

DESYs

KworkQuark

Teilchenphysik für alle!

Für alle, die wissen wollen, was es mit Elektronen, Quarks und Teilchenbeschleunigern auf sich hat.

Version 2.0.1, April 2008

Wissensdurst: großer Wissensdurst

“KworkQuark – Teilchenphysik für alle!” ist ein Angebot des Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Notkestraße 85
22607 Hamburg

Konzept, Inhalte und Programmierung: Dirk Rathje, Hamburg
Medien: Marc Hermann, Berlin

“KworkQuark – Teilchenphysik für alle!” ist ein Angebot des Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Notkestraße 85
22607 Hamburg

Konzept, Inhalte und Programmierung: Dirk Rathje, Hamburg
Medien: Marc Hermann, Berlin

Inhaltsverzeichnis

1	Teilchen und Kräfte	25
1.1	Man nehme...	25
1.1.1	Universum selbstgemacht *	25
1.1.2	Das Rezept **	26
1.1.3	Drei Säulen des Universums *	27
1.1.4	Teilet! **	29
1.1.5	Von der Kuh zum Quark **	30
1.1.6	KworkQuarkQuiz **	32
1.2	Elektron, Neutrino, Quarks und Konsorten	33
1.2.1	4 Freunde sollt Ihr sein *	33
1.2.2	Elektronen **	33
1.2.3	Neutrinos **	34
1.2.4	Quarks **	34
1.2.5	Antimaterie *	35
1.2.6	Drei Familien *	36
1.2.7	Nur drei Familien ***	36
1.2.8	KworkQuarkQuiz **	37
1.3	Was die Welt zusammenhält – Kräfte	38
1.3.1	Der Zaubertoaster *	38
1.3.2	Vier Kräfte *	39
1.3.3	Briefe schreiben bewegt *	39
1.3.4	Wechselwirkungsteilchen *	40
1.3.5	Vorsicht: Anschaulichkeit! ***	41
1.3.6	Ganz schön geladen ***	42
1.3.7	Photonen und der Elektromagnetismus **	42

1.3.8	Gluonen und die starke Kraft **	43
1.3.9	Farbladungen **	43
1.3.10	Ws, Zs und die schwache Wechselwirkung **	44
1.3.11	Elektroschwache Vereinigung ***	44
1.3.12	KworkQuarkQuiz **	45
1.4	Massive Korrektur – Der Higgs-Mechanismus	45
1.4.1	Eine Welt ohne Masse *	45
1.4.2	Der Higgs-Mechanismus *	46
1.4.3	Eine schwere Party **	46
1.4.4	Das Higgs-Teilchen: ein Gerücht **	47
1.4.5	KworkQuarkQuiz **	48
2	Teilchen beschleunigen	49
2.1	Wozu beschleunigen?	49
2.1.1	Physik in Hamburgs Unterwelt *	49
2.1.2	Energie erhöhen *	50
2.1.3	Vom Problem Kleingedrucktes zu lesen **	51
2.1.4	Energieschwindel? **	53
2.1.5	KworkQuarkQuiz **	54
2.2	Wie beschleunigen?	54
2.2.1	Die Grundidee: Spannung *	55
2.2.2	Das Elektronenvolt **	55
2.2.3	Erst noch langsam ... **	57
2.2.4	... dann lichtschnell **	58
2.2.5	Korrektur der Grundidee: Magnetfelder *	58
2.2.6	Die Fernsehöhre als Elektronenbeschleuniger ***	60
2.2.7	Doppelt beschleunigen knallt besser ***	61
2.2.8	KworkQuarkQuiz **	63
2.3	Kreis- und Linearbeschleuniger	63
2.3.1	Krumm gelaufen... *	63
2.3.2	...oder geradeaus? *	64
2.3.3	Der erste Kreisbeschleuniger: Das Zyklotron ***	64
2.3.4	Synchrotron und Speicherring *	66
2.3.5	Die Synchrotronstrahlungs-Not ... **	66
2.3.6	... zur Tugend gemacht. **	67

3	Teilchen streuen	69
3.1	Um die Ecke geschaut	69
3.1.1	Crash-Tests im Kleinen **	69
3.1.2	Streu-Experiment I: Um die Ecke geschaut *	70
3.1.3	Streu-Experiment II: Reingeschaut *	71
3.1.4	Streu-Experiment III: Neues gemacht *	72
3.2	Vom Atomkern zu den Quarks	73
3.2.1	Der Kern der Dinge *	73
3.2.2	Modell-Wettbewerb **	74
3.2.3	Rutherford, die zweite **	75
3.2.4	Das Proton von innen **	76
3.2.5	HERA *	77
3.2.6	KworkQuarkQuiz **	77
3.3	Moderne Streuexperimente	78
3.3.1	Teilchennachweis *	78
3.3.2	Großdetektoren *	78
3.3.3	Teilchennachweis im Groß-Detektor **	80
3.3.4	Wirkungsquerschnitt und Luminosität ***	81
3.3.5	KworkQuarkQuiz **	82
4	Quantenphysik	85
4.1	Das Ende vom Ende	85
4.1.1	Das Ende der Physik? **	85
4.1.2	Angequante Physik **	86
4.1.3	Vorsicht Quantensprung! **	87
4.1.4	Energie in Paketen **	87
4.1.5	Fast alles spint ***	89
4.2	Auf mehreren Hochzeiten tanzen	90
4.2.1	Verlieren Sie den Alltagsverstand! ***	90
4.2.2	Quanten beobachten **	91
4.2.3	Quanten unbeobachten **	93
4.2.4	Doppelspalt schaltet den Schall ab ***	94
4.2.5	Welle oder Teilchen? **	95
4.2.6	Torwandschießen mit Quanten-Fußbällen **	96
4.3	Wer wissen will, muss nachsehen	97
4.3.1	Vorhersagen ***	97
4.3.2	Vom Unwissen wissen **	97
4.3.3	Chaotisches Unwissen ***	98
4.3.4	Glücksspieler Gott **	99
4.3.5	Zustände in der Quantenwelt **	100

	4.3.6	Quanten vermessen **	102
	4.3.7	Quanten-Unbestimmtheit **	103
4.4		Was hat das nur zu bedeuten?	104
	4.4.1	Dahinter geschaut ***	104
	4.4.2	Verstehen wir „wirklich?“ ***	105
	4.4.3	Frage 1: Würfelt Gott? ***	105
	4.4.4	Frage 2: Wann stirbt Schrödingers Katze? ***	106
	4.4.5	Kopenhagener Deutung ***	107
	4.4.6	Der bewusste Beobachter ***	107
	4.4.7	Dekohärenz-Deutung ***	108
	4.4.8	Viele-Welten-Deutung ***	108
	4.4.9	Quanten-Kraftfeld ***	109
5		Symmetrien	111
	5.1	Was ist eine Symmetrie?	111
		5.1.1 Wenn nichts passiert **	111
		5.1.2 Symmetrien der Gesetze **	112
		5.1.3 Elefanten aus Mücken **	114
		5.1.4 Gebrochene Symmetrien ***	116
		5.1.5 Symmetrie erhält ***	117
		5.1.6 KworkQuarkQuiz **	118
	5.2	Über Symmetrien zu den Quarks	119
		5.2.1 Chemiker machen es vor ... ***	119
		5.2.2 ... und Physiker nach. ***	120
		5.2.3 Quarks, die Symmetriestifter ***	121
		5.2.4 Alles Quark? ***	122
		5.2.5 KworkQuarkQuiz ***	123
	5.3	Spieglein, Spieglein, ...	123
		5.3.1 C, P und T ***	123
		5.3.2 Neutrinos sind Vampire ***	124
		5.3.3 Wieso bestehen wir aus Materie? ***	126
		5.3.4 Ein starkes Team: CPT ***	127
		5.3.5 KworkQuarkQuiz ***	127
	5.4	Symmetrie hinter den Kräften	127
		5.4.1 Teilchen frei Haus ***	128
		5.4.2 Windige Gedanken ***	128
		5.4.3 Global Pfeile eichen: Ladungserhaltung ***	130
		5.4.4 Im Lichte der Beliebigkeit: Photonen ***	131
		5.4.5 Farben eichen: QCD ***	133
		5.4.6 Geschmäcker eichen: QFD ***	133

5.5	Supersymmetrie	134
5.5.1	Ein kleiner Unterschied ***	134
5.5.2	Die Teilchenverdopplerin **	136
5.5.3	Wieso Supersymmetrie? ***	136
6	Lexikon	139
6.1	ALICE **	139
6.2	Allgemeine Relativitätstheorie **	139
6.3	Anderson, Carl (1905–1991) **	139
6.4	Antimaterie *	140
6.5	Antineutron **	140
6.6	Antiproton **	141
6.7	Antiteilchen *	142
6.8	Aristoteles (384 v. Chr. bis 322 v. Chr.) **	142
6.9	Asymptotische Freiheit **	143
6.10	ATLAS **	143
6.11	Atom *	144
6.12	Atomkern *	144
6.13	Barn ***	145
6.14	Baryonen ***	145
6.15	Beschleunigermagnete **	146
6.16	Betatron ***	146
6.17	Betazerfall ***	147
6.18	Bhabha-Streuung ***	147
6.19	Blasenkammer ***	148
6.20	B-Mesonen ***	149
6.21	BNL ***	150
6.22	Bohr, Niels (1885–1962) **	151
6.23	Bose, Satayendra Nath (1894–1974) ***	151
6.24	Bose-Einstein-Kondensat ***	152
6.25	Boson **	152
6.26	Bottom-Quark *	152
6.27	Bremsstrahlung **	153
6.28	Bunch **	154
6.29	Casimir-Effekt ***	154
6.30	CERN *	154
6.31	Chadwick, James (1881–1974) ***	155
6.32	Charm-Quark **	155
6.33	CMS **	156
6.34	Compton, Arthur Holly (1892–1962) ***	157

6.35	Compton-Effekt ***	157
6.36	Compton-Streuung ***	158
6.37	CPT-Theorem ***	158
6.38	CP-Verletzung ***	159
6.39	C-Spiegelung ***	159
6.40	Dalton, John (1766–1844) ***	159
6.41	Dämpfungsring ***	160
6.42	de Broglie, Louis Victor (1892–1987) ***	160
6.43	Deltas ***	160
6.44	Demokrit (460 v.Chr. bis 375 v.Chr.) **	162
6.45	DESY *	162
6.46	DESY II ***	163
6.47	DESY III ***	164
6.48	Dipolmagnet **	164
6.49	Dirac, Paul (1902–1984) **	164
6.50	DORIS (III) ***	165
6.51	Down-Quark *	165
6.52	Drahtkammer **	167
6.53	Driftkammer ***	167
6.54	Driftröhre ***	168
6.55	Dunkle Materie **	168
6.56	Eichsymmetrie ***	169
6.57	Eichtheorie ***	169
6.58	Einstein, Albert (1879-1955) **	170
6.59	Elektrische Ladung *	170
6.60	Elektromagnetische Kraft *	171
6.61	Elektromagnetisches Kalorimeter **	171
6.62	Elektromagnetisches Spektrum **	171
6.63	Elektromagnetische Welle **	172
6.64	Elektromagnetismus **	172
6.65	Elektron *	172
6.66	Elektronenvolt *	174
6.67	Elektron-Neutrino *	174
6.68	Elektroschwache Kraft	176
6.69	Elektroschwache Theorie ***	176
6.70	Element **	176
6.71	Emittanz ***	177
6.72	Emulsionsdetektor ***	177
6.73	Energie **	177
6.74	Ereignis **	178

6.75	Ereignisrate **	178
6.76	Erhaltungssatz **	179
6.77	Eta-Teilchen ***	179
6.78	Experiment **	179
6.79	Farbladung **	180
6.80	Feld ***	180
6.81	Fermi, Enrico (1901–1954) **	181
6.82	Fermilab **	181
6.83	Fermion ***	181
6.84	Feynman, Richard P. (1918–1988) **	182
6.85	Feynman-Diagramme ***	182
6.86	FLASH **	182
6.87	Flavor ***	183
6.88	Fokussierung **	183
6.89	Fragmentierung ***	183
6.90	Franck, James (1882–1964) ***	183
6.91	Franck-Hertz-Versuch ***	184
6.92	Frequenz **	184
6.93	Funkenkammer **	184
6.94	Gell-Mann, Murray (*1929) **	185
6.95	Geschwindigkeit **	185
6.96	Glashow, Sheldon (*1932) ***	185
6.97	Gluon *	186
6.98	Gravitation **	188
6.99	Gravitationskraft *	188
6.100	Graviton **	189
6.101	Grid **	190
6.102	Großdetektor **	190
6.103	Gruppentheorie ***	191
6.104	GUT **	192
6.105	H1 **	192
6.106	Hadron ***	193
6.107	Hadronisches Kalorimeter ***	193
6.108	Halbleiter-Detektor **	193
6.109	HASYLAB **	193
6.110	Hauptquark **	194
6.111	Heisenberg, Werner (1901–1976) **	194
6.112	HERA *	194
6.113	HERMES **	195
6.114	Hertz **	196

6.115	Hertz, Gustav (1887–1975) ***	196
6.116	Hertz, Heinrich R. (1857–1894) ***	196
6.117	Higgs, Peter (*1929) **	196
6.118	Higgs-Mechanismus **	197
6.119	Higgs-Teilchen *	198
6.120	Hohlraumstrahlung ***	198
6.121	Hyperladung ***	199
6.122	ILC	199
6.123	Impuls **	199
6.124	Ion **	199
6.125	Ionengerätrepumpe ***	199
6.126	Isospin ***	200
6.127	J/Psi ***	200
6.128	Jet **	201
6.129	Kalorimeter *	201
6.130	Kaonen **	201
6.131	KEK **	203
6.132	Kernfusion **	204
6.133	Kernkraft **	204
6.134	Kernspaltung **	204
6.135	Kicker-Magnet **	204
6.136	Klassische Physik **	204
6.137	Klystron ***	205
6.138	Komplexe Zahlen ***	205
6.139	Kosmische Strahlung **	206
6.140	Kosmologie **	206
6.141	Kreisbeschleuniger *	206
6.142	Ladung **	207
6.143	Lambda ***	207
6.144	Längenkontraktion ***	208
6.145	Lawrence, Ernest O. (1901–1958) ***	208
6.146	Lebensdauer *	209
6.147	LEP **	209
6.148	Lepton ***	209
6.149	LHC *	210
6.150	LHCb **	211
6.151	LHCf **	211
6.152	Licht *	212
6.153	Lichtgeschwindigkeit *	212
6.154	LINAC II ***	212

6.155	LINAC III ***	213
6.156	Linearbeschleuniger *	213
6.157	Lorentz, Hendrik Antoon (1953–1928) ***	213
6.158	Lorentzkraft ***	214
6.159	Lorentztransformation ***	214
6.160	Luminosität ***	214
6.161	Magnetischer Monopol ***	214
6.162	Masse *	215
6.163	Masse-Energie-Äquivalenz **	216
6.164	Materieteilchen *	217
6.165	Maxwell, James Clerk (1831–1879) **	217
6.166	Maxwell-Gleichungen **	218
6.167	Mendelejew, Dimitri I. (1934-1907) **	218
6.168	Mesonen ***	218
6.169	Meyer, Julius (1830–1895) ***	218
6.170	Mikrotron ***	219
6.171	Mikrowellen ***	219
6.172	Moeller-Streuung ***	219
6.173	Molekül *	219
6.174	Monte-Carlo-Simulation ***	220
6.175	Myon *	220
6.176	Myonbeschleuniger ***	221
6.177	Myonkammer **	221
6.178	Myon-Neutrino *	221
6.179	Naturkonstanten **	222
6.180	Nebelkammer **	223
6.181	Neutraler Strom ***	224
6.182	Neutrinos *	224
6.183	Neutrino-Teleskope ***	224
6.184	Neutron *	226
6.185	Newton, Isaac (1643–1727) **	227
6.186	Nobelpreis *	227
6.187	Noether, Amalie E. (1882-1935) ***	227
6.188	Noether-Theorem ***	228
6.189	Nukleon ***	228
6.190	Nukleosynthese ***	228
6.191	Omega ***	228
6.192	Paarerzeugung und -vernichtung ***	229
6.193	Paper **	229
6.194	Parton ***	229

6.195	Pauli, Wolfgang (1900–1958) **	229
6.196	Pauli-Verbot ***	230
6.197	Periodensystem **	230
6.198	PETRA ***	230
6.199	Photoeffekt **	231
6.200	Photon *	233
6.201	Photovervielfacher **	234
6.202	PIA ***	235
6.203	Pion ***	235
6.204	Planck, Max (1858–1947) **	237
6.205	Planckkonstante **	238
6.206	Positron *	238
6.207	Proportionalkammer ***	239
6.208	Proton *	240
6.209	P-Spiegelung ***	241
6.210	P-Verletzung ***	241
6.211	Quadrupolmagnet **	242
6.212	Quant ***	242
6.213	Quantenchromodynamik (QCD) **	242
6.214	Quantencomputer ***	243
6.215	Quantenelektrodynamik (QED) **	245
6.216	Quantenfeldtheorie ***	245
6.217	Quantenfernbeziehung ***	245
6.218	Quantenflavordynamik (QFD) **	248
6.219	Quantengravitationstheorie ***	248
6.220	Quantenmessung ***	248
6.221	Quantensprung **	250
6.222	Quantenteleportation ***	250
6.223	Quantentheorie ***	250
6.224	Quantenzahl ***	252
6.225	Quantenverschlüsselung ***	252
6.226	Quantenzustand ***	253
6.227	Quarkgefangenschaft **	255
6.228	Quark-Gluon-Plasma **	255
6.229	Quarkmodell **	256
6.230	Quarks *	256
6.231	Radioaktivität **	257
6.232	Raum **	257
6.233	Raumzeit **	257
6.234	Relativistischer Massezuwachs **	258

6.235	Relativitätstheorie **	258
6.236	Renormierung ***	258
6.237	Resonanz ***	259
6.238	Resonator ***	260
6.239	RHIC **	260
6.240	Röntgen, Wilhelm C. (1845–1923) **	260
6.241	Röntgenstrahlung **	261
6.242	Ruhemasse ***	261
6.243	Rutherford, Ernest (1871–1937) **	261
6.244	Rutherfordscher Streuversuch **	262
6.245	Salam, Abdus (1926–1996) ***	262
6.246	Schrödinger, Erwin (1887–1961) **	263
6.247	Schrödingergleichung ***	263
6.248	Schrödingers Katze **	264
6.249	Schwache Kraft *	264
6.250	Schwache Ladung ***	265
6.251	Scrollpumpe ***	265
6.252	Seequark **	266
6.253	Seltsamkeit ***	266
6.254	Sextupolmagnet ***	266
6.255	Sigma ***	266
6.256	SLAC **	268
6.257	SLC **	268
6.258	Speicherring **	269
6.259	Spezielle Relativitätstheorie *	269
6.260	Spin **	269
6.261	Spurkammer **	270
6.262	Standardmodell *	270
6.263	Starke Kraft *	271
6.264	Strange-Quark *	272
6.265	Streuexperiment **	273
6.266	Strukturfunktion ***	273
6.267	SU(3) ***	274
6.268	Superstringtheorie **	274
6.269	Supersymmetrie **	274
6.270	Supraleitung **	275
6.271	Symmetrie ***	276
6.272	Symmetriebrechung ***	276
6.273	Symmetrieverletzung ***	277
6.274	Synchrotron **	277

6.275	Synchrotronstrahlung **	277
6.276	Szintillator ***	278
6.277	Tachyon ***	278
6.278	Tau-Neutrino *	279
6.279	Tauon *	280
6.280	Teilchen *	281
6.281	Teilchenbeschleuniger *	282
6.282	Teilchenbeschleuniger weltweit **	282
6.283	Teilchendetektor *	282
6.284	Teilchenfamilien *	283
6.285	Teilchenpaket	283
6.286	Teilchenphysikzentren **	284
6.287	Teilchenquellen **	284
6.288	Tesla **	285
6.289	Tevatron **	285
6.290	Theorie **	286
6.291	Thomson, John J. (1856–1940) ***	286
6.292	Tief-inelastische Streuung **	286
6.293	Titan-Sublimationspumpe ***	287
6.294	Top-Quark *	287
6.295	TOTEM **	288
6.296	Tscherenkow, Pawel A. (1904–1990) ***	289
6.297	Tscherenkow-Detektor ***	289
6.298	Tscherenkow-Strahlung ***	289
6.299	T-Spiegelung ***	290
6.300	Turbomolekularpumpe ***	290
6.301	Undulator **	291
6.302	Universum **	291
6.303	Unschärfebeziehung ***	293
6.304	Up-Quark *	294
6.305	Upsilon ***	295
6.306	Urknall **	296
6.307	Vakuum **	296
6.308	Vakuumpolarisation ***	296
6.309	Vakuumpumpe ***	297
6.310	Vereinheitlichung **	297
6.311	Vertexdetektor **	298
6.312	Virtuelle Teilchen **	298
6.313	W *	299
6.314	Wechselwirkung *	300

6.315	Wechselwirkungsteilchen *	300
6.316	Weinberg, Steven (*1933) ***	300
6.317	Wellenfunktion ***	301
6.318	Wellenlänge **	301
6.319	Welle-Teilchen-Dualismus **	301
6.320	Weltformel **	302
6.321	Wideröe, Rolf (1902–1996) ***	303
6.322	Wideröe-Struktur ***	303
6.323	Wiggler **	303
6.324	WIMP **	304
6.325	Wirkungsquerschnitt ***	304
6.326	Xi ***	304
6.327	Z *	305
6.328	Zehnerpotenz **	306
6.329	Zeit **	306
6.330	Zeitdilatation **	307
6.331	ZEUS **	308
6.332	Zweig, George (*1937) ***	308
6.333	Zyklotron **	308
A Zeitleiste		311
-600:	Der Urstoff: Wasser **	311
-450:	Vier Elemente: Feuer, Wasser, Erde, Luft **	311
-400:	Geburt der Atomidee *	311
263:	Berechnung von Pi ***	312
1300:	Erste mechanische Uhr **	312
1514:	Kopernikanische Wende **	312
1590:	Erstes Mikroskop **	312
1687:	Newtons Prinzipien ***	313
1803:	Atombeweis **	313
1831-1879:	James C. Maxwell ***	313
1846-1923:	Wilhelm C. Röntgen ***	313
1858-1947:	Max Planck **	314
1864:	Die Theorie des Lichts **	314
1869:	Periodensystem **	314
1879-1955:	Albert Einstein **	315
1885-1962:	Niels Bohr ***	315
1887-1961:	Erwin Schrödinger ***	315
1895:	Entdeckung der Röntgenstrahlung **	315
1896:	Entdeckung der Radioaktivität **	315

1897: Entdeckung des Elektrons *	316
1900-1958: Wolfgang Pauli ***	316
1900: Der Quantengedanke **	316
1901-1976: Werner Heisenberg ***	316
1902-1984: Paul A. M. Dirac ***	317
1905: Photoeffekt mit Quanten **	317
1905: Spezielle Relativitätstheorie **	317
1907: Allgemeine Relativitätstheorie ***	317
1909: Entdeckung des Atomkerns *	318
1909: Entdeckung der Ladungsquantelung **	318
1911: Kosmische Strahlung ***	318
1911: Nebelkammer **	318
1913: Bohrs Atommodell **	319
1918-1988: Richard Feynman **	319
1918: Noethers Theorem ***	319
1919: Entdeckung des Protons *	319
1922: Teilchennatur von Röntgenlicht **	320
1924: de Broglies Teilchenwellen ***	320
1925: Heisenbergs Matrizen-Mechanik ***	320
1925: Paulis Verbot ***	320
1925: Spin ***	320
1926: Kopenhagener Interpretation ***	321
1926: Schrödingers Gleichung ***	321
1926: Die Taufe des Photons **	321
1927: Unschärfebeziehung ***	321
1928: Vorhersage der Antimaterie **	321
1929: Murray Gell-Mann **	322
1929: Das Universum dehnt sich aus ***	322
1929: Zyklotron **	322
1930: Vorhersage des Elektron-Neutrinos *	322
1931: Magnetische Monopole ***	322
1932: Nachweis des Neutrons **	323
1932: Nachweis des Positrons *	323
1935: Erste Theorie der Kernkraft ***	323
1940: Tscherenkow-Detektoren **	323
1947: Entdeckung der geladenen Pionen ***	324
1947: Entdeckung des Myons **	324
1947: Seltsame Teilchen ***	324
1948: Fertigstellung der Quantenelektrodynamik **	324
1949: Entdeckung des neutralen Pions ***	324

1951: Blasenkammer **	325
1953: Vermessung des Atomkerns ***	325
1954: Eichtheorien ***	325
1955: Entdeckung des Antiprotons **	325
1956: Nachweis des Elektron-Neutrinos *	325
1957: Ist das Universum spiegelsymmetrisch? **	325
1957: Das Universum ist nicht spiegelsymmetrisch **	326
1959: Gründung von DESY **	326
1961: Vorläufer des Quark-Modells ***	326
1962: Entdeckung des Myon-Neutrinos **	326
1964: Entdeckung der CP-Verletzung ***	326
1964: Teilchenphysik wird schwer: Higgs **	327
1964: Entdeckung des Omega-Minus ***	327
1964: Vorhersage der Quarks *	327
1967: Elektroschwache Vereinigung **	327
1968: Proportionalkammer ***	327
1968: Die Beginne der Stringtheorie ***	328
1969: Nachweis der Quarks *	328
1971: Eichtheorien sind renormierbar ***	328
1971: Supersymmetrie **	328
1972: Quantenchromodynamik **	329
1973: Neutrale Ströme ***	329
1974: Entdeckung des Charm-Quarks **	329
1975: Entdeckung des Tauons **	329
1977: Entdeckung des Bottom-Quarks **	329
1978: PETRA ***	330
1979: Entdeckung der Gluonen **	330
1981: Stringtheorie **	330
1983: Entdeckung der Ws und Zs **	330
1987: Tevatron **	330
1987: B-Mischung ***	330
1989: Nur drei Familien **	331
1989-2000: LEP **	331
1989-2006: SLC **	331
1992-2007: HERA **	331
1995: M-Theorie ***	332
1995: Entdeckung des Top-Quarks **	332
2000: RHIC ***	332
2000: Entdeckung des Tau-Neutrinos **	332
2001: Neutrinos haben eine Masse ***	332

2004: Nobelpreis für asymptotische Freiheit ***	332
2008: Start des LHC *	332

B Fragen und Antworten	335
B.1 Aus wie vielen Quarks bestehen Protonen? **	335
B.2 Gibt es magnetische Monopole? ***	335
B.3 Gibt es noch mehr Teilchensorten? *	336
B.4 In wie viel Kilogramm Eisen stecken ein Kilo Elektronen? *	337
B.5 Ist das Vakuum wirklich leer? **	337
B.6 Kann etwas schneller sein als Licht? *	338
B.7 Warum kann das Standardmodell nicht stimmen? *	338
B.8 Was bedeutet „Elektron“? *	340
B.9 Was ist die Supersymmetrie? *	340
B.10 Was ist die Weltformel? **	341
B.11 Was ist dunkle Materie? **	341
B.12 Was sind Strings? **	342
B.13 Was suchen Physiker am Südpol? **	342
B.14 Was verbrigt sich hinter der QED? ***	343
B.15 Welche Arten von Beschleunigern gibt es? *	344
B.16 Welche Theorien stecken im Standardmodell der Teilchenphysik? **	345
B.17 Werden die Teilchen in neuen Beschleunigern schneller? *	346
B.18 Wer erfand die Atome? *	346
B.19 Wer gab dem Photon seinen Namen? *	347
B.20 Wer ist „Higgs“? *	347
B.21 Wie alt ist die Quantentheorie? **	348
B.22 Wie flott sind Sie bei einer Bewegungsenergie von 250 Milliarden Elektronenvolt? *	349
B.23 Wie heißt der weltweit größte Beschleuniger? *	349
B.24 Wie lange braucht Licht von der Erde zur Sonne? *	350
B.25 Wie schwer sind Neutrinos? *	350
B.26 Wie spricht man „Quark“ richtig aus? *	350
B.27 Wie viele Teilchensorten gibt es? *	351
B.28 Wie viel wiegen Quarks? *	352
B.29 Wie viel wiegt ein Elektron? *	353
B.30 Wie weit ist ein Quantensprung? **	353
B.31 Wie weit schaffte es ein Elektron im Beschleuniger HERA? *	354

B.32 Wofür bekam Albert Einstein den Nobelpreis? * 355
B.33 Woher stammt der Name „Quark“? * 355
B.34 Wo wurde das Gluon entdeckt? * 355

Kapitel 1

Teilchen und Kräfte

Zutaten für ein Universum

Sie wollen wissen, woraus das Universum besteht? Was es mit Quarks und Elektronen auf sich hat? Dann ist diese Einführung genau das Richtige.

Man nehme...

1.1

Die Zutaten für ein Universum sind im Rezept mit Namen „Standard-Modell der Teilchenphysik“ zusammengefasst.

Universum selbstgemacht *

1.1.1

Haben Sie Lust auf ein selbst gemachtes Weltall? Dann probieren Sie doch das folgende Rezept: „Universum à la Standardmodell der Teilchenphysik“.

Das Rezept zum Ausdrucken.

Was Sie benötigen? Zunächst ein paar Grundbausteine der Materie:

1. Elektronen gibt es in jedem Atom – und zwar in Hülle und Fülle.
2. Up-Quarks und Down-Quarks finden Sie im Atomkern nebenan.

3. Und die frischesten Neutrinos erhalten Sie in der Nähe der Sonne, wo sie bei der Kernfusion entstehen.

Dies sind die vier Teilchen, aus denen die Materie besteht. Falls Sie es würziger mögen, geben Sie doch einfach Teilchen aus einer der beiden anderen Familien des Standardmodell dazu: das Myon, das Myon-Neutrino, das Charm- und Strange-Quark. Oder das Tauon, Tau-Neutrino, Top- und Bottom-Quark.

Damit aus diesen Zutaten ein zusammenhängendes Universum wird, brauchen Sie noch drei Wechselwirkungen und die damit verbundenen Wechselwirkungsteilchen:

1. Verrühren Sie Quarks mit Gluonen und Sie erhalten unter anderem die Bestandteile der Atomkerne. Gluonen gibt es in acht Sorten und sind die Teilchen der starken Kraft,
2. Die Atomkerne verbinden Sie mit Elektronen. Dabei helfen Ihnen Photonen, die zwischen allen elektrisch geladenen Teilchen wirken.
3. Schließlich heben Sie unter das Ganze noch ein paar Ws und Zs, die Teilchen der schwachen Kraft. Doch Vorsicht: Ihr Universum ist nun radioaktiv.

Falls Sie keinen Wert auf allzu leichte Küche legen, geben Sie Ihrem Universum noch ein wenig Masse: Der Higgs-Mechanismus des Standardmodells macht die Teilchen schwer.

Aus diesem Teig besteht das Universum. Sie müssen ihm jetzt nur noch die rechte Form verpassen. Wenn Sie nicht warten wollen, wie die Sache am Ende aussieht: Jemand hat schon mal was vorbereitet – vor rund 14 Milliarden Jahren. Schauen Sie sich einfach um!

1.1.2 Das Rezept **

Es ist jung, erfolgreich und hatte bisher immer Recht: Das Standardmodell der Teilchenphysik ist der Stand der Dinge, wenn es um die Welt des Allerkleinsten geht.

Vor rund 30 Jahren hatten Teilchenphysiker ihre erfolgreichsten Ideen und Theorien zu diesem Modell zusammengeharkt. Sie hatten gute Arbeit geleistet. Denn so sehr sich die Forscher auch bemühten: Bisher konnten sie dem Modell keine falschen Vorhersagen nachweisen.

Vielmehr fanden Sie eine Vorhersage nach der anderen bestätigt. Die experimentellen Belege, die für das Modell sprechen, füllen inzwischen Bibliotheken. Sie entstanden mit Hilfe von Experimenten, die tief unter der Erde in wohnblockgroßen Höhlen hausen. Dort prallen Teilchen zusammen, die zuvor in Kilometer langen Tunneln auf Energien

beschleunigt wurden, wie sie kurz nach dem Beginn des Universums herrschten.

Da kommt schnell der Eindruck auf, dass alles wahnsinnig kompliziert sein müsse. Und in der Tat: Wenn Sie auch die letzten Details verstehen wollen, dann haben Sie einiges vor. Die Grundideen sind aber ganz einfach. Und um die geht es in dieser Einleitung.

Drei Säulen des Universums *

1.1.3

Um die Welt des Allerkleinsten zu erklären, gehen Physiker im Standardmodell der Teilchenphysik von drei Grundideen aus: Teilchen, Kräfte und Massenerzeugung.

Da gibt es zunächst **Teilchen**, die Bausteine dieser Welt. Zu diesen Teilchen zählt beispielsweise das Elektron, das ohne Überdross im Atom seine Runden zieht.

Zwischen den Teilchen wirken **Kräfte**. Auch dafür gibt es wiederum Teilchen, die Wechselwirkungsteilchen. Mit ihrer Hilfe erfährt beispielsweise ein Elektron, dass es da in fünf Metern Entfernung noch ein anderes Elektron gibt, von dem es abgestoßen wird.

Und dann soll da noch ein Prinzip am Werk sein, welches die Teilchen mit **Masse** versorgt: der Higgs-Mechanismus. Doch hier bleibt es spannend. Denn dieser letzte Puzzlestein des Standardmodells wurde noch nicht gefunden. Händeringend wird in den Teilchenphysiklaboren dieser Welt nach ihm gesucht.

Das Standardmodell kompakt

Wer es kompakt liebt: Das Standardmodell der Teilchenphysik lässt sich als eine Formel schreiben:

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\mathbf{B}_{\mu\nu}\mathbf{B}^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu} \\
& + \bar{L}\gamma^\mu(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g\tau\mathbf{W}_\mu - \frac{1}{2}g'YB_\mu)L \\
& + \bar{R}\gamma^\mu(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g'YB_\mu)R \\
& + |(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g\tau\mathbf{W}_\mu - \frac{1}{2}g'YB_\mu)\phi|^2 - V(\phi) \\
& - (g_1\bar{L}\phi R + g_2\bar{L}\tilde{\phi}R + \text{herm. conj.}) \\
& + \frac{1}{2}g_s(\bar{\Psi}_q^j\gamma^\mu\lambda_{jk}^a\Psi_q^k)G_\mu^a
\end{aligned}$$

Zugegeben, recht unübersichtlich. Aber selbst wenn Sie nicht wissen, was man mit einer solchen so genannten Lagrangedichte macht, so hilft Ihnen diese Formel dennoch bei einem: zu verstehen, dass es beim Standardmodell um mehr geht als die reine Aufzählung von ein paar Teilchen.

Und wer die Formel versteht, weiß auch noch lange nicht alles. Denn es müssen noch neunzehn Parameter bestimmt werden. Die aktuellen Werte lauten wie folgt:

$\Delta\alpha_{had}^{(5)}(m_Z)$	0,02761	\pm	0,00036
$m_Z[GeV]$	91,1875	\pm	0,00021
$\Gamma_Z[GeV]$	2,4952	\pm	0,00023
$\sigma_{had}^0[nb]$	41,540	\pm	0,037
R_l	20,767	\pm	0,025
$A_{fb}^{0,l}$	0,01714	\pm	0,00095
$A_l(P_\tau)$	0,1465	\pm	0,0033
R_b	0,21646	\pm	0,00065
R_c	0,1719	\pm	0,0031
$A_{fb}^{0,b}$	0,0990	\pm	0,0017
$A_{fb}^{0,c}$	0,0685	\pm	0,0034
A_b	0,922	\pm	0,020
A_c	0,670	\pm	0,026
$A_l(SLD)$	0,1513	\pm	0,0021
$\sin^2 \theta_{eff}^{lept}(Q_{fb})$	0,2324	\pm	0,0012
$m_W[GeV]$	80,450	\pm	0,039
$m_t[GeV]$	174,3	\pm	5,1
$\sin^2 \theta_W(\nu N)$	0,2255	\pm	0,0021
$Q_W(Cs)$	-72,50	\pm	0,70

Teilet! **

1.1.4

Schon ein paar antike Griechen glaubten, dass man Dinge nicht beliebig oft teilen könne. Im Standardmodell der Teilchenphysik ist mit Elektronen und Quarks die Grenze erreicht.

Kann man Dinge beliebig oft teilen? Kleiden wir diese Frage in eine Geschichte um einen Mantel: Sankt Martin hatte den seinen halbiert, die eine Hälfte einem Bettler gegeben und die andere behalten.

Was wäre nun, wenn es noch einen zweiten Bettler gegeben hätte? Wenn Martin seine Hälfte erneut halbiert, das eine Viertel verschenkt und das andere behalten hätte: Wie lange hätte er dieses Spiel wohl treiben können? Unendlich oft? Oder stößt man letztlich an eine Grenze, vor der jede Klinge – selbst die des Heiligen Martins – halt machen muss?

Bereits die alten Griechen Demokrit und sein Lehrer Leukipp glaubten, dass es eine solche Grenze gibt. Und weil die beiden nun einmal

Griechisch sprachen, gaben sie dem Unteilbaren auch den griechischen Namen für unteilbar: atomos. Die Idee vom Atom war geboren. Martin war längst heilig gesprochen, als dann Wissenschaftler des 19. Jahrhunderts herausfanden, dass Elemente wie Silber und Gold aus chemisch nicht weiter zerlegbaren Objekten bestehen. An Demokrit erinnert riefen sie „Atome!“ – etwas vorlaut, wie sich bald herausstellte. Denn Physiker nahmen sich der chemischen Atome an und diese auch gleich auseinander. Im 20. Jahrhundert fanden sie mit Elektronen, Neutrinos und Quarks Bewohner einer Welt unterhalb der der Atome: Die dem Namen nach unteilbaren Atome sind aus weiteren Teilchen zusammengesetzt. Aber weil man sich an die chemischen Atome bereits gewöhnt hatte, wurde am Namen nicht mehr gerüttelt: Chemische Atome heißen nach wie vor „Atome“, so teilbar sie auch sind.

1.1.5 Von der Kuh zum Quark **

Auf dem Weg von der Kuh zum Quark passiert man so einiges. Immerhin sind Quarks auch mehr als tausend Milliarden Milliarden Mal kleiner als Kühe.

An dieser Stelle wollen wir Sie einladen zu einer Reise von der Kuh zum Quark! Dabei liegen so einige Atome auf dem Weg – Dinge, die unteilbar sind, zumindest für den einen oder anderen.

Das Kleine in Zahlen

Elektronen und Quarks sind winzig. Sie sind sogar so unvorstellbar klein, dass Physiker die Größe der Teilchen nur noch durch besonders geschriebene Zahlen zum Ausdruck bringen – um Platz zu sparen und den Überblick zu behalten: 10^{-17} bedeutet dabei, dass nach dem Komma erst an 17. Stelle eine Eins folgt. 10^{-17} Meter sind also 0,000 000 000 000 000 001 Meter. Das ist die maximale Größe eines Quarks, wie Ergebnisse an DESYs Teilchenbeschleuniger HERA zeigten. Höchstwahrscheinlich ist das Quark noch viel, viel kleiner. Aber selbst bei dieser Größe ist es mit Sicherheit knapp eine Milliarde Milliarde Mal kleiner als eine Kuh.

Die Kuh **

Wie manch andere Geschichte beginnt auch diese im Stall. Und zwar mit einer Kuh, einem Vielzeller der Gattung *Bos taurus*.

Für den Melker ist die Kuh unteilbar. Denn sie gibt nur als ganze Kuh Milch. Da ein altgriechisch sprechender Melker nun nicht „unteilbar“, sondern „atomos“ ruft, ist die Kuh das Atom der Milch-Wirtschaft. Für den Metzger gilt das nicht.

Die Zelle **

Kühe sind aus Zellen gemacht. Diese sind dabei bereits rund 100.000-mal kleiner als Kühe. Zellen sind aber auch Atome, die Atome der Biologie. Denn einzeln leben ihre Bausteine nicht, gemeinsam bekommen sie es aber irgendwie hin.

Das Molekül **

Im Kern der Zellen befindet sich das Erbgut, der Bauplan der Zelle – codiert in Molekülen mit dem Namen Desoxyribonukleinsäure (DNS). Diese Information kommt in vier Buchstaben daher, den Molekülen Adenin, Cytosin, Guanin, und Thymin.

Wird das Leben noch mit vier Buchstaben geschrieben, so kommt die moderne Kommunikation mit nur zweien aus, mit der Eins und der Null – zusammengefasst als das Bit, das Atom der Information.

Das Atom **

Jeder der vier DNA-Bausteine besteht aus zehn bis zwanzig („wahren“) Atomen, die sich chemisch nicht weiter zerlegen lassen.

Das Proton und das Neutron **

Das letztlich Unteilbare war mit dem chemischen Atom noch nicht gefunden: Im Inneren des Atoms gab sich ein schwerer Kern zu erkennen. Er ist zehntausend Mal kleiner und nimmt nahezu die ganze Masse auf sich. Und als wollte es kein Ende nehmen: Auch den Atomkern konnte man spalten- zunächst nur im Labor, später dann auch bei der ersten Atombombenexplosion.

Atomkerne sind aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt, den Atomen der Kernphysik.

Elektron, Neutrino und Quarks **

Heute geht die Forschung von vier Materieteilchen aus, aus denen normale Materie besteht. Die Elektronen umkreisen den Kern in chemischen Atomen, Neutrinos entstehen bei radioaktiven Prozessen und der Atomkern ist aus Quarks zusammengesetzt. Jedes dieser Teilchen ist kleiner als ein Millionstel Millionstel Millionstel Meter.

1.1.6 KworkQuarkQuiz **

Haben Sie alles verstanden? Das Wichtigste behalten? Testen Sie hier Ihr Wissen.

Phänomene

Was kann das Standard-Modell der Teilchenphysik alles erklären?

- Welche Kräfte zwischen Teilchen wirken.
- Die Entstehung eines Regenbogens.
- Wie es zur Masse im Universum kommt.
- Wie Quarks und Elektronen Kühe bilden.
- Aus welchen Zutaten das Universum besteht.

Warten

Welcher Teil des Standard-Modells wartet noch auf experimentelle Bestätigung?

- Massenerzeugung
- Kräfte
- Teilchen

Alter Hase oder junges Küken?

Wie alt ist das Standard-Modell?

- rund 300 Jahre
- rund 30 Jahre
- rund 3 Jahre

Kuhinnereien

Kühe bestehen aus

- Quarks.
- Quark.

Elektron, Neutrino, Quarks und Konsorten 1.2

Die Materie um uns herum besteht aus Elektronen, Neutrinos und Quarks. Zu diesen Zutaten gesellen sich Antiteilchen und schwerere exotische Objekte.

4 Freunde sollt Ihr sein * 1.2.1

Mit nur vier verschiedenen Teilchensorten kann man den Großteil der Materie um uns herum beschreiben.

- ▷ **Elektronen** umkreisen in Atomen den Kern und sind in elektrischen Leitungen der Saft.
- ▷ **Neutrinos** entstehen bei Kernzerfällen und bei den Reaktionen in der Sonne – in unvorstellbarer Anzahl. Sie machen den universellen Braten aber nicht wirklich fett, denn sie haben kaum eine Masse.
- ▷ **Up** – und **Down-Quarks** bilden des Atomes Kern.

Elektronen ** 1.2.2

Heute ist unser Leben ohne ihr Kriechen durch Computer-Chips oder ihr Flitzen durch die Fernsehröhre unvorstellbar. Dabei wurden Elektronen vor gar nicht allzu langer Zeit entdeckt: Erst 1895 zeigte der Brite Thomson, dass in Atomen negativ geladenen Teilchen hausen.

Thomson hatte damit die moderne Teilchenphysik begründet. Denn Elektronen sind nicht nur Bestandteile der Atome, sondern auch des Standardmodells. Demnach sind sie unteilbar und nicht aus noch kleineren Dingen zusammengesetzt.

Das Elektron ist ein Leichtgewicht: In einem Pfund Schwarzbrot finden sich gerade einmal ein Achtel Gramm Elektronen. Seine elektrische Ladung fällt da schon mehr ins Gewicht. Mit ihr kann zum Beispiel elektrische Energie zu Bohrmaschinen transportieren oder das Teilchen auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigen. Auf diese Weise wird das Fernsehbild auf die Mattscheibe gemalt.

Was den Fernsehzuschauer freut, nützt auch dem Physiker bei seiner Suche nach dem Allerkleinsten. So wurden etwa bei DESYs Beschleunigeranlage HERA Elektronen auf hohe Energien beschleunigt, um den verbliebenen Geheimnissen der Natur auf die Schliche zu kommen. Und auf neue zu stoßen.

1.2.3 Neutrinos **

Neutrinos sind elektrisch neutral, extrem leicht, kontaktscheu und fundamentale Teilchen im Standardmodell.

In den 1930er Jahren stand mit der Energieerhaltung ein Gesetz auf dem Prüfstand, an dem zu zweifeln nur die Tollkühnsten gewagt hätten. Auslöser war die Untersuchung eines Prozesses, der bei der Verschmelzung von Atomkernen im Inneren der Sonne eine wichtige Rolle spielt. Das Erschütternde: Bei den Abläufen schien Energie ins Nichts zu verschwinden. Das Energie-Credo wackelte.

Nicht für Wolfgang Pauli. 1930 entschloss er sich in einem Verzweiflungsakt zu glauben, dass alles wieder gut würde, wenn es ein weiteres Teilchen gäbe: ein Elektron ohne Ladung und mit nur geringer Masse. Kurze Zeit später wurden dieses Teilchen Neutrino genannt, italienisch für „kleines Ungeladenes“. Direkt nachgewiesen hatte es bis dato aber noch niemand.

Es sollte ganze 26 Jahre dauern, bis aus der Vermutung Gewissheit wurde. Erst 1956 wurden Neutrinos experimentell nachgewiesen. Die Entdeckung der Teilchen ließ so lange auf sich warten, weil Neutrinos mit dem Rest der Materie äußerst selten wechselwirken. Ihnen kann selbst ein Millionen Kilometer dicker Bleiklotz nicht viel anhaben: Sie fliegen mit großer Wahrscheinlichkeit einfach hindurch. Nachweisen kann man sie nur, wenn man viel Zeit mitbringt. Oder sehr, sehr, sehr viele von ihnen hat.

Letzteres ist gewiss der Fall: Pro Sekunde durchdringen rund 200 Milliarden Neutrinos Ihren Kopf. Herkunft der Teilchen: der Kosmos.

Wie so mancher Mitmensch machten auch Neutrinos lange Zeit ein großes Geheimnis um ihre Masse. Zunächst vermutete man, dass sie masselos seien. Neusten Erkenntnissen zufolge ist dies aber nicht der Fall.

1.2.4 Quarks **

In den 1960er Jahren spürten Forscher Quarks, als sie versuchten, Ordnung in den bis dahin zusammengetragenen Teilchenzoo zu bringen.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts entdeckten Physiker immer weitere Teilchen. Da zerfiel zunächst der Atomkern in seine beiden Bestandteile – Protonen und Neutronen. Weit über 100 Teilchen von ganz ähnlicher Natur gaben sich im Laufe der Zeit zu erkennen. Niemand war

besonders angetan von dieser Unmenge an Teilchen. Denn niemand verstand, wieso es so viele sind.

Die meisten dieser Teilchen zerfielen nach kaum vorstellbar kurzen Zeiten in die alten Bekannten Neutron, Proton und Elektron. Mehr Durchhaltevermögen zeigten einige Forscher, die nach Regelmäßigkeiten Ausschau hielten. Sie zeichneten die Teilchen nach bestimmten Eigenschaften geordnet auf ein Blatt Papier und entdeckten wabenförmige Strukturen. Aus diesen Mustern schlossen Murray Gell-Mann und George Zweig, dass auch Protonen und Neutronen aus etwas aufgebaut seien müssten. Diese Teilchen nannten sie Quarks, was „kworks“ ausgesprochen wird.

Drei Quarks bilden ein Proton oder Neutron. Ein Proton besteht aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark. Das Neutron aus einem Up-Quark und zwei Down-Quarks. Und damit das mit der Ladung klappt, hat ein Up-Quark eine Ladung von $+2/3$ und ein Down-Quark von $-1/3$ der Elektronenladung. Rechnen Sie nach!

Dass die Quarks erst so spät entdeckt wurden, hatte den folgenden Grund: Ein Quark kommt niemals allein. Quarks hocken immer aufeinander und es gibt sie nur in Zweier- oder Dreier-Gruppen wie den Protonen.

Antimaterie *

1.2.5

Nach dem Standardmodell besitzt jedes Teilchen ein Antiteilchen.

Es war eine Hochzeit mit Hindernissen. Als man Anfang des 20. Jahrhunderts versuchte, die Quantentheorie mit der Speziellen Relativitätstheorie zu verheiraten, hatte man mit unerwünschtem Nachwuchs zu kämpfen: Denn die Gleichungen ergaben Teilchen mit negativer Energie.

Da war schon einiges an Selbstbewusstsein nötig, um Verunsicherung erst gar nicht aufkommen zu lassen. Der Physiker Paul A. M. Dirac war derart von den Gleichungen überzeugt, dass er schlichtweg die Existenz dieser Negativ-Energie-Teilchen forderte. Also teilte Dirac 1928 der Menschheit mit, dass es ab sofort eine neue Form von Materie gäbe: Antimaterie. Eine tapfere Leistung, die noch so manchen Science-Fiction-Autoren eine goldene Nase hat verdienen lassen. Zunächst grübelten Dirac und Kollegen noch darüber, ob das Anti-Elektron vielleicht das Proton sei. Vier Jahre später gab es die Gewissheit: Man irrte. Mit dem Positron wurde das „positive Elektron“ gefunden.

Die negativen Energien trieben auch bald kein Runzeln mehr auf die Stirne. Man kommt nämlich auch ohne aus, wenn man bei der Hochzeit von Quantentheorie und Relativitätstheorie als Trauzeugen noch ein paar mathematische Verfeinerungen wählt.

Wenn Antimaterie auch immer noch exotisch klingt, in den Teilchenbeschleunigern der Physiker zählt sie zum Alltag. Nicht nur, dass Antimaterie entsteht, wenn Teilchen aneinander stoßen. Antimaterie selbst wird beschleunigt und zum Zusammenstoß gebracht. So wurden bei LEP über zehn Jahre lang Elektronen auf deren Antiteilchen, die Positronen, geschossen.

1.2.6 **Drei Familien** *

Mit Elektron, Neutrino, den beiden Quarks und den jeweiligen Antiteilchen ist es nicht getan. Zu jedem dieser Objekte gibt es zwei weitere Materieteilchen – mit nahezu identischen Eigenschaften aber weit höheren Massen.

Als hätte die Natur bei ihrer Schöpfung nicht genug bekommen, gibt es zu jedem der vier Materieteilchen zwei schwerere Verwandte. Das macht zwölf Materieteilchen, die in **drei Teilchenfamilien** angeordnet sind. Die beiden schweren Varianten des Elektrons sind das Myon und das Tauon. Zu den Elektron-Neutrinos gesellen sich entsprechend Myon-Neutrinos und Tauon-Neutrinos. Auch die beiden leichten Quarks, das Up- und das Down-Quark, gibt es in massiveren Varianten: Charm-Quark, Strange-Quark, Top-Quark und Bottom-Quark.

Die schweren Teilchen entstehen in kosmischen Katastrophengebieten wie etwa Urknällen und Sternexplosionen, beim unsanften Aufprall lichtschneller Protonen auf die Erdatmosphäre oder in Teilchenbeschleunigern. Haben Sie einmal die Bühne des Universums betreten, verlassen sie diese auch schon wieder nach kürzester Zeit. Keines der schweren Teilchen lebt länger als den Bruchteil einer Sekunde.

1.2.7 **Nur drei Familien** ***

Die wissenschaftlichen Ergebnisse sprechen dafür, dass es nur drei Familien gibt. Weswegen es genau drei sind, weiß jedoch niemand.

Im Prinzip gibt es jetzt nur noch zwei Möglichkeiten: Entweder gehören Sie zu den Menschen, die sich fragen, ob das denn niemals ein Ende nehmen wird? Ob jetzt immer weitere Familien zum Vorschein kommen

werden? Dann seien Sie beruhigt. Es gibt überzeugende Indizien dafür, dass es bei den drei Familien bleibt.

Der Beleg, dass es nur drei Familien gibt

Am Beschleuniger LEP am CERN wurde mit großer Genauigkeit die Entstehung von Zs vermessen. Dazu ließ man Elektronen und Positronen bei Energien aufeinanderprallen, die in etwa der Masse des Zs entsprechen.

Die Häufigkeit für diese Reaktion kann theoretisch berechnet werden. Dabei fließt die Anzahl der Neutrinosorten ein. Die Rechnung deckt sich am besten mit den gemittelten Daten der vier LEP-Experimente, wenn man von drei (leichten) Neutrinosorten ausgeht.

Es kann aber auch sein, dass sie zum anderen Menschenschlag gehören. Vielleicht wissen Sie ja, wieso es diese drei Familien gibt. Wenn dem so ist: Schreiben Sie es um Himmels Willen auf! Machen Sie die Sache öffentlich! Und reservieren Sie schon einmal den Termin der nächsten Nobelpreis-Verleihung in Ihrem Kalender! Denn Sie wären mit Ihrem Wissen noch ganz alleine.

KworkQuarkQuiz **

1.2.8

Haben Sie alles verstanden? Das Wichtigste behalten? Testen Sie hier Ihr Wissen.

Drei Familien

Worin unterscheidet sich das Elektron von seinen Vettern in den anderen Teilchenfamilien?

- Sie unterscheiden sich in Masse und anderen Eigenschaften.
- Sie unterscheiden sich nur in der Masse.
- Es handelt sich um Materie und Antimaterie.

Die Nummer Eins

Welches der Teilchen des Standard-Modells wurde als erstes gefunden?

- Down-Quark
- Up-Quark
- Elektron-Neutrino
- Elektron

Protonenquark

Aus welchen Quarks ist das Proton aufgebaut?

- Down, Down, Down
- Up, Down, Down
- Up, Up, Down
- Up, Up, Up

Antimaterie

Wann kam Pauli Dirac auf die Idee der Antimaterie?

- Bei Studien zum Elektron.
- Als er über einen Warp-Antrieb nachdachte.

1.3 Was die Welt zusammenhält – Kräfte

Nur vier verschiedene Kräfte halten unser Universum davon ab, auseinander zu fallen. Sie sorgen für Bewegung und Veränderung.

1.3.1 Der Zaubertoaster *

Die Einordnung der Teilchen in Elektronen, Neutrinos und Quarks wäre vollkommen nutzlos, wenn diese Teilchen untereinander nicht in Wechselwirkung stünden. Denn ohne Wechselwirkung mit uns, würden wir nichts von den unterschiedlichen Teilchen mitbekommen.

Es war einmal ein Zaubertoaster. Ein Druck auf die Zaubertaste und er verschwand: Mit einem Schlag waren alle Wechselwirkungen mit dem ihn umgebenden Universum einfach ausgezaubert. Der Toaster war noch da. Er reflektierte aber kein Licht mehr: Jeder sah einfach hindurch. Kaffeetassen und Marmeladengläser waren für ihn kein Hindernis: Irre praktisch, wenn Sie eine kleine Küche haben. Der Toaster sendete aber auch keine Hitze mehr aus: Toasts blieben weiß und kalt, aber sie fielen ja sowieso hindurch auf den Tisch. Und da niemand mehr die Zaubertaste drücken oder gar sehen konnte, steht er da noch heute.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Ein Toaster mit roten Knopf. Drückt man auf den Knopf, so löst sich der Toaster in Nichts auf, er kann die Toastscheiben nicht mehr halten, die daraufhin herunterfallen.

Abbildung 1.1: Zaubertoaster: Nicht drücken!

Man muss kein Angestellter von Stiftung Warentest sein, um zu erkennen, dass ein Toaster ohne Wechselwirkung mit Toasts recht nutzlos

ist. Dasselbe würde auch für die Einordnung der Teilchen in Elektronen, Neutrinos und Quarks gelten, wenn diese nicht in Wechselwirkung untereinander stünden.

Welch Glück also, dass Universum und Teilchenphysiker auch an die Wechselwirkung gedacht haben: Über vier fundamentale Kräfte können Teilchen mit ihrer Umwelt – mit anderen Teilchen – kommunizieren.

Vier Kräfte *

1.3.2

Nur vier verschiedene Kräfte kennt die moderne Physik. Auf sie lässt sich die Vielfalt aller Wechselwirkungen zurückführen.

Teilchenphysiker machen es sich gerne leicht: Anstatt die Vielfalt unserer Welt mühevoll in allen Einzelheiten aufzulisten, führen sie sie auf vier Kräfte zurück:

- ▷ Die Schwerkraft sorgt dafür, dass wir mit den Füßen auf dem Boden bleiben.
- ▷ Die elektromagnetische Kraft zeigt sich unter anderem für die Sparten Elektrizität, Magnetismus, Mobilfunk und Licht verantwortlich.
- ▷ Die starke Kraft hält Atomkerne zusammen.
- ▷ Und die schwache Kraft lässt sie auseinander fallen.

Briefe schreiben bewegt *

1.3.3

Nach dem Standard-Modell der Teilchenphysik erfolgen Kräfte über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen. Darüber können sich Teilchen anziehen, abstoßen und ineinander umwandeln.

Wer miteinander redet, steht in Wechselwirkung. So etwas kann schriftlich über Briefe erfolgen. Ganz ähnlich kann man sich das kraftvolle Treiben in der Welt des Allerkleinsten vorstellen. Da teilen sich Teilchen ständig mit: „Hallo, hier bin ich. Jetzt reagiere mal!“

Stellen Sie sich vor, Sie befinden sich eines Morgens mit Schlittschuhen an den Füßen auf einem gefrorenen See! Sie wollen einen Brief loswerden, in dem Sie klagen, wie surreal Ihnen diese ganze Situation vorkommt. Sie holen aus, werfen den Brief ins Irgendwo und der Brief macht sich auf den Weg. Sie allerdings bekommen einen kleinen Schubs nach hinten: Sie ändern Ihre Bewegung.

Wenn Elementarteilchen Nachrichten austauschen, so ändern auch sie ihre Bewegung. Wenn sich zum Beispiel zwei Elektronen schreiben, endet das damit, dass sich die beiden abstoßen.

Teilchen mit entgegengesetzter Ladung ziehen sich jedoch an. Auf dem Eis bekämen sie das auch hin, wenn Sie statt Briefen einen Bumerang nähmen.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] 1. Zwei Personen auf einer Eisfläche werfen sich einen Brief zu. Dadurch werden sie voneinander abgestoßen. 2. Werfen sie sich einen Bummerang zu, gleiten sie wieder aufeinander zu.

Abbildung 1.2: Briefe schreiben kann entzweien, Bumerange lassen zusammenrücken.

Aber es ist noch etwas anderes möglich: Sie können Ihrem Eispartner auch ein Kleidungsstück zuwerfen. Mit solchen Aktionen wandeln sich Elementarteilchen ineinander um.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Zwei Personen auf einer Eisfläche. Die eine wirft ihre grüne Pudelmütze der anderen zu.

Abbildung 1.3: Wesensverändernder Mützenwurf.

Und wenn Sie das gerade verstanden haben, wissen Sie schon, wie sich Physiker Kräfte vorstellen: Kräfte kann man über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen beschreiben.

1.3.4 Wechselwirkungsteilchen *

Zu jeder Kraft gibt es im Standard-Modell der Teilchenphysik Wechselwirkungsteilchen.

Photonen übertragen die elektromagnetische Kraft. Elektronen tauschen beispielsweise Photonen aus, und stoßen sich dadurch voneinander ab.

Die starke Kraft wird über die **Gluonen** vermittelt. Diese kleben Quarks zu Teilchen wie den Protonen zusammen.

Die schwache Wechselwirkung entsteht über den Austausch so genannter **W-** und **Z-**Teilchen. Mit ihrer Hilfe können sich die Teilchen ineinander umwandeln. Dann wird etwa aus einem Elektron ein Elektron-Neutrino und aus einem Up-Quark ein Down-Quark.

Schwerkraft

- ▷ „Halt! Moment! Eins, zwei, drei... Fehlt da nicht was?“
- ▷ „Na, gut. Ertappt! Zur Schwerkraft wurde noch kein Wechselwirkungsteilchen gefunden. Beim Standard-Modell muss die Schwerkraft sowieso ganz draußen bleiben. Denn bei der theoretischen Beschreibung treten unlösbar scheinende Probleme auf.“
- ▷ „Das überzeugt nicht wirklich, oder? Dieses Modell soll toll sein und kommt noch nicht einmal mit der Schwerkraft zurecht? Die wirkt doch überall.“
- ▷ „Stimmt! Sie spielt in der Welt der aller kleinsten Teilchen aber nur eine sehr, sehr kleine Rolle. So ist die Schwerkraft zwischen zwei Elektronen mehr als eine Milliarde Milliarde Milliarde Milliarde Mal schwächer als die elektromagnetische Abstoßung. So genau sind selbst Hochpräzisions-Experimente nicht. In der Summe fällt die Schwerkraft aber schon ins Gewicht, weil sich Massen nur anziehen und nicht auch schon mal abstoßen.“

Vorsicht: Anschaulichkeit! ***

1.3.5

Woher weiß das Teilchen eigentlich, dass es einen anziehenden oder abstoßenden Brief schicken muss? Hier weiß nur die Quantentheorie Rat.

Welch anschauliches Bild! Teilchen tauschen Wechselwirkungsteilchen aus und üben so Kräfte aufeinander aus.

Doch leider gehört zu den meisten Bildern ein Haken. So auch hier. Denn das Bild lässt eine wichtige Frage offen: Woher weiß das Teilchen eigentlich, dass es einen anziehenden oder abstoßenden Brief schicken muss? Woher weiß das Elektron, ob es ein anziehendes oder abstoßendes Photon schicken muss. Es weiß ja nicht, ob der Empfänger positiv oder negativ geladen ist.

Die Antwort: Weiß es auch gar nicht. Es schickt alle möglichen Photonen. Und die Quantentheorie richtet schon, dass es passt.

Denn der Quantentheorie zufolge, muss man alle möglichen Photonen betrachten, die zwischen den Elektronen ausgetauscht werden können. Der Physiker sagt: Man muss über alle Impulse integrieren. Damit Phy-

siker hier den Überblick behalten nutzen sie kleine Bilder, so genannte Feynman-Diagramme.

Wenn man das alles richtig macht, ergibt sich der Unterschied zwischen Elektron-Elektron und Elektron-Positron gerade in einem Vorzeichen, so dass im Endergebnis einmal eine Abstoßung und das andere Mal eine Anziehung herauskommt.

1.3.6 Ganz schön geladen ***

Damit die Teilchen unterschiedlich wechselwirken können, versieht sie das Standard-Modell der Teilchenphysik mit unterschiedlichen Ladungen.

Zu jeder Kraft gehören Ladungen und nur Teilchen mit entsprechender Ladung unterliegen auch der Kraft:

- ▷ Die Ladung zur elektromagnetischen Kraft ist die weithin bekannte elektrische Ladung.
- ▷ Die Ladung zur Starken Kraft ist die Farbladung. Es gibt sie in Rot, Blau, Grün, Anti-Rot, Anti-Blau und Anti-Grün.
- ▷ Die Ladung zur Schwachen Kraft ist die schwache Ladung.
- ▷ Und selbst die Schwerkraft verfügt über eine Ladung. Es ist die Energie: Alles was Energie und damit eine Masse hat, unterliegt der Gravitation.

1.3.7 Photonen und der Elektromagnetismus **

Die Wechselwirkungsteilchen zum Elektromagnetismus heißen Photonen. Über sie werden die elektrischen und magnetischen Kräfte vermittelt. Auch Licht besteht aus Photonen.

Unsere Augen sehen Sonnenaufgänge, eine Kompassnadel richtet sich gen Norden aus, zwei Elektronen stoßen sich ab. Woher wissen Augen, Kompassnadel und Elektron, was Sache ist? Indem sie Information über das Gegenüber (Sonne, magnetischer Nordpol und anderes Elektron) in Form von Photonen erhalten. Dabei können Photonen anziehend wirken oder eher abstoßend sein: Denn gleichnamige elektrische Ladungen stoßen sich ab, unterschiedliche ziehen sich an.

Das Photon ist das wohl bekannteste der Wechselwirkungsteilchen. Es überträgt die elektromagnetische Kraft und ist zudem das einzige Elementarteilchen, das man wirklich sehen kann: Denn aus Photonen besteht das Licht.

Das Photon legt unendlich lange Distanzen zurück: Selbst wenn sich Ihre Schwiegermutter am anderen Ende des Universums befände, würden Sie mit ihr noch Photonen austauschen. Die Anzahl der Photonen in unserem Universum ist dabei erstaunlich: Schon ein Mobiltelefon strahlt rund 10 000 000 000 000 000 000 Photonen in der Sekunde ab. Zusammen formen diese Photonen eine elektromagnetische Welle, über die man mit der Schwiegermutter plaudern kann – falls sie sich nicht gerade im Weltall herumtreibt.

Gluonen und die starke Kraft **

1.3.8

Die Starke Kraft ist der Konrad-Spezialkleber unter den Kräften. Sie wirkt nur zwischen Quarks und sorgt dafür, dass diese zu Teilchen wie Protonen und Neutronen verklumpen. Die Starke Kraft wirkt über den Austausch von Gluonen.

Die Starke Kraft ist rund 100-mal stärker als der Elektromagnetismus und überwindet auf diese Weise spielend die elektromagnetische Abstoßung von gleichnamig geladenen Quarks. Auch bei der Anzahl der Kraftteilchen liegt sie ganz weit vorne. So gibt es acht unterschiedliche Gluonen (engl. to glue: kleben). Die Gluonen wurden 1979 bei DESY entdeckt.

Wenn die Starke Kraft so stark ist, wieso spüren Sie dann nicht mehr von ihr im Alltagsleben? Wieso kleben Sie nicht an Ihrem Stuhl fest, der doch auch aus Quarks besteht? Wieso können Sie von einer Person wieder lassen, der Sie soeben die Hand geschüttelt haben? Des Rätsels Lösung liegt in der geringen Reichweite der Starke Kraft: Sie wirkt nur über Entfernungen, die rund einem Hunderttausendstel der Ausdehnung eines Atomkernes entsprechen. Was jenseits liegt, interessiert sie nicht.

Farbladungen **

1.3.9

Quarks besitzen neben einer elektrischen auch eine Farbladung. Darüber wirkt die Starke Kraft. Quarks senden sich ständige bunte Gluonen aus und ändern dabei ihre Farbe.

Quarks gibt es in den Farben Rot, Grün und Blau. Antiquarks können zwischen Anti-Rot (Cyan), Anti-Grün (Magenta) und Anti-Blau (Gelb) wählen. Alle Teilchen, die eine Farbladung besitzen, können über den Austausch von Gluonen stark wechselwirken. Die Gluonen bestehen dabei aus einer Farbe und einer Antifarbe.

Auf diese Weise kann ein blaues Quark beispielsweise ein blau-antigrünes Gluonen mit einem grünen Quark austauschen. Die beiden Quarks tauschen dabei ihre Farbe.

Das mit den Farben ist dabei nicht wörtlich zu nehmen. Denn Quarks sind viel zu klein, als dass sie gesehen werden können. Und wenn man Quarks schon nicht sehen kann, gilt das erst recht für ihre Farbe. Die Farbeigenschaft der Quarks ist also etwas Abstraktes.

1.3.10 **Ws, Zs und die schwache Wechselwirkung** **

Wenn Atomkerne auseinander bersten, hatte meist die Schwache Kraft ihre Finger im Spiel. Denn sie erlaubt Teilchen, sich ineinander umzuwandeln: Aus einem Down-Quark wird dann beispielsweise ein Up, aus einem Elektron ein Elektron-Neutrino.

Die Wechselwirkungsteilchen zur Schwachen Kraft heißen W-Plus, W-Minus und Z-Null.

Zwei der drei Wechselwirkungsteilchen der Schwachen Kraft sind elektrisch geladen. Daher unterliegen sie auch der elektromagnetischen Kraft. Sie können also Photonen aussenden und sich gegenseitig anziehen: Ein Brief schreibt einen Brief.

Vorhergesagt wurden die Ws und Zs in den siebziger Jahren. Und noch vor ihrer Entdeckung, gab es für die kühne Vorhersage einen ebenso kühnen Nobelpreis. Gefunden wurden sie dann im Jahr 1984 am CERN.

1.3.11 **Elektroschwache Vereinigung** ***

Die elektromagnetische und Schwache Wechselwirkung werden im Standard-Modell mit Hilfe einer einzigen Elektroschwachen Kraft beschrieben.

Mit nur vier Kräften kann man die gesamte Vielfalt im Universum beschreiben. Aber vielen Physikern ist selbst das zu viel. Am liebsten hätten sie nur eine einzige Kraft: eine Urkraft, aus der sich alles ableiten lässt. Ein wichtiger Schritt zu diesem Ziel gelang in den 1960er Jahren: Damals machten sich Theoretiker an den Versuch, die elektromagnetische und Schwache Kraft auf eine einzige elektroschwache Kraft zurückzuführen.

Der Versuch gelang: Bei sehr hohen Energien (um die 100 Milliarden Elektronenvolt) und sehr kleinen Abständen (rund $0,5 \cdot 10^{-17}$ Metern)

treten elektromagnetische und Schwache Kraft gleich häufig auf. Ein starkes Indiz für die elektroschwache Vereinigung. Dies konnte an DESYs Beschleuniger HERA bestätigt werden

Die elektroschwache Vereinigung im Experiment

KworkQuarkQuiz **

1.3.12

Haben Sie alles verstanden? Das Wichtigste behalten? Testen Sie hier Ihr Wissen.

Schwerkraft

Wieso kommt die Schwerkraft im Standard-Modell nicht vor?

- Die Schwerkraft lässt sich theoretisch einfach nicht integrieren.
- Die Schwerkraft ist viel zu schwach, um in der Teilchenphysik wichtig zu sein.
- Die Schwerkraft kommt doch vor.

Massive Korrektur – Der Higgs-Mechanismus^{1.4}

Mit Hilfe des so genannten Higgs-Mechanismus gelangen die Teilchen im Standardmodell an Masse. Nach den dazu gehörenden Higgs-Teilchen suchten Physiker bisher aber vergeblich.

Eine Welt ohne Masse *

1.4.1

Es bedarf eines Tricks, um die Teilchen im Standardmodell mit einer Masse auszustatten.

Das Standardmodell scheint eine tolle Sache zu sein: Es beschreibt die Teilchen und die Kräfte in der Welt des Allerkleinsten. Wir müssen Sie aber auf einen kleinen Haken hinweisen: In der momentanen Version ist es falsch. Denn bis jetzt sind in der Theorie zu unserem Modell alle Teilchen masselos.

Keine Masse? Klasse, sagen sich diejenigen, bei denen der Jahresbeitrag für Weight Watchers demnächst fällig ist. Doch masselose Objekte haben eine tödliche Eigenschaft: Sie sind ständig mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs. Masse hingegen macht träge und bremst. Wenn alle Teilchen mit Lichtgeschwindigkeit durchs Universum jagen würden,

gäbe es zwar keinen Stillstand, aber auch kein Leben: Quarks und Elektronen würden keine Atome bilden. Atome weder Moleküle, Sterne noch Sie!

Wir sollten uns also über unsere Massen freuen. Den Standardmodellisten bereitete sie aber zunächst Kummer: Denn wie bekommt man nur die Masse ins Standardmodell?

1.4.2 Der Higgs-Mechanismus *

Physiker lieben es einfach und schön. Entsprechend angetan waren sie, als sie über einen Theorietyp stolperten, mit dem man alle drei Kräfte des Standardmodells beschreiben kann. Das Dumme: Diese Art von Theorie funktioniert nur mit masselose Teilchen.

Daher ersannen der schottische Physiker Peter Higgs und einige seiner Kollegen einen Trick: Der Higgs-Mechanismus versorgt die Teilchen nachträglich mit Masse.

Zu diesem Mechanismus gibt es auch Teilchen – die Higgs-Teilchen. Gesehen hat sie noch niemand. Dabei wäre der Fund schon recht wichtig für das Standardmodell. Ansonsten käme es in Erklärungsnot. Verständlich also, dass die Higgs-Teilchen, von denen es vielleicht sogar mehrere gibt, ganz weit oben auf der Fahndungsliste der Teilchenphysiker stehen.

Theorien im Standardmodell?

Die Wechselwirkung der Kräfte wird im Standardmodell mit Hilfe zweier Theorien beschrieben:

1. Die Quanten-Chromodynamik beschreibt das Wirken der Starken Kraft über den Austausch von Gluonen.
2. Die Quanten-Flavordynamik, oder elektroschwache Theorie, beschreibt die elektromagnetische und Schwache Kraft.

In beiden Fällen handelt es sich um so genannte Eichtheorie. Ihnen liegt ein ähnliches Symmetrieprinzip zugrunde. (Wer mehr darüber erfahren möchte, kann dies in der KworkQuark-Tour „Symmetrie“ tun.)

1.4.3 Eine schwere Party **

*Was kann lichtschnelle Teilchen unter Lichtgeschwindigkeit bringen?
Wie kommen die Teilchen an Masse?*

Stellen Sie sich dazu eine Party nach einem Konzert vor! Überall wimmelt es vor Fans – einigermaßen gleichmäßig über den ganzen Raum verteilt.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: null

Abbildung 1.4: Fans zu haben macht schwer.

Plötzlich tritt ein Rockstar in den Raum und will doch eigentlich nur zum Örtchen auf der anderen Seite. Entsprechend eilig hat er es. Doch die Fans stürzen auf ihn: Ein Schwätzchen hier, ein Autogramm dort. Unser Star schafft es so nur unter allergrößten Mühen zum Erleichterung versprechenden Ort – er zieht zu viele Fans an, er wird langsamer – ganz so, als ob er Masse gewönne.

Im Standardmodell sorgt ein ähnlicher Mechanismus für die Masse aller Teilchen. Die Fans bilden das so genannte Higgs-Feld, und unser Star gewinnt aufgrund seiner Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld an Masse.

Das Higgs-Teilchen: ein Gerücht **

1.4.4

Wenn sich Quarks, Elektronen und Konsorten durch das Higgs-Feld zwingen, wird es verzerrt. Dabei fallen weitere Teilchen an: die so genannten Higgs-Teilchen.

Wie man sich diese Higgs-Teilchen bildlich vorstellen kann? Nun, als ein Drängeln der Fans auch ohne Musiker. Denn die Gäste auf der Party knubblen sich zuweilen auch ohne Star: Die Tür geht auf. Die Gäste vermuten den Star. Und schon drängeln sie zusammen. Andere sehen das, stoßen hinzu. Die mitgekriegt haben, dass es gar keinen Star gibt, wenden sich wieder ab. Auf diese Weise breitet sich eine Verzerrung des Higgs-Feldes durch den Raum. Das Higgs-Teilchen sind Gerüchte, die durch den Raum ziehen.

Vielleicht bleibt sie auch ein Gerücht. Denn bisher gibt es nur indirekte Befunde für die Existenz der Higgs-Teilchen.

Die Teilchen würden aber zu gut ins Bild passen, um daran zu zweifeln. Es ist wie beim Puzzeln. Da reiht man Stunden um Stunden Stein an Stein, arbeitet sich mühevoll vom Rand zur Mitte und stellt dann voller Entsetzen fest, dass er fehlt – der letzte Stein zur Perfektion. Fast alles

wissen wir über ihn: seine Position, seine Form, selbst seinen Farbton. Dieses Ding muss einfach existieren! Und die Suche geht weiter ...

1.4.5 **KworkQuarkQuiz** **

Haben Sie alles verstanden? Das Wichtigste behalten? Testen Sie hier Ihr Wissen.

Masseverlust

Wie so haben die Teilchen im Standard-Modell zunächst keine Masse?

- Die Theorien der Kräfte funktionieren nur mit masselosen Teilchen.
- Die Theoretiker kannten damals das Konzept „Masse“ noch nicht.

Wo ist das Higgs?

Wieso wurde das Higgs-Teilchen noch nicht gefunden?

- Weil es nicht existiert.
- Weil seine Masse zu groß ist.

Masse des Masseerzeugers

Wie kann das Higgs-Teilchen eine Masse haben, wenn es doch für die Erzeugung der Masse verantwortlich sein soll?

- Es hat gar keine Masse.
- Es wechselwirkt mit seinem eigenen Feld, also quasi mit sich selbst.

Teilchen beschleunigen

Wie man Teilchen auf Trab bringt

Um der Natur ihren Bauplan zu entlocken, bringen Physiker Teilchen in Beschleunigern auf hohe Energien. Erfahren Sie hier mehr über die Tricks der Forscher und dass die erreichten Energien eigentlich gar nicht so groß sind!

Wozu beschleunigen?

2.1

Physiker beschleunigen Teilchen, um in deren Inneres zu blicken, Kräfte zu vermessen oder neue, schwere Teilchen zu erzeugen. Auch können sie auf diese Weise untersuchen, wie das Universum wohl kurz nach dem Urknall ausgesehen haben muss.

Physik in Hamburgs Unterwelt *

2.1.1

HERA hieß DESYs größter Teilchenbeschleuniger. In Hamburgs Unterwelt wurden hier Elektronen und Protonen auf hohe Energien gebracht und aufeinander geschossen.

Eifersüchtig war Hera, die Frau des Zeus, die Herrin auf dem Olymp. Weit friedfertiger ist da HERA, die Hochenergie-Stätte in Hamburg, in der das Teilchenopfer zu Wissen führt – nicht in 3000 Metern olym-

pischer Höhe, sondern in einer Tiefe von bis zu 25 Metern unter Hamburgs Stadtgebiet.

HERA macht Sehen. HERA ist einmalig. Nirgends sonst rasten Elektronen auf Protonen – in einem Teilchenbeschleuniger von 6,3 Kilometern Länge. In einem? Ach was?! In zweien. Einer für Elektronen, der andere für Protonen. Beide in einem Tunnel, durch den auch eine U-Bahn passt. Dafür rackerten tausende Wissenschaftler, 4.000 Magnete, 100 Beschleunigungs-Module und einer der größten Kühlschränke der Welt. Tagaus. Tagein. Denn jede HERA-Stunde zählte: Quarks, Myonen und Elektronen. HERA war Deutschlands größte Forschungsanlage und hat alles in allem rund eine halbe Milliarde Euro gekostet.

Wenn auch nicht eifersüchtig, empfindlich ist HERA allemal: Da musste nur ein Keller in der Nähe des HERA-Tunnels zu tief gegraben werden und schon drohte der Liebesentzug. Dann hob oder senkte sich der Boden um wenige Millimeter und die empfindliche HERA-Technik musste neu eingestellt werden.

Daher Vorsicht: Nach dieser Einführung werden Sie HERA wahrscheinlich auseinander nehmen, aber gewiss nicht wieder zusammensetzen können. Eines wird Ihnen jedoch gewiss gelingen: Sie werden bei den Grundprinzipien der Teilchenbeschleunigung mitreden können. Die sind nämlich gar nicht so kompliziert.

2.1.2 Energie erhöhen *

In Teilchenbeschleunigern werden Elektronen und Protonen auf immer höhere Energien gebracht. Die Geschwindigkeit der Teilchen ändert sich dabei kaum. Denn sie sind bereits mit nahezu Lichtgeschwindigkeit unterwegs und nichts kann schneller sein.

Wer mit dem Fahrrad einen Berg hinunterrollt, bei dem schallt es aus dem Innenohr: „Hey, du wirst beschleunigt.“ Verantwortlich hierfür ist das Gleichgewichtsorgan. Auch in Kurven gibt es Bescheid. In beiden Fällen liegt Beschleunigung vor; in beiden Fällen ändert sich die Geschwindigkeit: einmal ihre Größe, das andere Mal ihre Richtung.

Wir Menschen können Beschleunigung spüren. Elektronen und Quarks haben hingegen keinen Sinn. Und selbst wenn die Teilchen feststellen könnten, wie viel schneller sie auf ihren Runden in den großen Teilchenbeschleunigern dieser Welt werden, würden sie es nicht tun. Weil es nicht geschieht. Die Teilchen sind dort bereits mit Geschwindigkeiten unterwegs, die knapp unter der des Lichts liegen. Nach der Relativitätstheorie von Albert Einstein kann nichts schneller werden.

Denn nähert sich die Geschwindigkeit eines Teilchens diesem Tempolimit, so wird es immer schwerer, es noch schneller zu machen. Falls es dennoch weiter beschleunigt wird, so erhöht sich seine Geschwindigkeit kaum, es erhält aber mehr Energie.

Den energiehungrigen Teilchenphysikern passt das sehr. Mit höheren Energien können sie neue, schwere Teilchen erzeugen. Auch lässt sich untersuchen, wie das Universum wohl gewesen war, als seine ganze Energie noch auf einen kleinen Bereich konzentriert war.

Vom Problem Kleingedrucktes zu lesen **

2.1.3

Es ist eine der eher paradox klingenden Regeln der Natur: Je winziger die Strukturen, die man in der Natur ausmachen will, umso größer sind die dazu notwendigen Energien. Deswegen sind Teilchenbeschleuniger so groß.

Gerne wird sie „Elementarteilchenphysik“ genannt – jene Wissenschaft, die den Bauklötzen des Universums auf die Schliche kommen soll.

Ob die bisher gefundenen Puzzlesteine dabei wirklich *elementar* sind, kann heute niemand mit letzter Gewissheit sagen. Es sprechen zwar gute Gründe dafür, aber die Menschen „wussten“ auch viele Jahre lang, dass das Atom unteilbar sei. Und gar nicht so lange davor, drehte sich die Sonne noch um die Erde – zumindest in den Köpfen der Menschen. Und wie viel hat das bizarre Benehmen von Elektronen und Quarks eigentlich noch mit dem von *Teilchen* gemein? Der gegenwärtigen Beschreibung nach, der so genannten Quantentheorie zufolge wenig. Danach verhalten sich Quarks und Konsorten zwar wie Teilchen, wenn man sie erspäht, schaut man hingegen weg, so bewegen sie sich wie Wellen fort und werden mit Hilfe wabernder, den ganzen Raum durchziehender Quantenfelder beschrieben.

„Vielleicht-nicht-ganz-elementare-wabernde-Quantenfelder-Physik“ ist aber auch keine Alternative zu „Elementarteilchenphysik“. Das Los vieler Physiker fiel vielmehr auf „Hochenergiephysik“. Damit beschreiben sie ihren Versuch, die Natur bei immer höheren Energien zu untersuchen und damit immer kleinere Strukturen zu beleuchten. Dieses Mehr an Energie ist der Grund, wieso Teilchenbeschleuniger im Laufe der Zeit immer größer geworden sind. Es ergibt sich aus einem grundlegenden Prinzip in der Quantenwelt: Je kleiner etwas ist, umso mehr Energie ist vonnöten, um es genau zu untersuchen. Kleingedrucktes zu lesen, strengt halt an.

Trotz aller Einsicht: KworkQuark wird nicht in „Hochenergiephysik für alle!“ umbenannt. Begriffe dienen der Verständigung und der Begriff „Teilchenphysik“ macht seinen Job hervorragend.

Wieso so hohe Energien?

Eine mathematische Herleitung für das Problem, Kleingedrucktes zu lesen, ergibt sich aus der Heisenbergschen Unschärfebeziehung und der Energie-Masse-Impuls-Beziehung der Relativitätstheorie.

Nach der Heisenbergschen Unschärfebeziehung kann man Impuls und Ort eines Teilchens nicht beliebig genau messen. So sehr man sich auch bemüht: Für beide Größen bleibt eine gewisse Unschärfe, deren Produkt mindestens von der Größenordnung der Planck-Konstante h ist.

$$\Delta x \Delta y \geq \frac{h}{4\pi}$$

Der Impuls eines Teilchens hängt über die Energie-Masse-Impuls-Beziehung mit der Energie zusammen:

$$E = \sqrt{(m_0^2 c^2)^2 + (cp)^2}$$

Bei sehr schnellen Teilchen fällt der erste Term unter der Wurzel gegenüber dem zweiten nicht weiter ins Gewicht und kann getrost vernachlässigt werden. Es gilt dann:

$$\frac{E}{c} \approx p$$

Wenn wir jetzt noch davon ausgehen, dass der Impuls eines Teilchens größer ist als die Unschärfe im Impuls, haben wir schon alles, was wir brauchen. Die obigen Formeln ergeben dann zusammen:

$$\frac{E}{c} \approx p \geq \Delta p \geq \frac{h}{4\pi \Delta x}$$

Oder nach der Unschärfe im Ort aufgelöst:

$$\Delta x \geq \frac{hc}{4\pi E}$$

Die Ortsunschärfe kann also umso kleiner sein, je größer die Energie ist. Oder: Je kleiner die Dinge, die man sehen will, umso mehr Energie braucht man.

Energieschwindel? **

2.1.4

Wenn so riesige Maschinen zum Einsatz kommen, dann müssen die Energien der beschleunigten Teilchen doch gigantisch sein, oder? Nein, sie sind erstaunlich gering.

Nehmen wir als Beispiel das Zukunftsprojekt der Teilchenphysik, den ILC, einen über 30 Kilometer langen Beschleuniger, der in internationaler Zusammenarbeit geplant wird: Hier sollen Elektronen mit Weltrekordenergie unterwegs sein. Gemessen wird die in Elektronenvolt. Beim ILC sollen es am Ende 250 Milliarden Elektronenvolt pro Elektron sein – so etwas gab's noch nie.

Wenn Sie jedoch selbst diese Bewegungsenergie hätten, wären Sie mit enttäuschend schlappen 12 Zentimetern pro Stunde unterwegs. Jede Schnecke ist schneller.

Haben sich hier die Planer der neuen Maschine verrechnet? Oder sind gar listige Energieschwindler am Werk? Mitnichten! Denn beim ILC wäre die Energie auf ein einzelnes Elektron konzentriert und nicht wie im Falle Ihres Körpers auf Milliarden Milliarden Milliarden Elektronen. Ein ILC-Elektron flitzt daher mit 99,9999 Prozent der Lichtgeschwindigkeit durch den Tunnel. Und das überholen Sie nicht so schnell.

Wie flott sind Sie mit 250 Milliarden Elektronenvolt?

So berechnen Sie Ihre Geschwindigkeit bei einer Bewegungsenergie von 250 Milliarden Elektronenvolt.

Zunächst sollten wir die Energieeinheit der Teilchenphysik, das Elektronenvolt eV, in die Standard-Einheit, das Joule J, umrechnen. Ein Elektronenvolt entspricht $1,6022 \times 10^{-19}$ Joule, macht für ein ILC-Elektron: $E_{kin} = 4 \times 10^{-8}$ Joule.

Für die Bewegungsenergie E_{kin} eines Teilchens mit der Masse m und der Geschwindigkeit v gilt:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$$

Wenn wir diese Gleichung nach der Geschwindigkeit v auflösen, erhalten wir:

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$$

Das macht bei einer Masse von 70 Kilogramm $3,410^{-5}m/s$ oder rund 12 cm/h.

2.1.5 **KworkQuarkQuiz** **

Überprüfen Sie, was Sie in diesem Kapitel gelernt haben!

Beschleunigung: Wann?

Wann liegt Beschleunigung vor?

- Wenn sich die Bewegungsenergie eines Objektes ändert.
- Wenn sich die Richtung einer Geschwindigkeit ändert.
- Wenn sich die Größe einer Geschwindigkeit verringert.
- Wenn sich die Größe einer Geschwindigkeit erhöht.

HERA

Welche Teilchen wurden beim DESY-Beschleuniger HERA beschleunigt?

- Neutronen
- Protonen
- Elektronen
- Positronen

Beschleunigung: Wozu?

Was ist die Hauptaufgabe von Teilchenbeschleunigern?

- Teilchen sollen auf hohe Energien gebracht werden, damit sich das Verhalten der Teilchen kurz nach dem Urknall studieren lässt.
- Teilchen sollen auf hohe Energien gebracht werden, damit sich aus der beim Zusammenstoß frei werdenden Energie neue Teilchen bilden können.
- Teilchen sollen auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt werden, damit sich die Zusammenstöße schneller ereignen.

2.2 **Wie beschleunigen?**

Mit Hilfe elektrischer Spannungen beschleunigen Physiker geladene Teilchen auf hohe Energie. Magnetfelder halten die Teilchen dabei auf Bahn.

Die Grundidee: Spannung *

2.2.1

Mit Hilfe elektrischer Spannungen bringen Physiker geladene Teilchen auf Trab und somit auf hohe Energien.

Wie beschleunigt man kleinste Teilchen? Wie bringt man sie auf Trab? Viele Möglichkeiten gibt es nicht: Die Schwerkraft scheidet aus. Sie ist zu schwach, als dass es reichen würde, ein Elektron von einem Turm zu werfen, und zu hoffen, dass es unten schnell aufprallt. Düsentriebwerke für die winzigen Teilchen gibt es auch keine.

Es gibt aber elektrische Felder. Und in diesen wandern negativ geladene Elektronen immer zum positiv geladenen Pluspol. So passiert es in Stromleitungen, beim Blitzeinschlag und in modernen Teilchenbeschleunigern: Elektrische Spannungen sind die einzigen Möglichkeiten, Teilchen auf Trab zu bringen.

Spannungen und elektrische Feldstärke

Die Einheit der Spannung ist das Volt. An einem Antennenkabel liegen 0,1 Tausendstel Volt an, eine Autobatterie liefert 12 Volt, Hochspannungsleitungen kommen mit 800.000 Volt daher und in einem Blitz gibt es bis zu 100 Millionen Volt.

Wo Spannungen sind, gibt es auch elektrische Felder. Deren Stärke gibt die Kraft pro Ladung an und ist damit die eigentlich maßgebliche Größe für Beschleunigerphysiker. Es gilt dabei: Je höher die Spannung zwischen zwei Platten und je kleiner ihr Abstand, umso größer ist die Stärke des elektrischen Feldes.

Hier ein paar elektrische Feldstärken zum Vergleich:

- ▷ Stereo-Radioempfang: 50 Millionstel Volt pro Meter
 - ▷ Feldstärke zwischen zwei Hochspannungsleitungen: 100.000 Volt pro Meter
 - ▷ Feldstärke in Gewitterluft kurz vor dem Blitzeinschlag: 2 bis 3 Millionen Volt pro Meter
 - ▷ Feldstärke im Vakuum von DESYs Beschleuniger HERA: 6 Millionen Volt pro Meter
 - ▷ Feldstärke beim Zukunftsprojekt ILC: 25 Millionen Volt pro Meter
-

Das Elektronenvolt **

2.2.2

Ob sie Massen angeben oder die Leistungsfähigkeit von Teilchenbe-

schleunigern beschreiben – die Einheit der Teilchenphysiker für die Energie ist das Elektronenvolt.

Die Physik zählt zu den exakten Wissenschaften. Das heißt nun nicht, dass sich Physiker nicht auch mal irren, sondern dass sie ihre Ergebnisse in Zahlen ausdrücken können. Damit solche Zahlen vergleichbar sind, damit man Äpfel nicht mit Birnen verwechselt, haben sie sich auf gemeinsame Einheiten geeinigt. Für die Einheit der Energie in der Welt der Teilchenphysik fiel dabei das Los auf das „Elektronenvolt“: Wird ein Elektron durch die elektrische Spannung von einem Volt beschleunigt, so gewinnt es eine Energie von einem Elektronenvolt.

Wieso „Elektronenvolt“?

Woher kommt der Begriff „Elektronenvolt“ als Einheit einer Energie? Die folgende Ableitung macht's deutlich:

Wenn ein Teilchen über die Strecke d durch eine Kraft F beschleunigt wird, so gilt für die gewonnene Energie W :

$$W = Fd$$

Nach der Lorentzgleichung ist die elektrische Kraft F , die auf ein Teilchen mit der Ladung q wirkt, proportional zur elektrischen Feldstärke E :

$$F = qE$$

Nun gilt es, die Stärke des elektrischen Feldes zu bestimmen. Wenn an zwei Metallplatten, die Strecke d voneinander entfernt sind, die Spannung U angelegt wird, beträgt die Stärke des elektrischen Feldes, das zwischen den beiden Platten entsteht:

$$E = \frac{U}{d}$$

Wenn man diese drei Formeln zusammennimmt, erhalten wir für die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es zwischen zwei elektrisch geladenen Platten beschleunigt wird:

$$W = qU$$

Ladungen können in Vielfachen der Elektronenladung e angegeben werden. Die Einheit der Spannung U ist das Volt. Verkürzt ergibt sich daher das Elektronenvolt.

Erst noch langsam ... **

2.2.3

Will man Teilchen mit Wechselspannungen auf immer höhere Energie bringen, so kommt es auf die Polung an.

Mit der elektrischen Spannung zwischen zwei geladenen Platten kann man Teilchen beschleunigen. Wollte man mehr, müsste man dann nicht einfach nur die Spannung erhöhen? Das geht leider nicht beliebig weit. Denn irgendwann wird die Stärke der Elektrizität durchschlagend: Ein Blitz entsteht und das Feld bricht zusammen.

Doch hier gibt es einen Ausweg. Was man nicht auf einmal erreicht, verfolgt man eben Schritt für Schritt – in unserem Fall heißt das: Platten hintereinander schalten. Aus technischen Gründen greifen Physiker dabei nicht auf Platten zurück, sondern wenden sich metallischen Röhren zu. Alle Röhren hängen an derselben Spannungsversorgung, die immer wieder umgeschaltet werden muss, damit die Teilchen nicht versehentlich abgebremst werden. Dieses Umschalten sollte erfolgen, wenn sich die Elektronen in den Röhren befinden. Dort sind sie nämlich vor den äußeren elektrischen Feldern geschützt – wie die Insassen in einem metallischen Auto, wenn ein Blitz einschlägt.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: In der Interaktion soll die elektrische Spannung an einer Röhre so umgepolt werden, dass die Teilchen maximal beschleunigt werden.

Abbildung 2.1: Beschleunigen Sie das Elektron möglichst hoch!

Auf Dauer wird das Umschalten per Hand öde. Es erfolgt auch alles andere als flott. Gegen Langeweile und Langsamkeit ziehen Physiker mit einer Wechselspannung zu Felde. Diese liefern uns auch die Stromkonzerne bis in die Steckdose: Dort wechseln Plus und Minus 50-mal in der Sekunde. Da nun die Spannung immer nach festen Zeitabständen umpolt, die Teilchen aber – zumindest so lange sie noch viel langsamer als das Licht sind – immer schneller werden, muss die Länge der Röhren angepasst werden:

Unser erster kleiner, leistungsstarker Teilchenbeschleuniger ist fertig. Er funktioniert, so lange sich die Geschwindigkeiten unterhalb der des Lichts bewegen.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: In der Interaktion sollen die Längen der einzelnen Röhren so angepasst werden, dass die erreichte Energie der Teilchen maximal wird.

Abbildung 2.2: Bringen Sie das Elektron ans Ziel!

2.2.4 ... dann lichtschnell **

Für die weitere Beschleunigung nahezu lichtschneller Teilchen werden heute so genannte Hohlraumresonatoren verwendet.

Auch wenn Sie es von der speziellen Relativitätstheorie vielleicht nicht erwarten: Bei hohen Geschwindigkeiten macht sie alles einfacher. So gilt, dass Teilchen nicht schneller werden können als das Licht im Vakuum: Beschleunigt man fast lichtschnelle Teilchen, so erhöht sich ihre Geschwindigkeit nicht mehr wesentlich; nur noch die Energie der Teilchen nimmt zu. Das vereinfacht Teilchenbeschleuniger ungemein. Denn bei gleich bleibenden Geschwindigkeiten muss man sich nicht mehr um die unterschiedlichen Längen der Röhren kümmern: *One size fits all.* Wir befinden uns auf der argumentativen Zielgeraden zu den so genannten Hohlraumresonatoren, die in allen modernen Beschleunigern fleißig für die Energiezufuhr sorgen. In diesen Hohlräumen wird ein elektromagnetisches Feld eingeschleust, das einer Wechselspannung entspricht, die immer zur rechten Zeit in die richtige Richtung zeigt, um die Teilchen zu beschleunigen.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] Ein Elektron wird von den wechselnden Feldern im Hohlraumresonator vorangetrieben.

Abbildung 2.3: Das Prinzip eines Hohlraumresonators

2.2.5 Korrektur der Grundidee: Magnetfelder *

Physiker nutzen elektrische Felder, um Teilchen auf höhere Energien zu beschleunigen. Um die Teilchen auf die krumme Bahn zu bringen, verwenden sie magnetische Felder.

Immer wieder ist es notwendig, geladene Teilchen umzulenken. Dies ist

etwa in Kreisbeschleunigern der Fall, in denen die Teilchen auf einer kreisförmigen Bahn immer wieder dieselben Beschleunigungsstrecken durchlaufen. Oder aber, wenn die Teilchen von einem Beschleuniger in einen anderen geleitet oder zu kompakten Strahlen gebündelt werden sollen.

Bei alledem nutzt man den Effekt, dass elektrische Teilchen in Magnetfeldern entlang einer Kreisbahn fliegen. Verantwortlich dafür ist die so genannte Lorentzkraft. Ihre Richtung hängt dabei von der Ladung des Teilchens und der Richtung des Magnetfeldes ab.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: Bei dieser Interaktion wird mit Hilfe eines magnetischen Feldes ein Teilchen auf Kreisbahnen gebracht. Ziel ist es, das Teilchen durch Umpolen zur richtigen Zeit in ein Tor zu befördern.

Abbildung 2.4: Torwandschießen mit Henry Lorentz.

Die magnetische Kraft

Die Kraft eines magnetischen Feldes B auf eine elektrische Ladung q mit der Geschwindigkeit v wird durch die magnetische Komponente der Lorentzkraft beschrieben:

$$F = qv \times B$$

Die Kraft steht immer senkrecht zur Geschwindigkeit (, was durch das Kreuzprodukt-Zeichen „ \times “ angedeutet wird). Daher kann ein Magnetfeld nur die Richtung der Geschwindigkeit ändern, jedoch nicht ihren Betrag erhöhen oder erniedrigen. Auch in diesem Fall sprechen Physiker von Beschleunigung.

Der Radius des Kreises

Um den Radius der Kreisbahn eines geladenen Teilchens in einem magnetischen Feld zu berechnen, muss man die Zentripetalkraft mit der magnetischen Kraft gleichsetzen. Für ein nicht-relativistisches Teilchen – also eines mit einer Geschwindigkeit weiter unter der des Lichts – gilt die folgende Ableitung.

Die Zentripetalkraft eines Teilchen der Masse m auf einer Kreisbahn mit der Geschwindigkeit v und dem Radius R bestimmt sich über:

$$F_Z = \frac{mv^2}{R}$$

Die magnetische Kraft auf das geladene Teilchen mit der Ladung q im Magnetfeld B beträgt:

$$F_{mag} = qv \text{ times } B$$

Auf der Kreisbahn sind diese beiden Kräfte gleich. Dies ergibt für den Radius:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Je höher die Geschwindigkeit, umso geringer kann das Magnetfeld sein. Je höher die Masse, umso stärker muss das Magnetfeld sein. Für Protonen braucht man daher viel stärkere Magnete als für Elektronen.

2.2.6 Die Fernsehröhre als Elektronenbeschleuniger ***

Mit elektrischen Spannungen zur Beschleunigung von Teilchen und Magnetfeldern zu deren Ablenkung haben wir alle wesentlichen Zutaten für eine Fernsehröhre beisammen.

In einer Fernsehröhre werden Elektronen mit Hilfe einer elektrischen Spannung auf Energien von mehreren zigtausend Elektronenvolt beschleunigt. Man kann die Intensität des Strahls variieren, was in unterschiedlicher Leuchtstärke auf der Mattscheibe sichtbar wird. Damit der Strahl jeden Punkt der Mattscheibe erreichen kann, kommen magnetische Felder zum Einsatz.

Welche Geschwindigkeit erreicht ein Fernsehelektron?

Für die Bewegungsenergie eines Teilchens der Masse m und Geschwindigkeit v gilt:

$$W_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$$

Die Energie, die ein Teilchen mit der Ladung q in einem elektrische Feld mit der Spannung U erfährt, beträgt:

$$W_{el} = qU$$

Diese beiden Energien sind gleichzusetzen und nach der Geschwindigkeit aufzulösen. Das ergibt:

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

Doppelt beschleunigen knallt besser ***

2.2.7

In so genannten Kollisionsexperimenten werden zwei Teilchen getrennt beschleunigt und gegeneinander geschossen. Dabei werden weit höhere Energien frei, als wenn man ein beschleunigtes Teilchen auf ein ruhendes schießt: Doppelt beschleunigen knallt besser.

Es gilt, die folgende Nuss zu knacken: eine Walnuss an einem Bindfaden hängend. Zum Öffnen stehen zwei Hämmer zur Verfügung. Welche Versuchsanordnung führt wohl eher zum Ziel?

1. Sie hauen mit beiden Hämmern von derselben Seite gegen die Nuss.
2. Sie schlagen gleichzeitig von zwei entgegengesetzten Richtungen dagegen.

Im ersten Fall werden Sie der Nuss wahrscheinlich nur einen gewaltigen Schubs verpassen. Denn ein großer Teil der Energie, der in den Hämmern steckt, wird zur Beschleunigung der Nuss verwendet.

Dies wird bei der zweiten Versuchsanordnung nicht geschehen. Hier kann die Energie der Hämmer nicht in Bewegungsenergie der Walnuss entfliehen. Sie steht ganz der Nuss-Zertrümmerung zur Verfügung.

Die Erklärung: Impulserhaltung

Der Grund für den unterschiedlichen Ausgang der beiden Experimente liegt in der Erhaltung des Impulses. Danach entspricht der Gesamtimpuls eines Systems vor einem Stoß immer dem Impuls nach dem Stoß. Im ersten Fall ist der Gesamtimpuls größer als Null. Hämmer und Nuss müssen daher auch nach dem Stoß einen Impuls haben: Ein Großteil der Energie bleibt daher als Bewegungsenergie erhalten.

Im zweiten Fall ist der Gesamtimpuls vor und nach dem Stoß Null. Die Hämmer kommen nach dem Stoß zur Ruhe und es geht keine Zertrümmerungsenergie in Form von Bewegungsenergie verloren.

Auch in der Teilchenphysik gibt es die beiden Hammermethoden:

1. Man kann ein Teilchen auf ein ruhendes Ziel beschleunigen. (In diesem Fall sprechen Physiker von einem Fixed-Target-Experiment.)
2. Oder man nimmt zwei Teilchen, beschleunigt beide und lässt sie frontal aufeinander stoßen. (Der Fachterminus hier: Kollisionsexperiment.)

Der Vorteil von Kollisionsexperimenten: Es geht keine Energie für die Beschleunigung des ruhenden Ziels verloren. Das Treffen wird aber schwieriger. Das wird Ihnen schnell klar, wenn Sie einmal versuchen, mit einem Elektron auf ein anderes zu zielen. Bei Experimenten mit festem Ziel hingegen kann man einfach einen Block mit Materie hinstellen und berechtigt hoffen, dass man schon irgendetwas treffen wird.

Welche Energien werden frei?

Prallen zwei Teilchen mit jeweils einer Energie E_0 aufeinander, so steht die volle doppelte Energie $2E_0$ zur Verfügung:

$$E = 2E_0$$

Um zu berechnen, wie die Sache aussieht, wenn eines der Teilchen mit Masse m ruht, muss man die Relativitätstheorie um Rat fragen. Das soll hier nicht geschehen. Das Ergebnis sei aber dennoch verraten:

$$E = \sqrt{2m(E_0 + m)}$$

Wie hoch müsste die Energie der Elektronen bei HERA sein, wenn die Protonen ruhten?

Wenn HERAs Elektronen mit einer Energie von 30 Milliarden Elektronenvolt auf HERAs Protonen mit einer Energie von 820 Milliarden Elektronenvolt geschossen werden, wird eine Energie von 314 Milliarden Elektronenvolt frei.

Wie hoch müsste die Energie der Elektronen sein, wenn die Protonen ruhten?

Aus der Gleichung:

$$314 \times 10^9 eV = \sqrt{938 \times 10^6 eV (E + m_{Proton})}$$

ergibt sich mit der Masse fürs Proton ($m_{Proton} = 938 \times 10^6 eV$) eine Energie der Elektronen von 53 Billionen Elektronenvolt. Dies liegt weit jenseits der heute erreichbaren Energien.

KworkQuarkQuiz **

2.2.8

Haben Sie alles verstanden? Das Wichtigste behalten? Testen Sie hier Ihr Wissen.

Elektronenvolt

Was ist das Elektronenvolt?

- Das Elektronenvolt ist eine Einheit der Energie, die vornehmlich in der Hochenergiephysik verwendet wird.
- Das Elektronenvolt ist die Energie, die ein Auto bei einer Geschwindigkeit von hundert Kilometern pro Stunde hat.
- Das Elektronenvolt ist die Energie eines Elektrons, nachdem es eine Spannung von einem Volt durchlaufen hat.

Beschleunigen: Neutronen

Lassen sich Neutronen mit Hilfe elektrischer Felder beschleunigen?

- Ja.
- Nein.

Kreis- und Linearbeschleuniger

2.3

Ob nun lang oder kurz, geradeaus oder krumm – für jeden Verwendungszweck gibt es das passende Beschleunigermodell.

Krumm gelaufen... *

2.3.1

DESYs Beschleuniger HERA ist rund. Den Vorteil von Ringanlagen kennen auch Fans der Formel-1. Zwar sind Kollisionen im Rennsport eher unerwünscht, nicht aber das Vorbeifahren der Wagen an der Zuschauertribüne – an der muss jeder Fahrer immer wieder vorbei.

Zu fortwährender Wiederkehr kommt es auch bei ringförmigen Beschleunigern. Hier können dieselben Beschleunigungselemente bei jedem Umlauf erneut verwendet werden. Auf diese Weise lassen sich einfacher höhere Energien erreichen.

Ringanlagen helfen auch, wenn es zu Zusammenstößen kommen soll. Denn wenn man einen Haufen Protonen und einen Haufen Elektronen aufeinander wirft, passiert meist gar nichts. Da die Teilchen winzig sind, fliegen sie meist ohne Kollision aneinander vorbei. Dumm gelaufen. Besser daher: krumm gelaufen. Denn in Ringbeschleunigern kann man den vermeintlichen Zusammenstoß mit denselben Teilchen nahezu beliebig oft wiederholen.

2.3.2 ...oder geradeaus? *

Als Alternative zu gigantischen Ringbeschleunigern tüfteln Physiker an geraden (linearen) Anlagen. Die dabei zu meistern den technischen Hürden waren hoch, sind aber gemeistert.

Im Gegensatz zu Ringbeschleunigern müssen die Teilchen bei geraden Beschleunigern in einem Rutsch auf hohe Energien gebracht werden. Auch müssen die Teilchenstrahlen besonders intensiv sein, damit es überhaupt zum Zusammenstoß kommt. Denn eine zweite Chance bei einer nächsten Runden gibt es hier nicht.

Dies stellt die Physiker bei der Konstruktion solcher Maschinen vor besonders knifflige Aufgaben. In internationaler Zusammenarbeit wird derzeit ein solcher linearer Beschleuniger geplant: der International Linear Collider ILC – basierend auf einer Beschleunigungstechnologie, die bei DESY entwickelt wurde.

2.3.3 Der erste Kreisbeschleuniger: Das Zyklotron ***

Der erste Kreisbeschleuniger wurde in den 1930er Jahren entwickelt – und zwar von Ernest Orlando Lawrence in Berkeley (USA), der dafür im Jahr 1939 den Physik-Nobelpreis erhielt.

Die Hochzeiten der Zyklotrone sind vorbei. Diese Beschleuniger werden nämlich recht schnell unhandlich, um hohe Energien zu erreichen. So wurde das größte Zyklotron 1954 im russischen Dubna gebaut und brachte 7.200 Tonnen auf die Waage.

Ein Zyklotron besteht aus zwei D-förmigen Kammern, zwischen denen eine Wechsellspannung angelegt wird. Diese ist immer so gepolt, dass die Teilchen beschleunigt und nicht abgebremst werden, wenn sie sich im Spalt zwischen den beiden Kammern befinden. Die Kammern selbst sind von einem Magnetfeld durchsetzt, das die Teilchen auf eine Kreisbahn zwingt. Mit zunehmender Energie wird die Kreisbahn der Teilchen immer größer, bis sie das Zyklotron verlassen.

Das Zyklotron kann nur bei nicht-relativistischen Teilchen verwendet werden (deswegen meist Protonen, keine Elektronen), weil es sonst zu Taktlosigkeiten kommt und die Beschleunigungsspannung nicht mehr in die richtige Richtung zeigt. Maschinen, die diesen Effekt ausgleichen heißen Synchrozyklotrons. Bei ihnen ändert sich die Stärke des Magnetfeldes mit der Zeit.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: Ein Elektron kreist in einem Zyklotron und wird immer schneller. Dabei vergrößert sich der Radius der Bahn, bis das Teilchen das Zyklotron verlässt.

Abbildung 2.5: Funktionsweise eines Zyklotrons

Energien, die man in einem Zyklotron erreichen kann.

Gehen wir davon aus, dass sich die Geschwindigkeit der Teilchen noch weit unter der des Lichts bewegt. Dann gilt für die Bewegungsenergie:

$$W = \frac{p^2}{2m}$$

Auf der anderen Seite gilt für die Bahn des Teilchens, dass Lorentz-Kraft und Radialbeschleunigung im Gleichgewicht sind

$$F_{mag} = qvB = \frac{q}{m}pB$$

$$F_Z = \frac{mv^2}{m} = \frac{p^2}{mR}$$

$$p = qBr$$

$$W = \frac{q^2B^2r^2}{2m}$$

Bei einem Proton, einem Magnetfeld von 1,6 Tesla und einem Zyklotronradius von 0,3 Metern ergibt dies: 11 Millionen Elektronenvolt.

2.3.4 Synchrotron und Speicherring *

Um noch höhere Geschwindigkeiten zu erreichen, werden lineare Beschleuniger verwendet, die durch Kurvenstücke miteinander verbunden sind.

Die Magnetfeldstärke muss jedoch mit zunehmender Teilchenenergie anwachsen, also synchronisiert werden. Denn je größer die Energie eines Teilchens, umso stärker muss ein Magnetfeld sein, dass es auf eine Kreisbahn zwingt. Wegen des Abstimmungsaufwandes heißen solche Maschinen „Synchrotrone“.

Der Speicherring ist eine Weiterentwicklung des Synchrotrons, in dem die Teilchen, nachdem sie ihre Zielenergie erreicht haben, noch weiter ihre Kreise ziehen, um damit die Anzahl der möglichen Zusammenstöße zu erhöhen. Denn wenn Teilchenpakete aufeinander treffen, heißt das noch lange nicht, dass auch etwas passiert:

Elektronen bei HERA legen auf diese Weise knapp elf Milliarden Kilometer zurück. Das ist einmal bis zum Rand unseres Sonnensystems und zurück.

2.3.5 Die Synchrotronstrahlungs-Not ... **

Gemäß Straßenverkehrsordnung wird die Änderung der Fahrtrichtung durch ein Lichtzeichen angezeigt. Zwingt man elektrisch geladene Teilchen auf eine Kreisbahn, strahlen auch diese Licht ab: so genannte Synchrotronstrahlung.

Für die Konstrukteure von Teilchenbeschleunigern ist diese Sache verflucht ärgerlich. Denn Licht abstrahlen kostet Energie. Und zwar umso mehr, je enger die Kurve und je größer die bereits vorhandene Energie ist. Irgendwann verlieren die Teilchen bei jedem Umlauf soviel Energie, dass fast alle Energie, die man hineinsteckt, direkt wieder als Licht herauskommt. Eine recht kostspielige Tunnelbeleuchtung.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: null

Abbildung 2.6: Teilchen in einer Kurve strahlen Synchrotronstrahlung ab. alt=Ein Teilchen fliegt um eine Kurve und strahlt dabei Licht ab.

Eine Lösung bestünde darin, noch größere Ringe zu bauen, weil dies die Kurven flacher macht. Das ist aber sehr, sehr teuer. Der mit 27

Kilometer Umfang derzeit längste Tunnel befindet sich am CERN. Die Teilchenphysik hat hier wohl das höchste der Gefühle erreicht.

Der Energieverlust in Zahlen

Für die abgestrahlte Leistung eines relativistischen Teilchens gilt:

$$P = \frac{q^2 c}{(6\pi\epsilon_0(m_0c^2)^2)} \frac{E^4}{R^2}$$

Wieso ist die Synchrotronstrahlung bei Elektronen ärgerlicher als bei Protonen?

Antwort: Die Ruhemasse m_0 eines Teilchens geht als vierte Potenz in den Energieverlust durch Synchrotronstrahlung ein. Ein Elektron ist 2.000-mal leichter als das Proton. Entsprechend ist der Energieverlust 160 Billionen-Mal größer.

... zur Tugend gemacht. **

2.3.6

Einige Physiker haben aus der Synchrotronstrahlungsnot eine Tugend gemacht. Denn diese Strahlung mag bei der Beschleunigung von Teilchen ärgerlich sein; bei der Untersuchung von Materialien und Werkstoffen ist diese Strahlung normalem Licht und sogar LASERlicht in einigen Punkten überlegen.

Bei DESY gibt es mit dem HASYLAB ein eigenes Labor, in dem Synchrotronstrahlung für Forschungszwecke benutzt wird. Dort wird ein eigener Beschleuniger für die Erzeugung von Synchrotronstrahlung betrieben: DORIS.

Worin zeichnet sich Synchrotronstrahlung aus?

Synchrotronstrahlung ist linear polarisiert, sehr intensiv und deckt einen großen spektralen Bereich bis hin zur Röntgenstrahlung ab.

Einsatzbereiche für Synchrotronstrahlung gibt es viele: Synchrotronstrahlung kann zum schonenden Röntgen von Herzkranzgefäßen genutzt werden, um das Molekül des Giftes einer Klapperschlange dreidimensional zu photographieren oder um winzige Risse in einem Flugzeugflügel aufzudecken. Synchrotronstrahlung ist ein Tausendsassa! Mit

FLASH bei DESY wurde ein Röntgenlaser gebaut, der besonders intensives Licht im weichen Röntgenbereich aussendet. Er ist der Prototyp zum europäischen XFEL (x-ray free electron laser), an dem es ab 2013 in der Nähe von DESY sogar möglich sein wird, chemische Reaktionen zu filmen.

Kapitel 3

Teilchen streuen

Wie man das Unsichtbare sichtbar macht

Quarks und Elektronen sind unvorstellbar klein. Dennoch bekommen Physiker Bücherregale mit den Eigenschaften dieser Teilchen gefüllt. Wie ihnen das gelingt, erfahren Sie hier.

Um die Ecke geschaut

3.1

Direkt sehen können auch Teilchenphysiker das Allerkleinste nicht, sie müssen um die Ecke schauen. Dabei helfen ihnen so genannte Streuexperimente. Was dabei passieren kann, lernen Sie hier.

Crash-Tests im Kleinen **

3.1.1

In modernen Teilchenphysik-Experimenten werden Teilchen auf hohe Energien gebracht und aufeinander geschossen. Mit diesen Crash-Tests im Kleinen versuchen Wissenschaftler der Natur des Allerkleinsten auf die Schliche zu kommen.

Kein Mensch hat jemals ein Elektron oder Quark mit eigenen Augen gesehen. Das hindert Physiker nicht daran, laufend Neues über

die Eigenschaften dieser Objekte zu veröffentlichen, dabei in fernen Städten zu tagen und über neue Instrumente zu beraten, mit denen das Unsichtbare nun noch sichtbarer gemacht werden soll. Wirklich sehen kann man dabei nur jene kilometerlangen und wohnblockgroßen Maschinen, mit denen Physiker die Welt des Allerkleinsten in die unsrige rücken: Teilchenbeschleuniger und Teilchendetektoren.

Diese Geräte sind so kompliziert, dass sie von bis zu mehreren tausend Wissenschaftlern betreut werden müssen. Darunter befindet sich längst niemand mehr, der über Sinn und Zweck eines jeden Kabels Bescheid weiß. Für alles gibt es Experten, die das zuweilen unmöglich Scheinende zustande bringen: gemeinsam wissenschaftliche Ergebnisse zu produzieren.

Und wenn die Maschinen schließlich laufen, wenn der Beschleuniger beschleunigt, der Detektor detektiert, dann ist noch lange nicht Feierabend. Dann gilt es, Herr und Dame über die Telefonbücher füllenden Mengen an Daten zu werden, die von den Detektoren ausgespuckt und mit eigens dafür geschriebenen Computerprogrammen ausgewertet werden.

Aus diesen Daten rekonstruieren die Forscher, was im Detektor geschah, nachdem winzige Teilchen bei hohen Energien aufeinander prallten: Von diesen Crash-Tests im Allerkleinsten handelt dieses KworkQuark-Thema.

3.1.2 Streu-Experiment I: Um die Ecke geschaut *

Der Weg zur Erkenntnis führt in der modernen Physik über das Streu-Experiment. Das ist der Fachausdruck der Physiker, wenn sie Dinge aufeinander werfen und schauen, was hinten herauskommt.

Streuung gibt's überall. Zum Beweis laden wir Sie zu einem kleinen Spaziergang ein: Was passiert eigentlich, bevor Sie an einem sonnenverwöhnten Frühlingmorgen einen Marienkäfer erspähen? Es beginnt rund 150 Millionen Kilometer entfernt in der Sonne, wo sich Licht in Form eines Photons zielstrebig aufmacht zu einem Planeten mit Namen Erde.

Nach rund acht Minuten Reisezeit von der Sonne zur Erde prallt das Lichtteilchen auf einen Marienkäfer und wird verschluckt. Doch dieses jähe Ende ist Beginn: Neue Photonen mit der Farbe Rot entstehen. Einige dieser Photonen treffen auf Ihre Netzhaut und werden dort zu elektrischen Signalen. Andere Photonen verfehlen den Marienkäfer, treffen ein Blatt, werden dabei ganz grün und zu anderen Si-

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: Ein Photon macht sich von der Sonne aus auf den Weg zur Erde. Dort prallt es auf einen Marienkäfer, wechselt seine Farbe und wird zu einem Auge abgelenkt. Das Gehirn rekonstruiert auf Grundlage vieler solcher Photonen das Bild des Marienkäfers.

Abbildung 3.1: Von der Sonne in den Kopf: der lange Weg eines Photons

gnalen. Die unterschiedlichen Farben und das ausgefeilte Multimedia-Betriebssystem Ihres Gehirns ermöglichen Ihnen dann, Marienkäfer von Blättern zu unterscheiden.

Direkt nehmen Sie den Marienkäfer nicht wahr. Sie brauchen Hilfe durch Photonen, um von seiner Existenz zu erfahren: Sie müssen um die Ecke schauen. Das ist das Prinzip der Streuung. Es funktioniert an einem sonnenverwöhnten Frühlingsmorgen ebenso wie in den Detektoren moderner Physikexperimente.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] ein Dreieck, ein Quadrat und ein Kreis werden mit Bällen beworfen, die an den drei Objekten abprallen. Die Objekte sind verdeckt, so dass anhand der Streuung der Bälle Rückschlüsse auf die Form der Objekte gezogen werden können. Die Verdeckung lässt sich entfernen. Lernziel: Über die Streuung von Teilchen an Objekten können Rückschlüsse auf die Form des Objektes gezogen werden.

Abbildung 3.2: Drumrumgeschaut! Welche Objekte befinden sich hinter den Fragezeichen?

Streu-Experiment II: Reingeschaut *

3.1.3

Mit Streu-Experimenten kann man nicht nur auf Dinge drauf, sondern auch in sie hineinblicken. Nichts anderes passiert beim medizinischen Röntgen.

Röntgenlicht ist energiereicher als normales Licht und prallt daher nicht an der Haut ab; beim Röntgen flitzen die meisten Photonen durch Ihren Körper hindurch. Einige von ihnen bleiben jedoch in den Knochen auf der Strecke, schaffen es nicht auf die Photoplatte und lassen durch ihr Fehlen Rückschlüsse auf das Innere Ihres Körpers zu.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Drei Objekte (Quadrat, Dreieck, Kreis) sind zu einem großen, kreisförmigen Objekt zusammengefasst. Dieses Objekt kann mit (1) großen, langsamen Bällen beworfen werden (Dabei prallen die großen Bälle an der Außenschale des zusammengesetzten Objektes ab.), (2) mit kleinen, langsamen Bällen beworfen werden (Dabei prallen die kleinen an den Bestandteilen ab, wie in der vorherigen Interaktion.) und (3) mit kleinen, schnellen Bällen beworfen werden (Dabei werden die Bestandteile aus dem Ball gerissen (tief-inelastischer Prozess).

Abbildung 3.3: Reingeschaut! Je höher die Energie, umso tiefere Einblicke erhält man.

Mit DESYs Beschleuniger HERA röntgerten Physiker Protonen, die Kerne des Wasserstoffs. Dazu nahmen sie Photonen, die noch viel energiereicher sind als jene beim Röntgen. Sie werden von Elektronen abgestrahlt, wenn man mit ihnen auf die Protonen zielt.

Doch Vorsicht: Wenn Sie HERA nutzen wollen, um Ihre Knochenbrüche zu untersuchen, dann seien Sie gewarnt! Selbst wenn es Ihnen gelänge, die zahlreichen Sicherheitsvorkehrungen zu umgehen, würde es nur eine kurze Weile dauern, bevor Ihnen ganz merkwürdig zumute würde und Sie niemals mehr einen Arzt bräuchten. Denn die Energien der Photonen bei HERA sind so groß, dass damit Quarks aus den Protonen geschlagen werden können. Das macht nicht nur Protonen kaputt, sondern auf Dauer auch Sie.

Physiker jedoch sind begeistert, dass sie mit HERA so tief in das Innere des Protons blicken können. Sie nennen die Sache aber nicht „Ins-Proton-schauen-indem-man-es-kaputt-macht“, sondern sprechen bescheiden von „tief-inelastischer Streuung“.

3.1.4 Streu-Experiment III: Neues gemacht *

Teilchenphysiker machen in ihren Experimenten wirklich Neues: Die meisten Teilchen, die dort entstehen, gab es vorher nicht.

Neues besteht meist aus recht Altem: Autoren stellen bekannte Wörter auf neue, noch nie gelesene Weise zusammen und Architekten schaffen aus Sand und Schiefer neue, noch nie betretene Gebäude. All das ist neu in seiner Form. Doch die Zutaten, die Wörter oder der Sand und Schiefer, haben vorher schon existiert.

Teilchenphysiker können wirklich Neues schaffen: Teilchen, die so zuvor noch nicht existierten. Die Forscher stecken dabei mit der Quanten- und Relativitätstheorie unter einer Decke. Denn danach können aus Energie neue Bewohner des Mikrokosmos entstehen.

Solche Kreativität wird beispielsweise frei, wenn Elektronen auf ihre Antiteilchen, die Positronen, stoßen. Dann bilden sich Teilchen wie Photonen, Zs, Neutrinos oder Quarks, die vorher alle noch nicht waren. Damit haben wir den dritten Typus von Streu-Experiment. Auch hier werden Dinge aufeinander geworfen. Auch hier schauen Physiker, was hinten herauskommt. Nur geht es hier weniger um die gestreuten Teilchen selbst als um das, was bei der Streuung entsteht.

Vom Atomkern zu den Quarks

3.2

Mit Hilfe von Streuexperimenten gelang es Teilchenphysikern, immer tiefer in die Natur zu blicken. Auf diese Weise entdeckten Sie die Atomkerne ebenso wie die Quarks.

Der Kern der Dinge *

3.2.1

Der Atomkern wurde entdeckt, als Forscher Goldatome mit anderen Teilchen beschossen.

1911 wurde das Atom vermessen. Ein Team um den britischen Physiker Ernest Rutherford (1871–1937) beschoss es dazu mit so genannten Alphateilchen. Die Forscher wussten bereits, dass diese Teilchen irgendetwas mit Heliumatomen zu tun hatten. Dass es sich um die winzigen Atomkerne von Helium handelte, wussten sie noch nicht. Ansonsten hätten sie sich wohl die Mühe erspart, den Atomkern ein zweites Mal zu entdecken.

Mühevoll war der Versuch. Rutherfords Team saß stundenlang in einem abgedunkelten Raum und zählte die Blitze, die beim Aufprall der Teilchen auf einer Nachweisschicht entstanden. Heute wäre alles so viel einfacher gewesen: Man hätte das Experiment aufgebaut, eingeschaltet und sich einen schönen Abend gemacht. Das Ergebnis hätte dann am folgenden Tag von daheim über einen Web-Browser abgerufen werden können. Gezählt wurde damals aber noch per Auge und Hand.

Aus den Positionen der Blitze konnten Rutherford und Co. auf die Ablenkung der Alphateilchen schließen. Dass dabei eines von achttausend Teilchen (zählen Sie einmal 8.000 Blitze!) nicht durch die Folie ging,

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Kreis mit Goldfolie in der Mitte. Über radial angeordnete Balken wird das Zähl-Ergebnis der Rutherfordgruppe verdeutlicht. Die Balken zeigen eine normierte Häufigkeitsverteilung an.

Abbildung 3.4: Der Rutherfordsche Streuversuch in Zeitraffer: Die meisten Teilchen gingen wie erwartet ohne große Ablenkung hindurch. Dass einige Teilchen zurückprallten, konnte das gängige Atommodell nicht erklären.

sondern zurückprallte, war zunächst unerklärlich. Die Forscher waren davon ausgegangen, dass die Teilchen allerhöchstens leicht abgelenkt werden. Die Kehrtwenden ließen sich jedoch nur mit einer völlig neuen Idee erklären: Im Inneren der Atome liegt ein kleiner, schwerer Kern. Der Rest des Atoms ist größtenteils Nichts.

3.2.2 Modell-Wettbewerb **

Wer forscht, muss kritisch vergleichen können. Auch bei der Entdeckung des Atomkerns mussten die experimentellen Daten genau mit den theoretischen Rechnungen in Einklang gebracht werden.

Vergessen Sie bitte für die nächsten 774 Zeichen, dass es im Inneren des Atoms einen Kern gibt! Dazu müssen Sie sich zeitlich noch nicht einmal allzu weit zurückversetzen: Physiker waren noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts davon ausgegangen, dass das Atom wie ein Rosinenkuchen aufgebaut ist. Die Rosinen stellen die leichten Elektronen dar, während der größte Teil der Masse im Teig untergebracht ist. Beim Beschuss eines solchen Rosinenkuchens mit Teilchen, die viel schwerer als die Elektronen (Rosinen) sind, werden die Teilchen kaum abgelenkt, wie Rechnungen zeigen.

Im Falle eines Atomkerns sind Ladungen und Massen hingegen nicht gleichmäßig im Atom verteilt: Durch die dünne Elektronenhülle flitzen die Teilchen ungehindert durch. Doch an den schweren Kernen können sie abprallen.

Aber auch noch andere Modell sind denkbar. Das einer harten Kugel etwa, an der alle Teilchen abprallen, oder das eines kleinen Wurzelgnoms, der im Inneren des Kerns sitzt und nach Gutdünken die Teilchen verteilt.

Welches dieser Modelle nun zutrifft, lässt sich experimentell untersu-

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Das Messergebnis des Rutherford'schen Streuversuchs kann mit unterschiedlichen Atommodellen verglichen werden: (1) Rosinenkuchenmodell, (2) Atomkern, (3) Kugel und (4) Wurzelgnom. Das Modell mit dem Atomkern passt am besten.

Abbildung 3.5: Der Vergleich der experimentellen Daten mit dem Experiment lässt die Entscheidung für ein Modell nicht schwer fallen.

chen. Dazu berechnet man die theoretische Verteilung und vergleicht sie mit den Ergebnissen des Experiments.

Rutherford's menschliche Addiermaschinen zählten den zweiten Fall: Das Rennen machte die Theorie mit dem Kern.

Die Rutherford'sche Streuformel

Wenn man ein Teilchen mit der elektrischen Ladung q_a an einem ruhenden Teilchen der Ladung q_b streut, wird es abgelenkt.

Die Wahrscheinlichkeit für die Ablenkung hängt vom Ablenkwinkel und der Energie des gestreuten Teilchens ab. Sie wird durch die Rutherford'sche Streuformel beschrieben. Diese Formel gibt den so genannten differentiellen Wirkungsquerschnitt an. Wenn man diese Größe mit der Luminosität des Experiments multipliziert, erhält man die Anzahl der Teilchen pro Winkelbereich:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{(4\pi\epsilon_0)^2}{16} \frac{q_a q_b}{E_a^2 \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

Rutherford, die zweite **

3.2.3

Was Wissenschaftler Anfang des 20. Jahrhunderts mit dem Atom anstellten, wurde knapp fünfzig Jahre später mit dem Proton, dem Atomkern des Wasserstoffs, wiederholt. Das Ergebnis waren Photos vom Proton.

In den 1950er Jahren schoss ein Team um den Physiker Robert Hofstadter Elektronen auf ein Wasserstoffgas. Die Elektronen hatten sie zuvor auf eine Energie beschleunigt, die rund 50 Mal größer war als die

der Heliumkerne bei Rutherfords Experiment. Mit der höheren Energie, konnte man Protonen besser vermessen.

Wären Protonen feste Kugeln (oder hätten einen schweren Kern), so hätte die Elektronen ähnlich abgelenkt werden müssen, wie die Heliumkerne bei Rutherfords Versuch. Es wurden aber viel weniger Teilchen stark abgelenkt, als es der Fall hätte sein müssen.

Hofstadters Schluss: Das Proton ist kein punktförmiges Teilchen. Vielmehr hat es einen Radius von rund 2×10^{-15} Metern. Er konnte auch die Ladung im Inneren des Protons genau vermessen: Sie ist über das ganze Innere verschmiert. Für dieses Bild vom Proton bekam der Photograph Robert Hofstadter 1961 den Nobelpreis.

Im Laufe der Zeit wurden die Energien größer und die Photos immer detailreicher.

3.2.4 Das Proton von innen **

Robert Hofstadter hatte gezeigt, dass das Proton nicht punktförmig ist. Damit lag der Verdacht nahe, dass es aus anderen Dingen zusammengesetzt sein könnte. Um herauszufinden, was das sein könnte, musste man tiefer und genauer in das Proton blicken.

Für einen besseren Blick ins Proton brauchte man mehr Energie. Die entsprechend leistungsstarken Beschleuniger wurden in den 1960er Jahren am SLAC in Kalifornien und bei DESY in Hamburg gebaut.

Am SLAC schauten die Physiker Henry Kendall, Jerome Friedman und Richard Taylor ins Proton. Für die Erklärung der Ergebnisse dieser Experimente nahm Richard Feynman an, die Protonen seien aus so genannten Partonen zusammengesetzt. Nach einigem Hin und Her wurden die Partonen als Quarks und Gluonen, die Träger der starken Wechselwirkung, identifiziert.

Tief-inelastische und elastische Streuung

Bei den Experimenten am SLAC wurde das Proton zuweilen stark in Mitleidenschaft gezogen. Solche Vorgänge, bei denen Energie von den Elektronen an das Proton übertragen wird, heißen tief-inelastisch. Im Gegensatz zu den vorherigen Experimenten von Rutherford und Hofstadter: Rutherfords Alphateilchen konnten den Atomen nicht viel anhaben. Auch Hofstadters Elektronen wurden lediglich vom Proton abgelenkt, kaputtmachen konnten sie es nicht. Diese beiden Streuveruche heißen elastisch.

HERA *

3.2.5

DESY hatte 1990 die Nachfolge Rutherfords übernommen. DESYs größter Beschleuniger HERA war weltweit die einzige Anlage, die Elektronen und Protonen getrennt beschleunigte und dann aufeinanderstoßen ließ. Auf diese Weise wurde in das Innere des Protons geblickt.

Wenn Elektronen und Protonen bei HERA aneinandergerieten, konnten die Elektronen mit den Quarks in den Protonen wechselwirken. Dies geschah immer indirekt über den Austausch eines Wechselwirkungsteilchens, eines Photons oder Zs oder W-Plus bzw. W-Minus.

Mit den Energien, die bei HERA erreicht werden, können Strukturen von bis zu 10^{-18} Meter erkannt werden. Das ist 1.000-Mal kleiner als der Protonenradius. Kein Mikroskop kann genauer hinschauen.

Die HERA-Forscher nutzten die Ergebnisse der Zusammenstöße, um sich gleich einer ganzen Liste von Fragen anzunehmen:

- ▷ Sind Elektronen und Quarks aus etwas Kleinerem zusammengesetzt?
- ▷ Wie genau laufen die elektromagnetische und schwache Wechselwirkung ab?
- ▷ Gibt es eine Vereinigung der beiden Kräfte?
- ▷ Wird die starke Wechselwirkung mit der so genannten Quantenchromodynamik korrekt beschrieben?
- ▷ Gibt es neue Teilchen und Wechselwirkungen?

KworkQuarkQuiz **

3.2.6

Überprüfen Sie, was Sie gelernt haben:

Atomkern

Wie entdeckte Rutherford den Atomkern?

- Er untersuchte Alphateilchen mit Hilfe eines Mikroskops.
- Er beschoss eine Goldfolie mit Heliumatomen.
- Er wickelte den Kern in eine Goldfolie ein und wartete ab.

Verwunderung

Was verwunderte Rutherford bei seinem Experiment?

- Er hatte nicht damit gerechnet, dass jemand 8000 Blitze zählen kann.
- Er hatte nicht damit gerechnet, dass einige Teilchen zurückprallen.
- Er hatte nicht damit gerechnet, dass so viele Teilchen durch die Folie gehen.

Größe

Wie groß ist das Proton?

- 0,000 000 000 000 000 001 Meter
- 0,000 000 000 000 001 Meter
- 0,000 000 000 1 Meter

3.3 Moderne Streuexperimente

In modernen Teilchenphysik-Experimenten werden Teilchen auf hohe Energien gebracht und aufeinander geschossen. Die Ergebnisse dieser Crash-Tests im Kleinen werden in modernen Teilchendetektoren untersucht. Darüber erfahren Sie hier mehr.

3.3.1 Teilchennachweis *

Mit bloßen Augen kann man Elektronen und Quarks nicht sehen. Aber auch Sternschnuppen am Himmel wären für das menschliche Auge unsichtbar, wenn sie sich nicht durch Leuchtspuren in der Atmosphäre verraten würden.

Um die Bahnen und Eigenschaften von Teilchen zu vermessen, die an den Zusammenstößen in modernen Teilchenphysikexperimenten beteiligt sind, setzen die Physiker Detektoren ein, in denen sich elektrisch geladene Teilchen durch charakteristische Spuren zu erkennen geben.

Ionisation

Bei lichtschnellen Teilchen hängt die Zahl der durch Ionisation erzeugten Elektronen nur von der Ladung der Teilchen ab. In einem festen Material sind es einige tausend pro Zentimeter, in einem Gas bei Normaldruck sind es einige Dutzend bis hundert Elektronen.

3.3.2 Großdetektoren *

Im Laufe der Zeit haben sich Physiker Dutzende unterschiedliche Detektortypen ausgedacht. Sie alle sind auf bestimmte Aufgaben spezialisiert und wirken in Großdetektoren zusammen.

Die unterschiedlichen Typen von Teilchendetektoren haben jeder ihre Vor- und Nachteile und sind meist für die Beantwortung einer ganz speziellen Frage geeignet:

- ▷ Um welches Teilchen handelt es sich?
- ▷ Wie groß ist die Energie des Teilchens?
- ▷ In welcher Richtung ist es unterwegs?

Es gibt keinen Detektortyp, der alles gleich gut kann. Daher kommen mehrere von ihnen in modernen Großdetektoren zum Einsatz. Dort sind sie meist wie Zwiebelschalen umeinander gelegt. Moderne Detektoren der Teilchenphysik werden damit schnell zu gewaltigen und hochkomplexen Geräten. Der größte Detektor an einem Teilchenbeschleuniger, ATLAS am LHC, ist 22 Meter hoch und 45 Meter lang.

Und das sind die einzelnen Komponenten im Detail:

- ▷ Spurdetektoren

Im Inneren eines Großdetektors werden die Spuren vermessen, die elektrisch geladene Teilchen hinterlassen. Wenn die Teilchen dabei ein magnetisches Feld durchfliegen, ist ihre Bahn gekrümmt. Anhand der Krümmung lassen sich Rückschlüsse auf den Impuls (Geschwindigkeit mal Masse) und die Ladung der Teilchen ziehen.

- ▷ Kalorimeter

In Kalorimetern wird die Energie der Teilchen bestimmt. Es werden dabei zwei Typen von Kalorimetern unterschieden: Elektromagnetische Kalorimeter bestimmen die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen. Hadronische Kalorimeter kümmern sich um alle Teilchen, die aus Quarks zusammengesetzt sind, die Hadronen.

- ▷ Magnete

Im Inneren von Großdetektoren herrschen Magnetfelder, die bis zu 100.000-mal stärker sind als das Magnetfeld der Erde. Dies krümmt die Bahnen geladener Teilchen auf verräterische Weise.

- ▷ Myonkammer

Myonen, die schweren Vettern der Elektronen, durchfliegen alle inneren Detektorschichten und werden in den ganz außen liegenden Myonkammern nachgewiesen.

- ▷ Elektronikcontainer

Nur mit Hilfe elektronischer Rechenknechte können Physiker die unvorstellbaren Informationsmengen bewältigen, die in Großdetektoren anfallen: Die Hard- und Software in Elektronikcontainern entscheidet, ob sich bei einem Zusammenstoß auch etwas Spannendes ereignet hat. Die „schlechten“ Ereignisse wandern ins Daten-

Nirvana, nur die „guten“ Ereignisse bekommen die Physiker zu Gesicht.

3.3.3 **Teilchennachweis im Groß-Detektor** **

Die verschiedenen Teilchen geben sich durch verschiedene Spuren in den einzelnen Detektorschichten zu erkennen.

Nachweis von Photonen **

Bei Photonen kommt es nur zu einem einzigen Energienachweis im elektromagnetischen Kalorimeter. In den Spurdetektoren gibt es kein Signal, weil Photonen keine elektrische Ladung besitzen. Da die Teilchen zudem ihre gesamte Energie im elektromagnetischen Kalorimeter verlieren, schaffen sie es auch nicht weiter.

Nachweis von Elektronen und Positronen **

Da Elektronen und Positronen elektrisch geladen sind, können ihre Spuren in den Spurdetektoren nachgewiesen werden. Im elektromagnetischen Kalorimeter kann die Energie der Teilchen bestimmt werden. Weiter kommen sie nicht.

Nachweis von Quark-Verbindungen **

Wenn es zu einem Energienachweis im hadronischen Kalorimeter kommt, ist man wahrscheinlich einem Teilchen, das aus Quarks besteht, auf der Spur. Schlug zudem die Spurkammer an, so war das Teilchen elektrisch geladen, ansonsten neutral.

Nachweis von Myonen **

Myonen reagieren nur schwach mit Materie. Sie durchqueren daher die Kalorimeter ungestört und sorgen auch noch in den Myonkammern für Signale.

Nachweis von Neutrinos **

Neutrinos hinterlassen überhaupt keine Spuren in einem Großdetektor. Ihre Anwesenheit kann nur indirekt bestimmt werden: Wenn die Energie der Teilchen nach dem Zusammenstoß kleiner ist als die Energie vor dem Zusammenstoß, war bestimmt ein Neutrino entwischt.

Nachweis von extrem kurzlebigen Teilchen (Resonanzen) **

Es gibt Teilchen, die so kurzlebig sind, dass sie selbst bei Lichtgeschwindigkeit noch nicht einmal den Radius eines Protons durchqueren können. Entsprechend müßig ist der Versuch, sie direkt in einem Detektor nachzuweisen. Hier helfen nur indirekte Methoden, dass beispielsweise die Reaktionsrate drastisch ansteigt, wenn die freiwerdende Energie der Masse eines solchen Teilchens entspricht.

Wirkungsquerschnitt und Luminosität ***

3.3.4

Zusammenstöße von Teilchen gehören zu den wenigen Dingen, aus denen Physiker ihr Wissen über die Natur der kleinsten Dinge ziehen können. Gerade für solche Zusammenstöße werden Elektronen, Protonen und Konsorten in riesigen Beschleunigern auf extrem hohe Energien gebracht und – unter physikalischer Aufsicht – aufeinander geschossen.

Abwechslung ist dabei vorprogrammiert: Denn wenn sich zwei Teilchen treffen, heißt das noch lange nicht, dass auch immer dasselbe herauskommt. Bei DESYs Beschleuniger HERA beispielsweise wurden Elektronen auf Protonen beschleunigt. Passieren konnte dabei Vielerlei: So wurde das eine Mal ein Elektron vielleicht stark abgelenkt, ein weiteres Mal nur schwach und beim nächsten Zusammenstoß zerlegte es das Proton in seine Einzelteile. Was wann wie passierte, wusste niemand genau. Im Mikrokosmos regiert der Zufall.

Der **Wirkungsquerschnitt** einer Reaktion beschreibt nun die Wahrscheinlichkeit, dass eben diese auch eintritt. Eine solche Reaktion könnte beispielsweise sein: Ein Elektron wird um 45 Grad nach oben abgelenkt.

Teilchenphysiker verbringen nun einen großen Teil ihrer Zeit damit, konkrete Zahlen für diese Wahrscheinlichkeiten zu berechnen. Dazu zählen sie, wie oft etwas geschieht, wie oft beispielsweise ein Elektron um 45 Grad nach rechts abgelenkt wird.

Man kann sich nun leicht klar machen, dass diese Anzahl davon abhängt, wie häufig sich die Reaktionspartner über den Weg laufen. Wenn die Teilchenstrahlen recht dicht sind, wird mehr passieren, als wenn große Lücken zwischen den einzelnen Teilchen existieren. Daher brauchen die Physiker neben der Anzahl der Reaktionen noch einen Wert für die Chance des „Sich-über-den-Weg-Laufens“. Diese Größe heißt **Luminosität** und hängt vom Teilchen-Beschleuniger ab. Je höher die Lu-

minosität und je höher der Wirkungsquerschnitt einer Reaktion, umso öfter tritt diese Reaktion auch auf.

Um möglichst viel Datenmaterial für ihre Untersuchungen zu haben, sind Teilchenphysiker daher sehr daran interessiert, die Luminosität eines Beschleunigers zu erhöhen.

3.3.5 KworkQuarkQuiz **

Überprüfen Sie, was Sie gelernt haben:

Großdetektor: Zwiebel

Wieso sehen Großdetektoren wie Zwiebeln aus?

- Weil man sie aus Kostengründen nicht an einem Stück bauen kann.
- Weil jede Schicht eine eigene Aufgabe hat.
- Damit einem die Tränen kommen.

Großdetektor: Innerste Schicht

Wofür ist die innerste Schicht da?

- Zum Schutz vor Radioaktivität
- Zur Bestimmung der Teilchenbahnen
- Zur Energiemessung

Großdetektor: Kalorimeter

Was ist die Aufgabe von Kalorimetern?

- Bestimmung von Teilchenbahnen
- Gewichtsbestimmung
- Energiebestimmung

Großdetektor: Reihenfolge

Wieso sind in Großdetektoren Kalorimeter außerhalb der Spurkammern angebracht?

- Weil die meisten Teilchen in den Kalorimetern stecken bleiben.
- Weil man sonst zu Wartungszwecken nicht an die Kalorimeter herankommen kann.

Großdetektor: Magnet

Wofür befindet sich ein Magnet im Großdetektor?

- Um die Bahnen geladener Teilchen zu krümmen.
- Um die Bahnen aller Teilchen zu krümmen.
- Um den Detektor nach Norden auszurichten.

Großdetektor: Neutrinos

Womit werden in Großdetektoren Neutrinos nachgewiesen?

- ❑ In Neutrinokammern.
- ❑ In den Kalorimetern.
- ❑ Im Spurdetektor.

Quantenphysik

Sprünge im Universum

Fühlen Sie sich manchmal unverstanden? Dann geht es Ihnen wie der Quantentheorie. Sie hat zwar unser Leben revolutioniert, doch laufen ihre Ergebnisse unserem Alltagsverständnis zuwider.

Das Ende vom Ende

4.1

Ende des 19. Jahrhunderts lag die Physik in ihren letzten Zügen - dachten so einige. Es schien alles erforscht. Doch mit der Entdeckung der Quantentheorie bekam unser Weltbild Sprünge.

Dieser Artikel stellt das Phänomen vor, das der Quantentheorie zu ihrem Namen verhalf. Viele Eigenschaften von Quanten – wie beispielsweise die Energie von Lichtteilchen – können nur bestimmte Werte annehmen. Sollen sich solche gequantelte Größen ändern, so muss die Natur Sprünge machen.

Das Ende der Physik? **

4.1.1

Die Physik hätte ein so gutes Ende nehmen können: Um 1900 schienen alles erforscht. Zwar gab es da noch ein paar Probleme bei der Beschreibung der Strahlung heißer Körper. Aber solche Kleinigkeiten würden doch kaum noch das Weltbild revolutionieren, oder?

Das war's dann wohl: Ende! Finito! Schluss! Das 20. Jahrhundert sollte den glorreichen Abschluss bringen, die Physik als aktive Suche nach

der Erkenntnis beenden und die Physiker in die Arbeitslosigkeit entlassen. Denn war nicht alles erforscht? Physiker hatten das unteilbare Atom entdeckt. Auch wussten sie, wie man mit der Schwerkraft und dem Elektromagnetismus rechnet. Zwar gab es da noch eine ungeklärte Abweichung bei der Beschreibung heißer Körper. Aber bis man ihr den Garaus machen könnte, war bestimmt doch nur eine Frage der Zeit. Vorsichtshalber fragte der junge Max Planck dann auch nach, ob es denn überhaupt noch lohne, Physik zu studieren. Der Münchener Physiker von Jolly riet ihm ab: Alles Wesentliche sei erforscht, nur noch hier und da ein paar Lücken zu stopfen.

1918 erhielt Max Planck den Nobelpreis für Physik. Er hatte nicht auf von Jolly gehört, sich der heißen Körper angenommen und damit das Kapitel der Quantentheorie in der Physikgeschichte eröffnet. Die wissenschaftliche Fragestunde ging in eine neue Runde.

4.1.2 **Angequante Physik** **

Quantenphysik begann als reine Grundlagenforschung: Dass ihre Gründer zu Beginn vermutet hätten, dass heute rund ein Viertel des Bruttosozialprodukts der Vereinigten Staaten auf Anwendungen der Quantentheorie beruht, mag bezweifelt werden.

Ohne Quantentheorie gäbe es keinen Laser, und damit weder DVD noch moderne Augen-Operationen. Es gäbe keine Atomuhren, keine Mikrochips, keine Computer und keine Mikrowellenöfen. Von Kwork-Quark ganz zu schweigen. Unsere Welt wäre frei von Atomreaktoren, aber auch von Solarzellen und Energiesparlampen.

Und ein Ende der Anwendung ist nicht in Sicht: Vielleicht wird es schon bald die ersten Quanten-Computer geben. Sie würden alle bisher gekannte Rechenleistung in den Schatten stellen, und könnten im Nu verschlüsselte Nachrichten knacken, für die andere Rechner Jahrzehnte bräuchten. Geheimniskrämer müssen sich aber nicht sorgen: Mit Hilfe der Quantentheorie wurde ein Verschlüsselungsverfahren entwickelt, das absolut unknackbar ist und bereits funktioniert (Siehe Thementour: „??? [[quantenphysik-3]] ???“).

Der Nutzen von Grundlagenforschung lässt sich nie sicher abschätzen. Das wusste auch schon Michael Faraday (1791–1867). Ihm wird nachgesagt, dass er nach einem Vortrag über die elektromagnetische Induktion, vom britischen Premierminister gefragt wurde, welchen praktischen Nutzen das alles hätte. Faraday soll geantwortet haben: „Das

weiß ich noch nicht. Aber ich versichere Ihnen, dass Sie schon bald eine Steuer darauf erheben werden.“

Vorsicht Quantensprung! **

4.1.3

Von Quantensprüngen hört man immer wieder: Sie werden bei diplomatischen Verhandlungen gesichtet sowie in Wissenschaft und Technik. Doch Vorsicht! Quantensprünge sind die kleinsten Veränderungen, die ein physikalisches System durchmachen kann.

Betrachten wir ein Wasserstoff-Atom: Es besteht aus einem Atomkern (einem Proton), der von einem Elektron umkreist wird. Das Elektron kann sich auf unterschiedlichen Bahnen um das Proton bewegen. Jedoch lässt die Natur nicht beliebige Abstände zu: Zwischen zwei erlaubten Bahnen befindet sich eine verbotene Zone. Um seine Bahn zu ändern, muss das Elektron dann von einer erlaubten Bahn auf eine andere springen. Einen kleineren Sprung gibt's nicht. Dies sind Quantensprünge – und die haben überhaupt nichts mit großem Brimborium zu tun.

Wenn Ihnen also jemand einen Quantensprung bei diplomatischen Verhandlungen verkaufen will, seien Sie auf der Hut!

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] Ein Elektron springt eine Treppe stufenweise herunter. Bei jedem Sprung sendet es dabei ein Lichtteilchen aus. Auf dem umgekehrten Weg hoch nimmt es bei jedem Sprung ein Lichtteilchen auf.

Abbildung 4.1: Sprunghafte Natur: Die Energie eines Elektrons kann in einem Atom nur bestimmte Werte annehmen. Will es sich verändern, muss es springen.

Energie in Paketen **

4.1.4

Die Elektronen in einem Atom können Licht nur in bestimmten Energiemengen abgeben. Aber auch das Licht selbst ist verklumpt. Es besteht aus winzigen Paketen: den Lichtquanten.

Licht ist verklumpt. Der folgende Versuch macht das deutlich: Bescheinigen wir dazu einen empfindlichen Lichtdetektor mit Licht. Dieser Detektor liefert immer genau dann ein Signal, wenn er Lichtenergie aufnimmt. Bei einer hohen Intensität ist der Ausschlag gleichmäßig. Wenn wir nun die Intensität der Lichtquelle verändern, wird sie für

uns Menschen dunkler. Auch der Ausschlag am Lichtdetektor nimmt ab. Irgendwann können wir Menschen gar nichts mehr sehen. Der nicht-menschliche Lichtdetektor ist da empfindlicher: Er nimmt immer noch etwas wahr. Aber ab einer bestimmten Schwelle wird die Lichtquelle nicht mehr gleichmäßig dunkler; irgendwann beginnt sie zu flackern. Der Detektor spürt jetzt die einzelnen Lichtpakete auf, die von der Quelle abgegeben werden.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Mit einem Regler kann die Intensität einer Lichtquelle eingestellt werden. Bei hoher Intensität leuchtet ein Detektor kontinuierlich

Abbildung 4.2: Bei kleiner Intensität sieht man: Licht besteh aus Klumpen. Der Detektor beginnt zu flackern.

Licht gibt es nur in kleinen Paketen, den Lichtquanten. Diese Pakete gaben gleich einer ganzen Theorie ihren Namen: der Quantentheorie. Für alle, die mit Geld umgehen können, sind gequantelte Größen nichts Unheimliches. Denken Sie doch nur an die Formel für den Zinseszins. Nach drei Jahren und einem Jahreszinssatz von 3% werden aus einem Euro eigentlich 1,092727 Euro. Doch nur auf dem Papier. Euros gibt es nur als Vielfache von Cents. In unserem Beispiel müsste man auf- oder abrunden. Wie in der Welt der Quanten. Licht besteht aus kleinsten Energiepaketen. Lichtenergie ist das Geld, Photonen die Münzen.

Die Energie von Lichtquanten (Photonen)

Experimente haben gezeigt: Die Energie, die in einem Lichtquant steckt, hängt von seiner Frequenz ab. Je höher die Frequenz, umso größer ist die Energie. Die Lichtquanten, die beim Röntgen von Knochenbrüchen eingesetzt werden, sind 100.000.000.000-mal energiereicher als Lichtquanten, die von einem Mobiltelefon abgestrahlt werden.

Die Energie E eines Photons ergibt sich aus seiner Frequenz f und der so genannten Planckkonstanten h :

$$E = hf$$

Da der Wert Planckkonstante $h = 6,62 \times 10^{-34}$ Joule-Sekunden sehr klein ist, ist die Energie eines Lichtquants sehr gering und es gibt entsprechend viele Lichtquanten. Daher bemerken wir in der Regel auch nicht, dass Licht verklumpt ist. Ein roter Laserstrahl (Wellenlänge

700 nm), mit der Leistung einer 100-Watt-Lampe (100 Joule/Sekunde) strahlt in der Sekunde rund $352.388.274.069.488.020.200 (= 3,5 \times 10^{20})$ Photonen ab.

Fast alles spint ***

4.1.5

Nicht nur Energien kommen in der Quantentheorie in Paketen daher. Auch andere Größen sind gequantelt – wie der Spin, mit dem das Magnetfeld von Teilchen verknüpft ist.

Ein klimatischer Exkurs: Im Winter ist Winter und im Sommer eben Sommer – nicht nur, weil es so im Kalender steht, sondern weil die Erde schief um die Sonne läuft. Ihre Drehachse ist um rund 23 Grad geneigt. Deswegen zeigt im Sommer die Nordhalbkugel zur Sonne und im Winter ist dann der Süden dran.

Prinzipiell ist aber auch jede andere Neigung der Achse denkbar: Wäre sie überhaupt nicht gekippt, gäbe es keinen Unterschied zwischen Sommer und Winter. Bei einer Neigung um neunzig Grad hieße Winter vollkommene Dunkelheit und Eiseskälte. Im Sommer würden dann der jeweiligen Pol verdampfen. Mit den mittelmäßigen 23 Grad haben wir es also ganz gut erwischt.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] Erde dreht sich um die Sonne.

Abbildung 4.3: Die Achse der Erde ist bei der Drehung um die Sonne um rund 23 Grad geneigt. Anders als bei der Quantentheorie wäre theoretisch auch jeder anderer Winkel denkbar.

Mit der Erddrehung ist ein Magnetfeld verknüpft. Es zeigt in nahezu dieselbe Richtung wie die Drehachse. Auch dieses Magnetfeld könnte einen beliebigen anderen Einstellwinkel besitzen, wenn sich die Erde nur anders drehte.

In der Quantenwelt ist es vorbei mit diesen Freiheiten. Auch Quanten wie Elektronen und Quarks haben ein Magnetfeld, das aus einer Eigenschaft hervorgeht, die Spin genannt wird. Der Spin kann jedoch nicht beliebig ausgerichtet sein.

Um eine Richtung anzugeben, braucht man eine Referenzrichtung. Den Winkel der Erdachsenneigung bestimmt man relativ zur Ebene, in der

sich die Erde um die Sonne dreht. Bei den Magnetfeldern von Quanten gibt es eine solche ausgezeichnete Richtung nicht. Man kann die Ausrichtung eines jeden Magnetfeldes nehmen, um das Magnetfeld des Quants zu vermessen. Dabei zeigt sich Verblüffendes. Wohin man das äußere Magnetfeld auch zeigen lässt, bei Teilchen mit dem Spin $1/2$ (Materieteilchen wie Elektronen und Quarks) gibt es nur zwei Möglichkeiten: Das Magnetfeld ist parallel zum äußeren Magnetfeld eingestellt oder entgegengesetzt. Bei massiven Wechselwirkungsteilchen (Spin 1) sind es drei. Der Spin kann also nicht beliebige Einstellungen einnehmen: Er ist gequantelt.

4.2 Auf mehreren Hochzeiten tanzen

Quanten können auf mehreren Hochzeiten tanzen. Nach den Gleichungen der Quantentheorie befinden sich die Teilchen schon mal an mehreren Orten zugleich – zumindest solange man nicht genau hinsieht. Hier lernen Sie mehr über die Eigenart von Quanten, sich bei Messungen wie Teilchen zu verhalten, sich aber wellenartig auszubreiten, wenn man nicht genau hinsieht. Ein Phänomen, das mit dem Namen Welle-Teilchen-Dualismus in die Physikgeschichte einging.

4.2.1 Verlieren Sie den Alltagsverstand! ***

Wer sich auf eine Bildungsreise in die Welt der Quanten begibt, lässt am besten seine Alltagserfahrungen daheim. Die sind nur unnötiger Ballast.

Sie wollen die Quantentheorie verstehen? Dann sollten Sie vergessen lernen! Vergessen Sie, dass sich ein Elektron immer wie ein Teilchen verhalten muss, nur weil es ab und an wie ein Teilchen aussieht. Vergessen Sie, dass Licht immer eine Welle sein muss, nur weil es sich zuweilen wellenartig fortbewegt. Und vergessen Sie, dass Physiker berechnen können, wie sich die Natur als nächstes verhalten wird! Sie können es nämlich nicht.

Werfen Sie den Alltag über Bord! Und freuen Sie sich darüber, dass Sie es viel besser haben als die Pioniere der Quantenphysik. Diese wussten zu Beginn des 20. Jahrhunderts noch nicht, wie viel sie von ihren Alltagserfahrungen über Bord werfen mussten, um eine erfolgreiche Theorie zu schaffen. Sie hingegen können auf über 100 Jahre Erfahrung mit der Quantenwelt zurückgreifen.

Also: Wenn Sie mit der Quantentheorie glücklich werden wollen, dann verlieren Sie Ihren Alltagsverstand!

Quanten beobachten **

4.2.2

Ein einfaches Experiment zeigt: Wenn man genau hinsieht, bestehen Licht und Elektronenstrahlen aus Teilchen.

Seien Sie bitte nicht enttäuscht! Das folgende Experiment ist vollkommen unspektakulär: Wir zielen mit einer Licht- beziehungsweise Elektronenquelle auf einen so genannten Doppelspalt. Dabei handelt es sich um eine Wand mit zwei Löchern darin – wie die Torwand aus dem ZDF-Sportstudio, nur kleiner. An den beiden Löchern, den Spalten, seien Detektoren angebracht, die Alarm geben, sobald ein Lichtquant oder Elektron durch den Spalt tritt. Hinter dem Doppelspalt messen wir, wo die Quanten hinfliegen.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] In der Interaktion lässt sich das Intensitätsmuster hinter einen Doppelspalt erzeugen. Dabei kann die Intensität der Quelle geändert werden, ferner lassen sich die beiden Spalte getrennt voneinander schließen. Zu sehen ist das Intensitätsmuster.

Abbildung 4.4: Aus einer Quelle machen sich Quanten auf zu einem Doppelspalt. Manchmal fliegt ein Quant durch einen der beiden Spalte: dort leuchtet der Detektor auf, und auch auf dem Schirm wird das Quant registriert.

Bei diesem Experiment passiert nichts, was nicht jeder erwarten würde, der weiß, dass Licht und Elektronen in Paketen daher kommen:

- ▷ Die Quanten-Detektoren leuchten jeweils kurz auf: Elektronen und Licht bestehen aus Paketen. Man könnte sagen, die Detektoren registrieren Licht- oder Elektronen-Teilchen.
- ▷ Wenn die Quanten-Quelle ausreichend schwach ist, leuchtet immer höchstens ein Spaltdetektor auf: Ein Quant geht also immer nur durch einen der beiden Spalte, niemals durch beide. Nicht jedes Quant schafft es hingegen durch die Spalte, manche werden auch von der Wand verschluckt.
- ▷ Das Zählmuster hinter der Wand ergibt sich als Summe aus den Verteilungen der beiden Einzelspalte. Sie sind ein wenig in die Breite gezogen, weil die Quanten an den Spalten leicht abprallen. Die

Verteilung von Spalt 1 und die Verteilung von Spalt 2 ergeben die Gesamtverteilung, wenn man beide addiert.

Mathematik zum Wissen

Auch wenn in dem Experiment nichts merkwürdig Quantenhaftes zu passieren scheint, so lässt die Mathematik der Quantentheorie dennoch eine Beschreibung zu.

Im Wesentlichen liefert die Quantentheorie Antworten auf Fragen nach der Wahrscheinlichkeit, dass etwas Bestimmtes geschieht. Nehmen wir als Beispiel für ein solches Quantenereignis die Messung eines Quants (Elektrons) an einem Ort B , wenn es zuvor an einem Ort x_0 gesichtet wurde. Im Fall des Doppelspaltexperiments ist der Ort A die Elektronenquelle und B ein Punkt auf dem Schirm. Die Wahrscheinlichkeit für ein Quanten von A nach B zu kommen, sei dann:

$$P(A \rightarrow B)$$

In der Quantentheorie kann eine solche Wahrscheinlichkeit mit Hilfe einer komplexen Zahl, der Wahrscheinlichkeitsamplitude, berechnet werden. Die Wahrscheinlichkeitsamplitude, die den Übergang von Ort A zu Ort B beschreibt, bezeichnen wir mit $\langle | \rangle$. Die Wahrscheinlichkeit ergibt sich dann daraus, dass wir den Betrag der Wahrscheinlichkeitsamplitude quadrieren.

$$P(A \rightarrow B) = |\langle B|A \rangle|^2$$

(Weitere Infos zu komplexen Zahlen finden Sie im Lexikon.)

Ist ein Weg aus zwei Teilstücken zusammengesetzt, so ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsamplitude für den Gesamtweg aus der Multiplikation der Amplitude für die beiden Teilwege. Im Fall, dass nur Spalt 1 offen ist, setzt sich der Weg aus dem Teilstück von A zum Spalt 1 und vom Spalt 1 zu B zusammen. Für die Wahrscheinlichkeit müssen die Wahrscheinlichkeitsamplituden für die beiden Wege dann multipliziert werden:

$$P(A \rightarrow B) = |\langle B|Spalt_1 \rangle|^2$$

Wenn ein Quantenereignis über verschiedene Wege ablaufen kann und man aufgrund einer Messung weiß, welcher der Wege gegangen wurde, so addieren sich die Wahrscheinlichkeiten. Für den Doppelspalt heiße das:

$$P_{\text{Weg bekannt}}(A \rightarrow B) = |\langle B|Spalt_1\rangle\langle Spalt_1|A\rangle|^2 + |\langle B|Spalt_2\rangle\langle Spalt_2|A\rangle|^2$$

Quanten unbeobachten **

4.2.3

Wenn man Quanten beobachtet, verhalten sie sich wie Teilchen. Das ändert sich, wenn man wegsieht.

Stellen wir uns dumm! Dabei wiederholen wir das Doppelspaltexperiment, entfernen aber die Detektoren an den beiden Spalten: Wir haben also keine Ahnung mehr, durch welchen Spalt die Quanten jeweils marschieren. Das scheint kein großer Eingriff in das Experiment zu sein. In einer Welt ohne Quantentheorie sollte er keine Auswirkungen auf die Verteilung der Quanten auf dem Schirm haben. Hat er aber.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Wenn man die Detektoren am Doppelspalt deaktiviert, so ergibt sich eine andere Intensitätsverteilung auf dem Schirm.

Abbildung 4.5: Wenn man die Detektoren an den Spalten entfernt, ändert sich das Muster der Verteilung. Probieren Sie einfach beide Fälle aus, indem Sie die Intensität hochdrehen und von beiden Fällen einen Graphen erzeugen!

Die Verteilung ändert ihre Gestalt. Es entsteht ein vielfältiges Muster. Es gibt plötzlich Orte, an denen sich gar kein Quant mehr blicken lässt, obwohl dies vorher noch der Fall war. In der Mitte, wo im ersten Experiment relativ wenig los war, sind die meisten Quanten zu finden. Wir haben soeben mit dem wohl größten aller Quantengeheimnisse Bekanntschaft gemacht: Die Auftreffwahrscheinlichkeit der Quanten auf dem Schirm hängt davon ab, ob wir die Quanten zuvor an den beiden Spalten beobachtet haben oder nicht.

Beobachtung erhält in der Quantentheorie eine vollkommen neue Bedeutung. Sie liefert uns keine passive Information über die Realität, sondern beeinflusst aktiv und maßgeblich das, was wir beobachten. Durch die Beobachtung schaffen wir Realität.

Mathematik zum Unwissen

Wenn ein Quantenereignis über verschiedene Wege ablaufen kann und wir nicht wissen, welcher der Wege genommen wurde, so berechnet sich nach der Quantentheorie die Wahrscheinlichkeit für dieses Ereignis, indem alle Wahrscheinlichkeitsamplituden addiert und danach quadriert werden:

$$P(A \rightarrow B)_{Weg \text{ unbekannt}} = |\langle B | Spalt_1 \rangle \langle Spalt_1 | A \rangle + \langle B | Spalt_2 \rangle \langle Spalt_2 | A \rangle|^2$$

Dies ist eine andere Rechnung als beim Experiment mit den beiden Detektoren an den Spalten. Dort gilt laut Quantentheorie:

$$P(A \rightarrow B)_{Weg \text{ bekannt}} = |\langle B | Spalt_1 \rangle \langle Spalt_1 | A \rangle|^2 + |\langle B | Spalt_2 \rangle \langle Spalt_2 | A \rangle|^2$$

Dass das einen Unterschied macht, wird klar, wenn man die folgenden Werte einsetzt:

$$\langle B | Spalt_1 \rangle \langle Spalt_1 | A \rangle = \frac{1}{2}, \quad \langle B | Spalt_2 \rangle \langle Spalt_2 | A \rangle = -\frac{1}{2}$$

Dann ergibt sich

$$P(A \rightarrow B)_{Weg \text{ bekannt}} = \frac{1}{2}, \quad P(A \rightarrow B)_{Weg \text{ unbekannt}} = 0$$

4.2.4 Doppelspalt schaltet den Schall ab ***

Beim Doppelspaltversuch ergeben sich Muster, die sich mit Hilfe von Wellen beschreiben lassen.

Eins und Eins ergibt Null. Nicht immer, aber doch ab und zu. Und nicht nur in der Welt der Quanten, sondern auch beim Schall. Hören wir also rein, wie Schall entsteht!

Wenn Sie eine Stimmgabel anschlagen, gerät diese in Schwingung. Ganz kleine Bewegungen, hin und her – bis zu mehreren tausend Malen in der Sekunde. Doch die Stimmgabel ist nicht allein: Luftmoleküle umgeben sie und schwingen mit. Diese Teilchen haben wiederum Nachbarn, die auch schwingen und so weiter: Eine Schallwelle – eine regelmäßige Störung der Luft – entsteht und macht sich auf den Weg in Ihr Ohr. Dort drücken und ziehen die schwingenden Luftteilchen abwechselnd an Ihrem Trommelfell: Sie hören einen Ton.

Bringen wir eine zweite Schallwelle ins Spiel! Von Teamgeist hat sie noch nicht viel gehört. Sie drückt immer gerade dann gegen Ihr Trommelfell, wenn die andere daran zieht. Und umgekehrt. Der Effekt: Ihr Trommelfell verharrt in Ruhe, Sie hören überhaupt nichts, obwohl doch doppelt so viel Schall an Ihr Ohr gelangt. Das Fachwort: Interferenz, lateinisch für Überlagerung und immer ein gutes Indiz, dass etwas Wellenartiges am Werk war.

Für Interferenz braucht man zwei Wellen. Mit einem Trick reicht aber auch eine. Denn der Doppelspalt macht aus einer zwei. Stellen Sie sich eine Schallwelle vor, die auf eine Wand mit zwei Löchern prallt. Jedes der beiden Löcher dient nun wiederum als Schallquelle. Das ermöglicht der ursprünglichen Welle, sich mit sich selbst zu überlagern: Je nach Position hinter der Wand ist es möglich, dass man nichts hört oder dass es besonders laut wird – nämlich genau dann, wenn die beiden Wellen gleichzeitig ziehen und drücken.

Welle oder Teilchen? **

4.2.5

Physiker kennen die Muster, die beim Doppelspaltexperiment ohne Hinsehen entstehen. Sie bilden sich immer dort, wo Wellen im Spiel sind. Schießt man Elektronen auf einen Doppelspalt und versucht man nicht herauszufinden, durch welchen der beiden Spalte die Elektronen gewandert sind, so entstehen Muster auf dem Schirm, die für Physiker nichts Neues sind. Solche Muster entstehen auch, wenn man statt Elektronen Licht nimmt. Sie lassen sich beschreiben, indem man Licht als eine Welle ansieht.

Daher versuchten Quantentheoretiker auch die Elektronenmuster mit Hilfe von Wellen zu beschreiben, was vortrefflich gelang. Diese Wellen wandern durch beide Spalte zugleich und können sich an den Orten des Schirmes verstärken oder gegenseitig auslöschen. Wo sie sich auslöschen, wird man kein Quant messen. Wo sie sich verstärken, schlägt der Detektor besonders oft an.

Dass die Quantenwellen durch beide Spalte zugleich wandern, mag Ihnen vielleicht nicht sonderlich behagen: Ein Elektron kann doch nicht durch zwei Spalte gleichzeitig gehen! Zu Ihrer Beruhigung: Niemand hat ein Elektron jemals durch zwei Spalte gleichzeitig wandern sehen. Die Quantentheorie beschreibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Quanten mit Hilfe von Wellen. Sie sagt nicht, dass es Wellen sind.

Jede Klärung der Frage, durch welchen Spalt das Quant gewandert ist,

würde das Wellenmuster sofort zerstören, wie es ja auch passiert, wenn wir die Spaltdetektoren einschalten.

Das heißt, dass uns ein Quant immer dann wie ein Teilchen erscheint, wenn wir es direkt beobachten. Nur in den Rechnungen befindet sich das Elektron gleichzeitig an unterschiedlichen Orten, es tanzt auf mehreren Hochzeiten gleichzeitig – immer dann, wenn wir nicht genauer hinschauen.

De-Broglie-Wellen

In seiner Doktorarbeit von 1924 setzte der französische Physiker Louis de Broglie den Impuls p eines Teilchens über die Planckkonstante h mit einer Wellenlänge in Beziehung. Dieser Schritt gilt als Meilenstein in der Entwicklung der Quantentheorie:

$$\frac{\lambda = h}{p}$$

Die Welle, die zu dieser Wellenlänge gehört, ist keine physikalische Welle, wie es bei Wasserwellen der Fall ist. Vielmehr lässt sich mit ihr die Wahrscheinlichkeit für das Auffinden eines Quants berechnen.

4.2.6 Torwandschießen mit Quanten-Fußbällen **

Mittlerweile wird so einiges durch Doppelspalte gejagt – Miniaturfußbälle inklusive.

Das Doppelspaltexperiment spielte eine zentrale Rolle bei der Entwicklung der Quantentheorie. Dabei war es überhaupt noch nicht durchgeführt worden, als die Quantenpioniere über die Folgen seiner Ergebnisse für unser Weltverständnis diskutierten.

Es war ein Gedankenexperiment, das nur in den Köpfen der Wissenschaftler existierte, weil die experimentellen Möglichkeiten noch nicht ausreichten.

Die Ausformulierung der Quantentheorie war schon über 40 Jahre alt, als der Doktorand Claus Jönsson und sein Betreuer Prof. Möllenstedt Elektronen erstmals durch einen Doppelspalt flitzen ließen und Interferenzmuster ausmachten.

Mittlerweile schicken die Physiker auch größere Objekte durch zwei Spalte. 1991 gelang den Forschern O. Carnal und J. Mlynek der Doppelspaltversuch mit Atomen. 1999 konnte die Innsbrucker Gruppe um

Anton Zeilinger sogar große Moleküle, zur quantenphysikalischen Überlagerung mit sich selbst bringen. In einer Art quantenphysikalischen Torwandschießens verwendeten sie Fullerene, das sind große Moleküle, bei denen 60 Kohlenstoffatome wie bei einem Fußball zusammengesetzt sind.

Wer wissen will, muss nachsehen

4.3

Mit der Quantentheorie ist den wissbegierigen Wissenschaftlern ein Eigentor gelungen. Denn über die Eigenschaften von Quanten kann man oft erst dann Genaues sagen, wenn man nachgesehen hat.

Vorhersagen ***

4.3.1

Wissenschaft schafft Wissen in Form von Vorhersagen. Im Laufe der Jahrhunderte wurden die mathematischen Tricks dazu immer besser, die Vorhersagen immer genauer. Die Allwissenheit schien greifbar nah – bis die Quantentheorie einen Strich durch die Rechnungen machte.

Wissenschaft ist moderne Wahrsagerei: Es ist zwar schon nicht schlecht zu wissen, dass es letzte Woche mittags mal kurz dunkel wurde, weil sich der Mond zwischen Erde und Sonne schob. Viel beeindruckender ist es, eine Sonnenfinsternis für den nächsten Freitagmittag vorherzusagen – samt Warnung, dass sich doch bitte niemand vor Schreck die Jagdkeule auf den Fuß fallen lasse.

Die Bewegung der Planeten konnten Wissenschaftler schon bald so gut vorhersagen, dass die Welt wie ein einfaches Uhrwerk erschien. Zur totalen Allwissenheit bräuchten sie nur zwei Dingen, meinten sie:

1. Wie funktioniert die Welt?
(Dass und wie sich beispielsweise der Mond um die Erde dreht, die Erde um die Sonne und wie die Bewegungsbahnen aus einer Gravitationstheorie berechnet werden können.)
2. Wie sieht die Welt jetzt im Moment aus?
(Wenn man weiß, wo sich der Mond jetzt befindet, und man weiß, wie sich der Mond bewegt (siehe 1.), dann kann man auch seine Position in 15 Minuten oder auch in zwanzig Jahren vorhersagen.)

Vom Unwissen wissen **

4.3.2

Mit der Quantentheorie erkannten die Physiker die Grenzen ihrer Er-

kenntnis: Sie fanden heraus, dass sie weit weniger über die Quantenwelt wissen können, als sie naiv aus ihrer Alltagswelt vermuteten – nicht weil sie es nicht besser können, sondern weil es auch die Natur womöglich nicht besser weiß.

Der Quantentheorie zufolge sind keine vollständigen Vorhersagen mehr möglich: Niemand kann Ihnen mit Bestimmtheit sagen, wo sich das Elektron, das Sie gerade noch in einem Experiment untersucht haben, nächsten Freitag zur Mittagszeit befinden wird. Ein Physiker kann Ihnen höchstens die wahrscheinlichsten Orte berechnen.

Die Quantentheorie verwaltet das Unwissen über unsere Welt. Wir können nicht mehr alles wissen. Das liegt nicht an menschlichem Unvermögen alleine; die Natur selbst scheint es nicht besser zu wissen (oder zumindest verrät sie es uns nicht). Wenn man etwa ein Elektron auf eine Wand mit zwei Löchern schießt, so bietet die Quantentheorie keine Wege zu erfahren, durch welches der Löcher das Elektron geflitzt ist, so lange man das nicht eigens nachmisst. Aber sobald man eine Messung auf die Wege ansetzt, verändert sich das Elektronverhalten hinter der Wand.

Aber trotz all dieses Unwissens: Die Quantentheorie verdammt uns nicht zum Nichtwissen. Sie erlaubt uns, Wahrscheinlichkeiten für den Ausgang von Ereignissen zu berechnen. Und mit Mikrochips und Laserstrahlen und damit Computern und CDs liefert sie sogar die Grundlagen für unsere Wissensgesellschaft.

4.3.3 Chaotisches Unwissen ***

Auch ohne Quantentheorie täuscht die Hoffnung auf Allwissenheit. Den Grund liefert die Chaostheorie.

Die Chaostheorie besagt, dass es sehr kompliziert werden kann, das Verhalten von vielen Teilchen zu bestimmen, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Solche Systeme tragen den bezeichnenden Namen „komplex“.

Komplexe Systeme sind empfindlich: In ihnen kann jedes noch so kleine Unwissen über den jetzigen Zustand einen beliebig großen Einfluss auf den Zustand des Systems zu einem späteren Zeitpunkt haben. Eine Vorhersage über den Weltenlauf könnte einen friedlichen Tag prophezeien. Doch ein unberücksichtiger Flügelschlag eines Schmetterlings in Indien letzte Woche löst dann leider einen Tornado aus, der in Europa zu einem Börsen-Crash führt.

Aus der Empfindlichkeit komplexer Systeme kann man aber nicht den Schluss ziehen, hier spiele der Zufall mit: In der Wettervorhersage geht man von der Bestimmtheit der Welt aus. Man misst Luftdrücke und Temperaturen in immer feinerem Maßstab und berechnet eindeutig, wie sich diese Werte entwickeln müssten. Es handelt sich um ein determiniertes (bestimmtes) Chaos, denn das Verhalten der Welt noch eindeutig durch die physikalischen Gesetze bestimmt.

Anders in der Quantentheorie. Danach sind wir selbst bei einem einzelnen Elektron nicht in der Lage, alles über dieses Teilchen zu wissen: zum Beispiel Ort und Geschwindigkeit zugleich. Je genauer wir die eine Größe kennen, umso größer ist die Spielbreite bei der Messung des anderen.

Das Mysteriöse ist nun, wie die beiden Welten zusammenpassen. In der Quantenwelt scheint der Zufall zu regieren, in unserer Welt scheint hingegen alles bestimmt zu sein: Ein Glas Milch fällt mit Sicherheit zu Boden, wenn man es fallen lässt, dabei besteht es doch aus Elektronen, von denen wir nicht mehr alles wissen können. Bei der Beantwortung dieser Fragen macht die Forschung erst allmählich Fortschritte.

Glücksspieler Gott **

4.3.4

Die Quantenwelt wird von Wahrscheinlichkeiten regiert: Mit der Quantentheorie lässt sich berechnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Messung ein bestimmtes Ergebnis ergeben würde.

Wer auf Nummer sicher gehen will, liegt mit der Quantentheorie falsch. Mit ihr lassen sich keine eindeutigen Vorhersagen über die exakten Eigenschaften von Quanten berechnen. Sie liefert allerhöchstens Wahrscheinlichkeiten für verschiedene mögliche Ergebnisse einer Messung. Was Sie dann messen werden, kann Ihnen niemand mit Sicherheit sagen; vielleicht noch nicht einmal die Natur oder Gott, weil sie so mit dem Auswürfeln der Ergebnisse beschäftigt sind.

Nehmen wir ein Elektron, das sie gerade noch am Hamburger Rathaus aufspürten. Sie könnten sich jetzt fragen, ob es vielleicht heute um Mitternacht an der Autobahnausfahrt Frechen zu finden ist. Die Antwort der Quantentheorie lautet hier weder „Ja“ noch „Nein“, sondern beispielsweise 0,01, was einer Wahrscheinlichkeit von einem Prozent entspricht. In einem von hundert Fällen würden Sie also das Elektron finden, in 99 anderen gingen Sie leer aus.

Oder nehmen wir die Polarisation eines Photons, also seine Schwingungsrichtung. Man kann diese Polarisation mit Hilfe eines Experi-

menten messen. Dabei wählt man sich eine Polarisationsrichtung aus, gegen die man messen will. Das Ergebnis ist Eins oder Null. Entweder ist das Teilchen in diese Richtung polarisiert oder nicht. Es gibt nun Fälle, in denen wir überhaupt keine Ahnung haben, wie eine Messung ausgehen wird: Für Eins und Null gibt es dann eine Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent.

Oder nehmen wir den Zerfall von Teilchen. Prallen hochenergetische Teilchen aus dem Universum auf unsere Atmosphäre, so können sich so genannte positive Kaonen bilden. Diese werden nach kurzer Zeit in eine von fast 30 Teilchenkombinationen zerfallen. Viele Physiker verbrachten einen Großteil ihrer Zeit damit herauszufinden, mit welcher Häufigkeit die einzelnen Kombinationen auftreten. Das heißt, sie messen und berechnen die einzelnen Wahrscheinlichkeiten. So zerfallen gut 63 Prozent der Kaonen in Anti-Myonen, über 21 Prozent in ein positives und neutrales Pion und so weiter. Wenn Sie jedoch einen Physiker fragen, in was ein bestimmtes Kaon zerfallen wird, zum Beispiel jenes, auf das Sie gerade mit dem Finger zeigen, werden Sie Schulterzucken ernten. Nicht weil der Wissenschaftler zu blöd ist, sondern weil es die Natur selbst noch nicht weiß.

4.3.5 Zustände in der Quantenwelt **

So wie man den Zustand unseres Sonnensystems durch die Position und Geschwindigkeiten der Planeten und ihrer Monde beschreiben kann, so steckt in einem Quantenzustand alles, was man über ein Quant wissen kann.

Physiker packen alles, was sie über ein einzelnes Quanten wissen können, in ein mathematisches Konstrukt mit Namen Quantenzustand. Den benutzen sie dann wie eine Nachschlagetabelle, in der sie nachsehen können, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie bei einer Messung ein bestimmtes Ergebnis erhalten.

Mathematik zum Zustände kriegen

Es gibt verschiedene mathematische Darstellungen für Quantenzustände. Hier soll eine Darstellung vorgestellt werden, die auf den Physiker Pauli Dirac zurückgeht. Er beschrieb einen Quantenzustand wie folgt:

$$|\Psi\rangle$$

Das ist also ein senkrechter Strich, ein Symbol (in diesem Fall der griechische Buchstabe „Psi“) und ein Größerzeichen.

Nehmen wir das einfachste aller Beispiele: ein Quant, bei dem es eine Messung gibt, die nur eine von zwei Ergebnisse liefern kann: „0“ oder „1“. (Die Polarisation eines Photons wäre eine solche Eigenschaft.)

Für den Fall, dass wir genau wissen, dass eine Messung den Wert „0“ ergeben wird, schreiben wir den Quantenzustand wie folgt:

$$|\Psi_0\rangle = |0\rangle$$

Falls wir wissen, dass die Messung den Wert „1“ liefern wird, lautet der Zustand:

$$|\Psi_1\rangle = |1\rangle$$

Allgemein kann man damit schreiben:

$$|\Psi_0\rangle = 1|0\rangle + 0|1\rangle, |\Psi_1\rangle = 0|0\rangle + 1|1\rangle$$

Dies sind aber nur zwei mögliche Quantenzustände zur Beschreibung unseres Quants. Nach der Quantentheorie ist das noch längst nicht alles. Das Quant kann sich in einem gemischten Zustand befinden: ein bisschen „0“ und ein wenig „1“ oder andersrum. Im Zustand wird dann die Wahrscheinlichkeit beschrieben, mit der das jeweilige Messergebnis auftreten wird.

Der allgemeinste Fall lautet daher:

$$|\Psi\rangle = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$$

wobei C_0 und C_1 komplexe Zahlen sind.

Der Quantentheorie zufolge ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten für eine Messung von „0“ oder „1“ dann aus dem Betragsquadrat von C_0 bzw. C_1 :

$$P_0 = |C_0|^2, P_1 = |C_1|^2$$

Da eine Messung immer eine der beiden Möglichkeiten „0“ oder „1“ liefern wird, muss die Summe der beiden Wahrscheinlichkeiten 100% ergeben. Es gilt also:

$$|C_0|^2 + |C_1|^2 = 1$$

4.3.6 **Quanten vermessen** **

Wer Quanten vermisst, sollte sich seiner schöpferischen Verantwortung bewusst sein: Die Messung legt viele Eigenschaften der Quant überhaupt erst fest.

Schauen wir uns zunächst ein Beispiel ohne Quanten an: Es geht um das Magnetfeld der Erde. Seine Ausrichtung soll vermessen werden und dazu haben Sie sich einen Kompass besorgt. Sie setzen Ihren Kompass in Gang und messen, dass sich der magnetische Nordpol ganz in der Nähe des geographischen befindet. Und Sie würden vermuten, dass er dort auch schon gestern war. Bei der Erde ist das auch völlig in Ordnung.

In der Quantenwelt sieht das hingegen anders aus: Auch Elektronen besitzen ein Magnetfeld. Dies unterliegt aber der Quantentheorie – und das gleich zweifach: Zum einen kann eine Messung hier nur zwei Werte ergeben – entweder zeigt der Nordpol nach oben („1“) oder nach unten („0“). Ein dazwischen (zur Seite) gibt es nicht. Aber das ist noch nicht seltsam genug. In den meisten Fällen ist völlig unklar, wie das Ergebnis ausgehen wird. Die Quantentheorie erlaubt uns lediglich, die Wahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Messergebnisse zu berechnen. Erst im Moment der Messung scheidet sich die Welt dann für eine der beiden Möglichkeiten zu entscheiden. Wenn Sie dann aber einmal gemessen haben, dass der Nordpol oben liegt und Sie das Elektron nicht weiter beeinflussen, wird auch die nächste Messung ein „oben“ ergeben. Nach der Messung ist damit nicht mehr vor der Messung. Der Zustand des Quants hat sich grundlegend geändert. Denn nach der Messung ist die Wahrscheinlichkeit für „unten“ plötzlich null.

Quanten-Messung

Nehmen wir das einfachste aller Beispiele – ein Quant mit einer Eigenschaft, die nur die Werte „0“ (Magnetfeld unten) oder „1“ (Magnetfeld oben) bei einer Messung ergeben kann. Die allgemeine Form des Quantenzustands lautet dann:

$$|\Psi_1\rangle = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$$

Bei einer Messung werden wir mit einer Wahrscheinlichkeit von $|C_0|^2$ das Ergebnis „0“ erhalten. Mit einer Wahrscheinlichkeit von $|C_1|^2$ werden wir eine „1“ messen.

Nehmen wir jetzt an, der zweite Fall würde eintreten: Das Ergebnis

lautet „1“. Das Quant befindet sich dann plötzlich in einem Zustand, in dem wir auch bei einer zweiten Messung eine „1“ erhalten würden. Der Quantenzustand hat sich geändert. Er lautet nun:

$$|\Psi_2\rangle = C_1|1\rangle$$

Durch die Messung verändert sich der Quantenzustand. Weil wir eine „1“ gemessen haben, wird die Möglichkeit für eine „0“ ausgelöscht. Die Messung hat den Zustand verändert. Man sagt hier auch manchmal, der Quantenzustand sei kollabiert.

Quanten-Unbestimmtheit **

4.3.7

Bestimmte Eigenschaften von Quanten sind in der Quantentheorie gepaart: Je genauer man die eine gemessen hat, umso weniger kann man über die andere aussagen.

1927 stellte Werner Heisenberg seine Unschärfebeziehung auf und goss damit unser Unwissen über die Quantenwelt in eine Formel.

Bei der Unbestimmtheitsbeziehung handelt es sich um eine der wichtigsten Formeln der Quantentheorie. Nach ihr können der Ort und die Geschwindigkeit (genauer: der Impuls) eines Teilchens nicht beide beliebig exakt gemessen werden. Je genauer man den Ort kennt, umso weniger Aussagen kann man über den Ausgang einer Geschwindigkeitsmessung machen und umgekehrt. Im Extremfall heißt das sogar: Wenn man den Ort 100-prozentig genau kennt, kann man der Quantentheorie zufolge überhaupt nichts über die Geschwindigkeit des Teilchens aussagen. Eine Messung könnte jeden beliebigen Wert ergeben.

Die Größe der Unschärfe

Man kann genau angeben, wie groß die Unbestimmtheit bei der Messung einer quantentheoretischen Größe ist.

Für die Unschärfe zwischen dem Ort x und dem Impuls p gilt:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Für die Unschärfe von der Energie E und der Zeit t gilt:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

4.4 Was hat das nur zu bedeuten?

Die Andersartigkeit der Quantenwelt ließ Forscher immer wieder fragen, wie wohl die Realität hinter der Quantentheorie aussieht. Die Antworten liefern jede Menge Stoff für Science-Fiction-Autoren und bisher kaum eine Idee, wie man die richtige Deutung der Quantentheorie herausfindet.

4.4.1 Dahinter geschaut ***

Sie wollen Berechnungen in der Quantenwelt vornehmen? Dann setzen Sie auf die Quantentheorie! Sie ist Ihr bester Partner, wenn es um die Vorhersagen für das Verhalten von Quanten geht. Doch es gibt da ein paar bittere Kröten zu schlucken: Wie sich Quanten genau verhalten, kann Ihnen auch die Quantentheorie nicht sagen.

Mit der Theorie lassen sich in der Regel nur Wahrscheinlichkeiten berechnen. Was genau passiert, scheint der Zufall zu entscheiden: zum Beispiel, welche Eigenschaft ein Quant annimmt, wenn man es misst (siehe Wer wissen will, muss nachsehen). Und dann können sich Quanten auch noch in Fernbeziehungen aufhalten, in denen ihre Eigenschaften über Lichtjahre entfernt miteinander aufs Engste verwoben sind (siehe Photonen in Fernbeziehung – Verschränkung).

Das sind ausreichend Sonderbarkeiten, um zu fragen, was das eigentlich alles zu bedeuten hat und wie wohl die Realität hinter der Quantentheorie aussieht? In dutzenden Deutungen gaben hier Forscher Antworten. In noch weit mehr Science-Fiction-Romanen deuteten Autoren die Deutungen: Da soll sich das Universum in unzählige Parallel-Welten aufspalten, von einer Quanten-Kraft beherrscht werden oder sich durch das menschliche Bewusstsein allein beeinflussen lassen.

Alle Deuterei erfolgt nicht ohne Kritik: Der Quantenpionier Niels Bohr vertrat die Auffassung, dass es müßig sei, über Dinge zu spekulieren, die man nicht messen könne. Und in der Tat: Es sind derzeit keine durchführbaren Experimente bekannt, mit denen zwischen den einzelnen Deutungen unterschieden werden kann.

Es mag also müßig sein, auf die möglichen Realitäten hinter der Quan-

tentheorie zu blicken. Niels Bohr möge uns daher den vorliegenden Teil verzeihen.

Verstehen wir „wirklich?“ ***

4.4.2

Möglich: Mit ein wenig Übung kann jeder die mathematischen Grundlagen der Quantentheorie verstehen und einfache Rechnungen durchführen.

Unmöglich: Mit unserer Alltagserfahrung lassen sich die Ergebnisse kaum in Übereinstimmung bringen.

„Es gibt wohl keinen, der die Quantentheorie versteht“, sagte einst Richard Feynman. Die Rechenregeln der Quantentheorie kann er damit nicht gemeint haben. Schließlich hat er sie selbst mit aufgestellt.

Feynman versteht hier unter Verstehen etwas anderes: das In-Einklang-Bringen-mit-der-Alltagserfahrung. Hier sind wir Menschen bei anderen Theorien weit verständnisvoller als im Quantenfall. So kann jeder die Theorie der Schwerkraft prima mit seiner Alltagserfahrung in Einklang bringen: Lassen Sie dazu nur ein Glas Milch los, das Sie in Händen halten!

Für vieles in der Quantenwelt gibt es solche Alltagserfahrungen nicht: Hier gehen die Rechnungen beispielsweise davon aus, dass ein Elektron zwischen zwei Nachweisgeräten alle Wege zugleich nehmen kann. Unsere Alltagserfahrung lehrt uns aber, dass man nicht auf mehreren Hochzeiten zugleich tanzen kann.

Die Mathematik, welche die Quantentheorie bei alledem benutzt, ist verständlich. Sie ist sogar im Vergleich zur Mathematik anderer Theorien recht einfach gestrickt. Problematisch wird es erst, wenn man versucht, die Realität zu verstehen, die hinter der Mathematik steckt. Hier beschreiten die unterschiedlichen Deutungen der Quantentheorie jeweils eigene Wege. Sie gehen dabei jedoch alle von derselben Mathematik aus.

Frage 1: Würfelt Gott? ***

4.4.3

Die Quantentheorie lässt in vielen Fällen nur die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten zu. Das könnte bedeuten, dass Gott würfelt – muss es aber nicht.

Wer im Deutschland des Jahres 2001 auf eine beliebige Person zeigte, hätte mit einer Wahrscheinlichkeit von 51,1 Prozent eine Frau erwischt – ganz so, als hätte der Zufall ein leichtes Faible für das weibliche Geschlecht.

Das heißt aber nicht, dass der Zufall an der Wahl des Geschlechts beteiligt war. Es gibt vielmehr durchaus einen Grund für das Frau- oder Mannsein. Das genetische Geschlecht eines Menschen ist nämlich weiblich, wenn es ein Spermium mit einem X-Chromosom zur Eizelle schafft, es ist männlich, wenn es ein Y-Chromosom ist. Hier regiert nicht der Zufall, sondern es ist einfach nur eine Frage, welches Spermium als erstes ans Ziel kam.

Es gibt also einen Grund dafür, dass ein Mensch eine Frau ist. Wissenschaftler sprechen hier von Kausalität. Es gibt einfach Ursachen (X-Spermium), die zu einer Wirkung (Frau) führen. Mit zufälliger Beliebigkeit hat das nichts zu tun.

Doch wie ist das mit der Kausalität im Fall von Quanten? Deren Eigenschaften nehmen oft erst im Moment einer Messung konkrete Werte an. Diese scheinen zufällig bestimmt zu sein. Dafür gibt es zwei mögliche Erklärungen:

1. Entweder die Quantenwelt wird vom Zufall regiert und sie ist nicht kausal. Oder:
2. Dem Zufall liegt eine uns verborgene Gesetzmäßigkeit zugrunde.

Der Zufall wäre dann nur scheinbar, die Kausalität gerettet.

Einstein mochte die Vorstellung vom Zufall in der Quantenwelt nicht und meinte: „Gott würfelt nicht!“ Niels Bohr (sein Rivale in Quantenfragen) gab ihm daraufhin die Empfehlung, Gott doch nicht vorzuschreiben, was er zu tun oder zu lassen habe.

4.4.4 **Frage 2: Wann stirbt Schrödingers Katze? *****

Schrödingers Katze zeigt, dass man sich etwas einfallen lassen sollte, wenn man Quanten- und Alltagswelt in Einklang bringen will.

Er ist wohl einer der bekanntesten Tierversuche der Geschichte: 1935 bringt der Physiker Erwin Schrödinger in einem Gedankenexperiment eine Katze um. Er will damit auf ein Problem bei der Standarddeutung der Quantentheorie hinweisen, das sich ergibt, wenn man das „Aufmehrereren-Hochzeiten-tanzen-Können“ von der Quantenwelt in unsere Alltagswelt überträgt:

„Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muß): in einem geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, daß im Laufe einer Stunde vielleicht eines der Atome zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein

Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert“ (Erwin Schrödinger (1935): Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik. In: Naturwissenschaften 23:807-812).

Hier nun das Problem: Nach der Quantentheorie befinden sich die Atome – wenn man sie eine Stunde lang nicht beobachtet hat – in einem mysteriösen Mischzustand zwischen „nicht zerfallen“ und „zerfallen“. Erst wenn man genau nachsieht, scheint sich die Natur für einen der Zustände zu entscheiden. Aber gilt das auch für die Katze? Ist diese „tot“ und „lebendig“ zugleich? Unsere Erfahrung zeigt, dass wir eine Katze immer nur als tot oder lebendig vorfinden. Die Gleichungen der Quantentheorie lassen sich also nicht so einfach auf Katzen übertragen – oder?

Kopenhagener Deutung ***

4.4.5

Die Standarddeutung besagt, dass die Quantentheorie unser gesamtes Wissen über Quanten beschreibt. Immer wenn Messungen an Quanten vorgenommen werden, entscheidet der Zufall über den Ausgang. Es macht keinen Sinn, über die Welt „dahinter“ zu spekulieren.

Die Standardinterpretation vermeidet viel Deutung: Danach beschreibt die Quantentheorie alles, was man über die Natur wissen kann. Erst im Moment der Messung entscheidet sich die Natur, welche Eigenschaften die Quanten erhalten. Zuvor ist alles unbestimmt.

Der Großteil der Physiker folgt dieser Deutung – auch Richard Feynman, wenn er sagt: „Shut up and calculate!“ (Mund halten und rechnen!).

Doch diese Deutung ist nicht ohne Probleme. Die Messung erhält in der Kopenhagener Interpretation eine zentrale Rolle. Es wird aber nicht genau geklärt, was eine Messung ist: Zwar wird hier zwischen dem Quantensystem und der Messapparatur unterschieden. Aber beide zusammen bilden doch auch wieder ein Quantensystem, das erst vermessen werden müsste, um genaue Eigenschaft aufzuweisen, oder? Und wer vermisst das Universum? Gott?

Den Namen hat die Kopenhagener Interpretation vom Ort des Schaffens von einem ihrer Mitbegründer, Niels Bohr.

Der bewusste Beobachter ***

4.4.6

Was genau eine Quantenmessung ist, versucht die Bewusstseinsdeutung zu klären: Danach ist das menschliche Bewusstsein nicht nur die

derzeitige Krönung der Schöpfung, sondern auch alleinig in der Lage, durch Beobachtung dafür zu sorgen, dass Quanten konkrete Eigenschaften annehmen.

In der Bewusstseinsdeutung wird die Quantenwelt auch vom Zufall regiert. Die Würfel sind aber erst in dem Moment gefallen (die Quantenmessung abgeschlossen), wenn das Ergebnis einem menschlichen Beobachter bewusst geworden ist.

Auch hier bleiben wichtige Fragen offen: Was macht das Bewusstsein so einzigartig? Ist das Gehirn nicht auch ein Quantensystem? Und wer beobachtet das Universum?

4.4.7 Dekohärenz-Deutung ***

Die Dekohärenz-Deutung versucht das Problem mit Schrödingers Katze zu lösen, indem sie eine Grenze zwischen kleinen Quantensystemen und großen Systemen wie einer Katze zieht.

Danach kommt es nur in (kleinen) Quantensystemen zu Quanten-Überlagerungen. In großen Systemen hingegen sorgen Wechselwirkungen mit dem restlichen Universum dafür, dass die Überlagerungen von Quantenzuständen gestört werden (dekohärieren). Im Falle von Schrödingers Katze sorgen diese Störungen dafür, dass das Tier immer entweder tot oder lebendig ist. Ein Dazwischen gibt es nicht.

Wenn die Dekohärenz-Deutung auch viel versprechend zu sein scheint, ganz unproblematisch ist sie nicht: Denn wo genau muss diese Grenze gezogen werden? Im Fall von zwei Quanten, hundert Quanten, zehn Millionen? Schon heute ist es Experimentatoren gelungen, Quanten-Überlagerungen bei großen Molekülen nachzuweisen. Ist es bei ausreichendem experimentellem Geschick vielleicht doch möglich, auch eine lebendigtote Katze zu schaffen?

4.4.8 Viele-Welten-Deutung ***

Nach der Viele-Welten-Deutung werden Messergebnisse, die nach der Quantentheorie möglich sind, auch angenommen – nur jeweils in einem eigenen Universum.

1957 stellte Hugh Everett eine Deutung der Quantentheorie auf, die wohl die größte Anhängerschaft bei den Science-Fiction-Autoren hat. Danach werden alle Zustände, in denen sich ein Quant gleichzeitig befinden kann, auch gleichzeitig angenommen. Dies jedoch in einem jeweils eigenen Universum.

Schrödingers Katzenproblem wird in der Viele-Welten-Deutung dadurch gelöst, dass die Katze zu einem bestimmten Zeitpunkte immer tot oder lebendig ist. Was genau der Fall ist, hängt von dem Universum ab, in dem man gerade steckt. Alles im allem wäre der Weltenlauf bestimmt und nicht vom Zufall abhängig.

Während Everett davon ausging, dass die Paralleluniversen vollkommen unabhängig voneinander existieren und sich nicht beeinflussen können, glaubt David Deutsch von der University of Oxford, dass es Wechselwirkungen und gar Übergänge zwischen den Universen geben könnte. Damit wären selbst Zeitreisen möglich ohne all die Probleme mit Vorfahren, die man erschießt und die einen daher nicht mehr hervorbringen können. Denn nach Deutsch würden solche Zeitreisen in ein Paralleluniversum erfolgen. Man würde dann die Geburt seines Parallel-Ichs unterbinden, aber nicht die eigene.

Für viele Physiker ist das aber eher Stoff für Hollywood als für den Lehrplan. Sie sind nicht bereit, den Zufall in der Quantenwelt gegen die Existenz unendlich vieler Universum einzutauschen.

Quanten-Kraftfeld ***

4.4.9

Es gibt eine Klasse von Deutungen, für die die Quantentheorie nicht der Wahrheit letzter Schluss ist. Danach werden Quanten durch ein Kraftfeld beeinflusst, das wir nicht beobachten können. Diese Kraft sorgt dafür, dass sich die Teilchen so (zufällig) verhalten, wie es durch die Quantentheorie beschrieben wird.

Der bekannteste Vertreter dieser Deutung ist die Quanten-Kraft von David Bohm. Danach ist die ganze Welt von einem unbeobachtbaren Quanten-Kraftfeld durchzogen. Es sorgt im Stillen dafür, dass sich die Welt so verhält, wie es die Quantentheorie vorsieht. Nur weil wir das Feld nicht beobachten können, scheint es so, als regiere der Zufall.

Bei Bohms Deutung ist das so genannte Prinzip der Lokalität verletzt. Denn mit jeder Messung muss sich das Quanten-Kraftfeld im ganzen Universum sofort ändern. Dafür gilt die Kausalität und unsere Welt ist vorherbestimmt. Der Zufall kommt nur durch unser Unwissen über das Quanten-Kraftfeld ins Spiel.

Symmetrien

Das Schweizer Messer der modernen Physik

Die Natur steckt voller Symmetrien. Das schaut nicht nur hübsch aus, sondern ist auch außergewöhnlich praktisch. Denn längst haben sich Symmetrien zu einem wichtigen Werkzeug der theoretischen Physik entwickelt.

Was ist eine Symmetrie?

5.1

Ob nach Spiegeln, Drehen oder Vertauschen: Symmetrien liegen immer vor, wenn man etwas machen kann und nichts passiert.

Wenn nichts passiert **

5.1.1

Symmetrien finden sich überall: Eine Schneeflocke kann man beispielsweise drehen, ohne dass sich ihr Aussehen ändert.

Eiskristalle haben eine regelmäßige Form. Sie kann man um 60 Grad drehen, ohne dass sie ihr Aussehen ändern. Gleiches gilt für ein Quadrat bei einer Drehung um einen Viertel Vollkreis. Und bei einer perfekten Kugel ist sogar jeder beliebige Winkel drin. In allen Fällen liegt eine so genannte Drehsymmetrie vor.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] Eine Schneeflocke dreht sich schrittweise um 60 Grad und erscheint danach jeweils wie zuvor.

Abbildung 5.1: Alles wie gehabt: Eine Schneeflocke nach einer Drehung um 60 Grad.

Es gibt aber noch weit mehr als Drehsymmetrie: Wir Menschen ähneln unserem Spiegelbild und bei den meisten Kirchen lassen sich Nord- und Südturm kaum unterscheiden. In diesen Fällen haben wir es Spiegelsymmetrie zu tun.

Und Symmetrien sind aber nicht nur fürs Auge. Manche kann man sogar hören – zum Beispiel bei Johann Sebastian Bach: In manchen seiner Themen scheint die erste Stimme das Spiegelbild der zweiten zu sein – zumindest wenn man von den Halbtonschritten absieht.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Man kann die beiden Stimmen von Bachs Contrapunctus getrennt und zusammen hören.

Abbildung 5.2: In diesem Thema von Johann Sebastian Bach aus „Die Kunst der Fuge“ scheint die obere Stimme die gespiegelte Version der unteren – zumindest wenn man von den genauen Halbtonschritten absieht.

Es sind Regelmäßigkeiten in der Form, die uns Symmetrie ausmachen lassen. So steht das griechische Wort *symmetros* auch für regel- oder gleichmäßig. Solche Regelmäßigkeiten sorgen dafür, dass man mit symmetrischen Dingen etwas anstellen kann (etwa drehen, verschieben oder spiegeln), ohne dass sich ihre Form verändert: Eine Symmetrie liegt vor, wenn man etwas machen kann und nichts passiert.

5.1.2 Symmetrien der Gesetze **

Wenn Teilchenphysiker Symmetrien auf der Spur sind, dann wollen sie nicht das Universum drehen oder auf dem Kopf stellen, sondern sind den Naturgesetzen auf der Spur, die in ihm gelten.

Unser Weltall ist gar nicht sonderlich symmetrisch. Unsere Erde ist nur fast ein perfekte Kugel, sie ist an den Polen flacher als am Äquator. Und die Erde gibt es beispielsweise auch nur einmal und zwar hier.

Verschöben wir unseren Aufenthaltsort um 10 Lichtjahre, würden wir auf keine zweite Erde stoßen. Gegenüber einer solches Verschiebung ist das Weltall nicht symmetrisch.

Bei Naturgesetzen sieht das schon anders aus. Da gehen Physiker davon aus, dass diese hier an Ort und Stelle genauso gelten sollten wie in 10 Lichtjahren Entfernung. Es sollte egal sein, wie unser Labor gedreht ist, wenn wir Naturgesetze untersuchen. Auch im Spiegelbild gelten in der Regel dieselben Gesetze. Und morgen sollten die Welt von keinen anderen Naturgesetze beherrscht werden als gestern. Es sind solche Symmetrieanahmen, die Physiker zahlreiche Bedingungen dafür liefern, wie Naturgesetze aussehen können. Denn sie müssen so gebaut sein, dass sie sich symmetrisch verhalten.

Schauen wir uns die einzelnen Symmetrieanahmen noch einmal im Detail an:

Ort verschieben

Die physikalischen Gesetze in unserem Universum sollten dieselben an verschiedenen Orten sein. Oder sollte etwa ein Physiker andere Naturgesetze entdecken als sein Kollege im Zimmer nebenan?

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] Ein Gitter verschiebt sich vor den Augen des Betrachters. Es sieht danach jeweils aus wie zuvor.

Abbildung 5.3: Ein unendlich ausgedehntes Gitter lässt sich verschieben, ohne dass es sein Aussehen ändert. Hier liegt eine Verschiebungssymmetrie vor.

Richtung drehen

Welche Naturgesetze findet wohl ein Physiker, der Zeit seines Lebens mit einem zur Seite geneigten Kopf durch die Welt läuft? Dieselben wie sein aufrecht gehender Kollege. Denn wie man das Universum auch dreht: Es sollten dieselben Naturgesetze gelten. Die Gesetze des Universums sind drehsymmetrisch.

Spiegeln

Wenn man es manchmal auch nicht wahrhaben mag: Das Ding da morgens im Badezimmer ist das eigene Spiegelbild und sieht einem

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] Ein Würfel dreht sich um verschiedene Achsen. Er sieht danach jeweils aus wie zuvor.

Abbildung 5.4: Drehsymmetrie: Ein Würfel kann auf viele Weisen gedreht werden, ohne dass sich sein Aussehen verändert.

ganz schön ähnlich. Denn wir Menschen sind im Großen und Ganzen spiegelsymmetrisch aufgebaut. Und auch die meisten der Gesetze der Physik müsste man nicht umschreiben, wenn wir in einer gespiegelten Version unseres Universums lebten.

Zeit verschieben

Es ist 20:15. Gerade lief der Wetterbericht. Als nächstes steht die Vorhersage für die physikalischen Gesetze von Morgen auf dem Programm. Wie stark wird die Schwerkraft sein? Wird es morgen überhaupt Atome geben? Oder ist zur Abwechslung mal alles ganz anders? Absurde Vorstellung? Stimmt! Denn wir gehen davon aus, dass das Universum heute, gestern und morgen denselben physikalischen Gesetzen gehorcht. Die Gesetze im Universum sind symmetrisch bei einer Verschiebung der Zeit.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] Drei Szenen: Im Jahr 1703, 2003 und 2303 fällt jeweils ein Apfel von einem Baum. Jeweils auf dieselbe Weise.

Abbildung 5.5: Der Apfel fällt nie weit vom Stamm.

5.1.3 Elefanten aus Mücken **

Symmetrien helfen Physiker dabei, Theorien zu entwickeln, die mit wenigen Annahmen möglichst viel erklären können.

Suchen Sie die wissenschaftliche Anerkennung, den akademischen Erfolg? Schielen Sie sogar auf den Nobelpreis? Dann machen Sie doch aus Mücken Elefanten! Nein, dies ist kein Plädoyer für die unzulässige Aufblähung von Forschungsergebnissen. Gemeint ist das Vergnügen der Wissenschaft an der Vermehrung von Erkenntnis.

Je mehr Erkenntnis man dabei aus wenigen Annahmen gewinnt, umso größeren Eindruck schindet man – vor Kollegen und dem Nobelpreis-Komitee. Beispiel: Einsteins Relativitätstheorie. Hier beruhen so revolutionisierende Aussagen wie „Eine bewegte Uhr tickt langsamer.“ oder „Energie und Materie lassen sich ineinander überführen“ im Wesentlichen auf nur zwei Annahmen. Der Rest ergab sich dann fast von selbst.

Theorien können Sie sich als eine Art Maschine vorstellen, als Aussagenvervielfacher. Man füttert sie mit Grundannahmen wie „Das Licht ist überall gleich schnell.“ oder „Ein Wissenschaftler in Bewegung sollte dieselben Naturgesetze erkennen wie sein Kollege in Ruhe.“ Diese Annahmen können von der Theorie selbst nicht erklärt werden, sondern müssen vorausgesetzt werden. Als nächstes treten dann die mathematischen Zahnräder der Theorie in Aktion – bis hinten neue Aussagen herausfallen – zum Beispiel: „Eine bewegte Uhr tickt langsamer.“

Je mehr hinten herauskommt, umso besser. Bei Sparkonten wählt man ja auch das mit dem höheren Zinssatz. Theoretiker sind also ständig auf der Suche nach besonders lukrativen Erkenntnisanlagen. Und dabei sind zu ihrer größten Freude auf Symmetrien gestoßen: Denn der Zinssatz ist hier besonders hoch. Die Elefanten werden aus diesen Mücken besonders groß.

Die Mathematik der Symmetrie: Gruppentheorie

Um Symmetrien kümmern sich nicht nur Physiker. Ihnen hat sich auch eine ganze Abteilung der Mathematik verschrieben: die Gruppentheoretiker. Die untersuchen nicht etwa kleinere Menschenansammlungen, sondern mathematische Gruppen, zu denen auch viele symmetrische Aktionen zusammengefasst werden.

Nehmen wir beispielsweise einen Kreis. Er kann um einen beliebigen Winkel gedreht werden, ohne dass sich sein Aussehen ändert. In der Mathematik nennt man eine solche Drehung „Symmetrieoperation“. Davon gibt es bei einem Kreis unendlich viele, weil wir ihn um einen beliebigen Winkel drehen können. Damit nun die Symmetrieoperationen eine Gruppe bilden, muss Folgendes gelten:

1. Wenn wir zwei Operationen nacheinander ausführen, erhalten wir eine dritte. (Anstatt zuerst um 90 Grad und dann um -20 Grad zu drehen, könnten wir gleich um 70 Grad drehen.)
2. Auch das Nichtstun ist eine Symmetrieoperation. (Also das Drehen um null Grad.)

3. Zu jeder Drehung gibt es eine Drehung, die sie wieder rückgängig macht. (Wenn man um 35 Grad nach links dreht, kann man danach auch um 35 Grad nach rechts drehen.)
4. Es gilt die so genannte Assoziativität. (Wenn wir drei Drehungen um 15, 25 und 35 haben, so können wir zunächst um 40 ($= 15 + 25$) und dann um 35 Grad drehen, oder zunächst um 15 und dann um 60 ($= 25 + 35$) Grad drehen.)

Mathematiker haben sich mittlerweile alle denkbaren Symmetriegruppen angeschaut und einen mächtigen Werkzeugkasten, eben die Gruppentheorie, entwickelt, mit dem sie die Eigenschaften von Gruppen untersuchen können. Ohne diesen Kasten trauen sich die wenigsten theoretischen Physiker heute noch aus dem Haus.

5.1.4 Gebrochene Symmetrien ***

Die Welt ist voller Symmetrien, die keine mehr sind – von Physikern „gebrochen“ genannt. In diesen Fällen kann man nur noch erahnen, dass es da wohl mal eine Symmetrie gab.

Nobody's perfect – auch einige Symmetrien nicht. Zum Glück, denn in einer vollkommen symmetrischen Welt würden wir wohl nur aus einem Grund nicht an Langeweile sterben: Weil wir erst gar nicht existierten. Denn dann wäre alles gleich. Es gäbe keine unterschiedlichen Wechselwirkungen, es gäbe keine Sterne, Planeten oder Menschen.

Fassen Sie sich nur ans Herz! Es schlägt wahrscheinlich auch bei Ihnen links. Während der Rest Ihres Körpers spiegelsymmetrisch ist, ist diese Symmetrie im Detail nicht vorhanden. Für solche Symmetriebrüche gibt es zahlreiche Beispiele:

Beispiel: Biomoleküle

Bei Zucker und Milchsäuren ist die Natur eher rechtslastig. So kommen viele Biomoleküle in rechts- und linksdrehenden Versionen daher. Beide Typen bestehen aus denselben Atomen, sind jedoch Spiegelbilder voneinander. Irdische Lebewesen haben nun ein besonderes Faible für die rechtsdrehenden Formen: Sie sind besser verträglich und werden schneller vom Körper abgebaut als die linksdrehende Version.

Was bei Milchsäuren nur eine Frage der Zeit ist und „rechtsdrehenden“ Joghurt bekömmlicher macht, war im Falle des Beruhigungsmittels Contergan für zehntausende Missbildungen verantwortlich. Denn

während das rechtsdrehende Contergan ein gut verträgliches Schlafmittel ist, schädigt die linksdrehende Variante den Fötus.

Bei Biomolekülen hat sich die Natur irgendwann entschieden, welchen der beiden Molekültypen sie bevorzugt. Wie die Symmetrie gebrochen wurde, ist purer Zufall. Hätte das Los anders entschieden, würde jetzt für Joghurt mit linksdrehenden Milchsäuren geworben.

Beispiel: Roulette-Spiel

In 37 gleich große Felder sind Roulettescheiben eingeteilt. Für jede Zahl von 0 bis 36 besteht daher dieselbe Wahrscheinlichkeit, dass die Kugel dort liegen bleibt. Man könnte die Bezeichnung der Felder also einfach alle um ein paar Felder links- oder rechtsherum drehen, ohne dass dies Folgen für das Spiel mit sich brächte. Die Roulettescheibe ist drehsymmetrisch.

Aber nach dem „Rien ne va plus“ des Croupiers entscheidet sich die Kugel dann irgendwann für eine Zahl. Dann ist die ursprüngliche Symmetrie gebrochen, dass prinzipiell keines der 37 Felder unterschieden werden kann.

Beispiel: Die Urkraft

Eines der verbliebenen großen Rätsel der Natur lautet: Lassen sich die unterschiedlichen Kräfte im Universum auf eine einzige Wechselwirkung zurückführen? Physiker, die das bejahen, sind gut beraten zu erklären, wieso wir denn dann unterschiedliche Wechselwirkungen um uns herum ausmachen. Ihre Antwort: Symmetriebruch. Bei den hohen Energien direkt nach dem Urknall waren die Wechselwirkungen gleich und ununterscheidbar. Damals gab es eine Kräftesymmetrie. Als das Universum abkühlte, flockten die uns heute bekannte Kräfte aus. Die ursprüngliche Symmetrie wurde gebrochen.

Symmetrie erhält ***

5.1.5

Schön = dumm? Mitnichten! 1918 erfolgte der Gegenbeweis. Damals zeigte die Mathematikerin Emmy Noether, dass Symmetrien nicht nur hübsch sind, sondern Physikern einiges zu bieten haben: Mit vielen Symmetrien sind so genannte Erhaltungsgrößen verbunden.

Erhaltungsgrößen sind in der Physik unglaublich wichtig, weil sie sich nicht verändern, was auch passiert. Eine der bekanntesten Erhaltungs-

größen ist die Energie. Egal, was im Universum auch geschieht, seine Energie bleibt erhalten. Niemand hat bisher beobachtet, dass brauchbare Energie aus dem Nichts entsteht oder einfach dahin verschwindet. (Sehen wir von dem Urknall und ein paar kurzzeitigen Aussetzern in der Quantenwelt ab.)

Emmi Noether zeigte, dass mit Symmetrien Erhaltungsgrößen verbunden so. So gehört zur Erhaltungsgröße Energie die Symmetrie, dass die physikalischen Gesetze heute und morgen gleich lauten, dass wir also ohne arge Konsequenzen den Nullpunkt unserer Zeitrechnung verschieben können.

Wäre die Schwerkraft beispielsweise sonntags doppelt so groß wie im Rest der Woche, so ließe sich auf folgende Weise Energie erzaubern: Sie pumpen am Samstag Wasser mit einem Motor in einen Wasserturm. Dafür brauchen Sie einen bestimmten Energiebetrag, den Sie erst einmal vorschießen müssen. Nun legen Sie sich die Nacht über schlafen und lassen das Wasser am Sonntag wieder durch eine Turbine hinunter. Da die Schwerkraft am Sonntag doppelt so groß ist, fließt das Wasser mit viel üppigerer Wucht nach unten und Sie erhalten die doppelte Energie zurück. Mit einem solchen Perpetuum Mobile sollten Sie dann ganz schnell zum Patentamt flitzen.

Symmetrie und Erhaltungsgrößen

Die Erhaltungsgröße zur Symmetrie der Verschiebung der Zeitachse ist die Energie. Die Erhaltungsgröße zur Symmetrie, dass die Naturgesetze für einen Physiker genauso lauten wie für seinen Kollegen im Raum nebenan, ist der Impuls. Und aus der Drehsymmetrie des Universums folgt die Erhaltung des Drehimpulses.

5.1.6 KworkQuarkQuiz **

Testen Sie hier, was Sie gelernt haben.

Symmetrie beim Würfel

Wie viele Symmetrieachsen besitzt ein Würfel, d.h. um wie viele Achsen kann man ihn drehen, ohne dass er sein Aussehen ändert?

- Sieben.
- Fünf.
- Keine.

Symetrie

Wann liegt Symetrie vor?

- Symetrie gibt es nicht.
- Wenn man ein Objekt drehen kann und nichts passiert.

Symmetrie einer Kugel

Um wie viele Achsen kann man eine Kugel drehen, ohne dass sie ihr Aussehen ändert?

- Um unendlich viele.
- Um drei.
- Um eine.

Über Symmetrien zu den Quarks

5.2

Symmetrien waren die Geburtshelfer der Quarkidee: Dass Teilchen wie Protonen und Neutronen aus Quarks zusammengesetzt sind, war ein zunächst vollkommen theoretischer Gedanke. Er basierte auf Symmetrien zwischen den Teilchen.

Chemiker machen es vor ... ***

5.2.1

Das Periodensystem der Elemente lässt Rückschlüsse auf den Aufbau der Atome zu. Ganz ähnliche Überlegungen führten 100 Jahre später zur Entdeckung der Quarks.

1869 räumten Dmitrij Mendelejew und Julius Meyer mit der Unordnung auf, die ihre Chemiker-Kollegen hinterlassen hatten: Die hatten rund die Hälfte der heute bekannten chemischen Elemente zusammengetragen und akribisch deren Eigenschaften bestimmt. Nur ein System dahinter erschloss sich nicht.

Mendelejew und Meyer gelang das Meisterstück. Sie erkannten, dass sich einige Eigenschaften der Elemente periodisch wiederholten. Also sortierten sie die Elemente in ein rechteckiges Muster: das Periodensystem der Elemente.

Dem Periodensystem liegt eine Symmetrie zugrunde. Denn es ähneln sich die Eigenschaften der Elemente einer Spalte (Periode). Die so genannten Edelgase ganz rechts außen sind beispielsweise alle eher reaktionsfaul, die Alkalimetalle ganz links gehen hingegen ganz gerne Verbindungen ein.

Diese Symmetrie ist nicht perfekt, denn sonst könnte man zwei Edelgase einfach vertauschen oder einen Sack Gold durch einen mit Silber ersetzen, ohne dass irgendjemand davon Wind bekommen würde.

Aber auch die Nur-Fast-Symmetrie reichte zu erkennen, dass die Atome einer Spalte alle ganz ähnlich aufgebaut sein müssen. Und noch etwas anderes ließ sich aus der Regelmäßigkeit ableiten: Mendelejew sagte 1871 die Elemente Gallium, Scandium und Germanium samt Eigenschaften vorher, um so Lücken zu füllen, die im Periodensystem noch klafften. Entdeckt wurden diese Elemente dann in den folgenden beiden Jahrzehnten.

5.2.2 ... und Physiker nach. ***

In den 1960er Jahren folgten Physiker den Spuren der Chemiker. Das Sortieren der stark wechselwirkenden Teilchen führte wie beim Periodensystem zu Formen von erstaunlicher Regelmäßigkeit.

Fast hundert Jahre nach der Entdeckung des Periodensystems der chemischen Elemente machten es zwei Physiker den Chemikern nach. Sie versuchten einen Zoo aus über hundert stark wechselwirkenden Teilchen zu bändigen, der sich im Laufe der Jahre zu erkennen gegeben hatte. Die Eigenschaften der Teilchen waren bestimmt und Murray Gell-Mann und Yuval Ne'eman ordneten die Teilchen zu Drei- und Sechsecken.

Die Symmetrien der stark wechselwirkenden Teilchen

Um die stark wechselwirkenden Teilchen anzuordnen, bedienten sich Gell-Mann und Ne'eman dreier Eigenschaften dieser Teilchen:

- ▷ Teilchen mit derselben **elektrischen Ladung** Q wurden von Murray Gell-Mann und Yuval Ne'eman auf einer (abfallenden) Diagonalen angeordnet.
- ▷ Teilchen mit demselben **Isospin** I_3 liegen in Gell-Manns und Ne'emanns Diagrammen auf einer vertikalen Linie. Den Isospin hatten Physiker in den 1930er Jahren eingeführt, um das Proton und das Neutron zu unterscheiden, falls es keine elektrische Ladung gäbe. Man kann sich die beiden Teilchen dann als unterschiedliche Zustände desselben Teilchen vorstellen, bei denen nur dieser Wert verschieden ist. Das Neutron hat einen Isospin-Wert von $-1/2$, das Proton einen von $+1/2$. Auch den anderen Teilchen konnte man Isospin-Werte zuordnen: -1 , $-1/2$, 0 , $+1/2$ und 1 .

- ▷ Auf einer Waagerechten liegen Teilchen mit derselben **Seltsamkeit** S . In den 1940er Jahren wurden seltsame Teilchen gesichtet, die viel länger lebten, als man es von den anderen bis dato entdeckten Teilchen kannte. Daher wies man ihnen einen Wert mit Namen Seltsamkeit zu. Heute wissen wir, dass Teilchen seltsam sind, wenn in ihnen ein seltsames Quark steckt.
-

Wie beim Periodensystem konnte aus der Anordnung der bekannten Teilchen auf ein neues Geschöpf im Teilchenzoo geschlossen werden: Das so genannte Omega-Minus gab sich anderthalb Jahre nach seiner Vorhersage zu erkennen. Ein starkes Indiz, dass man hier einer großen Entdeckung auf der Spur war: nämlich der der Quarks.

Quarks, die Symmetriestifter ***

5.2.3

Zu denselben Mustern wie bei den stark wechselwirkenden Teilchen gelangten die Physiker auch, als sie ganz allgemein die Vertauschungen von drei Objekten untersuchten: den Quarks.

Die Drei- und Sechsecke, zu denen die stark wechselwirkenden Teilchen zusammengefasst werden konnten, riefen bei einigen Physikern und Mathematikern Erinnerungen hervor. Dieselben Muster erhält man nämlich auch, wenn man eine ganz bestimmte Symmetrie genauer untersucht: die Vertauschungen bzw. Drehungen von drei Objekten, die schon bald darauf von Gell-Mann „Up-Quark“, „Down-Quark“ und „Strange-Quark“ genannt wurden. Die beobachteten Drei- und Sechsecke ergeben sich dann ganz natürlich, wenn man die Vertauschungen auf Quark-Zweiergruppen (Mesonen) oder Quark-Dreiergruppen (Baryonen) anwendet. Neben Murray Gell-Mann war auch George Zweig an diesen Überlegungen beteiligt.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Es lassen sich Zusammenstellungen von Quarkverbindungen anzeigen.

Abbildung 5.6: Teilchen, die aus drei Quarks zusammengesetzt sind, können zu einem Sechseck aus acht Teilchen (Oktett) und zu einem Dreieck aus zehn (Dekuplett) angeordnet werden.

Man hatte also die stark wechselwirkenden Teilchen nach ihren Eigen-

schaften sortiert und die dabei entstandenen Muster mit den Mustern verglichen, die bei der Untersuchung einer mathematischen Theorie zum Vorschein kamen. Daraus zogen Physiker den Schluss, dass es Quarks geben müsse.

Die Symmetriegruppe zu den Quarks

Die Symmetriegruppe, also die mathematische Menge aller möglichen Vertauschungen und Drehungen, die man den drei leichtesten Quarks unterwerfen kann, wird $SU(3)$ genannt, die spezielle unitäre Gruppe in drei Dimensionen.

5.2.4 Alles Quark? ***

Von den Quarks zeigten sich zunächst nicht alle Physiker begeistert. Einigen Forschern ging diese Idee, die auf reinen Symmetrieüberlegungen fußte, einfach zu weit – bis es fünf Jahre später erste experimentelle Belege gab.

So attraktiv die Symmetrieüberlegungen auch erschienen, noch sprach einiges gegen die Quarkidee:

1. So hatte man Quarks nicht direkt beobachtet. Das einzige Indiz waren regelmäßige Muster, die man mit ihnen erklären könnte.
2. Die Teilchen sollten zudem drittelzahlige elektrische Ladungen besitzen. Dabei hatte man in zahlreichen Experimenten nur ganzzahlige Ladungen vorgefunden.

Einen der beiden Quarkerfinder, George Zweig, setzte man sogar vor die Tür: Ihm verweigerte man eine neue Anstellung an einer Universität in den USA, weil der dort führende theoretische Physiker meinte, „das Quarkmodell sei das Produkt eines Scharlatans...“ Dem anderen Quarkdenker, Murray Gell-Mann, erging es besser: Er suchte keinen neuen Job.

Erst im Jahr 1969 wendete sich das Blatt für die Quark-Idee. Damals feuerten Physiker am SLAC energiereiche Elektronen auf Protonen. Und dabei gelang der Nachweis, dass im Inneren der Protonen kleinere Teilchen schlummern müssten: Quarks, zunächst aufgrund mathematischer Symmetrieüberlegungen gefordert, wurden physikalische Wirklichkeit.

KworkQuarkQuiz ***

5.2.5

Testen Sie hier, was Sie gelernt haben.

Quarkdenker

Wer hat die Quarks vorhergesagt?

- Dimitrij Meneldejew und Lothar Meyer
- Murray Gell-Mann und Yuval Ne'eman
- Murray Gell-Mann und George Zweig

Spieglein, Spieglein, ...

5.3

Zum Glück ist nicht alles symmetrisch: Denn gäbe es da nicht Unterschiede in den Gesetzmäßigkeiten für unser Universum und sein Spiegelbild, so würden wir vielleicht nicht existieren.

C, P und T ***

5.3.1

Physiker kennen drei verschiedene Spiegelungen. Denn sie spiegeln nicht nur den Raum, sie drehen auch Materie und Zeit auf links.

P: Spiegeln des Raumes

Die offizielle Bezeichnung der Physiker für eine Spiegelung des Raumes lautet P (Paritätstransformation). Sie entspricht einer Spiegelung an einer Ebene (wie bei einem Spiegel) und der gleichzeitigen Drehung um 180 Grad. Aber auch hier gilt: Links und rechts werden vertauscht. Eine perfekte Kugel ist von ihrem Spiegelbild nicht zu unterscheiden. Ein X ebenso wenig wie ein U.

Den allermeisten Gleichungen der Physik ist es egal, wo links und rechts sind: Sie könnten keinen Unterschied zwischen einem Billardspiel und einer gespiegelten Videoaufzeichnung entdecken.

Für Politiker gilt das nicht: Hier sind links und rechts nicht dasselbe. Auch tragen Menschen ihr Herz meist links und nichts rechts. Und gefahren wird auf dem europäischen Festland seit Napoleon rechts. Politiker, Natur und Franzosen haben sich hier irgendwann einmal auf eine der beiden Möglichkeiten festgelegt: Im Makrokosmos ist die Spiegelsymmetrie gebrochen.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] Zwei Uhren – eine läuft vorwärts, die andere rückwärts.

Abbildung 5.7: T lässt die Zeit rückwärts laufen.

T: Zeitumkehr

Nach einer Spiegelung T läuft die Zeit (engl.: time) in umgekehrte Richtung. Aus dem Morgen wird das Gestern.

Angenommen, Sie haben den Zusammenstoß zweier Billardkugeln auf eine Videokassette gebannt. Sie könnten den Film dann rückwärts abspielen und würden keinen großen Unterschied entdecken. Denn in diesem Fall ist unsere Welt symmetrisch gegenüber Zeitspiegelungen. Das ist bei Billardkugeln so und meistens auch in der Teilchenphysik.

Doch Ausnahmen im Makrokosmos sind hier die Regel: Gläser zer-springen und setzen sich nicht von selbst zusammen, und das Chaos in der Schreibtischschublade wird auch immer größer. Gerade wenn viele Teilchen am Werk sind, wird Zeitsymmetrie immer unwahrscheinlicher. Viele Köche verderben das T.

C: Materie und Antimaterie

Physiker kennen da noch eine dritte Möglichkeit, das Universum zu spiegeln. Bei der Spiegelung C tauschen Teilchen und Antiteilchen ihre Rollen und damit auch ihre Ladungen (engl.: charge).

Stellen Sie sich unsere Welt komplett aus Antimaterie vor! Man könnte erst einmal denken, dass das keine Auswirkung auf Ihr persönliches Leben hätte. Atome bestünden dann eben nicht aus Elektronen und Kernen, sondern aus Anti-Elektronen und Anti-Kernen. Die Nuss-Nougat-Creme wäre eine Anti-Nuss-Nougat-Creme. Schmecken würde sie genauso, weil Ihre Zunge ja auch eine Antizunge wäre.

5.3.2 **Neutrinos sind Vampire** ***

Würde man das Universum spiegeln, könnten Neutrinos nicht mit den gängigen Gesetzen der Teilchenphysik beschrieben werden: Neutrinos sind Vampire.

Bis in die Mitte der 1950er Jahre waren die meisten Physiker davon ausgegangen, dass unser Universum symmetrisch sei unter der Raum-

spiegelung P. Dabei hatten sie vergessen nachzusehen, ob dem auch wirklich so ist.

Die Physiker Lee und Yang waren da misstrauischer und ersannen 1956 ein Experiment, mit dem die Gültigkeit der P-Symmetrie überprüft werden sollte. Ein Jahr später zeigte sich: Die P-Symmetrie ist verletzt. Ein Jahr danach erhielten Lee und Yang den Nobelpreis.

Die Verletzung der P-Symmetrie wird bei Neutrinos besonders deutlich. Denn hier ist sie völlig außer Gefecht gesetzt. Dazu muss man wissen, dass sich Neutrinos so verhalten, als drehten sie sich um die Richtung, in die sie fliegen. Dazu stünden ihnen prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Im Uhrzeigersinn oder dagegen. Bisher wurden jedoch nur Neutrinos beobachtet, die sich gegen den Uhrzeigersinn drehen. Anti-Neutrinos drehen sich immer mit dem Uhrzeigersinn. Wenn man das Universum nun spiegelt, so schaffen wir Teilchen, die es auf dieser Seite des Spiegels nicht gibt: Neutrinos, die sich mit dem Uhrzeigersinn um ihre Bewegungsachse drehen. Neutrinos sind wie Vampire. Sie haben keine Spiegelbilder.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] (1) Ein linksdrehendes Neutrino wird P-gespiegelt und ergibt ein (nicht-existierendes) rechtsdrehendes Neutrino. (2) Ein linksdrehendes Neutrino wird P-gespiegelt und ergibt ein (nicht-existierendes) linksdrehendes Anti-Neutrino (2) Ein linksdrehendes Neutrino wird P- und C-gespiegelt und ergibt ein (existierendes) rechtsdrehendes Anti-Neutrino

Abbildung 5.8: Eine P- oder eine C-Spiegelung ergeben nicht existente Neutrinos. Alles ist wieder im Lot, wenn man CP-spiegelt.

Aber nicht nur die P-Symmetrie ist verletzt. Dasselbe gilt auch für die Spiegelung C. Diese wandelt Neutrinos in Antineutrinos um. Wenn man dabei aber nicht gleichzeitig den Raum spiegelt, erhalten wir auch wieder sich falsch drehende Neutrinos. Das heißt, die physikalischen Gesetze – und damit das Universum – sind weder C- noch P-symmetrisch. Betrachtet man jedoch C und P gemeinsam, ist alles wieder im Lot: Aus einem linksdrehenden Neutrino wird dann ein rechtsdrehendes Anti-Neutrino.

Doch der Glaube an die Erhaltung von CP war nur von kurzer Dauer. Der Symmetriezerfall im Weltbild der Physik schritt unaufhaltsam voran.

1964 fanden James Watson Cronin (*1931) und Val Logsdon Fitch (*1923) heraus, dass auch die Kombination CP nicht gilt. Dazu hatten sie Kaonen untersucht – Teilchen, die in Teilchenphysikexperimenten erzeugt werden und schnell wieder zerfallen. Cronin und Fitch zeigten, dass der Zerfall einiger weniger dieser Kaonen die CP-Symmetrie verletzt.

5.3.3 **Wieso bestehen wir aus Materie? *****

Um den Sieg der Materie über die Antimaterie in unserem Universum zu erklären, greifen Physiker auf die Verletzung von CP zurück.

Zu Beginn des Universums war es unvorstellbar heiß. Es war so heiß, dass aus seiner Hitze Materie und Antimaterie entstanden. Die Welt war dabei perfekt symmetrisch: Mit jedem Teilchen gebar sie auch ein Antiteilchen. Doch deren Existenz währte meist nur kurz: Trafen sich Teilchen und Antiteilchen, so vernichteten sich die beiden zu reinem Licht.

Mit der Zeit kam die Kälte. Das Universum kühlte sich ab. Und während so immer weniger Teilchenpaare entstanden, ging deren gegenseitige Vernichtung unentwegt weiter.

Wäre es dabei nicht zu Unregelmäßigkeiten gekommen, hätte sich die Materie wohl vollständig vernichtet. Das Universum bestünde dann nur noch aus Licht: Das hätte zwar die Erfindung der Glühlampe überflüssig gemacht, aber auch die Entstehung ihrer Erfinder vereitelt.

Astronomen ist es gelungen, die Photonen, die bei der großen Materie-Antimaterie-Vernichtung entstanden sind, aufzuspüren: Sie bilden die so genannte kosmische Hintergrundstrahlung. Wenn man eifrig zählt und ein wenig abschätzt, erhält man 10.000.000.000.000 Photonen für jedes Materieteilchen im Universum. Da bei einer Teilchen-Antiteilchen-Vernichtung zwei Photonen entstehen, muss es vor der Vernichtung ein Verhältnis von 5.000.000.000.000 Antiteilchen zu 5.000.000.000.001 Materieteilchen gegeben haben.

Dieses eine zusätzliche Teilchen stellt den Sieg der Materie über die Antimaterie dar. 1967 stellte der russische Physiker und spätere Friedens-Nobelpreisträger Andrej Dmitrijewitsch Sacharow (1921-1989) eine Theorie auf, wie es zu diesen zusätzlichen Materieteilchen kommen konnte. Die Theorie ist schon recht kompliziert, aber die Verletzung von CP ist ein wesentlicher Bestandteil.

Ein starkes Team: CPT ***

5.3.4

Auch wenn das Universum bezüglich der einzelnen Spiegelungen C, P oder T nicht immer symmetrisch ist, eine der Grundfesten der modernen Physik lautet: Führt man alle drei Spiegelungen nacheinander aus, passt es auf jeden Fall.

Nicht alle Gesetze unseres Universums sind unter den Spiegelungen C, P und T symmetrisch. Unter bestimmten Umständen ist ein wie auch immer gespiegeltes Universum dann nicht gleich dem Original. Die Gesetze müssten dann umgeschrieben werden.

Die Kombination aller drei Spiegelungen – C, P und T – scheint jedoch eine perfekte Symmetrie zu sein. Dies folgt zumindest aus den wenigen grundlegenden Annahmen der relativistischen Quantenfeldtheorie, dem Fundament der modernen Physik. Ohne CPT würde dieses Fundament in sich zusammenstürzen. Diese Katastrophe erscheint nach dem heutigen Kenntnisstand recht unwahrscheinlich.

Konkret heißt CPT: Wenn Sie unser Universum spiegeln würden, die Zeit rückwärts laufen ließen und dann auch noch Teilchen und Antiteilchen miteinander vertauschten, dann hätten Sie nicht nur jede Menge zu tun, sondern es würde noch nicht einmal jemand merken.

KworkQuarkQuiz ***

5.3.5

Drehende Neutrinos

Welche Spiegelung liegt vor, wenn man ein linksdrehendes Neutrino in ein rechtsdrehendes Neutrino verwandelt?

- C
- P
- T

Symmetrie: P-Spiegelung

Welche Aussage ist richtig?

- Die P-Spiegelung beinhaltet eine Drehung.
- Die P-Spiegelung beinhaltet eine Raum-Spiegelung.

Symmetrie hinter den Kräften

5.4

Die Kräfte des Standard-Modells der Teilchenphysik lassen sich alle auf jeweils eine Symmetrie zurückführen. Wenn man diese für das Universum fordert, bekommt man die Wechselwirkungen frei Haus.

5.4.1 Teilchen frei Haus ***

Wie kommt man wohl auf die Idee, sich die starke Kraft über den Austausch farbiger Gluonen zwischen bunten Quarks vorzustellen? Psychedelische Drogen waren hier wohl nicht am Werk: Symmetrien wiesen den Weg.

Die Theorien zu allen Kräften des Standard-Modells basieren auf demselben Prinzip – auf der so genannten lokalen Eichsymmetrie. Dabei gehen die Theoretiker davon aus, dass für Teilchen wie Elektronen oder Quarks bestimmten Symmetrien gelten: lokale Eichsymmetrien. Die Wechselwirkungsteilchen, wie Photonen und Gluonen, bekommt man dann frei Haus.

Entdeckt hatte man das Prinzip der lokalen Eichsymmetrie zunächst bei der elektromagnetischen Kraft. Als man dann nach einer Beschreibung der anderen Kräfte suchte, griff man elegant auf dieses Konzept zurück.

5.4.2 Windige Gedanken ***

Die Symmetrien hinter den Kräften basieren auf so genannten Eichungen. Wenn man eine Küchenwaage eicht, verschiebt man den Nullpunkt. Eichungen sind überall wichtig, wo Zahlen eine Rolle spielen, es aber nur auf Unterschiede ankommt – wie beim Wind.

Wind ist Luft, die weht, wenn an zwei Orten verschiedene Luftdrücke herrschen: Wenn der Luftdruck „hier“ höher ist als „dort“, wird sich Luft von „hier“ nach „dort“ aufmachen. Es weht ein Wind.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Eine Szene mit Windfahne. Links und rechts lässt sich getrennt der Luftdruck einstellen. Wenn es eine Differenz im Luftdruck gibt, so weht Wind.

Abbildung 5.9: Wind: Es kommt auf den Unterschied an. Wenn Sie die Luftdrücke links und rechts verschieden wählen, weht Wind.

Beim Wind kommt es auf den Luftdruckunterschied an: Je größer dieser Unterschied ist, umso stärker bläst der Wind. So weht zwischen den Luftdrücken 25 Einheiten und 30 Einheiten ein schwächeres Lüftchen als zwischen 25 Einheiten und 50 Einheiten.

Und es kommt nur auf den Unterschied an: Wie hoch die einzelnen Luftdrücke genau sind, ist egal: Zwischen den Werten 35 Einheiten und 10 Einheiten herrscht derselbe Wind wie zwischen 185 Einheiten und 160 Einheiten. Wir könnten daher den Nullpunkt unserer Luftdruckskala beispielsweise um 150 Einheiten nach unten verschieben. Aus 35 Einheiten würden dann 185 Einheiten, und aus 10 Einheiten würden 160 Einheiten. In beiden Fällen bläst derselbe Wind.

Diese Form der Nullpunktverschiebung nennen Physiker globale Eichung (global = überall). Da sich am Wind nichts ändert, wenn wir global eichen, liegt eine so genannte globale Eichsymmetrie vor.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Eine Szene mit Windfahne. Der Luftdruck links und rechts lässt sich um jeweils denselben Betrag ändern. Dies entspricht einer Änderung des Nullpunkts. Dies ändert die Differenz, also den bewirkten Wind, nicht.

Abbildung 5.10: Globale Eichsymmetrie: Wenn wir den Nullpunkt für die Luftdrücke an jedem Ort um denselben Wert verschieben, könnten wir dieselben Formeln verwenden, um den Wind zu berechnen. Der Wind nach der Eichung ist der vor der Eichung.

Gehen wir einen Schritt weiter: Was wäre, wenn wir den Nullpunkt für den Luftdruck an den beiden Orten verschieden verschoben? Die Folge wäre ein zusätzlicher Luftdruckunterschied zwischen den beiden Orten. Daraus würde ein neuer Wind resultieren – quasi ein mathematisches Abfallprodukt, mit dem wir nichts anfangen können. Es liegt also keine lokale Eichsymmetrie vor (lokal = nur örtlich).

Es gibt da aber einen Trick, wie wir dennoch lokale Eichsymmetrie erreichen könnten. Wir setzen einen großen Ventilator auf die Wiese und stellen ihn so ein, dass er dem zusätzlichen Wind entgegen bläst, der durch die lokale Eichung entsteht. Der Ventilator entsorgt den mathematischen Abfall, so dass der Wind nach der Eichung genauso groß ist wie der vor der Eichung. Mit dem Ventilator ist unser Luftdruck lokal eichsymmetrisch.

Lokale Eichsymmetrien haben sich aber zu einem der wichtigsten Prinzipien der modernen Physik gemausert. Ihretwegen sind Physiker auf die Form der Theorie der starken Kraft gestoßen: Sie hatten das Prinzip bei der Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung gefunden und es dann auf die starke Kraft übertragen.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Eine Szene mit Windfahne. Links und rechts kann der Luftdruck getrennt verändert werden, Zusätzlich sorgt aber ein Ventilator dafür, dass der entstehende Wind ausgeglichen wird.

Abbildung 5.11: Lokale Eichsymmetrie mit Ventilator: Die Luftdrücke sind gleich. Es weht also kein Wind. Wenn wir den Nullpunkt für die Luftdrücke an jedem Ort um verschiedene Werte verschieben, brauchen wir einen Ventilator, der dem Wind, der entstehen würde, entgegen bläst. Nur dann ist vor der Eichung nach der Eichung.

5.4.3 Global Pfeile eichen: Ladungserhaltung ***

Auch bei Elektronen und Co kann geeicht werden. Denn diese elektrisch geladenen Teilchen werden mit Hilfe von Zahlen beschrieben, bei denen man einen Nullpunkt wählen muss. Aus dieser Freiheit folgt die Ladungserhaltung.

Elektronen und Quarks werden in der Teilchenphysik mit Hilfe von Feldern beschrieben. Das ist ein Art physikalische Buchführung: Hier ordnet man jedem Punkt in Raum und Zeit einen Wert zu. Ein Luftdruckfeld besagt beispielsweise, wie groß der Luftdruck an einem Ort zu einer bestimmten Zeit ist. Und mit Hilfe des Elektronenfeldes berechnen Physiker die Wahrscheinlichkeit, an einem Ort ein Elektron anzutreffen.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] Zwei Messinstrumente zeigen jeweils einen Wert in einem Elektronenfeld an.

Abbildung 5.12: Das Elektronenfeld kann man sich aus kleinen Pfeilen zusammengesetzt vorstellen: An jedem Raum-Zeit-Punkt zeigen solche Pfeile in eine bestimmte Richtung – so wie eine Kompassnadel. Dabei muss man für das Elektronenfeld einmal eine (beliebige) Nullrichtung wählen.

Vor dem Universum sind alle Richtungen gleich. Daher sollte nicht viel passieren, wenn wir die Nullrichtung des Elektronenfeldes weltweit um einen festen Betrag verdrehen. Das Elektronenfeld ist daher global eichsymmetrisch.

Wir können uns sogar zu jeder Zeit eine neue globale Eichung überle-

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Zwei Messinstrumente zeigen jeweils einen Wert in einem Elektronenfeld an. Die Nullrichtung dieser Werte kann verschoben werden.

Abbildung 5.13: Keine Richtung ist besser als die anderen: Das Elektronenfeld kann global geeicht werden, d.h. die Nullrichtung des Elektronenfeldes kann für alle Orte um den gleichen Winkel gedreht werden.

gen – zum Beispiel eine solche, die einen ausgewählten Pfeil immer in die Nullrichtung zeigen lässt.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] Zwei Messinstrumente zeigen jeweils einen Wert in einem Elektronenfeld an. Der linke Wert wird jeweils auf Null geeicht.

Abbildung 5.14: Die Dauernull: Das Elektronenfeld wird global so geeicht, so dass der linke Pfeile immer in Nullrichtung zeigt.

Das Elektronenfeld ist global eichsymmetrisch. Nach einem Satz in der Physik ist mit den meisten Symmetrien eine Erhaltungsgrößen verbunden. Im Fall der globalen Eichsymmetrie des Elektronenfeldes ist es die elektrische Ladung: Weil wir das Elektronenfeld global eichen können, ohne dass sich an der Physik etwas ändert, ist die elektrische Ladung erhalten.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Trickfilm] In einem Balkendiagramm werden die positiven und negativen Ladungen im Universum angezeigt. Die Summe ergibt immer Null.

Abbildung 5.15: Was auch geschieht: Die Gesamtladung im Universum bleibt Null. Für jede positive Ladung entsteht auch eine negative.

Im Lichte der Beliebigkeit: Photonen ***

5.4.4

Den Nullpunkt von Elektronenfeldern kann man nur dann an jedem

Punkt in Raum und Zeit beliebig wählen, wenn man Photonenfelder einführt, die den mathematischen Abfall, der dabei entsteht, schlucken. Was folgt wohl, wenn wir für jeden Punkt des Elektronenfeldes eine andere Nullrichtung wählen? Zunächst einmal blanker Unsinn, möchte man meinen. Denn dann könnten wir beispielsweise alle Pfeile auf einen beliebigen Wert – wie beispielsweise – Null zeigen lassen. Wir müssten uns dann nicht die Arbeit machen, die Werte in einem komplizierten Feld zu speichern. Die Werte wären vollkommen beliebig. Wir werden uns mit dieser Beliebigkeit abfinden müssen. Denn die lokale Eichsymmetrie von Feldern ist eines der wichtigsten Prinzipien der modernen Physik.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: [Interaktion] Zwei Messinstrumente zeigen jeweils einen Wert in einem Elektronenfeld an. Man kann die Nullrichtungen der beiden Werte getrennt einstellen.

Abbildung 5.16: Beliebig: Wenn man das Elektronfeld lokal eicht, kann man jeden beliebigen Wert erreichen. Dies bleibt nur dann ohne Auswirkungen für die Physik, wenn es zudem ein Feld wie das elektromagnetische gibt, welches die mathematischen Abfallprodukte schluckt.

Auf diesem Prinzip ruht die Quantenelektrodynamik, die Quantentheorie zur elektromagnetischen Wechselwirkung. Dort reicht es aus, von einem Elektronenfeld auszugehen und die lokale Eichsymmetrie zu fordern.

Das Elektronenfeld ist nicht lokal eichsymmetrisch: Es entstehen mathematische Abfallprodukte bei seiner lokalen Eichung. Diese Abfallprodukte sind nun aber genau so beschaffen, dass sie bei einer Eichung eines zweiten Feldes geschluckt würden, wenn dieses zweite Feld die Eigenschaften des elektromagnetischen Feldes hat. Die genaue Form des elektromagnetischen ergibt sich damit automatisch aus der Forderung nach lokaler Eichsymmetrie.

Wieso funktioniert das nur? Das liegt daran, dass wir weder Ladungen (Elektronen) noch den Elektromagnetismus getrennt voneinander betrachten können: Wir benötigen Ladungen, um elektromagnetische Kräfte zu messen. Elektronen können wir aber auch nur mit elektromagnetischen Feldern (Licht) sichtbar machen. Um das eine zu untersuchen, sind wir immer auf das andere angewiesen. Wenn wir nun alle Pfeile des Elektronenfeldes beispielsweise auf Null drehen, könnten

wir das mit einer Eichung des elektromagnetischen Feldes ausgleichen. Durch die Verwebung der Felder ist dann nach der Eichung vor der Eichung.

Farben eichen: QCD ***

5.4.5

Bei der Beschreibung der starken Kraft griffen Physiker auf das zurück, was sich beim Elektromagnetismus schon bestens bewährt hatte: Sie nahmen an, dass für die Quarks eine lokale Eichsymmetrie gilt. Die Gluonen erhielten sie dann frei Haus.

Als Physiker im 20. Jahrhundert bei der Theorie der elektromagnetischen Kraft auf das Prinzip der lokalen Eichsymmetrie gestoßen waren, war dies zunächst nur eine neue Form, Bekanntes zu beschreiben. Dieses Prinzip erwies sich dann aber als extrem nützlich, als man für die beiden anderen Kräfte des Standard-Modells nach passenden Beschreibungen Ausschau hielt.

Bereits ein Jahr nach der Einführung der Quarks war klar, dass es diese Teilchen in drei unterschiedlichen Sorten geben müsste. Quarks gibt es nur in Gruppen wie Protonen. Und damit man die Teilchen dort unterscheiden kann, führte man eine farbenfrohe Bezeichnung ein. Seitdem gibt es rote, grüne und blaue Quarks. Die Wahl der Farben ist jedoch willkürlich, so wie es die Nullrichtung der Elektronenfeldpfeile ist. Die Farben sind vertauschbar. Und der Wunsch, die Farben an jedem Punkt nach Gutdünken wählen zu können, entspricht der Forderung einer lokalen Eichsymmetrie.

Wenn wir die Quarkfelder lokal farbeichen, dann entstehen wie beim Elektronenfeld mathematische Abfallprodukte. Aus ihnen kann auf die Art eines zweiten Feldes geschlossen werden. Dieses kann dann gleichzeitig so geeicht werden, dass die Abfallprodukte verschwinden.

Aus diesen Überlegungen kann man auf die Form des Feldes der starken Kraft schließen. Aus der folgt, dass es acht Gluonen statt des einen Photons geben muss. Die ganze Theorie heißt Quantenchromodynamik (QCD), die Quantenlehre von der Farbkraft.

Geschmäcker eichen: QFD ***

5.4.6

1979 pokerte das Nobelpreiskomitee recht hoch. Es schenkte drei Wissenschaftlern Ruhm und eine Menge Geld für die Beschreibung der elektroschwachen Kraft. Erst vier Jahre später entdeckte man die Teilchen, welche von der Theorie vorhergesagt wurden. Die preisgekrönte

Theorie erschien einfach zu schön und elegant, als dass sie falsch sein konnte.

Die Theorie der elektroschwachen Kraft schaffte, was das letzte Mal einhundert Jahre zuvor gelang und woran sich selbst Einstein die Zähne ausbiss: Sie vereinigte zwei Kräfte. Diesmal waren es aber nicht der Magnetismus und die Elektrizität, die von Maxwell zum Elektromagnetismus vereinigt wurden. Vielmehr sollte der Elektromagnetismus selbst mit der schwachen Wechselwirkung zur elektroschwachen Kraft werden.

Auch dieser Theorie liegt eine lokale Eichsymmetrie zugrunde. Sie ist ein wenig unanschaulich, und wir wollen sie hier nicht weiter vertiefen. Mit Hilfe abstrakter Symmetrien konnte man aber zwei der vier Wechselwirkungen zusammenfassen. Die Theorie sagt als Wechselwirkungsteilchen die W s und Z s voraus. Diese wurden 1983 am CERN in der Nähe von Genf entdeckt.

Die Theorie heißt elektroschwache Theorie oder Quantenflavordynamik (QFD) – die Quantenlehre der Geschmäcker: In ihr werden Geschmäcker (flavors) geeicht.

Eingefrorene Symmetrie

Warum wir dennoch zwischen elektromagnetischer und Schwacher Kraft unterscheiden? Es ist zu kalt in unserem Universum. Die Symmetrie ist eingefroren: Eigentlich gibt es da eine Symmetrie – sie hat sich aber versteckt. Die elektroschwache Wechselwirkung taut erst bei einer Billion Grad Celsius auf – einer Temperatur, wie sie nur kurz nach dem Urknall herrschte.

5.5 Supersymmetrie

Mit der Supersymmetrie versuchen Physiker, die strikte Trennung zwischen Materie und Kräften zu überwinden. Zu einem nicht geringen Preis: Die Zahl der Teilchen würde sich glatt verdoppeln. Gesehen hat man von dieser zweiten Hälfte noch nichts.

5.5.1 Ein kleiner Unterschied ***

Die Teilchenwelt ist in zwei Lager geteilt: Da gibt es Materie- und Wechselwirkungsteilchen, beide Arten unterscheiden sich in einem we-

sentlichen Punkt: dem so genannten Spin. Ein kleiner Unterschied mit großen Folgen.

Der Spin ist eine Eigenschaft von Teilchen, die aufs Engste mit dem Magnetfeld verknüpft ist, das die Teilchen umgibt. Als Quantengröße kann der Spin nicht beliebige Werte annehmen, das Magnetfeld kann nicht in beliebige Richtungen zeigen.

Will man die Spinrichtung eines Teilchens bestimmen, so kann man es ein äußeres Magnetfeld durchfliegen lassen und schauen, in welche Richtung es abgelenkt wird. Hier unterscheiden sich Materie- und Wechselwirkungsteilchen. Bei Materieteilchen sind nur zwei Einstellungen der Magnetfeldachse möglich: parallel oder entgegengesetzt zum äußeren Magnetfeld. Bei den schweren Wechselwirkungsteilchen gibt es drei Möglichkeiten. Teilchen mit einer geraden Anzahl von Möglichkeiten nennt man Fermionen, bei einer ungeraden Anzahl sprechen Physiker von Bosonen.

Gerade oder ungerade – dieser Unterschied scheint gering; er führt jedoch zu einem völlig anderen Verhalten von Materie- oder Wechselwirkungsteilchen, wenn mehrere von ihnen aufeinandertreffen. So können Materieteilchen im Gegensatz zu Wechselwirkungsteilchen nicht im selben Zustand verweilen. Das ist auch gut so: Denn daraus folgt, dass die Elektronen eines Atoms nicht gleichzeitig im Zustand niedrigster Energie verharren können, sondern sich in fein säuberlich geordneten Energiestufen um den Kern befinden. Ohne dieses Prinzip würden die Elektronen in den Atomen alle auf die niedrigste Energieebene fallen. Die Chemie einer solchen Welt hätte mit der unsrigen nichts gemein. Für Wechselwirkungsteilchen (Bosonen) gilt diese Einschränkung nicht, sie können sich zusammenzuklumpen.

Die Supersymmetrie vereint nun die ungleichen Brüder, sie hebt die Trennung der Welt in Materie- und Wechselwirkungsteilchen auf. Jedoch zu einem nicht geringen Preis: Die Zahl der Teilchen würde sich verdoppeln.

Gesehen hat man von dieser zweiten Hälfte noch nichts, auch wenn intensiv danach Ausschau gehalten wird.

Der Spin

Den Spin eines Teilchens gibt man in halbzahligen oder ganzzahligen Vielfachen des Planckschen Wirkungsquantums h an:

$$0 \frac{h}{2\pi}, \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}, 1 \frac{h}{2\pi}, \frac{3}{2} \frac{h}{2\pi}$$

usw.

Materieteilchen wie Elektronen und Quarks haben einen Spin von $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$. Sie heißen Fermionen. Die Wechselwirkungsteilchen des Standard-Modell – die Photonen, Ws, Zs und Gluonen – haben einen Spin von $1 \frac{h}{2\pi}$. Solche Teilchen nennt man Bosonen.

5.5.2 Die Teilchenverdopplerin **

Der Supersymmetrie zufolge soll es mehr als doppelt so viele Teilchensorten geben, als man bisher gesichtet hat. Denn zu jedem Materieteilchen gesellt sich ein Wechselwirkungsteilchen und umgekehrt.

Nach der Supersymmetrie gibt es zu jedem Materieteilchen (Fermion) ein Wechselwirkungsteilchen (Boson) und umgekehrt.

Gefunden wurden diese Super-Teilchen noch nicht. Aber Namen haben sie schon: Den Super-Partnern der Materieteilchen stellt man ein „s“ vorweg. Die supersymmetrischen Zwillinge der Wechselwirkungsteilchen bekommen ein „ino“ hinten angestellt. Und so tummeln sich in der supersymmetrischen Welt Selektroten, Gluinosen, Squarks und Higgsinos.

- ▷ Elektron – Selektroten
- ▷ Neutrino – Sneutrino
- ▷ Quark – Squark
- ▷ Gluon – Gluino
- ▷ Photon – Photino
- ▷ Higgs – Higgsino

5.5.3 Wieso Supersymmetrie? ***

Auch wenn supersymmetrische Teilchen noch nicht entdeckt wurden. Es spricht einiges für die Supersymmetrie.

Die letzte Symmetrie

Noch eine Symmetrie? Wird das denn nie ein Ende nehmen? Werden Physiker sich ständig neue Symmetrien ausdenken und diese dann womöglich auch noch entdecken? Die Aussichten für ein definitives Nein stehen gut. Denn 1975 bewiesen Mathematiker, dass es wohl keine weiteren Symmetrien gibt.

Die Gleichungen der Teilchenphysik zeigen eines in jedem Fall: Theoretisch bietet unser Universum Platz für die Supersymmetrie. Daher

werden Teilchenphysiker nicht ruhen bis zu dem Tag, an dem sie diese letzte Symmetrie direkt nachgewiesen haben oder einen Grund dafür erkennen, warum es sie nicht gibt. Alle anderen Symmetrien, die theoretisch möglich erschienen, wurden auch entdeckt. Warum sollte es bei der Supersymmetrie anders sein?

Urkraft

Eines der großen Ziele der Teilchenphysik ist die Vereinheitlichung aller Kräfte. Physiker kennen derzeit vier Wechselwirkungen. Zu viele!, meinen die meisten Theoretiker. Ihnen wäre eine einzige Urkraft am liebsten, aus der sich die anderen Kräfte ableiten würden.

Für die Existenz einer Urkraft spricht, dass sich die Stärken der Kräfte bei kleinen Distanzen angleichen. Bei Abständen im Bereich von Atomen unterscheiden sich die Stärken der elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkungen noch beträchtlich. Steigt man die Längenskala jedoch immer tiefer hinab, so bewegen sich die Stärken aufeinander zu. Irgendwann treffen sie sich sogar. Wenigstens fast: Vorkhersagen zeigen, dass sich die Stärken bei winzigen Abständen zwar sehr nahe kommen, sich jedoch knapp verfehlen.

Das verhält sich anders, wenn supersymmetrische Teilchen in den Rechnungen berücksichtigt werden. Dann zeigt sich, dass die elektromagnetische, schwache und starke Kraft dieselbe Stärke annehmen – ein wichtiges Indiz für die Existenz einer Urkraft.

Feinabstimmung

Das Standard-Modell der Teilchenphysik ist extrem empfindlich. Damit hier keine Unendlichkeiten entstehen, müssen die Parameter, die man hineinsteckt, extrem gut aufeinander abgestimmt sein – besser als 0,000 000 000 000 1 Prozent genau. Dass wir in einer Welt leben, bei der alles so genau stimmt, ist unwahrscheinlich.

In einem supersymmetrischen Standard-Modell wird alles viel einfacher. Denn viele Beiträge von Bosonen und Fermionen heben sich gegenseitig auf. Da mit der Supersymmetrie diese beiden Teilchensorten immer in Paaren vorkommen, reagiert ein supersymmetrisches Standard-Modell viel weniger sensibel auf seine Parameter. Mit der Supersymmetrie steigt also nicht nur die Zahl der Teilchen in dieser Welt, sondern auch ihre Wahrscheinlichkeit überhaupt zu existieren.

Lexikon

ALICE **

6.1

ALICE ist einer der Detektoren am Teilchenbeschleuniger LHC. Hier werden die Zusammenstöße von schweren Blei-Ionen beobachtet, um einen Materiezustand zu untersuchen, wie er kurz nach dem Urknall existiert haben soll: das Quark-Gluon-Plasma.

Der ALICE-Detektor ist 16 Meter hoch, 16 Meter breit und 26 Meter lang. Er wiegt rund 10.000 Tonnen. Am ALICE-Experiment nehmen mehr als 1.000 Wissenschaftler teil, aus 94 Instituten in 28 Ländern (Stand 2006).

Ausmaße

Die Abkürzung ALICE steht für „A Large Ion Collider Experiment“.

Name

▷ LHC ▷ Quark-Gluon-Plasma

Siehe auch

Allgemeine Relativitätstheorie **

6.2

Nach der allgemeinen Relativitätstheorie ziehen sich Massen an, weil sie den Raum und die Zeit krümmen. Wie auch die spezielle Relativitätstheorie wurde sie von Albert Einstein erdacht.

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Gravitationskraft ▷ Kosmologie ▷ Raumzeit
▷ Relativitätstheorie ▷ Spezielle Relativitätstheorie

Siehe auch

Anderson, Carl (1905–1991) **

6.3

Amerikanischer Physiker. Carl David Anderson entdeckte 1932 das

Positron und fünf Jahre später das Myon (1937, mit S. H. Neddermeyer).

- Eckdaten Carl Anderson wurde am 3. September 1905 in New York geboren und starb am 11. November 1991 in San Marino, Kalifornien.
- Nobelpreis Carl Anderson erhielt 1936 den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung des Positrons.“
- Siehe auch ▷ Myon ▷ Nobelpreis ▷ Positron

6.4 Antimaterie *

Antimaterie ist aus Antiteilchen aufgebaut, so wie „normale“ Materie aus normalen Teilchen besteht.

- Anti-Atome Einige leichte Antiteilchen kommen in der Natur vor, ganze Atome aus Antimaterie sind hingegen nicht natürlich. 1995 ist es am CERN-Experiment LEAR gelungen, aus Positronen und Antiprotonen künstliche Antiwasserstoff-Atome zu bilden. Diese Anti-Atome vernichten sich innerhalb kürzester Zeit, wenn sie mit „normaler“ Materie in Kontakt treten.

Siehe auch ▷ Antiteilchen

6.5 Antineutron **

Antiteilchen zum Neutron. Das Antineutron ist wie das Neutron elektrisch ungeladen und hat eine Masse, die rund 2000-mal so groß ist wie die des Elektrons. Es besteht aus einem Anti-Up-Quark und zwei Anti-Down-Quarks.

- Entdeckung Das Antineutron wurde 1956 von B. Cork und Team entdeckt.

Details zum Antineutron

Name Antineutron

Entdeckung 1956

Zusammensetzung ein Anti-Up-Quark und zwei Anti-Down-Quarks

Elektrische Ladung keine

Teilchenklassen Das Antineutron gehört zu den Anti-Hadronen und Anti-Baryonen.

Masse 938,3 Millionen Elektronenvolt, rund 2000-mal so groß wie die Masse des Elektrons

▷ Antimaterie ▷ Neutron

Siehe auch

Antiproton **

6.6

Antiteilchen zum Proton. Das Antiproton ist elektrisch negativ geladen und hat wie das Proton eine Masse, die rund 2000-mal so groß ist wie die des Elektrons. Es besteht es aus zwei Anti-Up-Quarks und einem Anti-Down-Quark.

Das Antiproton wurde 1955 von Emilio Segrè, Owen Chamberlain und Team entdeckt. Für diese Entdeckung gab es 1959 den Physik-Nobelpreis.

Entdeckung

An einigen Teilchenphysikzentren – beispielsweise bei CERN und am Fermilab – werden Antiprotonen künstlich erzeugt und für Teilchenphysikexperimente auf hohe Energien beschleunigt.

Erzeugung

Details zum Antiproton

Name Antiproton

Entdeckung 1955 von Emilio Segrè, Owen Chamberlain und Team

Zusammensetzung zwei Anti-Up-Quarks und ein Anti-Down-Quark

Elektrische Ladung eine negative Elementarladung

Teilchenklassen Das Antiproton gehört zu den Anti-Hadronen und Anti-Baryonen.

Masse 938,3 Millionen Elektronenvolt, rund 2000-mal so groß wie die Masse des Elektrons

▷ Antimaterie ▷ Proton

Siehe auch

6.7 Antiteilchen *

Teilchen existieren in zwei Formen – als „normale“ Teilchen und als Antiteilchen. Stoßen beide aufeinander, so können sie sich vollständig in Energie umwandeln.

Eigenschaften	Der Antipartner eines Teilchens verfügt über dieselbe Masse, dieselbe Lebensdauer und denselben Spin, besitzt jedoch entgegengesetzte Ladungen.
Beispiele	Der Antipartner zum Elektron ist das Positron. Der Antipartner zum W-Minus ist das W-Plus. Ansonsten ergibt sich bei fundamentalen Teilchen der Name des Antipartners, indem man die Silbe „Anti“ davor stellt: Anti-Up-Quark, Anti-Elektron-Neutrino usw. Es gibt Teilchen wie das Photon, die identisch mit ihrem Antiteilchen sind.
Vernichtung	Treffen ein Teilchen und sein Antipartner aufeinander, so können sich beide vollständig in Energie umwandeln. Dabei werden gigantische Energien frei. 80 Kilogramm Antiprotonen würden ausreichen, den jährlichen Energieverbrauch Deutschlands zu decken. Zur Energiegewinnung oder als Waffe taugt das aber nicht wirklich: Es befinden sich keine größeren Mengen Antimaterie in unmittelbarer Nähe zur Erde und für die Antimaterie, die in Teilchenbeschleuniger geschaffen wird, muss weit mehr Energie zur Erzeugung aufgebracht werden, als wieder gewonnen werden kann.
Vorhersage und Entdeckung	1928 sagte Paul Adrien Maurice Dirac die Existenz von Antimaterie voraus. Vier Jahre später gab es das erste Photo vom Positron, dem Antipartner zum Elektron.
Siehe auch	▷ Antimaterie ▷ Antineutron ▷ Antiproton ▷ Paarerzeugung und -vernichtung ▷ Paul Dirac (1902–1984) ▷ Positron

6.8 Aristoteles (384 v. Chr. bis 322 v. Chr.) **

Griechischer Philosoph. Als Gegner der Atomidee Demokrits stellte er sich die Welt aus den vier Elementen Feuer, Wasser, Luft und Erde zusammengesetzt vor.

Bedeutung	Aristoteles zählt zu den bedeutendsten Philosophen der Antike. Er schrieb Wissenschaftsgeschichte mit seinen Beiträgen zu Logik, Metaphysik, Ethik, Politik, Psychologie, Poetik und Kunsttheorie.
Eckdaten	Aristoteles wurde im Jahr 384 v. Chr. als Sohn des Arztes Nikomachos geboren. Er starb 322 v. Chr.
Siehe auch	▷ Atom

Asymptotische Freiheit **

6.9

Phänomen, dass die starke Kraft bei geringen Abständen an Stärke verliert.

Das Gegenteil der asymptotischen Freiheit ist die Quarkgefangenschaft. Für die Entdeckung des Phänomens der asymptotischen Freiheit im Jahre 1973 erhielten David Gross, Frank Wilczek und David Politzer den Nobelpreis für Physik des Jahres 2004.

Gegenteil
Nobelpreis

▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quarkgefangenschaft

Siehe auch

ATLAS **

6.10

ATLAS ist einer der Detektoren am Teilchenbeschleuniger LHC.

Bei ATLAS werden mehrere physikalische Fragestellungen verfolgt: Insbesondere wird die Entdeckung der Higgs-Teilchen erwartet. Dabei handelt es sich um Teilchen, die mit der Entstehung von Masse in unserem Universum in Verbindung gebracht werden. Zudem sollen supersymmetrische Teilchen und zusätzliche Raumdimensionen aufgespürt werden. Ferner soll die so genannte CP-Verletzung untersucht werden, die ein wesentlicher Puzzlestein bei der Frage darstellt, wieso in unserem Universum mehr Materie als Antimaterie vorkommt. ATLAS wird auch dem Wesen dunkler Materie und dunkler Energie nachgehen.

ATLAS hat einen Durchmesser von 25 Meter und eine Länge von 46 Meter. ATLAS ist damit rund halb so groß wie die Kirche Notre-Dame in Paris und der größte Teilchendetektor, der jemals an einem Teilchenbeschleuniger gebaut wurde. Der Detektor wiegt 7.000 Tonnen. Am ATLAS-Experiment nehmen über 1.700 Wissenschaftler teil, aus mehr als 159 Instituten in 37 Ländern (Stand 2006).

Ausmaße

Der Detektor ist von innen nach außen in drei Bereiche gegliedert. Der innere Teil dient der Messung von Teilchenspuren. In der Mitte befinden sich Kalorimeter zur Bestimmung der Energie der Teilchen. Daran schließen sich außen die so genannten Myonkammern an, mit denen Myonen, die schweren Vettern der Elektronen, aufgespürt werden. Der ganze Detektor befindet sich in einem sehr starken Magnetfeld, das die Bahnen der entstehenden Teilchen krümmt. Das Magnetsystem bei ATLAS setzt sich aus verschiedenen Elementen zusammen. Im Inneren des Detektors befindet sich eine Zylinderspule (Solenoid) von 5,3 Metern Länge und mit einem Durchmesser von 2,4 Metern.

Aufbau

Zwischen Kalorimeter und Myonsystem befindet sich zudem ein supraleitendes Toroid-System, mit dem ein Magnetfeld einer Stärke von 4 Tesla erzeugt werden kann.

Name Die Abkürzung ATLAS steht für „A Toroidal LHC Apparatus“, wobei sich das „Toroidal“ auf das äußere Magnetsystem bezieht.

Siehe auch ▷ Higgs-Teilchen ▷ LHC ▷ Quark-Gluon-Plasma

6.11 Atom *

Objekte, aus denen chemische Elemente (wie z.B. Wasserstoff oder Eisen) aufgebaut sind. Atome bestehen aus einem elektrisch positiven geladenen Atomkern, um den sich Elektronen bewegen.

Atommodelle In den einfachsten Modellen bewegen sich die Elektronen wie in einem Planetensystem auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen um den Kern. Nach der Quantentheorie kann aber nicht mehr von genau definierten Bahnen gesprochen werden; es können nur noch Wahrscheinlichkeiten für den Aufenthaltsort der Teilchen berechnet werden.

Entdeckung Schon die alten Griechen Demokrit und sein Lehrer Leukipp dachten vor über zweitausend Jahren, dass es so etwas wie Atome geben müsse. Überzeugende experimentelle Indizien fand dann John Dalton im 19. Jahrhundert: Mit ihnen ließen sich einige physikalische und chemische Eigenschaften von Materie elegant erklären.

Größe Der Durchmesser von Atomen liegt bei rund 10^{-10} Metern: Man muss also zehn Milliarden Atome aneinander reihen, um eine Strecke von einem Meter zu erhalten.

Name Das griechische Wort „atomos“ bedeutet unteilbar. Mittlerweile haben sich Atome aber als durchaus teilbar herausgestellt. In ihrem Zentrum befindet sich ein Kern, der aus Protonen und Neutronen aufgebaut sind, die wiederum aus Quarks und Gluonen bestehen.

Siehe auch ▷ Atomkern ▷ Demokrit (460 v.Chr. bis 375 v.Chr.) ▷ Elektron ▷ Element ▷ Ernest Rutherford (1871–1937) ▷ John Dalton (1766–1844) ▷ Niels Bohr (1885–1962) ▷ Quarks

6.12 Atomkern *

Objekt, das sich im Zentrum eines Atoms befindet. Atomkerne sind elektrisch positiv geladen und aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt. Diese bestehen wiederum aus Quarks und Gluonen.

Dass sich im Inneren von Atomen ein massiver Kern befindet, hat im Jahr 1909 ein Team um Ernest Rutherford in einem Streuversuch nachgewiesen. Entdeckung

Mit einem Durchmesser von rund 10^{-14} Metern sind Atomkerne etwa zehntausend Mal kleiner als Atome. Man müsste hunderttausend Milliarden Kerne aneinander reihen, um eine Strecke von einem Meter zu erhalten. Abmessung

▷ Atom ▷ Kernfusion ▷ Kernkraft ▷ Neutron ▷ Proton ▷ Quarks Siehe auch

Barn *** 6.13

Flächeneinheit, die in der Kern- und Teilchenphysik verwendet wird, um die Größe von Wirkungsquerschnitten anzugeben.

Das Einheitenzeichen des Barns ist das „b“. Dabei gilt: $1b = 10^{-28}m^2$. Das ist ungefähr der Querschnitt eines schweren Atomkerns wie etwa dem von Uran. Wert

Barn steht im Englischen für „Scheune“. Und der winzig anmutende Wert für ein Barn ist für die Teilchenphysik groß wie einen Scheunentor. Dort werden meist Werte im Bereich von Mikro-, Nano-, und Pikobarn gemessen. Name

▷ Wirkungsquerschnitt Siehe auch

Baryonen *** 6.14

Klasse für zusammengesetzte Teilchen aus drei Hauptquarks. Zu den Baryonen zählen beispielsweise das Proton und das Neutron.

Es gibt rund 120 verschiedene Baryonen, von denen alle bis auf das Proton in Protonen zerfallen.

Der Name „Baryon“ ist dem griechischen Wort für „schwer“ entlehnt. So ist das Proton beispielsweise 2000-mal schwerer als das Elektron, das leichteste der Leptonen. Name

Unterschiedliche Baryonen mit demselben Quarks-Inhalt

Neutron und Delta-Null sind beide aus zwei Down-Quarks und einem Up-Quark zusammengesetzt. Wieso am Ende dennoch zwei unterschiedliche Teilchen herauskommen, liegt am Spin der drei Quarks.

Der Spin ist eine Eigenschaft, die bei Quarks zwei unterschiedliche Werte annehmen kann: Er kann nach oben (+) oder nach unten (-) zeigen.

Bringt man nun drei Quarks zusammen, muss man zwei Möglichkeiten unterscheiden. Entweder zeigen alle drei Spins in dieselbe Richtung (+++ oder ---), oder es zeigen zwei in dieselbe Richtung und der dritte schert aus (++- oder +-+ oder -++ oder -+ oder +- oder +-). Mit diesen beiden Möglichkeiten sind nun unterschiedliche Eigenschaften, wie etwa Zerfall und Masse verbunden.

Bei einem Neutron zeigen nur die Spins von zwei Quarks in dieselbe Richtung, beim Delta-Null sind die Spins aller drei Quarks gleich ausgerichtet.

Siehe auch ▷ Deltas ▷ Hadron ▷ Lambda ▷ Mesonen ▷ Neutron ▷ Omega ▷ Proton
▷ Quarks ▷ Sigma ▷ Xi

6.15 Beschleunigermagnete **

In Teilchenbeschleunigern kommen Magnete für verschiedene Zwecke zum Einsatz – zum Bündeln von Teilchenpaketen, zum Ablenken von Teilchen sowie zur Erzeugung von intensiver Strahlung.

Funktionsweise Magnete kommen in Teilchenbeschleunigern zum Einsatz, weil sich mit ihnen die Bahn von elektrisch geladenen Teilchen krümmen lässt.

Einsatz Teilchenpakete lassen sich mit Hilfe von Quadrupol- und Sextupolmagneten bündeln. Teilchen können mit Dipolmagneten und Kickermagneten umgelenkt werden und mit Undulatoren und Wiggler auf Slalomkurse und zur Lichtaussendung gebracht werden.

Siehe auch ▷ Dipolmagnet ▷ Fokussierung ▷ Kicker-Magnet ▷ Quadrupolmagnet ▷ Sextupolmagnet ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Undulator ▷ Wiggler

6.16 Betatron ***

Kreisförmiger Teilchenbeschleuniger für Elektronen. Bei einem Betatron werden Elektronen durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld auf einer Kreisbahn gehalten und beschleunigt.

Entwicklung und Einsatz Das Betatron wurde 1928 von Rolf Wideroe vorgeschlagen. Die ersten Betatrons wurden 1935 von M. Steenbeck und 1940 von D. W. Kerst gebaut; letzteres erreichte eine Elektronenenergie von 2,3 Millionen

Elektronenvolt. Heute kann man mit Betatrons Elektronen auf bis zu 30 Millionen Elektronenvolt beschleunigen.

Mit Magnetfeldern beschleunigen

Nach den Gesetzen der Elektrodynamik (Maxwell-Gleichungen) ist mit einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld auch ein elektrisches Feld verknüpft. Im Betatron ist es genau dieses elektrische Feld, das die Elektronen beschleunigt. Dieser Effekt heißt Transformatorprinzip.

▷ Kreisbeschleuniger ▷ Mikrotron ▷ Synchrotron ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Zyklotron Siehe auch

Betazerfall ***

6.17

Beim Betazerfall handelt es sich um einen radioaktiven Prozess, bei denen sich Quarktypen ineinander umwandeln.

Beim Beta-Minus-Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton um. Dabei entstehen ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino. Beim Beta-Plus-Zerfall wandelt sich ein Proton in ein Neutron um. Dabei entstehen ein Positron und ein Elektron-Neutrino.

Zwei Typen

Stellt man sich Neutronen und Protonen aus Quarks zusammengesetzt vor, passiert beim Beta-Minus-Zerfall das Folgende: Eines der beiden Down-Quarks des Neutrons wandelt sich in ein Up-Quark um. Dabei wird ein W-Minus-Teilchen frei. Aus diesem W-Minus entstehen dann das Elektron und das Anti-Elektron-Neutrino. Damit ist der Betazerfall ein Phänomen der schwachen Kraft. Analoges gilt für den Beta-Plus-Zerfall.

Betazerfall auf Quarkebene

▷ Radioaktivität ▷ Schwache Kraft

Siehe auch

Bhabha-Streuung ***

6.18

Die Bhabha-Streuung ist eine Wechselwirkung zwischen einem Elektron und einem Positron über den Austausch eines Photons.

Wenn Elektronen und Positronen über den Austausch eines Photons wechselwirken, sprechen Physiker von Bhabha-Streuung. Dieser Vorgang ist sehr gut verstanden und wird in Teilchenbeschleunigern zur Bestimmung der Luminosität verwendet.

Name	Der Name für die Bhabha-Streuung geht auf den indischen Physiker Homi Jehangir Bhabha (1909-1966) zurück.
Siehe auch	▷ Feynman-Diagramme

6.19 Blaskammer ***

Eine Blaskammer ist ein Teilchendetektor, in dem sich entlang der Bahnen von elektrisch geladenen Teilchen Siedeblläschen bilden, die photographiert werden können.

Hauptbestandteil einer Blaskammer ist eine Flüssigkeit, die heißer ist als ihr Siedepunkt. Kleine Störungen, wie etwa elektrisch geladene Teilchen, können diese überhitzte Flüssigkeit an Ort und Stelle zum Kochen bringen. Entlang der Bahnen der Teilchen bilden sich dann Dampfbläschen, die photographiert werden können. Auf diese Weise lässt sich die Position der Teilchen bis auf einen Fünfzigstel Millimeter genau bestimmen. Anhand der Zahl der Bläschen, die sich pro Zentimeter bilden, können sogar Rückschlüsse auf die Energie der Teilchen gezogen werden.

Entwicklung und
Verwendung

Die erste Blaskammer wurde 1952 von dem amerikanischen Physiker und Molekularbiologen Donald Arthur Glaser (*1926) entwickelt. Glaser erhielt dafür 1960 den Physik-Nobelpreis. Zu den wichtigen Entdeckungen, die mit Blaskammern gemacht wurden, zählt das Omega-Minus-Teilchen, dessen Fund 1964 eine wesentliche Stütze für das Quark-Modell darstellte. Auch der Nachweis des so genannten neutralen Stroms als Indiz für die elektroschwache Vereinigung gelang 1973 mit Hilfe einer Blaskammer. Blaskammern spielen in den Großexperimenten der modernen Teilchenphysik keine Rolle mehr, sie werden heute aber noch zu Demonstrationszwecken eingesetzt.

Wie man das Kochen unterbindet

Liegt die Temperatur einer Flüssigkeit über ihrem Siedepunkt, so könnte man erwarten, dass sie kocht. In einer Blaskammer gibt es jedoch einen Trick, der das Kochen unterbindet: Nicht die Temperatur wird über den Siedepunkt erhöht, sondern der Siedepunkt unter die Temperatur erniedrigt.

Dazu hält man die Flüssigkeit in einem Druckbehälter auf einer Temperatur knapp unter ihrem Siedepunkt. Vergrößert man nun rasch die Größe des Behälters, so bleibt die Temperatur gleich, der Druck fällt

jedoch ab. Der Siedepunkt ist nun druckabhängig und nimmt ebenfalls ab. So kocht Wasser auf der Zugspitze (Luftdruck: 700 Millibar, statt 1013 Millibar normal) schon bei 90 Grad Celsius.

Eine so überhitzte Flüssigkeit befindet sich in einem sehr instabilen Zustand. Die kleinste Störung – zum Beispiel durch weitere Energiezugabe – sorgt für Blasenbildung. Dies ist auch der Grund, wieso sich im Kochtopf meist am Boden die Blasen bilden.

▷ Nebelkammer ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

B-Mesonen ***

6.20

Das B-Meson ist eine Verbindung aus einem Bottom-Quark und einem Anti-Up- oder Anti-Down-Quark.

Aufgrund ihrer hohen Masse wurden die B-Mesonen erst 1983 entdeckt

Entdeckung

Details zu den negativen B-Mesonen

Name Negatives B-Meson

Entdeckung 1983 am Detektor CLEO

Elektrische Ladung eine negative Elementarladung

Masse 5.280 Millionen MeV/c^2

Lebensdauer 1.6×10^{-12} Sekunden

Quarkinhalt Anti-Bottom- und Up-Quark

Teilchenklassen B-Mesonen gehören zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zu den neutralen B-Mesonen

Name Neutrales B-Meson

Entdeckung 1983 am Detektor CLEO

Elektrische Ladung 0

Masse 5.280 Millionen MeV/c^2

Lebensdauer 1.5×10^{-12} Sekunden

Quarkinhalt Anti-Bottom- und Down-Quark

Teilchenklassen B-Mesonen gehören zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zu den positiven B-Mesonen

Name Positives B-Meson

Entdeckung 1983 am Detektor CLEO

Elektrische Ladung 0

Masse 5.280 Millionen MeV/c^2

Lebensdauer 1.6×10^{-12} Sekunden

Quarkinhalt Bottom- und Anti-Up-Quark

Teilchenklassen B-Mesonen gehören zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Siehe auch ▷ Mesonen

6.21 BNL ***

Das (BNL) ist ein Forschungszentrum der US-amerikanischen Energiebehörde, das als interdisziplinärer Tausendsassa in den Bereichen Kern- und Teilchenphysik, Umwelt- und Energietechnik, medizinischer Bildverarbeitung sowie Strukturbiologie forscht.

Das BNL wurde 1947 gegründet und befindet sich 100 km nordöstlich von New York. Am Zentrum sind 3.000 Personen beschäftigt, zu denen sich jährlich rund 4.000 Gastwissenschaftler gesellen.

Der derzeit größte Beschleuniger am BNL ist RHIC. In ihm stoßen geladene Atomkerne wie etwa die von Gold zusammen, um unter anderem eine Materieform mit Namen Quark-Gluon-Plasma zu erzeugen und zu untersuchen. Ferner wird mit RHIC der Spin des Protons erforscht.

Beschleuniger

Das Labor kann auf insgesamt sechs Nobelpreise zurückblicken: für die Entdeckung der P- (1957) und CP-Verletzung (1980) sowie für die Entdeckung des J/Psi-Teilchens (1976), des Myon-Neutrinos (1988) und kosmischer Neutrinos (2002). 2003 ging der Chemie-Nobelpreis an das Forschungszentrum.

Entdeckungen
und Nobelpreise

<http://www.bnl.gov>

Im Web

▷ Teilchenphysikzentren

Siehe auch

Bohr, Niels (1885–1962) **

6.22

Dänischer Physiker. Niels (Hendrik David) Bohr hat unter anderem mit seinem Atommodell zur Entwicklung der Quantentheorie beigetragen.

Niels Bohr wurde am 7. Oktober 1885 in Kopenhagen geboren und starb am 18. November 1962 in derselben Stadt.

Eckdaten

Bohr erhält 1922 den Physik-Nobelpreis für „seine Verdienste bei der Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung.“

Nobelpreis

▷ Atom ▷ Quantentheorie

Siehe auch

Bose, Satayendra Nath (1894–1974) ***

6.23

Indischer Physiker. Satyendra Nath Bose leitete im Jahr 1924 die Planckschen Strahlungsgesetze, die ersten Arbeiten zur Quantentheorie überhaupt, auf der Basis eines statistischen Verfahrens ab, bei dem er von Photonen als den Teilchen des Lichts ausging.

Albert Einstein erweiterte Boses Methode auf alle Teilchen mit ganzzahligem Spin. Diese Teilchen werden heute Bosonen genannt.

Satyendra Nath Bose wurde am 1. Januar 1894 in Kalkutta geboren und am 4. Februar 1974 starb in derselben Stadt.

Eckdaten

▷ Bose-Einstein-Kondensat ▷ Boson

Siehe auch

6.24 **Bose-Einstein-Kondensat** ***

Ein Bose-Einstein-Kondensat ist eine Ansammlung von Teilchen, die sich alle in einem Zustand geringster Energie befinden.

Vorhersage und
Entdeckung

Die Existenz von Bose-Einstein-Kondensaten war 1925 von Albert Einstein und Satyendra Nath Bose theoretisch vorhergesagt worden. Ein solches Kondensat aus Helium wurde 1938 entdeckt, eines aus schweren Atomen erst 1995 von C. E. Wieman und E.A. Cornell geschaffen. Dafür gab es 2001 den Physik-Nobelpreis.

Bosonen und Fermionen

Bose-Einstein-Kondensate sind nur mit Bosonen möglich, weil sich Fermionen aufgrund des Pauli-Verbots nicht im selben Zustand befinden dürfen.

Siehe auch \triangleright Albert Einstein (1879-1955) \triangleright Boson \triangleright Pauli-Verbot \triangleright Satayendra Nath Bose (1894–1974) \triangleright Spin

6.25 **Boson** **

Bosonen sind alle Teilchen mit ganzzahligem Spin (1, 2, ...).

Bosonen im
Standard-Modell

Alle Wechselwirkungsteilchen des Standard-Modells sind Bosonen. Bei den Materieteilchen handelt es sich hingegen um Fermionen.

Name Bosonen sind nach dem indischen Physiker Satyendra Nath Bose benannt.

Siehe auch \triangleright Fermion \triangleright Satayendra Nath Bose (1894–1974) \triangleright Spin \triangleright Wechselwirkungsteilchen

6.26 **Bottom-Quark** *

Fundamentales Teilchen. Das Bottom-Quark ist eines der sechs Quarks.

Masse Die Masse des Bottom-Quarks ist mit rund $4.300 \text{ MeV}/c^2$ fast 10.000-mal größer als die des Elektrons.

Nachweis und
Entdeckung Das erste Teilchen mit Bottom-Quark-Inhalt wurde 1977 am Fermilab mit dem Upsilon gesichtet.

Lebensdauer 2×10^{-12} Sekunden (Schätzung aus dem Zerfall von Quark-Gruppen).

Name Das englische „Bottom“ bedeutet so viel wie „am Grund“ oder „unten“.

Wie bei den Up- und Down-Quarks steht dies für den Wert des Isospins des Teilchens. Der entsprechende Partner zum Bottom-Quark ist das Top-Quark.

Details zum Bottom-Quark

Name Bottom-Quark

Bemerkung Das Bottom-Quark bildet mit dem Top-Quark ein Paar (bottom: engl. für unten, top: engl. für oben).

Masse ca. $4.300 \text{ MeV}/c^2$

Nachweis Das erste Teilchen mit Bottom-Quark-Inhalt wurde 1977 am Fermilab gesichtet.

Elektrische Ladung $-1/3$ der Elementarladung

Lebensdauer 2×10^{-12} Sekunden

Starke Kraft Ja

Elektromagnetische Kraft Ja

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Bottom-Quark gehört damit zu den Fermionen.

▷ Charm-Quark ▷ Down-Quark ▷ Lepton ▷ Materieteilchen ▷ Quarks ▷ Strange-Quark ▷ Top-Quark ▷ Up-Quark ▷ Upsilon Siehe auch

Bremsstrahlung ^{**}

6.27

Elektromagnetische Strahlung, die entsteht, wenn elektrisch geladene Teilchen beschleunigt, abgebremst oder abgelenkt werden.

Eine besondere Form der Bremsstrahlung ist die Synchrotronstrahlung.

Synchrotronstrahlung

▷ Feynman-Diagramme ▷ Synchrotronstrahlung

Siehe auch

6.28 **Bunch** **

Englischsprachige Bezeichnung für Teilchenpaket.

Siehe auch ▷ Teilchenpaket

6.29 **Casimir-Effekt** ***

Effekt, nach dem im Vakuum auf zwei parallele Platten eine anziehende Kraft wirkt. Er lässt sich nur mit der Quantentheorie erklären.

Effekt und Größe Bringt man zwei parallele Platten in einen Abstand von wenigen Millionstel Meter, so entsteht eine anziehende Kraft, die aus einer Beeinflussung des Quantenvakuums durch die Platten entsteht. Die Größe des Casimir-Effektes ist fast verschwindend gering: So ziehen sich zwei jeweils einen Quadratzentimeter große Leiterplatten, die sich einen halben Tausendstelmillimeter auseinander entfernt befinden, mit der Kraft an, die der Gewichtskraft von zehn Staubkörnern entspricht.

Vorhersage und Bestätigung Vorhergesagt wurde dieser Effekt 1948 vom niederländischen Physiker Hendrik Brugt Gerhard Casimir (*1909). Zehn Jahr später kam die erste experimentelle Bestätigung, aber erst 1997 gelang es einem amerikanischen Forscher, den Effekt mit einer ausgeklügelten Apparatur exakt zu vermessen

Siehe auch ▷ Vakuumpolarisation

6.30 **CERN** *

CERN ist das europäische Zentrum für Atom-, Kern- und Teilchenphysik in der Nähe von Genf. Es beherbergt unter anderem den Teilchenbeschleuniger LHC.

Geschichte und Größe CERN wurde 1954 gegründet und wird von 20 Mitgliedsstaaten finanziert. Das Forschungszentrum beschäftigt rund 2.600 Personen und wird von jährlich 6.500 Wissenschaftlern besucht. Damit ist CERN das weltgrößte Forschungszentrum für Teilchenphysik.

Beschleuniger Lange Zeit war CERNs Beschleuniger LEP die weltweit größte Forschungsanlage. Mittlerweile wurde in den 27 Kilometer langen Tunnel von LEP der Nachfolger LHC montiert, der Mitte 2008 seinen Dienst aufnimmt.

Entdeckungen und Nobelpreise Das Labor kann auf zwei Nobelpreise zurückblicken: Den einen gab es für die Entdeckung der W- und Z-Teilchen (1984); den anderen für die

Entwicklung der Proportionalzählkammer (1992). In den Jahren 1989 und 1990 entwickelte der CERN-Informatiker Tim Berners-Lee das World Wide Web.

<http://www.cern.ch>

Im Web

▷ LEP ▷ LHC ▷ Teilchenphysikzentren

Siehe auch

Chadwick, James (1881–1974) ***

6.31

Britischer Physiker. Sir James Chadwick entdeckt 1932 das elektrisch neutrale Neutron.

James Chadwick wurde am 10. Oktober 1891 im Manchester geboren. Er starb am 23. Juli 1974 in Pinehurst.

Eckdaten

Im Jahr 1935 erhält Chadwick den Physik-Nobelpreis für die Entdeckung des Neutrons.

Nobelpreis für Physik

▷ Neutron

Siehe auch

Charm-Quark **

6.32

Das Charm-Quark ist eines der sechs Quarks.

Die Masse des Charm-Quarks entspricht etwa $1.200 \text{ MeV}/c^2$. Es ist damit rund 25 Prozent schwerer als das Proton. Die Masse der Quarks lässt sich nicht so leicht angeben wie die anderer Teilchen, weil Quarks immer nur in Gruppen und nie einzeln vorgefunden werden. Daher lässt sich nur aus der Masse der Gruppen auf die der Bestandteile schließen.

Masse

Das erste Teilchen mit Charm-Quark-Inhalt, das J/Psi, wurde 1974 am SLAC und BNL gesichtet.

Nachweis und Entdeckung

ca. 10^{-12} Sekunden (Schätzung aus dem Zerfall von Quark-Gruppen)

Lebensdauer

Der Name des Charm-Quarks soll darauf zurückzuführen sein, dass die Theoretiker, die seine Existenz vorhersagten, dieses Teilchen außerordentlich reizvoll („charming“) fanden, da sich mit ihm Probleme mit der theoretischen Beschreibung der schwachen Kraft elegant beseitigen ließ.

Name

Details zum Charm-Quark

Name Charm-Quark

Bemerkung Theoretiker fanden es 1970 charmant, dass ein viertes Quark theoretische Probleme elegant beseitigen konnte.

Masse ca. $1.200 \text{ MeV}/c^2$

Nachweis Charm-Quarks wurden 1970 von Sheldon Glashow, John Iliopoulos und Luciano Maiani vorhergesagt. Das erste Teilchen mit Charm-Inhalt wurde 1974 entdeckt.

Elektrische Ladung $+2/3$

Lebensdauer ca. 10^{-12}

Starke Kraft Ja

Elektromagnetische Kraft Ja

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Charm-Quark gehört damit zu den Fermionen.

Siehe auch \triangleright Bottom-Quark \triangleright Down-Quark \triangleright Lepton \triangleright Materieteilchen \triangleright Quarks \triangleright Strange-Quark \triangleright Top-Quark \triangleright Up-Quark

6.33 CMS **

CMS ist einer der Detektoren am Teilchenbeschleuniger LHC.

Bei CMS werden mehrere physikalische Fragestellungen verfolgt: Insbesondere wird die Entdeckung der so genannten Higgs-Teilchen erwartet. Dabei handelt es sich um Teilchen, die mit der Entstehung von Masse in unserem Universum in Verbindung gebracht werden. Zudem sollen supersymmetrische Teilchen und zusätzliche Raumdimensionen aufgespürt werden. CMS wird auch dem Wesen dunkler Materie und dunkler Energie nachgehen.

Ausmaße CMS hat einen Durchmesser von 15 Meter und eine Länge von 21,5 Meter. Der Detektor wiegt rund 12.500 Tonnen. Am CMS-Experiment nehmen rund 2.000 Physiker (inklusive 400 Studierende) teil, aus mehr als 155 Instituten in 37 Ländern

Aufbau Der Detektor ist von innen nach außen in verschiedenen Schichten auf-

gebaut. Im Inneren befinden sich Komponenten zur Bestimmung von Teilchenspuren. Daran schließen sich Kalorimeter zur Ermittlung von Teilchenenergien an. Außen befinden sich Myonkammern, mit denen Myonen, die schweren Vettern der Elektronen, nachgewiesen werden können, die die anderen Bereiche des Detektors ungehindert passieren. Der Detektor befindet sich in einem supraleitenden Zylinderspulenmagneten, der eine Magnetfeldstärke von 4 Tesla erreicht.

Die Abkürzung CMS steht für „Compact Muon Solenoid“, wobei das „Solenoid“ den Magnettypen beschreibt.

▷ Dunkle Materie ▷ Higgs-Teilchen ▷ LHC

Name

Siehe auch

Compton, Arthur Holly (1892–1962) ***

6.34

US-amerikanischer Physiker. Arthur Holly Compton untersuchte 1922 die Streuung von Photonen an freien Elektronen, bei der der Compton-Effekt auftritt.

Arthur Holly Compton wurde am 10. September 1892 in Wooster, USA, geboren und starb am 15. März 1962 in Berkeley, USA.

Im Jahr 1927 erhält Compton den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung des nach ihm benannten Effekts.“

▷ Compton-Effekt ▷ Compton-Streuung

Eckdaten

Nobelpreis

Siehe auch

Compton-Effekt ***

6.35

Der Compton-Effekt tritt auf, wenn man Licht auf Elektronen strahlt. Er zeigt, dass sich Licht zuweilen teilchenartig verhält.

Der Compton-Effekt tritt auf, wenn man Licht auf Elektronen strahlt. Dann ändern sich Farbe und damit auch die Energie des Lichts. Das Verblüffende dabei: Die Energieänderung kann man relativ einfach berechnen, wenn man Licht und Elektronen wie Billardkugeln aneinanderstoßen lässt.

Der Compton-Effekt liefert somit wichtige Indizien dafür, dass sich Licht zuweilen teilchenartig verhält. Das bedeutet aber nicht, dass Licht auch aus Teilchen besteht. Es gibt zahlreiche Licht-Phänomene, die nur erklärt werden können, wenn man auf die Welleneigenschaften von Licht zurückgreift. Licht ist also weder Teilchen noch Welle, sondern etwas Drittes.

Sichtung und Berechnungen nahm 1922 der amerikanische Physiker

Effekt

Bedeutung des Effekts

Geschichte

Arthur Holly Compton vor.

Siehe auch ▷ Arthur Holly Compton (1892–1962) ▷ Compton-Streuung ▷ Elektron ▷ Photon
▷ Quantentheorie

6.36 Compton-Streuung ***

Compton-Streuung liegt vor, wenn Photonen mit freien Elektronen wechselwirken.

Bedeutung Die mathematische Beschreibung dieses Vorganges liefert eine Erklärung für den so genannten Compton-Effekt.

Name Der Name der Compton-Streuung geht auf den amerikanischen Physiker Arthur Compton zurück.

Siehe auch ▷ Arthur Holly Compton (1892–1962) ▷ Compton-Effekt ▷ Feynman-Diagramme

6.37 CPT-Theorem ***

Nach dem CPT-Theorem ist unser Universum symmetrisch, wenn man es gleichzeitig den drei Spiegelungen C, P und T unterwirft.

Details Konkret besagt das CPT-Theorem: Wenn Sie unser Universum räumlich spiegelten (P), die Zeit rückwärts laufen ließen (T) und dann auch noch Teilchen und Antiteilchen miteinander vertauschten (C), dann hätten Sie nicht nur jede Menge zu tun, es würde noch nicht einmal jemand merken.

Bedeutung Nicht alle Naturgesetze in unserem Universum sind unter den Spiegelungen C, P und T symmetrisch: Manchmal ist ein wie auch immer gespiegeltes Universum nicht gleich dem Original. Dann liegt eine Symmetrieverletzung vor und die Gesetze müssten für das Spiegelbild umgeschrieben werden. Die Kombination aller drei Spiegelungen – C, P und T – scheint jedoch eine perfekte Symmetrie zu sein. Dies folgt aus den wenigen grundlegenden Annahmen der relativistischen Quantenfeldtheorie, dem Fundament der modernen Physik. Wäre das CPT-Theorem verletzt, würde dieses Fundament in sich zusammenstürzen, eine aus heutiger Sicht eher unwahrscheinliche Katastrophe.

Siehe auch ▷ C-Spiegelung ▷ P-Spiegelung ▷ Symmetrie ▷ T-Spiegelung

CP-Verletzung ***

6.38

Phänomen, dass man unserer Universum von demjenigen unterscheiden könnte, in dem Materie und Antimaterie vertauscht (C-Spiegelung) und alles gespiegelt (P-Spiegelung) ist.

Die CP-Verletzung wurde bisher nur beim Zerfall von Kaonen und B-Mesonen beobachtet. Sie ist wichtige Zutat, wenn man erklären will, wieso unsere Welt aus Materie und nicht aus Antimaterie besteht, obwohl man doch annehmen sollte, dass beide Materietypen beim Urknall in der gleichen Menge entstanden sind. Die CP-Verletzung wurde erstmals 1964 am BNL nachgewiesen (J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch und R. Turlay). Diese Entdeckung wurde 1980 mit dem Physik-Nobelpreis für Cronin und Fitch belohnt.

Nachweis

▷ C-Spiegelung ▷ P-Spiegelung ▷ Symmetrie

Siehe auch

C-Spiegelung ***

6.39

Bei der C-Spiegelung ändern sich die Vorzeichen aller ladungsartigen Eigenschaften der Teilchen (engl.: charge = Ladung). Damit werden aus Teilchen die dazu gehörenden Antiteilchen und umgekehrt.

In der Teilchenwelt ist die C-Spiegelung verletzt. So drehen sich Neutrinos in der entgegengesetzten Richtung wie Antineutrinos (sagen wir mal: Neutrinos links- und Antineutrinos rechtsherum). Wenn man Materie und Antimaterie vertauscht, so drehen sich Neutrinos plötzlich rechtsherum und Antineutrinos linksherum. Man könnte diese beiden Welten unterscheiden. Die Symmetrie ist gebrochen.

▷ CPT-Theorem ▷ P-Spiegelung ▷ Symmetrie ▷ T-Spiegelung

Siehe auch

Dalton, John (1766–1844) ***

6.40

Englischer Chemiker und Physiker. John Dalton liefert wesentliche Indizien für die Existenz der Atome. Nach seinem Modell sind Atome einfache, unteilbare Kugeln, die sich zu kleineren Gruppen, den heutigen Molekülen zusammenschließen können.

John Dalton wurde am 6. September 1766 in Eaglesfield geboren und starb am 27. Juli 1844 in Manchester.

Eckdaten

▷ Atom

Siehe auch

6.41 **Dämpfungsring** ***

Bestandteil einiger Teilchenbeschleuniger, die zur Verbesserung der Teilchenstrahlqualität zum Einsatz kommen.

Dämpfungsringe sind kleine Speicherringe, die in Teilchenbeschleunigern eingesetzt werden, um den Querschnitt des Teilchenstrahls zu verringern. Dabei kommt Synchrotronstrahlung zu Hilfe. Über diese verlieren die Teilchen transversale (Betatron)schwingungen.

Siehe auch ▷ Speicherring ▷ Teilchenbeschleuniger

6.42 **de Broglie, Louis Victor (1892–1987)** ***

Französischer Physiker. Louis Victor (Pierre Raymond) de Broglie (7. Herzog von Broglie) setzte 1924 in seiner Doktorarbeit den Impuls eines Teilchens mit seiner quantentheoretischen Wellenlänge in Beziehung und beschrieb damit den Welle-Teilchen-Dualismus.

Eckdaten Louis Victor de Broglie wurde am 15. August 1892 in Dieppe geboren und starb am 19. März 1987 in Louveciennes.

Nobelpreis für Physik Im Jahr 1929 erhält de Broglie den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung der Wellennatur des Elektrons.“

Siehe auch ▷ Quantentheorie ▷ Welle-Teilchen-Dualismus

6.43 **Deltas** ***

Delta-Teilchen bestehen wie das Proton aus drei Quarks, allerdings in einer etwas anderen Zusammensetzung.

Details zu den negativen Deltas

Name Delta-Minus

Elektrische Ladung eine negative Elementarladung

Masse 1.231 Milliarden Elektronenvolt

Lebensdauer rund 5×10^{-24} Sekunden

Quarkinhalt drei Down-Quarks

Teilchenklassen Das Delta-Minus gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zu den neutralen Deltas

Name Delta-Null

Elektrische Ladung keine

Masse $1.231 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer rund 5×10^{-24} Sekunden

Quarkinhalt ein Up-Quark und zwei Down-Quarks

Teilchenklassen Das Delta-Null gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zu den einfach positiven Deltas

Name Delta-Plus

Elektrische Ladung eine negative Elementarladung

Masse $1.231 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer rund 5×10^{-24} Sekunden

Quarkinhalt drei Down-Quarks

Teilchenklassen Das Delta-Plus gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zu den zweifach positiven Deltas

Name Delta-Plus-Plus

Elektrische Ladung zwei positive Elementarladungen

Masse $1.231 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer rund 5×10^{-24} Sekunden

Quarkinhalt drei Up-Quarks

Teilchenklassen Das Delta-Plus-Plus gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Siehe auch \triangleright Baryonen \triangleright Quarks

6.44 Demokrit (460 v.Chr. bis 375 v.Chr.) **

Griechischer Philosoph und Erfinder des Atoms.

Wirken Demokrit von Abdera und sein Lehrer Leukippos gingen als Erste davon aus, dass Materie aus kleinsten unteilbaren Teilchen (Atomen) zusammengesetzt sei. So schrieb er: „Der Bestimmung nach gibt es Farbe, der Bestimmung nach Süßes, der Bestimmung zufolge Bitteres, in Wirklichkeit aber nur Atome und Leeres.“ Für Demokrit hatten die Atome die Form regelmäßiger geometrischer Körper wie Kugeln, Pyramiden, Zylinder und Würfel. Aus verschiedenen Anordnungen dieser Atome ergaben sich dann die verschiedenen Stoffe.

Eckdaten Demokrit wurde um 460 v. Chr. in Abdera geboren und starb um 375 v. Chr.

Siehe auch \triangleright Atom

6.45 DESY *

Am deutschen Forschungszentrum DESY werden Teilchenbeschleuniger entwickelt sowie Teilchenphysik und Forschung mit Photonen betrieben.

Wirken DESY betreibt naturwissenschaftliche Grundlagenforschung mit den Schwerpunkten Beschleuniger (Entwicklung, Bau und Betrieb von Beschleunigeranlagen), Teilchenphysik (Untersuchung der fundamentalen Eigenschaften der Materie und Kräfte) und Forschung mit Photonen (Untersuchungen in allen Naturwissenschaften mit speziellem Licht, das an Beschleunigern erzeugt wird).

DESY wurde 1959 im Hamburger Stadtteil Bahrenfeld gegründet. Nach der deutschen Wiedervereinigung kam mit DESY-Zeuthen ein zweiter Standort hinzu. DESY ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft, zu der 15 große deutsche Forschungszentren zusammengefasst sind. Am Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB, einem Teilbereich DESYs, wird Forschung mit Synchrotronstrahlung betrieben. Bei DESY sind rund 1.900 Mitarbeiter beschäftigt. Jährlich wird das Zentrum von etwa 3.000 Wissenschaftlern besucht. Der Jahresetat beträgt rund 170 Millionen Euro, von denen 90 Prozent das Bundesministerium für Bildung und Forschung trägt; die restlichen zehn Prozent übernehmen die Länder Hamburg beziehungsweise Brandenburg.

Eckdaten

Die größte Beschleunigeranlage bei DESY (1990–2007) war HERA, die von zahlreichen Maschinen wie LINAC II, DESY II und PETRA mit vorbeschleunigten Teilchen versorgt wurde. In HERA wurden die Bausteine des Wasserstoffatoms (Protonen und Elektronen bzw. Positronen) beschleunigt und aufeinander geschossen, um die Struktur der Protonen sowie das Wesen der fundamentalen Kräfte genauer zu verstehen. Die Beschleuniger DORIS, PETRA und FLASH werden zur Forschung mit Photonen verwendet.

Beschleuniger

An DESYs Beschleuniger PETRA wurde 1979 das Gluon entdeckt. Am ARGUS-Experiment bei DESY wurde 1987 beobachtet, dass sich neutrale B-Mesonen in ihre Antiteilchen umwandeln können und umgekehrt. Das Ergebnis hatte weit reichende Konsequenzen für die Teilchenphysik. Denn es legte nahe, dass die Masse des damals noch nicht nachgewiesenen Top-Quarks weit höher ist, als bis dahin vermutet wurde.

Entdeckungen

<http://www.desy.de>

Im Web

▷ DESY II ▷ DORIS (III) ▷ HASYLAB ▷ HERA ▷ LINAC II ▷ PETRA
▷ Teilchenphysikzentren

Siehe auch

DESY II ***

6.46

DESY II ist einer der kleineren Teilchenbeschleuniger bei DESY.

Die Anlage bringt Elektronen und Positronen auf eine Energie von 9 Milliarden Elektronenvolt. Mit dieser Energie werden sie in den Elektronenteil von PETRA geleitet, um dort weiter beschleunigt zu werden. DESY II ist ein Synchrotron mit einem Umfang von 293 Metern.

Details

▷ DESY ▷ Synchrotron

Siehe auch

6.47 **DESY III** ***

DESY III war einer der kleineren Teilchenbeschleuniger bei DESY.

Details Die Anlage brachte Protonen auf eine Energie von 7,5 Milliarden Elektronenvolt. Mit dieser Energie wurden sie in den Protonenteil von PETRA geleitet, um dort weiter beschleunigt zu werden. Das Ziel war DESYs größter Beschleuniger HERA. DESY III war ein Synchrotron mit einem Umfang von 317 Metern.

Siehe auch ▷ DESY ▷ Synchrotron

6.48 **Dipolmagnet** **

Ein magnetischer Dipol besteht aus einem magnetischen Nord- und einem magnetischen Südpol. In Teilchenbeschleunigern kommt er zur Ablenkung von Teilchen zum Einsatz.

Bedeutung Mit einem magnetischen Dipol können elektrisch geladene Teilchen wie etwa Elektronen und Protonen abgelenkt werden. So lassen sich die Teilchen auf eine Kurvenbahn bringen oder von einem Beschleuniger in einen anderen überführen.

Name Die Vorsilbe „Di“ ergibt sich aus dem griechischen Wort für zwei.

Siehe auch ▷ Beschleunigermagnete ▷ Fokussierung ▷ Quadrupolmagnet ▷ Sextupolmagnet

6.49 **Dirac, Paul (1902–1984)** **

Britischer Physiker und Prophet der Antimaterie. Paul (Adrienne Maurice) Dirac leistete wesentliche Beiträge zur Quantentheorie – darunter die relativistische Beschreibung der Elektronen, aus der er Antimaterie vorhersagte.

Eckdaten Paul Dirac wurde am 8. August 1902 in Bristol geboren und starb am 20. Oktober 1984 in Tallahassee.

Nobelpreis für Physik Pauli Dirac erhält 1933 zusammen mit Erwin Schrödinger den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung neuer, fruchtbarer Formen der Atomtheorie.“

Siehe auch ▷ Antimaterie ▷ Quantenfeldtheorie

DORIS (III) ***

6.50

DORIS (III) kommt bei DESY in Hamburg zum Einsatz, um Synchrotronstrahlung für das HASYLAB zu erzeugen. Die Anlage hat einen Umfang von rund 300 Metern und beschleunigt Positronen auf 4,5 Milliarden Elektronenvolt.

Durch den Nachweis so genannter angeregter Charmonium-Zustände leistete DORIS 1975 einen wichtigen Beitrag zum Nachweis schwerer Quarks. 1987 wurde im ARGUS-Detektor des DORIS-Speicherrings zum ersten Mal die Umwandlung eines B-Mesons in sein Antiteilchen, ein Anti-B-Meson, beobachtet. Daraus ließ sich schließen, dass sich das Bottom-Quark unter bestimmten Bedingungen in ein anderes Quark umwandeln kann. Des Weiteren folgte aus der Beobachtung, dass das noch nicht gefundene Top-Quark eine sehr große Masse haben musste. Mit der Gründung von HASYLAB im Jahre 1980 wurde die ursprünglich von DORIS als Nebenprodukt erzeugte Synchrotronstrahlung auch für Forschung genutzt. Stand anfangs nur ein Drittel der Betriebszeit von DORIS für die Forschung mit Synchrotronstrahlung zur Verfügung, diente der Speicherring ab 1993 unter dem Namen DORIS III ausschließlich als Strahlungsquelle für HASYLAB. Um eine intensivere und besser steuerbare Synchrotronstrahlung zu erhalten, wurde DORIS ab 1984 mit Wiggler und Undulatoren bestückt.

Teilchenphysik

Forschung mit
Photonen

Die Abkürzung DORIS steht für „Doppel-Ring-Speicher“. Sie stammt noch aus der Zeit, als die Maschine von 1974 bis 1992 sowohl für die Teilchenphysik als auch für die Erzeugung von Synchrotronstrahlung eingesetzt wurde. Damals wurden Elektronen und deren Antiteilchen, die Positronen, in der Anlage beschleunigt.

Name

▷ DESY ▷ Synchrotron ▷ Synchrotronstrahlung ▷ Undulator ▷ Wiggler

Siehe auch

Down-Quark *

6.51

Das Down-Quark ist eines der sechs Quarks. Aus Down- und Up-Quarks sind die Bestandteile der Atomkerne, die Protonen und Neutronen, zusammengesetzt.

Die Masse des Down-Quarks entspricht etwa $6 \text{ MeV}/c^2$ und ist damit gut zehnmal größer als die des Elektrons. Die Masse der Quarks lässt sich nicht so leicht angeben wie die anderer Teilchen, weil Quarks immer nur in Gruppen und nie einzeln vorgefunden werden. Daher lässt sich nur aus der Masse der Gruppen auf die der Bestandteile schließen.

Masse

Nachweis und Entdeckung	Up-Quarks wurden 1964 von Murray Gell-Mann und George Zweig vorhergesagt und 1969 experimentell bestätigt.
Lebensdauer	Mithilfe der Lebensdauer des Neutrons lässt sich die des Down-Quarks auf einige hundert Sekunden schätzen.
Name	„Down“ ist Englisch für „runter“, „nach unten“. Der Name beruht auf einer physikalischen Größe, die allen Teilchen zugeschrieben wird: dem Isospin. Diese Größe kann man sich als Pfeil vorstellen, der nach oben oder nach unten zeigen kann. Im Falle des Up-Quarks zeigt er nach oben. Und beim Down-Quark nach unten.

Details zum Down-Quark

Name Down-Quark

Bemerkung Aus Down- und Up-Quarks sind die Bestandteile der Atomkernen, die Protonen und Neutronen, zusammengesetzt.

Masse ca. $6 \text{ MeV}/c^2$

Entdeckung Down-Quarks wurden 1964 von Murray Gell-Mann und George Zweig vorhergesagt und 1969 experimentell bestätigt.

Elektrische Ladung $-1/3$

Lebensdauer Einige hundert Sekunden

Starke Kraft Ja

Elektromagnetische Kraft Ja

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Down-Quark gehört damit zu den Fermionen.

Siehe auch [▷ Bottom-Quark](#) [▷ Charm-Quark](#) [▷ Lepton](#) [▷ Materieteilchen](#) [▷ Neutron](#) [▷ Proton](#) [▷ Quarks](#) [▷ Strange-Quark](#) [▷ Top-Quark](#) [▷ Up-Quark](#)

Drahtkammer **

6.52

Die Drahtkammer ist ein Teilchendetektor. Darin lässt sich die Bahn von elektrisch geladenen Teilchen verfolgen, wenn diese ein Gas durchfliegen.

Drahtkammern sind mit einem Gas gefüllt, durch das elektrisch geladene Drähte gespannt sind. Durchfliegt nun ein geladenes Teilchen das Gas, so werden entlang der Flugbahn elektrische Ladungen entstehen. Diese wandern zu den geladenen Drähten und ergeben dort ein elektrisches Signal, aus dem auf die Position der Teilchen geschlossen werden kann.

Funktionsweise

Je nach Anzahl und Anordnung der Drähte und der Höhe der Spannung unterscheidet man unterschiedliche Drahtkammertypen.

Typen

- ▷ Zu den einfachsten Drahtkammern zählen die Proportionalitätskammern.
- ▷ Driftkammern besitzen eine höhere Ortsauflösung als Proportionalitätskammern, weil bei ihnen auch der Weg gemessen werden kann, den die Elektronen bis zu den Auslesedrähten zurücklegte.

Die Entwicklung der Drahtkammer fand am CERN durch Georges Charpak statt und wurde 1992 mit dem Nobelpreis für Physik belohnt.

Entwicklung und Nobelpreis

- ▷ Driftkammer ▷ Proportionalitätskammer ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

Driftkammer ***

6.53

Die Driftkammer ist ein Teilchendetektor. Darin lässt sich die Bahn von elektrisch geladenen Teilchen verfolgen, wenn diese ein Gas durchfliegen.

Driftkammern stellen eine Weiterentwicklung der Proportionalitätskammern dar: Durch den zusätzlichen Einsatz so genannter Feldformungsdrähte wird das elektrische Feld in der Kammer so beeinflusst, dass die durch die nachzuweisenden Teilchen gebildeten Elektronen mit etwa konstanter (Drift-)Geschwindigkeit (ca. 50 m/s) durch das Gas zu den Auslesedrähten wandern (driften). Wenn man jetzt die Zeit misst, welche die Elektronen in der Driftkammer unterwegs waren, kann aus der Driftgeschwindigkeit der gedriftete Weg bestimmt werden. Die Driftkammern erreichen damit eine höhere Ortsauflösung als Proportionalitätskammern.

Funktionsweise

- ▷ Drahtkammer ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

6.54 **Driftröhre** ***

Metallröhre, mit der einfache Teilchenbeschleuniger realisiert werden können.

Funktionsweise Einfache Linearbeschleuniger bestehen aus mehreren Driftröhren, an denen elektrische Spannungen angelegt sind. Befindet sich ein elektrisch geladenes Teilchen zwischen zwei solchen Röhren, so wird es zu einer Driftröhre hin beschleunigt. Im Innere der Röhre angelangt, wirkt kein äußeres Feld mehr auf das Teilchen und die Spannung zwischen den Driftröhren kann umgekehrt werden. Dieses Feld beschleunigt die Teilchen dann weiter, sobald sie die Driftröhre verlassen haben.

Siehe auch ▷ Linearbeschleuniger

6.55 **Dunkle Materie** **

Zu dunkler Materie fasst man all jene Materie im Universum zusammen, die man nicht sehen kann, auf deren Existenz jedoch indirekt zum Beispiel durch die Gravitationswirkung geschlossen wurde.

Physiker wissen nicht, woher 90 Prozent der Masse im Universum stammen. Doch die Ratlosigkeit bietet Gelegenheit, auch exotische Lösungen für das Problem in Betracht zu ziehen. Einige davon entstanden in Zusammenarbeit mit Teilchenphysiker. So könnten beispielsweise schwere Teilchen wie die WIMPs für das Gewichtsproblem verantwortlich sein.

Indizien Das Universum ist groß und daher sicherlich auch schwer. Aber wie misst man seine Masse? Oder besser: Wie kommt man auf die Idee, dass es schwerer sein müsste als all das, was man sieht? Sterne stellt man nicht einfach auf eine Waage, wirft eine Münze ein und liest das Ergebnis ab. Vielmehr sind indirekte Methoden zur Ferngewichtsmessung gefragt. Eine dieser Methoden betrifft die Rotation von Galaxien: Galaxien sind ständig in Bewegung, drehen sich um sich selbst. Anderenfalls würden sie aufgrund der Schwerkraft in sich stürzen. Durch die Drehung werden die Gestirne jedoch wie im Karussell nach außen gedrückt, was sie auf der Bahn hält. Auch unser Sonnensystem behält auf diese Weise seine Form. Dabei fällt allerdings auf, dass die Planeten umso schneller um die Sonne kreisen, je weiter innen sie sich befinden. Die Erde ist rund dreimal so flott wie der Saturn. Messungen an Galaxien ergeben dagegen, dass die Geschwindigkeitsverteilung wie beim Sonnensystem für die Sternenanhäufungen nicht mehr zutrifft. Hier

zeigt sich, dass die Sterne alle mit nahezu derselben Geschwindigkeit unterwegs sind – egal wie weit sie sich vom Zentrum entfernt befinden. In unserem Planetensystem könnte man eine solche Geschwindigkeitsverteilung erreichen, wenn es auch noch zwischen den Planeten jede Menge Materie gibt. Dann könnten Erde und Saturn auch gleich schnell unterwegs sein. Dasselbe Argument deutet nun auf die Existenz von dunkler Materie hin: Alle Galaxien sind von einer kugelförmigen, massiven Ansammlung dunkler Materie eingehüllt.

Physiker haben zahlreiche Kandidaten ausgemacht, die zur dunklen Materie beitragen könnten: Sternenstaub beispielsweise oder Braune Zwerge. Das sind Sonnen, die zu leicht sind, als dass in ihnen eine Kernfusion in Gang kommen könnte. Auch bereits erloschene Sterne kann man nicht sehen. Es gibt zudem weit schwerere Kandidaten, wie die Schwarzen Löcher, die – der Name lässt es vermuten – nun auch recht unsichtbar sind. Diese Anwärter auf dunkle Materie sind Sache der Astronomen. Doch es gibt da noch eine weitere Klasse von dunklen Objekten, welche eher in das Gebiet der Teilchenphysik fallen: WIMPs.

▷ Kosmologie ▷ WIMP

Woraus besteht dunkle Materie?

Siehe auch

Eichsymmetrie ***

6.56

Bei der Eichsymmetrie handelt es sich um eine besondere Form der Symmetrie, auf der die Theorien des Standard-Modells beruhen (QED, QFD, QCD).

Wenn man solche Symmetrien von den Materieteilchen fordert, so erhält man die Wechselwirkungen frei Haus.

▷ Eichtheorie ▷ Erhaltungssatz ▷ Symmetrie

Siehe auch

Eichtheorie ***

6.57

Ein Typ von Theorien, in denen eine Eichsymmetrie zum Tragen kommt. Die Eichtheorien des Standard-Modells sind die Quantenflavordynamik und die Quantenchromodynamik.

Der Name „Eichttheorie“ geht auf den deutsch-amerikanischen Mathematiker Hermann Weyl (1885-1955) zurück, der mit dem Prinzip der Eichsymmetrie in den 1920er Jahren vergeblich versucht hatte, Elektromagnetismus und Gravitation zu einer Theorie zu vereinigen.

▷ Eichsymmetrie ▷ Erhaltungssatz

Name

Siehe auch

6.58 **Einstein, Albert (1879-1955) ****

Deutsch-schweizerisch-amerikanischer Physiker und Verweber der Raumzeit. Einstein revolutionierte mit seiner Relativitätstheorie das Verständnis von Raum und Zeit sowie von Materie und Energie. Zudem leistete er auch wesentliche Beiträge zur Quantentheorie, darunter eine Erklärung des Photoeffekts.

Eckdaten Albert Einstein wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren. Er starb am 18. April 1955 in Princeton, USA.

Nobelpreis für Physik Im Jahr 1921 erhält Einstein den Physik-Nobelpreis „für seine Verdienste um die theoretische Physik und insbesondere für seine Entdeckung des Gesetzes für den photoelektrischen Effekt.“

Siehe auch ▷ Allgemeine Relativitätstheorie ▷ Bose-Einstein-Kondensat ▷ Gravitationskraft ▷ Kernspaltung ▷ Photoeffekt ▷ Relativitätstheorie ▷ Spezielle Relativitätstheorie ▷ Zeitdilatation

6.59 **Elektrische Ladung ***

Die elektrische Ladung eines Teilchens gibt an, wie stark dieses der elektromagnetischen Kraft ausgesetzt ist. Je größer diese Ladung, um so stärker spürt ein Teilchen andere elektrische Ladungen.

Zwei Typen Die elektrische Ladung kann positiv und negativ sein. Gleichnamig geladene Teilchen stoßen sich ab, und entgegengesetzt geladene Teilchen ziehen sich an.

Ladungsquantelung Eines der letzten, großen Rätsel der modernen Physik ist die Frage, wieso die elektrischen Ladungen von Elektronen und Protonen bis auf ein Vorzeichen übereinstimmen. Einen offensichtlichen Grund dafür gibt es nicht, haben die beiden Teilchensorten doch eigentlich nichts miteinander gemein. Wir können uns aber recht glücklich schätzen, dass dem so ist. Denn nur aufgrund dieser Übereinstimmung sind elektrisch neutrale Atome möglich, in denen die negativen Ladungen der Elektronen die des positiven Kernes exakt aufheben. Wären die beiden Ladungen nur geringfügig verschieden, würden sich alle Atome anziehen oder abstoßen: Eine Welt, wie wir sie kennen, wäre unmöglich.

Millikans Öltröpfchenversuch Die Ladungsquantelung wurde im Jahr 1909 vom amerikanischen Physiker Robert Andrews Millikan (1868-1953) entdeckt: Als er die elektrischen Ladungen von Öltröpfchen untersuchte, stellte er fest, dass sie bei allen Öltröpfchen dem ganzzahligen Vielfachen der Ladung des Elektrons entsprachen. Für diese Entdeckung erhielt Millikan 1923 den

Nobelpreis für Physik („für seine Arbeiten zur elektrischen Elementarladung und zum photoelektrischen Effekt“).

▷ Elektromagnetische Kraft ▷ Ladung ▷ Quantenelektrodynamik (QED)

Siehe auch

Elektromagnetische Kraft *

6.60

Die elektromagnetische Kraft zählt zu den vier fundamentalen Wechselwirkungen. Sie hält Elektronen auf der Umlaufbahn um Atomkerne. Sie sorgt dafür, dass sich Kompassnadeln gen Norden ausrichten und liefert Energie in die Steckdosen.

Nach der Quantenelektrodynamik erfolgt die elektrische Kraft über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen mit dem Namen Photon.

Funktionsweise

Details der elektromagnetischen Kraft

Was wechselwirkt elektromagnetisch? Alles mit einer elektrischen Ladung.

Reichweite unendlich

Wechselwirkungsteilchen Photon

Theorie Quantenelektrodynamik

▷ Elektrische Ladung ▷ Elektromagnetismus ▷ Photon ▷ Quantenelektrodynamik (QED) ▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell ▷ Starke Kraft ▷ Wechselwirkung

Siehe auch

Elektromagnetisches Kalorimeter **

6.61

Ein elektromagnetisches Kalorimeter ist ein Teilchendetektor zur Bestimmung der Energie von Elektronen, Positronen und Photonen.

▷ Hadronisches Kalorimeter ▷ Kalorimeter ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

Elektromagnetisches Spektrum **

6.62

Zum elektromagnetischen Spektrum sind alle elektromagnetischen Wellenlängen zusammengefasst. Einen Teil des Spektrums macht das sichtbare Licht aus.

Siehe auch [▷ Elektromagnetische Welle](#) [▷ Licht](#)

6.63 **Elektromagnetische Welle** **

Elektromagnetische Wellen sind regelmäßige Störungen des elektromagnetischen Feldes. Sie decken das ganze elektromagnetische Spektrum ab: Auch der sichtbare Bereich des Spektrum, das Licht, gehört dazu. Nach der Quantentheorie kann die Energie von elektromagnetischen Wellen nur bestimmte Werte annehmen. Diese Lichtpakete heißen Photonen.

Siehe auch [▷ Elektromagnetismus](#) [▷ Licht](#) [▷ Maxwell-Gleichungen](#) [▷ Photon](#)

6.64 **Elektromagnetismus** **

Zum Elektromagnetismus sind Elektrizität und Magnetismus vereint.

Buy two, get one!

Unsere Augen sehen Sonnenaufgänge, eine Kompassnadel richtet sich gen Norden aus und zwei gleich geladene Elektronen stoßen sich ab. Bei all diesen doch recht verschiedenen Phänomenen hat der Elektromagnetismus seine Finger im Spiel. Anfang des 19. Jahrhunderts waren Elektrizität und Magnetismus für die Menschheit noch zwei völlig verschiedene Dinge, bis sie dann in der Mitte des 19. Jahrhundert zu einem einzigen Phänomen, dem Elektromagnetismus, vereinigt wurden. Seitdem können elektrische und magnetische Kräfte, sowie auch alle Eigenschaften des Lichts mit einer Handvoll Formeln erklärt werden.

Funktionsweise

Klassisch wird der Elektromagnetismus durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben, quantentheoretisch durch die Quantenelektrodynamik, der bis heute am besten experimentell bestätigten Theorie. Sie beschreibt elektromagnetische Kräfte über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen mit dem Namen „Photon.“

Siehe auch [▷ Maxwell-Gleichungen](#) [▷ Photon](#) [▷ Quantenelektrodynamik \(QED\)](#) [▷ Schwache Kraft](#) [▷ Wechselwirkung](#)

6.65 **Elektron** *

Fundamentales Teilchen des Standardmodells. Es wurde 1897 als erstes der fundamentalen Teilchen entdeckt und bewegt sich in Atomen um den Kern.

Details [Ohne das Flitzen der Elektronen durch Glühlampen, Computer und Mi-](#)

krowellenherde, wäre unser heutiges Leben unvorstellbar. Dabei wurden Elektron erst Ende des 19. Jahrhunderts als Bestandteil der Atome entdeckt. Die Teilchen gelten als unteilbar, sind elektrisch negativ geladen und ein wahres Fliegengewicht: In einem Pfund Schwarzbrot finden sich gerade einmal ein Achtel Gramm Elektronen.

Der Zerfall eines Elektrons in ein anderes Teilchen wurde bisher nicht beobachtet. Es scheint stabil zu sein.

Das Elektron wurde 1897 von Sir Joseph John Thomson (1856–1940) entdeckt, als er so genannte „Kathodenstrahlen“ untersuchte. Solche Kathodenstrahlen sorgen in Fernsehgeräten für das Bild auf der Mattscheibe. Thomson zeigte, dass Kathodenstrahlen aus Teilchen, den Elektronen bestehen. Das Elektron ist das erste Teilchen des Standard-Modells, das entdeckt wurde.

Der Name „Elektron“ leitet sich aus dem griechischen Wort für Bernstein ab, dem Harz von Nadelbäumen. Bernstein lädt sich besonders schnell elektrisch auf, wenn man daran reibt. Im Jahr 1874, also noch vor der Entdeckung des Elektrons, legte George Johnstone Stoney (1826–1911) eine Theorie über das „Atom der Elektrizität“ vor. Zusammen mit dem deutschen Physiker Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821–1894) gab er diesem Atom den Namen Elektron.

Lebensdauer und Zerfall

Nachweis und Entdeckung

Name

Details der elektromagnetischen Kraft

Name Elektron

Bemerkung Das Elektron wurde als erstes der fundamentalen Teilchen des Standard-Modells gefunden. In Atomen bewegt es sich um den Kern.

Masse $0,511 \text{ MeV}/c^2 = 9,1 \times 10^{-28}$ Gramm

Nachweis Das Elektron wurde 1897 von J.J. Thomson bei der Untersuchung so genannter Kathodenstrahlen entdeckt.

Elektrische Ladung -1

Lebensdauer unendlich

Starke Kraft Nein

Elektromagnetische Kraft Ja

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Elektron gehört damit zu den Fermionen.

Teilchenklassen Elektronen zählen zu den Leptonen.

Siehe auch ▷ Elektron-Neutrino ▷ Lepton ▷ Materieteilchen ▷ Myon ▷ Positron ▷ Tauon

6.66 **Elektronenvolt** *

In der Teilchenphysik gebräuchliche Einheit für die Energie.

Die Physik zählt zu den so genannten exakten Wissenschaften. Das heißt nun nicht, dass sich Physiker nicht auch einmal irren, sondern dass sie ihre Ergebnisse in Zahlen ausdrücken können. Damit solche Zahlen vergleichbar sind, damit man Äpfel nicht mit Birnen verwechselt, haben sie sich auf gemeinsame Einheiten geeinigt. Für die Einheit der Energie in der Welt der Teilchenphysik fiel dabei das Los auf das „Elektronenvolt“: Wird ein Elektron durch die elektrische Spannung von einem Volt beschleunigt, so gewinnt es eine Energie von einem Elektronenvolt.

Siehe auch ▷ Energie

6.67 **Elektron-Neutrino** *

Fundamentales Teilchen des Standard-Modells. Es ist elektrisch neutral, hat nur eine sehr geringe Masse und ist nach dem Standard-Modell der Teilchenphysik unteilbar. Neutrinos entstehen unter anderem bei Kernprozessen in der Sonne und zwar in unvorstellbar großer Anzahl.

Details Das Elektron-Neutrino ist eines drei Neutrinos. Die Teilchen treten nur über die schwache Kraft mit dem Rest der Materie in Wechselwirkung. Dies geschieht aufgrund der Schwäche dieser Kraft sehr selten: Man benötigt einen Bleiklotz von rund 10 Milliarden Kilometer Länge, um mehr oder minder sicher zu gehen, ein Neutrino einzufangen.

Nachweis und Entdeckung Das Elektron-Neutrino wurde 1930 von Wolfgang Pauli vorgeschagt, um einen mysteriösen Energieschwund beim Betazerfall zu erklären. Aufgrund seiner geringen Anstalten, mit dem Rest der Materie in Kontakt

zu treten, wurde es erst 1956 von Clyde L. Cowan und Frederick Reines entdeckt. Dazu untersuchten die beiden die (vermutete) starke Neutrinoproduktion in einem Kernreaktor. Frederick Reines (*1918) bekam den Physik-Nobelpreis (1995) „für seine bahnbrechenden experimentellen Beiträge zur Physik der Leptonen, insbesondere für die Entdeckung des Neutrinos.“

Der Zerfall eines Elektron-Neutrinos wurde noch nicht beobachtet. Es gilt als stabil.

Lebensdauer und Zerfall

Der Name „Neutrino“ wurde 1933 vom Italiener Enrico Fermi geprägt. Er bedeutet auf Italienisch „kleines Ungeladenes“.

Name

Details der elektromagnetischen Kraft

Name Elektron-Neutrino

Bemerkung Neutrinos wechselwirken so schwach mit der restlichen Materie, dass sie erst 26 Jahre nach ihrer Vorhersage entdeckt wurden.

Masse Kleiner als $3 eV/c^2$

Nachweis 1956 von Clyde L. Cowan und Frederick Reines

Elektrische Ladung 0

Starke Kraft Nein, da keine Farbladung

Elektromagnetische Kraft Nein, da keine elektrische Ladung

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Elektron-Neutrino gehört damit zu den Fermionen.

Teilchenklassen Elektron-Neutrinos gehören zu den Leptonen.

▷ Betazerfall ▷ Elektron ▷ Lepton ▷ Materieteilchen ▷ Myon-Neutrino ▷ Neutrinos ▷ Tau-Neutrino

Siehe auch

6.68 Elektroschwache Kraft

Bei hohen Energien und kleinen Abständen sind die schwache und elektromagnetische Kraft nicht mehr zu unterscheiden. Sie sind dann zur elektroschwachen Kraft vereint. Beschrieben wird diese Kraft durch die elektroschwache Theorie, die Teil des Standard-Modells der Teilchenphysik ist.

Siehe auch ▷ Elektromagnetismus ▷ Schwache Kraft

6.69 Elektroschwache Theorie ***

Theorie zur einheitlichen Beschreibung von Elektronmagnetismus und schwacher Wechselwirkung

Bei hohen Energien und kleinen Abständen sind die schwache und elektromagnetische Kraft nicht mehr zu unterscheiden. Sie sind dann zur elektroschwachen Wechselwirkung vereint. Theoretisch beschrieben wird dies mit Hilfe der Quantenflavordynamik.

Nobelpreis für
Physik

Die drei Physiker Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg erhalten 1979 der Physik-Nobelpreis „für ihre Beiträge zu Theorie und Vereinheitlichung der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen, einschließlich u.a. der Vorhersage des schwachen neutralen Stroms.“

Hinweise auf elektroschwache Vereinigung bei HERA

An DESYs Beschleuniger HERA konnte die elektroschwache Vereinigung experimentell bestätigt werden: Bei Energien im Bereich von 100 Milliarden Elektronenvolt und Abständen von rund $0,5 \times 10^{-17}$ Metern treten elektromagnetische und schwache Kraft gleich häufig aus.

Siehe auch ▷ Elektromagnetismus ▷ Quantenflavordynamik (QFD) ▷ Schwache Kraft ▷ Vereinheitlichung

6.70 Element **

Ein chemisches Element ist aus identischen Atomen zusammengesetzt. Eine Ordnung erfahren die chemischen Elemente im Periodensystem der Elemente.

▷ Atom ▷ Atomkern ▷ Elektron ▷ Periodensystem

Siehe auch

Emittanz ***

6.71

Gütekriterium für den Teilchenstrahl eines Teilchenbeschleunigers. Die Emittanz beschreibt den Querschnitt und die Auffächerung eines Teilchenstrahls. Je kleiner der Strahl und umso weniger aufgefächert, umso kleiner (und besser) ist die Emittanz.

▷ Teilchenbeschleuniger

Siehe auch

Emulsionsdetektor ***

6.72

Emulsionen können als Teilchendetektoren verwendet werden, mit denen die Positionen von elektrisch geladenen Teilchen genau vermessen werden können.

Emulsionen sind eine Art lichtempfindlicher Wackelpudding. Wie in einem Fotofilm befinden sich hier Silberverbindungen (Silberbromid oder Silberchlorid) in einer Gelatine. Treffen elektrisch geladene Teilchen auf diese Moleküle, entsteht Silber, das sich bei der Entwicklung im Photolabor schwarz färbt.

Funktionsweise

Der große Vorteil von Emulsionen ist, dass sich mit ihnen der Ort der Teilchen sehr genau bestimmen lässt. Ortsauflösungen von wenigen Millionstel Meter sind damit möglich. Die Platten müssen aber regelmäßig ausgetauscht, entwickelt und aufwändig ausgelesen werden – eine Kostenfrage.

Hohe Genauigkeit

Emulsionen haben in der Teilchenphysik vor allem in den 1950er und 1960er Jahren eine bedeutende Rolle gespielt. Aufgrund der Notwendigkeit des regelmäßigen Austausches bleibt Emulsionen der Einsatz in modernen Groß-Detektoren verwehrt; sie finden aber immer wieder für Spezialaufgaben Verwendung: Beispielsweise wurde mit ihrer Hilfe im Jahr 2000 das Tau-Neutrino entdeckt.

Geschichte und Einsatz

▷ Teilchendetektor

Siehe auch

Energie **

6.73

Grundlegende physikalische Größe.

Es gibt also eine ganze Menge unterschiedlicher Energieformen. Wenn

Definition

etwas Energie hat, kann es damit etwas anderes tun (= Arbeit verrichten). Eine Melone, die man auf dem Kopf balanciert, kann herunterfallen. Sie hat Lageenergie. Die Bewegungsenergie eines Autos lässt es fahren. Und die elektrische Energie in Batterien kann Plüschhasen wild auf Trommeln schlagen lassen.

Energieerhaltung-
und
umwandlung

Energie machen kann allerdings keiner. Eine der zentralsten Aussagen der Physik lautet: Energie bleibt erhalten. Sie kann nicht aus dem Nichts erschaffen werden, so sehr das auch Umweltschützer hoffen und Öl-Multis fürchten. Wir können allerdings die verschiedenen Energieformen ineinander umwandeln, aus der einen Energieform eine andere machen. Und das geschieht unentwegt: So wird aus der chemischen Energie in unseren Muskeln beim Radfahren Bewegungs- und durch ein Dynamo dann schließlich elektrische Energie. Und seit Einsteins Relativitätstheorie wissen wir noch was: Aus Energie kann man auch Materie machen. Energie und Materie lassen sich ineinander überführen.

Siehe auch ▷ Elektronenvolt ▷ Masse

6.74 Ereignis **

Als Ereignis (engl. event) bezeichnen Physiker eine konkrete Teilchenreaktion, von denen sie tausende und abermillionen in modernen Teilchenphysikexperimenten erzeugen und für ihre Rückschlüsse untersuchen.

Siehe auch ▷ Streuexperiment

6.75 Ereignisrate **

Die Ereignisrate gibt an, wie viele Ereignisse einer bestimmten Art in einem bestimmten Experiment pro Sekunde auftreten. Die Ereignisrate wächst mit der Dichte der Teilchen im Beschleuniger (Luminosität) und der allgemeinen Wahrscheinlichkeit für das Ereignis (Wirkungsquerschnitt).

Beispiel Die Ereignisrate beantwortet beispielsweise die folgende Frage: Wie viele Neutrino-paare entstehen pro Sekunde, wenn sich im Experiment XYZ ein Elektron und ein Positron über den Weg laufen?

Siehe auch ▷ Ereignis ▷ Luminosität ▷ Streuexperiment ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Wirkungsquerschnitt

Erhaltungssatz **

6.76

Ein Erhaltungssatz ist ein physikalisches Gesetz, das besagt, dass eine bestimmte Größe (wie zum Beispiel die Energie) in einem abgeschlossenen System erhalten bleibt.

Wichtige Erhaltungsgrößen sind die Energie, der Impuls und der Drehimpuls. Aber auch die elektrische Ladung ist erhalten.

Beispiele

In der modernen Physik werden Erhaltungssätze auf Symmetrien zurückgeführt.

Symmetrie

▷ Noether-Theorem ▷ Symmetrie

Siehe auch

Eta-Teilchen ***

6.77

Zusammengesetztes, extrem kurzlebiges Teilchen, das aus einem Quark und einem Antiquark besteht

Details zu den Etas

Name Eta

Elektrische Ladung neutral

Masse 547 Millionen MeV/c^2

Lebensdauer 10^{-25} Sekunden

Quarkinhalt Up- und Anti-Up-Quark, Down- und Anti-Down-Quark, Strange- und Anti-Strange-Quark

Teilchenklassen Das Eta gehört zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

▷ Mesonen ▷ Quarks

Siehe auch

Experiment **

6.78

In Experimenten stellen Wissenschaftler Fragen an die Natur, um mit den Antworten Theorien zu überprüfen.

Ein Beispiel für eine solche Frage lautet: Was passiert, wenn ich bei einer bestimmten Energie ein Elektron auf ein Proton schieße? Um der Natur diese Frage zu stellen, braucht man Elektronen und Protonen sowie einen Teilchenbeschleuniger, der die beiden Teilchen auf die benötigten Energien bringt. Dann ist die Natur am Zuge. Sie macht vor, wie sich die Teilchen verhalten. Die Antwort muss dann im Prinzip nur noch abgelesen werden. Dazu sind in der Teilchenphysik aber komplexe Detektoren vonnöten, die schnell die Ausmaße eines Hochhauses annehmen.

Theorie und Experiment

Die Welt der Physiker ist in zwei Lager geteilt: Theoretiker und Experimentatoren. Zusammen haben sie es nicht immer leicht: Die neuesten Theorien der Theoretiker sind viel zu kompliziert, als dass sie ein Experimentator sofort verstehen könnte, und die aktuellen Experimente der Experimentatoren sind so ausgefeilt, dass man besser alles daran setzen sollte, sie vor den Fingern der Theoretikern zu schützen.

Beide müssen jedoch eng zusammen arbeiten, wenn es darum geht, der Natur ihre kleinsten Geheimnisse zu entlocken. In einem wissenschaftlichen Pingpong wirft man sich gegenseitig Fragen zu, erntet Antworten, um dann wieder auf neue Fragen zu stoßen. Oder auf das schwedische Königspaar bei der Nobelpreisvergabe in Stockholm.

Siehe auch [▷ Quantenmessung](#) [▷ Standardmodell](#) [▷ Theorie](#)

6.79 Farbladung **

Eigenschaft eines Teilchen, die bestimmt, ob es der starken Wechselwirkung unterliegt. Quarks und Gluonen tragen Farbladungen.

Name Nehmen Sie das mit den Farben nicht allzu wörtlich! Da Quarks viel zu klein sind, um gesehen zu werden, kann man auch keine Farbe erkennen. Wieso die Ladung Farbladung heißt, liegt daran, dass in der Natur nur Teilchen vorkommen, deren Quarkfarben zusammen die Farbe Weiß ergeben. Also zum Beispiel Rot + Grün + Blau.

Siehe auch [▷ Ladung](#) [▷ Quantenchromodynamik \(QCD\)](#) [▷ Starke Kraft](#)

6.80 Feld ***

Form der mathematischen Buchführung, die jedem Punkt in der Raumzeit einen Wert (Temperatur, Stärke einer Kraft usw.) zuordnet. Die Theorien des Standard-Modells beschreiben Felder.

▷ Quantenfeldtheorie

Siehe auch

Fermi, Enrico (1901–1954) **

6.81

Italienischer Physiker. Enrico Fermi leistete maßgebliche Beiträge zur Entwicklung der Kernphysik und der Quantentheorie. Er gab dem Neutrino seinen Namen. Fermionen und das Fermilab sind nach ihm benannt.

Enrico Fermi wurde am 29. September 1901 in Rom geboren. Er starb am 28. November 1954 in Chicago.

Eckdaten

1938 erhält Enrico Fermi den Physik-Nobelpreis „für seinen Nachweis neuer radioaktiver Elemente, die durch Neutronenbeschuss entstehen, und für die damit verwandte Entdeckung von Kernreaktionen mithilfe langsamer Neutronen.“

Nobelpreis für Physik

▷ Fermilab ▷ Fermion ▷ Neutrinos ▷ Quantentheorie ▷ Schwache Kraft ▷ Spin

Siehe auch

Fermilab **

6.82

Fermilab ist ein Teilchenphysik-Zentrum 50 Kilometer im Westen von Chicago.

Das Zentrum wurde 1967 gegründet und beschäftigt rund 2.200 Mitarbeiter. Zudem wird das Labor jährlich von etwa 2.300 Gastwissenschaftlern besucht.

Am Fermilab wurden das Bottom-Quark (1977), das Top-Quark (1995) und das Tau-Neutrino (2000) entdeckt.

Entdeckungen

1974 wurde das Zentrum, das zuerst noch „National Accelerator Laboratory“ hieß, offiziell in „Fermi National Accelerator Laboratory“ umbenannt – nach dem italienischen Physiker Enrico Fermi (1901–1954). <http://www.fnal.gov/>

Name

Im Web

▷ Bottom-Quark ▷ Enrico Fermi (1901–1954) ▷ Tau-Neutrino ▷ Teilchenphysikzentren ▷ Top-Quark

Siehe auch

Fermion ***

6.83

Fermionen sind alle Teilchen mit halbzahligen Spin ($1/2$, $3/2$, ...).

Alle Materieteilchen des Standard-Modells sind Fermionen. Bei den Wechselwirkungsteilchen handelt es sich hingegen um Bosonen.

Fermionen im Standard-Modell

Pauli-Verbot	Für Fermionen gilt das Pauli-Verbot: Danach können zwei Fermionen niemals im selben Zustand verweilen.
Name	Fermionen sind nach dem italienischen Physiker Enrico Fermi benannt.
Siehe auch	▷ Boson ▷ Enrico Fermi (1901–1954) ▷ Materieteilchen ▷ Pauli-Verbot ▷ Spin

6.84 Feynman, Richard P. (1918–1988) **

Amerikanischer Physiker. Richard (Phillips) Feynman leistete maßgebliche Beiträge zur Entwicklung der Quantenfeldtheorie – insbesondere zur Quanten-Elektrodynamik und Renormierung. Auf ihn geht eine grafische Methode zurück, die zur Durchführung komplizierter Rechnungen in der Quantenfeldtheorie hilfreich sind: Feynman-Diagramme.

Eckdaten	Richard Feynman wurde am 11. Mai 1918 in Far Rockaway (New York) geboren. Er starb am 15. Februar 1988 in Los Angeles.
Nobelpreis für Physik	Richard Feynman erhält 1965 den Physik-Nobelpreis „für die fundamentalen Arbeiten zur Quantenelektrodynamik mit weitreichenden Konsequenzen für die Elementarteilchenphysik.“
Siehe auch	▷ Feynman-Diagramme ▷ Quantenelektrodynamik (QED) ▷ Quantenfeldtheorie ▷ Renormierung

6.85 Feynman-Diagramme ***

Feynman-Diagramme sind Grafiken, die in der Teilchenphysik benutzt werden, um die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Teilchenreaktionen zu berechnen.

Name	Feynman-Diagramme gehen auf den amerikanischen Physiker Richard Feynman zurück.
Siehe auch	▷ Bhabha-Streuung ▷ Bremsstrahlung ▷ Compton-Streuung ▷ Moeller-Streuung ▷ Quantenfeldtheorie ▷ Richard P. Feynman (1918–1988)

6.86 FLASH **

Anlage bei DESY zur Erzeugung hochintensiver Röntgenstrahlung.

Detail	FLASH ist 260 Meter lang und erzeugt hochintensive Strahlung im weichen Röntgenbereich bis hinunter zu einer Wellenlänge von sechs Nanometern. FLASH ist die weltweit erste Quelle für kurzwellige Laserstrahlung mit hoher Spitzenleuchtstärke und ultrakurzen Lichtpul-
--------	---

sen. Das wissenschaftliche Interesse ist dementsprechend groß und umfasst Experimente aus Bereichen wie Cluster-, Festkörper-, und Oberflächenphysik, Plasmaforschung sowie Molekularbiologie.

Flavor *** 6.87

Flavor (Geschmack) ist eine Eigenschaft von fundamentalen Teilchen. Zu jedem der sechs verschiedenen Quarktypen und sechs verschiedenen Leptonen gehört ein Flavor.

▷ Materieteilchen

Siehe auch

Fokussierung ** 6.88

Die Fokussierung ist eine Maßnahme in Teilchenbeschleunigern, bei der die beschleunigten Teilchen gebündelt werden.

Die Fokussierung erfolgt mit Hilfe von Quadrupol- und Sextupolmagneten. Durch die Fokussierung wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass es zu Teilchenkollisionen kommt.

▷ Beschleunigermagnete ▷ Quadrupolmagnet ▷ Sextupolmagnet ▷ Teilchenbeschleuniger

Siehe auch

Fragmentierung *** 6.89

Phänomen, bei dem aus einem hoch energetischen Quark-Antiquark-Paar neue Quarkpaare entstehen. Die Fragmentierung kann in Teilchendetektoren in Form von Teilchen-Jets wahrgenommen werden.

▷ Gluon ▷ Hadron ▷ Jet ▷ Quarks

Siehe auch

Franck, James (1882–1964) *** 6.90

Deutsch-amerikanischer Physiker. James Franck spendete einen Teil seines Namens für den Franck-Hertz-Versuch, einem Schlüsselexperiment der Quantentheorie.

James Franck wurde am 26. August 1882 in Hamburg geboren. Er starb am 21. Mai 1964 in Göttingen.

Im Jahr 1925 erhielt James Franck gemeinsam mit Gustav Hertz den

Eckdaten

Nobelpreis für Physik

Physik-Nobelpreis „für ihre Entdeckungen und Forschungen beim Stoß eines Elektrons mit einem Atom.“

Siehe auch ▷ Franck-Hertz-Versuch

6.91 Franck-Hertz-Versuch ***

Schlüsselexperiment zur Quantentheorie. Der 1913 von James Franck und Gustav Hertz durchgeführte Versuch zeigt, dass Atome nur auf bestimmte Energien angeregt werden können.

Siehe auch ▷ Atom ▷ Gustav Hertz (1887–1975) ▷ James Franck (1882–1964) ▷ Quantentheorie

6.92 Frequenz **

Die Frequenz gibt die Anzahl von Schwingungen pro Zeit an. Frequenzen werden in der Einheit Hertz gemessen. Eine Schaukel, die mit einem Hertz schwingt, schwingt einmal pro Sekunde

Sichtbares Licht entspricht Frequenzen im Bereich von 500 Billionen Hertz, das heißt Licht schwingt 500 Billionen Mal in der Sekunde hin und her.

Siehe auch ▷ Elektromagnetische Welle ▷ Heinrich R. Hertz (1857–1894) ▷ Wellenlänge

6.93 Funkenkammer **

Teilchendetektor zum Nachweis elektrisch geladener Teilchen.

Funktionsweise In einer Funkenkammer liegt eine elektrische Spannung von mehreren zehntausend Volt zwischen parallelen Platten an. Dazwischen befindet sich ein Edelgas. Die angelegte Spannung ist nicht hoch genug, als dass Funken – also kleine Blitze – zwischen den Platten ohne fremde Hilfe entstehen könnten. Die Sache sieht anders aus, wenn sich ein geladenes Teilchen zwischen den Platten bewegt. Das geladene Teilchen bildet Ladungen im Gas und erleichtert so die Funkenbildung, die entlang der Bahn des Teilchens erfolgt. Um „Dauerfunken“ auszuschießen, wird zur Beruhigung der Kammer die Spannung immer nur für wenige Millisekunden angelegt und danach wieder abgestellt.

Entwicklung und Einsatz Funkenkammern wurden Anfang der 1960er Jahre entwickelt, aber nach 1970 durch andere Techniken ersetzt. Sie spielen in der aktuellen Forschung keine Rolle mehr.

▷ Teilchendetektor

Siehe auch

Gell-Mann, Murray (*1929) **

6.94

Amerikanischer Physiker und Namenspatron der Quarks. Murray Gell-Mann hatte unter anderem die Idee mit den Quarks und erarbeitete neben anderen die Quantenchromodynamik (QCD). Er führte aber auch die Seltsamkeit in die Teilchenphysik ein.

Murray Gell-Mann wurde am 15. September 1929 in New York geboren.

Eckdaten

Gell-Mann erhält 1969 den Physik-Nobelpreis „für seine Beiträge und Entdeckungen hinsichtlich der Klassifikation der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen.“

Nobelpreis für Physik

▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quarks

Siehe auch

Geschwindigkeit **

6.95

Die Geschwindigkeit eines Teilchens gibt an, wie schnell es ist, das heißt wie viel Raum pro Zeiteinheit es zurücklegen kann.

Nach der Relativitätstheorie kann nichts über Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.

Einschränkung

▷ Impuls ▷ Lichtgeschwindigkeit

Siehe auch

Glashow, Sheldon (*1932) ***

6.96

Amerikanischer Physiker. Sheldon Lee Glashow war maßgeblich an der Entwicklung der Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung beteiligt.

Sheldon Lee Glashow wurde am 5. Dezember 1932 in New York geboren.

Eckdaten

Die drei Physiker Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg erhielten 1979 der Physik-Nobelpreis „für ihre Beiträge zu Theorie und Vereinheitlichung der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen, einschließlich u.a. der Vorhersage des schwachen neutralen Stroms.“

Nobelpreis für Physik

▷ Elektroschwache Theorie ▷ Quantenflavordynamik (QFD)

Siehe auch

6.97 **Gluon** *

Fundamentales Teilchen des Standard-Modells. Über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen mit Namen Gluon kommt die starke Kraft zustande, d.h. stark wechselwirkende Teilchen wie die Quarks üben aufeinander Kräfte aus, indem sie Gluonen austauschen.

Gluonen sind elektrisch neutral, masselos und es gibt acht verschiedene Typen von ihnen.

Entdeckung

Gluonen wurden 1979 am PETRA-Beschleuniger bei DESY entdeckt. Dort beobachtete man beim Zusammenprall von Elektronen mit Positronen immer wieder drei Bündel von Teilchen. Für eine Erklärung dieses Phänomens einigten sich die Wissenschaftler auf das Folgende: Beim Zusammenstoß entstehen ein Quark und ein Antiquark, von denen eines ein Gluon aussendet, bevor aus allen drei Teilchen zahlreiche weitere Teilchen entstehen, die sich zu Bündeln formen.

Farbe der
Gluonen

Was bei der elektromagnetischen Kraft die elektrische Ladung ist, ist bei der starken Kraft die Farbladung. Gluonen sind zweifarbig. Sie enthalten eine Farb- und eine Antifarbe-Komponente wie zum Beispiel „Rot-Antirot“ oder „Blau-Antigrün“. Damit wird die Kraft schnell unübersichtlich: Da nämlich Gluonen selbst auch eine Farbladung haben, können sie über den Austausch von Gluonen stark wechselwirken. Den Überblick behält hier die Theorie der starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik (Quantenfarbkraftlehre). Sie erklärt das genaue Zustandekommen der starken Kraft.

Name

Der Name „Gluon“ stammt vom englischen Wort für Klebstoff glue ab.

Details zu den Gluonen

Name Gluon

Elektrische Ladung keine

Schwache Ladung vorhanden

Farbladung Eine Kombination aus Farbe (Rot, Grün, Blau) und Antifarbe (Antirot, Antigrün, Antiblau), zum Beispiel Rot-Antiblau

Masse keine

Spin 1 (damit zählen Gluonen zu den Bosonen)

Wieso acht und nicht neun Gluonen?

Wenn Gluonen zweifarbig sind und es für jede Farbe drei Möglichkeiten gibt, dann sollte es nach Adam Riese doch bitteschön auch neun Gluonen geben. Oder?

1. Rot-Antirot,
2. Rot-Antigrün,
3. Rot-Antiblaul,
4. Grün-Antirot,
5. Grün-Antigrün,
6. Grün-Antiblaul,
7. Blau-Antirot,
8. Blau-Antigrün und
9. Blau-Antiblaul.

Dem ist nicht so. Um dem Grund dafür auf die Schliche zu kommen, muss man sich ein wenig in der Quantentheorie und der so genannten Gruppentheorie auskennen.

So darf man nach der Quantentheorie zum einen nicht nur die neun oben genannten Möglichkeiten betrachten, sondern muss auch alle Kombinationen, die sich aus Addition und Subtraktion ergeben, berücksichtigen – so zum Beispiel: $1/\sqrt{2}(\text{Rot-Antirot} - \text{Grün-Antigrün})$.

Zum anderen handelt es sich bei der Theorie der starken Kraft um eine Eichtheorie, d.h. sie ruht auf der Tatsache, dass es schrecklich egal ist, welche Farbe wir nun Rot, Blau oder Grün nennen. Wir könnten auch umbenennen, ohne dass dies das Verhalten der Quarks beeinflussen sollte. Es liegt also eine Symmetrie vor und mathematisch werden Symmetrien mithilfe der Gruppentheorie beschrieben.

Die Ergebnisse der Gruppentheorie zusammen mit der Kombinationsbildung der Quantentheorie ergeben nun die folgenden neun Möglichkeiten für die Gluonen:

1. Rot-Antigrün,
2. Rot-Antiblaul,
3. Grün-Antirot,
4. Grün-Antiblaul,
5. Blau-Antirot,
6. Blau-Antigrün,
7. $1/\sqrt{2}(\text{Rot-Antirot} - \text{Grün-Antigrün})$,

Kombinationen
in der
Quantentheorie

Gruppenbildung
in der
Gruppentheorie

8. $1/\text{Wurzel}(6)(\text{Rot-Antirot} + \text{Grün-Antigrün} - 2 \text{Blau-Antiblau})$ und
 9. $1/\text{Wurzel}(3)(\text{Rot-Antirot} + \text{Grün-Antigrün} + \text{Blau-antiblau})$

Beim neunten Gluonen heben sich die Farben genau auf: Dieses so genannte Farb-Singulett ist farblos und spielt bei der Übertragung der starken Kraft keine Rolle. Denn dabei kommt es gerade auf die Farbe an.

Also bleiben nach all der Mathematik nur acht Gluonen übrig. Das Farblose bleibt auf der Strecke.

Siehe auch \triangleright Farbladung \triangleright Quantenchromodynamik (QCD) \triangleright Starke Kraft \triangleright Wechselwirkungsteilchen

6.98 Gravitation **

Als Gravitation bezeichnet man die Anziehungen von Körpern mit Masse. Sie erfolgt über die Gravitationskraft.

Siehe auch \triangleright Allgemeine Relativitätstheorie \triangleright Gravitationskraft \triangleright Graviton \triangleright Wechselwirkung

6.99 Gravitationskraft *

Die Gravitationskraft ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Sie wirkt zwischen Massen.

Eigenschaften Mit den Füßen auf dem Boden zu bleiben, fällt dank Gravitationskraft leicht. Diese populärste der vier Wechselwirkungen sorgt dafür, dass Äpfel im Herbst auf die Erde fallen sowie dass sich die Erde auch im restlichen Jahr um die Sonne dreht und nicht in die dunklen Weiten des Weltraums geschleudert wird. Alles mit Masse oder Energie ist ihr unterworfen und sie ist dabei äußerst attraktiv: Denn während sich etwa elektrische Ladungen abstoßen können, ziehen sich Massen immer an. Darin liegt auch der Grund, weswegen die Gravitationskraft die Welt im großen Maßstab regiert, obwohl sie selbst so schwach ist, dass ihre Wirkungen bei Vorgängen im Aller kleinsten problemlos unter den Teppich gekehrt werden können. Es gibt aber auch noch einen zweiten Grund für ihre Omnipräsenz: Im Gegensatz zur schwachen und starken Kraft hat die Gravitationskraft eine unendliche Reichweite, das heißt: Sie ziehen auch noch dann ihre Schwiegermutter an, selbst wenn sich diese auf der anderen Seite des Universums befindet.

Als derzeit gültige Theorie zur Gravitationskraft gilt die Allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein. Bei der Relativitätstheorie handelt es sich um einen der beiden großen theoretischen Würfe der Physiker im 20. Jahrhunderts. Der andere ist Widersacher zugleich: die Quantentheorie. Denn während die Quantentheorie die Vermittlung der starken, schwachen und elektromagnetischen Kraft mit Hilfe des Austausches von Wechselwirkungsteilchen beschreibt, geht die allgemeine Relativitätstheorie einen völlig anderen Weg und erklärt die Schwerkraft über die Krümmung der Raumzeit.

Theoretische
Duellanten

Zwar gibt es mit dem Wort „Graviton“ schon einmal einen Namen für das Teilchen, über welche die Gravitationskraft quantentheoretisch erklärt werden soll. Aber trotz wissenschaftlicher Rasterfahndung, hat noch niemand ein Graviton zu Gesicht bekommen. Auch ist es theoretisch bisher nicht gelungen, Allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie unter einen Hut zu bekommen. Physiker arbeiten aber daran. Ein besonders populärer Versuch ist hier die Superstringtheorie.

Graviton

Details zur Gravitationskraft

Was wechselwirkt? Alles mit Masse oder Energie

Reichweite unendlich

Name des Wechselwirkungsteilchens Graviton?

Quantentheorie zur Kraft Superstringtheorie?

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Allgemeine Relativitätstheorie ▷ Gravitation
▷ Graviton ▷ Isaac Newton (1643-1727) ▷ Masse ▷ Superstringtheorie ▷ Wechselwirkung

Siehe auch

Graviton **

6.100

Viele Teilchenphysiker vermuten, dass auch die Gravitationskraft über ein Wechselwirkungsteilchen vermittelt wird. Diesem Teilchen gaben sie den Namen „Graviton“. Gesichtet wurde dieses Teilchen jedoch noch nicht.

▷ Gravitationskraft ▷ Wechselwirkung ▷ Wechselwirkungsteilchen

Siehe auch

6.101 **Grid** **

Name für einen Zusammenschluss von Computern, der wie ein einziger Rechner genutzt werden kann.

Mit dem so genannten Grid Computing sollen die immensen Anforderungen an Datenspeicherung und -verarbeitung gemeistert werden, die von den Experimenten am Teilchenbeschleuniger LHC gestellt werden. Dazu werden weltweit verteilte Computer zu einem gewaltigen Netzwerk zusammengeschlossen.

Siehe auch ▷ LHC

6.102 **Großdetektor** **

Aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzter Teilchendetektor, der in modernen Teilchenphysikexperimenten zum Einsatz kommt.

Im Laufe der Zeit haben sich Physiker Dutzende unterschiedliche Detektortypen ausgedacht. Jeder hat seine Vor- und Nachteile und ist meist für die Beantwortung einer ganz speziellen Frage geeignet. Es gibt keinen einfachen Detektortyp, der alles gleich gut kann. Daher kommen in Großdetektoren die einzelnen Detektortypen gemeinsam zum Einsatz. Dort sind sie wie Zwiebelschalen umeinander gelegt.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: null

Abbildung 6.1: null

Spurdetektoren	In den inneren Zwiebelschalen werden die Spuren vermessen, die elektrisch geladene Teilchen hinterlassen. Wenn die Teilchen dabei ein magnetisches Feld durchfliegen, ist ihre Bahn gekrümmt. Anhand der Krümmung lassen sich Rückschlüsse auf den Impuls (Geschwindigkeit mal Masse) und die Ladung der Teilchen ziehen.
Kalorimeter	In Kalorimetern wird die Energie der Teilchen bestimmt. Es werden dabei zwei Typen von Kalorimetern unterschieden: Elektromagnetische Kalorimeter bestimmen die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen. Hadronische Kalorimeter kümmern sich um alle Teilchen, die aus Quarks zusammengesetzt sind, die Hadronen.
Magnete	Im Inneren von Großdetektoren herrschen Magnetfelder, die bis zu 100.000-mal stärker sind als das Magnetfeld der Erde. Dies krümmt

die Bahnen elektrisch geladener Teilchen auf verräterische Weise. Die Krümmung kann in den Spurdetektoren beobachtet werden und lässt Rückschlüsse auf den Impuls der Teilchen zu.

Myonen, die schweren Vettern der Elektronen, durchfliegen alle inneren Detektorschichten und können auch noch in den ganz außen liegenden Myonkammern nachgewiesen werden.

Nur mit Hilfe elektronischer Rechenknechte können Physiker Herr und Dame über die unvorstellbaren Informations-Mengen werden, die in Großdetektoren anfallen: Die Hard- und Software in Elektronikcontainern entscheidet, ob sich bei einem Zusammenstoß auch etwas Spannendes ereignet hat. Die „schlechten“ Ereignisse wandern ins Daten-Nirvana, nur die „guten“ Ereignisse bekommen die Physiker zu Gesicht.

▷ Kalorimeter ▷ Myonkammer ▷ Spurkammer

Myonkammer

Elektronikcontainer

Siehe auch

Gruppentheorie ***

6.103

Teilbereich der Mathematik, in dem die Eigenschaften von Symmetrien untersucht werden. Für eine theoretische Beschreibung des Standard-Modells der Teilchenphysik sind diese Symmetrien von großer Bedeutung.

Um Symmetrien kümmern sich nicht nur Physiker. Auch eine ganze Abteilung der Mathematik hat sich ihnen verschrieben: die Gruppentheoretiker. Was nach soziologischer Untersuchung kleinerer Menschenansammlungen klingt, ist reine Mathematik. Zu so genannten „Gruppen“ werden symmetrische Aktionen zusammengefasst, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind.

Nehmen wir beispielsweise einen Kreis. Er kann um einen beliebigen Winkel gedreht werden, ohne dass sich sein Aussehen ändert. Wir wollen bei einer solchen Drehung von einer „Symmetrieoperation“ sprechen. Davon gibt es bei einem Kreis unendlich viele, weil wir ihn um einen beliebigen Winkel drehen können. Damit nun die Symmetrieoperationen eine Gruppe bilden, muss Folgendes gelten:

1. Wenn wir zwei Operationen nacheinander ausführen, erhalten wir eine weitere. (Anstatt zuerst um 90 Grad und dann um -20 Grad zu drehen, könnten wir gleich um 70 Grad drehen.)
2. Auch das Nichtstun ist eine Symmetrieoperation. (Also das Drehen um null Grad.)

3. Zu jeder Drehung gibt es eine Drehung, die sie wieder rückgängig macht. (Wenn man um 35 Grad nach links dreht, kann man danach auch um 35 Grad nach rechts drehen.)
4. Es gilt die so genannte Assoziativität. (Wenn wir drei Drehungen um 15, 25 und 35 haben, so können wir zunächst um 40 (= 15 + 25) und dann um 35 Grad drehen, oder zunächst um 15 und dann um 60 (= 25 + 35) Grad drehen.)

Mathematiker haben sich mittlerweile alle denkbaren Symmetriegruppen angeschaut und einen mächtigen Werkzeugkasten, eben die Gruppentheorie, entwickelt, mit dem sie die Eigenschaften von Gruppen untersuchen können. Ohne diesen Kasten trauen sich die wenigsten theoretischen Physiker heute noch aus dem Haus.

Siehe auch [▷ Eichsymmetrie](#) [▷ SU\(3\)](#) [▷ Symmetrie](#) [▷ Theorie](#)

6.104 GUT **

Abkürzung für Grand Unified Theory oder auf Deutsch: Große Vereinheitlichte Theorie. In einer GUT wären drei der vier Wechselwirkungen (die elektromagnetische, schwache und starke Kraft) zu einer Grundkraft vereinigt.

Theoretiker haben verschiedene Ansätze entwickelt, eine GUT zu formulieren. Perfekt sind sie aber alle noch nicht. Auch bliebe bei einer GUT die Gravitationskraft außen vor. Eine Theorie, die auch diese vierte Wechselwirkung umfasst, heißt TOE, Theory Of Everything bzw. Weltformel.

Siehe auch [▷ Gravitationskraft](#) [▷ Standardmodell](#) [▷ Superstringtheorie](#) [▷ Vereinheitlichung](#)

6.105 H1 **

Teilchenphysikexperiment bei DESY, das unter anderem die Struktur des Protons erforscht. Das Experiment untersucht dazu Zusammenstöße von Elektronen mit Protonen, die in der Beschleunigeranlage HERA zum Zusammenstoß gebracht wurden.

Detektor Das H1-Experiment nutzt den H1-Detektor, der unterirdisch um den Kollisionspunkt der Teilchen angesiedelt ist. Er wiegt 2.800 Tonnen, hat eine Höhe von 12 Metern, ist 10 Meter breit und 15 Meter lang.

Geschichte Das Experiment H1 zeichnete von 1992 bis 2007 Zusammenstöße von

Elektronen und Protonen auf. Bis weit über 2010 werden Forscher mit der Datenauswertung beschäftigt sein.

▷ HERA ▷ Tief-inelastische Streuung

Siehe auch

Hadron ***

6.106

Hadronen sind zusammengesetzte Teilchen, die aus Quarks bestehen.

Die Hadronen lassen sich in zwei Klassen unterteilen:

- ▷ Baryonen mit 3 Quarks sowie
- ▷ Mesonen mit einem Quark- und Antiquark.
- ▷ Hadron ▷ Mesonen ▷ Neutron ▷ Proton

Baryonen und Mesonen

Siehe auch

Hadronisches Kalorimeter ***

6.107

Mit Hilfe von hadronischen Kalorimetern wird die Energie von Teilchen bestimmt, die aus Quarks bestehen (so genannte Hadronen).

▷ Elektromagnetisches Kalorimeter ▷ Kalorimeter ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

Halbleiter-Detektor **

6.108

In Halbleiter-Detektoren kommen Halbleiter zum Einsatz, um Teilchen nachzuweisen.

Lichtschranken in einem Fahrstuhl funktionieren nach diesem Prinzip: Licht (aber auch elektrisch geladene Teilchen) beeinflussen die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern. Unter Lichteinfall haben sie einen anderen Widerstand als bei Dunkelheit und die Fahrstuhltür kann sich schließen. Der Vorteil von Halbleiter-Detektoren liegt darin, dass sie sehr kompakt sind und mit ihnen der Ort eines einfallenden Teilchens sehr genau vermessen werden kann. Genauigkeiten im Bereich von Millionstel Metern sind hier kein Problem.

Halbleiter-Detektoren sind heute in vielen modernen Großdetektoren im Einsatz – meist in direkter Nähe zum Punkt des Zusammenstoßes.

Einsatz

▷ Teilchendetektor

Siehe auch

HASYLAB **

6.109

Einrichtung bei DESY in Hamburg, das Forschung mit Photonen (Syn-

chrotronstrahlung und XFEL-Strahlung) durchführt und für andere Wissenschaftsgruppen ermöglicht.

Siehe auch ▷ DESY ▷ Synchrotronstrahlung

6.110 Hauptquark **

Baryonen und Mesonen (zum Beispiel Protonen) sind aus drei bzw. zwei Hauptquarks zusammengesetzt, die über Gluonen zusammengehalten werden.

Zu unterscheiden sind die Hauptquarks von den virtuellen Seequarks, die sich zahlreich aus den Gluonen bilden können. Andere Bezeichnung: Valenzquark.

Siehe auch ▷ Baryonen ▷ Gluon ▷ Mesonen ▷ Proton ▷ Seequark ▷ Tief-inelastische Streuung

6.111 Heisenberg, Werner (1901–1976) **

Deutscher Physiker und Bestimmer der Quantenunbestimmtheit. Werner (Karl) Heisenberg hat sich maßgeblich an der Entwicklung der Atom-, Quanten- und Kernphysik beteiligt – unter anderem mit seiner Unschärfebeziehung.

Eckdaten Werner Heisenberg wurde am 5. Dezember 1901 in Würzburg geboren. Er starb am 1. Februar 1976 in München.

Nobelpreis für Physik Werner Heisenberg erhielt 1932 den Physik-Nobelpreis „für die Entwicklung der Quantenmechanik, deren Anwendung unter anderem zur Entdeckung der allotropen Formen des Wasserstoffs führte“ (Allotropie ist das Auftreten von chemischen Elementen in verschiedenen festen Zustandsformen).

Siehe auch ▷ Quantentheorie ▷ Unschärfebeziehung

6.112 HERA *

HERA war die größte Teilchenbeschleuniger-Anlage bei DESY in Hamburg.

Beschreibung Hera war die eifersüchtige Gattin von Göttervater Zeus mit Wohnsitz auf dem Olymp. HERA ist aber auch die Abkürzung für „Hadron-Elektron-Ring-Anlage“. Das ist nicht nur ein sprachlicher Riese; HERA

war auch Deutschlands größte Forschungsanlage. Und einzigartig war HERA obendrein. Der Kreisbeschleuniger war von 1990 bis 2007 die weltweit einzige Anlage, die Protonen und Elektronen (die beiden Bestandteile des Wasserstoffatoms) in entgegengesetzter Richtung aufeinanderprallen ließ. Damit ist es möglich, Strukturen im Proton zu untersuchen, die mit 0,000.000.000 000.000.000,5 Metern 2.000-mal kleiner sind als das Proton selbst. HERA bot damit den weltweit schärfsten Blick ins Proton überhaupt. Ende Juni 2007 wurde die Anlage angeschaltet, die Auswertung der gesammelten Daten wird aber weit über 2010 hinaus andauern.

Experimentiert wurde bei HERA an unterschiedlichen Stellen: H1 (im Norden), HERMES (im Osten) und ZEUS (im Süden). In diesen Experimenten muss sich das Standardmodell seit HERAs Inbetriebnahme 1992 kritischen Tests unterziehen.

Und so kommt's zum Namen:

- ▷ Hadron: Zu den Hadronen zählen Protonen, also die aus Quarks zusammengesetzten Kerne des Wasserstoffatoms. Das Proton wiegt im Ruhezustand knapp 1 Milliarde Elektronenvolt und wird in HERA auf das 820-fache seiner Ruhemasse beschleunigt.
- ▷ Elektronen: Als zweiten Teilchentyp verwenden die HERA-Forscher Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen. Die Elektronen haben eine Energie von rund 500.000 Elektronenvolt vor der Beschleunigung und knapp 30 Milliarden hinterher.
- ▷ Ring-Anlage: HERA bildet einen geschlossenen Ring mit einer Länge von 6,3 Kilometern. An zwei Stellen prallen Protonen und Elektronen rund zehn Millionen Mal in der Sekunde aufeinander.

▷ Beschleunigermagnete ▷ DESY ▷ H1 ▷ HERMES ▷ Synchrotron ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit ▷ ZEUS

Experimente

Name

Siehe auch

HERMES **

6.113

Teilchenphysikexperiment bei DESY, das den Spin der Protonen und Neutronen erforscht. Dazu werden die Elektronen von HERA durch eine mit Gas gefüllte Zelle gelenkt.

Der HERMES-Detektor wiegt 400 Tonnen, hat eine Höhe von 3,5 Metern, ist 8 Meter breit und 5 Meter lang.

Detektor

Das Experiment HERMES zeichnete von 1995 bis 2007 Daten auf. Bis weit über 2010 werden Forscher mit der Datenauswertung beschäftigt sein.

Geschichte

Siehe auch ▷ HERA ▷ Proton ▷ Spin

6.114 Hertz **

Das Hertz ist die Einheit der Frequenz, die nach Heinrich Rudolph Hertz benannt wurde. Eine Schaukel, die mit einem Hertz schwingt, schwingt einmal pro Sekunde

Siehe auch ▷ Elektromagnetisches Spektrum ▷ Elektromagnetische Welle ▷ Heinrich R. Hertz (1857–1894)

6.115 Hertz, Gustav (1887–1975) ***

Deutscher Physiker. Gustav (Ludwig) Hertz wurde durch den Franck-Hertz-Versuch berühmt, der ein Schlüsselexperiment der Quantentheorie ist.

Eckdaten Gustav Hertz wurde am 22. Juli 1887 in Hamburg geboren. Er starb am 30. Oktober 1975 in Berlin. Er ist Neffe von Heinrich Hertz.

Nobelpreis für Physik Im Jahr 1925 erhielt Gustav Hertz gemeinsam mit James Franck den Physik-Nobelpreis „für ihre Entdeckungen und Forschungen beim Stoß eines Elektrons mit einem Atom.“

Siehe auch ▷ Franck-Hertz-Versuch

6.116 Hertz, Heinrich R. (1857–1894) ***

Deutscher Physiker. Heinrich (Rudolph) Hertz hat wesentliche Experimente zu elektromagnetischen Wellen durchgeführt. Nach ihm ist die Einheit der Frequenz benannt.

Eckdaten Heinrich Hertz wurde am 22. Februar 1857 in Hamburg geboren. Er starb am 1. Januar 1894 in Bonn.

Siehe auch ▷ Frequenz

6.117 Higgs, Peter (*1929) **

Britischer Physiker. Peter (Ware) Higgs wurde vornehmlich durch den von ihm formulierten und nach ihm benannten Higgs-Mechanismus bekannt.

Eckdaten Peter Higgs wurde am 29. März 1929 in Bristol geboren. Higgs ist

Professor der Universität Edinburgh im Ruhestand.

▷ Higgs-Mechanismus ▷ Higgs-Teilchen

Siehe auch

Higgs-Mechanismus **

6.118

Der Higgs-Mechanismus klärt, wie die Teilchen im Standardmodell der Teilchenphysik an Masse gelangen. Sein Wirken könnte durch den Fund von Higgs-Teilchen bestätigt werden, nach denen fieberhaft Ausschau gehalten wird – bisher vergeblich.

Um den Higgs-Mechanismus zu verstehen, muss man in tiefe mathematische Details des Standard-Modells der Teilchenphysik abtauchen. Eine Veranschaulichung findet sich in der folgenden Geschichte: Der Higgs-Mechanismus beschreibt, wie Teilchen an Massen gelangen. Der Gewinn von Masse hat eine Verringerung der Geschwindigkeit zufolge. Denn massive Objekte müssen mit einer Geschwindigkeit unter der des Lichts unterwegs sein. Der Higgs-Mechanismus beschreibt nun, wie Teilchen abgebremst werden können. Stellen Sie sich dazu eine Party nach einem Konzert vor! Überall wimmelt es vor Fans – einigermaßen gleichmäßig über den ganzen Raum verteilt. Plötzlich taucht ein Rockgigant auf, tritt durch die Tür und will doch eigentlich nur zu einem stillen Örtchen auf der anderen Seite. Die Fans jedoch stürzen sich auf ihn: Ein Schwätzchen hier, ein Autogramm dort. Unser Star schafft es so nur unter allergrößten Mühen zum Erleichterung versprechenden Ort – er zieht zu viele Fans an: Er wird langsamer – ganz so, als ob er Masse gewönne. Im Standard-Modell wären die Fans das so genannte Higgs-Feld, und unser Star gewinnt aufgrund seiner Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld an Masse. Und was ist dann das Higgs-Teilchen? Nun, wo Teilchen-Felder, da sind auch Teilchen. Wenn sich Quarks und Elektronen durch das Higgs-Feld zwingen, wird es verzerrt. Dabei fallen weitere Teilchen an: die so genannten Higgs-Teilchen. Wie kann man sich dieses Higgs-Teilchen nun vorstellen? Nun, es ist ein Drängeln der Fans auch ohne Musiker. Denn die Gäste auf der Party knubblen sich zuweilen auch ohne Star: Die Tür geht auf. Die Gäste wissen vom Star. Und schon drängeln sie sich – auch ohne Rockgigant – zusammen. Andere sehen das, stoßen hinzu. Die mitgekriegt haben, dass es gar keinen Star gibt, wenden sich wieder ab. Auf diese Weise breitet sich eine Verzerrung des Higgs-Feldes durch den Raum. Der Name des Mechanismus geht auf den Schotten Peter Higgs zurück, der neben anderen an der Entwicklung der Idee beteiligt war.

Der Higgs-Mechanismus als Party

Name

Siehe auch ▷ Higgs-Teilchen ▷ Masse ▷ Peter Higgs (*1929) ▷ Standardmodell

6.119 Higgs-Teilchen *

Die Existenz des Higgs-Teilchens wird vermutet. Sie ergibt sich aus dem Higgs-Mechanismus, der erklären soll, wie die Teilchen des Standard-Modells an eine Masse gelangen.

Nachweis Das Higgs-Teilchen ist das einzige Teilchen des Standard-Modells, das noch nicht nachgewiesen werden konnte. Physiker vermuten, dass es einfach zu schwer ist, um in bisherigen Teilchenphysikexperimenten gesichtet worden zu sein.

Name Der Name des Teilchens geht auf den Schotten Peter Higgs zurück, der neben anderen an der Entwicklung der Idee des Higgs-Mechanismus beteiligt war.

Siehe auch ▷ Higgs-Mechanismus ▷ Masse ▷ Peter Higgs (*1929) ▷ Standardmodell ▷ Teilchen

6.120 Hohlraumstrahlung ***

Die Hohlraumstrahlung ist ein Modell, dessen Beschreibung 1900 die Quantentheorie einläutete.

Schwarze Strahler Schwarze Strahler sind nichts für eitle Menschen. Denn sie sind das Gegenteil perfekter Spiegel: Ein schwarzer Strahler reflektiert kein Licht, sondern nimmt sämtliche elektromagnetische Strahlung auf, die auf ihn einfällt. Daher ist er zunächst schwarz. Doch bleibt dies nicht lange der Fall: Die Strahlung erhitzt den Körper, so dass er mit der Zeit Wärmestrahlung aussendet – bis zur Weißglut und drüber hinaus.

Eigenschaften Physiker hatten schon im 19. Jahrhundert herausgefunden, dass die Strahlung, die von einem schwarzen Strahler ausgeht (die so genannte Hohlraumstrahlung), nur von seiner Temperatur abhängen kann. Je heißer er ist, umso stärker verschieben sich die Frequenzen von Rot in Richtung Blau. Auch Herdplatten „leuchten“ zunächst nur unsichtbar infrarot-warm und später weißglühend.

Theoretische Beschreibung Die theoretische Beschreibung der Farbverteilung schwarzer Strahler hatte Physiker vier Jahrzehnte auf Trab gehalten. 1900 erriet Max Planck die Formel der Farbverteilung. Zwei Monate später präsentierte er eine theoretische Ableitung. Dazu zerteilte er die Energie des schwarzen Strahlers in kleine frequenzabhängige Energieportionen (Quanten).

▷ Max Planck (1858–1947) ▷ Quantentheorie

Siehe auch

Hyperladung ***

6.121

Eigenschaft von fundamentalen und zusammengesetzten Teilchen, die sich aus der Baryonenzahl und der Seltsamkeit ergibt. Sie spielt bei der gruppentheoretischen Beschreibung von Quarks eine große Rolle.

▷ Quantenzahl ▷ Seltsamkeit ▷ SU(3)

Siehe auch

ILC

6.122

Teilchenbeschleuniger der nächsten Generation. Der rund 35 Kilometer lange Linearbeschleuniger würde Elektronen und deren Antiteilchen bei einer bisher unerreichten Energie von 500 Milliarden Elektronenvolt zum Zusammenstoß bringen.

▷ Teilchenbeschleuniger

Siehe auch

Impuls **

6.123

Eigenschaft von Teilchen, die dessen Bewegungszustand beschreibt. Je größer Masse und Geschwindigkeit des Teilchens sind, umso höher ist sein Impuls.

▷ Geschwindigkeit ▷ Masse

Siehe auch

Ion **

6.124

Bei Ionen handelt es sich um Atome, die durch fehlende oder zusätzliche Elektronen eine elektrische Ladung besitzen.

▷ Atom ▷ Elektron

Siehe auch

Ionengetterpumpe ***

6.125

Vakuumpumpe, die zur Evakuierung von Teilchenbeschleunigern zum Einsatz kommt.

In Getterpumpen sind keine beweglichen, mechanischen Teile zu finden. Die Gasmoleküle werden vielmehr im Innern der Pumpe am so

Funktionsweise

genannten Gettermaterial chemisch gebunden. Dazu wird das Gas ionisiert, d.h. elektrisch aufgeladen und dann mit Hilfe einer Hochspannung auf das Gettermaterial (zum Beispiel Titan) beschleunigt. Dabei wird die Oberfläche durch die auftreffenden Ionen zerstäubt. Das freigewordene Titan bindet die Gasmoleküle chemisch an sich und setzt sich wieder an den Innenwänden der Pumpe ab. Dies funktioniert allerdings nicht mit Edelgasen, da diese chemisch äußerst träge reagieren. Dennoch werden auch diese in der Pumpe gebunden; nicht chemisch, sondern indem sie einfach so tief in die Titanwände geschossen werden, dass sie dort gefangen bleiben.

Siehe auch \triangleright Ion \triangleright Vakuum \triangleright Vakuumpumpe

6.126 **Isospin** ***

Eigenschaft, durch die sich Teilchen wie das Up- und Down-Quark – neben der elektrischen Ladung – unterscheiden. Der Isospin spielt bei der Gruppentheorie der Quarks eine wesentliche Rolle.

Siehe auch \triangleright Quantenzahl \triangleright SU(3)

6.127 **J/Psi** ***

Zusammengesetztes Teilchen aus einem Charm- und einem Anti-Charm-Quark.

Entdeckung Das J/Psi, und damit das Charm-Quark, wurde 1974 nahezu gleichzeitig von B. Richter und Team am SLAC und S. Ting und Team am BNL entdeckt.

Details zum J/Psi

Name J/Psi

Entdeckung 1977 von L. Ledermann und Team am Fermilab

Elektrische Ladung neutral

Masse $3.100 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer 10^{-20} Sekunden

Quarkinhalt Charm- und Anti-Charm-Quark

Teilchenklassen Das J/Psi gehört zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

▷ Mesonen ▷ Quarks

Siehe auch

Jet **

6.128

Bei Teilchenkollisionen mit hoher Energie entstehen oft gebündelte Strahlen von Teilchen. Diese so genannten Jets werden durch die Existenz von Quarks und Gluonen und der so genannten Fragmentierung erklärt.

▷ Fragmentierung ▷ Hadron ▷ Quarks ▷ Streuexperiment

Siehe auch

Kalorimeter *

6.129

Teilchendetektor, mit dessen Hilfe die Energie von Teilchen gemessen werden kann.

Kalorimeter sind wie Sandwichs aufgebaut. Dabei kommen zwei Schichten zum Einsatz: In den *Materieschichten* wechselwirken die Teilchen mit Materie. Dabei entstehen zahlreiche neue – jedoch energieärmere – Teilchen. Dieser „Schauer“ von Teilchen wird in den *Detektorschichten* nachgewiesen. Anhand der Teilchenzahl und der Länge des Schauers kann auf die Energie des ursprünglichen Teilchens geschlossen werden.

Funktionsweise

Man unterscheidet zwei Sorten von Kalorimetern: In elektromagnetischen Kalorimetern wird die Energie von Elektronen und Photonen vermessen. In hadronischen Kalorimetern werden die Energien von Quark-Verbindungen (Hadronen) bestimmt.

Elektromagnetische und hadronische Kalorimeter

Kalorimeter sind heute in jedem modernen Großdetektor im Einsatz.

Einsatz

▷ Elektromagnetisches Kalorimeter ▷ Hadronisches Kalorimeter ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

Kaonen **

6.130

Zusammengesetztes Teilchen, das aus einem Quark und einem Anti-quark besteht. Je nach konkreter Zusammensetzung ergeben sich dann

elektrisch negativ und positiv geladene beziehungsweise neutrale Kaonen.

Kaonen bestehen aus einem Quark und einem Antiquark. Die Teilchen haben eine geringe Lebensdauer und eine Masse, die rund 1.000-mal so groß ist wie die des Elektrons. Das Kaon kommt in drei elektrischen Ladungen daher – als K-Plus, K-Null und K-Minus.

Entdeckung

Die Kaonen wurden 1950/51 als Teil der kosmischen Höhenstrahlung mit Hilfe einer großen Nebelkammer auf dem Pic du Midi (französische Pyrenäen) in einer Höhe von 2830 Metern entdeckt.

Details zum negativen Kaon

Name Negatives Kaon

Entdeckung 1947 von G. Rochester und Team

Elektrische Ladung eine negative Elementarladung

Masse $494 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer $1,2 \times 10^{-8}$ Sekunden

Quarkinhalt Strange- und Anti-Up-Quark

Teilchenklassen Kaonen gehören zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zu den neutralen Kaonen

Name Neutrales Kaon

Entdeckung 1947 von G. Rochester und Team

Elektrische Ladung 0

Masse $498 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer 10^{-10} (kurzlebige Version) und 5×10^{-8} (langlebige Version)

Quarkinhalt Down- und Anti-Strange-Quark und Strange- und Anti-Down-Quark

Teilchenklassen Kaonen gehören zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zum positiven Kaon

Name Positives Kaon

Entdeckung 1947 von G. Rochester und Team

Elektrische Ladung eine Elementarladung

Masse $494 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer $1,2 \times 10^{-8}$ Sekunden

Quarkinhalt Up- und Anti-Strange-Quark

Teilchenklassen Kaonen gehören zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

▷ Antimaterie ▷ Mesonen ▷ Nebelkammer ▷ Quarks

Siehe auch

KEK **

6.131

KEK ist das japanische Zentrum für Teilchenphysik. Es liegt in Tsukuba, rund 60 Kilometer von Tokio entfernt.

KEK betreibt den Ringbeschleuniger KEK-B, in dem B-Mesonen erzeugt werden, um die CP-Verletzung zu untersuchen. Dazu prallen Elektronen und Positronen bei rund 10 Milliarden Elektronenvolt aufeinander. Bei den B-Mesonen zerfallen aufgrund der CP-Verletzung Teilchen und Antiteilchen unterschiedlich schnell. Das Experiment BELLE nimmt diesen Unterschied genauer unter die Lupe.

Beschleuniger

<http://www.kek.jp>

Webadresse

▷ CP-Verletzung ▷ Teilchenphysikzentren

Siehe auch

6.132 **Kernfusion** **

Vorgang, bei dem zwei Atomkerne zu einem größeren verschmelzen. In der Sonne entsteht auf diese Weise Energie. Die Kernfusion ist kein Forschungsgegenstand der aktuellen Teilchenphysik.

Siehe auch ▷ Atomkern ▷ Energie ▷ Kernspaltung

6.133 **Kernkraft** **

Kraft, welche Protonen und Neutronen zu Atonkernen zusammenhält. Sie geht auf die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks in den Kernteilchen zurück. Sie ist mit dieser aber nicht identisch, sondern nur das, was von ihr übrig bleibt.

Siehe auch ▷ Starke Kraft

6.134 **Kernspaltung** **

Vorgang, bei dem ein Atomkern in zwei oder mehr Teile zerfällt, nachdem er von anderen Teilchen (meist Neutronen) getroffen wurde. In Kernreaktoren wird die dabei frei werdende Energie zur Stromerzeugung genutzt. Die Kernspaltung ist kein Forschungsgegenstand der aktuellen Teilchenphysik.

Siehe auch ▷ Atomkern ▷ Energie ▷ Kernfusion

6.135 **Kicker-Magnet** **

Magnet in Teilchenbeschleunigern. Kicker-Magnete werden verwendet, um elektrisch geladene Teilchen aus einem Teilchenstrahl zu kicken und somit etwa in einen anderen Beschleuniger zu lenken.

Siehe auch ▷ Beschleunigermagnete

6.136 **Klassische Physik** **

Klassisch sind alle Bereiche der Physik, die ohne Zuhilfenahme von Quanten- und Relativitätstheorie beschrieben werden können, zum Beispiel die Beschreibung eines Billardspiels, die Bewegung der Planeten

um die Sonne, wie sie noch Newton vornahm, oder die Akustik einer Orgelpfeife.

▷ Quantentheorie ▷ Relativitätstheorie

Siehe auch

Klystron ***

6.137

Gerät zur Erzeugung von Mikrowellen. Mit Hilfe von Klystrons werden Mikrowellen erzeugt, die zur Beschleunigung von Teilchen – beispielsweise in Resonatoren – verwendet werden.

▷ Mikrowellen ▷ Resonator

Siehe auch

Komplexe Zahlen ***

6.138

Komplexe Zahlen spielen in der Physik und gerade in der Quantentheorie eine ganz zentrale Rolle. Man kann sie sich als Pfeile vorstellen, die man addiert, indem man die Pfeile aneinanderlegt.

Mathematisches: Sie Notwendigkeit komplexer Zahlen

Auf komplexe Zahlen waren Mathematiker im 18. Jahrhundert gestoßen, als sie immer neue mathematische Aufgaben lösen wollten und die Menge der bis dahin bekannten Zahlen erweitert werden musste, bis sie schließlich auch die komplexen Zahlen beinhaltete:

- ▷ Zu Anfang kannten Mathematiker ganze Zahlen wie -2, 0, 1, oder 2. Mit ihnen ließen sich Aufgaben wie „Welche ganze Zahl x ergibt mit 2 multipliziert 8?“ lösen. Die Antwort lautet $x = 4$.
- ▷ Bei der Frage „Welche Zahl x ergibt mit 2 multipliziert 9?“ müssen die ganzen Zahlen jedoch passen. Es gibt keine ganze Zahl, die Antwort auf diese Frage ist. Die Menge der Zahlen musste um die der Brüche erweitert werden. Damit lautet die Antwort auf obige Frage $x = 9/2 = 4,5$. Ganze Zahlen und Brüche bilden zusammen die Menge der rationalen Zahlen.
- ▷ Doch auch die rationalen Zahlen reichen nicht aus. So konnten Mathematiker zeigen, dass es keine rationale Antwort auf die Frage „Welche Zahl ergibt mit sich selbst multipliziert 2?“ gibt. Für diese Aufgabe wurde die irrationale „Wurzel 2“ erfunden. Rationale und irrationale Zahlen ergeben die reellen Zahlen.
- ▷ Mit den reellen Zahlen kann man die Gleichung „ $x^2 = 2$ “ lösen; „ $x^2 = -1$ “ bleibt aber immer noch ohne Antwort, so lange man die

Menge der Zahlen nicht noch ein weiteres Mal erweitert und zwar um die imaginäre Zahl $\sqrt{-1}$ = Wurzel von -1 = $\sqrt{-1}$. Dies tat der Mathematiker Leonhard Euler (1707-1783). Die Menge aller Zahlen, die aus reellen Zahlen und reellen Vielfachen von i zusammengesetzt sind, nennt man komplexe Zahlen.

Siehe auch \triangleright Quantentheorie

6.139 Kosmische Strahlung **

Die kosmische Strahlung stammt aus dem Weltall und besteht vor allem aus Atomkernen und Elektronen. Rund 1.000 dieser Teilchen prallen pro Sekunde auf jeden Quadratmeter der äußeren Atmosphäre. Dabei entstehen zahlreiche weitere Teilchen, die Höhenstrahlung.

Als es noch keine irdischen Teilchenbeschleuniger gab, war die kosmische Strahlung nahezu ausschließlicher Untersuchungsgegenstand der Teilchenphysiker. Und sie birgt immer noch Spannendes: So beinhaltet sie Teilchen mit derart hohen Energien, wie sie wohl niemals in einem irdischen Beschleuniger erreicht werden können – aber leider nur vereinzelt und zufällig verteilt.

Siehe auch \triangleright Myon

6.140 Kosmologie **

Teil der Physik, der sich mit nichts Geringerem als dem Universum beschäftigt: mit seiner möglichen Entstehung im Urknall, seinem jetzigen Zustand und seiner zukünftigen Entwicklung. Da auch das Größte aus Kleinstem zusammengesetzt ist, gibt es zahlreiche Schnittpunkte zwischen Kosmologie und Teilchenphysik.

Siehe auch \triangleright Dunkle Materie \triangleright Nukleosynthese \triangleright Standardmodell \triangleright Universum \triangleright Urknall

6.141 Kreisbeschleuniger *

Typ eines Teilchenbeschleunigers. In Kreisbeschleunigern durchlaufen Teilchen dieselben Beschleunigungsstrecken mehrfach, um so Umlauf für Umlauf auf immer höhere Energien gebracht zu werden. Dies unterscheidet sie von geraden Linearbeschleunigern.

Der erste Kreisbeschleuniger war das Zyklotron. Heute kommen vornehmlich Synchrotrons zum Einsatz. Beispiele

Moderne Kreisbeschleuniger wie das Synchrotron sind nicht kreisrund: Sie bestehen vielmehr aus geraden Beschleunigungsstrecken, die über kurvige Verbindungsstücke zu einer geschlossenen Struktur angeordnet sind. Name

▷ Betatron ▷ Linearbeschleuniger ▷ Mikrotron ▷ Speicherring ▷ Synchrotron Siehe auch
▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Zyklotron

Ladung ^{**} 6.142

Dass Teilchen auf unterschiedliche Weise wechselwirken, erklärt das Standard-Modell der Teilchenphysik über verschiedene Ladungen – darunter die elektrische und schwache Ladung sowie die Farbladung.

Zu jeder Kraft gehören Ladungen und nur Teilchen, die eine entsprechende Ladung aufweisen, unterliegen der jeweiligen Kraft:

- ▷ Die Ladung zur elektromagnetischen Kraft ist die weithin bekannte elektrische Ladung.
- ▷ Die Ladung zur schwachen Kraft ist die schwache Ladung.
- ▷ Die Ladung zur starken Kraft ist die Farbladung. Es gibt sie in Rot, Blau, Grün, Anti-Rot, Anti-Blau und Anti-Grün.
- ▷ Und selbst die Schwerkraft verfügt über eine Ladung. Es ist die Energie beziehungsweise Masse: Alles was Energie und damit eine Masse hat, unterliegt der Gravitation.
- ▷ Elektrische Ladung ▷ Farbladung ▷ Schwache Ladung Siehe auch

Lambda ^{***} 6.143

Zusammengesetztes Teilchen, das wie Protonen und Neutronen aus drei Quarks besteht. Eines davon ist seltsam.

Lambdas sind rund 20 Prozent schwerer als das Proton und zerfallen nach kürzester Zeit.

Das Lambda wurde wie die Kaonen 1951 mit Hilfe einer großen Nebelkammer in den französischen Pyrenäen auf dem Pic du Midi in einer Höhe von 2.830 Metern entdeckt. Die Teilchen kommen in der kosmischen Höhenstrahlung vor. Entdeckung

Details zum Lambda

Name Lambda

Entdeckung 1951 von C. Butler und Team

Elektrische Ladung neutral

Masse $1.115 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer $2,6 \times 10^{-10}$ Sekunden

Quarkinhalt Up- Down- und Strange-Quark

Teilchenklassen Das Lamda gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Siehe auch ▷ Baryonen ▷ Nebelkammer ▷ Quarks

6.144 **Längenkontraktion** ***

Phänomen, nach dem ein Stab verkürzt erscheint, wenn sich dieser sehr schnell bewegt. Dieser Effekt wird von der speziellen Relativitätstheorie beschrieben, er tritt nur bei Geschwindigkeiten in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit spürbar zutage.

Siehe auch ▷ Spezielle Relativitätstheorie ▷ Zeitdilatation

6.145 **Lawrence, Ernest O. (1901–1958)** ***

Amerikanischer Physiker. Ernest Orlando Lawrence baute das erste Zyklotron. Nach ihm ist das Element 103 benannt: Lawrencium.

Eckdaten Ernest Orlando Lawrence wurde am 8. August 1901 in Canton geboren. Er starb am 27. August 1958 in Palo Alto.

Nobelpreis für Physik 1939 erhält Lawrence den Physik-Nobelpreis „für die Erfindung und Entwicklung des Zyklotrons und für damit erzielte Resultat, besonders in Bezug auf künstliche radioaktive Stoffe.“

Siehe auch ▷ Zyklotron

Lebensdauer *

6.146

Mittlere Zeitdauer, bis ein Teilchen zerfällt.

Da in der Quantenwelt der Zufall regiert, ist die *mittlere* Zeitdauer gemeint. So beträgt die Lebensdauer eines freien Neutrons (wenn es sich also außerhalb eines Atomkerns befindet) knapp 15 Minuten, das heißt: Es zerfällt im Durchschnitt nach knapp 15 Minuten. Wann aber das Neutron zerfällt, auf das Sie mit dem Finger zeigen, wissen Sie nicht: Es kann nur wenige Sekunden überleben. Es können aber auch einige Tage bis zu seinem Ableben verstreichen.

Statistische
Größe

Resonanzen sind die kurzlebigsten Teilchen, die Physiker beobachtet haben. Für sie ist selbst ein Augenschlag eine Ewigkeit. So existieren Resonanzen gerade mal 10^{-24} Sekunden, bevor sie das Zeitliche segnen. In dieser Zeitspanne legt Licht gerade einmal den Durchmesser eines Atomkerns zurück. Mit einer Uhr stoppen kann man diese Zeit nicht. Physiker bleibt nur die Möglichkeit, indirekt auf die Lebenserwartung von Resonanzen zu schließen.

Extrem
kurzlebig:
Resonanzen

▷ Resonanz ▷ Zeit

Siehe auch

LEP **

6.147

Kreisförmiger Beschleuniger am CERN, der von 1989 bis 2000 Elektronen und Positronen auf Energien von jeweils bis zu 100 Milliarden Elektronenvolt und dann zum Zusammenstoß brachte.

LEP war bei CERN in der Nähe von Genf im Forschungsdienst. Er wurde 2001 aus dem 27 Kilometer langen Tunnelsystem entfernt und durch seinen Nachfolger LHC ersetzt. Bei den Zusammenstößen in LEP wurden bis zu 200 Milliarden Elektronenvolt frei. Diese Energie reicht aus, um Z-Teilchen und Paare von W-Teilchen zu erzeugen und zu untersuchen.

LEP ist die Abkürzung für Large Electron Positron Collider (= großer Elektronen-Positronen-Zusammenstoßer).

Name

▷ CERN ▷ Kreisbeschleuniger ▷ LHC ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit

Siehe auch

Lepton ***

6.148

Zu den Leptonen fasst man alle Materieteilchen zusammen, die keine

Quarks sind. Also Elektronen und Elektron-Neutrinos, Myonen und Myon-Neutrinos, Tauonen und Tau-Neutrinos.

Name Der Name „Lepton“ ist dem griechischen Wort für „dünn“, „zierlich“ entlehnt. Für das Elektron trifft diese Benennung zu: Es ist rund zweitausendmal leichter als das Proton. Nach dem Elektron fand man aber auch weit schwerere Leptonen. So entspricht die Masse des schwersten Leptons, des Tauons, der Masse von zwei Protonen. Wäre das schon bei der Namensgebung bekannt gewesen, hätten sich Physiker wohl für eine andere Bezeichnung entschieden. Übrigens: Lepton stand im alten Griechenland auch für die kleinste Münze.

Siehe auch ▷ Elektron ▷ Elektron-Neutrino ▷ Materieteilchen ▷ Myon ▷ Myon-Neutrino
▷ Tau-Neutrino ▷ Tauon

6.149 LHC *

Kreisförmiger Beschleuniger am CERN in der Nähe von Genf, der Protonen bei einer Energie von jeweils 7 Billionen Elektronenvolt aufeinander schießen soll.

Der LHC nimmt 2008 seinen Forschungsdienst auf. Mit seinen 27 Kilometern Umfang wird er das größte und wohl komplexeste wissenschaftliche Instrument auf Erden sein. Bei einer Betriebstemperatur von minus 271 Grad Celsius ist er kälter gestellt als der Weltraum.

Forschungsfragen Physiker erhoffen sich, mit dem LHC Antworten auf zahlreiche Forschungsfragen zu finden. Darunter:

- ▷ Taugt der Higgs-Mechanismus, um die Masse von Teilchen zu erklären?
- ▷ Gibt es die Supersymmetrie?
- ▷ Wieso bestehen wir aus Materie und nicht aus Antimaterie?
- ▷ Gibt es zusätzliche Dimensionen?
- ▷ Was sind dunkle Materie und dunkle Energie?
- ▷ Wieso ist die Schwerkraft so viel schwächer als die anderen Kräfte?

Experimente Entlang des LHC leisten 6 Detektoren ihren Dienst: Die beiden Universaldetektoren ATLAS und CMS sowie die Detektoren LHCb, ALICE, TOTEM und LHCf für spezielle Fragestellungen.

GRID Wenn der LHC und seine Experimente in Betrieb sind, werden jährlich rund 15 Millionen Gigabyte an Daten produziert. Diese Daten werden mit Hilfe eines Grids gespeichert und Wissenschaftlern zur Auswertung zur Verfügung gestellt.

Name LHC ist die Abkürzung für Large Hadron Collider (= großer Hadronen-

Zusammenstoßer).

▷ ALICE ▷ ATLAS ▷ CERN ▷ CMS ▷ Grid ▷ Kreisbeschleuniger ▷ LEP Siehe auch
▷ LHCb ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit

LHCb ** 6.150

LHCb ist einer der kleineren Detektoren am Teilchenbeschleuniger LHC.

An LHCb soll die so genannte CP-Verletzung anhand des Zerfalls von B-Mesonen untersucht werden. Die CP-Verletzung ist ein wichtiger Puzzlestein bei der Beantwortung der Frage, wieso es in unserem Universum mehr Materie als Antimaterie gibt. Am LHCb-Experiment nehmen 650 Wissenschaftler teil, von 48 Instituten in 13 Ländern (Stand 2006).

Der LHCb-Detektor nutzt Spurdetektoren auf Halbleiterbasis und so genannte Ring-Tscherenkow-Detektoren zur Teilchenidentifikation. Eine besondere Herausforderung stellen die hohe Wechselwirkungsrate und das Verhältnis von Untergrund und Signal von 1000 zu 1 dar, weshalb die Rekonstruktion der Ereignisse bei LHCb bereits online erfolgen muss. Aufbau

Die Abkürzung „LHCb“ steht für „LHC beauty“, wobei „beauty“ eine andere Bezeichnung für die Bottom-Quarks in B-Mesonen darstellt. Name

▷ LHC Siehe auch

LHCf ** 6.151

LHCf ist einer der Detektoren am Teilchenbeschleuniger LHC.

Bei LHCf werden LHC-Teilchen genutzt, um kosmischen Teilchen unter Laborbedingungen zu simulieren. Die Ergebnisse sollen dazu dienen werden, um andere Experimente zu kalibrieren.

Am LHCf-Experiment nehmen 22 Wissenschaftler teil, von 10 Instituten in 4 Ländern (Stand 2006). Ausmaße

Die Abkürzung „LHCf“ steht für „LHC forward“, wobei sich das „forward“ auf die untersuchten, in Vorwärtsrichtung gestreuten oder produzierten Teilchen bezieht. Name

▷ LHC Siehe auch

6.152 **Licht** *

Als Licht bezeichnet man den sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums.

- Wellenlängen Dabei handelt es sich um elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge zwischen 380 (violett) und 780 Milliardstel Metern (rot).
- Quantentheorie Nach der Quantentheorie ist Licht aus Photonen zusammengesetzt. Dabei handelt es sich um Objekte, die sowohl wellen- als auch teilchenartige Eigenschaften besitzen. Eine durchschnittliche Glühlampe sendet pro Sekunde im Schnitt $3 \times 10^{20} = 300$ Milliarden Milliarden Photonen aus.
- Siehe auch ▷ Elektromagnetische Welle ▷ Elektromagnetismus ▷ Lichtgeschwindigkeit ▷ Maxwell-Gleichungen ▷ Photon ▷ Spezielle Relativitätstheorie

6.153 **Lichtgeschwindigkeit** *

Licht breitet sich im Vakuum mit einer Geschwindigkeit von 299.792.458 Metern pro Sekunde aus. Somit braucht das Licht von der Sonne bis zur Erde – je nach Jahreszeit – rund 8 Minuten. Nach der speziellen Relativitätstheorie ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum das absolute Tempolimit: Nichts kann schneller sein.

- Lichtgeschwindigkeit in Materie Durch Materie bewegt sich Licht mit einer geringeren Geschwindigkeit als durch das Vakuum. So beträgt die Lichtgeschwindigkeit im Wasser nur rund 75 Prozent und die in Diamant nur 41 Prozent des Wertes im Vakuum. In Materie ist es somit für massive Teilchen prinzipiell auch möglich, schneller als das Licht zu sein. Dabei wird eine besondere Form von Strahlung ausgesendet, die Tscherenkow-Strahlung, die in bestimmten Detektoren zum Nachweis der Teilchen genutzt wird.
- Siehe auch ▷ Licht ▷ Naturkonstanten ▷ Spezielle Relativitätstheorie ▷ Tscherenkow-Strahlung

6.154 **LINAC II** ***

Teilchenbeschleuniger bei DESY. Die 70 Meter lange Anlage beschleunigt Elektronen auf eine Energie von 900 Millionen Elektronenvolt, bevor sie in DESY II und PETRA auf noch höhere Energien gebracht werden.

- Siehe auch ▷ DESY ▷ Linearbeschleuniger ▷ PETRA

LINAC III ***

6.155

Teilchenbeschleuniger bei DESY. Die 32 Meter lange Anlage beschleunigt negativ geladene Wasserstoffatome (= ein Proton plus zwei Elektronen) auf 50 Millionen Elektronenvolt. Am Ende von LINAC III werden die beiden Elektronen abgestreift, wonach Protonen übrig bleiben.

Die Protonen werden anschließend in DESY III und PETRA weiter beschleunigt, bevor sie das Ziel HERA erreichen.

▷ DESY ▷ Linearbeschleuniger

Siehe auch

Linearbeschleuniger *

6.156

Typ eines Teilchenbeschleunigers. In Linearbeschleunigern durchlaufen Teilchen einmal eine gerade (lineare) Anordnung von Beschleunigungselementen, um so auf hohe Energien gebracht zu werden. Dies unterscheidet sie von Kreisbeschleunigern, bei denen die Teilchen Umlauf für Umlauf beschleunigt werden.

Ein wesentlicher Vorteil von Linearbeschleunigern ist, dass die beschleunigten Teilchen darin keinen Energieverlust aufgrund von Synchrotronstrahlung erleiden. Diese Strahlung entsteht, wenn elektrisch geladene Teilchen eine krumme Bahn verfolgen.

Derzeit finden Planungen zum internationalen Projekt ILC statt. Dieser Linearbeschleuniger soll eine Länge von 35 Kilometern haben.

▷ Driftröhre ▷ Kreisbeschleuniger ▷ LINAC II ▷ Resonator ▷ SLC ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Tesla ▷ Wideröe-Struktur

Siehe auch

Lorentz, Hendrik Antoon (1953–1928) ***

6.157

Niederländischen Physiker. Auf Hendrik Antoon Lorentz geht unter anderem die Lorentzkraft des Elektromagnetismus und die Lorentz-Transformationen der Relativitätstheorie zurück.

Hendrik Antoon Lorentz wurde am 18. Juli 1853 in Arnheim geboren. Er starb am 4. Februar 1928 in Haarlem.

Eckdaten

Lorentz teilt sich im Jahr 1902 den Physik-Nobelpreis mit Pieter Zeeman (1865–1943) für Forschungen über Magnetismus und Strahlung.

Nobelpreis für Physik

▷ Lorentzkraft ▷ Lorentztransformation

Siehe auch

6.158 **Lorentzkraft** ***

Die Lorentzkraft setzt sich aus der elektrischen und magnetischen Kraft zusammen, die auf ein elektrisch geladenes Teilchen in einem elektromagnetischen Feld wirkt.

Siehe auch ▷ Elektromagnetismus

6.159 **Lorentztransformation** ***

Lorentztransformationen spielen in der Relativitätstheorie eine wichtige Rolle. Mit ihnen lässt sich berechnen, wie ein System aus einer anderen Perspektive aussieht.

Siehe auch ▷ Raumzeit ▷ Spezielle Relativitätstheorie ▷ Zeitdilatation

6.160 **Luminosität** ***

Eigenschaft eines Teilchenstrahls in einem Teilchenbeschleuniger. Mit Hilfe der Luminosität lässt sich ermitteln, mit wie vielen Teilchenreaktionen pro Sekunde gerechnet werden kann.

Da Teilchenphysiker möglichst viel Datenmaterial für Ihre Untersuchungen haben wollen, kann ihnen die Luminosität gar nicht hoch genug sein.

Siehe auch ▷ Ereignisrate ▷ Streuexperiment ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Wirkungsquerschnitt

6.161 **Magnetischer Monopol** ***

Hypothetisches Objekt. Ein Monopol besteht aus nur einen Pol – zum Beispiel ein Plus- oder Minuspol bei der Elektrizität. Magnete wurden bisher aber immer nur mit zwei Polen gefunden.

Zerteilt man einen Magneten, so hält man danach nicht etwa den Nordpol in der einen Hand und den Südpol in der anderen. Es entstehen vielmehr erneut zwei vollständige Magnete. Auch wenn man wieder und wieder den Magneten zerbricht: Magnetismus kommt anscheinend immer mit zwei Polen daher – als Dipol. Im Gegensatz zur elektrischen Ladung hat man noch keine magnetische Ladung gefunden – so sehr Physiker auch danach Ausschau halten. Die Suche nach magnetischen

Monopolen ist ein Standardvorgang in fast allen modernen Teilchenphysikexperimenten. Und wieso sucht man überhaupt danach? Seit 1931 weiß man, dass theoretisch aus der Existenz magnetischer Monopole die Tatsache folgt, dass elektrische Ladungen immer ein Vielfaches der Ladung des Elektrons sind. Dafür kennt man sonst keinen Grund. Das ließ den Entdecker dieser Tatsache, Paul Dirac, 50 Jahre später zu dem Ausspruch hinreißen: „Theoretisch müsste es eigentlich Monopole geben, denn der mathematische Beweis ist so schön.“

▷ Elektrische Ladung ▷ Quantenzahl

Siehe auch

Masse *

6.162

Eigenschaft von Teilchen.

Die alltägliche Einheit für Massen ist das Kilogramm. In der Teilchenphysik führt dies zu sehr kleinen Zahlen. Daher ist hier die gebräuchliche Einheit eine Million Elektronenvolt (Megaelektronenvolt).

Einheiten

Einige häufig verwendete Massen

Ruhemasse des Elektrons

$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} = 511 \text{ MeV}/c^2$$

Ruhemasse des Protons

$$m_p = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg} = 938.272 \text{ MeV}/c^2$$

Ruhemasse des Neutrons

$$m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg} = 939.565 \text{ MeV}/c^2$$

Massen macht sich auf zwei unterschiedlichen Arten bemerkbar: Über die so genannte *schwere Masse* ziehen sich Gegenstände an. Die schwere Masse ist es, die uns zum Erdmittelpunkt drückt und für den Ausschlag einer Personenwaage sorgt. Die schwere Masse ist damit die Ladung der Schwerkraft. Unsere *träge Masse* hingegen leistet Widerstand, wenn jemand versucht, uns zu beschleunigen oder abzubremsen. Es ist eine der Grundannahmen der allgemeinen Relativitätstheorie, dass diese beiden Masseformen gleich sind. Stellen Sie sich dazu die folgende Situation vor: Sie befinden sich eingesperrt in einem dunklen Raum und werden gegen den Boden gedrückt. Dies könnte nun daran liegen, dass sich der Raum auf einem Planeten befindet und ihre schwere Masse Sie zu Boden drückt. Es könnte aber auch sein, dass der

Schwere und träge Masse

Masse im
Standard-Modell
der
Teilchenphysik

Raum nach oben beschleunigt wird und Ihre Trägheit für die gefühlte Schwere verantwortlich ist.

Im Standard-Modell der Teilchenphysik vermuten Physiker, dass die Masse der Elementarteilchen durch den Higgs-Mechanismus entsteht. Der Großteil der Masse normaler Materie entsteht jedoch nicht durch den Higgs-Mechanismus. Dieser sorgt nur für wenige Prozent der Masse der Protonen, die aus Quarks zusammengesetzt sind. Die restlichen rund 95 Prozent der Masse gehen auf die Energie zurück, die in der starken Kraft zwischen den Quarks steckt. Denn nach der speziellen Relativitätstheorie können Energie und Masse ineinander überführt werden.

Energie und Masse

Nach der Speziellen Relativitätstheorie gilt: $E = mc^2$. Masse und Energie sind also nicht gleich, sondern über den Faktor c^2 miteinander verbunden.

Nimmt man für die Einheit der Masse nun die Einheit der Energie, das Elektronenvolt, so unterschlägt man den Faktor c^2 . Dies ist rechtens, wenn man die Lichtgeschwindigkeit c auf 1 (ohne Einheiten) setzt und die Einheiten für Länge und Zeit entsprechend undefiniert.

Siehe auch ▷ Energie ▷ Higgs-Mechanismus ▷ Masse-Energie-Äquivalenz

6.163 Masse-Energie-Äquivalenz **

Nach der Masse-Energie-Äquivalenz können Masse und Energie ineinander überführt werden. Dieses Phänomen wird durch die spezielle Relativitätstheorie beschrieben.

Die berühmteste Formel der Welt

Die Masse-Energie-Äquivalenz kommt in Einsteins berühmter Formel zum Ausdruck: $E = mc^2$

Siehe auch ▷ Relativistischer Massezuwachs ▷ Spezielle Relativitätstheorie

Materieteilchen *

6.164

Gruppe von fundamentalen Teilchen, die zusammen mit den Wechselwirkungsteilchen die Zutaten für unser Universum bilden.

Zu den Materieteilchen werden die folgenden Teilchen zusammengefasst:

- ▷ das Elektron und Elektron-Neutrino,
- ▷ das Myon und Myon-Neutrino,
- ▷ das Tauonen und Tau-Neutrino,
- ▷ das Up-Quark
- ▷ das Down-Quark,
- ▷ das Strange-Quark,
- ▷ das Charm-Quark,
- ▷ das Bottom-Quark und
- ▷ das Top-Quark.

Spin der Materieteilchen

Was die Materieteilchen vereint, ist ihr Spin. Dieser ist im Gegensatz zu den Wechselwirkungsteilchen halbzahlig. Materieteilchen gehören damit zur Gruppe der Fermionen.

▷ Elektron ▷ Lepton ▷ Myon ▷ Myon-Neutrino ▷ Neutrinos ▷ Quarks ▷ Standardmodell ▷ Tau-Neutrino ▷ Tauon ▷ Teilchen Siehe auch

Maxwell, James Clerk (1831–1879) **

6.165

Britischer Physiker. James Clerk Maxwell wurde vor allem durch seine Gleichungen zum Elektromagnetismus und seine Beiträge zur statistischen Physik berühmt.

Maxwell zeigte, dass elektrische und magnetische Kraft zwei Seiten der einen elektromagnetischen Kraft darstellen. Er folgerte, dass Licht als eine elektromagnetische Welle angesehen werden kann.

Elektromagnetismus

James Maxwell wurde am 13. Juni 1831 in Edinburgh geboren. Er starb am 5. November 1879 in Cambridge.

Eckdaten

▷ Elektromagnetische Welle ▷ Elektromagnetismus ▷ Licht ▷ Maxwell-Gleichungen Siehe auch

6.166 **Maxwell-Gleichungen** **

Satz von Gleichungen, die alle klassischen elektromagnetischen Phänomene (Elektrizität, Magnetismus, Licht) beschreiben.

Die Gleichungen wurden in den Jahren von 1861 bis 1864 von James Clerk Maxwell entwickelt. In der modernen Physik werden die Maxwell-Gleichungen als Näherung an die Quantenelektrodynamik, die derzeit gültige Theorie zum Elektromagnetismus, angesehen.

Siehe auch ▷ Elektromagnetische Welle ▷ Elektromagnetismus ▷ James Clerk Maxwell (1831–1879) ▷ Licht ▷ Quantenelektrodynamik (QED)

6.167 **Mendelejew, Dimitri I. (1934-1907)** **

Russischer Chemiker und Element-Sortierer. Mendelejew stellte 1869 unabhängig von Julius Meyer das Periodensystem der Elemente auf.

Eckdaten Dimitrij Iwanowitsch Mendelejew wurde am 8. Februar 1834 in Tobolsk (Sibirien) geboren. Er starb am 2. Februar 1907 in St. Petersburg.

Siehe auch ▷ Julius Meyer (1830–1895) ▷ Periodensystem

6.168 **Mesonen** ***

Mesonen sind Teilchen, die aus einem Quark und einem Antiquark zusammengesetzt sind. Diese hochbrisante Mischung macht die Teilchen instabil: Sie zerfallen meist nach kurzer Zeit in Elektronen, Positronen, Neutrinos und Photonen.

Vielfalt Die Mesonen bilden zusammen mit den Baryonen die Gruppe der Hadronen. Es gibt rund 140 Mesonen. Zu den Mesonen zählen die Pionen und die Kaonen.

Name Der Name „Meson“ ist dem griechischen Wort für „mittel“ entlehnt. Denn die Masse ersten untersuchten Mesonen lag zwischen denen der leichten Elektronen und der schweren Baryonen.

Siehe auch ▷ Antimaterie ▷ B-Mesonen ▷ Eta-Teilchen ▷ Hadron ▷ J/Psi ▷ Kaonen ▷ Mesonen ▷ Pion ▷ Quarks ▷ Upsilon

6.169 **Meyer, Julius (1830–1895)** ***

Deutscher Chemiker und Element-Sortierer. Julius Lothar Meyer stell-

te 1869 unabhängig von D.I. Mendelejew das Periodensystem der Elemente auf.

Lothar Meyer wurde am 19. August 1830 in Varel geboren. Er starb am 11. April 1895 in Tübingen.

Eckdaten

▷ Dimitri I. Mendelejew (1934-1907) ▷ Periodensystem

Siehe auch

Mikrotron ***

6.170

Kreisförmiger Teilchenbeschleuniger für Elektronen.

Das Mikrotron ist eine Weiterentwicklung des Zyklotrons. Beim Mikrotron ändert sich die Frequenz der Beschleunigungsspannung mit der Zeit, um Effekte der speziellen Relativitätstheorie zu berücksichtigen.

Funktionsweise

Das zurzeit (1999) größte Mikrotron befindet sich in Mainz: MAMI (Mainz Mikrotron) kann Elektronen auf 1,5 Milliarden Elektronenvolt beschleunigen.

Einsatz

▷ Betatron ▷ Kreisbeschleuniger ▷ Synchrotron ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Zyklotron

Siehe auch

Mikrowellen ***

6.171

Elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen zwischen einem Zehntel Millimeter und 30 Zentimetern. In Mikrowellenherden erwärmen Mikrowellen das Wasser in Lebensmitteln, in Beschleunigern beschleunigen sie Teilchen.

▷ Elektromagnetisches Spektrum ▷ Elektromagnetische Welle ▷ Klystron

Siehe auch

Moeller-Streuung ***

6.172

Prozess, bei dem sich zwei Elektronen über den Austausch eines Photons abstoßen.

▷ Feynman-Diagramme

Siehe auch

Molekül *

6.173

Aus Atomen zusammengesetztes Objekt.

▷ Atom ▷ Element

Siehe auch

6.174 **Monte-Carlo-Simulation** ***

Simulationsverfahren, mit dem das Zufallsverhalten quantentheoretischer Prozesse erfasst werden kann. Monte-Carlo-Simulationen spielen bei der Auswertung von Ergebnissen von Teilchenphysikexperimenten eine wesentliche Rolle.

Siehe auch ▷ Quantentheorie ▷ Streuexperiment

6.175 **Myon** *

Fundamentales Teilchen. Das Myon ist mit dem Elektron verwandt und ebenso elektrisch negativ geladen, seine Masse ist jedoch 207-mal größer.

Lebensdauer und
Zerfall

Ein Myon im Ruhezustand zerfällt im Schnitt nach rund zwei milliostel Sekunden in ein Elektron, ein Elektron-Anti-Neutrino und ein Myon-Neutrino.

Nachweis und
Entdeckung

Auf das Myon stießen Carl David Anderson (1905-1991) und Seth Henry Neddermeyer (*1907) bereits 1937, als sie die kosmische Strahlung mit Nebelkammern untersuchten. Aber erst im Jahr 1947 identifizierte man das Teilchen als schweren Partner des Elektrons. Es ist damit das erste aufgespürte Mitglied der zweiten Teilchenfamilie. Seine Entdeckung überraschte die Physiker so sehr, dass sich ein damaliger Zeitgenosse zum Ausspruch hinreißen ließ: „Wer hat das denn bestellt?“ (I.I. Rabi)

Details zum Myon

Name Myon

Masse 105,7 Millionen $MeV/c^2 = 1,9\hat{G}$ Gramm

Nachweis Das Myon wurde im Jahr 1937 von Seth Neddermeyer und Carl Anderson in der kosmischen Strahlung entdeckt.

Elektrische Ladung -1e

Lebensdauer 2×10^{-6} Sekunden

Starke Kraft Nein

Elektromagnetische Kraft Ja

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Myon gehört damit zu den Fermionen.

Teilchenklassen Myonen zählen zu den Leptonen.

▷ Elektron ▷ Lepton ▷ Materieteilchen ▷ Myonkammer ▷ Myon-Neutrino Siehe auch
▷ Tauon

Myonbeschleuniger *** 6.176

Teilchenbeschleuniger für Myonen. Zurzeit nur Zukunftsmusik, aber von großem Interesse. Denn mit Myonenbeschleuniger ließen sich sehr hohe Energien erreichen, da Myonen viel schwerer sind als Elektronen.

▷ Teilchenbeschleuniger Siehe auch

Myonkammer ** 6.177

Myon-Kammern sind Teilchendetektoren, mit denen in modernen Groß-Detektoren Myonen nachgewiesen werden.

Myon-Kammern sind heute in jedem modernen Groß-Detektor im Einsatz. Entwicklung und Einsatz

▷ Myon ▷ Teilchendetektor Siehe auch

Myon-Neutrino * 6.178

Fundamentales Teilchen. Das Myon-Neutrino ist eines der drei Neutrinos. Es ist elektrisch neutral, hat nur eine sehr geringe Masse und ist nach dem Standard-Modell der Teilchenphysik unteilbar.

Das Myon-Neutrino wurde 1962 von Leon Max Lederman (*1922), Melvin Schwartz (*1932) und Jack Steinberger (*1921) entdeckt. Die drei bekamen 1988 den Physik-Nobelpreis „für die Neutrinostrahlmethode und die Demonstration der Dublettstruktur der Leptonen durch die Entdeckung des Myon-Neutrinos“. Nachweis und Entdeckung

Der Name leitet sich vom Myon ab, mit dem es zusammen ein Paar Name

bildet. Die Bezeichnung „Neutrino“ wurde 1933 vom Italiener Enrico Fermi geprägt. Er bedeutet auf Italienisch „kleines Ungeladenes“.

Details zum Myon-Neutrino

Name Myon-Neutrino

Bemerkung Elektronen, Myonen, Tauonen und die jeweiligen Neutrinos bilden zusammen die Leptonen (griechisch für zierlich).

Masse Kleiner als $190.000 \text{ MeV}/c^2$

Nachweis 1962

Elektrische Ladung 0

Starke Kraft Nein, da keine Farbladung

Elektromagnetische Kraft Nein, da keine elektrische Ladung

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Myon-Neutrino gehört damit zu den Fermionen.

Teilchenklassen Myon-Neutrinos gehören zu den Leptonen.

Siehe auch [▷ Elektron-Neutrino](#) [▷ Lepton](#) [▷ Materieteilchen](#) [▷ Myon](#) [▷ Neutrinos](#) [▷ Tau-Neutrino](#)

6.179 Naturkonstanten **

Naturkonstanten geben Eigenschaften des Universums an. Sie lassen sich aus den gängigen Theorien nicht ableiten, sondern müssen vorausgesetzt und in Experimenten gemessen werden.

Einige Naturkonstanten

Lichtgeschwindigkeit $c = 299.792.458 \text{ m/s}$

Planck Konstante (Wirkungsquantum): $h = 6,626.068.76(52) \times 10^{-24}$ Joulesekunden

Ladung des Elektrons $e = 1,60217733 \times 10^{-19}$ Coulomb

▷ Lichtgeschwindigkeit ▷ Planckkonstante

Siehe auch

Nebelkammer **

6.180

Eine Nebelkammer ist ein Teilchendetektor, in dem übersättigter Dampf kondensiert, wenn er von einem elektrisch geladenen Teilchen durchflogen wird. Es bilden sich dann Nebelspuren entlang der Teilchenbahnen, die sich bei entsprechender Beleuchtung fotografieren lassen.

Die Genauigkeit, mit der mit einer Nebelkammer den Ort von Teilchen bestimmt werden kann, liegt bei wenigen zehntel Millimetern.

Ortsauflösung

Wie man richtig Dampf macht

In einer Nebelkammer befindet sich ein übersättigtes Gemisch aus Gas und Dampf wie zum Beispiel Luft-Wasserdampf oder Argon-Alkohol. Ein gesättigtes Gemisch kann keine weitere Flüssigkeit mehr aufnehmen. Wenn man dann den Behälter ruckartig vergrößert, so sinkt der Druck, die Temperatur bleibt aber gleich und das Gas-Dampf-Gemisch befindet sich in einem empfindlichen übersättigten Zustand.

Die erste funktionstüchtige Nebelkammer wurde 1911 vom Schotten Charles Thomson Rees Wilson (1869–1959) gebaut. 1927 erhielt er den Physik-Nobelpreis „für seine Methode, die Bahnen von elektrisch geladenen Teilchen durch Kondensation von Wasserdampf sichtbar zu machen.“ In einer Nebelkammer entdeckte Carl Anderson das Positron (1931). Sechs Jahre später machte es ihm J. C. Street and E. C. Stevenson mit dem Myon nach. In beiden Fällen wurde die kosmische Strahlung untersucht. Nebelkammern spielen in der aktuellen Forschung keine Rolle mehr. Sie werden in Ausstellungen aber gerne zu Demonstrationszwecken gezeigt.

Geschichte und Einsatz

▷ Blaskammer ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

6.181 **Neutraler Strom** ***

Prozess der schwachen Kraft, bei dem sich die elektrische Ladung nicht ändert. Ein Beispiel sind zwei Neutrinos, die aneinander streuen.

Siehe auch ▷ Schwache Kraft

6.182 **Neutrinos** *

Fundamentale Teilchen, die nur der schwachen Kraft und Gravitationskraft unterliegen. Sie besitzen kaum Masse und sind elektrisch neutral.

Das Standard-Modell der Teilchenphysik kennt drei Typen von Neutrinos:

1. Elektron-Neutrinos,
2. Myon-Neutrinos und
3. Tau-Neutrinos.

Vorhersage und Nachweis Neutrinos wurden 1930 von Wolfgang Pauli vorhergesagt, aber erst 1956 direkt nachgewiesen.

Siehe auch ▷ Elektron-Neutrino ▷ Materieteilchen ▷ Myon-Neutrino ▷ Neutrino-Teleskope
▷ Tau-Neutrino

6.183 **Neutrino-Teleskope** ***

Mit Neutrino-Teleskopen wird das Universum nach Neutrinos abgesehen.

Endstation Erde Neutrinos sausen Millionen von Lichtjahren durch das Weltall, durch jeden Stern, der sich ihnen in den Weg stellt – und ausgerechnet hier auf der Erde sollen sie sich mit einem Teleskop einfangen lassen? Klingt unmöglich. Funktioniert dennoch: Genauso wie man mit einer Gabel auch Suppe essen kann: ein bisschen bleibt immer an den Zinken. Einige Neutrinos bleiben nämlich auch in der Erde hängen. In einer selten vorkommenden Reaktion im Erdinneren kann ein Neutrino ein anderes Elementarteilchen erzeugen, ein Myon. Es fliegt in dieselbe Richtung wie das Neutrino. Wer also die Herkunft des Neutrinos ergründen möchte, kann stattdessen die Flugbahn des Myons messen. Und das geht, weil sich das Teilchen schneller als das Licht bewegt.

Überlichtblitz Ist nicht nichts schneller als das Licht? Von wegen! Das gilt nur im Vakuum, dem leeren Raum. In Wasser, Glas oder anderen Medien

können Elektron, Myon & Co. das Licht auch schon mal hinter sich lassen, weil es sich dort langsamer ausbreitet als im Vakuum. Dabei ähneln sie einem Düsenjäger. Wenn dieser schneller als der Schall fliegt, dann gibt's einen Knall zu hören, den Überschallknall. Fliegt das Myon mit Überlichtgeschwindigkeit durchs Wasser, dann gibt es keinen Knall, sondern einen Blitz, einen Überlichtblitz. Diese Strahlung trägt den Namen Tscherenkow-Strahlung. Um sie handelt es sich auch beim blauen Licht, in welchem Kernreaktoren schimmern. Das Myon, das bei einer Neutrino-Reaktion entsteht, saust schneller als das Licht durchs Eis und zieht einen Tscherenkow-Lichtkegel hinter sich her. Er ist es, wonach die Neutrino-Teleskope Ausschau halten.

Die geplanten und im Bau befindlichen Neutrino-Teleskope unterscheiden sich deutlich von Fernrohren oder Radioteleskopen. Die auffälligste Besonderheit ist, dass sie nicht auf dem Erdboden stehen, sondern tief im Wasser oder gar im antarktischen Eis versenkt werden. Dort ist es dunkel genug, dass lediglich die Tscherenkow-Strahlung der Myonen registriert wird. Kern des Neutrino-Teleskops sind Detektorkugeln, sie sollen die Überlichtblitze wahrnehmen. Diese Kugeln werden in mehreren langen Ketten unter Wasser oder im Eis angebracht. Durch die dreidimensionale Anordnung der Detektoren ist es möglich, die Herkunft des Neutrinos zu rekonstruieren: Aus dem Vergleich der Ankunftszeiten eines Lichtblitzes bei den Sensoren kann die Lage des Tscherenkow-Lichtkegels berechnet werden. Daraus ergibt sich die Flugbahn des Myons und somit die des Neutrinos. In den 25 bis 40 Zentimeter großen, druckfesten Glaskugeln befinden sich empfindliche Lichtsensoren, sogenannte Photovervielfacher. In ihnen lösen die schwachen Tscherenkow-Lichtblitze einen Schauer von Elektronen aus. Dieses elektrische Signal wird gemessen und gibt Aufschluss über die Stärke des Blitzes und damit über die Entfernung zur Myonenstrecke. Nur Neutrinos, die aus dem Weltall kommen, sind für die Forscher von Interesse, Teilchen aus der Erdatmosphäre oberhalb des Detektors stören da nur. Deshalb werden nur Myonen berücksichtigt, die von unten kommen. Dazu ist die obere Hälfte der Detektorkugeln mit einer lichtundurchlässigen Farbe bestrichen. Die Glasaugen schauen also nur ins Innere der Erde und benutzen diese gewissermaßen als mächtigen Teilchenfilter.

Was man mit Fernrohr, Röntgen- und Radioteleskopen am Himmel sehen kann, ist noch lange nicht alles. Von Neutrino-Teleskopen wird erwartet, dass sie der Kosmologie neue Impulse geben. Zum Beispiel bei der Suche nach WIMPs („Weak Interacting Massive Particle“). Diese massereichen, aber schwach wechselwirkenden Teilchen sind ganz heiße

Kugellager unter Wasser

Was möchte man mit Neutrino-Teleskopen erforschen?

Kandidaten für die „dunkle Materie“. Das ist Materie, die die Astronomen bislang noch nicht entdeckt haben, weil sie keine Strahlung abgibt. Aus der Bewegung der Galaxien schließen die Astrophysiker aber auf ihre Existenz. WIMPs, so vermutet man, hocken im Innern von Sternen oder im Zentrum der Erde und geben Neutrinos einer bestimmten Energie ab. Auch Urknall-Exoten wie magnetische Monopole, Relikte aus der Entstehung unseres Universums, könnten sich durch besonders energiereiche Neutrinos verraten. Wie die Kosmologie könnten auch Astro- und Teilchenphysik von den Ergebnissen der Neutrino-Teleskope profitieren. Mögliche Anwendungsgebiete sind: der Nachweis von Neutrinos aus Supernovae in unserer Galaxis und ein besseres Verständnis von „Gamma Ray Bursts“, gigantischen Strahlenexplosionen in den Zentren von Galaxien. Auch der Effekt der so genannten Neutrino-Oszillation könnte untersucht werden, ein wichtiger Hinweis auf die Masse der Teilchen. Die Vermessung des Spektrums atmosphärischer Neutrinos und die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der kosmischen Strahlung würden auch diesem Zweig der Teilchenphysik neue Impulse geben

Siehe auch ▷ Kosmologie ▷ Neutrinos

6.184 Neutron *

Aus Quarks zusammengesetztes Teilchen. Neutronen sind Bestandteile der Atomkerne und bestehen nach dem einfachen Quarkmodell aus einem Up-Quark und zwei Down-Quarks.

Lebensdauer Wenn ein Neutron nicht in einem Atomkern gebunden ist, zerfällt es nach knapp 15 Minuten – zum Beispiel über einen Betazerfall.

Entdeckung Das Neutron wurde 1932 von Sir James Chadwick entdeckt, der dafür den Physik-Nobelpreis erhielt. Die Existenz des Teilchens war bereits 12 Jahre zuvor von Ernest Rutherford vorhergesagt worden.

Details zum Neutron

Name Neutron

Entdeckung 1932 von James Chadwick

Zusammensetzung zwei Down-Quarks und ein Up-Quark

Lebensdauer rund 14 Minuten und 49 Sekunden

Elektrische Ladung keine

Teilchenklassen Das Neutron gehört zu den Hadronen und Baryonen, zusammen mit den Protonen bildet es die Nukleonen.

Masse 939,6 Millionen Elektronenvolt, rund 2.000-mal so groß ist wie Masse des Elektrons

▷ Antineutron ▷ Atomkern ▷ Baryonen ▷ Hadron ▷ James Chadwick (1881–1974) ▷ Nukleon ▷ Proton Siehe auch

Newton, Isaac (1643–1727) ** 6.185

Englischer Physiker, Mathematiker und Astronom. Sir Isaac Newton zählt zu den größten Physikern der Geschichte. Er leistete so wesentliche Beiträge zur Mechanik, Gravitation und Optik, dass Jahrzehnte nach ihm erst einmal nicht viel Neues geschah.

Isaac Newton wurde am 4. Januar 1643 in Woolfsthorpe geboren. Er starb am 31. März 1727 in Kensington. Eckdaten

▷ Gravitationskraft Siehe auch

Nobelpreis * 6.186

Auszeichnung für außergewöhnliche wissenschaftliche Leistungen.

▷ Albert Einstein (1879–1955) ▷ Erwin Schrödinger (1887–1961) ▷ Louis Victor de Broglie (1892–1987) ▷ Max Planck (1858–1947) ▷ Paul Dirac (1902–1984) ▷ Richard P. Feynman (1918–1988) ▷ Werner Heisenberg (1901–1976) ▷ Wolfgang Pauli (1900–1958) Siehe auch

Noether, Amalie E. (1882–1935) *** 6.187

Deutsche Mathematikerin, die im Noether-Theorem Symmetrien und physikalische Erhaltungssätze in Beziehung setzte.

Noether wurde am 23. März 1882 in Erlangen geboren. Sie starb am 14. April 1935 in Bryn Mawr, Pennsylvania. Eckdaten

▷ Noether-Theorem ▷ Symmetrie Siehe auch

6.188 **Noether-Theorem** ***

Nach dem Noether-Theorem gehört zu jeder (kontinuierlichen) Symmetrie in der Natur ein Erhaltungssatz. Dieses Theorem wurde 1912 von der deutschen Mathematiker Emmy Noether aufgestellt.

Siehe auch ▷ Amalie E. Noether (1882-1935) ▷ Erhaltungssatz ▷ Symmetrie

6.189 **Nukleon** ***

Zu Nukleonen fasst man die Bausteine des Atomkerns, die Neutronen und Protonen, zusammen.

Siehe auch ▷ Atomkern ▷ Neutron ▷ Nukleosynthese ▷ Proton

6.190 **Nukleosynthese** ***

Die Nukleosynthese beschreibt, wie sich schwere Teilchen wie Neutronen und Protonen nach dem Urknall gebildet haben und weiterhin bilden.

Siehe auch ▷ Kosmologie ▷ Nukleon

6.191 **Omega** ***

Zusammengesetztes Teilchen, das wie Protonen und Neutronen aus drei Quarks besteht. Alle drei Quarks sind seltsam.

Entdeckung Das Omega-Minus wurde 1964 von Barnes und Team am BNL entdeckt. Dies war ein wichtiger Hinweis auf die Richtigkeit des Quark-Modells. Denn einige Eigenschaften des Omega-Minus konnte vor seinem Fund vorhergesagt werden.

Details zum Omega-Minus

Name Omega-Minus

Entdeckung 1964 von V. Barnes und Team am BNL

Elektrische Ladung eine negative Elementarladung

Masse 1.672 Millionen MeV/c^2

Lebensdauer $0,8 \times 10^{-10}$ Sekunden

Quarkinhalt drei Strange-Quarks

Teilchenklassen Das Omega gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

▷ Baryonen ▷ Quarks

Siehe auch

Paarerzeugung und -vernichtung ***

6.192

Nach der Quantenfeldtheorie kann sich aus Energie ein Teilchen-Antiteilchen-Paar bilden. Treffen Teilchen und Antiteilchen aufeinander können beide in reine Energie zerstrahlen.

▷ Antimaterie ▷ Vakuum

Siehe auch

Paper **

6.193

„Paper“ (engl. für Papier) werden die Veröffentlichungen genannt, in denen Forscher ihre Kollegen darüber informieren, welche neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse sie gewonnen haben. Dazu werden die Paper in Fachzeitschriften veröffentlicht.

▷ Experiment ▷ Theorie

Siehe auch

Parton ***

6.194

Die Bestandteile von aus Quarks zusammengesetzten Teilchen wie etwa Protonen nannte man zunächst Partonen, bevor man erkannte, dass es sich dabei um Quarks und Gluonen handelt.

▷ Gluon ▷ Quarks

Siehe auch

Pauli, Wolfgang (1900–1958) **

6.195

Physiker und Verbotregler. Wolfgang Pauli hat wesentliche Beiträge zur Quantentheorie geleistet. Auf Pauli geht unter anderem das Pauli-Verbot und die Vorhersage der Neutrinos zurück.

Wolfgang Pauli wurde am 25. April 1900 in Wien geboren. 1946 erhielt

Eckdaten

er die amerikanische und 1949 die schweizer Staatsbürgerschaft. Pauli starb am 15. Dezember 1958 in Zürich.

Nobelpreis für
Physik

Wolfgang Pauli erhielt 1945 den Physik-Nobelpreis “für die Entdeckung des Ausschlussprinzips, auch Pauli-Prinzip genannt.“

Siehe auch ▷ Neutrinos ▷ Pauli-Verbot ▷ Quantentheorie

6.196 Pauli-Verbot ***

Prinzip der Quantentheorie, nach der sich bestimmte Teilchen nicht in gleichen Zuständen befinden dürfen. Konsequenz: Man kann Materie nicht beliebig dicht packen.

Gültigkeit Das Pauli-Verbot gilt für Teilchen mit halbzahligem Spin, den Fermionen. Zu diesen Teilchen zählen Elektronen und Quarks.

Name Der Name geht auf den Physiker Wolfgang Pauli zurück, der das Gesetz 1925 aufstellte.

Siehe auch ▷ Fermion ▷ Quantentheorie ▷ Spin ▷ Wolfgang Pauli (1900–1958)

6.197 Periodensystem **

Im Periodensystem sind alle Elemente in einer Tabelle ihren chemischen Eigenschaften nach sortiert. Das Periodensystem wurde 1869 unabhängig von Dmitrij Mendelejew (1834–1907) und Julius Lothar Meyer (1830–1895) vorgeschlagen.

Siehe auch ▷ Atom ▷ Dimitri I. Mendelejew (1834–1907) ▷ Element ▷ Julius Meyer (1830–1895)

6.198 PETRA ***

Teilchenbeschleuniger bei DESY. Das rund 2,3 Kilometer lange Synchrotron beschleunigt Elektronen, Positronen und Protonen. Zudem wird an PETRA Forschung mit Synchrotronstrahlung betrieben.

Einsatz Von 1978 bis 1986 wurden an PETRA Elektronen und Positronen gegeneinander beschleunigt und zum Zusammenprall gebracht. An vier Experimenten wurde damit Teilchenphysik betrieben und zum Beispiel das Gluon entdeckt. Später diente PETRA zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung sowie zur Vorbeschleunigung von Teilchen für HERA.

Zukunft Mitte 2007 endete eine der Nutzungen von PETRA. Der Ring wird

nicht mehr als Vorbeschleuniger für HERA benötigt, weil HERA stillgelegt wurde. Danach konnte der Umbau von PETRA II zu PETRA III beginnen, einer höchst brillanten Lichtquelle. Dazu werden etwa 300 Meter von den 2,3 Kilometer des Ringes mit Undulatoren bestückt. Ab 2009 bieten etwa 15 neue Messplätze Wissenschaftlern exzellente Experimentiermöglichkeiten. Im Bereich der Röntgenstrahlung gehört PETRA dann zu den besten Quellen der Welt.

Der Name ergab sich als Abkürzung für „Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage“.

Am ARGUS-Experiment an PETRA wurde 1987 beobachtet, dass sich neutrale B-Mesonen in ihre Antiteilchen umwandeln können und umgekehrt. Dabei überraschte vor allem die Häufigkeit von rund 20 Prozent, mit der diese Umwandlung erfolgt. Mit dieser großen Zahl hatte niemand gerechnet. Das Ergebnis hatte weit reichende Konsequenzen für die Teilchenphysik. Zum einen legte es nahe, dass die Masse des damals noch nicht nachgewiesenen Top-Quarks weit höher ist, als bis dahin vermutet wurde. Dies bestätigte sich 1995 beim direkten Nachweis des schwersten aller sechs Quarks am Fermilab. Zum anderen liefert das ARGUS-Resultat die Grundlage für eine neue Generation von Experimenten an so genannten B-Fabriken, die weltweit eigens zur Erzeugung und Untersuchung von B-Mesonen gebaut wurden. Diese nehmen Ende der 1990er Jahren ihre Arbeit auf und untersuchen unter anderem die so genannte CP-Verletzung, die ein Grund für die ungleiche Verteilung von Materie und Antimaterie im Universum sein könnte.

▷ DESY ▷ Synchrotron

Name

Argus-
Experiment

Siehe auch

Photoeffekt **

6.199

Beim Photoeffekt treten Elektronen aus einem Metall heraus, das mit Licht beschienen wird. Die Erklärung dieses Effekts hat wesentlich zur Entwicklung der Quantentheorie beigetragen.

Bei Lichtschranken im Fahrstuhl passiert es tagtäglich: Elektronen treten aus einem Metall heraus, wenn dieses mit Licht beschienen wird. Als Physiker um 1900 diesen Effekt erklären wollten, bissen sie sich die Zähne daran aus. Denn mit der klassischen Physik war da nicht viel zu machen; zur Erklärung musste erst noch die Quantentheorie entwickelt werden.

Die nicht-klassischen Eigenschaften des Photoeffekts

Die experimentellen Untersuchungen des Photoeffekts hatten die folgenden beiden Eigenschaften ans Licht gebracht, die sich klassisch nicht erklären ließen:

- ▷ Damit sich Elektronen überhaupt vom Metall lösen, muss die Frequenz des Lichts einen bestimmten Schwellenwert überschreiten; darunter passiert nichts, egal wie viel Licht man auf die Platte strahlt und wie lange.
- ▷ Die Geschwindigkeit (Energie) der Elektronen hängt nicht von der Intensität des Lichts ab, sondern wächst (linear) mit der Frequenz (Farbe).

Beide Eigenschaften stehen im Widerspruch zum klassischen Verständnis von Licht als elektromagnetische Welle. Denn danach sollte es von der Intensität des Lichts abhängen, ob Teilchen austreten und welche Energien sie dabei besitzen.

Einsteins
Erklärung

Albert Einstein nahm sich im Jahr 1905 einer Erklärung des Photoeffekts an. Die nicht-klassischen Eigenschaften konnte er dabei elegant erklären, indem er sich Licht als aus kleinen Energiepaketen zusammengesetzt vorstellte. Diese Energiepakete wurden 1926 „Photonen“ genannt.

Die Erklärung des Photoeffekts mit Photonen

Einstein griff eine Idee von Max Planck auf, nach der die Energie eines Photons mit der Frequenz des Lichts zunimmt: $E = hf$

Geht man nun davon aus, dass ein Elektron nicht die Energie mehrerer Photonen sammeln kann, so muss die Energie eines einzelnen Photons ausreichen, um das Elektron aus dem Metall zu lösen. Daher gibt es eine Schwellenfrequenz, ab der der Photoeffekt überhaupt erst zu beobachten ist.

Liegt die Energie des Photons über der Energie, die zum Herauslösen des Elektrons aus dem Metall nötig ist, so wird das Elektron mit der restlichen Energie beschleunigt. Die Endenergie des Elektrons wächst daher linear mit der Frequenz des Lichts und hängt nicht von seiner Intensität ab. Wie viel Energie für eine Beschleunigung der Elektronen übrig bleibt, hängt auch von der Frequenz der Photonen (und des Lichts) und nicht von ihrer Anzahl (also der Intensität des Lichts) ab.

Besteht Licht
aus Teilchen?

Der Photoeffekt liefert wichtige Indizien zur Teilchenartigkeit von Licht.

Dies bedeutet aber nicht, dass Licht aus Teilchen besteht. Welleneigenschaften des Lichts treten auch beim Photoeffekt an freien Atomen zutage. So werden Elektronen dabei nicht in Richtung der Lichtausbreitung ausgesendet, sondern senkrecht dazu in Richtung der elektrischen Feldstärke der entsprechenden Welle: Licht ist also weder Teilchen noch Welle, sondern etwas Drittes.

Der Photoeffekt findet vielfache Verwendung. Mit seiner Hilfe

- ▷ produzieren Lichtschranken je nach Lichteinfall unterschiedliche elektrische Signale,
- ▷ werden Elektronen für Teilchenbeschleuniger erzeugt und
- ▷ werden infrarote (Wärme)-Photonen in Nachtsichtgeräten sichtbar gemacht.

Anwendungen
des Photoeffekts

Als der Photoeffekt zum ersten Mal bemerkt wurde, wusste die Welt noch nichts von Elektronen. Damals – im Jahr 1887 – untersuchte Heinrich Hertz die Funkenbildung zwischen elektrisch geladenen Platten. Er bemerkte, dass die Stärke und Anzahl der Funken zunahm, als er die Metallflächen mit ultraviolettem Licht bestrahlte. Was da passierte, verstand er noch nicht. Erst 1899 zeigte Philipp Lenard, dass beim Lichteinfall negativ geladene Teilchen die Platten verlassen: Es handelte sich um die zwei Jahre zuvor entdeckten Elektronen. Die quantitativen Untersuchungen wurden erst im Jahr 1902 vollständig abgeschlossen und allesamt 1905 mit Einsteins Lichtquantenhypothese erklärt. Damit legte Einstein einen wichtigen Grundstein zur Quantentheorie und erhielt dafür 1921 den Nobelpreis für Physik.

Geschichte eines
Effekts

- ▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Photon ▷ Quantentheorie

Siehe auch

Photon *

6.200

Fundamentales Wechselwirkungsteilchen der elektromagnetischen Kraft und Bestandteil des Lichts.

Wieso sehen unsere Augen einen Sonnenaufgang? Wieso richtet sich eine Kompassnadel gen Norden aus? Und wieso stoßen sich zwei gleich geladene Elektronen ab? Also woher wissen Augen, Kompassnadel und Elektronen, was Sache ist? Weil sie Informationen über das Gegenüber (Sonne, magnetischer Nordpol und anderes Elektron) in Form von Photonen erhalten. Photonen übertragen die elektromagnetische Kraft. Sie können dabei sehr anziehend wirken oder auch Dinge auseinander treiben: Gleichnamige elektrische Ladungen stoßen sich ab, elektrische Ladungen mit unterschiedlichem Vorzeichen ziehen sich an. Über

den Austausch von Wechselwirkungsteilchen mit dem Namen Photon wird das Zustandekommen der elektromagnetischen Kraft erklärt, d.h. elektrisch geladene Teilchen üben aufeinander Kräfte aus, indem sie Photonen austauschen. Photonen sind aber auch noch anderweitig beschäftigt: Aus ihnen besteht das Licht.

Entdeckung	1900 sagte Max Planck vorher, dass Licht von einem leuchtenden Körper nur in bestimmten Energieportionen aufgenommen oder abgegeben werden kann. Albert Einstein ging 1905 einen Schritt weiter: Bei seiner Erklärung des photoelektrischen Effekts forderte er, dass Licht aus Teilchen bestehe. Ein weiterer experimenteller Meilenstein für die Entdeckung der Teilchennatur der Photonen wurde 1922 von Arthur Holly Compton (1892–1962) gelegt, als er Röntgenlicht (Photonen) mit Elektronen zusammenstoßen ließ und dabei den so genannten Compton-Effekt beobachtete.
Name	Im Jahr 1926 schlug der amerikanische Chemiker Gilbert Newton Lewis (1875–1946) den Namen „Photon“ für das Teilchen des Lichts vor.

Details zum Photon

Elektrische Ladung keine

Farbladung keine

Schwache Ladung keine

Masse keine

Spin 1 (damit zählen Photonen zu den Bosonen)

Siehe auch [▷ Elektromagnetische Welle](#) [▷ Elektromagnetismus](#) [▷ Maxwell-Gleichungen](#) [▷ Photoeffekt](#) [▷ Wechselwirkungsteilchen](#)

6.201 **Photovervielfacher** **

Teilchendetektor für Photonen.

Funktionsweise Ihr Name trägt: Denn Photovervielfacher (oder: Photo-Multiplier) vervielfältigen weder Photos noch Photonen, sondern Elektronen. Es handelt sich also um Elektronen-Vervielfacher, die so empfindlich sind,

dass mit ihnen einzelne Teilchen des Lichts (Photonen) nachgewiesen werden können. Fällt ein Photon auf die so genannte Photokathode eines Photoervielfachers, so kann ein einzelnes Elektron herausgelöst werden. Dieses Elektron wird zu einem positiv geladenen Pol beschleunigt, trifft dort wuchtvoll auf und befreit gleich mehrere weitere Elektronen aus dem Metall. Diese wandern gemeinsam zu einem zweiten Pol, wo das Spiel von vorne beginnt. Damit sich den Elektronen auf ihrem Weg durch die Röhre keine Luftmoleküle in den Weg stellen, die sind Photoervielfacher sind evakuiert. Nach zahlreichen solcher Verstärkungsprozessen entsteht am Ende ein elektrisches Signal, das stark genug ist, um einfach ausgelesen zu werden.

▷ Teilchendetektor

Siehe auch

PIA ***

6.202

PIA ist kleiner Speicherring bei DESY in Hamburg, in dem Positronen angesammelt werden, bevor sie in DESY II, PETRA und HERA weiter beschleunigt werden.

▷ DESY

Siehe auch

Pion ***

6.203

Zusammengesetztes Teilchen aus einem Quark und einem Antiquark. Pionen haben eine geringe Lebensdauer. Ihre Masse ist ungefähr 200-mal so groß wie die des Elektrons. Das Pion kommt in drei Ladungen daher: Als Pi-Minus, Pi-Null und Pi-Plus.

Die geladenen Pionen wurden 1947 von Cecil Powell in der kosmischen Höhenstrahlung entdeckt. Dazu wurden Kernemulsionsplatten mit Ballons in die Höhe geschickt. Zwei Jahre später gab sich das neutrale Pion in einem Experiment an einem Teilchenbeschleuniger zu erkennen.

Entdeckung

Das Pion wurde 1932 vom japanischen Physiker Hideki Yukawa (1907-1981) vorhergesagt. Er versuchte damit, den Zusammenhalt von Protonen und Neutronen zu Atomkernen zu erklären. Yukawas Theorie der Kernkraft wird heute als Näherung der Quantenchromodynamik aufgefasst, der Theorie der starken Wechselwirkung.

Vorhersage

Details zum negativen Pion

Name Negatives Pion

Entdeckung 1947 von C. Powell und Team

Elektrische Ladung ein negative Elementarladung

Masse $140 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer $2,6 \times 10^{-8}$ Sekunden

Quarkinhalt Up- und Anti-Down-Quark

Teilchenklassen Pionen gehören zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zum neutralen Pion

Name Neutrales Pion

Entdeckung 1949 von R. Bjorkland und Team

Elektrische Ladung 0

Masse $140 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer $0,5 \times 10^{-12}$ Sekunde

Quarkinhalt Up- und Anti-Up-Quark und Down- und Anti-Down-Quark

Teilchenklassen Pionen gehören zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zum positiven Pion

Name Positives Pion

Entdeckung 1947 von C. Powell und Team

Elektrische Ladung eine Elementarladung

Masse $140 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer $2,6 \times 10^{-8}$ Sekunden

Quarkinhalt Up- und Anti-Down-Quark

Teilchenklassen Pionen gehören zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

▷ Antimaterie ▷ Mesonen ▷ Quarks

Siehe auch

Planck, Max (1858–1947) **

6.204

Deutscher Physiker. Urvater der Quantenidee.

Max (Ernst Ludwig) Planck ging 1900 davon aus, dass das elektromagnetische Feld (also auch Licht) Energie nur in bestimmten Paketen aufnehmen und abgeben könne. Diese Annahme benötigte er zur Beschreibung schwarzer Strahler. Er revolutionierte damit die Physik. Dabei hatte ihm ein Physik-Professor 1876 noch davon abgeraten, Physik zu studieren. Denn in einer so abgeschlossenen Wissenschaft wie der Physik hätte ein junger, intelligenter Mensch keine Chance. Besonders glücklich war Planck mit der Quantenidee nicht: „Kurz zusammengefaßt kann ich die ganze Tat als einen Akt der Verzweiflung bezeichnen. Denn von Natur aus bin ich friedlich und bedenklichen Abenteuern abgeneigt. Aber eine theoretische Deutung des Strahlungsgesetzes mußte um jeden Preis gefunden werden, und wäre er noch so hoch.“ Er wettete sogar gegen Albert Einstein, weil dieser die Vorstellung von Energiequanten für die (heute immer noch gültige) Erklärung des Photoeffekts verwendet hatte. Als Einstein 1913 in die Preußische Akademie der Wissenschaften aufgenommen werden sollte, schrieb Planck: „Daß Einstein in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie zum Beispiel in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzu sehr anrechnen dürfen. Denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, läßt sich auch in der exaktesten Wissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.“

Der
Quantengedanke

Max Planck wurde am 23. April 1858 in Kiel geboren. Er starb am 4.

Eckdaten

Oktober 1947 in Göttingen.

Nobelpreis für Physik 1918 erhielt Max Planck den Physik-Nobelpreis „in Anerkennung seiner Verdienste um die Entwicklung der Physik durch seine Entdeckung der Energiequanten.“

Siehe auch ▷ Hohlraumstrahlung ▷ Planckkonstante ▷ Quantentheorie

6.205 Planckkonstante **

Die Planckkonstante (oder auch: Plancksches Wirkungsquantum) ist eine fundamentale Naturkonstante, die in nahezu sämtlichen Formeln der Quantentheorie zu finden ist.

Wie groß ist das Wirkungsquantum?

Das Plancksche Wirkungsquantum h hat einen Wert von $6,62 \times 10^{-34}$ Joulesekunden.

Über das Wirkungsquantum ist beispielsweise die Energie eines Photons mit seiner Frequenz verknüpft.

Wie groß ist die Energie eines Photons?

Die Energie eines Photons ergibt sich direkt aus dem Planckschen Wirkungsquantum h und der Frequenz f des Photons: $E = hf$.

Siehe auch ▷ Max Planck (1858–1947) ▷ Naturkonstanten ▷ Quantentheorie

6.206 Positron *

Fundamentales Teilchen. Als Antiteilchen des Elektrons hat es dieselbe Masse und dieselbe Lebenserwartung, es trägt aber eine entgegengesetzte Ladung und ist somit positiv geladen.

Lebensdauer Der Zerfall eines Positrons ohne Kontakt mit Materie ist bisher nicht beobachtet worden. Das Teilchen scheint stabil zu sein. Wenn sich jedoch Elektronen und Positronen treffen, kreisen die beiden Teilchen zunächst für 10^{-10} bis 10^{-7} Sekunden umeinander (eine Verbindung, die Positronium heißt), bis sie sich vernichten.

Entdeckung Das Positron ist das erste Antiteilchen, das entdeckt wurde. Vorher-

gesagt wurde die Existenz des Positrons 1928 durch Paul Dirac, als er die spezielle Relativitätstheorie mit der Quantentheorie verband. Vier Jahr später gab es das erste Bild vom Positron – geschossen von Charles D. Anderson mit Hilfe einer Nebelkammer und eines starken Magnetfeldes. Für diese Fund bekam Anderson den Physik-Nobelpreis.

Details zum Positron

Name Positron

Bemerkung Das Positron ist das erste Antiteilchen, das entdeckt wurde.

Entdeckung Das Positron wurde 1932 von Carl Anderson bei der Untersuchung kosmischer Strahlung in einer Nebelkammer entdeckt.

Elektrische Ladung eine Elementarladung

Masse $0,511 \text{ MeV}/c^2$ oder: $9,1 \times 10^{-28}$ Gramm

Lebensdauer mehr als $4,3 \times 10^{23}$ Jahre, es zerstrahlt jedoch beim Kontakt mit Materie.

Starke Kraft Nein

Elektromagnetische Kraft Ja

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Positron gehört damit zu den Fermionen.

▷ Antimaterie ▷ Carl Anderson (1905–1991) ▷ Elektron

Siehe auch

Proportionalkammer ***

6.207

Teilchendetektor, mit dem sich die Bahn von elektrisch geladenen Teilchen verfolgen lässt, wenn diese ein Gas durchfliegen.

Der französische Physiker Georges Charpak (*1924) erhielt 1992 den

Entwicklung und
Nobelpreis

Nobelpreis „für seine Erfindung und Entwicklungen von Teilchendetektoren, insbesondere der Vieldraht-Proportionalzählkammer.“

Heutige
Bedeutung

Heute befinden sich in der Regel nur noch die Nachfolger der Proportionalzählkammern, die Driftkammern, im Einsatz.

Siehe auch

▷ Drahtkammer ▷ Teilchendetektor

6.208 **Proton** *

Aus Quarks zusammengesetztes Teilchen. Protonen sind Bestandteile der Atomkerne und bestehen nach dem einfachen Quarkmodell aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark.

Lebensdauer

Bisher wurde noch kein Zerfall eines Protons beobachtet. Es hat eine Lebensdauer, die das Alter des Universums übertrifft.

Benennung

1920 nennt Ernest Rutherford den Atomkern des Wasserstoffs „Proton“.

Details zum Proton

Name Proton

Benennung 1920 von Ernest Rutherford

Zusammensetzung ein Down-Quark und zwei Up-Quarks

Lebensdauer unendlich?

Elektrische Ladung +1e

Teilchenklassen Das Proton gehört zu den Hadronen und Baryonen, zusammen mit den Neutronen bildet es die Nukleonen.

Masse $938,3 \text{ MeV}/c^2$, rund 2.000-mal so groß ist wie Masse des Elektrons

Siehe auch

▷ Antiproton ▷ Atomkern ▷ Baryonen ▷ Ernest Rutherford (1871–1937) ▷ Neutron ▷ Nukleon

P-Spiegelung ***

6.209

Gedankenexperiment, bei dem man das Universum spiegelt. Dabei ist von Interesse, ob die Naturgesetze dann immer noch gültig sind, oder ob eine P-Verletzung vorliegt.

Der Name geht auf „Paritätstransformation“ (P-Transformation) zurück. Das ist die offizielle Bezeichnung für Spiegelungen an einem Punkt und entspricht einer Spiegelung an einer Ebene (wie bei einem Spiegel) und einer gleichzeitigen Drehung.

▷ CPT-Theorem ▷ C-Spiegelung ▷ P-Verletzung ▷ Symmetrie ▷ T-Spiegelung Siehe auch

P-Verletzung ***

6.210

Phänomen, nach dem in einem gespiegelten Universum andere Naturgesetze gelten.

In unserer Welt ist es nicht egal, wo links und rechts sind. Ein gespiegeltes Universum lässt sich gut von seinem Original unterscheiden. Menschen tragen ihr Herz meist links, nicht rechts. Und gefahren wird auf dem europäischen Festland seit Napoleon rechts. Natur und Straßenverkehrsregler haben sich hier irgendwann einmal auf eine der beiden Möglichkeiten festgelegt: Im Makrokosmos ist die Spiegelsymmetrie oft verletzt.

Verletzte
Symmetrie

Auch in der Welt des Allerkleinsten muss hier unterschieden werden. Schuld daran ist die schwache Kraft. Bei Neutrinos, die nur über die schwache Kraft wechselwirken, wird die Spiegelsymmetrie des Universums größtmöglich verletzt. Das hat damit zu tun, dass sich Neutrinos so verhalten, als drehten sie sich um die Richtung, in die sie fliegen. Dazu stünden ihnen prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Im Uhrzeigersinn oder dagegen. Bisher wurden jedoch nur Neutrinos beobachtet, die sich gegen den Uhrzeigersinn drehen. Anti-Neutrinos drehen sich immer mit dem Uhrzeigersinn. Wenn man das Universum nun spiegelt, so schaffen wir Teilchen, die es auf dieser Seite des Spiegels nicht gibt: Neutrinos, die sich mit dem Uhrzeigersinn um ihre Bewegungsachse drehen. Neutrinos sind wie Vampire: Sie haben keine Spiegelbilder.

Neutrinos sind
Vampire

Lange Zeit gingen Wissenschaftler von einem spiegelsymmetrischen Universum aus. Erst 1956 veröffentlichten die Physiker Tsung Dao Lee (geb. 1926) und Chen Ning Yang (geb. 1922) die Idee zu einem Experiment, mit dem eine mögliche Verletzung dieser Symmetrie bei der

Entwicklung

schwachen Wechselwirkung nachgewiesen werden konnte. Die Physikerin Chien-Shiung Wu (geb. 1912) führt einen entsprechenden Versuch 1957 mit tiefgekühlten Atomen durch. Das Ergebnis: Das Universum ist nicht spiegelsymmetrisch!

Siehe auch ▷ Neutrinos ▷ P-Spiegelung ▷ Schwache Kraft ▷ Symmetrie

6.211 **Quadrupolmagnet** **

= *Vierpolmagnet. Magnet in Teilchenbeschleunigern zur Bündelung von Teilchenpaketen.*

Aufbau Quadrupolmagnete bestehen aus zwei Nord- und zwei Südpolen.

Siehe auch ▷ Beschleunigermagnete ▷ Dipolmagnet ▷ Fokussierung ▷ Sextupolmagnet

6.212 **Quant** ***

Quanten sind die Objekte, welche durch die Quantentheorie beschrieben werden. Dazu zählen Elektronen und Photonen.

Welle und
Teilchen

Quanten können in Quantenmessungen als Teilchen dingfest gemacht werden. Wenn man jedoch nicht genau hinschaut, so beschreibt die Quantentheorie die Ausbreitung von Quanten mit Hilfe von Wellen (Welle-Teilchen-Dualismus).

Siehe auch ▷ Quantentheorie ▷ Welle-Teilchen-Dualismus

6.213 **Quantenchromodynamik (QCD)** **

Theorie des Standard-Modells der Teilchenphysik, welche die starke Wechselwirkung beschreibt. Danach ziehen sich alle stark wechselwirkenden Teilchen über den Austausch von Gluonen an.

Farbladungen

Bei der Quantenchromodynamik geht es bunt zur Sache. Denn so wie sich Elektronen abstoßen, weil sie eine elektrische Ladung besitzen, treten Quarks und Gluonen aufgrund ihrer Farbladung in Wechselwirkung. Quarks gibt es in den Farben Rot, Grün und Blau. Antiquarks kommen in Antirot, Antigrün und Antiblau daher. Gluonen haben sogar zwei Farbkomponenten, zum Beispiel Rot und Antiblau. Wenn beispielsweise ein rotes Quark ein rot-antiblaues Gluon aussendet, ändert es seine Farbe zu Blau. Wird dieses Gluon dann von einem blauen Quark geschluckt, so wird dieses rot. Bei diesem Austausch können sich die Quarks anziehen oder abstoßen.

Verkompliziert wird die Sache nun noch dadurch, dass ja nicht nur die Quarks, sondern auch die Gluonen selbst farbig sind. Daher kann beispielsweise ein rot-antiblaues Gluon grün-antiblaug werden, indem es ein rot-antigrünes Gluon austauscht, das dann von einem anderen Gluon wieder geschluckt werden muss. Eine solche Selbstwechselwirkung der Gluonen gibt es nur bei der starken Kraft, sie ist ein Grund dafür, dass die Kraft so enorm stark ist und man Quarks niemals alleine vorfindet (Quark-Gefangenschaft).

Verquickungen

▷ Asymptotische Freiheit ▷ Gluon ▷ Quantenfeldtheorie ▷ Quarkgefangenschaft
▷ Quarks ▷ Standardmodell ▷ Starke Kraft

Siehe auch

Quantencomputer ***

6.214

Computer, der Gesetze der Quantentheorie ausnutzt.

Quantencomputer könnten in Windeseile berechnen, wofür herkömmliche Rechner länger bräuchten, als das Universum alt ist. Doch bis Ihr Lieblings-Discounter den ersten Quantencomputer im Programm hat, gilt es noch, ein paar technische Hürden zu meistern.

Nutzen

Ob nun Windows, MacOS oder Linux: In allen herkömmlichen Computern sind Informationen in derselben Weise gespeichert – als Bits, die zwei unterschiedliche Zustände annehmen können: die Null oder die Eins. Auch Quanten können in unterschiedlichen Zuständen stecken. Im einfachsten aller Fälle gibt es auch hier nur zwei unterschiedliche Einstellungen: Nennen wir sie „1“ oder „0“. Einen solchen Zustand bezeichnen Physiker als „Quantenbit“ oder „Qubit“ [kju:bit]. Im Quantenbit steckt aber weit mehr drin als im herkömmlichen Fall. Ihm stehen nicht nur die beiden Möglichkeiten „1“ und „0“ zur Auswahl, es kann sich zudem in einer von unendlich vielen Mischungen aus den beiden Zuständen befinden: ein wenig „1“ und ein wenig „0“. Die genaue Mischung bestimmt dann, mit welcher Wahrscheinlichkeit bei einer Messung das entsprechende Ergebnis herauskommen würde.

Quantenbit

In dieser Überlagerung von Quantenzuständen liegt die Mächtigkeit der Quantencomputer. Denn ein Quantencomputer muss jetzt nicht nacheinander mit „1“ oder „0“ gefüttert werden, um den Wert für die Eingaben „1“ oder „0“ zu berechnen. Man kann ihm beide Werte gleichzeitig vorsetzen („1“ und „0“). Er würde beide Werte dann gleichzeitig bearbeiten. Die Rechenzeit würde sich halbieren. Der Vorteil der Quantencomputer wird noch größer, wenn mehrere Quantenbits am Werk sind. Zwei herkömmliche Bits können beispielsweise in vier

Quantenparallelität

Zuständen stecken: „00“, „01“, „10“ und „11“. Mit zwei Quantenbits lässt sich daher in einem Rutsch berechnen, wofür im herkömmlichen Fall die vierfache Zahl an Rechenschritten notwendig wäre. Mit drei Quantenbits könnte man schon acht Werte simultan darstellen und mit 250 Quantenbits bereits mehr Zahlen, als es Atome im Universum gibt.

Haken 1 Die Sache hat Haken. Zwar wird die Quanten-Berechnung auf allen möglichen Quantenbits gleichzeitig ausgeführt, am Ende liegt das Ergebnis aber auch nur in einer Mischung dieser Ergebnisse vor. Es muss dann eine Messung des Quantenzustandes vorgenommen werden, bei dem eines der Ergebnisse ausgewählt wird. Der Rest verschwindet. Diesen Sachverhalt muss man bei der Entwicklung von Algorithmen für Quantencomputer berücksichtigen.

Haken 2 Und es gibt noch einen zweiten Haken: Quantencomputer sind extrem empfindlich. Die Mischung der Zustände bleibt nur bestehen, so lange der Quantencomputer nicht mit seiner Umgebung wechselwirkt. Es gibt Kritiker, die befürchten, dass es niemals gelingen wird, ausreichend große Quantencomputer zu bauen, mit denen wirklich praktische Probleme gelöst werden können. Aber es gab auch Menschen, die glaubten, dass Maschinen, die schwerer sind als Luft, sich niemals in die Lüfte erheben werden.

Beispiele Beispiele für Quantencomputeralgorithmen gibt es für das Durchsuchen von Datenbanken und die Zerlegung von Primzahlen:

Beispiel 1:
Durchsuchen von
Telefonbüchern

▷ Die Aufgabe sei, ein Telefonbuch mit 2 Millionen Einträgen zu durchsuchen. Ein herkömmlicher Computer braucht dazu im Mittel 1 Million Rechenschritte. Ein Quantencomputer benötigt mit Hilfe des so genannten Grover-Algorithmus nur 1.400 Rechenschritte.

Beispiel 2:
Primzahlfaktor-
zerlegung

▷ Zahlen miteinander zu multiplizieren, lernt man in der Grundschule. Auch Computer sind hier flink. Schwieriger ist der Weg zurück, wenn man herausfinden will, welche nicht weiter teilbaren Zahlen (Primzahlen) multipliziert werden müssen, damit man eine gegebene Zahl erhält (Frage: Welche Primzahlen ergeben 15? Antwort: 3 mal 5). Was nach einfachem Multiplizieren klingt, zählt zu den schwierigsten Rechenproblemen, auf dem wichtige Sicherheitsprinzipien moderner Verschlüsselungssysteme beruhen: Die Zerlegung einer Zahl mit 400 Stellen würde mit den besten im Jahr 2002 bekannten Hochleistungsrechner etwa 10^{10} Jahre benötigen. Ein Quantencomputer mit einem Programm von Peter Shor (1994) würde die Aufgabe in 3 Jahren erledigen. Erste Anfänge sind gemacht. So wurde 2001 bei IBM die Zahl 15 in ihre Primzahlfaktoren zerlegt.

▷ Quantentheorie

Siehe auch

Quantenelektrodynamik (QED) **

6.215

Theorie, welche die elektromagnetische Wechselwirkung beschreibt. Danach wechselwirken alle elektrisch geladenen Teilchen über den Austausch von Photonen.

Die QED ist die genaueste Theorie, die sich Menschen jemals ausgedacht haben, d.h. bei keiner anderen Theorie stimmen berechnete und experimentell ermittelte Größe auf so viele Stellen überein.

Genauigkeit

Genauigkeit in Zahlen

Wie genau die Quanten-Elektrodynamik ist, zeigt das magnetische Moments des Elektrons. Dieser Wert beschreibt die Magnetstärke eines ruhenden Elektrons. Der Wert, den die Theorie ergibt, lautet: 1,001.159.652.17 +- 0,000.000.000.03. Im Labor misst man: 1,001.159.652.19 +- 0,000.000.000.01. Die Werte stimmen auf 10 Nachkommastellen überein.

▷ Elektromagnetismus ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quantenfeldtheorie
▷ Quantenflavordynamik (QFD) ▷ Renormierung ▷ Richard P. Feynman (1918–1988)

Siehe auch

Quantenfeldtheorie ***

6.216

Theorietyp, bei dem die Prinzipien der Quantentheorie auf räumlich ausgedehnte Größen (Felder) wie etwa das elektromagnetische Feld angewendet werden. Die Theorien des Standard-Modells der Teilchenphysik (QFD, QCD) sind von diesem Typ.

▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quantenelektrodynamik (QED) ▷ Quantenflavordynamik (QFD) ▷ Quantentheorie ▷ Renormierung

Siehe auch

Quantenfernbeziehung ***

6.217

Stecken zwei Quanten in einer Quantenfernbeziehung, so sind ihre Eigenschaften nicht mehr unabhängig voneinander bestimmt: Nimmt

man etwa eine Messung bei einem der beiden Quanten vor, so ist sofort auch das Ergebnis für den Partner festgelegt – selbst wenn es sich am anderen Ende des Universums befindet.

Spuk? Einstein nannte das Phänomen „spukhafte Fernwirkung“ und sah in ihm den Beweis, dass mit der Quantentheorie etwas nicht stimmen konnte. Doch heute haben sich Wissenschaftler längst damit abgefunden, dass zwei Quanten auch über Lichtjahre hinweg in einer so intensiven Beziehung zueinander stehen können, dass man ihnen nur gemeinsam Eigenschaften zuschreiben kann und keinem einzeln. Stecken Quanten in einer solchen Fernbeziehung, so werden sie „verschränkt“ genannt.

Anwendung Genutzt werden solche Quantenfernbeziehungen mittlerweile eifrig. In Experimenten konnten sie schon weit über 150 Kilometer nachgewiesen werden. Sie spielen bei der Entwicklung von Quantencomputern ebenso eine Rolle wie bei der technischen Umsetzung von Methoden zur Quantenverschlüsselung. Und auch wenn Forscher Quanten durch die Gegend beamten, sind Quanten in Fernbeziehungen immer mit von der Partie (Quantenteleportation)

Mathematik der Quantenbeziehungen

Photonen besitzen eine Eigenschaft, die Polarisation heißt. Diese kann man mit Hilfe eines Polarisators messen. Für das Messergebnis gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder geht das Photon durch den Polarisator hindurch oder es wird reflektiert. Diese beiden Ergebnisse seien „1“ beziehungsweise „0“. Wenn die Messung immer das Ergebnis „0“ liefert, so sei das Quant zuvor im Zustand

$$|0\rangle$$

Falls das Ergebnis immer „1“ lautet, soll der Zustand wie folgt bezeichnet werden:

$$|1\rangle$$

Nach der Quantentheorie kann sich das Photon auch in einer Überlagerung aus diesen beiden Zuständen befinden. Im allgemeinen Fall wird dann mit einer Wahrscheinlichkeit von $|C_0|^2$ der Wert „0“ gemessen und mit einer Wahrscheinlichkeit von $|C_1|^2$ lautet das Ergebnis „1“. Für den Zustand des Quants schreibt man dann:

$$C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$$

Sind nun zwei Quanten ins Spiel, verkompliziert sich die Sache nur gering. Der Quantentheorie zufolge muss man die Zustände der beiden Quanten nur auf eine ganz bestimmte Weise hinterinander schreiben. Dies ist eine Form der Multiplikation.

Zwei Photonen

$$|0\rangle|0\rangle$$

beschreibt einen Zustand, bei dem eine Messung bei beiden Photonen immer den Wert „0“ ergeben würde.

$$C_{00}|0\rangle|0\rangle + C_{10}|1\rangle|0\rangle + C_{01}|0\rangle|1\rangle + C_{11}|1\rangle|1\rangle$$

lautet der allgemeinste aller Quantenzustände bei zwei Photonen. Er bedeutet, dass bei einer Messung mit einer Wahrscheinlichkeit von $|c_{00}|^2$ bei beiden Quanten der Wert „0“ gemessen wird, mit einer Wahrscheinlichkeit von $|c_{01}|^2$ bei ersten Quanten „0“ und beim zweiten „1“, mit einer Wahrscheinlichkeit von $|c_{10}|^2$ beim ersten Quant „1“ und beim zweiten „0“ und mit einer Wahrscheinlichkeit von $|c_{11}|^2$ bei beiden Quanten „1“.

An dieser Interpretation wird sichtbar, dass es bei der Multiplikation in der Quantenwelt auf die Reihenfolge der einzelnen Zustände ankommt. Es gilt:

$$|0\rangle|1\rangle \neq |1\rangle|0\rangle$$

Welche Werte im Allgemeinen c_{00} , c_{01} , c_{10} und c_{11} annehmen, ist vom Quantensystem abhängig. c_{00} und c_{11} könnten beispielsweise auch Null sein. Dann erhalten wir:

$$C_{10}|1\rangle|0\rangle + C_{01}|0\rangle|1\rangle$$

Was bedeutet das? Wenn wir die Polarisation des ersten Photons messen, werden wir mit einer Wahrscheinlichkeit von c_{01} „0“ erhalten und mit einer Wahrscheinlichkeit von c_{10} „1“. Bei dieser ersten Messung regiert der Zufall. Doch sobald wir das Ergebnis für das erste Quant kennen, wissen wir auch über das zweite Quant Bescheid. Denn der Quantenzustand legt fest, dass beide Quanten über entgegengesetzte Einstellungen verfügen.

Auch wenn die beiden Quanten Lichtjahre voneinander entfernt sind: Wenn wir in einer Messung die Eigenschaften des einen Teilchens festlegen, so gilt das auch für das andere Teilchen

Siehe auch ▷ Quantentheorie ▷ Quantenzustand

6.218 Quantenflavordynamik (QFD) **

Theorie des Standard-Modells der Teilchenphysik, welche die elektroschwache Wechselwirkung beschreibt. Danach üben elektrisch und schwach geladene Teilchen Kräfte über den Austausch von Photonen, W s und Z s aus.

Siehe auch ▷ Abdus Salam (1926-1996) ▷ Elektromagnetismus ▷ Elektroschwache Theorie ▷ Photon ▷ Schwache Kraft ▷ Sheldon Glashow (*1932) ▷ Standardmodell ▷ Steven Weinberg (*1933) ▷ W ▷ Z

6.219 Quantengravitationstheorie ***

Name für eine Theorie, die Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie vereint und damit alle Kräfte auf einheitliche Weise beschreibt. Bisher gibt es nur Ansätze für solche Theorien – wie etwa die Superstringtheorie.

Siehe auch ▷ Superstringtheorie

6.220 Quantenmessung ***

Das Vermessen von Quanten nimmt in der Quantentheorie eine zentrale Stellung ein. Denn ohne Messung stehen viele Eigenschaften von Quanten nicht fest. Erst durch die Messung wird das Ergebnis bestimmt. Die Messung kann dabei den Zustand des Quants grundlegend verändern.

Beispiel Schauen wir uns zunächst ein Beispiel ohne Quanten an: Es geht um das Magnetfeld der Erde. Seine Ausrichtung soll vermessen werden und dazu haben Sie sich einen Kompass besorgt. Sie setzen Ihren Kompass in Gang und messen, dass sich der magnetische Nordpol ganz in der Nähe des geographischen befindet. Sie kämen wahrscheinlich nicht auf die Idee, dass der Nordpol da nicht auch schon gestern gelegen hätte.

Bei der Erde ist das auch völlig in Ordnung. In der Quantenwelt sieht das hingegen anders aus: So besitzen auch Elektronen ein Magnetfeld. Dies unterliegt aber der Quantentheorie – und das gleich zweifach: Zum einen kann eine Messung hier nur zwei Werte ergeben – entweder zeigt der Nordpol nach oben („+“) oder nach unten („-“). Ein dazwischen (zur Seite) gibt es nicht. Aber das ist noch nicht seltsam genug. In den meisten Fällen ist völlig unklar, wie das Experiment ausgehen wird. Die Quantentheorie erlaubt uns lediglich, die Wahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Messergebnisse zu berechnen. Erst im Moment der Messung scheint sich die Welt dann für eine der beiden Möglichkeiten zu entscheiden. Wenn Sie dann aber einmal gemessen haben, dass der Nordpol oben liegt und Sie das Elektron nicht weiter beeinflussen, wird auch die nächste Messung ein „oben“ ergeben. Vor der Messung ist damit nicht mehr nach der Messung. Der Zustand des Quants hat sich grundlegend geändert. Denn nach der Messung ist die Wahrscheinlichkeit für „unten“ plötzlich Null.

Quanten-Messung

Nehmen wir das einfachste aller Beispiele – ein Quant mit einer Eigenschaft, die nur die Werte „0“ (Magnetfeld unten) oder „1“ (Magnetfeld oben) bei einer Messung ergeben kann. Die allgemeine Form des Quantenzustands lautet dann:

$$|\Psi_1\rangle = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$$

Bei einer Messung werden wir mit einer Wahrscheinlichkeit von $|C_0|^2$ das Ergebnis „0“ erhalten. Mit einer Wahrscheinlichkeit von $|C_1|^2$ werden wir eine „1“ messen.

Nehmen wir jetzt an, der zweite Fall würde eintreten: Das Ergebnis lautet „1“. Das Quant befindet sich dann plötzlich in einem Zustand, in dem wir auch bei einer zweiten Messung eine „1“ erhalten würden. Der Quantenzustand hat sich geändert. Er lautet nun:

$$|\Psi_2\rangle = C_1|1\rangle$$

Durch die Messung verändert sich der Quantenzustand. Weil wir eine „1“ gemessen haben, wird die Möglichkeit für eine „0“ ausgelöscht. Die Messung hat den Zustand verändert. Man sagt hier auch manchmal, der Quantenzustand sei kollabiert.

Siehe auch ▷ Quantentheorie ▷ Quantenzustand ▷ Schrödingers Katze

6.221 **Quantensprung** **

Vorgang, bei dem sich die Quantenwelt des Mikrokosmos sprunghaft verändert.

Kleinste
Veränderungen

Von Quantensprüngen hört man immer wieder: Sie werden bei diplomatischen Verhandlungen gesichtet sowie in Wissenschaft und Technik. Doch Vorsicht! Zu Quantensprüngen zählen die kleinsten Veränderungen, die ein physikalisches System durchmachen kann. Wenn Ihnen also jemand einen Quantensprung verkaufen will, seien Sie auf der Hut! Bestenfalls wissen die Leute, die da Quanten springen sehen, nicht, was sie sagen. Sie könnten aber auch einem arglistigen Täuscher aufgesessen sein.

Beispiel

Betrachten wir ein Wasserstoff-Atom: Es besteht aus einem Atomkern (einem Proton), der von einem Elektron umkreist wird. Das Elektron kann sich auf unterschiedlichen Bahnen um das Proton bewegen. Jedoch lässt die Natur nicht beliebige Abstände zu: Zwischen zwei erlaubten Bahnen befindet sich eine verbotene Zone. Um seine Bahn zu ändern, muss das Elektron dann von einer erlaubten Bahn auf eine andere springen. Einen kleineren Sprung gibt's nicht.

Siehe auch ▷ Quantentheorie ▷ Quantenzustand

6.222 **Quantenteleportation** ***

Mit Hilfe der Quantenteleportation lassen sich Eigenschaften eines Quants auf ein anderes übertragen und somit eine identische Kopie erstellen.

Siehe auch ▷ Quantenfernbeziehung ▷ Quantentheorie

6.223 **Quantentheorie** ***

Die Quantentheorie zählt zu den zentralen Pfeilern der modernen Physik. Sie wurde Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelt und beschreibt das oftmals wundersame Verhalten von Quanten.

Anwendungen

Auch wenn die Konzepte und Methoden der Quantentheorie in vielen Dingen dem gesunden Menschenverstand zuwider laufen, ohne die

Ergebnisse und Anwendungen der Theorie wäre unsere heutige moderne Welt unvorstellbar: Ohne sie gäbe es keine Kernenergie, keinen Laser, weder Kernspintomographie, noch Mikrochips. Auch für einen webgestützten Lexikoneintrag zur Quantentheorie sähe es schlecht aus. Und mit der Entwicklung von Quantencomputern oder der Quantenverschlüsselung von Nachrichten scheint ein Ende revolutionärer Anwendungen nicht in Sicht.

Als Erster kam Max Planck im Jahr 1900 auf die Idee, dass die Energie von Licht nur in Portionen aufgenommen und abgegeben werden kann (vgl. Hohlraumstrahlung). 1905 ging Albert Einstein noch einen Schritt weiter, als er bei der Erklärung des Photoeffekts behauptete, dass Licht sogar aus Lichtpaketen, den Photonen, *besteht*. Im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts legten dann Forscher wie Niels Bohr, Paul Dirac, Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger die mathematischen Fundamente der Quantentheorie.

Entwicklung der
Quantentheorie

Der Quantentheorie zufolge geht es im Mikrokosmos recht sprunghaft zu: So kann ein Elektron, das sich um einen Atomkern bewegt, nicht beliebige Energien besitzen und muss daher springen, um von einem Energiezustand zu einen anderen zu gelangen. Auch kann sich die Energie eines elektromagnetischen Feldes nicht um beliebige Werte ändern: Energie kann nur in kleinen Portionen (Photonen) aufgenommen oder abgegeben werden.

Quantensprünge

In der Quantentheorie spielt die Messung von Eigenschaften ein zentrale Rolle: Viele Eigenschaften von Quanten werden erst durch eine Messung festgelegt. Davor liefert die Theorie nur Wahrscheinlichkeitsaussagen. Insbesondere gibt es Fälle, in denen es Wahrscheinlichkeiten für vollkommen unterschiedliche Messergebnisse gibt. Dann könnte ein Quant beispielsweise entweder in Hamburg oder auch in Rom geortet werden. Dies ist eng verknüpft mit dem quantentheoretischen Welle-Teilchen-Dualismus, nach dem Quanten zwar als Teilchen gemessen werden können, die Ausbreitung in der Quantentheorie jedoch mit Hilfe von Wellen beschrieben wird.

Quantenmessung

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Erwin Schrödinger (1887-1961) ▷ Louis Victor de Broglie (1892-1987) ▷ Max Planck (1858-1947) ▷ Niels Bohr (1885-1962) ▷ Quantenfeldtheorie ▷ Unschärfebeziehung ▷ Welle-Teilchen-Dualismus ▷ Werner Heisenberg (1901-1976)

Siehe auch

6.224 **Quantenzahl** ***

Eine Quantenzahl ist eine ganze oder halbe Zahl, mit der der Zustand eines Quants (z.B. ein Elektron oder Photon) beschrieben werden kann. Zwischen den unterschiedlichen Zuständen liegen verbotene Zonen, die nur über Quantensprünge gemeistert werden können.

Siehe auch ▷ Erhaltungssatz ▷ Quantentheorie

6.225 **Quantenverschlüsselung** ***

Die Quantenphysik liefert schon heute Schlüssel zu unknackbaren Verschlüsselungsverfahren. Damit kann absolut zuverlässig unterbunden werden, dass Unbefugte Ihre Kontodaten oder Liebesbriefe lesen.

Sichere
Verschlüsselung

Nehmen wir Julia und Romeo. Die Geschichte ist schnell erzählt: Beide sind Kinder reicher Familien, die sich nicht gerade lieben. Die Kinder aber schon. Also sollen die Liebesbriefe für andere unlesbar verschickt werden. Eine Möglichkeit ist der Cäsar-Code: Dazu muss man sich auf eine Zahl einigen – sagen wir drei. Wenn man nun einen Text verschlüsseln will, nimmt man von jedem Buchstaben den dritten Nachfolger. Aus einem U wird dann ein X, aus einem V ein Y, aus einem W ein Z und aus einem X ein A, weil man nach dem Z einfach wieder von vorne anfängt. Bei der verschlüsselten Nachricht muss dann einfach nur von jedem Buchstaben der dritte Vorgänger ermittelt werden und die ursprüngliche Nachricht liegt wieder vor. Diese Sache lässt sich spielend leicht knacken. Man muss einfach nur alle 27 Möglichkeiten ausprobieren und bekommt irgendwann einen lesbaren Text. Eine mögliche Verfeinerung sieht wie folgt aus: Man nimmt nicht nur eine Zahl, sondern jedes Zeichen der ursprünglichen Nachricht wird mit einer eigenen Zahl verschlüsselt. Dieses Verfahren kann nicht geknackt werden, vorausgesetzt der Code bleibt geheim und er wird nur einmal verwendet. Romeo und Julia brauchen also eine Menge Zufallszahlen und beide dieselben. Dazu müssen sie sich entweder einmal treffen oder sie brauchen einen Boten, dem sie absolut vertrauen wollen. Und wenn Julia und Romeo sich nicht treffen können oder keinen treuen Boten kennen? Dann weiß ihr Quanten-Professor Rat: Quantenverschlüsselung ist das Stichwort, mit dem absolut sichere Schlüssel ausgetauscht werden können. Die Quantentheorie liefert eine Möglichkeit, an zwei getrennten Orten Zufallszahlen zu erzeugen, bei denen man sicher gehen kann, dass sie kein anderer abgehört hat. Mit diesen Zufallszahlen

kann dann eine Nachricht verschlüsselt werden, die auf ganz normalen Weg verschickt werden kann. Entschlüsseln kann sie niemand.

Quantenverschlüsselung konkret

Hier das Rezept, mit dem Julia und Romeo einen sicheren Verschlüsselungsschlüssel erstellen können:

1. Julia schickt ein Photon an Romeo. Dazu wählt sie für jedes Photon zufällig eine von vier Polarisations-Einstellungen aus: 0 Grad, 45 Grad, 90 Grad und 135 Grad. Ein Photon nach dem anderen wandert Richtung Romeo.
2. Romeo wählt für jedes Photon an seinem Messgerät eine von zwei möglichen Einstellungen: senkrecht oder schräg. Er schreibt die Einstellung auf und ob das Photon durchgekommen ist oder nicht.
3. Nach beendeter Messung veröffentlicht Romeo, wann er sein Messgerät wie eingestellt hatte. Er schweigt aber darüber, welches Messergebnis jeweils herauskam. Julia sieht sich die Liste an und nennt alle Messungen, bei denen Romeos Messgerät gleich oder entgegengesetzt zu Julias Photon eingestellt waren.
4. Beide verfügen jetzt über denselben Schlüssel, wenn das Photon zwischenzeitlich nicht gestört wurde – beispielsweise durch eine Messung eines Lauschers. Dieser kennt die Messeinstellung von Romeo nicht. Daher muss er irgendeine zufällig nehmen und eine Messung vornehmen. Wenn diese nicht der von Romeo entspricht und es eine gültige Messung war, wird der Code von Julia und Romeo nicht übereinstimmen. Um herauszufinden, ob gelauscht wurde, müssen beiden einen Teil ihres Schlüssel miteinander vergleichen. Wenn Fehler aufgetreten sind, wurde wahrscheinlich gelauscht und es muss ein neuer Schlüssel erzeugt werden.

▷ Quantenfernbeziehung ▷ Quantentheorie

Siehe auch

Quantenzustand ***

6.226

Mathematisches Konstrukt, in dem alle Informationen über ein einzelnes Quant stecken. Damit lässt sich berechnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit bei einer Quantenmessung ein bestimmtes Ergebnis zu erwarten ist.

Mathematik zum Zustände kriegen

Es gibt verschiedene mathematische Darstellungen für Quantenzustände. Hier soll eine Darstellung vorgestellt werden, die auf den Physiker Pauli Dirac zurückgeht. Er beschrieb einen Quantenzustand wie folgt:

$$|\Psi\rangle$$

Das ist also ein senkrechter Strich, ein Symbol (in diesem Fall der griechische Buchstabe „Psi“) und ein Größerzeichen.

Nehmen wir das einfachste aller Beispiele: ein Quant, bei dem es eine Messung gibt, die nur eine von zwei Ergebnisse liefern kann: „0“ oder „1“. (Die Polarisation eines Photons wäre eine solche Eigenschaft.)

Für den Fall, dass wir genau wissen, dass eine Messung den Wert „0“ ergeben wird, schreiben wir den Quantenzustand wie folgt:

$$|\Psi_0\rangle = |0\rangle$$

Falls wir wissen, dass die Messung den Wert „1“ liefern wird, lautet der Zustand:

$$|\Psi_1\rangle = |1\rangle$$

Allgemein kann man damit schreiben:

$$|\Psi_0\rangle = 1|0\rangle + 0|1\rangle, |\Psi_1\rangle = 0|0\rangle + 1|1\rangle$$

Dies sind aber nur zwei mögliche Quantenzustände zur Beschreibung unseres Quants. Nach der Quantentheorie ist das noch längst nicht alles. Das Quant kann sich in einem gemischten Zustand befinden: ein bisschen „0“ und ein wenig „1“ oder andersrum. Im Zustand wird dann die Wahrscheinlichkeit beschrieben, mit der das jeweilige Messergebnis auftreten wird.

Der allgemeinste Fall lautet daher:

$$|\Psi\rangle = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$$

wobei C_0 und C_1 komplexe Zahlen sind.

Der Quantentheorie zufolge ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten für eine Messung von „0“ oder „1“ dann aus dem Betragsquadrat von C_0 bzw. C_1 :

$$P_0 = |C_0|^2, P_1 = |C_1|^2$$

Da eine Messung immer eine der beiden Möglichkeiten „0“ oder „1“ liefern wird, muss die Summe der beiden Wahrscheinlichkeiten 100% ergeben. Es gilt also:

$$|C_0|^2 + |C_1|^2 = 1$$

▷ Quantenmessung ▷ Quantentheorie ▷ Wellenfunktion

Siehe auch

Quarkgefangenschaft **

6.227

Phänomen, nach dem Quarks niemals einzeln auftreten, sondern sich immer zu Gruppen wie Protonen oder Neutronen zusammenfinden. Dieses unfreie Verhalten nennt man Quarkgefangenschaft oder auch Quark-Einsperrung (engl. confinement).

In allen bisher durchgeführten Experimenten hat man immer nur Paare oder Dreiergruppen von Quarks beobachtet, einzelne Quarks hingegen nicht. Versucht man, eine solche Gruppe von Quarks mit hoher Energie zu trennen, so treten spontan neue Paare von Quarks und Antiquarks auf, die sich aus der hineingesteckten Energie bilden: Quarks sind immer in diesen Gruppen gefangen. Das Gegenteil der Quarkgefangenschaft ist die asymptotische Freiheit.

Quarkgruppen

Eine andere Formulierung der Quarkgefangenschaft lautet: Die Welt ist nicht bunt. Denn nach der Quantenchromodynamik der Theorie zur starken Wechselwirkung, besitzen Quarks Farbladungen. Diese Farbladungen gibt es in drei Arten wie Rot, Grün und Blau, dazu jeweils noch eine entgegengesetzte Antifarbladung: Antirod, Antigrün und Antiblau. Ein aus Quarks zusammengesetztes Teilchen heißt nun farbladungsneutral, wenn zu jeder Farbe seiner Bestandteile ein Bestandteil mit einer Antifarbe existiert, oder wenn jede der drei Farbladungen in ihm vorkommt. Quark-Einsperrung bedeutet: Wir können nur farbneutrale Objekte beobachten.

Die Welt ist nicht bunt.

▷ Asymptotische Freiheit ▷ Farbladung ▷ Gluon ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quarks

Siehe auch

Quark-Gluon-Plasma **

6.228

Zustand extrem hoher Energie, in dem Quarks und Gluonen als freie

Teilchen wechselwirken und nicht der Quarkgefangenschaft unterliegen.

Siehe auch ▷ Gluon ▷ Quarkgefangenschaft ▷ Quarks

6.229 Quarkmodell **

Will man die genaue Zusammensetzung von Teilchen beschreiben, die aus Quarks bestehen, so stehen verschiedene Stufen von Genauigkeit zur Verfügung.

Einfaches
Quarkmodell

Im einfachen Quarkmodell bestehen etwa Protonen lediglich aus drei Quarks, den drei Hauptquarks. Damit das Proton nicht auseinander fällt, werden die drei Quarks über den ständigen Austausch von Gluonen zusammengehalten.

Quarkmodell mit
Seequarks

Schaut man genauer hin, wird es weit komplizierter. Denn aus den Gluonen können für kurze Momente Quark-Antiquark-Paare entstehen. Zwischen diesen Quarks entstehen wiederum Gluonen, die wieder Quarks bilden können. Und so weiter. Und so fort. Diese zusätzlichen Quarks heißen Seequarks, weil sie quasi einen See bilden, in dem die Hauptquarks schwimmen.

Siehe auch ▷ Baryonen ▷ Hadron ▷ Mesonen ▷ Neutron ▷ Proton ▷ Quarks

6.230 Quarks *

Typ von fundamentalen Teilchen. Das Standard-Modell der Teilchenphysik unterscheidet sechs verschiedene Quarksorten.

Aus Quarks sind unter anderem die Bestandteile von Atomkernen, Protonen und Neutronen, zusammengesetzt. Im einfachsten Modell bilden drei Quarks ein Proton oder Neutron.

Farbladung

Quarks sind – neben Gluonen – die einzigen Teilchen, die über die starke Kraft wechselwirken. Dazu tragen die Teilchen eine Farbladung, aufgrund derer sie Gluonen, die Wechselwirkungsteilchen der starken Kraft, austauschen können.

6 Quarksorten

Es gibt sechs verschiedene Quarksorten:

- ▷ Up-Quark
- ▷ Down-Quark,
- ▷ Strange-Quark,
- ▷ Charm-Quark,
- ▷ Bottom-Quark und

▷ Top-Quark.

Den Namen Quark entnahm Murray Gell-Mann dem Roman Finnegans Wake des Iren James Joyce. Gell-Mann hatte eigenen Äußerungen zufolge zunächst den Klang „kwork“ im Ohr und stieß später auf die folgenden Textstelle: „Three quarks for Muster Mark! // Sure he hasn't got much of a bark // And sure any he has it's all beside the mark...“ (Finnegans Wake S. 383)

▷ Bottom-Quark ▷ Charm-Quark ▷ Down-Quark ▷ Gluon ▷ Materieteilchen
▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Strange-Quark ▷ SU(3) ▷ Top-Quark ▷ Up-Quark

Radioaktivität ** 6.231

Phänomen, bei dem sich Atomkerne in andere umwandeln.

1896 entdeckte der französische Physiker Antoine Henry Becquerel (1852–1908), dass Uran radioaktiv ist. Dies ließ sich daran beobachten, dass Uransalz Photoplatten schwarz färbt, selbst wenn kein Licht darauf fällt. Das Becquerel gilt als Einheit für die Aktivität einer radioaktiven Substanz.

▷ Atomkern ▷ Betazerfall ▷ Kernfusion ▷ Kernspaltung

Raum ** 6.232

Raum ermöglicht, dass wir die gegenseitige Anordnung von Dingen wahrnehmen können. Nach der speziellen Relativitätstheorie sind Raum und Zeit zur Raumzeit verwoben.

▷ Raumzeit ▷ Relativitätstheorie ▷ Zeit

Raumzeit ** 6.233

Nach der Relativitätstheorie können Raum und Zeit nicht mehr getrennt voneinander betrachtet werden. Sie verschmelzen zur Raumzeit.

▷ Raum ▷ Relativitätstheorie ▷ Zeit

6.234 **Relativistischer Massezuwachs** **

Relativistisches Phänomen, nach dem die Masse von Teilchen mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt.

Folge:
Tempolimit

Es liegt am relativistischen Massezuwachs, dass massive Teilchen nicht auf Lichtgeschwindigkeit und darüber beschleunigt werden können. Denn aufgrund der zunehmenden Masse wird immer mehr Energie für die Beschleunigung notwendig. Um Lichtgeschwindigkeit zu erreichen, müsste unendlich viel Energie aufgewendet werden. Die gibt es jedoch nicht.

In Teilchenbeschleunigern

In Teilchenbeschleunigern muss der relativistische Massezuwachs der beschleunigten Teilchen berücksichtigt werden, weil mit zunehmender Masse stärkere Magnetfelder notwendig sind, um die Teilchen abzulenken und beispielsweise auf eine kreisförmige Bahn zu bringen.

Siehe auch

▷ Masse-Energie-Äquivalenz ▷ Spezielle Relativitätstheorie

6.235 **Relativitätstheorie** **

Oberbegriff für die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie, durch die Albert Einstein unser Verständnis von Raum, Zeit, Energie und Masse revolutionierte.

Siehe auch

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Allgemeine Relativitätstheorie ▷ Spezielle Relativitätstheorie

6.236 **Renormierung** ***

Theoretischer Trick, Unendlichkeiten unter den Teppich zu kehren. Dieser muss für die Theorien des Standard-Modells der Teilchenphysik angewendet werden.

Unendliches

Als sich Theoretiker ans Rechnen mit relativistischen Quantenfeldern machten, wurden viele Ergebnisse unendlich groß: so etwa die elektrische Ladung und Masse des Elektrons. Diese Unendlichkeiten entstehen wie folgt: Teilchen sind im Mikrokosmos von unzähligen anderen Teilchen umgeben. Wenn sich ein Elektron bewegt, strahlt es Photonen ab, die es kurz danach wieder einfängt: Eine Photonenwolke bildet sich um das Elektronen. Diese Photonen können jedoch auch wieder Teilchen-Antiteilchen-Paaren bilden. Die können auch wieder strahlen. Und so weiter. Und so fort. Es gibt unendlich viele Möglichkeiten, auf

denen das alles passieren kann. Die Rechenregeln der Quantentheorie besagen nun, dass man all diese Möglichkeiten addieren muss. Und das liefert am Ende das unendlich große Ergebnis.

Die Unendlichkeiten brachten die relativistischen Quantenfeldtheorien in arge Bedrängnis. Doch einige Physiker – darunter Richard Feynman – bügelten sie aus der Theorie. Sie fanden in den 1940er Jahren einen Kunstgriff, den sie „Renormierung“ nannten. Die Physiker kehrten dabei die Unendlichkeiten unter den Teppich: Sie gaben nicht den Theorien, sondern dem Universum die Schuld an allen Unendlichkeiten. So ist die eigentliche Masse von Elektronen seit Urzeiten minus unendlich. Weil nun aufgrund der Teilchenwolken eine positiv unendliche Masse hinzukommt, ergibt sich am Ende genau die Differenz zwischen zwei Unendlichkeiten: die Masse des Elektrons, wie man sie im Labor misst. Was hier nach einem Schildbürger-Streich klingt, fabriziert Theorien mit verblüffendem Erfolg: Quantenfeldtheorien gehören zu dem Genauesten, was sich die Menschheit bisher ausgedacht hat.

▷ Eichtheorie ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quantenelektrodynamik (QED) ▷ Quantenfeldtheorie ▷ Quantentheorie ▷ Richard P. Feynman (1918–1988)

Unter den
Teppich kehren

Siehe auch

Resonanz ***

6.237

Als Resonanzen bezeichnet man außerordentlich kurzlebige Teilchen. Sie existieren so kurz, dass sie kaum die Länge des eigenen Durchmessers zurücklegen können, selbst wenn sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.

Bei den schweren stark wechselwirkenden Teilchen handelt es sich um Resonanzen. So hat etwa das Delta-Minus eine Lebensdauer von nur 10^{-23} Sekunden. Licht legt in dieser Zeit eine Strecke vom Bruchteil eines Atomkerns zurück.

Die Spuren von Resonanzen sind so kurz, dass sie von keinem Teilchendetektor der Welt aufgezeichnet werden können. Wie kommt es, dass Physiker dennoch von diesen Teilchen wissen? Und sogar deren Massen angeben? Beides ist eng miteinander verknüpft: Bei einer bestimmten Art von Teilchenphysikexperimenten bringen Physiker zwei Teilchen zum Zusammenstoß – etwa ein Elektron und ein Positron. Dabei erhöhen sie die Energie im Laufe des Experiments allmählich und schauen, wie sich die Ereignisrate verhält, wie viel also pro Sekunde passiert. Resonanzen lassen sich über einen plötzlichen Anstieg von

Beispiele

Wie werden
Resonanzen
nachgewiesen?

Ereigniszahlen in einem Detektor nachweisen, wenn bei der Kollision der Ausgangs-Teilchen die Energie erreicht wird, die der Masse der Resonanz entspricht. Auf diese Weise erhält man den Hinweis auf eine Resonanz und kann an der Energie gleich die Masse ablesen. Jetzt bleibt nur noch die Lebensdauer zu ermitteln. Diese lässt sich – als Anwendung der Unschärferelation – aus der Breite des Resonanzberges errechnen.

Siehe auch ▷ Baryonen ▷ Mesonen ▷ Unschärfebeziehung

6.238 Resonator ***

System, das für bestimmte Schwingungen besonders gut geeignet ist. Resonatoren für elektromagnetische Wellen werden zur Teilchenbeschleunigung genutzt.

Siehe auch ▷ Linearbeschleuniger ▷ Teilchenbeschleuniger

6.239 RHIC **

Kreisförmiger Beschleuniger am Brookhaven National Laboratory, der schwere Ionen (zum Beispiel Gold) bei hohen Energien aufeinander schießt, um eine Materieform mit Namen Quark-Gluon-Plasma zu untersuchen. Ferner wird mit RHIC der Spin des Protons erforscht.

Name RHIC ist die Abkürzung für „Relativistic Heavy Ion Collider“ (= relativistischer Zusammenstoßer von Schwerionen).

Siehe auch ▷ BNL ▷ Proton ▷ Quark-Gluon-Plasma ▷ Spin

6.240 Röntgen, Wilhelm C. (1845–1923) **

Deutscher Physiker. Wilhelm Conrad Röntgen entdeckte 1895 das nach ihm benannte energiereiche Licht.

Eckdaten Wilhelm Conrad Röntgen wurde am 27. März 1845 in Lennep (heute Remscheid) geboren. Er starb am 10. Februar 1923 in München.

Nobelpreis für Physik Röntgen erhielt 1901 den ersten Physik-Nobelpreis „in Anerkennung der außergewöhnlichen Verdienste, die er sich durch die Entdeckung der bemerkenswerten Strahlen, welche später nach ihm benannt werden, erworben hat.“

Siehe auch ▷ Elektromagnetisches Spektrum ▷ Licht ▷ Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung **

6.241

Röntgenstrahlung ist eine Form von Licht, dessen Energie ausreicht, um biologische Gewebe zu durchleuchten. Auf diese Weise lassen sich etwa Knochenbrüche aufspüren. Die Röntgenstrahlung wurden von Conrad Röntgen entdeckt. Nach der Quantentheorie besteht sie aus Photonen.

▷ Elektromagnetisches Spektrum ▷ Synchrotronstrahlung ▷ Wilhelm C. Röntgen (1845–1923) Siehe auch

Ruhemasse ***

6.242

Die Ruhemasse ist die Masse eines Teilchens in Ruhe, also wenn es keine Geschwindigkeit besitzt. Sie ist geringer als die relativistische Masse eines bewegten Teilchens. Denn mit der Geschwindigkeit nimmt die Masse zu.

▷ Relativistischer Massezuwachs ▷ Relativitätstheorie Siehe auch

Rutherford, Ernest (1871–1937) **

6.243

Neuseeländischer Physiker. Lord Ernest Rutherford wurde insbesondere durch sein Streuexperiment bekannt, mit dem er die Atomkerne im Inneren von Atomen entdeckte. Darauf aufbauend entwickelte er das Rutherford'sche Atommodell, nach dem die elektrisch positiven Atomkerne von elektrisch negativen Elektronen umgeben werden.

Rutherford führte 1919 die erste künstliche Kernreaktion durch und nannte 1920 den Atomkern des Wasserstoffs „Proton“. Er vermutete zugleich die Existenz eines elektrisch neutralen Partners zum Proton: das Neutron. Wirken

Ernest Rutherford wurde am 30. August 1871 in Brightwater bei Nelson (Neuseeland) geboren und starb am 19. Oktober 1937 in Cambridge (England). Eckdaten

Ernest Rutherford erhielt 1908 den Chemie-Nobelpreis für seine Erklärung der Radioaktivität. Nobelpreis

▷ Atom ▷ Atomkern ▷ Rutherford'scher Streuversuch ▷ Streuexperiment Siehe auch

6.244 **Rutherford'scher Streuversuch** **

Wichtiges Experiment zur Atomphysik. Beim Rutherford-Experiment wurde eine Goldfolie mit Heliumkernen beschossen. Damit konnte nachgewiesen werden, dass in Atomen schwere Kerne hausen.

Um die wenige millionstel Meter dicke Goldfolie herum befand sich eine kreisrunde Nachweisschicht aus Zinksulfid. Die Heliumkerne erzeugen auf der Zinksulfidschicht Blitze, die mit Hilfe eines Mikroskops nachgewiesen werden können.

Die Rutherford'sche Streuformel

Wenn man ein Teilchen mit der elektrischen Ladung q_a an einem ruhenden Teilchen der Ladung q_b streut, wird es abgelenkt.

Die Wahrscheinlichkeit für die Ablenkung hängt vom Ablenkwinkel und der Energie des gestreuten Teilchens ab. Sie wird durch die Rutherford'sche Streuformel beschrieben. Diese Formel gibt den so genannten differentiellen Wirkungsquerschnitt an. Wenn man diese Größe mit der Luminosität des Experiments multipliziert, erhält man die Anzahl der Teilchen pro Winkelbereich:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{(4\pi\epsilon_0)^2}{16} \frac{q_a q_b}{E_a^2 \sin^4(\frac{\theta}{2})}$$

Siehe auch ▷ Ernest Rutherford (1871–1937) ▷ Streuexperiment

6.245 **Salam, Abdus (1926-1996)** ***

Pakistanischer Physiker. Abdus Salam war maßgeblich an der Entwicklung der Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung beteiligt.

Eckdaten Abdus Salam wurde am 29. Januar 1926 in Jhang in Pakistan geboren. Er starb am 21. November 1996 in Oxford, England.

Nobelpreis für Physik Die drei Physiker Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg erhalten 1979 der Physik-Nobelpreis „für ihre Beiträge zu Theorie und Vereinheitlichung der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen, einschließlich u.a. der Vorhersage des schwachen neutralen Stroms.“

Siehe auch ▷ Elektroschwache Theorie ▷ Quantenflavordynamik (QFD)

Schrödinger, Erwin (1887–1961) **

6.246

Österreichische Physiker. Erwin Schrödinger hat die Quantentheorie – unter anderem mit seiner Schrödingergleichung – maßgeblich mitentwickelt. Mit der Schrödingerkatze verdeutlichte er ein Interpretationsproblem der Quantentheorie.

Erwin Schrödinger wurde am 12. August 1887 in Wien geboren. Am 4. Januar 1961 starb er dort.

Eckdaten

Erwin Schrödinger erhielt 1933 zusammen mit Pauli Dirac den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung neuer, fruchtbarer Formen der Atomtheorie.“

Nobelpreis für Physik

▷ Quantentheorie ▷ Schrödingers Katze ▷ Wellenfunktion

Siehe auch

Schrödingergleichung ***

6.247

Gleichung, mit der sich Wellenfunktion für ein Quant oder für eine Gruppe von Quanten berechnen lässt.

Diese Gleichung wurde 1926 von Erwin Schrödinger aufgestellt.

Entstehung

Wellenfunktion

Um die Wellenfunktion für ein Teilchen zu berechnen, muss man die Energien kennen, die das Quant an den unterschiedlichen Orten hat. So nimmt die Energie eines Elektrons, das sich um einen Atomkern bewegt, mit dem Abstand zu. Diese Energie schreibt man gewöhnlich als $V(x,y,z)$, wobei das „ (x,y,z) “ zum Ausdruck bringt, dass diese Energie vom Ort des Quants abhängt.

Um die Schrödingergleichung zu verstehen, muss man sich ein wenig in der Differentialrechnung auskennen. Dabei handelt es sich um jenen Zweig der Mathematik, der die zeitlichen und räumlichen Veränderungen von Funktionen – wie beispielsweise der Wellenfunktion – untersucht.

Die Schrödinger-Gleichung lautet:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, y, z, t) = \left(-\frac{\hbar}{2m} \Delta + V(x, y, z) \right) \Psi(x, y, z, t)$$

▷ Quantentheorie ▷ Quantenzustand ▷ Wellenfunktion

Siehe auch

6.248 **Schrödingers Katze** **

Gedankenexperiment, mit dem Erwin Schrödinger auf ein Problem bei der Interpretation der Quantentheorie hinwies.

- Versuchsaufbau 1935 entwickelte Erwin Schrödinger einen der wenigen Tierversuche der Physik, der jedoch immer nur Gedankenexperiment blieb: „Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muß): in einem geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, daß im Laufe einer Stunde vielleicht eines der Atome zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auf keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert“ (Erwin Schrödinger (1935): Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik. In: Naturwissenschaften 23:807-812).
- Das Problem Hier nun das Problem: Nach der Quantentheorie befinden sich die Atome – wenn man sie eine Weile lang nicht beobachtet hat – in einem mysteriösen Mischzustand zwischen „nicht zerfallen“ und „zerfallen“. Erst wenn man genau nachsieht, scheint sich die Natur für einen der Zustände zu entscheiden – die genaue Wahrscheinlichkeit dafür kann man berechnen. Aber gilt das auch für die Katze? Ist diese „tot“ und „lebendig“ zugleich? Kann das sein?
- Siehe auch ▷ Erwin Schrödinger (1887–1961) ▷ Quantenmessung ▷ Quantentheorie ▷ Quantenzustand

6.249 **Schwache Kraft** *

Die schwache Kraft ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Sie wirkt zwischen schwachen Ladungen.

- Unruhestifter Die schwache Kraft ist ein Unruhestifter in der Teilchenwelt: Wenn Atomkerne auseinander bersten und wenn's radioaktiv wird, dann hatte sie meist ihre Finger im Spiel. Denn sie erlaubt es Teilchen, sich ineinander umzuwandeln: Aus einem Down-Quark wird dann beispielsweise ein Up-Quark (und damit aus einem Neutron ein Proton), aus einem Elektron ein Elektron-Neutrino.
- Wechselwirkungsteilchen Die Wechselwirkungsteilchen, die an diesen identitätsverändernden Maßnahmen beteiligt sind, heißen W-Plus, W-Minus und Z-Null.
- Vorhersage und Entdeckung Vorhergesagt wurden die Ws und Zs in den 1970er Jahren. Und noch

vor ihrer Entdeckung gab es für die kühne Vorhersage einen Nobelpreis. Gefunden wurden sie dann im Jahr 1984 am CERN.

Details zur schwachen Kraft

Was wechselwirkt schwach? Alles mit einer schwachen Ladung

Reichweite 10^{-18} m (rund ein Zehntausendstel Durchmesser eines Atomkerns)

Name des Wechselwirkungsteilchens W und Z

Quantentheorie zur Kraft Quantenflavordynamik

▷ P-Verletzung ▷ Quantenflavordynamik (QFD) ▷ Schwache Ladung ▷ Standardmodell ▷ W ▷ Wechselwirkung ▷ Z Siehe auch

Schwache Ladung ^{***} 6.250

Die schwache Ladung eines Teilchens bestimmt, ob es der schwachen Kraft unterliegt. Elektronen, Neutrinos und Quarks verfügen über eine schwache Ladung.

▷ Ladung ▷ Quantenflavordynamik (QFD) ▷ Schwache Kraft Siehe auch

Scrollpumpe ^{***} 6.251

Vakuumpumpe, die zur Evakuierung von Teilchenbeschleunigern zum Einsatz kommt.

In der Scrollpumpe befinden sich zwei ineinander gesteckte Spiralzylinder. Einer ist drehbar, aber die Achse liegt nicht in der Mitte der Pumpenkammer, sondern etwas daneben. Es entstehen bei der Drehung des einen Spiralzylinders in der Kammer Bereiche, die sich abwechselnd vergrößern und verkleinern. Auf diese Weise wird Gas in die Pumpe gesaugt, eingeschlossen, verdichtet und ausgestoßen. Ventile sorgen dafür, dass immer nur aus einem Raum Luft entnommen und in den anderen gepumpt wird. Das erreichbare Vakuum beträgt etwa ein Millionstel des normalen Atmosphärendrucks.

▷ Vakuumpolarisation ▷ Vakuumpumpe Siehe auch

6.252 **Seequark** **

Quark, das neben den Hauptquarks in Mesonen und Baryonen zu finden sind. Sie bilden sich als virtuelle Teilchen aus den Gluonen, die die Hauptquark binden.

Siehe auch ▷ Gluon ▷ Hauptquark ▷ Nukleon ▷ Quarks

6.253 **Seltsamkeit** ***

Eigenschaft von Quarks und aus Quarks zusammengesetzten Teilchen. Sie gibt an, wie viele Strange-Quarks darin enthalten sind.

Geschichte In den 1950er Jahren wurden Teilchen entdeckt, die durch ihre lange Lebensdauer überraschten. Ein Physiker brachte seine Verwunderung mit dem folgenden Vergleich zum Ausdruck: „Das ist so, als wäre Cleopatra über Bord gegangen und hätte immer noch nicht das Wasser berührt.“ Zwar ging es bei den Teilchen nicht um Jahrtausende, sondern um Bruchteile einer Sekunde. Aber auch diese Bruchteile waren viel länger als erwartet und Grund, die entsprechenden Teilchen „seltsam“ zu nennen. Mittlerweile weiß man: Seltsame Teilchen bestehen aus Strange-Quarks (seltsame Quarks). Diese können nur über die schwache Wechselwirkung zerfallen und das dauert eben.

Siehe auch ▷ Quantenzahl ▷ Strange-Quark

6.254 **Sextupolmagnet** ***

= Sechspolmagnet. Magnet in Teilchenbeschleunigern zur Bündelung von Teilchenpaketen.

Aufbau Sextupolmagnete bestehen aus drei Nord- und drei Südpolen.

Siehe auch ▷ Beschleunigermagnete ▷ Dipolmagnet ▷ Fokussierung ▷ Quadrupolmagnet

6.255 **Sigma** ***

Aus Quarks zusammengesetztes Teilchen. Sigma-Teilchen bestehen wie Protonen aus drei Quarks. Es gibt Sigmas in drei verschiedenen Ladungen: Sigma-Minus, Sigma-Null und Sigma-Plus.

Entdeckung Das positive Sigma-Teilchen wurde 1953 in der kosmischen Höhen-

strahlung gefunden. 1956 entdeckte man in Teilchenbeschleunigern zudem die neutrale und negativ geladene Version.

Details zum negativen Sigma

Name Sigma-Minus

Entdeckung 1956 von W. Fowler

Elektrische Ladung eine negative Elementarladung

Masse $1.197 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer $1,5 \times 10^{-10}$ Sekunden

Quarkinhalt Zwei Down-Quarks und ein Strange-Quark

Teilchenklassen Das Sigma-Minus gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zum neutralen Sigma

Name Sigma-Null

Entdeckung 1956 von R. Piano und Team am BNL

Elektrische Ladung keine

Masse $1.192 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer 6×10^{-20} Sekunden

Quarkinhalt Ein Up-, ein Down- und ein Strange-Quark

Teilchenklassen Das Sigma-Null gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zum positiven Sigma

Name Sigma-Plus

Entdeckung 1953 von G. Tomasini und Team

Elektrische Ladung eine positive Elementarladung

Masse $1.189 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer $0,8 \times 10^{-10}$ Sekunden

Quarkinhalt Zwei Up-Quarks und ein Strange-Quark

Teilchenklassen Das Sigma-Plus gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Siehe auch \triangleright Baryonen \triangleright Quarks

6.256 SLAC **

US-amerikanisches Teilchenphysikzentrum im Süden von San Francisco, Kalifornien. Das Stanford Linear Accelerator Center (Stanford Linearbeschleunigerzentrum) SLAC wird von der Stanford University betrieben.

Beschleuniger Der größte Beschleuniger am SLAC ist SLC.

Nobelpreise SLAC kann auf drei Nobelpreise zurückblicken: für den allgemeinen Nachweis der Quarks (1990) sowie für die Entdeckung des Charm-Quarks (Entdeckung: 1974; Nobelpreis: 1976) und die des Tauons (Entdeckung: 1974; Nobelpreis: 1995).

Im Web <http://www.slac.stanford.edu>

Siehe auch \triangleright SLC \triangleright Teilchenphysikzentren

6.257 SLC **

Linearbeschleuniger am Forschungszentrum SLAC in Kalifornien. Hier wurden von 1989 bis 2006 Elektronen und Positronen bei einer Energie von jeweils bis zu 50 Milliarden Elektronenvolt aufeinandergeschossen.

Untersuchungen Die 100 Milliarden Elektronenvolt, die als Energie beim Elektron-Positron-Zusammenstoß frei werden, sind gerade so groß, dass ein Z entstehen kann. Entsprechend kommt diesem Teilchen daher im Forschungsprogramm vom SLC auch ein Großteil der Aufmerksamkeit zu.

SLC ist die Abkürzung für SLAC Linear Electron Positron Collider (= SLAC Gerader Elektronen-Positronen-Zusammenstoßer).

Nach dem Teilchenphysikprogramm wird der Beschleuniger zur Erzeugung hochintensiven Lichts umgerüstet.

▷ Teilchenbeschleuniger weltweit

Speicherring **

Typ eines Kreisbeschleunigers. Bei einem Speicherring handelt es sich um ein Synchrotron, in dem Teilchen nach erfolgter Beschleunigung für mehrere Stunden gespeichert werden können, damit sie öfters Gelegenheit bekommen zusammenzustoßen.

▷ Kreisbeschleuniger ▷ Synchrotron

Spezielle Relativitätstheorie *

Nach der speziellen Relativitätstheorie folgt als der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit eine Verwebung von Raum und Zeit, bewegte Uhren laufen langsamer, bewegte Stäbe erscheinen kürzer und Masse und Energie können ineinander umgeformt werden.

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Allgemeine Relativitätstheorie ▷ Längenkontraktion ▷ Lichtgeschwindigkeit ▷ Lorentztransformation ▷ Masse-Energie-Äquivalenz ▷ Relativitätstheorie ▷ Zeitdilatation

Spin **

Eigenschaft von Teilchen, die man sich in vielen Punkten wie eine Drehung der Teilchen um die eigene Achse vorstellen kann.

Der Spin ist eine quantentheoretische Größe, die für verschiedene Teilchen unterschiedliche Werte annehmen kann. Den Materieteilchen wie Elektronen, Neutrinos oder Quarks stehen hier zwei verschiedenen Einstellungen zur Verfügung. Bei den Wechselwirkungsteilchen sind es drei Möglichkeiten.

Auch zusammengesetzte Teilchen besitzen einen Spin. Der Spin eines Atoms setzt sich aus denen des Kerns und der Elektronen zusammen,

der Spin des Kerns ergibt sich aus dem der Neutronen und Protonen und der eines Protons resultiert wiederum aus denen seiner Bestandteile. Wie letzteres genau funktioniert, wird unter anderem am Experiment HERMES bei DESY untersucht.

Der Spin

Den Spin eines Teilchens gibt man in halbzahligen oder ganzzahligen Vielfachen des Planckschen Wirkungsquantums h an:

$$0 \frac{h}{2\pi}, \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}, 1 \frac{h}{2\pi}, \frac{3}{2} \frac{h}{2\pi}$$

usw.

Materieteilchen wie Elektronen und Quarks haben einen Spin von $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$. Sie heißen Fermionen. Die Wechselwirkungsteilchen des Standard-Modell – die Photonen, W s, Z s und Gluonen – haben einen Spin von $1 \frac{h}{2\pi}$. Solche Teilchen nennt man Bosonen.

Siehe auch ▷ Boson ▷ Fermion ▷ Quantentheorie ▷ Superstringtheorie ▷ Supersymmetrie

6.261 Spurkammer **

Teilchendetektor, mit denen die Bahn (Spur) von Teilchen vermessen werden kann. Oft kommen hier Drahtkammern zum Einsatz.

Siehe auch ▷ Drahtkammer ▷ Teilchendetektor

6.262 Standardmodell *

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist der weit akzeptierte Stand der Dinge, wenn es um die Erklärung des Treibens in der Welt des Allerkleinsten geht.

Danach üben

- ▷ Materieteilchen
- ▷ Wechselwirkungen (oder Kräfte) aufeinander über den Austausch von
- ▷ Wechselwirkungsteilchen aus.

Zudem erklärt der Higgs-Mechanismus, wie die Teilchen an Masse gelangen.

Siehe auch ▷ Higgs-Mechanismus ▷ Materieteilchen ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quan-

tenelektrodynamik (QED) ▷ Quantenflavordynamik (QFD) ▷ Teilchenfamilien
 ▷ Wechselwirkung ▷ Wechselwirkungsteilchen ▷ Weltformel

Starke Kraft *

6.263

Die starke Kraft ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Sie wirkt zwischen Farbladungen und wird über den Austausch von Gluonen beschrieben.

Die starke Kraft ist der Konrad-Spezialkleber unter den Kräften. Sie sorgt beispielsweise dafür, dass sich aus Quarks Teilchen wie Protonen oder Neutronen formen. Die Kraft ist dabei rund 100-mal stärker als der Elektromagnetismus und überwindet auf diese Weise spielend die elektromagnetische Abstoßung von gleichnamig geladenen Quarks.

Eigenschaften

Erklärt wird das Zustandekommen der starken Kraft über den Austausch von acht verschiedener Gluonen (engl. to glue: kleben). Dabei geht es bunt zur Sache: Alle Objekte mit einer so genannten Farbladung wechselwirken stark, indem sie Gluonen austauschen. Farbige sind dabei Quarks und die Gluonen selbst.

Funktionsweise

Wenn die starke Kraft so stark ist, wieso spüren Sie dann nicht mehr von ihr im Alltagsleben? Wieso kleben Sie nicht an Ihrem Stuhl fest, der doch auch aus Quarks besteht? Wieso können Sie von einer Person wieder lassen, der Sie soeben die Hand geschüttelt haben? Des Rätsels Lösung liegt in der geringen Reichweite der starken Kraft: Sie wirkt nur über Entfernungen, die rund einem Zehntel der Ausdehnung eines Atomkerns entsprechen. Was jenseits liegt, berührt sie nicht.

Reichweite

Weil Gluonen selbst auch stark untereinander wechselwirken, nimmt die starke Wechselwirkung mit größer werdendem Abstand zu. Aus diesem Grund kann man ein Quark auch nicht so einfach aus einem Proton entfernen (Quarkgefangenschaft). Bei sehr viel kleineren Abständen als dem Durchmesser eines Atomkerns hingegen nimmt die Stärke der starken Wechselwirkung ab, so dass sich die Quarks fast wie freie Teilchen bewegen. Man spricht hier von „asymptotischer Freiheit“.

Stärke

Theoretisch beschrieben wir das Ganze durch die Quantenchromodynamik.

Theorie

Details zur Starken Kraft

Was wechselwirkt stark? Alles mit einer Farbladung

Reichweite 10^{-15} m (rund ein Zehntel Durchmesser eines Atomkerns)

Name des Wechselwirkungsteilchens 8 verschiedene Gluonen

Quantentheorie zur Kraft Quantenchromodynamik

Siehe auch ▷ Farbladung ▷ Gluon ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Standardmodell
▷ Wechselwirkung

6.264 **Strange-Quark** *

Fundamentales Teilchen des Standardmodells. Das Strange-Quark ist eines der sechs Quarks.

Masse Die Masse des Strange-Quarks ist mit $100 \text{ MeV}/c^2$ rund 200-mal größer als die des Elektrons. Die Masse der Quarks lässt sich nicht so leicht angeben wie die anderer Teilchen, weil Quarks immer nur in Gruppen und nie einzeln vorgefunden werden. Daher lässt sich nur aus der Masse der Gruppen auf die der Bestandteile schließen.

Lebensdauer Verbindungen, die aus Strange-Quarks bestehen, sind instabil und zerfallen nach kurzer Zeit. Da sich dabei ein Strange-Quark in ein leichteres Quark verwandeln muss, dieser Vorgang der schwachen Kraft aber eher selten passiert, existieren Teilchen aus Strange-Quarks länger als zunächst vermutet. Dies kam den Physikern zunächst seltsam vor. Daher nannten sie solche Teilchen schon „seltsam“, bevor sie wussten, dass ein Strange-Quark im Inneren steckt. Die Lebensdauer des Strange-Quarks kann man aus den Lebensdauern der seltsamen Quark-Gruppen auf 5×10^{-8} Sekunden schätzen.

Nachweis und Entdeckung Das Strange-Quark zählt zu den ersten drei Quarksorten, die von Murray Gell-Mann und George Zweig 1964 erfunden wurden, um Ordnung in den damaligen Teilchenzoo zu bringen.

Name Das Strange-Quark ist Bestandteil so genannter seltsamer (engl. strange) Teilchen, welche den Physikern aufgrund ihrer seltsamen Zerfallsarten (u.a. lange Lebensdauern) aufgefallen waren.

Details zum Strange-Quark

Name Strange-Quark

Beschreibung Teilchen aus Strange-Quarks leben recht lange, was Physikern zunächst recht seltsam (engl. strange) vorkam.

Masse rund $100\text{MeV}/c^2$

Nachweis Strange-Quarks wurden 1964 von Murray Gell-Mann und George Zweig vorhergesagt und Ende der 1969 Jahre experimentell bestätigt.

Elektrische Ladung $-1/3$

Lebensdauer ca. 5×10^{-8} Sekunden

Starke Kraft Ja

Elektromagnetische Kraft Ja

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Down-Quark gehört damit zu den Fermionen.

▷ Bottom-Quark ▷ Charm-Quark ▷ Down-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Quarks Siehe auch
▷ Top-Quark ▷ Up-Quark

Streuexperiment ** 6.265

Sammelbezeichnung für physikalische Experimente, bei denen ein Objekt untersucht wird, in dem es mit anderen Objekten beschossen wird. Viele Experimente der Teilchenphysik sind Streuexperimente.

▷ Rutherford'scher Streuversuch ▷ Teilchendetektor ▷ Tief-inelastische Streuung Siehe auch

Strukturfunktion *** 6.266

Strukturfunktionen beschreiben die innere Struktur von zusammengesetzten Teilchen wie etwa den Protonen.

Bei HERA werden die Strukturfunktionen von Protonen gemessen, anhand derer auf das Innere der zusammengesetzten Teilchen geschlossen werden kann. Bedeutung

▷ Nukleon ▷ Tief-inelastische Streuung Siehe auch

6.267 **SU(3)** ***

Symmetrie-Gruppe, die der Quantenchromodynamik zugrunde liegt.

Siehe auch ▷ Gruppentheorie ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Symmetrie

6.268 **Superstringtheorie** **

Die Superstringtheorie führt alle Elementarteilchen auf dieselbe Sache zurück: auf unvorstellbar winzige Fäden, die hin- und herschwingen. Diese Strings, engl. für Saite, haben Abmessungen von wenigen milliardstel billionstel billionstel Metern.

Bedeutung Die Stringtheorie ist Anwärter für die letzte, große Theorie, mit deren Hilfe alle Kräfte beschrieben werden können. So ist es Teilchenphysikern bisher nicht gelungen, die Schwerkraft in Rahmen des Standard-Modells der Teilchenphysik zu beschreiben. Dies ist bei den Strings anders. Doch bei der mathematischen Ausformulierung der Theorie bissen sich selbst die klügsten Köpfe immer wieder Zähne aus. Zunächst muss eine ganz neue Mathematik entwickelt werden.

Teilchen als Strings Ob uns Strings wie Elektronen oder Quarks erscheinen, hängt davon ab, wie die Fäden schwingen. Alle Eigenschaften der Teilchen sollen sich aus dieser Bewegung ergeben, so wie ein tiefes, schweres C von derselben Geigensaite herrühren kann wie ein leichtes, hohes. Wenn Strings musizieren, erzeugen sie eine Symphonie, die wir Universum nennen.

Dimensionenüberschuss Der Stringtheorie zufolge muss unser Universum aus zehn oder gar elf Dimensionen bestehen. Das sind mehr als doppelt so viele wie die vier, die uns im Alltag begegnen: Länge, Breite, Tiefe, Zeit. Stringtheoretiker gehen daher davon aus, dass diese Extradimensionen zu Gebilden aufgerollt sind, die so winzig sind, dass wir sie schlichtweg übersehen. Die Dicke eines Blattes Papier nehmen wir in der Regel ja auch nicht wahr.

Super? Der Zusatz „Super“ im Namen stammt daher, dass die Superstringtheorie eine supersymmetrische Welt beschreibt.

Siehe auch ▷ Gravitationskraft ▷ Supersymmetrie ▷ Vereinheitlichung ▷ Weltformel

6.269 **Supersymmetrie** **

Vermutete Symmetrie, mit der einige offene Fragen der Teilchenphysik

geklärt werden könnten. Die Supersymmetrie stellt eine Verbindung zwischen Materie- und Wechselwirkungsteilchen her.

Die Welt der Elementarteilchen ist in zwei Lager geteilt: in so genannte Fermionen (darunter fallen die Materieteilchen) und in Bosonen (die Wechselwirkungsteilchen). In Gruppen legen diese beiden Teilchentyphen sehr verschiedene Verhalten an den Tag. So können Materieteilchen (also Fermionen) nicht in demselben Zustand verweilen. Daraus folgt beispielsweise, dass die Elektronen eines Atoms nicht gleichzeitig im Zustand niedrigster Energie verweilen können, sondern in fein säuberlich geordneten Schalen um den Kern angeordnet sind. Für Bosonen gilt diese Einschränkung nicht.

Fermionen und Bosonen

Die Supersymmetrie vereint nun die ungleichen Brüder: Danach gibt es zu jedem Fermion (Materieteilchen) ein entsprechendes Boson (Wechselwirkungsteilchen) und umgekehrt. Für die Namen der Superpartner der Materieteilchen stellt man ein „s“ vorweg. Die supersymmetrischen Zwillinge der Wechselwirkungsteilchen bekommen ein „ino“ hinten angestellt. Und so tummeln sich in der supersymmetrischen Welt Selekttronen, Squarks, Sneutrinos, Gluinos, Photinos, Winos, Zinos und Higgsinos.

Vereinigung

Für die Teilchenphysik spielt die Idee der Supersymmetrie eine wichtige Rolle. So ist es beispielsweise im Rahmen einer supersymmetrischen Theorie möglich, die starke und die elektroschwache Kraft in einer so genannten Grand Unified Theory (GUT) zu vereinheitlichen. Darüber hinaus stellt Supersymmetrie einen ersten Schritt auf der Suche nach einer Quantengravitationstheorie, d.h. einer vereinheitlichten Theorie aller Kräfte der Natur dar. So ist sie auch zentrales Element der Stringtheorie – einem viel versprechenden Kandidaten für eine Quantengravitation.

Konsequenzen

Im Jahre 1973 begründete Julius Wess (1934–2007) zusammen mit Bruno Zumino die Supersymmetrie, die in vielen Gebieten der theoretischen Physik und vor allem in der Teilchenphysik ihre Anwendung gefunden hat. Gesichtet wurden supersymmetrische Teilchen noch nicht, auch wenn Physiker eifrig danach Ausschau halten.

Entdeckung

▷ Boson ▷ Fermion ▷ Symmetrie ▷ Vereinheitlichung ▷ Weltformel

Siehe auch

Supraleitung **

6.270

Phänomen, dass bestimmte Materialien bei tiefen Temperaturen ihren elektrischen Widerstand verlieren; in ihnen kann elektrischer Strom

dann verlustfrei fließen. In modernen Teilchenbeschleunigern kommen häufig supraleitende Bauteile zum Einsatz.

Siehe auch ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Tesla

6.271 Symmetrie ***

Symmetrie liegt vor, wenn man etwas tun kann (Drehen, Spiegeln, Verschieben), ohne dass etwas passiert, es also nachher genauso aussieht wie vorher. In der modernen Physik hat sich die Erforschung von Symmetrien als wichtiges Werkzeug etabliert, um der Struktur des Universums auf die Schliche zu kommen.

Beispiele Eiskristalle kann man um 60 Grad drehen, ohne dass sie ihr Aussehen ändern. Gleiches gilt für ein Quadrat bei einer Drehung um einen Viertel Vollkreis. Und bei einer perfekten Kugel ist sogar jeder beliebige Winkel drin. Wir Menschen ähneln unserem Spiegelbild und bei den meisten Kirchen lassen sich Nord- und Südturm kaum unterscheiden.

Erhaltungssätze Symmetrien spielen in der modernen Physik eine wichtige Rolle, weil mit ihnen Erhaltungssätze verbunden sind. Physiker sind aber auch sehr an der Untersuchung von Symmetrieverletzungen und Symmetriebrechungen interessiert.

Name Es sind Regelmäßigkeiten in der Form, die uns Symmetrie ausmachen lassen. So steht das griechische Wort „symmetros“ auch für regel- oder gleichmäßig.

Siehe auch ▷ C-Spiegelung ▷ Erhaltungssatz ▷ Gruppentheorie ▷ P-Spiegelung ▷ SU(3) ▷ Symmetriebrechung ▷ T-Spiegelung

6.272 Symmetriebrechung ***

Ein vollkommen symmetrisches Universum wäre öd und leer. Die Idee des Symmetriebruchs beschreibt, wie trotz zugrundeliegender Symmetrie Struktur in das Universum gelangen kann. Auch dem Higgs-Mechanismus liegt eine Symmetriebrechung zugrunde.

Symmetriebruch bei Magneten Manchen Systemen liegen Symmetrien zugrunde, obwohl man das auf Anhieb so nicht erkennt: Die Elementarmagnete eines Magneten können beispielsweise prinzipiell in jede Richtung ausgerichtet sein, sie müssen sich aber für eine entscheiden.

Symmetriebruch und Symmetrieverletzung Der Symmetriebruch ist von Symmetrieverletzungen zu unterscheiden.

▷ Higgs-Mechanismus ▷ Symmetrie ▷ Symmetrieverletzung

Siehe auch

Symmetrieverletzung ***

6.273

Wenn für eine Theorie eine bestimmte Symmetrie nicht gilt, dann nennt man die Symmetrie verletzt.

Nobody's perfect – auch das Universum nicht, wenn es um Symmetrien geht. Im Falle der schwachen Wechselwirkung etwa kann man nicht ohne Weiteres das Universum spiegeln oder Teilchen und ihre Antiteilchen austauschen, ohne dass man es merkt. Bei der schwachen Wechselwirkung sind diese Symmetrien verletzt.

Die Symmetrieverletzungen sind von Symmetriebrechungen zu unterscheiden.

▷ Symmetrie ▷ Symmetriebrechung

Schwache Wechselwirkung

Symmetriebruch und Symmetrieverletzung

Siehe auch

Synchrotron **

6.274

Typ eines Kreisbeschleunigers. In einem Synchrotron werden elektrisch geladene Teilchen auf geraden Teilstücken beschleunigt und in kurvigen Verbindungsstücken mit Hilfe von Magnetfeldern umgelenkt. Damit die Teilchen dabei mit zunehmender Energie auf der Bahn bleiben, muss die Stärke der Magnetfelder entsprechend erhöht (synchronisiert) werden.

Der Umfang eines Synchrotrons kann beachtliche Ausmaße annehmen. So befindet sich der LHC am CERN in einem 27 Kilometer langen Tunnel.

▷ Betatron ▷ Kreisbeschleuniger ▷ Mikrotron ▷ Synchrotronstrahlung ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Zyklotron

Beispiel

Siehe auch

Synchrotronstrahlung **

6.275

Strahlung, die entsteht, wenn geladene Teilchen durch ein Magnetfeld abgelenkt werden.

Für Teilchenphysikexperimente ist die Synchrotronstrahlung ein Ärgernis, weil die Teilchen durch sie Energie verlieren und daher weniger hohe Endenergien erreicht werden können. Die Synchrotronstrahlung weist aber zahlreiche interessante Eigenschaften auf, so dass mit ihr selbst wieder geforscht werden kann. Dies geschieht beispielsweise am HASYLAB bei DESY.

Synchrotronstrahlung entsteht immer, wenn geladene Teilchen durch

Bedeutung

Erzeugung

ein Magnetfeld abgelenkt werden. Durch spezielle Magnetanordnungen (Wiggler und Undulatoren) lässt sich besonders intensive Synchrotronstrahlung erzeugen.

Der Energieverlust in Zahlen

Für die abgestrahlte Leistung eines relativistischen Teilchens gilt:

$$P = \frac{q^2 c}{(6\pi\epsilon_0(m_0c^2)^2)} \frac{E^4}{R^2}$$

Wieso ist die Synchrotronstrahlung bei Elektronen ärgerlicher als bei Protonen?

Antwort: Die Ruhemasse m_0 eines Teilchens geht als vierte Potenz in den Energieverlust durch Synchrotronstrahlung ein. Ein Elektron ist 2000-mal leichter als das Proton. Entsprechend ist der Energieverlust 160 Billionen-Mal größer.

Siehe auch ▷ Synchrotron

6.276 Szintillator ***

Material, in dem Licht entsteht, wenn es von elektrisch geladenen Teilchen oder Photonen durchflogen wird.

Beispiele Materialien wie Natriumjodid leuchten von ganz alleine, wenn sich geladene Teilchen hindurch bewegen.

Geschichte und Einsatz Das szintillierende Material Zinksulfid wurde schon 1909 beim Rutherford'schen Streuversuch genutzt. Szintillatoren kommen auch in modernen Teilchenphysikdetektoren zum Einsatz.

Siehe auch ▷ Teilchendetektor

6.277 Tachyon ***

Hypothetisches Teilchen, das sich schneller als das Licht und rückwärts durch die Zeit bewegt.

Eigenschaften Tachyonen sind eine mögliche Lösung der Gleichungen der Relativitätstheorie. Im Gegensatz zu normalen Teilchen (den Tardonen), die nicht auf Überlichtgeschwindigkeit beschleunigt werden können, weil dazu

ein unendliches Maß an Energie notwendig wäre, würde es sich bei Tachyonen genau andersherum verhalten: Sie könnten nur mit unendlich viel Energie auf eine Geschwindigkeit unterhalb der des Lichts abgebremst werden.

Es gibt gewiss mehr Science-Fiction- und esoterische Literatur über diese Teilchen als wissenschaftliche. So ist keineswegs belegt, ob diese Teilchen in Wirklichkeit existieren.

Die Teilchen wurden 1966 von Gerald Feinberg benannt. Das griechische Wort „tachus“ bedeutet „schnell“.

▷ Lichtgeschwindigkeit

Nachweis

Name

Siehe auch

Tau-Neutrino *

6.278

Fundamentales Teilchen des Standard-Modells. Das Tau-Neutrino ist eines der drei Neutrinos. Es ist elektrisch neutral, hat nur eine sehr geringe Masse und ist unteilbar.

Das Tau-Neutrino wurde am Fermilab im Jahr 2000 als letztes Materieteilchen des Standardmodells direkt gesichtet. Dabei kam eine Emulsion zum Einsatz. Gerade einmal vier Photos mit Teilchenspuren hatten Wissenschaftler in der Hand, als sie den Fund des Tau-Neutrinos ausriefen.

Nachweis und Entdeckung

Der Vorsilbe „Tau“ leitet sich vom Tauon ab, mit dem es zusammen ein Paar bildet. Die Bezeichnung „Neutrino“ wurde 1933 vom Italiener Enrico Fermi geprägt. Er bedeutet auf Italienisch „kleines Ungeladenes“.

Name

Details zum Tau-Neutrino

Name Tau-Neutrino

Bemerkung Gerade einmal vier Photos mit Teilchenspuren hatten Wissenschaftler in der Hand, als sie 2000 den Fund des Tau-Neutrinos ausriefen.

Masse Kleiner als $18.200 \text{ eV}/c^2$

Nachweis 2000

Elektrische Ladung 0

Starke Kraft Nein, da keine Farbladung

Elektromagnetische Kraft Nein, da keine elektrische Ladung

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Tau-Neutrino gehört damit zu den Fermionen.

Teilchenklassen Tau-Neutrinos gehören zu den Leptonen.

Siehe auch \triangleright Elektron-Neutrino \triangleright Emulsionsdetektor \triangleright Lepton \triangleright Materieteilchen \triangleright Myon-Neutrino \triangleright Neutrinos \triangleright Tauon

6.279 **Tauon** *

Fundamentales Teilchen des Standardmodells. Das Tauon ist mit dem Elektron verwandt und ebenso elektrisch negativ geladen, seine Masse ist 3.500-mal größer.

Lebensdauer und Zerfall Das Tauon kann auf zahlreiche Weise in andere Teilchen zerfallen. Daher hat es eine sehr kurze Lebensdauer von dreihundert millionstel billionstel Sekunden.

Nachweis und Entdeckung Das Tauon wurde 1975 von Martin Lewis Perl (*1927) und seinen Mitarbeitern entdeckt. Perl bekam im Jahr 1995 den Physik-Nobelpreis „für seine bahnbrechenden experimentellen Beiträge zur Physik der Leptonen, insbesondere für die Entdeckung des Tau-Leptons“.

Name Der Name Tauon, beziehungsweise der Buchstabe tau, stammt von dem griechischen Wort für Drittes (triton), weil das Tauon das dritte geladene elektronähnliche Teilchen ist.

Details zum Tauon

Name Tauon

Bemerkung Der griechische Buchstabe „tau“ für das dritte elektronähnliche Teilchen ist der Anfangsbuchstabe von triton (gr. für Drittes).

Masse $1.777 \text{ MeV}/c^2$

Nachweis 1975 von Martin Lewis Perl und Team

Elektrische Ladung -1**Lebensdauer** $2,9 \times 10^{-13}$ Sekunden**Starke Kraft** Nein**Elektromagnetische Kraft** Ja**Schwache Kraft** Ja**Gravitationskraft** Ja**Spin** 1/2, das Tauon gehört damit zu den Fermionen.**Teilchenklassen** Tauonen zählen zu den Leptonen.

▷ Elektron ▷ Lepton ▷ Materieteilchen ▷ Myon ▷ Tau-Neutrino

Siehe auch

Teilchen *

6.280

Grundlegender Begriff, mit dem Zutaten des Universums beschrieben werden.

Gerne wird sie „Teilchenphysik“ genannt – jene Wissenschaft, die den Zutaten des Universums auf die Schliche kommen soll. Doch wie viel hat das bizarre Benehmen von Elektronen und Quarks eigentlich noch mit dem von Teilchen gemein? Der Quantentheorie zufolge herzlich wenig – zumindest wenn man bei Teilchen an kleine Billardkugeln denkt. Vielmehr handelt es sich bei diesen Geschöpfen um die Eigenschaften von Quantenfeldern, die den ganzen Raum durchziehen.

Im Standard-Modell der Teilchenphysik unterscheidet man drei Teilchensorten:

Drei
Teilchensorten

- ▷ Materieteilchen,
- ▷ Wechselwirkungsteilchen und
- ▷ Higgs-Teilchen.

- ▷ Higgs-Teilchen ▷ Materieteilchen ▷ Quantenfeldtheorie ▷ Standardmodell
- ▷ Wechselwirkungsteilchen

Siehe auch

6.281 **Teilchenbeschleuniger** *

Maschinen, mit denen Physiker geladene Teilchen auf hohe Energien, nahezu Lichtgeschwindigkeit und dann zum Zusammenstoß mit anderen Teilchen bringen. In Teilchendetektoren untersuchen sie dann die Ergebnisse dieser Mini-Crashes, um den Rätself des Mikrokosmos auf die Schliche zu kommen.

Beschleunigerelemente

Teilchenbeschleuniger sind recht komplexe Maschinen, die aus vielen unterschiedlichen Elementen zusammengesetzt sind – darunter Magnete, Resonatoren, Vakuumpumpen und Teilchenquellen.

Siehe auch ▷ Kreisbeschleuniger ▷ Linearbeschleuniger ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit
▷ Teilchendetektor ▷ Teilchenphysikzentren

6.282 **Teilchenbeschleuniger weltweit** **

Zu den aktuell wichtigsten Teilchenbeschleuniger-Projekten zählen
▷ HERA bei DESY,
▷ LEP/LHC am CERN,
▷ das Tevatron am Fermilab sowie
▷ RHIC am BNL.

Siehe auch ▷ HERA ▷ LEP ▷ LHC ▷ SLC ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Tesla ▷ Tevatron

6.283 **Teilchendetektor** *

Mit Teilchendetektoren werden Teilchen nachgewiesen. Direkt geht es dabei nur selten zu Sache: Die meisten Teilchen verraten sich durch die Erzeugung elektrischer Ladungen entlang ihrer Bahnen oder durch das Anregen zur Lichtaussendung.

Typen Es gibt zahlreiche Typen von Teilchendetektoren, die jeweils auf unterschiedliche Aufgaben spezialisiert sind:
▷ Blaskammern, Nebelkammern, Emulsionen, Spurkammern (Vertexdetektoren, Drahtkammern Driftkammern, Proportionalkammern) zur Vermessung von Teilchenbahnen,
▷ Kalorimeter zu Vermessung von Energie,
▷ Photovervielfacher zum Nachweis von Photonen,
▷ Funkenkammern,
▷ Halbleiter-Detektoren,
▷ Szintillatoren,

▷ Tscherenkow-Detektoren.

In den Großdetektoren moderner Teilchenphysik-Experimente kommen unterschiedliche Detektortypen zum Einsatz.

▷ Blasenkammer ▷ Driftkammer ▷ Elektromagnetisches Kalorimeter ▷ Emulsionsdetektor ▷ Hadronisches Kalorimeter ▷ Kalorimeter ▷ Myonkammer ▷ Nebelkammer ▷ Spurkammer

Siehe auch

Teilchenfamilien *

6.284

Muster, nach dem die Teilchen im Standardmodell angeordnet sind. Das Standardmodell kennt drei Teilchenfamilien.

Die drei Familien des Standardmodells sind:

Drei Familien

- ▷ 1. Familie: Elektron, Elektron-Neutrino, Up-Quark und Down-Quark
- ▷ 2. Familie: Myon, Myon-Neutrino, Charm-Quark und Strange-Quark
- ▷ 3. Familie: Tauon, Tau-Neutrino, Top-Quark und Bottom-Quark

Wieso es genau drei Familien gibt, hat noch niemand herausgefunden. Wenn Sie also einen Tipp haben, nur zu! Wissenschaftler sind sich aber sehr sicher, dass es nur drei Familien mit leichten Neutrinos gibt. Dies haben Experimente am CERN und SLAC gezeigt.

Wieso 3?

Der Beleg, dass es nur drei Familien gibt

Am Beschleuniger LEP am CERN wurde mit großer Genauigkeit die Entstehung von Z s vermessen. Dazu ließ man Elektronen und Positronen bei Energien aufeinanderprallen, die in etwa der Masse des Z s entsprechen.

Die Häufigkeit für diese Reaktion kann theoretisch berechnet werden. Dabei fließt die Anzahl der Neutrinosorten ein. Die Rechnung deckt sich am besten mit den gemittelten Daten der vier LEP-Experimente, wenn man von drei (leichten) Neutrinosorten ausgeht.

▷ Standardmodell

Siehe auch

Teilchenpaket

6.285

In Teilchenbeschleunigern werden Teilchen in kleinen Paketen von meh-

reren Millionen bis Milliarden Teilchen beschleunigt. Zwischen diesen Paketen befinden sich lange Lücken.

Die englischsprachige Bezeichnung für Teilchenpaket lautet „bunch“.

Siehe auch ▷ Teilchenbeschleuniger

6.286 Teilchenphysikzentren **

Um immer tiefer in die Welt des Allerkleinsten vorzudringen, muss die moderne Teilchenphysik immer größeren Aufwand betreiben. Daher ist es nicht verwunderlich, dass man die Anstrengungen in weltweiten Zentren konzentriert.

Zu den renommiertesten zählen:

- ▷ BNL
- ▷ CERN
- ▷ DESY
- ▷ Fermilab
- ▷ KEK
- ▷ SLAC

Siehe auch ▷ BNL ▷ CERN ▷ DESY ▷ Fermilab ▷ KEK ▷ SLAC ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit

6.287 Teilchenquellen **

Bestandteil eines Teilchenbeschleunigers.

Elektronenquellen

Freie Elektronen zu erzeugen, ist fast ein Kinderspiel. In der Regel reicht es hier schon aus, einen Draht zu erhitzen oder mit Licht zu bescheinen. Die Elektronen treten dann freiwillig heraus und können mit einem elektrischen Feld vom Draht weg beschleunigt werden. In manchen Fällen kann man sich Hitze und Licht auch sparen und saugt die Elektronen mit einem starken elektrischen Feld heraus.

Protonenquellen

Aufwendiger ist da schon die Herstellung von Protonen. Bei DESYs Beschleuniger HERA kam dazu ein handelsübliches Wasserstoffgas aus einer Stahlflasche zum Einsatz. Bevor jedoch aus den Wasserstoff-Molekülen Protonen werden, bleibt noch einiges zu tun: Zunächst wird das Gas in seine Atome gespalten und mit zusätzlichen Elektronen elektrisch aufgeladen. Das Ergebnis sind negative Wasserstoff-Ionen, die nun beschleunigt werden können: zunächst auf 750.000 Elektronenvolt, danach in einem kleinen Linearbeschleuniger (LINAC III, Länge:

32 Meter) auf 50 Millionen Elektronenvolt. Am Ende des Linearbeschleunigers prallen die Teilchen auf eine dünne Aluminiumfolie. Dabei legen sie ihre Elektronen ab. Das Resultat sind positiv geladene Wasserstoff-Ionen, also Protonen.

Um Positronen zu erzeugen, werden bei HERA zunächst Elektronen auf 300 Millionen Elektronenvolt beschleunigt und dann auf ein Stück Wolfram geschossen. Dabei werden die Elektronen abgebremst und strahlen Photonen ab. Aus diesen Photonen können sich nach den Gesetzen der Quantenphysik wieder Elektron-Positron-Paare bilden. Jetzt gilt es nur noch, mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Feldern, die Spreu von den Positronen zu trennen. Auf diese Weise entsteht bei einem Einsatz von 100 Elektronen nur ein Positron. Daher werden Positronen in einem kleinen Speicherring mit dem Namen PIA angesammelt. Von dort nehmen sie denselben Weg wie die Elektronen.

▷ Teilchenbeschleuniger

Positronenquelle

Siehe auch

Tesla **

6.288

Tesla ist die Einheit der magnetischen Flussdichte (, die oft mit der Stärke des magnetischen Feldes gleichgesetzt wird, sich in der Definition aber geringfügig davon unterscheidet).

Die Magnete, mit denen die Protonen im LHC auf einer Kreisbahn gehalten werden, erreichen eine magnetische Flussdichte von bis zu 9 Tesla, dies ist 100.000-mal stärker als das Erdmagnetfeld.

Beispiele

Tevatron **

6.289

Kreisbeschleuniger am Fermilab. Er beschleunigt Protonen und deren Antiteilchen auf insgesamt 2 Billionen Elektronenvolt. Das Tevatron wurde 1987 erbaut und hat einen Umfang von rund 6,3 Kilometern.

Experimente am Tevatron sind CDF und D0.

Zu den wichtigsten Forschungsergebnisse zählt die Entdeckung des Top-Quarks.

Experimente

Entdeckungen

▷ Fermilab ▷ Synchrotron ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit ▷ Top-Quark

Siehe auch

6.290 **Theorie** **

Zu Theorien fassen Wissenschaftler ihre Annahmen und Folgerungen zusammen, mit denen sie ein Phänomen erklären und vorhersagen wollen.

Mithilfe von Experimenten überprüfen dann (meist andere) Wissenschaftler, ob die Folgerungen richtig sind, ob beispielsweise das Auseinanderbersten eines Protons, wenn man es mit einem Elektron beschieß, richtig vorhergesagt wurde.

Theorie und Experiment

Die Welt der Physiker ist in zwei Lager geteilt: Theoretiker und Experimentatoren. Zusammen haben sie es nicht immer leicht: Die neuesten Theorien der Theoretiker sind viel zu kompliziert, als dass sie ein Experimentator sofort verstehen könnte, und die aktuellen Experimente der Experimentatoren sind so ausgefeilt, dass man besser alles daran setzen sollte, sie vor den Fingern der Theoretiker zu schützen.

Beide müssen jedoch eng zusammen arbeiten, wenn es darum geht, der Natur ihre kleinsten Geheimnisse zu entlocken. In einem wissenschaftlichen Pingpong wirft man sich gegenseitig Fragen zu, erntet Antworten, um dann wieder auf neue Fragen zu stoßen. Oder auf das schwedische Königspaar bei der Nobelpreisvergabe in Stockholm.

Siehe auch ▷ Experiment ▷ Standardmodell

6.291 **Thomson, John J. (1856–1940)** ***

Englischer Physiker. Sir Joseph John Thomson ist Entdecker des Elektrons.

Eckdaten Joseph John Thomson wurde am 18. Dezember 1856 in Cheetham Hill geboren. Er starb am 30. August 1940 in Cambridge.

Nobelpreis für Physik

Im Jahr 1906 erhält Thomson den Physik-Nobelpreis „in Anerkennung der außergewöhnlichen Verdienste, die er sich durch seine theoretischen und experimentellen Untersuchungen zur elektrischen Leitung durch Gase erworben hat.“

Siehe auch ▷ Elektron

6.292 **Tief-inelastische Streuung** **

Wenn Physiker beispielsweise mit Hilfe sehr energiereicher Elektronen

das Innere von Protonen erkunden, spricht man von tief-inelastischer Streuung.

▷ Gluon ▷ HERA ▷ Proton

Siehe auch

Titan-Sublimationspumpe ***

6.293

Vakuumpumpe, die zur Evakuierung von Teilchenbeschleunigern zum Einsatz kommt.

In dieser Pumpe werden Gasmoleküle chemisch gebunden. Dazu wird ein dicker Draht aus Titan durch einen starken Strom bei über 1300 Grad zur Weißglut gebracht. Das Titan verdampft dabei: Es sublimiert. Der Titan-Dampf kondensiert nun an den kälteren Wänden der Pumpe wie Wasserdampf an einer Fensterscheibe und kann dort mit den Luftmolekülen in der Pumpe reagieren: Gase wie Sauerstoff, Stickstoff oder Kohlendioxid werden so chemisch ans Titan gebunden. Mit einer Sublimationspumpe kann ein Vakuum mit einem Luftdruck erzeugt werden, der 100 Milliarden Mal kleiner ist als der normale Atmosphärendruck.

Funktionsweise

▷ Vakuumpolarisation ▷ Vakuumpumpe

Siehe auch

Top-Quark *

6.294

Fundamentales Teilchen des Standardmodells. Das Top-Quark ist eines der sechs Quarks. Das schwerste der fundamentalen Teilchen des Standard-Modells der Teilchenphysik wiegt fast so viel wie ein Goldatom. Daher verzögerte sich auch seine Entdeckung bis ins Jahr 1995.

Das Top-Quark ist das schwerste Elementarteilchen. Seine Masse beträgt $170.000 \text{ MeV}/c^2$. Dies entspricht fast der Masse eines Goldatoms. Die Masse der Quarks lässt sich nicht so leicht angeben wie die anderer Teilchen, weil Quarks immer nur in Gruppen und nie einzeln vorgefunden werden. Daher lässt sich nur aus der Masse der Gruppen auf die der Bestandteile schließen.

Masse

Die Lebensdauer des Top-Quark beträgt rund 6×10^{-25} Sekunden.

Lebensdauer

Erst im Jahr 1995 gab sich das Top-Quark als letztes der Quarks am Tevatron zu erkennen. Um es zu erzeugen, sind sehr hohe Energien nötig. Daher hatte der Fund so lange auf sich warten lassen.

Entdeckung

„Top“ ist Englisch für „auf der Höhe“, „oben“. Wie bei den Up-Quarks

Name

steht dies für den Wert des Isospins des Teilchens.

Details zum Top-Quark

Name Top-Quark

Bemerkung Das schwerste der fundamentalen Teilchen wiegt fast so viel wie ein Goldatom. Daher verzögerte sich seine Entdeckung.

Masse ca. 174.300 Millionen MeV/c^2

Nachweis Das Top-Quark wurde 1995 am Tevatron entdeckt

Elektrische Ladung $+2/3$

Lebensdauer 6×10^{-25} Sekunden

Starke Kraft Ja

Elektromagnetische Kraft Ja

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin $1/2$, das Top-Quark gehört damit zu den Fermionen.

Siehe auch ▷ Bottom-Quark ▷ Charm-Quark ▷ Down-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Quarks
▷ Strange-Quark ▷ Up-Quark

6.295 TOTEM **

TOTEM ist einer der kleineren Detektoren am Teilchenbeschleuniger LHC.

Bei TOTEM wird unter anderem die Größe des Protons untersucht sowie die Qualität der beschleunigten Teilchenpakete beobachtet (Luminosität). Das TOTEM-Experiment wird dazu in Vorwärtsrichtung gestreute und produzierte Teilchen untersuchen.

Ausmaße Am TOTEM-Experiment nehmen rund 50 Wissenschaftler teil, von 10 Instituten in 8 Ländern (Stand 2006).

Name Die Abkürzung „TOTEM“ steht für „TOTal Elastic and diffractive cross section Measurement“.

Siehe auch ▷ LHC ▷ Luminosität

Tscherenkow, Pawel A. (1904–1990) *** 6.296

Russischer Physiker. Pawel Alexejewitsch Tscherenkow ist Entdecker der nach ihm benannten Tscherenkow-Strahlung. Auf den Physiker geht auch die Idee zurück, damit einen Teilchendetektor zu bauen, den Tscherenkow-Detektor.

Pawel Alexejewitsch Tscherenkow wurde am 28. Juli 1904 in Naviai Chigla geboren. Er starb am 6. Januar 1990 in Moskau. Eckdaten

Im Jahr 1958 erhält Pawel A. Tscherenkow zusammen mit Ilja Michailowitsch Frank (1908–1990) und Igor Jewgenewitsch Tamm (1895–1971) den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung und Interpretation des Tscherenkow-Effekts.“ Nobelpreis für Physik

▷ Tscherenkow-Detektor ▷ Tscherenkow-Strahlung Siehe auch

Tscherenkow-Detektor *** 6.297

Tscherenkow-Detektoren sind Teilchendetektoren, die Tscherenkow-Strahlung zum Nachweis von Teilchen nutzen. Diese entsteht, wenn Teilchen schneller als das Licht unterwegs sind.

In einem Tscherenkow-Detektor wird die Öffnung des Überlichtkegels vermessen. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit des geladenen Teilchens ziehen: Je schneller das Teilchen, umso spitzer der Kegel. Funktionsweise

Tscherenkow-Detektoren sind auch in modernen Teilchenphysikexperimenten im Einsatz. Einsatz

▷ Teilchendetektor ▷ Tscherenkow-Strahlung ▷ Tscherenkow-Strahlung Siehe auch

Tscherenkow-Strahlung *** 6.298

Tscherenkow-Strahlung entsteht, wenn sich Teilchen in einem Material schneller als das Licht in diesem Material bewegen.

Dass nichts schneller sein kann als Licht, gilt nämlich nur im Vakuum. In dichteren Stoffen – wie beispielsweise Wasser – kann Licht von Teilchen überholt werden. Elektrisch geladene Teilchen erzeugen dann Tscherenkow-Strahlung: Wie bei einem Überschallflugzeug, das die Schallmauer durchbrochen hat, entsteht ein Überlichtkegel. Schneller als Licht?

Wie kommt es zur Tscherenkow-Strahlung?

Durchfliegt ein elektrisch geladenes Teilchen Materie, so werden deren Atome zu elektrischen (Dipol-)Schwingungen angeregt: Die Atome strahlen entlang ihrer gesamten Bahn elektromagnetische Wellen ab. Wenn nun die Geschwindigkeit des erregenden Teilchens kleiner ist als die des Lichts, heben sich die Wellen gegenseitig auf. Überlichtschnelle Teilchen bringen diese Rechnung jedoch durcheinander: Unter dem Strich bleibt die Tscherenkow-Strahlung übrig.

Anhand der Tscherenkow-Strahlung ist es möglich, Teilchen zu identifizieren. Dies geschieht mithilfe so genannter Tscherenkow-Detektoren.

Wie weit ist der Tscherenkow-Kegel?

Für den Öffnungswinkel a eines Tscherenkow-Kegels gilt: $\sin(a) = c'/v$, wobei c' die Lichtgeschwindigkeit im Medium ist und v die Geschwindigkeit des Teilchens.

Siehe auch ▷ Lichtgeschwindigkeit ▷ Pawel A. Tscherenkow (1904–1990) ▷ Tscherenkow-Detektor

6.299 T-Spiegelung ***

Nach einer T-Spiegelung läuft die Zeit (engl.: time) in umgekehrte Richtung: Aus dem Morgen wird das Gestern.

Siehe auch ▷ CPT-Theorem ▷ C-Spiegelung ▷ P-Spiegelung ▷ Symmetrie

6.300 Turbomolekularpumpe ***

Vakuumpumpe, die zur Evakuierung von Teilchenbeschleunigern zum Einsatz kommt.

Funktionsweise Die Turbo-Molekularpumpe, eine Erfindung aus dem Jahre 1958, funktioniert wie ein Ventilator. Bei diesem Staubsauger für Gasmoleküle erreichen die hochtourigen Schaufelblätter fast Schallgeschwindigkeit. Sie geben den Gasmolekülen einen kräftigen Stoß und befördern sie so nach außen. Auf diese Weise lässt sich ein Luftdruck von einem

Milliardenstel des Atmosphärendrucks erreichen. Damit Turbomolekularpumpen richtig funktionieren, muss der Luftdruck zuvordurch eine andere Pumpe, z.B. eine Scrollpumpe, erniedrigt worden sein.

▷ Vakuumpolarisation ▷ Vakuumpumpe

Siehe auch

Undulator **

6.301

Magnetanordnung zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung.

Wenn es Physiker auf die Erzeugung von Synchrotronstrahlung anlegen, dann verwenden sie bestimmte Magnetstrukturen, mit denen sie beschleunigte Elektronen auf einen Slalomkurs zwingen. Bei diesen Strukturen handelt es sich um Undulatoren und Wiggler.

Einsatz

Ein Undulator besteht aus einer Folge von Magnetten, die in abwechselnder Nord-Süd-Ausrichtung hintereinander geschaltet sind. Da sich Elektronen in einem Magnetfeld auf einer Kreisbahn bewegen, geraten sie in einem Undulator auf eine wellenförmige Bahn. Die Lichtausendung beruht auf demselben Prinzip, der auch bei Sendeantennen zur Abstrahlung elektromagnetischer Wellen führt. Auch dort bewegen sich elektrische Ladungen hin und her. Es gibt jedoch einen wesentlichen Unterschied zur herkömmlichen Sendeantenne: Beim Undulator müssen aufgrund der hohen Elektronenenergie Effekte der speziellen Relativitätstheorie berücksichtigt werden. Das Ergebnis ist Synchrotronstrahlung, die extrem zielgerichtet, einfarbig und um ein Vielfaches intensiver ist als im spontan erzeugten Fall.

Aufbau und Funktionsweise

▷ Beschleunigermagnete ▷ Synchrotronstrahlung ▷ Wiggler

Siehe auch

Universum **

6.302

Das Universum ist die mit Teilchen und Energie gefüllte Raumzeit.

Für das Alter des Universums geben neueste Ergebnisse den Wert 13,7 Milliarden Jahr an. Dies ergaben im Jahr 2003 veröffentlichte Messungen der Raumsonde „Microwave Anisotropy Probe“, welche von der NASA zwischen Erde und Mond geparkt war.

Alter

Was in diesen 13,7 Milliarden Jahren alles geschah, zeigt die folgende Übersicht:

Eine kurze Geschichte des Universums

- ▷ **Der Urknall** (0 Sekunden) Aufgrund des Auseinanderdriftens der Galaxien lässt sich vermuten: Vor knapp 13,7 Milliarden Jahren war das Universum in einem einzigen Punkt vereint und damit noch

unendlich mal kleiner als eine Wasserstoffatom. Daher kann es zu Beginn nicht nur keine Atome geben, auch für unterschiedliche Teilchentypen und Kräfte ist kein Platz.

- ▷ **Die Planck-Ära** (0 Sekunden bis ca. 10^{-43} Sekunden) Über die allerersten Momente im Leben des Universums ranken viele Geheimnisse. Vermutungen gibt es schon, aber die heutigen Theorien lassen sich nicht ohne weiteres auf diese erste Ära anwenden. Alle vier Wechselwirkungen sind wohl zu einer Urkraft vereint.
- ▷ **Die Vereinigte Ära** (ca. 10^{-43} Sekunden bis 10^{-12} Sekunden) Das Universum ist immer noch rund eine Billion Billion Mal kleiner als ein Wasserstoffatom. Die Schwerkraft ist aber bereits flügge geworden und hat sich von den anderen Kräften losgesagt. Doch es ist immer noch so heiß, dass elektromagnetische, schwache und starke Kraft als eine einzige Kraft auftreten. Mit den GUTs (Grand Unified Theories, Große Vereinigte Theorien) gibt es Ansätze, die diese Große Vereinigung der Kräfte beschreiben. Sie stecken aber – wie das Universum, das sie beschreiben – in den Kinderschuhen. In der Vereinigten Ära könnten sich Prozesse abgespielt haben, die dafür sorgten, dass es zu einem Überschuss an Materie gegenüber Antimaterie gekommen ist.
- ▷ **Die Quark-Gluon-Ära** (ca. 10^{-12} Sekunden bis 10^{-7} Sekunden) Die Große Vereinigung bricht zusammen: Die starke Kraft löst sich von der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung. Quarks bilden mit den Gluonen ein so genanntes Quark-Gluon-Plasma.
- ▷ **Die Leptonen-Ära** (ca. 10^{-7} Sekunden bis eine Sekunde) Die schwache und die elektromagnetische Kraft gehen unterschiedliche Wege. Nun stehen zum ersten Mal alle vier Wechselwirkungen des Standard-Modells getrennt auf der Bühne. Es entstehen Elektronen und Neutrinos. Erst jetzt bildet sich eine Eigenschaft heraus, die wir Masse bezeichnen.
- ▷ **Die Nukleonen-Ära** (ca. eine Sekunde bis 10 Sekunden) Quarks finden sich zu Verbänden wie Protonen und Neutronen zusammen, den Nukleonen. Auch deren Antipartner entstehen. Im Vernichtungskampf der Nukleonen siegt die Materie, weil es einen leichten Materie-Überschuss gibt.
- ▷ **Die große Vernichtung** (ca. 10 Sekunden bis 3 Minuten) Fast alle Elektronen und Positronen vernichten sich gegenseitig. Es überlebt nur der kleine Elektronenrest, aus dem unser Universum besteht. Die Energie der Neutrinos ist so weit abgefallen, dass die Teilchen

kaum noch die Kraft haben, mit den anderen Teilchen schwach wechselzuwirken.

- ▷ **Die Kern-Ära** (ca. 3 Minuten bis 300.000 Jahre) Die ersten Atomkerne bilden sich aus den Neutronen und Protonen, zunächst die der leichten Elemente Wasserstoff und Helium.
- ▷ **Die Struktur-Ära** (ab rund 300.000 Jahren) Es bilden sich räumliche Unregelmäßigkeiten, aus denen später Galaxien und Galaxienhaufen hervorgehen werden.
- ▷ **Die Atom-Ära** (rund 300.000 bis 1 Milliarde Jahre) Nach 300.000 Jahren ist die Temperatur des Universums auf rund 3.000 Kelvin abgefallen. Erst jetzt sind Atome stabil, das heißt Atomkerne können Elektronen dauerhaft einfangen. Photonen werden nun nicht mehr von den zahlreichen Elektronen abgelenkt: Das Universum wird zum ersten Mal mehr oder weniger durchsichtig.
- ▷ **Die Galaxien-Ära** (rund 1 Milliarde Jahre nach dem Urknall bis kurz vor heute) Atome und Atomkerne finden sich zu Sonnen zusammen und verschmelzen. Es bilden sich Galaxien und Planeten.
- ▷ **Das Jetzt** (13,7 Milliarden Jahre nach dem Urknall) Auf einem blauen Planeten hat sich Leben entwickelt, das in der Lage ist Mutmaßungen über die ersten Momente des Universums anzustellen.
- ▷ GUT ▷ Kosmologie ▷ Nukleosynthese ▷ Standardmodell ▷ Urknall

Siehe auch

Unschärfebeziehung ***

6.303

Bei den Unschärfebeziehungen handelt es sich um wichtige Gleichungen der Quantentheorie, nach der Ort und Impuls eines Teilchens nicht beide beliebig exakt bestimmt werden können. Dasselbe trifft auch auf Energie und Zeit zu.

Die Unschärfebeziehung wurde 1927 von Werner Heisenberg aufgestellt.

Die Größe der Unschärfe

Man kann genau angeben, wie groß die Unbestimmtheit bei der Messung einer quantentheoretischen Größe ist.

Für die Unschärfe zwischen dem Ort x und dem Impuls p gilt:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Für die Unschärfe von der Energie E und der Zeit t gilt:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Siehe auch \triangleright Quantenmessung \triangleright Quantentheorie \triangleright Quantenzustand \triangleright Werner Heisenberg (1901–1976)

6.304 Up-Quark *

Fundamentales Teilchen. Das Up-Quark ist eines der sechs Quarks. Aus Up- und Down-Quarks sind die Bestandteile der Atomkerne, die Protonen und Neutronen, zusammengesetzt.

Masse Die Masse des Up-Quarks entspricht etwa $3 \text{ MeV}/c^2$ und ist damit rund sechsmal größer als die des Elektrons. Die Masse der Quarks lässt sich nicht so leicht angeben wie die anderer Teilchen, weil Quarks immer nur in Gruppen und nie einzeln vorgefunden werden. Daher lässt sich nur aus der Masse der Gruppen auf die der Bestandteile schließen.

Nachweis und Entdeckung Up-Quarks wurden 1964 von Murray Gell-Mann und George Zweig vorhergesagt und 1969 experimentell bestätigt.

Lebensdauer Ein hypothetisch freies Up-Quark würde unendlich lange existieren.
Name „Up“ ist Englisch für „hoch“, „nach oben“. Der Name beruht auf einer physikalischen Größe, die den Quarks zugeschrieben wird: dem Isospin. Diese Größe kann man sich als Pfeil vorstellen, der nach oben oder nach unten zeigen kann. Im Falle des Up-Quarks zeigt er nach oben. Und beim Down-Quark nach unten.

Details zum Up-Quark

Name Up-Quark

Bemerkung In seiner Partnerschaft mit dem Down-Quark steht das Up-Quark oben (down: engl. für hinunter, up: engl. für hinauf)

Masse ca. $3 \text{ MeV}/c^2$

Elektrische Ladung $+2/3$

Nachweis Up-Quarks wurden 1964 von Murray Gell-Mann und George Zweig vorhergesagt und 1969 experimentell bestätigt.

Lebensdauer Ein hypothetisch freies Up-Quark würde unendlich lange existieren.

Starke Kraft Ja

Elektromagnetische Kraft Ja

Schwache Kraft Ja

Gravitationskraft Ja

Spin 1/2, das Down-Quark gehört damit zu den Fermionen.

▷ Bottom-Quark ▷ Charm-Quark ▷ Down-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Neutron
▷ Proton ▷ Quarks ▷ Strange-Quark ▷ Top-Quark Siehe auch

Upsilon *** 6.305

Zusammengesetztes Teilchen. Das Upsilon ist eine Verbindung aus einem Bottom- und einem Anti-Bottom-Quark.

Das Upsilon, und damit das Bottom-Quark, wurde 1977 von Leon Ledermann und Team am Fermilab entdeckt. Entdeckung

Details zum Upsilon

Name Upsilon

Entdeckung 1977 von L. Ledermann und Team am Fermilab

Elektrische Ladung neutral

Masse $9.460 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer rund 0×10^{-20} Sekunden

Quarkinhalt Bottom- und Anti-Bottom-Quark

Teilchenklassen Das Upsilon gehört zu den Mesonen und damit zur Klasse der Hadronen.

▷ Mesonen ▷ Quarks Siehe auch

6.306 **Urknall** **

Der vermutete Beginn des Universums. Die Urknalltheorie kann elegant erklären, wieso sich das Universum ausdehnt. Danach ist es vor rund 14 Milliarden Jahren in einer gewaltigen Explosion entstanden. Temperatur und Dichte der Welt waren damals unendlich groß.

Siehe auch ▷ Allgemeine Relativitätstheorie ▷ Kosmologie ▷ Standardmodell ▷ Universum

6.307 **Vakuum** **

Umgangssprachlich ist das Vakuum ein Raum ohne Materie. Der Quantentheorie zufolge ist aber auch der leere Raum noch gefüllt.

Vakuum im
Alltag

Vakuum ist, wo nichts ist. Wenigstens meinten dies die alten Römer; denn das lateinische „vacuus“ bedeutet „leer“. Vakuumtechniker packt bei dieser Definition die Ehrfurcht, denn eine solche Leere kann selbst mit den besten Vakuumpumpen nicht erreicht werden. Und auch das Vakuum im Universum ist nicht perfekt. Es beinhaltet immer noch einige Wasserstoffmoleküle pro Kubikmeter. So lautet dann auch die Deutsche Industrienorm 28400 sinngemäß und eher bescheiden: „Vakuum entspricht dem Druckbereich unterhalb des Atmosphärendrucks.“ Oder eben: verdünnte Luft.

Vakuum in der
Quantentheorie

Quantentheoretisch ist sowieso mal wieder alles ganz anders. Hier versteht man unter einem Vakuum den Zustand eines Feldes mit der niedrigsten Energie. Nach der Quantentheorie ist das Vakuum nicht leer, sondern besteht aus einer Unzahl laufend entstehender und schnell vergehender virtueller Teilchen.

Siehe auch ▷ Vakuumpolarisation ▷ Vakuumpumpe ▷ Virtuelle Teilchen

6.308 **Vakuumpolarisation** ***

Phänomen, bei dem sich geladene virtuelle Teilchen im Quantenvakuum ausrichten. Dies kann die jeweilige Ladung abschwächen oder verstärken.

Siehe auch ▷ Vakuum ▷ Virtuelle Teilchen

Vakuumpumpe ***

6.309

Teilchenphysiker sind auf ein gutes Vakuum in Teilchenbeschleunigern bedacht. Denn sie sind zwar an Zusammenstöße von Teilchen interessiert, aber bitte nicht mit Luftmolekülen!

Um Vakuum zu erzeugen, wurden im Laufe der Zeit zahlreiche unterschiedliche Pumpentypen erfunden. Dabei pumpen Vakuumpumpen nicht Vakuum irgendwo rein, sondern Luft raus. Es lassen sich zwei Typen von Vakuumpumpen unterscheiden: Die einen schieben Luftmoleküle von einem Raum in einen anderen. Die anderen entledigen sich der lästigen Gasmoleküle, indem sie diese chemisch binden.

Funktionsweise

In der Beschleunigertechnik kommen unter anderem die folgenden Typen zum Einsatz:

Typen

- ▷ Scrollpumpen,
- ▷ Turbomolekularpumpen,
- ▷ Ionengetterpumpen und
- ▷ Titan-Sublimationspumpen.

Egal, wie lange eine Pumpe arbeitet – irgendwann hat sie ihre Grenze erreicht. Dann ist für sie aus dem zu evakuierenden Raum nichts mehr herauszuholen und das so genannte „Endvakuum“ erreicht. Will man ein besonders gutes Vakuum erreichen, so kann man verschiedene Vakuumpumpen hintereinanderschaltet.

Endvakuum

- ▷ Ionengetterpumpe ▷ Scrollpumpe ▷ Titan-Sublimationspumpe ▷ Turbomolekularpumpe ▷ Vakuum

Siehe auch

Vereinheitlichung **

6.310

Theoretiker sind danach bestrebt, unterschiedliche Phänomene mit denselben Mustern zu erklären. Insbesondere versuchen sie, die verschiedenen Wechselwirkungen auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen.

Maxwells Theorie des Elektromagnetismus vereinigte Elektrizität und Magnetismus. Die QFD vereinigt elektromagnetische und schwache Kraft zur elektroschwachen Wechselwirkung. In so genannten GUTs sollen elektroschwache und starke Kraft miteinander verschmolzen werden. Superstringtheorien haben sogar den Anspruch, auch die Gravitationskraft mit ins Boot zu holen.

Beispiele

- ▷ Elektromagnetismus ▷ Elektroschwache Theorie ▷ GUT ▷ Superstringtheorie
- ▷ Supersymmetrie

Siehe auch

6.311 **Vertexdetektor** **

Vertex-Detektoren sind Teilchendetektoren mit besonders hoher Ortsauflösung. In Großdetektoren befinden sie sich dicht am Strahlrohr, um beispielsweise zu vermessen, wo sich der Zusammenprall der Teilchen ereignet hat.

Siehe auch \triangleright Teilchendetektor

6.312 **Virtuelle Teilchen** **

Ein Teilchen heißt virtuell, wenn es nicht direkt beobachtet werden kann, weil seine Energie für nur kurze Zeit geborgt wurde.

Wechselwirkungsteilchen sind oft virtuell, es sei denn die Energie in Beschleunigern reicht für die Produktion reeller Teilchen aus.

Die Reichweite und Lebensdauer von virtuellen Teilchen

Nach der über die Heisenbergsche Unschärfebeziehung kann der Energiebetrag ΔE für die Zeitspanne Δt geborgt werden, wenn gilt:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

wobei h das Plancksche Wirkungsquantum und damit eine sehr kleine Zahl darstellt.

Nach Einsteins Relativitätstheorie beträgt die Energie eines Teilchens mit der Masse m :

$$E = mc^2$$

Damit kennen wir die Energie, die geborgt werden muss. Setzen wir die beiden Gleichungen ineinander ein und lösen nach der Zeit auf, so ergibt sich:

$$\Delta T \geq \frac{h}{4\pi mc^2}$$

Da das Teilchen nicht schneller als das Licht im Vakuum sein kann, legt es in dieser Zeit maximal die folgende Strecke zurück:

$$\Delta r = c\Delta t \geq \frac{h}{4\pi mc}$$

Bei masselosen Teilchen ist die Reichweite daher beliebig groß. Aufgrund der hohen Masse der Ws und Zs, hat die schwache Kraft einen recht kurzen Atem.

▷ Feynman-Diagramme ▷ Vakuum

Siehe auch

W *

6.313

Fundamentale Wechselwirkungsteilchen der schwachen Kraft.

Über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen mit Namen W-Plus und W-Minus (sowie der Z) wird das Zustandekommen der schwachen Kraft erklärt. Es gibt eine positive und negative Version des W. Beide Teilchen wiegen rund 80-mal so viel wie ein Proton. Diese große Masse ist ein Grund für die Schwäche der schwachen Kraft.

Details

Ws können in zahlreiche andere Teilchen zerfallen und tun dies nach rund 0,3 Billionstel Billionstel Sekunden auch in kürzester Zeit.

Zerfall

Der Buchstabe „W“ leitet sich von der ursprünglichen Bezeichnung „Weakon“ ab („weak“ ist die englische Bezeichnung für schwach).

Name

Die beiden Ws wurden 1968 durch die Theorie der elektroschwachen Vereinigung vorhergesagt und 1983 am CERN entdeckt.

Entdeckung

Details zu den Ws

Elektrische Ladung +1 bzw. -1 der Elementarladung

Schwache Ladung ja

Farbladung nein

Masse $80.403 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer 3×10^{-25}

Spin 1 (damit zählen die Ws zu den Bosonen)

▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell ▷ Wechselwirkungsteilchen ▷ Z

Siehe auch

6.314 **Wechselwirkung** *

Wechselwirkung liegt immer vor, wenn zwischen zwei Dingen etwas passiert. Die moderne Physik unterscheidet dabei vier fundamentale Kräfte.

Vier Kräfte Auch Elementarteilchen wechselwirken unterschiedlich und lassen sich auf diese Weise unterscheiden. Physiker haben dabei vier unterschiedliche Kräfte ausgemacht. Ob man dabei „Kraft“ oder „Wechselwirkung“ sagt, ist jedem frei gestellt:

1. Quarks haften über die starke Kraft zusammen.
2. Elektrisch geladene Teilchen üben Kräfte über die elektromagnetische Kraft aufeinander aus.
3. Und über die schwache Kraft können Teilchen unter anderem ihren Typ ändern. Dann wird beispielsweise aus einem Elektron ein Neutrino, oder aus einem Charm-Quark ein Down-Quark.
4. Teilchen mit Masse ziehen sich über die Gravitationskraft an.

Wechselwirkungsteilchen

Im Standardmodell der Teilchenphysik wird das Zustandekommen der Wechselwirkungen über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen beschrieben.

Siehe auch ▷ Elektromagnetismus ▷ Gravitationskraft ▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell
▷ Starke Kraft ▷ Wechselwirkungsteilchen

6.315 **Wechselwirkungsteilchen** *

Das Zustandekommen von Wechselwirkungen wird im Standard-Modell der Teilchenphysik durch den Austausch von Wechselwirkungsteilchen beschrieben: Photonen, W_s , Z_s und Gluonen.

Siehe auch ▷ Gluon ▷ Graviton ▷ Photon ▷ Standardmodell ▷ Teilchen ▷ W ▷ Wechselwirkung ▷ Z

6.316 **Weinberg, Steven (*1933)** ***

Amerikanischer Physiker. Steven Weinberg hat bedeutende Arbeiten zur Kosmologie und Teilchenphysik verfasst. Mit Abdus Salam und Sheldon Lee Glashow entwickelte er die elektroschwache Vereinigung.

Eckdaten

Nobelpreis für Physik

Steven Weinberg wurde am 3. Mai 1933 in New York geboren. Die drei Physiker Sheldon Lee Glashow (*1932), Abdus Salam (1926-1999) und Steven Weinberg (*1933) erhielten 1979 der Physik-Nobelpreis

„für ihre Beiträge zu Theorie und Vereinheitlichung der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen, einschließlich u.a. der Vorhersage des schwachen neutralen Stroms.“

▷ Elektroschwache Theorie ▷ Quantenflavordynamik (QFD)

Siehe auch

Wellenfunktion ***

6.317

Möglichkeit, den Zustand eines Quants mathematisch zu beschreiben. Die Wellenfunktion eines Teilchens kann man mit Hilfe der Schrödinger-Gleichung berechnen.

Kennt man beispielsweise die Wellenfunktion zu einem Teilchen, so lässt sich damit die Wahrscheinlichkeit berechnen, das Teilchen zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort vorzufinden. Diese ergibt sich einfach aus dem Quadrat des Funktionswerts für die entsprechende Zeit und den entsprechenden Ort.

Wellenfunktion
und Wahrscheinlichkeit

▷ Erwin Schrödinger (1887–1961) ▷ Quantentheorie ▷ Quantenzustand ▷ Welle-Teilchen-Dualismus

Siehe auch

Wellenlänge **

6.318

Die Wellenlänge gibt den Abstand zweier Wellenberge einer an.

Die Wellenlänge von Licht liegt in einem Bereich zwischen 0,38 und 0,78 Tausendstel eines Millimeters (380 bis 780 Nanometer). Sie ist damit rund hundertmal kleiner als die Dicke eines menschlichen Haares.

Wellenlänge von
Licht

Beziehung zwischen Wellenlänge und Frequenz

Die Frequenz f und Wellenlänge λ einer Welle sind über die folgende Beziehung mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Welle verknüpft: $c = \lambda f$

▷ Frequenz

Siehe auch

Welle-Teilchen-Dualismus **

6.319

Der Welle-Teilchen-Dualismus beschreibt ein Phänomen in der Quantentheorie, nach dem Quanten in Messungen zwar als Teilchen ding-

fest gemacht werden, ihre Ausbreitung jedoch mit Hilfe von Wellen beschrieben werden muss, wenn man nicht hinsieht.

Doppelspalt-
Experiment

Schießt man Elektronen auf einen Doppelspalt und versucht nicht herauszufinden, durch welchen der beiden Spalte die Elektronen gewandert sind, so entsteht ein Muster auf dem Schirm, das Physiker von einem Experiment kennen, bei dem man Licht statt Elektronen verwendet. Daher verwundert es auch nicht, dass ein Quantentheoretiker das Muster berechnet, indem er die Ausbreitung der Quanten mit Hilfe von Wellen beschreibt. Diese Wellen wandern durch beide Spalte zugleich und können sich an den Orten des Schirmes verstärken oder gegenseitig auslöschen. Wo sie sich auslöschen, wird man kein Quant messen. Wo sie sich verstärken, schlägt der Detektor besonders oft an. Dass die Quantenwellen durch beide Spalte zugleich wandern, mag Ihnen vielleicht nicht sonderlich behagen: Ein Elektron kann doch nicht durch zwei Spalte gleichzeitig gehen! Zu Ihrer Beruhigung: Niemand hat ein Elektron jemals durch zwei Spalte gleichzeitig wandern sehen. Die Quantentheorie *beschreibt* die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Quanten mit Hilfe von Wellen. Sie sagt nicht, dass es Wellen *sind*. Jede Klärung der Frage, durch welchen Spalt das Quant gewandert ist, würde das Wellenmuster sofort zerstören. Ein Quant erscheint uns immer wie ein Teilchen, wenn wir es direkt beobachten. In den Rechnungen befindet sich das Elektron gleichzeitig an unterschiedlichen Orten, es tanzt auf mehreren Hochzeiten gleichzeitig – aber nur, wenn wir nicht genauer hinschauen.

Siehe auch ▷ Louis Victor de Broglie (1892–1987) ▷ Quant ▷ Quantentheorie ▷ Quantenzustand

6.320 Weltformel **

Die einen nennen sie „Weltformel“, die anderen „allumfassende Theorie ohne freie Parameter“. Gemeint ist in beiden Fällen dasselbe: Ein Gedankengerüst, das die fundamentalen Bausteine des Universums und alle in ihm wirkenden Kräfte beschreibt.

Eine Formel?

Ob jedoch das ganze Sehnen und Suchen nach kompaktem Wissen eine einzige Formel zu Vorschein treten lassen wird, darf bezweifelt werden. Es wird vielmehr gleich ein ganzes Set an Konzepten sein, das Antworten auf folgende Fragen liefern werden: Aus welchen fundamentalen Objekten besteht das Universum? (Sind es nun punktförmige Teilchen,

wabernde Quantenfelder, schwingende Fäden oder etwas noch ganz anderes?) Und wie treten diese Objekte miteinander in Wechselwirkung?

▷ GUT ▷ Superstringtheorie ▷ Theorie ▷ Vereinheitlichung

Siehe auch

Wideröe, Rolf (1902–1996) ***

6.321

Norwegisch-schweizerischer Elektrotechniker und Physiker. Rolf Wideröe hat wichtige Arbeiten zur Teilchenbeschleunigung verfasst.

Unter anderem erfand Rold Wideröe das Betatron, entwickelte die Idee des Speicherrings und baute den ersten Linearbeschleuniger, der mit Wechselspannung betrieben wird.

Wirken

Rolf Wideröe wurde am 11. Juli 1902 in Oslo geboren. Er starb am 11. Oktober 1996 im schweizerischen Nussbaumen.

Eckdaten

▷ Betatron ▷ Linearbeschleuniger ▷ Speicherring ▷ Wideröe-Struktur

Siehe auch

Wideröe-Struktur ***

6.322

Einfacher Linearbeschleuniger.

Bei einer Wideröe-Struktur sind Driftröhren verschiedener Länge hintereinandergeschaltet. An den Driftröhren liegt eine Wechselspannung an. Die Länge der einzelenn Driftröhren ist dabei so gewählt, dass die durchfliegenden Teilchen immer zum richtigen Zeitpunkt beschleunigt werden.

▷ Linearbeschleuniger ▷ Rolf Wideröe (1902–1996)

Siehe auch

Wiggler **

6.323

Magnetstruktur zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung.

Bei einem Wiggler handelt es sich um eine Anordnung von Magneten, die in abwechselnder Nord-Süd-Ausrichtung hintereinander geschaltet sind. In ihnen werden Elektronen auf einen Slalomkurs gebracht, wodurch intensive Synchrotronstrahlung entsteht. Neben Wiggler werden auch Undulatoren zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung eingesetzt. Bei Wigglern ist das Magnetfeld jedoch stärker als bei Undulatoren. Dies führt zu einem weiter ausgedehnten Slalomkurs und damit zu Synchrotronstrahlung, die weniger zielgerichtet ist und mehr Farben enthält.

Aufbau und Funktionsweise

▷ Beschleunigermagnete ▷ Synchrotronstrahlung ▷ Undulator

Siehe auch

6.324 **WIMP** **

WIMPs sind hypothetische Teilchen, die die dunkle Materie erklären sollen.

Name WIMP steht für „weakly interacting massive particle“ (schwach wechselwirkendes schweres Teilchen), das englische Wort „wimp“ bedeutet auch „Schwächling“ oder „Weichei“.

Siehe auch ▷ Dunkle Materie ▷ Schwache Kraft

6.325 **Wirkungsquerschnitt** ***

Der Wirkungsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Reaktion bei einem Teilchenexperiment auftritt. Eine solche Reaktion könnte beispielsweise sein: Ein Elektron wird um 45 Grad nach oben abgelenkt.

Name Der Name ergibt sich daraus, dass der Wirkungsquerschnitt derjenigen Kreisfläche entspricht, die von einem Teilchen getroffen werden muss, um die Reaktion auszulösen. Je größer diese Fläche ist, umso leichter lässt es sich treffen.

Einheit Daher ist die Einheit des Wirkungsquerschnitts auch eine Fläche. Da die Wirkungsquerschnitte in der Teilchenphysik sehr klein sind, gibt man sie in Vielfachen der winzigen Fläche Barn ($10^{-28}m^2$) an.

Siehe auch ▷ Barn ▷ Ereignisrate ▷ Luminosität ▷ Streuexperiment

6.326 **Xi** ***

Xi-Teilchen bestehen wie Protonen aus drei Quarks. Die Teilchen kommen in zwei Ladungen daher: Als Xi-Minus und Xi-Null.

Lebensdauer und Zerfall Xi-Teilchen haben eine geringe Lebensdauer. Da sie über zwei Stufen in Protonen zerfallen, nennt man sie auch Kaskadenteilchen. Diese Zweistufigkeit hängt mit der Zusammensetzung der Teilchen aus zwei Strange-Quarks zusammen.

Entdeckung Die Xi-Teilchen wurden in den 1950er Jahren mit Hilfe großer Nebelkammern in den französischen Pyrenäen auf dem Pic du Midi in einer Höhe von 2.830 Metern entdeckt. Die Teilchen wurden in der kosmischen Höhenstrahlung gefunden.

Details zum negativen Xi-Teilchen

Name Xi-Minus

Entdeckung 1952 von L. Alvarez

Elektrische Ladung eine negative Elementarladung

Masse $1.321 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer $1,6 \times 10^{-10}$ Sekunden

Quarkinhalt Ein Down- und zwei Strange-Quarks

Teilchenklassen Das Xi-Minus gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

Details zum neutralen Xi-Teilchen

Name Xi-Null

Entdeckung 1959 von R. Armenteros und Team

Elektrische Ladung keine

Masse $1.315 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer 3×10^{-10} Sekunden

Quarkinhalt Ein Up- und zwei Strange-Quarks

Teilchenklassen Das Xi-Minus gehört zu den Baryonen und damit zur Klasse der Hadronen.

▷ Baryonen ▷ Quarks

Siehe auch

Z *

6.327

Fundamentales Wechselwirkungsteilchen der schwachen Kraft.

Über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen mit Namen Z (sowie der Ws) wird das Zustandekommen der schwachen Kraft erklärt. Zs sind elektrisch neutral und wiegen rund 90-mal so viel wie Protonen.

Details

Diese große Masse ist ein Grund dafür, dass die schwache Kraft nur über eine geringe Reichweite verfügt.

Zerfall Zs können in zahlreiche andere Teilchen zerfallen und tun dies nach rund 0,3 Billionstel Billionstel Sekunden auch.

Vorhersage und Entdeckung Das Z wurde 1968 durch die Theorie der elektroschwachen Vereinigung vorhergesagt und 1983 am CERN entdeckt.

Details zum Z

Elektrische Ladung nein

Schwache Ladung ja

Farbladung nein

Masse $91.188 \text{ MeV}/c^2$

Lebensdauer $2,7 \times 10^{-25}$ Sekunden

Spin 1 (damit zählen die Zs zu den Bosonen)

Siehe auch \triangleright Schwache Kraft \triangleright Standardmodell \triangleright W \triangleright Wechselwirkungsteilchen

6.328 Zehnerpotenz **

Kurzschreibweise für Zahlen, um Platz zu sparen und Übersicht zu schaffen.

10^n entspricht dabei einer 1 mit n Nullen. 10^{-n} entspricht dabei einer 0 gefolgt von einem Komma, (n-1) Nullen und dann einer 1.

6.329 Zeit **

Grundlegender Begriff, nach dem unsere Erfahrungen geordnet sind. Allgemein kann man Zeit als ein Phänomen auffassen, nach dem wir unser Erleben in eine „Vergangenheit“, eine „Gegenwart“ und eine „Zukunft“ aufteilen können.

Kant, Newton
und Einstein

Nach Immanuel Kant (1724–1804) sind Raum und Zeit tief in der Sinnlichkeit des Menschen verankert: Zeit und Raum existieren nicht an

sich, sondern dienen dem Menschen als Ordnungsraster. Isaac Newton (1643–1727) ging von einer absoluten Zeit aus. Danach gäbe es eine universelle Standarduhr, die gleichmäßig seit dem Beginn des Universums (dem Beginn der Zeit) tickt. Albert Einstein (1879–1955) zeigte mit seiner Relativitätstheorie, dass das Fortschreiten der Zeit abhängig ist vom Bewegungszustand und löst damit die Newtonsche Vorstellung an: Je schneller sich eine Uhr zu uns bewegt, umso langsamer läuft die Zeit darauf ab. Es gibt also zahlreiche Zeiten.

Wieso schreitet die Zeit von gestern in Richtung morgen vor? Warum nicht umgekehrt? Betrachtet man die Welt der Teilchenphysik, so könnte hier die Zeit auch rückwärts ablaufen, ohne dass sich Wesentliches an den Gesetzen ändern würde (Mit der CP-Verletzung gibt es Anzeichen, dass es auch in der Teilchenwelt einen leichten Hang zu einer der beiden Zeitrichtungen gibt.). In der Statistischen Physik sieht das schon anders aus: Hier nimmt die Unordnung der Welt mit fortschreitender Zeit zu. Ein zu Boden fallendes Glas wird zerspringen. Aus den Scherben wird sich aber niemals von sich heraus ein Glas zusammensetzen.

Bis 1955 nutzte man die Drehung der Erde um die eigene Achse, um die Länge einer Sekunde festzulegen, die als $1/86.400$ des mittleren Sonnentages definiert war. Bis 1967 ersetzte man diese Definition durch ein $31.556.925,9747$ -tel des Sonnenjahres, das am 31. Dezember 1899 mittags begann. Heute verzichtet man ganz auf Erde und Sonne, um die Einheit der Zeit festzusetzen. Man misst vielmehr die Frequenz (Schwingungen pro Sekunde) eines bestimmten Lichtes, das eine bestimmte Form von Cäsium-Atomen (Cs-133) ausstrahlt. Eine solche Schwingung dauert $1/9.192.631.770$ Sekunden.

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Allgemeine Relativitätstheorie ▷ Lichtgeschwindigkeit ▷ Raumzeit ▷ Spezielle Relativitätstheorie

Die Richtung der Zeit

Einheiten der Zeit

Siehe auch

Zeitdilatation **

6.330

Phänomen, nach dem die Zeit auf einer sich schnell bewegenden Uhr langsamer vergeht. Dieser Effekt wird von der speziellen Relativitätstheorie beschrieben, er tritt nur bei Geschwindigkeiten in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit spürbar zutage.

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Längenkontraktion ▷ Spezielle Relativitätstheorie

Siehe auch

6.331 **ZEUS** **

Teilchenphysikexperiment bei DESY, das unter anderem die Struktur des Protons erforscht. Das Experiment untersucht dazu Zusammenstöße von Elektronen mit Protonen, die in der Beschleunigeranlage HERA zum Zusammenstoß gebracht wurden.

Detektor Das ZEUS-Experiment nutzt den ZEUS-Detektor, der unterirdisch um den Kollisionspunkt der Teilchen angesiedelt ist. Er wiegt 3.600 Tonnen, hat eine Höhe von 12 Metern, ist 11 Meter breit und 20 Meter lang.

Geschichte Das Experiment ZEUS zeichnete von 1992 bis 2007 Zusammenstöße von Elektronen und Protonen auf. Bis weit über 2010 werden Forscher mit der Datenauswertung beschäftigt sein.

Siehe auch ▷ DESY ▷ H1 ▷ HERA ▷ HERMES ▷ Tief-inelastische Streuung

6.332 **Zweig, George (*1937)** ***

Amerikanischer Physiker und Neurobiologe. Im Jahr 1964 hat George Zweig unabhängig von Murray Gell-Mann die Existenz der Quarks vorhergesagt. Er nannte die Teilchen jedoch „aces“ (Asse).

Siehe auch ▷ Murray Gell-Mann (*1929) ▷ Quarks

6.333 **Zyklotron** **

Kreisförmiger Teilchenbeschleuniger.

Aufbau und
Funktionsweise

Das Zyklotron ist ein Kreisbeschleuniger, der aus zwei D-förmigen Kammern besteht. Zwischen diesen Kammern liegt eine wechselnde Beschleunigungsspannung an. Diese wird von elektrisch geladenen Teilchen immer wieder durchlaufen und kann diese mit jedem Umlauf weiter beschleunigen, weil die Teilchen durch ein Magnetfeld auf eine Spiralbahn gezwungen werden. Das Zyklotron kann nur bei nicht-relativistischen Teilchen verwendet werden (deswegen meist Protonen, keine Elektronen), weil es sonst zu Taktlosigkeiten kommt und die Beschleunigungsspannung nicht mehr in die richtige Richtung zeigt. Maschinen, die diesen Effekt ausgleichen, heißen Synchrozyklotrons. Bei ihnen ändert sich die Stärke des Magnetfelds mit der Zeit. Andere Weiterentwicklungen des Zyklotronprinzips kommen im Mikrotron und Betatron zum Einsatz.

In der Onlineversion findet sich an dieser Stelle ein animiertes oder interaktives Medium: Ein Elektron kreist in einem Zyklotron und wird immer schneller

Abbildung 6.2: Funktionsweise eines Zyklotrons.

Zyklotronfrequenz

Als Zyklotronfrequenz bezeichnet man die Frequenz, mit der ein elektrisch geladenes Teilchen in einem Zyklotron (oder einem anderen gleichförmigen Magnetfeld) seine Runden zieht. Sie ergibt sich, wenn man die Zentrifugalkraft mit der Lorentzkraft gleichsetzt:

$$F_Z = m\omega^2 R$$

$$\omega_z = 2\pi f = \frac{1}{m} B$$

1930 schlug Ernest Orlando Lawrence (1901–1958) das Prinzip des Zyklotrons erstmals vor und hielt Ende desselben Jahres das erste Exemplar in Händen. Es hatte einen Durchmesser von rund 9 Zentimetern und beschleunigte Protonen auf eine Energie von 80.000 Elektronenvolt.

Entwicklung und Einsatz

Energien, die man in einem Zyklotron erreichen kann

Gehen wir davon aus, dass sich die Geschwindigkeit der Teilchen noch weit unter der des Lichts bewegt. Dann gilt für die Bewegungsenergie:

$$W_{kin} = \frac{p^2}{2m}$$

Auf der anderen Seite gilt für die Bahn des Teilchens, dass Lorentzkraft und Radialbeschleunigung im Gleichgewicht sind:

$$F_{mag} = qvB = \frac{q}{m} pB$$

$$F_Z = \frac{mv^2}{R} = \frac{p^2}{mR}$$

$$p = qbR$$

$$W_{kin,max} = \frac{q^2 B^2 r_m}{2m}$$

Bei einem Proton, einem Magnetfeld von 1,6 Tesla und einem Zyklotronradius von 0,3 Meter ergibt dies beispielsweise 11 Millionen Elektronenvolt.

Siehe auch ▷ Betatron ▷ Ernest O. Lawrence (1901–1958) ▷ Kreisbeschleuniger ▷ Mikrotron
▷ Synchrotron ▷ Teilchenbeschleuniger

Zeitleiste

Der Urstoff: Wasser **

-600

Dem griechischen Philosophen, Mathematiker und Astronomen Thales aus Milet (um 625 bis 546 v. Chr.) zufolge ist der Ursprung der Welt recht nass: Aus Wasser entspringt alles und alles fließt auch wieder in Wasser zurück.

Dagegen ist die Beschreibung der Welt durch die Quantentheorie eher trocken, selbst wenn Teilchen darin teilweise als Wellen beschrieben werden.

Vier Elemente: Feuer, Wasser, Erde, Luft **

-450

Dem griechischen Philosophen Empedokles (um 483 bis etwa 425 v. Chr.) zufolge besteht die Welt aus den vier Elementen Wasser, Feuer, Luft und Erde. Auf diese vier Bausteine wirken die beiden Urkräfte Liebe und Hass und geben ihnen Gestalt. Zu Beginn der Welt regierte die Harmonie: Denn alles war voller Liebe. Wasser, Feuer, Luft und Erde waren untrennbar vereint.

Auch die moderne Physik geht davon aus, dass die Bausteine des Universums zu Beginn der Welt untrennbar miteinander verschmolzen waren.

Geburt der Atomidee *

-400

Der Grieche Demokrit (um 460 bis ca. 370 v. Chr.) und sein Lehrer Leukipp entwickeln die Idee, dass das Universum aus leerem Raum und unsichtbaren, unzerstörbaren Teilchen bestehe. Das griechische Wort „atomos“ bedeutet unteilbar.

In der heutigen Teilchenphysik wird davon ausgegangen, dass Elektronen, Neutrinos und Quarks unteilbar sind. Diese können sich aber ineinander umwandeln und sind damit nicht wirklich unzerstörbar.

263 **Berechnung von Pi** ***

Um 263 n. Chr. ermittelt der chinesische Mathematiker Liu Hui einen auf fünf Nachkommastellen exakten Wert der Kreiszahl Pi: 3,14159. Dafür berechnet er den Umfang eines regelmäßigen 3.072-Ecks. Ende 2002 schaffen es Supercomputer auf 1,24 Billionen Stellen. Die ersten fünf Nachkommastellen ändern sich dabei nicht.

In den Formeln des Standardmodells der Teilchenphysik erscheint die Kreiszahl Pi an allen Ecken.

1300 **Erste mechanische Uhr** **

Erste Belege für mechanische Uhren stammen aus dem Europa des 14. Jahrhunderts. Diese Uhren werden von Gewichten angetrieben.

Im 20. Jahrhundert werden Teilchen gesichtet, die nur für den billionstel billionstel Teil einer Sekunde existieren. In dieser winzigen Zeitspanne legt Licht nur einen Bruchteil der Ausmaße eines Atomkerns zurück. Diese Zeiten lassen sich selbst mit modernsten Uhren nicht direkt messen. Auf sie kann aber in Teilchenphysikexperimenten über die Zerfallsart der Teilchen indirekt geschlossen werden.

1514 **Kopernikanische Wende** **

Der polnische Astronom Nikolaus Kopernikus (1473–1543) entwickelt ein Modell, nach dem die Erde um die Sonne kreist. Dieses Modell löst das Weltbild von Ptolemäus (um 100 bis ca. 160 n. Chr.) ab, in dem die Erde noch den Mittelpunkt der Welt bildet. 1609 verfeinert der deutsche Astronom und Naturphilosoph Johannes Kepler (1571–1630) Kopernikus Idee. In seiner *Astronomia Nova* erklärt er die Beobachtungen am Himmel damit, dass sich die Planeten auf Ellipsen und nicht auf Kreisen um die Sonne bewegen.

In den ersten einfachen Atommodellen kreisen Elektronen auf ähnlichen Bahnen um den Atomkern, wie es die Planeten um die Sonne tun. Mit dem Aufkommen der Quantentheorie wird jedoch alles komplizierter.

1590 **Erstes Mikroskop** **

Der Bau des ersten zusammengesetzten Mikroskops wird dem holländischen Brillenmacher Hans Janssen samt Sohn Zacharias zugeschrieben.

Dass man Kleines ganz groß machen kann, wenn man Vergrößerungslinsen hintereinander schaltet, ist jedoch schon länger bekannt.

Heute werden Teilchen vermessen, die kleiner als ein millionstel milliometer groß sind. Mit optischen Mikroskopen wird man sie nie zu Gesicht bekommen. Selbst die modernen Vergrößerungsapparate der Teilchenphysiker in Form hochhausgroßer Teilchendetektoren können bei Elektronen, Neutrinos und Quarks keine Ausdehnung festmachen.

Newton's Prinzipien ***

1687

Das Buch *Philosophiae naturalis principia mathematica* revolutioniert die Physik. Darin erläutert Sir Isaac Newton (1643–1727) die Grundgleichungen der Bewegung und liefert auch noch gleich sein Gravitationsgesetz mit dazu.

Newtons Arbeiten sind so umfangreich, dass es im Jahrhundert nach der *Principia* nur wenige Beiträge zur Physik gibt, die der Rede wert sind. Heute weiß man jedoch: Newtons Aussagen gelten nur bei kleinen Energien und nicht allzu winzigen Objekten. Bei hohen Energien werden Newtons Gesetze durch die der Relativitätstheorie abgelöst, bei kleinen Objekten kommt die Quantentheorie ins Spiel. Eine Lehre: Wissenschaftler können niemals sicher sein, dass es nicht doch noch eine bessere Theorie gibt.

Atombeweis **

1803

Der Brite John Dalton (1766–1844) findet heraus, dass chemische Elemente nur in bestimmten Verhältnissen Verbindungen eingehen: So bildet sich beispielsweise Wasser immer aus zwei Teilen Wasserstoff und einem Teil Sauerstoff. Aus dieser Tatsache folgert Dalton, dass es Atome als kleinste Bausteine chemischer Elemente geben müsse.

Mittlerweile weiß man: Diese chemischen Atome sind aus Elektronen und Quarks aufgebaut.

James C. Maxwell ***

1831-1879

Britischer Vereiniger von Elektrizität und Magnetismus: James Clerk Maxwell stellt 1861 bis 1864 eine Theorie auf, die alle Phänomene der Elektrizität und des Magnetismus beschreibt. Die elektromagnetische Kraft geht über hundert Jahre später im Standardmodell der Teilchenphysik als eine der fundamentalen Wechselwirkungen ein.

Wilhelm C. Röntgen ***

1846-1923

Deutscher Physiker mit Röntgenblick: Im Jahr 1899 entdeckt Wilhelm

Conrad Röntgen die Röntgenstrahlung. Nach dem Standardmodell der Teilchenphysik besteht Röntgenstrahlung aus sehr energiereichen Photonen.

Für seinen Fund erhält Röntgen 1901 den ersten Physik-Nobelpreis „in Anerkennung der außergewöhnlichen Verdienste, die er sich durch die Entdeckung der bemerkenswerten Strahlen, welche später nach ihm benannt wurden, erworben hat“.

1858-1947 **Max Planck** **

Deutscher Vater des Quantengedankens: Max Karl Ernst Ludwig Planck geht 1900 davon aus, dass Atome ihre Energie nur in einzelnen „gequantelten“ Portionen abgeben und aufnehmen können. Daraus entwickelt sich in den folgenden 30 Jahren die Quantentheorie. Obwohl Planck Vater des Quantengedankens ist, kann er sich nur schwer mit der Vorstellung anfreunden, dass Licht auch wirklich aus Quanten besteht. Für ihn ist die Idee nur Bestandteil eines mathematischen Modells zur Beschreibung von experimentellen Beobachtungen.

Planck erhält 1918 den Physik-Nobelpreis „in Anerkennung seiner Verdienste um die Entwicklung der Physik durch seine Entdeckung der Energiequanten“.

1864 **Die Theorie des Lichts** **

Der Brite James Maxwell (1831-1879) fasst alle bekannten Erkenntnisse zum Elektromagnetismus zu einer einzigen Theorie zusammen – der „dynamischen Theorie des elektromagnetischen Feldes“. Daraus ergibt sich unter anderem, dass Licht elektromagnetischen Wellen entspricht. Das Standardmodell der Teilchenphysik besagt heute: Licht besteht aus Photonen und zeigt sowohl teilchen- als auch wellenartige Züge. Dass lässt die Theorie Maxwells nicht vollkommen falsch werden, aber zum Spezialfall.

1869 **Periodensystem** **

Unabhängig voneinander schlagen Dmitrij Mendelejew (1834–1907) und Julius Lothar Meyer (1830–1895) das Periodensystem der Elemente vor. Darin sind alle damals bekannten Elemente ihren chemischen Eigenschaften nach geordnet. Ähnlichkeiten dieser Eigenschaften werden später durch Regelmäßigkeiten bei den entsprechenden Atomen erklärt.

In den 1960er Jahren führen ganz ähnliche Sortierarbeiten zur Entdeckung der Quarks.

Albert Einstein **

1879-1955

Deutsch-amerikanischer Verweber von Raum und Zeit: Albert Einstein wird mit seiner Relativitätstheorie und seinen Beiträgen zur Quantentheorie weltberühmt. In der Relativitätstheorie verwebt er Raum und Zeit und erkennt, dass Materie und Energie ineinander überführt werden können.

Einstein erhält 1921 den Physik-Nobelpreis „für seine Verdienste um die theoretische Physik und insbesondere für seine Entdeckung des Gesetzes für den photoelektrischen Effekt“.

Niels Bohr ***

1885-1962

Dänischer Atom-Modellierer: Niels Hendrik Bohr leistet unter anderem mit seinem Atommodell wesentliche Beiträge zur Quantentheorie.

Bohr erhält 1922 den Physik-Nobelpreis für „seine Verdienste bei der Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung“.

Erwin Schrödinger ***

1887-1961

Österreichischer Quantenphysiker: Erwin Schrödinger entwickelt die Quantentheorie maßgeblich mit. Mit der Schrödinger-Katze verdeutlichte er ein Interpretationsproblem der Quantentheorie.

Erwin Schrödinger erhält 1933 zusammen mit Pauli Dirac den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung neuer, fruchtbarer Formen der Atomtheorie“.

Entdeckung der Röntgenstrahlung **

1895

Der deutsche Physiker Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) entdeckt die Röntgenstrahlung, ein besonders energiereiches Licht, von dem sich heutzutage wohl jeder schon einmal hat durchleuchten lassen.

Im Jahr 1901 erhält Röntgen für seine Entdeckung den ersten Physik-Nobelpreis „in Anerkennung der außergewöhnlichen Verdienste, die er sich durch die Entdeckung der bemerkenswerten Strahlen, welche später nach ihm benannt werden, erworben hat“.

Entdeckung der Radioaktivität **

1896

Der französische Physiker Antoine Henry Becquerel (1852-1908) legt Uran auf Photoplatten und entdeckt, dass diese belichtet werden. Seit 1970 gilt das Becquerel als Einheit für die Aktivität radioaktiver Substanzen: 1 Becquerel entspricht dabei einer Kernumwandlung pro Sekunde.

Im Jahr 1903 erhält Becquerel zusammen mit Pierre und Marie Curie den Physik-Nobelpreis „in Anerkennung der außergewöhnlichen Verdienste, die er sich durch die Entdeckung der spontanen Radioaktivität erworben hat“.

Kernphysik und Teilchenphysik haben sich mittlerweile eigenständig entwickelt. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war alles noch viel stärker verwoben.

1897 **Entdeckung des Elektrons** *

Der Brite Sir Joseph John Thomson (1856–1940) entdeckt das Elektron. Dieser Fund kann als Beginn der modernen Teilchenphysik angesehen werden. Denn mit dem Elektron gibt sich das erste Teilchen des Standardmodells zu erkennen.

Im Jahr 1906 erhält Thomson den Physik-Nobelpreis „in Anerkennung der außergewöhnlichen Verdienste, die er sich durch seine theoretischen und experimentellen Untersuchungen zur elektrischen Leitung durch Gase erworben hat“.

1900-1958 **Wolfgang Pauli** ***

Österreichischer Verbotsgesetzgeber und Neutrinoerfinder: Wolfgang Pauli leistet wesentliche Beiträge zur Quantentheorie (darunter das Pauli-Verbot). Auf Pauli geht zudem die Vorhersage der Neutrinos zurück. Wolfgang Pauli erhält 1945 den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung des Ausschlussprinzips, auch Pauli-Prinzip genannt“.

1900 **Der Quantengedanke** **

Der deutsche Physiker Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858–1947) macht den revolutionären Vorschlag, dass die Energie von Strahlung nur in bestimmten Paketen aufgenommen und abgegeben werden kann. Er schafft damit die Grundlage für die Quantentheorie, die in den folgenden 30 Jahren entwickelt wird.

Im Jahr 1918 erhält Planck den Physik-Nobelpreis „in Anerkennung seiner Verdienste um die Entwicklung der Physik durch seine Entdeckung der Energiequanten“.

1901-1976 **Werner Heisenberg** ***

Deutscher Bestimmer der Unbestimmtheit: Werner Karl Heisenberg leistet maßgebliche Beiträge zur Atom-, Quanten- und Kernphysik – darunter die Heisenbergsche Unschärfebeziehung.

Werner Heisenberg erhält 1932 den Physik-Nobelpreis „für die Ent-

wicklung der Quantenmechanik, deren Anwendung unter anderem zur Entdeckung der allotropen Formen des Wasserstoffs führte“ [Allotropie ist das Auftreten von chemischen Elementen in verschiedene festen Zustandsformen].

Paul A. M. Dirac ***

1902-1984

Britischer Prophet der Antimaterie: Paul (Maurice) Dirac leistet wesentliche Beiträge zur Quantentheorie – darunter die Vorhersage von Antimaterie.

Dirac erhält 1933 zusammen mit Erwin Schrödinger den Nobelpreis in Physik „für die Entdeckung neuer, fruchtbarer Formen der Atomtheorie“.

Photoeffekt mit Quanten **

1905

Der deutsch-amerikanische Physiker Albert Einstein (1879–1955) liefert eine Erklärung für den Photoeffekt. Dabei lösen sich Elektronen von einer Metalloberfläche, wenn auf diese Licht fällt. Einsteins Erklärung: Das Licht besteht aus Paketen, den Photonen. Diese übertragen Energie an die Elektronen, so dass sich diese lösen können. Einstein greift damit die Photonen-Idee auf, die fünf Jahre zuvor von Max Planck ins Leben gerufen wurde.

Im Jahr 1921 erhält Einstein den Physik-Nobelpreis „für seine Verdienste um die theoretische Physik und insbesondere für seine Entdeckung des Gesetzes für den photo-elektrischen Effekt“.

Spezielle Relativitätstheorie **

1905

Der deutsch-amerikanische Physiker Albert Einstein (1879–1955) entwickelt die spezielle Relativitätstheorie. Darin findet er sich mit der Tatsache ab, dass die Geschwindigkeit des Lichts unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle ist. Daraus folgen die Verwebung von Raum und Zeit und die Umwandlungsmöglichkeit von Masse und Energie.

In Teilchenbeschleunigern wandeln sich Masse und Energie ständig um, auch müssen hier die Gesetze der Relativitätstheorie bedacht werden, die erst richtig bei Geschwindigkeiten in der Nähe der des Lichts zu tragen kommen.

Allgemeine Relativitätstheorie ***

1907

Der deutsch-amerikanische Physiker Albert Einstein (1879–1955) beginnt damit, die Gravitationskraft durch die Krümmung der Raumzeit

zu beschreiben. Die Arbeiten an der allgemeinen Relativitätstheorie werden bis 1916 andauern und Newtons Gravitationstheorie verbessern.

Die Gravitationskraft bereitet dem Standardmodell noch große Probleme. So ist es bisher nicht gelungen, allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie miteinander zu verheiraten. Es scheint so, als seien dazu ganz neue Konzepte vonnöten, zum Beispiel Superstrings.

1909 **Entdeckung des Atomkerns** *

Ein Forscherteam um den Briten Lord Ernest Rutherford (1871–1937) schießt Alphateilchen (zwei Neutronen plus zwei Protonen) auf eine Goldfolie. Die Resultate lassen Rutherford auf die Existenz kleiner, dichter und positiv geladener Kerne im Inneren der Atome schließen. Mittlerweile weiß man, dass diese Atomkerne selbst wieder aus kleineren Bestandteilen aufgebaut sind – den Quarks.

1909 **Entdeckung der Ladungsquantelung** **

Der amerikanische Physiker Robert Andrews Millikan (1868–1953) entdeckt, dass die elektrische Ladung von Öltröpfchen immer nur ein Vielfaches der Ladung des Elektrons groß ist. Seitdem geht man davon aus, dass elektrische Ladungen nur in ganzen Vielfachen der Elektronenladung vorkommen.

Quarks bilden hier eine Ausnahme: Bei ihnen gibt es auch Drittellaadung. Aber bisher ist es nicht gelungen, ein einzelnes Quark samt krummer Ladung nachzuweisen. Denn Quarks kommen immer in Gruppen vor, die zusammen wieder ein ganzes Vielfaches der Elementarladungen besitzen.

Millikan erhält 1923 den Physik-Nobelpreis „für seine Arbeiten zur elektrischen Elementarladung und zum photoelektrischen Effekt“.

1911 **Kosmische Strahlung** ***

Mit Hilfe bemannter Freiballons wird eine Strahlung aus dem Weltall entdeckt, die – wie sich später herausstellt – im Wesentlichen aus Atomkernen besteht. Diese kosmische Strahlung wird zum begehrten Untersuchungsobjekt der jungen Teilchenphysik.

Der österreichisch-amerikanische Physiker Victor Franz Hess (1883–1964) erhält 1936 den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung der kosmischen Strahlung“.

1911 **Nebelkammer** **

Das erste funktionstüchtige Exemplar einer Nebelkammer wird gebaut. Ihr Konstrukteur ist der schottische Physiker Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959).

In einer Nebelkammer bilden sich Nebelspuren entlang der Bahnen geladener Teilchen. In der heutigen Teilchenphysik spielen diese Detektoren keine Rolle mehr.

1927 erhält Wilson den Physik-Nobelpreis „für seine Methode, die Bahnen von elektrisch geladenen Teilchen durch Kondensation von Wasserdampf sichtbar zu machen“.

Bohrs Atommodell **

1913

Der Däne Niels Bohr (1885–1962) nutzt die bisher gewonnenen Ergebnisse der Quantentheorie, um ein neues Atommodell aufzustellen. Dieses Modell kann einige Eigenschaften von Atomen verblüffend elegant erklären, es bricht aber mit Vorstellungen der bisherigen Physik. Bohrs Atommodell ist ein wichtiger Schritt hin zum endgültigen quantentheoretischen Modell, das im folgenden Jahrzehnt aufgestellt wird. Im Jahr 1922 erhält Niels Bohr den Physik-Nobelpreis „für seine Verdienste bei der Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung“.

Richard Feynman **

1918-1988

Amerikanischer Physiker: Richard Phillips Feynman (1918–1988) leistet maßgebliche Beiträge zur Entwicklung der Quantenfeldtheorie, insbesondere erfindet er ein graphisches Verfahren, um Vorgänge in der Quantenwelt zu beschreiben. Diese so genannten Feynman-Diagramme gehören zum Handwerkszeug von Teilchenphysikern.

Feynman erhält 1965 den Physik-Nobelpreis „für die fundamentalen Arbeiten zur Quanten-Elektrodynamik mit weitreichenden Konsequenzen für die Elementarteilchenphysik“.

Noethers Theorem ***

1918

Die deutsche Mathematikerin Emmy Noether (1882-1935) zeigt ein für allemal: Mit bestimmten Symmetrien sind Erhaltungsgrößen verbunden. In den kommenden Jahrzehnten werden Symmetrien zu den wichtigsten Ideenlieferanten der Teilchenphysik.

Entdeckung des Protons *

1919

Der Brite Lord Ernest Rutherford (1871-1937) nennt den Kern des Wasserstoffs „Proton“.

- 1922 **Teilchennatur von Röntgenlicht** **
 Der Amerikaner Arthur Holly Compton (1892-1962) entdeckt, dass sich Röntgenlicht manchmal so verhält, als bestünde es aus Teilchen. Im Lichte der Quantentheorie ist das nicht verwunderlich. Denn Photonen, die Quanten des Lichts, besitzen Teilcheneigenschaften. Im Jahr 1927 erhält Compton den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung des nach ihm benannten Effekts“.
- 1924 **de Broglies Teilchenwellen** ***
 Der Franzose Louis de Broglie (1892-1987) entwickelt für seine Doktorarbeit die Vermutung, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten – und gibt auch gleich deren Wellenlänge an. Im Jahr 1929 erhält de Broglie den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung der Wellennatur des Elektrons“.
- 1925 **Heisenbergs Matrizen-Mechanik** ***
 Der deutsche Physiker Werner Karl Heisenberg (1901-1976) gibt mit seiner Matrizen-Mechanik eine mathematische Beschreibung der Quantentheorie. Heisenberg erhält 1932 den Physik-Nobelpreis für „die Entwicklung der Quantenmechanik, deren Anwendung unter anderem zur Entdeckung der allotropen Formen des Wasserstoffs führte“ [Allotropie ist das Auftreten eines chemischen Elements in verschiedenen festen Zustandsformen].
- 1925 **Paulis Verbot** ***
 Der österreichisch-amerikanische Physiker Wolfgang Pauli (1900-1958) formuliert die Vermutung, dass sich Elektronen in einem Atom nicht im selben Zustand befinden dürfen. Daher sind sie alle fein säuberlich auf Schalen übereinander angeordnet. Paulis Verbot gilt auch außerhalb des Atoms für alle Teilchen mit einem halbzahligen Spin. 1945 erhält Pauli den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung des Ausschlussprinzips, auch Pauli-Prinzip genannt“.
- 1925 **Spin** ***
 Die holländisch-amerikanischen Physiker Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978) und George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) führen das Konzept des Spins ein, eine Art Drehung von Teilchen um die eigene Achse. 1927 bestätigen der deutsche Physiker Walther Gerlach (1889-1979) und der deutsch-amerikanische Physiker Otto Stern (1888-1969)

die Richtigkeit dieser Idee. Der Spin zeigte sich darin, dass sich die Drehachsen von Atomen in einem Magnetfeld nur in bestimmte Richtungen einstellen können.

Das Standardmodell der Teilchenphysik ordnet jedem Teilchen einen Spin zu.

1943 erhält Otto Stern den Physik-Nobelpreis „für seinen Beitrag zur Molekularstrahl-Methode und seine Entdeckung des magnetischen Moments des Protons“.

Kopenhagener Interpretation ***

1926

Der deutsch-britische Physiker Max Born (1882-1970) versucht die Gleichungen der Quantentheorie zu verstehen. Er kommt zu dem Schluss, dass sie überwiegend Wahrscheinlichkeitsaussagen machen, zum Beispiel über den Aufenthaltsort eines Teilchens. Diese Gedanken werden von Niels Bohr und anderen zur Kopenhagener Interpretation weiterentwickelt, die ihren Namen dem Schaffensort Niels Bohrs verdankt. Max Born erhält 1954 den Physik-Nobelpreis „für seine grundlegenden Arbeiten in der Quantenmechanik, insbesondere für seine statistische Deutung der Wellenfunktion“.

Schrödingers Gleichung ***

1926

Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger (1887–1961) schafft mit der so genannten Wellenmechanik eine mathematische Formulierung der Quantentheorie. Mit der Schrödingergleichung lassen sich darin die möglichen Zustände für ein Quant berechnen.

Im Jahr 1933 erhält Schrödinger den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung, neuer fruchtbarer Formen der Atomtheorie“.

Die Taufe des Photons **

1926

Der amerikanische Chemiker Gilbert Newton Lewis (1875–1946) schlägt den Namen „Photon“ für das Teilchen des Lichts vor.

Unschärfebeziehung ***

1927

Der deutsche Physiker Werner Heisenberg (1901–1976) stellt die Unschärfebeziehung auf, nach der es unmöglich ist, sowohl Position als auch Impuls eines Teilchens beliebig genau zu bestimmen. Dasselbe gilt für Energie und Zeit.

Vorhersage der Antimaterie **

1928

Paul Dirac (1902–1984) kombiniert für die Beschreibung des Elektrons

spezielle Relativitätstheorie und Quantentheorie. Daraus folgt, dass es ein Antiteilchen zum Elektron geben müsse, ein positives Elektron. Dirac glaubt zunächst, dass es das Proton sei, aber schon bald wird dieser Irrtum berichtigt. Es ist das Positron.

1929 **Murray Gell-Mann** **

Amerikanischer Namenspatron der Quarks: Murray Gell-Mann (*1929) denkt sich die Quarks aus und entwickelt die Theorie der starken Wechselwirkung (Quantenchromodynamik) maßgeblich mit.

Gell-Mann erhält 1969 den Physik-Nobelpreis „für seine Beiträge und Entdeckungen hinsichtlich der Klassifikation der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen“.

1929 **Das Universum dehnt sich aus** ***

Der Amerikaner Edwin Powell Hubble (1889-1953) sieht rot: Er bemerkt, dass die Farbe des Lichts von Sternen oft in Richtung Rot verschoben ist. Er kombiniert daraus, dass sich das Universum ausdehnen müsse und dass die Sterne daher irgendwann sehr dicht beieinander gelegen haben müssen. Dies ist ein wichtiges Indiz für die Idee, dass das Universum in einem Urknall begann.

1929 **Zyklotron** **

Mit dem Zyklotron macht einer der ersten Kreisbeschleuniger die Runde. In ihm werden geladene Teilchen in einem Magnetfeld auf einer spiralförmigen Bahn beschleunigt.

1939 erhält Erbauer Ernest Lawrence den Physik-Nobelpreis „für die Erfindung und Entwicklung des Zyklotrons und für damit erzielte Resultate, besonders in Bezug auf künstliche radioaktive Stoffe“.

1930 **Vorhersage des Elektron-Neutrinos** *

Wolfgang Pauli (1900-1958) denkt sich das Neutrino aus. Er braucht dieses neue Teilchen, um den so genannten Betazerfall zu beschreiben. Ohne zusätzliches Teilchen würde hier ein unerschütterliches Prinzip der Physik verletzt, die Energieerhaltung. Neutrinos geben sich erst 1956 experimentell zu erkennen. Im Laufe der Jahrzehnte kommen noch zwei weitere Neutrino-Sorten hinzu.

1931 **Magnetische Monopole** ***

Paul Dirac (1902–1984) findet eine Antwort auf die Frage, wieso elektrische Ladungen nur in bestimmten Vielfachen der Elektronenladung

daherkommen. Dazu muss es aber auch magnetische Ladungen, so genannte magnetische Monopole, geben. Diese haben sich bisher aber noch nicht zu zeigen gegeben. Da aber auch kein Grund bekannt ist, wieso es diese Monopole nicht geben soll, halten Teilchenphysiker in ihren Experimenten weiterhin danach Ausschau.

Nachweis des Neutrons **

1932

Der Brite Sir James Chadwick (1891–1974) entdeckt das Neutron, dessen Existenz Ernest Rutherford 12 Jahre zuvor prophezeite. Im Jahr 1935 erhält Chadwick den Physik-Nobelpreis für diesen Fund.

Nachweis des Positrons *

1932

Der amerikanische Physiker Charles David Anderson (1905–1991) entdeckt das Positron, das Antiteilchen zum Elektron. Dieses Teilchen war vier Jahre zuvor von Paul Adrienne Maurice Dirac (1902–1984) vorhergesagt worden.

Im Jahr 1936 erhält Anderson den Physik-Nobelpreis für diese Entdeckung.

Erste Theorie der Kernkraft ***

1935

Der japanische Physiker Hideki Yukawa (1907–1981) veröffentlicht seine Theorie der Kernkräfte. Danach haften Protonen und Neutronen zu Kernen zusammen, weil sie Pionen austauschen.

Als Yukawa die Theorie aufstellt, sind Pionen noch unbekannt. Ihre Entdeckung wird auch noch 12 Jahre dauern. Heute wird Yukawas Theorie als eine Näherung der Quantenchromodynamik, der Theorie der starken Kraft, aufgefasst.

Yukawa erhält 1949 den Physik-Nobelpreis „für seine Vorhersage der Existenz der Mesonen auf der Grundlage theoretischer Arbeiten über Kernkräfte“.

Tscherenkow-Detektoren **

1940

Die ersten Tscherenkow-Detektoren sind einsatzbereit. Mit ihnen kann die Geschwindigkeit von geladenen Teilchen gemessen werden, die sich schneller als das Licht bewegen. Denn nur im Vakuum ist die Lichtgeschwindigkeit das oberste Tempolimit. In Materie kann Licht von Teilchen überholt werden.

Ilja Michailowitsch Frank (1908–1990), Igor Jewgenewitsch Tamm (1895–1971) und Pawel Alexejewitsch Tscherenkow (1904–1990) erhalten den Physik-

Nobelpreis (1958) „für die Entdeckung und Interpretation des Tscherenkow-Effekts“.

1947 **Entdeckung der geladenen Pionen** ***

Elektrisch geladene Pionen werden in der kosmischen Strahlung entdeckt. Knapp zwanzig Jahre später wird sich zeigen, dass man sich die sehr kurzlebigen Pionen als aus zwei Quarks zusammengesetzt vorstellen kann.

1947 **Entdeckung des Myons** **

Das erste Exemplar aus der zweiten Teilchenfamilie, das Myon, ein schwerer Vetter des Elektrons, wird identifiziert. Das geschieht völlig unerwartet: Der Physik-Nobelpreisträger I. I. Rabi bringt seine Irritation mit der Frage „Wer hat das denn bestellt?“ zum Ausdruck. Gesehen wurde das Myon bereits 1937 – man wusste aber fast ein Jahrzehnt lang nicht, was es ist.

1947 **Seltsame Teilchen** ***

Zwei neue Teilchentypen (Lambda und neutrales Kaon) werden in der kosmischen Strahlung entdeckt. Diese Teilchen entstehen nur in Paaren und zerfallen überraschend langsam. Physiker nennen sie daher „seltsam“ oder auf Englisch „strange“. Knapp Zwei Jahrzehnte später wird sich zeigen, dass das seltsame Verhalten darauf zurückzuführen ist, dass die Teilchen ein Strange-Quark beinhalten, das für den langsamen Zerfall verantwortlich ist.

1948 **Fertigstellung der Quantenelektrodynamik** **

Die Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung, die Quantenelektrodynamik, wird abgeschlossen. Sie ist die am genauesten experimentell bestätigte Theorie, die sich Menschen bisher ausgedacht haben. 1965 erhalten Shin-Ichiro Tomonaga (1906–1979), Richard P. Feynman (1918–1988) und Julian Seymour Schwinger (1918–1994) den Physik-Nobelpreis „für die fundamentalen Arbeiten zur Quanten-Elektrodynamik mit weitreichenden Konsequenzen für die Elementarteilchenphysik“.

1949 **Entdeckung des neutralen Pions** ***

Elektrisch neutrale Pionen werden in der kosmischen Strahlung entdeckt. Knapp zwanzig Jahre später wird sich zeigen, dass man sich die sehr kurzlebigen Pionen als aus zwei Quarks zusammengesetzt vorstellen kann.

Blasenkammer ** 1951

Der amerikanische Physiker und Molekularbiologe Donald Arthur Glaser (*1926) beginnt zu kochen: Er entwickelt die Blasenkammer, in der eine Flüssigkeit entlang der Bahn von geladenen Teilchen zum Sieden gebracht wird.

Glaser erhält 1960 den Physik-Nobelpreis „für die Erfindung der Blasen-kammer“.

Vermessung des Atomkerns *** 1953

Am kalifornischen Forschungszentrum SLAC misst der amerikanische Physiker Robert Hofstadter (1915-1990) die Ladungsverteilung innerhalb von Atomkernen. Dazu beschießt er sie mit Elektronen.

1961 erhält Hofstadter den Physik-Nobelpreis „für seine bahnbrechenden Untersuchungen zur Streuung von Elektronen in Atomkernen und seine dadurch gemachten Entdeckungen bezüglich der Kernstruktur“.

Eichtheorien *** 1954

Der chinesisch-amerikanische Physiker Chen Ning Yang (*1922) und Robert Mills (1927-1999) erfinden mit einem Streich ein ganzes Set neuer Theorien: Diese heißen (nicht-abelsche) Eichtheorien und bilden die theoretische Grundlage für das heutige Standardmodell der Teilchenphysik.

Entdeckung des Antiprotons ** 1955

Das Antiproton wird am Bevatron in Berkley gefunden.

Dafür erhalten 1959 Emilio Gino Segrè (1905-1989) und Owen Chamberlain (geb. 1920) den Physik-Nobelpreis.

Nachweis des Elektron-Neutrinos * 1956

Der experimentelle Nachweis des Elektron-Neutrinos durch Frederick Reines (1918–1998) und Clyde Cowan (1919–1974) gelingt. Die beiden untersuchen dafür die Strahlung, die von Kernreaktoren ausgeht.

Das Teilchen war 1930 von Wolfgang Pauli vorhergesagt worden. Da es aber nur über die schwache Kraft wechselwirkt, hat die Entdeckung 26 Jahre auf sich warten lassen.

Frederick Reines erhält 1995 den Nobelpreis „für seine bahnbrechenden experimentellen Beiträge zur Physik der Leptonen, insbesondere für den Nachweis des Neutrinos“.

Ist das Universum spiegelsymmetrisch? ** 1957

Der chinesisch-amerikanische Physiker Tsung Dao Lee (*1926) und der chinesische Physiker Chen Ning Yang (*1922) vermuten, dass für ein gespiegeltes Universum andere Gesetze gelten könnten. Diese Vermutung wird im folgenden Jahr experimentell bestätigt.

Lee und Yang erhalten 1957 den Physik-Nobelpreis „für ihre tief gehende Untersuchung der so genannten Paritätsgesetze, welche zu wichtigen Entdeckungen bei den Elementarteilchen führte“.

1957 **Das Universum ist nicht spiegelsymmetrisch** **

Ein Experiment der Physikerin Chien-Shiung Wu (*1912) und ihrer Mitarbeiter zeigt: Würde man unser Universum spiegeln, so würden andere Gesetze gelten. Damit konnte die Vermutung von Tsung Dao Lee (*1926) und Chen Ning Yang (*1922) im Jahr zuvor bestätigt werden.

1959 **Gründung von DESY** **

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY wird in Hamburg gegründet. Der Name geht auf den ersten Beschleuniger des Zentrums zurück. An dem Forschungsinstitut wird bis heute Teilchenphysik betrieben, werden Beschleuniger entwickelt und wird zudem hochintensives Licht (Synchrotronstrahlung) zur Erforschung von Materie erzeugt.

1961 **Vorläufer des Quark-Modells** ***

Der amerikanische Physiker Murray Gell-Mann (*1929) und der israelische Physiker Yuval Ne'eman ordnen alle bekannten stark wechselwirkenden Teilchen ihren Eigenschaften nach zu Mustern an. Dabei ergeben sich Acht- und Dreiecke. Drei Jahre später werden diese Muster durch die Zusammensetzung der Teilchen aus Quarks erklärt.

1962 **Entdeckung des Myon-Neutrinos** **

Experimente zeigen, dass es einen weiteren Neutrinotyp geben muss: Es ist das Myon-Neutrino.

1988 teilen sich Leon M. Ledermann (*1922), Melvin Schwartz (*1932) und Jack Steinberger (*1921) den Physik-Nobelpreis „für die Neutrinostrahlmethode und die Demonstration der Dublettstruktur der Leptonen durch die Entdeckung des Myon-Neutrinos“.

1964 **Entdeckung der CP-Verletzung** ***

Beim Zerfall des neutralen Kaons entdecken Physiker, dass dieser Prozess anders ablaufen würde, wenn man das Universum spiegeln und

Teilchen und Antiteilchen vertauschen würde. Bis dahin war man davon ausgegangen, dass man dies ungestraft machen könne, da die so genannte CP-Symmetrie im Universum gelte.

1980 erhalten James Watson Cronin (*1931) und Val Logsdon Fitch (*1923) den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung der Verletzung fundamentaler Symmetrieprinzipien beim Zerfall neutraler K-Mesonen“.

Teilchenphysik wird schwer: Higgs **

1964

Der schottische Physiker Peter Higgs (*1929) entdeckt einen theoretischen Trick, mit der Masse in das Standardmodell der Teilchenphysik gelangen kann. Ohne diese Lösung wären die Teilchen masselos und und das Standardmodell hätte ein massives Problem.

Entdeckung des Omega-Minus ***

1964

Das Omega-Minus-Teilchen wird entdeckt. Dies ist eine imposante Bestätigung der Quark-Idee, weil damit nicht nur die Existenz, sondern gleich auch die Masse des Teilchens vorhergesagt werden konnte. Der Fund ereignet sich bei einem Blasenkammerversuch am BNL.

Vorhersage der Quarks *

1964

Die amerikanischen Physiker Murray Gell-Mann (*1929) und George Zweig (*1937) bemerken zeitgleich, dass mithilfe dreier Quarks Ordnung in das damalige Gewirr der über 100 „Elementar“-Teilchen einkehren kann. Drei weitere Quarktypen kommen später hinzu.

Gell-Mann erhält 1969 den Physik-Nobelpreis „für seine Beiträge und Entdeckungen hinsichtlich der Klassifikation der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen“.

Elektroschwache Vereinigung **

1967

Sheldon Lee Glashow (*1932), Abdus Salam (1926-1999) und Steven Weinberg (*1933) erklären die schwache Wechselwirkung, indem sie diese theoretisch mit dem Elektromagnetismus verheiraten. Daraus folgt die Existenz der W- und Z-Teilchen.

Die drei Physiker erhalten 1979 der Nobelpreis für Physik „für ihre Beiträge zu Theorie und Vereinheitlichung der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen, einschließlich u.a. der Vorhersage des schwachen neutralen Stroms“.

Proportionalkammer ***

1968

Georges Charpak entwickelt die Proportionalkammer.

Der Physiker erhält 1992 den Physik-Nobelpreis „für seine Erfindung und Entwicklung von Teilchendetektoren, insbesondere der Vieldraht-Proportionalzählkammer“.

1968 **Die Beginne der Stringtheorie** ***

Der italienische Physiker Gabriele Veneziano bringt die erste Version einer Stringtheorie in den wissenschaftlichen Umlauf. Er versucht, damit die starke Wechselwirkung zu beschreiben, und wird scheitern. Die Stringtheorie wird aber bald herangezogen, um eine Theorie aller Kräfte zu entwickeln. Bis heute hält dieser Versuch an.

1969 **Nachweis der Quarks** *

Am Teilchenphysikzentrum SLAC werden Elektronen auf Protonen geschossen. Dabei gibt sich eine innere Struktur der Protonen zu erkennen. Zunächst ist man vorsichtig, dies mit der Zusammensetzung aus Quarks zu erklären, die fünf Jahre zuvor ins Spiel gebracht wurden. Im Laufe der Zeit wächst der Mut.

1990 teilen sich für diese Entdeckung Jerome I. Friedman (*1930), Henry W. Kendall (1926–1999) und Richard E. Taylor (*1929) den Physik-Nobelpreis „für ihre bahnbrechenden Forschungsarbeiten im Bereich der inelastischen Streuung von Elektronen und Protonen und gebundenen Neutronen, die von wesentlicher Bedeutung für die Entwicklung des Quark-Modells der Teilchenphysik war“.

1971 **Eichtheorien sind renormierbar** ***

Zwei Niederländer liefern einen wichtigen mathematischen Beweis: In den Theorietypen des Standardmodells treten keine unsinnigen Unendlichkeiten auf. Im Fachjargon liest sich das: Eichtheorien sind renormierbar.

Der niederländische Physiker Gerardus t’Hooft (*1946) und sein Doktorvater Martinus Veltmann (*1931) erhalten 1999 den Physik-Nobelpreis „für ihre entscheidenden, die Quantenstruktur betreffenden Beiträge zur Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung“.

1971 **Supersymmetrie** **

Die Supersymmetrie wird salonfähig. Es handelt sich dabei um eine Symmetrie zwischen Materie- und Wechselwirkungsteilchen. Sie sagt zu jedem der bekannten Teilchen einen supersymmetrischen Partner voraus. Physiker sind seitdem auf Partnersuche – bisher vergebens.

Quantenchromodynamik **

1972

Der Amerikaner Murray Gell-Mann (*1929) und der Deutsche Harald Fritzsch (*1943) entwickeln die Quantenchromodynamik (QCD) – die immer noch gültige Theorie zur starken Kraft. Danach haften Quarks aneinander, weil sie über Farbladungen verfügen und Gluonen austauschen.

Das *chromo* im Namen ist dem griechischen Wort für Farbe entlehnt: So besitzen Quarks nach der QCD Farbladungen wie Rot, Grün oder Blau. Nach der Theorie ist diese Farbe der Grund für die starke Wechselwirkung, so wie die elektrische Ladung Ursache für die elektromagnetische Wechselwirkung ist.

Neutrale Ströme ***

1973

Mit dem Nachweis so genannter neutraler Ströme am CERN erfolgt eine wesentliche Bestätigung der Theorie zur elektroschwachen Kraft.

Entdeckung des Charm-Quarks **

1974

Mit dem J/ψ („Jott/Psi“ oder im Englischen „Dschäi/Bei“) wird ein Teilchen entdeckt, das eine Verbindung aus einem Charm-Quark und dessen Antiteilchen ist. Die Existenz des Charm-Quarks wurde bereits 1970 von Theoretikern gefordert, um damit eine Eigenschaft der schwachen Kraft zu erklären.

Für den Fund erhalten 1976 Burton Richter (*1931) und Samuel Chao Chung Ting (*1936) den Physik-Nobelpreis „für ihre Pionierarbeit bei der Entdeckung eines schweren Elementarteilchens neuer Art“.

Entdeckung des Tauons **

1975

Eine Forschergruppe am US-amerikanischen Teilchenphysikzentrum SLAC weist mit dem Tauon das zweite schwere elektronähnliche Teilchen nach.

Der Chef der Gruppe, der amerikanische Physiker Martin Lewis Perl (*1927), erhält 1995 den Physik-Nobelpreis „für seine bahnbrechenden experimentellen Beiträge zur Physik der Leptonen, insbesondere für die Entdeckung des Tau-Leptons“.

Entdeckung des Bottom-Quarks **

1977

Mit dem Upsilon gibt sich eine Verbindung aus einem Bottom-Quark und dessen Antiteilchen zu erkennen. Der Fund glückt am Fermilab unter der Leitung des amerikanischen Physikers Leon Max Ledermann (*1922).

- 1978 **PETRA** ***
Bei PETRA in Hamburg werden von 1978 bis 1986 Elektronen und Positronen bei einer Energie von rund 23 Milliarden Elektronenvolt aufeinander geschossen. 1979 wird hier das Gluon entdeckt. „PETRA“ steht für *Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage*.
- 1979 **Entdeckung der Gluonen** **
Experimente am Beschleuniger PETRA bei DESY liefern die ersten experimentellen Nachweise für die Existenz des Gluons.
- 1981 **Stringtheorie** **
Michael Green (*1946) und John Schwarz (*1941) entwickeln erste Ansätze zur Superstringtheorie. Diese gilt mittlerweile als ein möglicher Kandidat, mit der sich alle bekannten Kräfte auf einheitliche Weise beschreiben lassen könnten.
- 1983 **Entdeckung der Ws und Zs** **
Am CERN werden die Teilchen W^+ , W^- und Z^0 gefunden, die Wechselwirkungsteilchen der schwachen Kraft. Die Physiker Carlo Rubbia (*1934) und Simon van der Meer (*1925) erhalten dafür schon im folgenden Jahr den Physik-Nobelpreis „für ihre entscheidenden Beiträge zu dem großen Projekt, das zur Entdeckung der Feldteilchen W und Z, den Vermittlern der schwachen Wechselwirkung, führte“.
- 1987 **Tevatron** **
Mit dem Tevatron geht am Fermilab der zu dem Zeitpunkt energie-reichste Beschleuniger der Welt in Betrieb. In ihm werden Protonen und Antiprotonen bei einer Energie von jeweils bis zu einer Billion Elektronenvolt zur Kollision gebracht. Diese geballte Energie wird ausreichen, um 1995 das Top-Quark nachzuweisen.
- 1987 **B-Mischung** ***
Am ARGUS-Experiment bei DESY wird 1987 beobachtet, dass sich neutrale B-Mesonen in ihre Antiteilchen umwandeln können und umgekehrt. Dabei überrascht vor allem die Häufigkeit von rund 20 Prozent, mit der diese Umwandlung erfolgt. Mit dieser großen Zahl hatte niemand gerechnet.
Das Ergebnis hat weit reichende Konsequenzen für die Teilchenphysik. Zum einen legt es nahe, dass die Masse des damals noch nicht nach-

gewiesenen Top-Quarks weit höher ist, als bis dahin vermutet wurde. Dies bestätigt sich 1995 beim direkten Nachweis des schwersten aller sechs Quarks am Fermilab. Zum anderen liefert das ARGUS-Resultat die Grundlage für eine neue Generation von Experimenten an so genannten B-Fabriken, die weltweit eigens zur Erzeugung und Untersuchung von B-Mesonen gebaut wurden. Diese nehmen Ende der 1990er Jahren ihre Arbeit auf und untersuchen unter anderem die so genannte CP-Verletzung, die ein Grund für die ungleiche Verteilung von Materie und Antimaterie im Universum sein könnte.

Nur drei Familien **

1989

Experimente am CERN und bei SLAC legen nahe, dass es nur drei Familien von Materieteilchen gibt. Wieso das so ist, weiß man nicht.

LEP **

1989-2000

Am CERN nimmt der Beschleuniger LEP den Forschungsbetrieb auf. Hier werden unter anderem die Wechselwirkungsteilchen der schwachen Kraft (die Ws und Zs) genau untersucht. 2000 wird der Beschleuniger abgeschaltet und abgebaut, um im Tunnel Platz für den Nachfolger LHC zu machen.

SLC **

1989-2006

Der Beschleuniger SLC am Forschungszentrum SLAC geht in Betrieb. In ihm werden Elektronen und deren Antiteilchen, die Positronen, bei jeweils bis zu 50 Milliarden Elektronenvolt aufeinandergeschossen. Am SLC wird bis 2006 Teilchenphysik betrieben. Danach wird die Anlage zu einer Quelle für intensive Strahlung zur Untersuchung von Materie umgebaut.

SLC steht für *Stanford Linear Collider* .

HERA **

1992-2007

Die Forschung an HERA beginnt. Dies ist die größte Beschleunigeranlage des Hamburger Teilchenphysikzentrums DESY in Hamburg. Hier werden – weltweit einzigartig – Elektronen auf Protonen beschleunigt. HERA ist bis zum Sommer 2007 in Betrieb.

HERAs Elektronen erreichen eine Energie von 27,5 Milliarden Elektronenvolt. Die Protonen schaffen es auf 920 Milliarden Elektronenvolt. Das Forschungsziel von HERA ist es unter anderem, das Innere des Protons zu untersuchen und die Grenzen der Gültigkeit des Standardmodells zu finden.

HERA steht für *Hadron-Elektron-Ring-Anlage* .

- 1995 **M-Theorie** ***
Edward Witten (*1951) und andere stellen die M-Theorie vor, die für große Furore in der Stringtheoretiker-Gemeinde sorgt, weil sie verschiedene Versionen der Theorie unter einem Dach vereint.
- 1995 **Entdeckung des Top-Quarks** **
Mit dem Top-Quark wird an Fermilabs Beschleuniger Tevatron das letzte der sechs Quarks gefunden.
Die Suche hat 18 Jahre gedauert. Und alle Fragen sind noch lange nicht beantwortet: Das Top-Quark wiegt so viel wie ein Goldatom. Niemand weiß, wieso dies so ist.
- 2000 **RHIC** ***
Im Beschleuniger RHIC ziehen Gold-Ionen ihre ersten Runden. Die Teilchen werden von Physikern am BNL in der Nähe von New York aufeinander geschossen, um neue Verbindungen aus Quarks und Gluonen zu untersuchen.
„RHIC“ steht für *Relativistic Heavy Ion Collider* .
- 2000 **Entdeckung des Tau-Neutrinos** **
Am Fermilab gibt sich mit dem Tau-Neutrino das letzte der drei Neutrinos des Standardmodells der Teilchenphysik zu erkennen.
- 2001 **Neutrinos haben eine Masse** ***
Das Sudbury-Experiment in Kanada bestätigt, dass Neutrinos eine (wenn auch kleine) Masse besitzen. Dies hatten bereits Befunde am Super-Kamiokande-Experiment in Japan nahe gelegt.
- 2004 **Nobelpreis für asymptotische Freiheit** ***
Die US-Amerikaner David Gross (*1941), David Politzer (*1949) und Frank Wilczek (*1951) erhalten den Physik-Nobelpreis „für die Entdeckung der asymptotischen Freiheit in der Theorie der Starken Wechselwirkung“.
- 2008 **Start des LHC** *
Am Forschungszentrum CERN nimmt der LHC seinen Forschungsbetrieb auf. In diesem Teilchenbeschleuniger der Superlative werden Protonen mit einer noch nie erreichten Energie von jeweils 7 Billionen Elektronenvolt aufeinander stoßen. Ziel ist es dabei unter anderem, das

Higgs-Teilchen zu finden, dessen Existenz für die Erklärung der Masse der Teilchen benötigt wird.

Fragen und Antworten

Aus wie vielen Quarks bestehen Protonen?

**

B.1

Kommt darauf an, wie genau Sie es nehmen.

Im einfachsten Modell bestehen Protonen lediglich aus drei Quarks. Aber schon dieses Modell muss verfeinert werden, wenn Ihnen daran liegt, dass die drei Quarks nicht auseinander fallen. Dazu sollten Sie davon ausgehen, dass zwischen den Quarks so genannte Gluonen wirken, die Wechselwirkungsteilchen der starken Kraft. Jetzt sind es schon drei Quarks und eine Handvoll Gluonen.

Doch es wird noch komplexer. Denn aus den Gluonen, die sich die Quarks austauschen, können für kurze Momente Quark-Antiquark-Paare entstehen. Zwischen diesen Quarks wirken wieder Gluonen, die wieder ... und so weiter und so fort. Die drei Hauptquarks sind demnach in einem See zahlreicher anderer Quarks eingebettet.

Ein Proton ist also – obwohl winzig klein – ein hochkomplexes System. Es ist noch nicht genau verstanden, was da im Proton alles vorgeht. Ein Ziel von DESYs größter Teilchenbeschleuniger-Anlage HERA ist es gerade, dies zu ändern.

Gibt es magnetische Monopole? ***

B.2

Solange keine entdeckt werden, kann das niemand genau sagen.

Zerteilt man einen Magneten, so hält man danach nicht etwa den Nordpol in der einen Hand und den Südpol in der anderen. Nein, es entstehen erneut zwei vollständige Magnete. Auch wenn man wieder und wieder den Magneten zerbricht: Magnetismus kommt anscheinend immer mit zwei Polen daher – als Dipol. Im Gegensatz zur elektrischen Ladung hat man noch keine magnetische Ladung gefunden – so sehr Physiker auch danach Ausschau halten. Die Suche nach magnetischen Monopolen ist ein Standardvorgang in fast allen modernen Teilchenphysikexperimenten.

Und wieso sucht man überhaupt danach? Seit 1931 weiß man, dass theoretisch aus der Existenz magnetischer Monopole die Tatsache folgt, dass elektrische Ladungen immer ein Vielfaches der Ladung des Elektrons sind. Dafür kennt man sonst keinen Grund. Das ließ den Entdecker dieser Tatsache, Paul Dirac, 50 Jahre später zu dem Ausspruch hinreißen: „Theoretisch müsste es eigentlich Monopole geben, denn der mathematische Beweis ist so schön.“

B.3 Gibt es noch mehr Teilchensorten? *

Das wird derzeit untersucht.

61 Sorten sind den Teilchenphysikern bekannt. Doch weltweit suchen Forscher nach weiteren Teilchen. Denn so erfolgreich die moderne Naturwissenschaft und das Standardmodell der Teilchenphysik auch sind: Man kann sich niemals in der 100-prozentigen Gewissheit wähen, wirklich alles zu wissen.

So wird vermutet, dass es so genannte supersymmetrische Teilchen gibt. Wenn dies der Fall wäre, würde sich die Zahl der Teilchen auf einen Schlag verdoppeln.

Bei aller Unsicherheit gibt es jedoch ein beeindruckendes Indiz dafür, dass es zumindest nicht mehr als jene drei Teilchenfamilien gibt, welche das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt.

Zur ersten Familie zählen die Teilchen, aus denen der Großteil unserer Welt besteht: Elektronen, Elektron-Neutrinos und die Up- und Down-Quarks. Alle Atomkerne, Atome und Moleküle und auch Ihr Körper sind nur aus diesen Teilchen aufgebaut. Zusätzlich gibt es aber zu jedem dieser vier Teilchen zwei Partner, die sich im Wesentlichen nur durch eine höhere Masse auszeichnen. Macht zusammen drei Teilchenfamilien.

Warum es drei sind, weiß niemand. Untersuchungen am CERN haben

jedoch bereits 1983 gezeigt: Es gibt nur $2,998 \pm 0,029$ Neutrinoarten, und damit wohl auch nur drei Familien.

Doch man sollte auch hier das Kleingedruckte nicht übersehen: Gäbe es Neutrinos, die so schwer wie Kalzium-Atome wären, ist auch eine vierte Teilchenfamilie denkbar. Wie gesagt: 100-prozentige Gewissheit gibt es nicht.

In wie viel Kilogramm Eisen stecken ein Kilo Elektronen? *

B.4

In knapp vier Tonnen Eisen.

Kurze Überschlagsrechnung gefällig? Gut:

1. Ein Elektron ist knapp 2.000 mal leichter als ein Proton oder Neutron.
2. Im Atom gehört zu jedem Proton ein Elektron.
3. Bei mittelschweren Elementen wie etwa Eisen kommt Pi mal Daumen auf jedes Proton ein Neutron.
4. Damit wiegt ein komplettes Eisenatom etwa 4.000 mal mehr als seine Elektronen. 1 Kilogramm Elektronen bedeuten daher etwa 4.000 Kilogramm Eisenatome.

Diese Näherung gilt für alle Atome, bei denen die Zahl der Neutronen und Protonen etwa gleich sind – stets braucht man rund 4.000 Kilogramm eines Elementes für ein Kilogramm Elektronen.

Ist das Vakuum wirklich leer? **

B.5

Mitnichten.

Doch dem Namen nach schon. Denn: Vakuum ist, wo nichts ist. Wenigstens meinten dies die alten Römer. So steht das lateinische Wort „vacuus“ für „leer“. Den Vakuumtechniker packt bei dieser Definition die Ehrfurcht, denn eine solche Leere kann selbst mit den besten Vakuumpumpen nicht erreicht werden. Auch das Vakuum im Universum ist nicht perfekt. Es beinhaltet immer noch einige Wasserstoffmoleküle pro Kubikmeter.

Und selbst wenn es den Technikern gelänge, auch das letzte Atom und Molekül aus einem Behältnis zu entfernen, so wäre es immer noch nicht leer. Denn seit der Quantenfeldtheorie weiß man, dass es kein perfektes

(= teilchenfreies) Vakuum geben kann. So steckt selbst das reinste Vakuum voller Teilchen. Dabei bilden sich Teilchen-Antiteilchen-Paare, die etwa 0,000 000 000 000 000 000 01 Sekunden nach ihrer Entstehung auch schon wieder verschwinden. Ein ständiges Geben und Nehmen mit Namen „Quantenfluktuation“. Das Universum borgt sich dazu Energie, lebt ständig auf Pump und zerstört so das Nichts.

B.6 **Kann etwas schneller sein als Licht?** *

Ja, es kann – aber nicht ohne Folgen.

Dass die Lichtgeschwindigkeit ein absolutes Tempolimit darstellt, gilt nur für Licht, das sich im Vakuum ausbreitet. Dort ist es immer mit knapp 300.000 Kilometern pro Sekunde unterwegs. Nach der Relativitätstheorie kann auch nichts schneller sein.

Licht breitet sich aber langsamer als 300.000 Kilometer pro Sekunde aus, wenn es durch ein lichtdurchlässiges Hindernis wie Wasser oder Diamant scheint. So hat Licht in Wasser nur noch eine Geschwindigkeit von 225.563 Kilometern pro Sekunde. In Diamant sind es sogar nur 123.957 Kilometer pro Sekunde. Solche Geschwindigkeiten werden von Teilchen nach Zusammenstößen in Beschleunigern locker erreicht. Diese Teilchen sind dann schneller als das Licht.

Nicht ohne Folgen: Wenn ein Flugzeug die Schallmauer durchbricht, gibt es einen Überschallknall. Beim Licht ist es ein Überlichtblitz, die so genannte Tscherenkow-Strahlung. Diese ist charakteristisch für die Art und Geschwindigkeit des Überlicht-Teilchen und wird von Physikern zur Bestimmung der Teilchenart genutzt.

Wenn es also heißt: „Nichts ist schneller als das Licht“, müsste man pedantisch ein „im Vakuum“ ergänzen.

B.7 **Warum kann das Standardmodell nicht stimmen?** *

Es gibt da einige Macken.

Das Standardmodell der Teilchenphysik steckt voller Rätsel. Da ist zunächst einmal diese Unzahl fundamentaler Teilchen. Zählt man alle zusammen, so kommt man auf eine Summe von 61 Teilchen. Das klingt nicht sonderlich fundamental. Überzeugender wäre es, wenn es nur

einige wenige Elementarteilchentypen gäbe, aus denen sich der Rest zusammensetzt.

Aber nicht nur die Teilchen selbst, auch ihre Masse und die Stärken ihrer Wechselwirkungen fallen im Standardmodell vom Himmel. Wie in einem Lückentext müssen hier rund 20 Werte von den Physikern in Experimenten bestimmt und dann per Hand in die Theorie eingesetzt werden. Die Wissenschaftler hätten nichts dagegen, wenn es auch hier nur ein, zwei Werte gäbe.

Und dann ist da ja auch noch die Schwerkraft. Obwohl wir sie in unserem Leben ständig spüren, bleibt sie im Standardmodell außen vor. Bisher ist es den Theoretikern nicht gelungen, auch die Schwerkraft über den Austausch von Kraftteilchen funktionieren zu lassen.

Das bedeutet nun nicht, dass die Schwerkraft theorielos ist: Die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt sie durch die Krümmung des Raumes. So kreist die Erde um die Sonne, weil diese den Raum eindellt und auf diese Weise unseren Planeten gefangen hält. Die Vorhersagen dieser Theorie decken sich hervorragend mit dem Experiment – zumindest bei großen Abständen. Denn bisher konnte man das Gravitationsgesetz nur bis zu einem Abstand von einem Millimeter exakt vermessen – der ist „riesig“ für das Standardmodell.

Physiker wissen aber auch ohne Messung, dass es bei sehr kleinen Abständen zu Problemen kommen muss. Dies liegt an so genannten Vakuum-Quantenfluktuationen. Denn nach der Quantentheorie kann sich das Universum Energie borgen. Je mehr Energie dabei geliehen wird, umso schneller muss sie zurückgezahlt werden. Dies alles geschieht in zeitlichen Größenordnungen von milliardstel milliardstel milliardstel Sekunden.

Dies bedeutet nun, dass das Vakuum nicht glatt ist – wie die allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt, sondern dass der Raum bei winzigsten Abmessung unangenehm spitz und scharfkantig gekrümmt ist. Quanteneffekte mischen die Raumzeit bei kleinen Abständen zu so genanntem Quantenschaum auf. Konkret bedeutet dies, dass die Gleichungen, mit denen man bisher versuchte, Quantentheorie und Schwerkraft unter einen Hut zu bringen, unendliche Ergebnisse hervorbrachten. Und das ist Unsinn.

B.8 Was bedeutet „Elektron“? *

Das Wort „Elektron“ hat griechischen Ursprung und bedeutet „Bernstein“.

Diese Bezeichnung hat 1891 der britische Physiker George Johnstone Stoney (1826–1911) für die Einheit der Elektrizität vorgeschlagen. Denn schon seit der Antike ist bekannt, dass sich Bernstein elektrisch auflädt, wenn man daran reibt. Entdeckt wurde das Elektron im Jahr 1897 vom Joseph John Thomson.

B.9 Was ist die Supersymmetrie? *

Der Supersymmetrie zufolge soll es mehr als doppelt so viele Teilchensorten geben, wie man bisher gesichtet hat.

Aufs Engste verbunden ist diese Verdoppelung mit der Tatsache, dass die Welt der Elementarteilchen in zwei Lager geteilt ist: in so genannte Fermionen (darunter fallen die Materieteilchen) und in Bosonen (die Wechselwirkungsteilchen).

Treten diese Teilchensorten im Rudel auf, so legen sie ein sehr unterschiedliches Verhalten an den Tag. So können mehrere Materieteilchen (also Fermionen) nicht in ein und demselben Zustand verweilen. Daraus folgt beispielsweise, dass die Elektronen eines Atoms nicht gleichzeitig im Zustand niedrigster Energie verharren können, sondern in fein säuberlich geordneten Schalen um den Kern angeordnet sind. Für Bosonen gilt diese Einschränkung nicht.

Die Supersymmetrie vereint nun die ungleichen Brüder: Danach gibt es zu jedem Fermion (Materieteilchen) ein entsprechendes Boson (Wechselwirkungsteilchen) und umgekehrt.

Gefunden wurden diese Super-Teilchen noch nicht. Aber Namen haben sie schon: Den Superpartnern der Materieteilchen stellt man ein „s“ vorweg. Die supersymmetrischen Zwillinge der Wechselwirkungsteilchen bekommen ein „ino“ hinten angestellt. Und so tummeln sich in der supersymmetrischen Welt Selektrenen, Gluinos, Squarks und Higgsinos.

Hier einige supersymmetrische Paare:

- ▷ Elektron – Selektion
- ▷ Neutrino – Sneutrino
- ▷ Quark – Squark
- ▷ Gluon – Gluino

- ▷ Photon – Photino
- ▷ Higgs – Higgsino

Was ist die Weltformel? **

B.10

Eines wohl sicher: keine Formel.

Die einen nennen sie Weltformel, die anderen allumfassende Theorie ohne freie Parameter. Gemeint ist in beiden Fällen das Gedankengerüst, das die wirklich fundamentalen Bausteine des Universums und alle in ihm wirkenden Kräfte beschreiben soll.

Ob dabei eine einzige Formel zu Tage treten wird, darf jedoch bezweifelt werden. Es wird vielmehr eine ganze Ansammlung von Konzepten sein, die angeben, aus welchen fundamentalen Objekten das Universum besteht und wie diese miteinander in Wechselwirkung treten. Das alles wird sich kaum in eine einzige Formel pressen lassen.

So steht Einsteins oft zitiertes „ E gleich m mal c Quadrat“ auch nicht für die gesamte Relativitätstheorie. Die Formel ist vielmehr ein Ergebnis zahlreicher Prinzipien und vieler Rechenschritte. Es reicht keineswegs aus, diese Formel zu kennen, um die ganze spezielle Relativitätstheorie zu verstehen.

Was ist dunkle Materie? **

B.11

Dunkel nennen Physiker Materie, die sie nicht direkt sehen können, deren Existenz sie aber indirekt vermuten.

Astronomen und Kosmologen wissen nicht, woher 90 Prozent der Masse im Universum stammt. Dass es diese 90 Prozent gibt, haben die Forscher unter anderem aus den Drehbewegungen von Galaxien erschlossen. Die müssten nämlich anders rotieren, wenn nur all das Masse hätte, was man auch sehen kann.

Es gibt zahlreiche Theorien dazu, aus welchen Dingen dunkle Materie besteht. Zu den vielen Kandidaten für die dunkle Materie zählen die so genannten WIMPs („weakly interacting massive particle“ oder: schwach wechselwirkende schwere Teilchen).

Auch DESY sucht nach diesen hypothetischen Teilchen – und zwar mit dem Neutrino-Teleskop ICECUBE im Ewigen Eis des Südpols. Dabei

konzentrieren sich die Forscher nicht auf den Kosmos. Vielmehr wird vermutet, dass sich WIMPs auch tief im Inneren der Erde aufhalten.

B.12 Was sind Strings? **

Strings sind winzige Fäden, aus denen sich manche Forscher das Universum zusammengesetzt denken.

Für Stringtheoretiker sind Elektronen und Quarks keine punktförmigen Teilchen, sondern winzige Fäden, die unentwegt hin- und herschwingen. Mit diesem Ansatz wollen die Wissenschaftler eine allumfassende Theorie schaffen, die alle Kräfte beschreibt. Im Gegensatz zum aktuellen Standardmodell der Teilchenphysik wäre dann auch die Schwerkraft mit von der Partie.

Das Wort „String“ kommt aus dem Englischen und bedeutet „Saite“. Und hier spielt die Musik: Die Superstrings schwingen auf verschiedene Arten und bilden so die unterschiedlichen Teilchen, ganz so, wie die Saiten einer Geige auch unterschiedliche Töne hervorbringen können. Strings sind dabei sogar im Vergleich zu Atomkernen zwergenhaft. Sie besitzen eine Länge von gerade einmal 10^{-34} Metern. Das bedeutet: Im Verhältnis zu einem Stecknadelkopf sind sie kleiner als der Stecknadelkopf im Vergleich zum Universum. Das ist so winzig, dass wir sie wohl niemals direkt beobachten werden können – auch nicht mit den Teilchenbeschleunigern der Zukunft.

B.13 Was suchen Physiker am Südpol? **

Neutrinos. Genauer gesagt: kosmische Neutrinos aus den entlegeneren Winkeln unseres Universums.

Kosmische Neutrinos zu beobachten ist nicht gerade einfach. Denn Neutrinos sind zwar extrem häufig, aber auch äußerst zurückhaltend, wenn es darum geht, mit anderen Teilchen zu wechselwirken – in jeder Sekunde rasen Ihnen 200 Milliarden Neutrinos durch den Kopf, ohne dass Sie es merken.

Um die Geisterteilchen dennoch zu orten, haben sich Wissenschaftler das Neutrino-Teleskop einfallen lassen, und das größte, ICECUBE, befindet sich am Südpol. Von der Neutrino-Teleskopie erhoffen sich die Wissenschaftler, das eine oder andere Geheimnis der Kosmologie zu lüften, wie z.B. das der dunklen Materie.

Die Idee hinter den Neutrino-Teleskopen: Manchmal verrät sich ein Neutrino beim Durchfliegen der Erde durch eine seltene Reaktion mit einem Atom, bei der ein anderes Elementarteilchen erzeugt wird, ein Myon. Es fliegt in dieselbe Richtung wie das Neutrino. Wer also die Herkunft des Neutrinos ergründen möchte, kann stattdessen die Flugbahn des Myons messen. Und das geht am besten in Wasser oder – wie im Fall von ICECUBE – in Eis, wo die Myonen schneller sind als das Licht und eine Art „Überlichtblitz“ abgeben, vergleichbar mit dem Überschallknall eines Düsenjets. Ein Neutrino-Teleskop besteht nun aus einer räumlichen Anordnungen einzelner Detektorkugeln, die in langen Ketten tief ins Wasser oder Eis versenkt werden, und die Lichtblitze der Myonen registrieren.

Nun soll ein solches Teleskop allerdings Neutrinos aufzeichnen, deren Reise nach Möglichkeit außerhalb unserer Galaxis ihren Anfang nahm. Doch diese sind in der Minderheit gegenüber denen, die in der Atmosphäre entstanden sind. Um diese „Fehlalarme“ so gering wie möglich zu halten, sind die Detektorkugeln nach oben abgeschirmt, registrieren also nur Myonen, die unter ihnen im Erdinnern entstanden sind.

Dennoch ist unter Tausenden von Neutrino-Ereignissen vielleicht gerade mal eines, was für die Astrophysiker von Interesse sein könnte.

Was verbrigt sich hinter der QED? ***

B.14

Die Theorie von Licht und Co.

Zutaten: Für eine Quantenelektrodynamik (QED) brauchen Sie die schon etwas abgehangene Theorie des Elektromagnetismus (Maxwell: 1861–1864), sowie die eher frische spezielle Relativitätstheorie (Einstein: 1905) und Quantentheorie (Planck, Schrödinger, Heisenberg & Co, 1900–1927).

Die Zubereitung erfordert einiges Geschick. Die ersten Versuche, die Zutaten zu vermengen, mögen Ihnen zwar viel versprechend erscheinen; es könnten aber ungegenießbare Unendlichkeiten im Theoriemix gären, wie auch schon Paul Dirac im Jahre 1927 feststellen musste. Halten Sie sich daher lieber an das Kochkunststück von Tomonaga, Feynman und Dyson, denen es um 1946 gelang, die unschön ausgeflockten Unendlichkeiten aufzulösen. Ihr Trick mit dem Namen „Renormierung“ wird seitdem in allen Theorieküchen der Teilchenphysik verwendet. Er wurde 1956 mit dem Nobelpreis belohnt.

Der Aufwand mag abschrecken, er lohnt aber allemal: Sie erhalten ei-

ne leckere Theorie, deren Vorhersagen in überwältigender Weise mit den Ergebnissen der Experimente übereinstimmen; man kann die QED sogar als genaueste bisher ausgedachte Theorie bezeichnen. Sie beschreibt, wie geladenen Teilchen elektromagnetisch miteinander wechselwirken und was Licht ist.

Die QED kommt in den unterschiedlichsten Variationen daher: Chef de Cuisine Richard Feynman hat sich dazu eigens eine Sprache ausgedacht, die Feynman-Diagramme, mit denen sich komplizierteste Reaktionen aus der Welt des Mikrokosmos berechnen lassen.

Zubereitungszeit: rund 17 Jahre Temperatur: 15 bis 25 Grad Celsius Kalorien: 0

Welche Arten von Beschleunigern gibt es?

B.15 *

Geradeaus und krumm.

Wer einen Teilchenbeschleuniger bauen will, steht zunächst vor einer grundlegenden Frage: geradeaus oder krumm? Waren die ersten Teilchenbeschleuniger noch gerade (oder linear), kam man recht schnell auf die Idee, Teilchenbeschleuniger als geschlossene Ringe zu bauen. Dies brachte einen wesentlichen Vorteil mit sich. Denn die Energie der Teilchen konnte so Schritt für Schritt, also Umlauf für Umlauf erhöht werden.

Der einfachste **Linearbeschleuniger** besteht aus zwei Platten, an denen eine elektrische Spannung anliegt. Geladene Teilchen werden von der anders geladenen Platte angezogen. Auf diese Weise werden auch die Elektronen in einem Fernseher beschleunigt. Um eine höhere Beschleunigung zu erreichen, können mehrere Platten hintereinander geschaltet werden.

Der Nachteil von Linearbeschleunigern: Man kann die einzelnen Elemente nicht mehrfach verwenden wie bei einem Ringbeschleuniger.

Ein **Synchrotron** besteht aus mehreren Linearbeschleunigern, die zu einem Ring angeordnet sind. In den Kurven sorgen Magnetfelder dafür, dass die Teilchen den richtigen Weg nehmen. Mit zunehmender Teilchenenergie muss die Stärke der Magnetfelder dabei erhöht werden, damit die Teilchen auf der vorgesehenen Bahn bleiben. Die Magnetfelder werden also mit der Energie der Teilchen synchronisiert, was zum Namen „Synchrotron“ führt..

Ein **Speicherring** ist die Weiterentwicklung des Synchrotrons. Nach der Beschleunigung können die Teilchen in ihm für mehrere Stunden oder sogar Wochen gespeichert werden. Die lange Verweildauer der Teilchen im Ring ist ein großer Vorteil von Speicherringen. Die Teilchen haben so mehrfach die Möglichkeit, miteinander zu kollidieren. Denn wenn sich in einem Beschleuniger zwei Teilchenpakete durchdringen, ist damit noch nicht gesagt, dass die Teilchen auch miteinander wechselwirken. Häufig passiert einfach gar nichts, die Teilchen fliegen dann einfach aneinander vorbei.

Welche Theorien stecken im Standardmodell der Teilchenphysik? **

B.16

QCD und QFD.

„Standardmodell der Teilchenphysik“ heißt jene Ansammlung von Ideen und Theorien, die sich bereit seit Jahren in der Teilchenphysiker-Gemeinde größter Anerkennung erfreut. Nach dem Standardmodell der Teilchenphysik gibt es Materieteilchen, die über Kräffeteilchen miteinander in Wechselwirkung stehen.

Wie diese Wechselwirkungen vonstatten gehen, wird dabei durch zwei Theorien beschrieben: Da ist auf der einen Seite die Quantenchromodynamik (QCD). Sie ist für die starke Kraft zuständig. Auf der anderen Seite findet man die Vereinigung von elektromagnetischer und schwacher Kraft zur elektroschwachen Kraft. Diese Vereinigung wird mathematisch in der so genannten Quantenflavordynamik (QFD) formuliert.

Sowohl die Quantenchromodynamik als auch die Quantenflavordynamik sind so genannte Quantenfeldtheorien. Dieser Theorietyp ergibt sich automatisch, wenn man die spezielle Relativitätstheorie mit der Quantentheorie verbindet. Während die spezielle Relativitätstheorie Vorgänge bei sehr hohen Energien und Geschwindigkeiten beschreibt, gilt die Quantentheorie insbesondere für winzige Objekte – wie es Elementarteilchen nun mal sind. In relativistischen Quantenfeldtheorien werden beide Denkmuster gekoppelt, um sinnvolle Aussagen über kleinste Teilchen bei hohen Energien zu machen. Aus diesen Theorien folgt dann etwa die Existenz von Antimaterie.

B.17 Werden die Teilchen in neuen Beschleunigern schneller? *

Kaum.

In allen Teilchenbeschleunigern bewegen sich Elektronen oder Protonen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit durch die Röhren. Dennoch unterscheiden sich die Teilchen in ihren Energien zuweilen erheblich. Denn doppelte Energie heißt bei weitem nicht doppelte Geschwindigkeit. Die Relativitätstheorie macht einem da einen Strich durch die Rechnung.

Denn wenn man ein Teilchen beschleunigt, so braucht man immer mehr Energie, je näher man an die Lichtgeschwindigkeit heranrückt. Diese Geschwindigkeit selbst kann nie erreicht werden, weil dazu eine unendliche Menge an Energie vonnöten wäre.

Doch schauen wir uns die Geschwindigkeiten der Elektronen in den einzelnen Teilchenbeschleunigern genauer an:

- ▷ HERA (in Ruhestand): 27,5 Milliarden eV (299.789.673 m/s)
- ▷ LEP (durch Nachfolger LHC ersetzt): 100 Milliarden eV (299.791.692 m/s)
- ▷ ILC (in Planung): 250 Milliarden eV (299.792.152 m/s)

Die Tabelle zeigt: Obwohl die Elektronen beim ILC gegenüber denen in HERA die zehnfache Energie besitzen werden, wird sich die Geschwindigkeit nur um 0,08 Promille erhöhen. ILCs Elektronen wären dann aber auch schon mit 99,9999-prozentiger Lichtgeschwindigkeit unterwegs.

Nicht zuletzt deshalb interessieren sich Teilchenphysiker auch nicht sonderlich für die Geschwindigkeit ihrer Teilchen. Für sie zählt die Energie alleine; schließlich nennen sie ihre Disziplin auch „Hochenergiephysik“ und nicht „Hochgeschwindigkeitsphysik“.

B.18 Wer erfand die Atome? *

Das griechische Gelehrtengepann Leukipp von Milet und Demokrit von Abdera.

Der Überlieferung zufolge gingen Leukipp von Milet (im 5. Jahrhundert v. Chr.) und Demokrit von Abdera (ca. 460 bis 371 v. Chr.) als Erste davon aus, dass die Welt aus Unteilbarem zusammengesetzt sei. Das Unteilbare heißt auf Griechisch „atomos“ und kam für die beiden

in unterschiedlichster Form daher: Die einen Atome waren spitz und eckig, die anderen rund und gebogen.

Auch für die Verbindungen der Atome zu Größerem ließen sich Leukipp und Demokrit einiges einfallen: So bestanden harte Körper aus Atomen mit Haken und Ösen, in flüssigen Stoffen schmiegt sich die Atome sanft umeinander.

Aber die Atomidee hatte ihre Widersacher. Darunter auch einer der Größten der Antike: Aristoteles (384 v. Chr. bis 322 v. Chr.). Ihm behagten die Atome ganz und gar nicht und so stellte er ihnen die Elemente Wasser, Feuer, Luft und Erde als Urstoffe entgegen. Aristoteles Meinung sollte bis ins Mittelalter die vorherrschende bleiben.

Wer gab dem Photon seinen Namen? *

B.19

Der Amerikaner Gilbert N. Lewis.

Wir schreiben das Jahr 1926. Vor fünf Jahren erhielt Albert Einstein den Nobelpreis für die Erklärung des Photoeffekts. Er ging dabei davon aus, dass Licht seine Energie nur in Portionen abgeben oder aufnehmen kann. Diese Portionen nannte er „Lichtquanten“, den Namen „Photon“ benutzte er nicht.

Der fiel zum ersten Mal 1926, als der amerikanische Chemiker Gilbert N. Lewis in einem Brief an das Wissenschaftsmagazin Nature schrieb: „*I therefore take the liberty of proposing for this hypothetical new atom, which is not light but plays an essential part in every process of radiation, the name photon.*“ (“Ich nehme mir daher die Freiheit heraus, für dieses hypothetische, neue Atom, das nicht Licht ist und dennoch eine wichtige Rolle bei Strahlungsvorgängen spielt, den Namen Photon vorzuschlagen.“)

Wer ist „Higgs“? *

B.20

„Higgs“ zählt zu den Meistgesuchten in der Teilchenphysik. Dabei hält er sich die meiste Zeit in Schottland auf.

Das Higgs-Feld sei überall, heißt es. Und es Sorge für unsere Masse. Zwei Aussagen, für die es nur – wenn auch überzeugende – Indizien gibt. Doch Physiker suchten bisher vergeblich nach dem so genannten Higgs-Teilchen, durch das sich das Higgs-Feld verraten soll.

Dabei gibt es die Theorie zum Teilchen schon eine ganze Weile. Ende der 1960er Jahre zeigte der schottische Physiker Peter Higgs, wie man den Teilchen im Standardmodell eine Masse geben könne. Das war auch dringend nötig. Denn es gab da zwar eine schöne theoretische Beschreibung, wie die Teilchen miteinander wechselwirken. Diese funktionierte aber nur bei masselosen Teilchen. Higgs brachte durch seinen Trick wieder alles ins Lot.

Gefunden wurde das Teilchen aber noch nicht, so sehr sich die Forscher auch bemühen. Das Higgs sei selbst zu schwer, um mit heutigen Teilchenbeschleunigern gefunden zu werden, sagen Physiker und betonen ihre Zuversicht, dass das Teilchen spätestens mit der nächsten Teilchenbeschleuniger-Generation ins Rampenlicht geholt werde – ein Schicksal, das dann auch Peter Higgs gewiss wäre.

B.21 Wie alt ist die Quantentheorie? **

Über 100 Jahre.

Angefangen hatte alles im Jahr 1900. Damals setzte Max Planck den Quantengedanken zum ersten Mal auf die physikalische Tagesordnung. Er musste. Denn nur so gelang ihm eine Erklärung für die Strahlung, die von einem heißen Körper wie einer glühenden Herdplatte ausgesendet wird. Richtig wohl fühlte sich Max Planck bei der Vorstellung jedoch nie: Dass die Natur Sprünge mache und dass Energie nur in Paketen aufgenommen und abgegeben werden könne, behagte ihm nicht. Albert Einstein war da skrupelloser. Er griff 1905 die Idee von den Quanten auf, um den so genannten photoelektrischen Effekt zu erklären. Physiker um ihn herum rümpften damals noch ihre Nase aufgrund dieses Wagemuts.

Richtige Quantentheorien kamen jedoch erst in den 1920er Jahren auf. Damals formulierten Erwin Schrödinger und Werner Heisenberg die Mechanik (jener Teil der Physik, der sich mit der Bewegung von Körpern beschäftigt) im Sinne der Quanten neu. Das Ergebnis ist die Quantenmechanik.

Im Laufe der Zeit wurde dann auch die Elektrodynamik (jener Teil der Physik, der sich mit elektromagnetischen Phänomenen beschäftigt) quantenformuliert und die spezielle Relativitätstheorie mit eingebaut. Einer der Höhepunkte dieser Entwicklung ist das Standardmodell der Teilchenphysik, in dem ein Großteil aller Quantenerkenntnisse zusammengefasst sind.

Wie flott sind Sie bei einer Bewegungsenergie von 250 Milliarden Elektronenvolt? *

B.22

Schlappe 12 Zentimeter pro Stunde.

Beim zukünftigen Linearbeschleuniger ILC sollen Elektronen mit jeweils rund 250 Milliarden Elektronenvolt unterwegs sein. Klingt nach viel, wäre auch Weltrekord. Doch wenn Sie selbst diese Energie hätten, wären Sie mit enttäuschend schlappen 12 Zentimetern pro Stunde unterwegs.

Dies ist die Geschwindigkeit einer Masse von 70 Kilogramm mit einer Bewegungsenergie von 250 Milliarden Elektronenvolt. Jede Nacktschnecke hält da locker mit.

Sind Teilchenphysiker also Hochstapler? Oder haben sie sich einfach verrechnet? Mitnichten! Denn in Ihrem Körper ist die Energie auf Milliarden Milliarden Elektronen verteilt. In Teilchenbeschleunigern hingegen ist die Energie auf ein einzelnes Teilchen konzentriert. Damit erreichen die Forscher beim Zusammenstoß dieser Teilchen einen Zustand, wie er in den ersten Momenten des Universums herrschte.

Wie heißt der weltweit größte Beschleuniger? *

B.23

LHC.

Der größte Teilchenbeschleuniger, den Physiker bisher gebaut haben, heißt LEP bei Genf. Oder besser: hieß. Denn im November 2000 wurde der 27 Kilometer lange Beschleuniger stillgelegt. Mehr als zehn Jahre lang drehten hier Elektronen und deren Antiteilchen, die Positronen, ihre Runden. Dabei konnte das Standardmodell der Teilchenphysik auf Herz und Nieren untersucht werden.

Mittlerweile wurden Beschleuniger und die Teilchendetektoren demonstert und mit der Tunnel mit neuer Technik gefüllt: Ab 2007 sind es dann Protonen, die die Physiker aufeinanderprallen lassen – im LHC, dem *Large Hadron Collider*. Der LHC wird nicht nur der weltweit längste Beschleuniger sein, sondern auch der mit der höchsten Energie.

B.24 **Wie lange braucht Licht von der Erde zur Sonne?** *

Etwas mehr als acht Minuten.

Licht braucht eben auch seine Zeit. Schließlich legt es „nur“ 299.792,458 Kilometer in der Sekunde zurück.

Und weil im Weltall das Licht immer diese Geschwindigkeit hat, werden astronomische Entfernungen auch in Zeiteinheiten gemessen. Die bekannteste Einheit nach diesem Prinzip ist das Lichtjahr (rund 9 Billionen Kilometer). Die Sonne ist demnach acht Lichtminuten (rund 150 Millionen Kilometer) von der Erde entfernt. Würde sie in diesem Augenblick erlöschen, so ginge bei uns das Licht erst in acht Minuten aus.

B.25 **Wie schwer sind Neutrinos?** *

Das wüssten Neutrinophysiker auch gerne. Nur eines scheint gewiss: Neutrinos wiegen etwas, aber nicht viel.

Die genaue Masse der Neutrinos hat man noch nicht bestimmt. Denn Neutrinos sind ebenso häufig wie zurückhaltend: So durchdringen zwar jede Sekunde 60 Milliarden Neutrinos jeden Quadratzentimeter Ihres Körpers, aber die Teilchen reagieren so schwach mit Materie, dass im Schnitt erst ein Bleiblock von 100 Lichtjahren Länge ausreicht, um die Teilchen einzufangen. Das macht Neutrinoexperimente äußerst schwierig. Die Neutrinomasse blieb daher lange im Dunklen.

Als Wolfgang Pauli die Existenz der Neutrinos 1930 vorhersagte, dachte er noch an eine Masse in der Nähe der des Elektrons. Aber schon bald mehrten sich die Vermutungen, dass das Neutrino vielleicht masselos sei. Und so ging das Standardmodell der Teilchenphysik lange von masselosen Neutrinos aus. Aber das ist falsch.

Denn neueste Ergebnisse am Sudbury-Neutrino-Observatorium in Kanada haben nun ergeben, dass Neutrinos nicht masselos sind. Schätzungen zeigen aber, dass sie über 50.000-mal leichter sind als Elektronen.

B.26 **Wie spricht man „Quark“ richtig aus?** *

„kwork“ oder „kwark“?

Als wäre es nicht schon kompliziert genug, sich die subatomaren Teilchen überhaupt vorzustellen, sorgt schon die Aussprache ihrer Namen für Kopfzerbrechen: „kwork“ oder „kwark“? Das ist hier die Frage. Vermeintlich eine Frage zwischen Englisch und Deutsch. Doch auch die Anglo-Amerikaner unterliegen prinzipiell der Qual der Wahl.

Einer sollte es genau wissen, der Benenner selbst. Und so schreibt der Teilchentheoretiker Murray Gell-Mann in seinem Buch „Das Quark und der Jaguar“, dass ihm bei der Teilchentaufe zunächst der Klang des Wortes in den Sinn gekommen sei. Und dieser Klang entsprach „kwork“.

Erst danach sei er bei einem seiner „gelegentlichen Streifzüge“ durch den Roman „Finnegans Wake“ des Schriftstellers James Joyce auf das Wort „quark“ gestolpert. Der Satz hieß „Three quarks for Muster Mark“.

„quark“ stand nun aber nicht im Einklang zu „kwork“. Denn „quark“ wird hier eindeutig als Reimwort zu „Mark“ verwendet und müsste daher wie das deutsche Milchprodukt ausgesprochen werden.

Eine Brücke musste her, und die fand Gell-Mann im Alkohol. So beschreibt der Roman „Finnegans Wake“, auf den sich Gell-Mann bezieht, den Traum eines Gastwirts mit Namen Humphrey Chimpden Earwicker. Wer nun wie Earwicker den Großteil seiner Zeit hinter der Bar verweilt, träumt auch nachts davon. Joyce lässt daher in seinem Roman immer wieder Sätze auftauchen, die mit der Bestellung von Getränken zusammenhängen. Wer nun von Earwicker „Three *quarts* for Muster Mark“ fordert, muss damit rechnen, drei Biere zu bekommen. Und hier ist die Lösung: Zum einen wird das „kwork“ ausgesprochen (passt vom Klang schon einmal ganz gut), zum anderen sind es drei und von ebenso vielen subatomaren Teilchen ging Gell-Mann aus.

Lange Rede, kurzer Klang: „kwork“ ist die Antwort. Auch wenn man mittlerweile weiß, dass es sechs unterschiedliche Quarktypen gibt.

Wie viele Teilchensorten gibt es? *

B.27

61.

Mal zählen...

Da haben wir zunächst die Materieteilchen, aus denen unsere Welt besteht: das Elektron, das Elektron-Neutrino sowie zwei Quarks (up und down). Die beiden Quarks kommen jeweils in den drei Farben

Rot, Grün und Blau daher. Macht zusammen 8 Teilchensorten, die zur „ersten Teilchenfamilie“ zusammengefasst sind. Daneben gibt es noch zwei weitere Familien, deren Mitglieder ganz ähnliche Eigenschaften haben, jedoch schwerer sind. 8 mal 3 ist 24. Damit sind wir aber noch nicht am Ende: Zu jedem dieser Teilchen gibt es noch einen antimateriellen Partner. Ergibt – summa summarum – 48.

Zwischen den Materieteilchen sorgen Wechselwirkungsteilchen für Abwechslung, über sie werden die Kräfte übermittelt. Zu jeder dieser Kräfte gibt es nun eigene Teilchen. Das Photon zur elektromagnetischen Kraft, die Teilchen W-Plus, W-Minus und Z-Null zur schwachen Kraft und insgesamt acht Gluonen für die starke Kraft: Macht $1+3+8=12$. Da die Schwerkraft im Standardmodell nicht beschrieben wird, lassen wir das Graviton mal außen vor.

Und dann gibt es ja noch die Higgs-Teilchen. Jene scheue Teilchen, die man zur Erklärung, wieso es eine Masse gibt, braucht, die den Forschern bisher jedoch durch die Lappen gegangen sind. Nach der einfachsten Theorie gibt es genau einen Typ von Higgs-Teilchen, es könnten aber auch mehr sein.

Zählt man zusammen, erhält man eine Summe von 61 Teilchen.

Das ist jede Menge und provoziert bei manchem die Frage, ob diese Teilchen wirklich so fundamental und auf der Suche nach dem Kleinsten der Weisheit letzter Schluss sind. Viele Physiker suchen daher auch nach Möglichkeiten, wie man diese große Anzahl von Teilchen auf wenige Annahmen zurückführen kann. Die Stringtheorie ist dabei ein Ansatz.

B.28 Wie viel wiegen Quarks? *

Eine Frage der Definition. Je nachdem, was Sie unter einem Quark verstehen, unterscheiden sich die Massen erheblich.

Quarks sind nach dem Standardmodell der Teilchenphysik elementare Bausteine der Natur. Aus ihnen bestehen beispielsweise Protonen und Neutronen, die Bestandteile der Atomkerne, aber auch viele weitere Verbindungen. Die Krux ist sogar: Quarks können gar nicht anders als miteinander verbunden zu sein. Kein Experimentator hat sie bisher einzeln angetroffen. Daher ist es bisher auch nicht geglückt, die Masse eines isolierten Quarks genau zu bestimmen.

Die Masse des Protons kennt man aber. Und man weiß, dass Protonen im Wesentlichen aus drei Quarks bestehen. Wenn man nun davon aus-

geht, dass sich diese drei Quarks die Masse des Protons teilen, bekommen wir etwas über 600 Milliardstel Milliardstel Milliardstel Gramm (oder: $360 MeV/c^2$).

Aber im Proton geht's vertrackter zu: So wuseln dort neben den drei Hauptquarks noch zahlreiche weitere Teilchen wie beispielsweise die Wechselwirkungsteilchen der starken Kraft, die Gluonen, herum. Da auch diese zur Masse des Protons beitragen, müssen sie weggerechnet werden. Dabei kommen auch leichte Unterschiede zwischen den beiden Quark-Typen im Proton zum Vorschein: Das Up-Quark wiegt rund 5 Milliardstel Milliardstel Milliardstel Gramm (oder: ca. $3 MeV/c^2$). Das Down-Quark kommt auf eine Masse von rund 12 Milliardstel Milliardstel Milliardstel Gramm (oder: ca. $6,5 MeV/c^2$).

Die leichtesten Quarks sind damit zehn bis zwanzigmal schwerer als ein Elektron. Aber es geht noch schwerer: Das erst 1995 entdeckte Top-Quark kann es im Masse messen gar mit einem Goldatom aufnehmen.

Wie viel wiegt ein Elektron? *

B.29

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 9 Kilogramm.

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 9 Kilogramm oder in der mit Nullen geizenden wissenschaftlichen Schreibweise: 9×10^{-31} Kilogramm. Damit zählen Elektronen zu den leichtesten Teilchen, die das Standardmodell zu bieten hat: 2.000-mal leichter als ein Wasserstoffatom, das Atom mit der geringsten Masse. Nur Neutrinos wiegen noch weniger.

Nach der speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein entsprechen sich Masse und Energie eines ruhenden Teilchens. Ein Elektron gewinnt dann an Masse, wenn man es auf hohe Energien beschleunigt. Aus diesem Grund waren die Elektronen in DESYs Beschleuniger HERA am Ende 60.000-Mal so schwer wie in Ruhe. Sie wogen dann mehr als ein Schwefelatom.

Wie weit ist ein Quantensprung? **

B.30

Ganz schön kurz.

Zu den Quantensprüngen zählen die kleinsten Veränderungen, die ein physikalisches System durchmachen kann. Nehmen wir als Beispiel ein

Atom: Dort umkreisen Elektronen einen Kern, was aber nicht auf beliebigen Bahnen erfolgen kann. Vielmehr stehen den Elektronen nur bestimmte Möglichkeiten zur Verfügung. Zwischen diesen Möglichkeiten gibt es verbotene Zonen. Die sind für die Elektronen Tabu.

Wenn ein Elektron nun seine Bahn ändert – zum Beispiel weil sein Atom durch Lichteinstrahlung Energie gewonnen hat, muss das Teilchen auf eine andere Bahn springen. Denn in der Tabuzone dazwischen darf es sich ja nicht aufhalten.

Ein solcher Quantensprung ist damit der kleinste Sprung, den das Elektron machen kann. Mit großen Schritten hat er nicht viel zu tun. Wenn Ihnen also demnächst jemand etwas von einem Quantensprung in einer politischen Verhandlung oder bei der Neuentwicklung eines Produkts erzählen will, seien Sie auf der Hut! Vielleicht weiß er, wie klein ein Quantensprung sein kann.

Wie weit schaffte es ein Elektron im Beschleuniger HERA? *

B.31

Einmal bis zur Grenze des Sonnensystems und zurück – wenn es geradeaus flöge, anstatt in DESYs Beschleuniger HERA Runde um Runde zu kreisen.

Im Tunnel des Ringbeschleunigers HERA waren Elektronen fast mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs. Bei einer durchschnittlichen Verweildauer von zehn Stunden legten sie knapp elf Milliarden Kilometer zurück. 10.792.428.228, um genau zu sein. Nach etwa zehn Stunden entledigen sich die Beschleunigerphysiker der Elektronen: der Teilchenstrahl war dann nach etlichen Zusammenstößen mit anderen Teilchen zu schlecht für gute Forschung geworden.

In den zehn Stunden seines HERA-Daseins hätte das Elektron auch dem gut fünf Milliarden Kilometer entfernten Planeten Pluto einen Besuch abstatten können. Aber von solchen Ausflügen konnte es in HERA nur träumen: Magnetfelder sorgten dafür, dass aus dem 6,3 Kilometer langen Tunnel kein Entrinnen ist.

Wofür bekam Albert Einstein den Nobelpreis? *

B.32

Nicht für seine Relativitätstheorie, sondern für seine frühen Beiträge zur Quantentheorie.

1905 griff Albert Einstein die Idee des deutschen Physikers Max Planck auf, nach der Licht Energie nur in Portionen – den so genannten Quanten – abgeben und aufnehmen könne. Mit diesem Ansatz gelang es Einstein, den „Photoeffekt“ zu erklären.

In der Nobelpreisbegründung von 1921 heißt es dann auch: „für seine Dienste in der theoretischen Physik, vor allem für die Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effektes“.

Woher stammt der Name „Quark“? *

B.33

Aus dem Roman „Finnegan’s Wake“ von James Joyce.

Der Name dieser Elementarteilchen geht auf den Physiker Murray Gell-Mann zurück. Er bezieht sich dabei auf eine Zeile aus dem Roman „Finnegan’s Wake“ von James Joyce. Dort heißt es „Three quarks for Muster Mark“. Wahrscheinlich sind damit drei Biere gemeint. So ganz klar wird das jedoch nicht. Denn der Roman wird dem eher unverständlichen Genre zugerechnet.

Im selben Jahr wie Gell-Mann hatte auch der amerikanische Physiker George Zweig entdeckt, dass mit weiteren subnuklearen Teilchen Ordnung in das Teilchenchaos gebracht werden könnte. Er taufte diese Objekte Asse (aces). „KworkQuark“ bedankt sich beim Lauf der Zeit für seinen Namen und fände die Bezeichnung „ÄisAss“ sehr gewöhnungsbedürftig.

Wo wurde das Gluon entdeckt? *

B.34

Bei DESY in Hamburg.

Im Jahr 1979 nahm der 2,3 Kilometer lange Beschleuniger PETRA bei DESY seinen Betrieb auf. Schon bald zeigten sich Mercedes-Sterne auf den Bildschirmen der Physiker. Dabei handelte es sich um drei gebündelte Teilchenstrahlen, von den Physikern „Jets“ genannt.

Die Erklärung der Physiker für diese Mercedes-Sterne: Einer der drei Jets stammt von einem Gluon, die beiden anderen von jeweils einem

Quark. Damit war bei PETRA die erste Sichtung der Gluonen gelungen, der Wechselwirkungsteilchen der starken Kraft.