

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: mittlerer 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

<b>1</b>	<b>Teilchen und Kräfte</b>	<b>19</b>
1.1	Man nehme...	19
1.1.1	Universum selbstgemacht *	19
1.1.2	Das Rezept **	20
1.1.3	Drei Säulen des Universums *	21
1.1.4	Teilet! **	21
1.1.5	Von der Kuh zum Quark **	22
1.1.6	KworkQuarkQuiz **	23
1.2	Elektron, Neutrino, Quarks und Konsorten	24
1.2.1	4 Freunde sollt Ihr sein *	24
1.2.2	Elektronen **	25
1.2.3	Neutrinos **	25
1.2.4	Quarks **	26
1.2.5	Antimaterie *	27
1.2.6	Drei Familien *	27
1.2.7	KworkQuarkQuiz **	28
1.3	Was die Welt zusammenhält – Kräfte	29
1.3.1	Der Zaubertoaster *	29
1.3.2	Vier Kräfte *	30
1.3.3	Briefe schreiben bewegt *	30
1.3.4	Wechselwirkungsteilchen *	31
1.3.5	Photonen und der Elektromagnetismus **	32
1.3.6	Gluonen und die starke Kraft **	33
1.3.7	Farbladungen **	33
1.3.8	Ws, Zs und die schwache Wechselwirkung **	34

	1.3.9	KworkQuarkQuiz **	34
1.4		Massive Korrektur – Der Higgs-Mechanismus	34
	1.4.1	Eine Welt ohne Masse *	35
	1.4.2	Der Higgs-Mechanismus *	35
	1.4.3	Eine schwere Party **	36
	1.4.4	Das Higgs-Teilchen: ein Gerücht **	36
	1.4.5	KworkQuarkQuiz **	37
<b>2</b>		<b>Teilchen beschleunigen</b>	<b>39</b>
2.1		Wozu beschleunigen?	39
	2.1.1	Physik in Hamburgs Unterwelt *	39
	2.1.2	Energie erhöhen *	40
	2.1.3	Vom Problem Kleingedrucktes zu lesen **	41
	2.1.4	Energieschwindel? **	42
	2.1.5	KworkQuarkQuiz **	42
2.2		Wie beschleunigen?	43
	2.2.1	Die Grundidee: Spannung *	43
	2.2.2	Das Elektronenvolt **	43
	2.2.3	Erst noch langsam ... **	44
	2.2.4	... dann lichtschnell **	45
	2.2.5	Korrektur der Grundidee: Magnetfelder *	45
	2.2.6	KworkQuarkQuiz **	46
2.3		Kreis- und Linearbeschleuniger	47
	2.3.1	Krumm gelaufen... *	47
	2.3.2	...oder geradeaus? *	47
	2.3.3	Synchrotron und Speicherring *	48
	2.3.4	Die Synchrotronstrahlungs-Not ... **	48
	2.3.5	... zur Tugend gemacht. **	49
<b>3</b>		<b>Teilchen streuen</b>	<b>51</b>
3.1		Um die Ecke geschaut	51
	3.1.1	Crash-Tests im Kleinen **	51
	3.1.2	Streu-Experiment I: Um die Ecke geschaut *	52
	3.1.3	Streu-Experiment II: Reingeschaut *	53
	3.1.4	Streu-Experiment III: Neues gemacht *	54
3.2		Vom Atomkern zu den Quarks	55
	3.2.1	Der Kern der Dinge *	55
	3.2.2	Modell-Wettbewerb **	56
	3.2.3	Rutherford, die zweite **	57
	3.2.4	Das Proton von innen **	58

3.2.5	HERA *	58
3.2.6	KworkQuarkQuiz **	59
3.3	Moderne Streuexperimente . . . . .	59
3.3.1	Teilchennachweis *	59
3.3.2	Großdetektoren *	60
3.3.3	Teilchennachweis im Groß-Detektor **	61
3.3.4	KworkQuarkQuiz **	62
<b>4</b>	<b>Quantenphysik</b>	<b>65</b>
4.1	Das Ende vom Ende . . . . .	65
4.1.1	Das Ende der Physik? **	65
4.1.2	Angequante Physik **	66
4.1.3	Vorsicht Quantensprung! **	67
4.1.4	Energie in Paketen **	67
4.2	Auf mehreren Hochzeiten tanzen . . . . .	68
4.2.1	Quanten beobachten **	69
4.2.2	Quanten unbeobachten **	71
4.2.3	Welle oder Teilchen? **	71
4.2.4	Torwandschießen mit Quanten-Fußbällen **	72
4.3	Wer wissen will, muss nachsehen . . . . .	73
4.3.1	Vom Unwissen wissen **	73
4.3.2	Glücksspieler Gott **	74
4.3.3	Zustände in der Quantenwelt **	75
4.3.4	Quanten vermessen **	75
4.3.5	Quanten-Unbestimmtheit **	76
<b>5</b>	<b>Symmetrien</b>	<b>77</b>
5.1	Was ist eine Symmetrie? . . . . .	77
5.1.1	Wenn nichts passiert **	77
5.1.2	Symmetrien der Gesetze **	78
5.1.3	Elefanten aus Mücken **	80
5.1.4	KworkQuarkQuiz **	82
5.2	Supersymmetrie . . . . .	83
5.2.1	Die Teilchenverdopplerin **	83
<b>6</b>	<b>Lexikon</b>	<b>87</b>
6.1	ALICE **	87
6.2	Allgemeine Relativitätstheorie **	87
6.3	Anderson, Carl (1905–1991) **	87
6.4	Antimaterie *	88

6.5	Antineutron **	88
6.6	Antiproton **	88
6.7	Antiteilchen *	89
6.8	Aristoteles (384 v. Chr. bis 322 v. Chr.) **	89
6.9	Asymptotische Freiheit **	90
6.10	ATLAS **	90
6.11	Atom *	91
6.12	Atomkern *	92
6.13	Beschleunigermagnete **	92
6.14	Bohr, Niels (1885–1962) **	92
6.15	Boson **	93
6.16	Bottom-Quark *	93
6.17	Bremsstrahlung **	93
6.18	Bunch **	93
6.19	CERN *	94
6.20	Charm-Quark **	94
6.21	CMS **	95
6.22	Demokrit (460 v.Chr. bis 375 v.Chr.) **	95
6.23	DESY *	96
6.24	Dipolmagnet **	97
6.25	Dirac, Paul (1902–1984) **	97
6.26	Down-Quark *	98
6.27	Drahtkammer **	98
6.28	Dunkle Materie **	99
6.29	Einstein, Albert (1879-1955) **	100
6.30	Elektrische Ladung *	100
6.31	Elektromagnetische Kraft *	101
6.32	Elektromagnetisches Kalorimeter **	101
6.33	Elektromagnetisches Spektrum **	101
6.34	Elektromagnetische Welle **	102
6.35	Elektromagnetismus **	102
6.36	Elektron *	102
6.37	Elektronenvolt *	103
6.38	Elektron-Neutrino *	104
6.39	Elektroschwache Kraft	104
6.40	Element **	105
6.41	Energie **	105
6.42	Ereignis **	105
6.43	Ereignisrate **	106
6.44	Erhaltungssatz **	106

6.45	Experiment **	106
6.46	Farbladung **	107
6.47	Fermi, Enrico (1901–1954) **	107
6.48	Fermilab **	108
6.49	Feynman, Richard P. (1918–1988) **	108
6.50	FLASH **	108
6.51	Fokussierung **	109
6.52	Frequenz **	109
6.53	Funkenkammer **	109
6.54	Gell-Mann, Murray (*1929) **	110
6.55	Geschwindigkeit **	110
6.56	Gluon *	110
6.57	Gravitation **	111
6.58	Gravitationskraft *	111
6.59	Graviton **	112
6.60	Grid **	112
6.61	Großdetektor **	113
6.62	GUT **	114
6.63	H1 **	114
6.64	Halbleiter-Detektor **	115
6.65	HASYLAB **	115
6.66	Hauptquark **	115
6.67	Heisenberg, Werner (1901–1976) **	115
6.68	HERA *	116
6.69	HERMES **	117
6.70	Hertz **	117
6.71	Higgs, Peter (*1929) **	117
6.72	Higgs-Mechanismus **	118
6.73	Higgs-Teilchen *	119
6.74	ILC	119
6.75	Impuls **	119
6.76	Ion **	119
6.77	Jet **	120
6.78	Kalorimeter *	120
6.79	Kaonen **	120
6.80	KEK **	121
6.81	Kernfusion **	121
6.82	Kernkraft **	121
6.83	Kernspaltung **	121
6.84	Kicker-Magnet **	122

6.85	Klassische Physik **	122
6.86	Kosmische Strahlung **	122
6.87	Kosmologie **	123
6.88	Kreisbeschleuniger *	123
6.89	Ladung **	123
6.90	Lebensdauer *	124
6.91	LEP **	124
6.92	LHC *	125
6.93	LHCb **	125
6.94	LHCf **	126
6.95	Licht *	126
6.96	Lichtgeschwindigkeit *	127
6.97	Linearbeschleuniger *	127
6.98	Masse *	127
6.99	Masse-Energie-Äquivalenz **	128
6.100	Marieteilchen *	128
6.101	Maxwell, James Clerk (1831–1879) **	129
6.102	Maxwell-Gleichungen **	129
6.103	Mendelejew, Dimitri I. (1834–1907) **	130
6.104	Molekül *	130
6.105	Myon *	130
6.106	Myonkammer **	130
6.107	Myon-Neutrino *	131
6.108	Naturkonstanten **	131
6.109	Nebelkammer **	131
6.110	Neutrinos *	132
6.111	Neutron *	132
6.112	Newton, Isaac (1643–1727) **	132
6.113	Nobelpreis *	133
6.114	Paper **	133
6.115	Pauli, Wolfgang (1900–1958) **	133
6.116	Periodensystem **	133
6.117	Photoeffekt **	134
6.118	Photon *	135
6.119	Photovervielfacher **	136
6.120	Planck, Max (1858–1947) **	136
6.121	Planckkonstante **	137
6.122	Positron *	137
6.123	Proton *	138
6.124	Quadrupolmagnet **	138

6.125	Quantenchromodynamik (QCD) **	138
6.126	Quantenelektrodynamik (QED) **	139
6.127	Quantenflavordynamik (QFD) **	139
6.128	Quantensprung **	139
6.129	Quarkgefangenschaft **	140
6.130	Quark-Gluon-Plasma **	140
6.131	Quarkmodell **	141
6.132	Quarks *	141
6.133	Radioaktivität **	142
6.134	Raum **	142
6.135	Raumzeit **	142
6.136	Relativistischer Massezuwachs **	142
6.137	Relativitätstheorie **	143
6.138	RHIC **	143
6.139	Röntgen, Wilhelm C. (1845–1923) **	143
6.140	Röntgenstrahlung **	144
6.141	Rutherford, Ernest (1871–1937) **	144
6.142	Rutherford'scher Streuversuch **	144
6.143	Schrödinger, Erwin (1887–1961) **	145
6.144	Schrödingers Katze **	145
6.145	Schwache Kraft *	146
6.146	Seequark **	146
6.147	SLAC **	146
6.148	SLC **	147
6.149	Speicherring **	147
6.150	Spezielle Relativitätstheorie *	147
6.151	Spin **	148
6.152	Spurkammer **	148
6.153	Standardmodell *	148
6.154	Starke Kraft *	149
6.155	Strange-Quark *	149
6.156	Streuexperiment **	150
6.157	Superstringtheorie **	150
6.158	Supersymmetrie **	151
6.159	Supraleitung **	152
6.160	Synchrotron **	152
6.161	Synchrotronstrahlung **	153
6.162	Tau-Neutrino *	153
6.163	Tauon *	154
6.164	Teilchen *	154

6.165	Teilchenbeschleuniger *	155
6.166	Teilchenbeschleuniger weltweit **	155
6.167	Teilchendetektor *	155
6.168	Teilchenfamilien *	156
6.169	Teilchenpaket	156
6.170	Teilchenphysikzentren **	156
6.171	Teilchenquellen **	157
6.172	Tesla **	158
6.173	Tevatron **	158
6.174	Theorie **	158
6.175	Tief-inelastische Streuung **	159
6.176	Top-Quark *	159
6.177	TOTEM **	160
6.178	Undulator **	160
6.179	Universum **	160
6.180	Up-Quark *	162
6.181	Urknall **	163
6.182	Vakuum **	163
6.183	Vereinheitlichung **	164
6.184	Vertexdetektor **	164
6.185	Virtuelle Teilchen **	164
6.186	W *	165
6.187	Wechselwirkung *	165
6.188	Wechselwirkungsteilchen *	166
6.189	Wellenlänge **	166
6.190	Welle-Teilchen-Dualismus **	166
6.191	Weltformel **	167
6.192	Wiggler **	167
6.193	WIMP **	168
6.194	Z *	168
6.195	Zehnerpotenz **	168
6.196	Zeit **	168
6.197	Zeitdilatation **	169
6.198	ZEUS **	170
6.199	Zyklotron **	170

<b>A Zeitleiste</b>	<b>173</b>
-600: Der Urstoff: Wasser **	173
-450: Vier Elemente: Feuer, Wasser, Erde, Luft **	173
-400: Geburt der Atomidee *	173

1300: Erste mechanische Uhr **	174
1514: Kopernikanische Wende **	174
1590: Erstes Mikroskop **	174
1803: Atombeweis **	174
1858-1947: Max Planck **	175
1864: Die Theorie des Lichts **	175
1869: Periodensystem **	175
1879-1955: Albert Einstein **	176
1895: Entdeckung der Röntgenstrahlung **	176
1896: Entdeckung der Radioaktivität **	176
1897: Entdeckung des Elektrons *	176
1900: Der Quantengedanke **	177
1905: Photoeffekt mit Quanten **	177
1905: Spezielle Relativitätstheorie **	177
1909: Entdeckung des Atomkerns *	177
1909: Entdeckung der Ladungsquantelung **	178
1911: Nebelkammer **	178
1913: Bohrs Atommodell **	178
1918-1988: Richard Feynman **	179
1919: Entdeckung des Protons *	179
1922: Teilchennatur von Röntgenlicht **	179
1926: Die Taufe des Photons **	179
1928: Vorhersage der Antimaterie **	179
1929: Murray Gell-Mann **	179
1929: Zyklotron **	180
1930: Vorhersage des Elektron-Neutrinos *	180
1932: Nachweis des Neutrons **	180
1932: Nachweis des Positrons *	180
1940: Tscherenkow-Detektoren **	180
1947: Entdeckung des Myons **	181
1948: Fertigstellung der Quantenelektrodynamik **	181
1951: Blasenkammer **	181
1955: Entdeckung des Antiprotons **	181
1956: Nachweis des Elektron-Neutrinos *	181
1957: Ist das Universum spiegelsymmetrisch? **	182
1957: Das Universum ist nicht spiegelsymmetrisch **	182
1959: Gründung von DESY **	182
1962: Entdeckung des Myon-Neutrinos **	182
1964: Teilchenphysik wird schwer: Higgs **	182
1964: Vorhersage der Quarks *	182

1967: Elektroschwache Vereinigung **	183
1969: Nachweis der Quarks *	183
1971: Supersymmetrie **	183
1972: Quantenchromodynamik **	183
1974: Entdeckung des Charm-Quarks **	184
1975: Entdeckung des Tauons **	184
1977: Entdeckung des Bottom-Quarks **	184
1979: Entdeckung der Gluonen **	184
1981: Stringtheorie **	184
1983: Entdeckung der Ws und Zs **	185
1987: Tevatron **	185
1989: Nur drei Familien **	185
1989-2000: LEP **	185
1989-2006: SLC **	185
1992-2007: HERA **	185
1995: Entdeckung des Top-Quarks **	186
2000: Entdeckung des Tau-Neutrinos **	186
2008: Start des LHC *	186

## **B Fragen und Antworten 187**

B.1 Aus wie vielen Quarks bestehen Protonen? **	187
B.2 Gibt es magnetische Monopole? ***	187
B.3 Gibt es noch mehr Teilchensorten? *	188
B.4 In wie viel Kilogramm Eisen stecken ein Kilo Elektronen? *	189
B.5 Ist das Vakuum wirklich leer? **	189
B.6 Kann etwas schneller sein als Licht? *	190
B.7 Warum kann das Standardmodell nicht stimmen? *	190
B.8 Was bedeutet „Elektron“? *	192
B.9 Was ist die Supersymmetrie? *	192
B.10 Was ist die Weltformel? **	193
B.11 Was ist dunkle Materie? **	193
B.12 Was sind Strings? **	194
B.13 Was suchen Physiker am Südpol? **	194
B.14 Was verbrigt sich hinter der QED? ***	195
B.15 Welche Arten von Beschleunigern gibt es? *	196
B.16 Welche Theorien stecken im Standardmodell der Teilchenphysik? **	197
B.17 Werden die Teilchen in neuen Beschleunigern schneller? *	198

B.18 Wer erfand die Atome? \* . . . . . 198

B.19 Wer gab dem Photon seinen Namen? \* . . . . . 199

B.20 Wer ist „Higgs“? \* . . . . . 199

B.21 Wie alt ist die Quantentheorie? \*\* . . . . . 200

B.22 Wie flott sind Sie bei einer Bewegungsenergie von 250  
 Milliarden Elektronenvolt? \* . . . . . 201

B.23 Wie heißt der weltweit größte Beschleuniger? \* . . . . . 201

B.24 Wie lange braucht Licht von der Erde zur Sonne? \* . . . . . 202

B.25 Wie schwer sind Neutrinos? \* . . . . . 202

B.26 Wie spricht man „Quark“ richtig aus? \* . . . . . 202

B.27 Wie viele Teilchensorten gibt es? \* . . . . . 203

B.28 Wie viel wiegen Quarks? \* . . . . . 204

B.29 Wie viel wiegt ein Elektron? \* . . . . . 205

B.30 Wie weit ist ein Quantensprung? \*\* . . . . . 205

B.31 Wie weit schaffte es ein Elektron im Beschleuniger HE-  
 RA? \* . . . . . 206

B.32 Wofür bekam Albert Einstein den Nobelpreis? \* . . . . . 207

B.33 Woher stammt der Name „Quark“? \* . . . . . 207

B.34 Wo wurde das Gluon entdeckt? \* . . . . . 207



---

## 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.

### 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.

#### 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.

### **KworkQuarkQuiz \*\***

1.1.6

*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.

1.2 **Elektron, Neutrino, Quarks und Konsorten**

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

1.2.1 **4 Freunde sollt Ihr sein \***

*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 Fernschröhre 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.

## Neutrinos \*\*

1.2.3

*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.

Massenraten

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.

### Drei Familien \*

1.2.6

*Mit Elektron, Neutrino, den beiden Quarks und den jeweiligen Antiteilchen ist es nicht getan. Zu jedem dieser Objekte gibt es zwei wei-*

*tere 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 Sternener Explosionen, 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 **KworkQuarkQuiz** \*\*

*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.

## Was die Welt zusammenhält – Kräfte

1.3

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

### Der Zaubertoaster \*

1.3.1

*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.

### 1.3.2 Vier Kräfte \*

*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.

### 1.3.3 Briefe schreiben bewegt \*

*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 Bumerang 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.

## Wechselwirkungsteilchen \*

1.3.4

*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 allerkleinsten 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.“

### 1.3.5 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 10 000 000 000 000 000 000 000 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 \*\***

1.3.6

*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 geringe Reichweite der Starken Kraft: Sie wirkt nur über Entfernungen, die rund einem Hunderttausendstel der Ausdehnung eines Atomkernes entsprechen. Was jenseits liegt, interessiert sie nicht.

## **Farbladungen \*\***

1.3.7

*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.

### 1.3.8 **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.

### 1.3.9 **KworkQuarkQuiz** \*\*

*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.

## 1.4 **Massive Korrektur – Der Higgs-Mechanismus**

*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 weden 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?

## Der Higgs-Mechanismus \*

1.4.2

*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.

### 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.

### 1.4.4 Das Higgs-Teilchen: ein Gerücht \*\*

*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 ...

### **KworkQuarkQuiz** \*\*

1.4.5

*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.

#### 2.1.4 **Energieschwindel?** \*\*

*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.

#### 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.

## **Wie beschleunigen?**

2.2

*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.

### **Das Elektronenvolt \*\***

2.2.2

*Ob sie Massen angeben oder die Leistungsfähigkeit von Teilchenbeschleunigern 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.

### 2.2.3 Erst noch langsam ... \*\*

*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:

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!

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

### **... dann lichtschnell \*\***

2.2.4

*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.

### **Korrektur der Grundidee: Magnetfelder \***

2.2.5

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

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

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.

## 2.2.6 KworkQuarkQuiz \*\*

*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.

### **...oder geradeaus? \***

2.3.2

*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 **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.

### 2.3.4 **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.

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

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

Abbildung 2.5: Teilchen in einer Kurve strahlen Synchrotronstrahlung ab. Ein Teilchen fliegt um eine Kurve und strahlt dabei Licht ab.

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

### **... zur Tugend gemacht. \*\***

2.3.5

*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.

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.

## 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 Rutherford's 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 Rutherford's Versuch. Es wurden aber viel weniger Teilchen stark abgelenkt, als es der Fall hätte sein müssen.

Hofstadter's Schluss: Das Proton ist kein punktförmiges Teilchen. Vielmehr hat es einen Radius von rund  $2 \times 10^{-15}$  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.

### 3.2.5 HERA \*

*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

## Moderne Streuexperimente

3.3

*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.*

### Teilchennachweis \*

3.3.1

*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.

### 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.

## Teilchennachweis im Groß-Detektor \*\*

3.3.3

*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.

#### 3.3.4 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 Spurkamern 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.

## 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.*

## Quanten beobachten \*\*

4.2.1

*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 4.3: 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 \*\*

4.2.2

*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 4.4: 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.

## Welle oder Teilchen? \*\*

4.2.3

*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.

#### 4.2.4 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.*

### Vom Unwissen wissen \*\*

4.3.1

*Mit der Quantentheorie erkannten die Physiker die Grenzen ihrer Erkenntnis: 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.

#### 4.3.2 Glücksspieler Gott \*\*

*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 Experimentes 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.

### Zustände in der Quantenwelt \*\*

4.3.3

*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.

### Quanten vermessen \*\*

4.3.4

*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 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. 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.

#### 4.3.5 Quanten-Unbestimmtheit \*\*

*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.

## 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 solchen 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 Naturgesetzen 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.

### **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 rechts herum 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.

#### 5.1.4 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.

## Supersymmetrie

5.2

*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.*

### Die Teilchenverdopplerin \*\*

5.2.1

*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 Selektrenen, Gluinos, Squarks und Higgsinos.

- ▷ Elektron – Selektion
- ▷ Neutrino – Sneutrino
- ▷ Quark – Squark
- ▷ Gluon – Gluino
- ▷ Photon – Photino
- ▷ Higgs – Higgsino

### 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: Vorkursoren 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.

Siehe auch ▷ Antimaterie ▷ Neutron

## 6.6 Antiproton \*\*

*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.*

Entdeckung Das Antiproton wurde 1955 von Emilio Segrè, Owen Chamberlain und Team entdeckt. Für diese Entdeckung gab es 1959 den Physik-Nobelpreis.

An einigen Teilchenphysikzentren – beispielsweise bei CERN und am Fermilab – werden Antiprotonen künstlich erzeugt und für Teilchenphysikexperimente auf hohe Energien beschleunigt.

Erzeugung

▷ Antimaterie ▷ Proton

Siehe auch

## Antiteilchen \*

6.7

*Teilchen existieren in zwei Formen – als „normale“ Teilchen und als Antiteilchen. Stoßen beide aufeinander, so können sie sich vollständig in Energie umwandeln.*

Der Antipartner eines Teilchens verfügt über dieselbe Masse, dieselbe Lebensdauer und denselben Spin, besitzt jedoch entgegengesetzte Ladungen.

Eigenschaften

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.

Beispiele

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.

Vernichtung

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.

Vorhersage und Entdeckung

▷ Antimaterie ▷ Antineutron ▷ Antiproton ▷ Paul Dirac (1902–1984) ▷ Positron

Siehe auch

## Aristoteles (384 v. Chr. bis 322 v. Chr.) \*\*

6.8

*Griechischer Philosoph. Als Gegner der Atomidee Demokrits stellte er sich die Welt aus den vier Elementen Feuer, Wasser, Luft und Erde zusammengesetzt vor.*

Aristoteles zählt zu den bedeutendsten Philosophen der Antike. Er

Bedeutung

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

## 6.9 Asymptotische Freiheit \*\*

*Phänomen, dass die starke Kraft bei geringen Abständen an Stärke verliert.*

**Gegenteil** Das Gegenteil der asymptotischen Freiheit ist die Quarkgefangenschaft.  
**Nobelpreis** 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.

**Siehe auch** ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quarkgefangenschaft

## 6.10 ATLAS \*\*

*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.

**Ausmaße** 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).

**Aufbau** 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. Zwischen Kalorimeter und Myonsystem befindet sich zudem ein supraleitendes Toroid-System, mit dem ein Magnetfeld einer Stärke von 4 Tesla erzeugt werden kann.

Die Abkürzung ATLAS steht für „A Toroidal LHC Apparatus“, wobei sich das „Toroidal“ auf das äußere Magnetsystem bezieht.

▷ Higgs-Teilchen ▷ LHC ▷ Quark-Gluon-Plasma

Name

Siehe auch

## Atom \*

6.11

*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.*

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.

Atommodelle

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.

Entdeckung

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.

Größe

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.

Name

▷ Atomkern ▷ Demokrit (460 v.Chr. bis 375 v.Chr.) ▷ Elektron ▷ Element  
▷ Ernest Rutherford (1871–1937) ▷ Niels Bohr (1885–1962) ▷ Quarks

Siehe auch

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.*

**Entdeckung** Dass sich im Inneren von Atomen ein massiver Kern befindet, hat im Jahr 1909 ein Team um Ernest Rutherford in einem Streuversuch nachgewiesen.

**Abmessung** 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.

**Siehe auch** ▷ Atom ▷ Kernfusion ▷ Kernkraft ▷ Neutron ▷ Proton ▷ Quarks

6.13 **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 ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Undulator ▷ Wiggler

6.14 **Bohr, Niels (1885–1962)** \*\*

*Dänischer Physiker. Niels (Hendrik David) Bohr hat unter anderem mit seinem Atommodell zur Entwicklung der Quantentheorie beigetragen.*

**Eckdaten** Niels Bohr wurde am 7. Oktober 1885 in Kopenhagen geboren und starb am 18. November 1962 in derselben Stadt.

**Nobelpreis** Bohr erhält 1922 den Physik-Nobelpreis für „seine Verdienste bei der Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung.“

▷ Atom

Siehe auch

**Boson** \*\*

6.15

*Bosonen sind alle Teilchen mit ganzzahligem Spin (1, 2, ...).*

Alle Wechselwirkungsteilchen des Standard-Modells sind Bosonen. Bei den Materieteilchen handelt es sich hingegen um Fermionen.

Bosonen sind nach dem indischen Physiker Satyendra Nath Bose benannt.

Bosonen im Standard-Modell

Name

▷ Spin ▷ Wechselwirkungsteilchen

Siehe auch

**Bottom-Quark** \*

6.16

*Fundamentales Teilchen. Das Bottom-Quark ist eines der sechs Quarks.*

Die Masse des Bottom-Quarks ist mit rund  $4.300 \text{ MeV}/c^2$  fast 10.000-mal größer als die des Elektrons.

Masse

Das erste Teilchen mit Bottom-Quark-Inhalt wurde 1977 am Fermilab mit dem Upsilon gesichtet.

Nachweis und Entdeckung

$2 \times 10^{-12}$  Sekunden (Schätzung aus dem Zerfall von Quark-Gruppen).

Lebensdauer

Das englische „Bottom“ bedeutet so viel wie „am Grund“ oder „unten“.

Name

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.

▷ Charm-Quark ▷ Down-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Quarks ▷ Strange-Quark  
▷ Top-Quark ▷ Up-Quark

Siehe auch

**Bremsstrahlung** \*\*

6.17

*Elektromagnetische Strahlung, die entsteht, wenn elektrisch geladene Teilchen beschleunigt, abgebremst oder abgelenkt werden.*

Eine besondere Form der Bremsstrahlung ist die Synchrotronstrahlung.

Synchrotronstrahlung

▷ Synchrotronstrahlung

Siehe auch

**Bunch** \*\*

6.18

*Englischsprachige Bezeichnung für Teilchenpaket.*

Siehe auch ▷ Teilchenpaket

## 6.19 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 Proportionalkammer (1992). In den Jahren 1989 und 1990 entwickelte der CERN-Informatiker Tim Berners-Lee das World Wide Web.

**Im Web** <http://www.cern.ch>

Siehe auch ▷ LEP ▷ LHC ▷ Teilchenphysikzentren

## 6.20 Charm-Quark \*\*

*Das Charm-Quark ist eines der sechs Quarks.*

**Masse** 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.

**Nachweis und Entdeckung** Das erste Teilchen mit Charm-Quark-Inhalt, das J/Psi, wurde 1974 am SLAC und BNL gesichtet.

**Lebensdauer** ca.  $10^{-12}$  Sekunden (Schätzung aus dem Zerfall von Quark-Gruppen)

**Name** 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.

▷ Bottom-Quark ▷ Down-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Quarks ▷ Strange-Quark    Siehe auch  
▷ Top-Quark ▷ Up-Quark

## CMS \*\* 6.21

*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.

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 Ausmaße

Der Detektor ist von innen nach außen in verschiedenen Schichten aufgebaut. 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. Aufbau

Die Abkürzung CMS steht für „Compact Muon Solenoid“, wobei das „Solenoid“ den Magnettypen beschreibt. Name

▷ Dunkle Materie ▷ Higgs-Teilchen ▷ LHC Siehe auch

## Demokrit (460 v.Chr. bis 375 v.Chr.) \*\* 6.22

*Griechischer Philosoph und Erfinder des Atoms.*

Demokrit von Abdera und sein Lehrer Leukippos gingen als Erste davon aus, dass Materie aus kleinsten unteilbaren Teilchen (Atomen) Wirken

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 ▷ Atom

## 6.23 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).

Eckdaten 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.

Beschleuniger 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.

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.

<http://www.desy.de>

Entdeckungen

Im Web

▷ HASYLAB ▷ HERA ▷ Teilchenphysikzentren

Siehe auch

## Dipolmagnet \*\*

6.24

*Ein magnetischer Dipol besteht aus einem magnetischen Nord- und einem magnetischen Südpol. In Teilchenbeschleunigern kommt er zur Ablenkung von Teilchen zum Einsatz.*

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.

Bedeutung

Die Vorsilbe „Di“ ergibt sich aus dem griechischen Wort für zwei.

Name

▷ Beschleunigermagnete ▷ Fokussierung ▷ Quadrupolmagnet

Siehe auch

## Dirac, Paul (1902–1984) \*\*

6.25

*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.*

Paul Dirac wurde am 8. August 1902 in Bristol geboren und starb am 20. Oktober 1984 in Tallahassee.

Eckdaten

Pauli Dirac erhält 1933 zusammen mit Erwin Schrödinger den Nobelpreis für Physik „für die Entdeckung neuer, fruchtbarer Formen der Atomtheorie.“

Nobelpreis für Physik

▷ Antimaterie

Siehe auch

## 6.26 Down-Quark \*

*Das Down-Quark ist eines der sechs Quarks. Aus Down- und Up-Quarks sind die Bestandteile der Atomkerne, die Protonen und Neutronen, zusammengesetzt.*

Masse	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.
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.
Siehe auch	▷ Bottom-Quark ▷ Charm-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Neutron ▷ Proton ▷ Quarks ▷ Strange-Quark ▷ Top-Quark ▷ Up-Quark

## 6.27 Drahtkammer \*\*

*Die Drahtkammer ist ein Teilchendetektor. Darin lässt sich die Bahn von elektrisch geladenen Teilchen verfolgen, wenn diese ein Gas durchfliegen.*

Funktionsweise	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.
Typen	Je nach Anzahl und Anordnung der Drähte und der Höhe der Spannung unterscheidet man unterschiedliche Drahtkammertypen. ▷ Zu den einfachsten Drahtkammern zählen die Proportionalitätskammern.

- ▷ Driftkammern besitzen eine höhere Ortsauflösung als Proportionalkammern, 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

- ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

## Dunkle Materie \*\*

6.28

*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.

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

Indizien

von dunkler Materie hin: Alle Galaxien sind von einer kugelförmigen, massiven Ansammlung dunkler Materie eingehüllt.

Woraus besteht dunkle Materie? 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.

Siehe auch ▷ Kosmologie ▷ WIMP

## 6.29 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 ▷ Gravitationskraft ▷ Kernspaltung ▷ Photoeffekt ▷ Relativitätstheorie ▷ Spezielle Relativitätstheorie ▷ Zeitdilatation

## 6.30 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.

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“).

Millikans  
Öltröpfchenver-  
such

▷ Elektromagnetische Kraft ▷ Ladung ▷ Quantenelektrodynamik (QED)

Siehe auch

## Elektromagnetische Kraft \*

6.31

*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

▷ Elektrische Ladung ▷ Elektromagnetismus ▷ Photon ▷ Quantenelektrodynamik (QED) ▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell ▷ Starke Kraft ▷ Wechselwirkung

Siehe auch

## Elektromagnetisches Kalorimeter \*\*

6.32

*Ein elektromagnetisches Kalorimeter ist ein Teilchendetektor zur Bestimmung der Energie von Elektronen, Positronen und Photonen.*

▷ Kalorimeter ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

## Elektromagnetisches Spektrum \*\*

6.33

*Zum elektromagnetischen Spektrum sind alle elektromagnetischen Wel-*

lenlängen zusammengefasst. Einen Teil des Spektrums macht das sichtbare Licht aus.

Siehe auch ▷ Elektromagnetische Welle ▷ Licht

## 6.34 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

## 6.35 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

## 6.36 Elektron \*

*Fundamentales Teilchen des Standardmodells. Es wurde 1897 als erstes*

*der fundamentalen Teilchen entdeckt und bewegt sich in Atomen um den Kern.*

Ohne das Flitzen der Elektronen durch Glühbirnen, Computer und Mikrowellenherde, 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.

▷ Elektron-Neutrino ▷ Materieteilchen ▷ Myon ▷ Positron ▷ Tauon

Details

Lebensdauer und Zerfall

Nachweis und Entdeckung

Name

Siehe auch

## Elektronenvolt \*

6.37

*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.

▷ Energie

Siehe auch

6.38 **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 vorgeschlagen, 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.“

**Lebensdauer und Zerfall** Der Zerfall eines Elektron-Neutrinos wurde noch nicht beobachtet. Es gilt als stabil.

**Name** Der Name „Neutrino“ wurde 1933 vom Italiener Enrico Fermi geprägt. Er bedeutet auf Italienisch „kleines Ungeladenes“.

**Siehe auch** ▷ Elektron ▷ Materieteilchen ▷ Myon-Neutrino ▷ Neutrinos ▷ Tau-Neutrino

6.39 **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

**Element** \*\*

6.40

*Ein chemisches Element ist aus identischen Atomen zusammengesetzt. Eine Ordnung erfahren die chemischen Elemente im Periodensystem der Elemente.*

▷ Atom ▷ Atomkern ▷ Elektron ▷ Periodensystem

Siehe auch

**Energie** \*\*

6.41

*Grundlegende physikalische Größe.*

Es gibt also eine ganze Menge unterschiedlicher Energieformen. Wenn 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.

Definition

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.

Energieerhaltung-  
und  
umwandlung

▷ Elektronenvolt ▷ Masse

Siehe auch

**Ereignis** \*\*

6.42

*Als Ereignis (engl. event) bezeichnen Physiker eine konkrete Teilchenreaktion, von denen sie tausende und abermillionen in modernen Teilchenphysikexperimenten erzeugen und für ihre Rückschlüsse untersuchen.*

▷ Streuexperiment

Siehe auch

6.43 **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 ▷ Streuexperiment ▷ Teilchenbeschleuniger

6.44 **Erhaltungssatz** \*\*

*Ein Erhaltungssatz ist ein physikalisches Gesetz, das besagt, dass eine bestimmte Größe (wie zum Beispiel die Energie) in einem abgeschlossenen System erhalten bleibt.*

Beispiele Wichtige Erhaltungsgrößen sind die Energie, der Impuls und der Drehimpuls. Aber auch die elektrische Ladung ist erhalten.

Symmetrie In der modernen Physik werden Erhaltungssätze auf Symmetrien zurückgeführt.

Siehe auch

6.45 **Experiment** \*\*

*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.

▷ Standardmodell ▷ Theorie

Siehe auch

## Farbladung \*\*

6.46

*Eigenschaft eines Teilchen, die bestimmt, ob es der starken Wechselwirkung unterliegt. Quarks und Gluonen tragen Farbladungen.*

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.

Name

▷ Ladung ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Starke Kraft

Siehe auch

## Fermi, Enrico (1901–1954) \*\*

6.47

*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 ▷ Neutrinos ▷ Schwache Kraft ▷ Spin

Siehe auch

6.48 **Fermilab** \*\*

*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.

Entdeckungen	Am Fermilab wurden das Bottom-Quark (1977), das Top-Quark (1995) und das Tau-Neutrino (2000) entdeckt.
Name	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).
Im Web	<a href="http://www.fnal.gov/">http://www.fnal.gov/</a>
Siehe auch	▷ Bottom-Quark ▷ Enrico Fermi (1901–1954) ▷ Tau-Neutrino ▷ Teilchenphysikzentren ▷ Top-Quark

6.49 **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	▷ Quantenelektrodynamik (QED)

6.50 **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 kurzweilige Laserstrahlung mit hoher Spitzenleuchtstärke und ultrakurzen Lichtpulsen. Das wissenschaftliche Interesse ist dementsprechend groß und um-
--------	---

fasst Experimente aus Bereichen wie Cluster-, Festkörper-, und Oberflächenphysik, Plasmaforschung sowie Molekularbiologie.

## Fokussierung \*\*

6.51

*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 ▷ Teilchenbeschleuniger

Siehe auch

## Frequenz \*\*

6.52

*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.

▷ Elektromagnetische Welle ▷ Wellenlänge

Siehe auch

## Funkenkammer \*\*

6.53

*Teilchendetektor zum Nachweis elektrisch geladener Teilchen.*

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“ auszuschließen, wird zur Beruhigung der Kammer die Spannung immer nur für wenige Millisekunden angelegt und danach wieder abgestellt.

Funkenkammern wurden Anfang der 1960er Jahre entwickelt, aber nach 1970 durch andere Techniken ersetzt. Sie spielen in der aktuellen Forschung keine Rolle mehr.

Funktionsweise

Entwicklung und Einsatz

Siehe auch ▷ Teilchendetektor

## 6.54 Gell-Mann, Murray (\*1929) \*\*

*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.*

Eckdaten Murray Gell-Mann wurde am 15. September 1929 in New York geboren.

Nobelpreis für Physik Gell-Mann erhält 1969 den Physik-Nobelpreis „für seine Beiträge und Entdeckungen hinsichtlich der Klassifikation der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen.“

Siehe auch ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quarks

## 6.55 Geschwindigkeit \*\*

*Die Geschwindigkeit eines Teilchens gibt an, wie schnell es ist, das heißt wie viel Raum pro Zeiteinheit es zurücklegen kann.*

Einschränkung Nach der Relativitätstheorie kann nichts über Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.

Siehe auch ▷ Impuls ▷ Lichtgeschwindigkeit

## 6.56 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 de-

nen eines ein Gluon aussendet, bevor aus allen drei Teilchen zahlreiche weitere Teilchen entstehen, die sich zu Bündeln formen.

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 Antifarb-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.

Der Name „Gluon“ stammt vom englischen Wort für Klebstoff glue ab.

▷ Farbladung ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Starke Kraft ▷ Wechselwirkungsteilchen

Farbe der  
Gluonen

Name

Siehe auch

## Gravitation \*\*

6.57

*Als Gravitation bezeichnet man die Anziehungen von Körpern mit Masse. Sie erfolgt über die Gravitationskraft.*

▷ Allgemeine Relativitätstheorie ▷ Gravitationskraft ▷ Graviton ▷ Wechselwirkung

Siehe auch

## Gravitationskraft \*

6.58

*Die Gravitationskraft ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Sie wirkt zwischen Massen.*

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

Eigenschaften

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.

Theoretische  
Duellanten

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.

Graviton

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.

Siehe auch

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Allgemeine Relativitätstheorie ▷ Gravitation  
▷ Graviton ▷ Isaac Newton (1643–1727) ▷ Masse ▷ Superstringtheorie ▷ Wechselwirkung

## 6.59 Graviton \*\*

*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.*

Siehe auch

▷ Gravitationskraft ▷ Wechselwirkung ▷ Wechselwirkungsteilchen

## 6.60 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.

▷ LHC

Siehe auch

## Großdetektor \*\*

6.61

*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

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.

Spurdetektoren

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.

Kalorimeter

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.

Magnete

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

Myonkammer

Elektronikcontai-  
ner

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.

Siehe auch ▷ Kalorimeter ▷ Myonkammer ▷ Spurkammer

## 6.62 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

## 6.63 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.

Siehe auch ▷ HERA ▷ Tief-inelastische Streuung

## Halbleiter-Detektor \*\*

6.64

*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 \*\*

6.65

*Einrichtung bei DESY in Hamburg, das Forschung mit Photonen (Synchrotronstrahlung und XFEL-Strahlung) durchführt und für andere Wissenschaftsgruppen ermöglicht.*

▷ DESY ▷ Synchrotronstrahlung

Siehe auch

## Hauptquark \*\*

6.66

*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.

▷ Gluon ▷ Proton ▷ Seequark ▷ Tief-inelastische Streuung

Siehe auch

## Heisenberg, Werner (1901–1976) \*\*

6.67

*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

## 6.68 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 abgeschaltet, die Auswertung der gesammelten Daten wird aber weit über 2010 hinaus andauern.

**Experimente** 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.

**Name** 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 Siehe auch

## HERMES \*\* 6.69

*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

▷ HERA ▷ Proton ▷ Spin Siehe auch

## Hertz \*\* 6.70

*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*

▷ Elektromagnetisches Spektrum ▷ Elektromagnetische Welle Siehe auch

## Higgs, Peter (\*1929) \*\* 6.71

*Britischer Physiker. Peter (Ware) Higgs wurde vornehmlich durch den von ihm formulierten und nach ihm benannten Higgs-Mechanismus bekannt.*

Peter Higgs wurde am 29. März 1929 in Bristol geboren. Higgs ist Professor der Universität Edinburgh im Ruhestand. Eckdaten

▷ Higgs-Mechanismus ▷ Higgs-Teilchen Siehe auch

6.72 **Higgs-Mechanismus** \*\*

*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.*

Der Higgs-  
Mechanismus als  
Party

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.

Name Der Name des Mechanismus geht auf den Schotten Peter Higgs zurück, der neben anderen an der Entwicklung der Idee beteiligt war.

Siehe auch ▷ Higgs-Teilchen ▷ Masse ▷ Peter Higgs (\*1929) ▷ Standardmodell

## Higgs-Teilchen \*

6.73

*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.*

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.

Der Name des Teilchens geht auf den Schotten Peter Higgs zurück, der neben anderen an der Entwicklung der Idee des Higgs-Mechanismus beteiligt war.

▷ Higgs-Mechanismus ▷ Masse ▷ Peter Higgs (\*1929) ▷ Standardmodell ▷ Teilchen Siehe auch

## ILC

6.74

*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 \*\*

6.75

*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 \*\*

6.76

*Bei Ionen handelt es sich um Atome, die durch fehlende oder zusätzliche Elektronen eine elektrische Ladung besitzen.*

▷ Atom ▷ Elektron Siehe auch

6.77 **Jet** \*\*

*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.*

Siehe auch   ▷ Quarks ▷ Streuexperiment

6.78 **Kalorimeter** \*

*Teilchendetektor, mit dessen Hilfe die Energie von Teilchen gemessen werden kann.*

Funktionsweise   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.

Elektromagnetische und hadronische Kalorimeter   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.

Einsatz   Kalorimeter sind heute in jedem modernen Großdetektor im Einsatz.

Siehe auch   ▷ Elektromagnetisches Kalorimeter ▷ Teilchendetektor

6.79 **Kaonen** \*\*

*Zusammengesetztes Teilchen, das aus einem Quark und einem Antiquark besteht. Je nach konkreter Zusammensetzung ergeben sind 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.

▷ Antimaterie ▷ Nebelkammer ▷ Quarks

Siehe auch

## KEK \*\*

6.80

*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

▷ Teilchenphysikzentren

Siehe auch

## Kernfusion \*\*

6.81

*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.*

▷ Atomkern ▷ Energie ▷ Kernspaltung

Siehe auch

## Kernkraft \*\*

6.82

*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.*

▷ Starke Kraft

Siehe auch

## Kernspaltung \*\*

6.83

*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

## 6.84 Kicker-Magnet \*\*

*Magnet in Teilchenbeschleunigern. Kicker-Magnete werden verwendet, um elektrisch geladene Teilchen aus einem Teilchenstrahl zu kickern und somit etwa in einen anderen Beschleuniger zu lenken.*

Siehe auch ▷ Beschleunigermagnete

## 6.85 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.*

Siehe auch ▷ Relativitätstheorie

## 6.86 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 ▷ Myon

## Kosmologie \*\*

6.87

*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.*

▷ Dunkle Materie ▷ Standardmodell ▷ Universum ▷ Urknall

Siehe auch

## Kreisbeschleuniger \*

6.88

*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

▷ Linearbeschleuniger ▷ Speicherring ▷ Synchrotron ▷ Teilchenbeschleuniger  
▷ Zyklotron

Siehe auch

## Ladung \*\*

6.89

*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.

Siehe auch ▷ Elektrische Ladung ▷ Farbladung

## 6.90 Lebensdauer \*

*Mittlere Zeitdauer, bis ein Teilchen zerfällt.*

Statistische  
Größe

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.

Extrem  
kurzlebig:  
Resonanzen

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.

Siehe auch ▷ Zeit

## 6.91 LEP \*\*

*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.

Name LEP ist die Abkürzung für Large Electron Positron Collider (= großer Elektronen-Positronen-Zusammenstoßer).

Siehe auch ▷ CERN ▷ Kreisbeschleuniger ▷ LHC ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit

**LHC** \*

6.92

*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.

Physiker erhoffen sich, mit dem LHC Antworten auf zahlreiche Forschungsfragen zu finden. Darunter:

Forschungsfragen

- ▷ 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?

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.

Experimente

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.

GRID

LHC ist die Abkürzung für Large Hadron Collider (= großer Hadronen-Zusammenstoßer).

Name

- ▷ ALICE ▷ ATLAS ▷ CERN ▷ CMS ▷ Grid ▷ Kreisbeschleuniger ▷ LEP
- ▷ LHCb ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit

Siehe auch

**LHCb** \*\*

6.93

*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 neh-

men 650 Wissenschaftler teil, von 48 Instituten in 13 Ländern (Stand 2006).

**Aufbau** Der LHCb-Detektor nutzt Spurdetektoren auf Halbleiterbasis und so genannte Ring-Tscherenkov-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.

**Name** Die Abkürzung „LHCb“ steht für „LHC beauty“, wobei „beauty“ eine andere Bezeichnung für die Bottom-Quarks in B-Mesonen darstellt.

**Siehe auch** ▷ LHC

## 6.94 LHCf \*\*

*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.

**Ausmaße** Am LHCf-Experiment nehmen 22 Wissenschaftler teil, von 10 Instituten in 4 Ländern (Stand 2006).

**Name** Die Abkürzung „LHCf“ steht für „LHC forward“, wobei sich das „forward“ auf die untersuchten, in Vorwärtsrichtung gestreuten oder produzierten Teilchen bezieht.

**Siehe auch** ▷ LHC

## 6.95 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

## Lichtgeschwindigkeit \*

6.96

*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.*

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.

Lichtgeschwindigkeit in Materie

▷ Licht ▷ Naturkonstanten ▷ Spezielle Relativitätstheorie

Siehe auch

## Linearbeschleuniger \*

6.97

*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.

▷ Kreisbeschleuniger ▷ SLC ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Tesla

Siehe auch

## Masse \*

6.98

*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

Massen macht sich auf zwei unterschiedlichen Arten bemerkbar: Über

Schwere und träge Masse

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 abzubremesen. 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 Raum nach oben beschleunigt wird und Ihre Trägheit für die gefühlte Schwere verantwortlich ist.

Masse im  
Standard-Modell  
der  
Teilchenphysik

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.

Siehe auch ▷ Energie ▷ Higgs-Mechanismus ▷ Masse-Energie-Äquivalenz

## 6.99 Masse-Energie-Äquivalenz \*\*

*Nach der Masse-Energie-Äquivalenz können Masse und Energie ineinander überführt werden. Dieses Phänomen wird durch die spezielle Relativitätstheorie beschrieben.*

Siehe auch ▷ Relativistischer Massezuwachs ▷ Spezielle Relativitätstheorie

## 6.100 Materieteilchen \*

*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.

▷ Elektron ▷ Myon ▷ Myon-Neutrino ▷ Neutrinos ▷ Quarks ▷ Standardmodell Siehe auch  
 ▷ Tau-Neutrino ▷ Tauon ▷ Teilchen

## Maxwell, James Clerk (1831–1879) \*\* 6.101

*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

## Maxwell-Gleichungen \*\* 6.102

*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.

▷ Elektromagnetische Welle ▷ Elektromagnetismus ▷ James Clerk Maxwell Siehe auch  
 (1831–1879) ▷ Licht ▷ Quantenelektrodynamik (QED)

6.103 **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 ▷ Periodensystem

6.104 **Molekül \***

*Aus Atomen zusammengesetztes Objekt.*

Siehe auch ▷ Atom ▷ Element

6.105 **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)

Siehe auch ▷ Elektron ▷ Materieteilchen ▷ Myonkammer ▷ Myon-Neutrino ▷ Tauon

6.106 **Myonkammer \*\***

*Myon-Kammern sind Teilchendetektoren, mit denen in modernen Groß-Detektoren Myonen nachgewiesen werden.*

Entwicklung und Einsatz Myon-Kammern sind heute in jedem modernen Groß-Detektor im Einsatz.

▷ Myon ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

## Myon-Neutrino \*

6.107

*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 bildet. Die Bezeichnung „Neutrino“ wurde 1933 vom Italiener Enrico Fermi geprägt. Er bedeutet auf Italienisch „kleines Ungeladenes“.

Name

▷ Elektron-Neutrino ▷ Materieteilchen ▷ Myon ▷ Neutrinos ▷ Tau-Neutrino

Siehe auch

## Naturkonstanten \*\*

6.108

*Naturkonstanten geben Eigenschaften des Universums an. Sie lassen sich aus den gängigen Theorien nicht ableiten, sondern müssen vorausgesetzt und in Experimenten gemessen werden.*

▷ Lichtgeschwindigkeit ▷ Planckkonstante

Siehe auch

## Nebelkammer \*\*

6.109

*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

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

Geschichte und Einsatz

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.

Siehe auch ▷ Teilchendetektor

## 6.110 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 ▷ Tau-Neutrino

## 6.111 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.

Siehe auch ▷ Antineutron ▷ Atomkern ▷ Proton

## 6.112 Newton, Isaac (1643–1727) \*\*

*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.

▷ Gravitationskraft

Eckdaten

Siehe auch

## Nobelpreis \*

6.113

*Auszeichnung für außergewöhnliche wissenschaftliche Leistungen.*

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Erwin Schrödinger (1887–1961) ▷ Max Planck (1858–1947) ▷ Paul Dirac (1902–1984) ▷ Richard P. Feynman (1918–1988) ▷ Werner Heisenberg (1901–1976) ▷ Wolfgang Pauli (1900–1958)

Siehe auch

## Paper \*\*

6.114

„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

## Pauli, Wolfgang (1900–1958) \*\*

6.115

*Physiker und Verbotsregler. 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 er die amerikanische und 1949 die schweizer Staatsbürgerschaft. Pauli starb am 15. Dezember 1958 in Zürich.

Eckdaten

Wolfgang Pauli erhielt 1945 den Physik-Nobelpreis “für die Entdeckung des Ausschlussprinzips, auch Pauli-Prinzip genannt.“

Nobelpreis für Physik

▷ Neutrinos

Siehe auch

## Periodensystem \*\*

6.116

*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

## 6.117 Photoeffekt \*\*

*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.

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.

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.

Anwendungen  
des Photoeffekts

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.

Geschichte eines  
Effekts

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.

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Photon

Siehe auch

## Photon \*

6.118

*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.

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.

Entdeckung

Im Jahr 1926 schlug der amerikanische Chemiker Gilbert Newton Lewis (1875–1946) den Namen „Photon“ für das Teilchen des Lichts vor.

Name

▷ Elektromagnetische Welle ▷ Elektromagnetismus ▷ Maxwell-Gleichungen ▷ Photoeffekt ▷ Wechselwirkungsteilchen

Siehe auch

6.119 **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 Photovervielfachers, 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 Photovervielfacher sind evakuiert. Nach zahlreichen solcher Verstärkungsprozessen entsteht am Ende ein elektrisches Signal, das stark genug ist, um einfach ausgelesen zu werden.

Siehe auch   ▷ Teilchendetektor

6.120 **Planck, Max (1858–1947)** \*\*

*Deutscher Physiker. Urvater der Quantenidee.*

Der  
Quantengedanke

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.“

Max Planck wurde am 23. April 1858 in Kiel geboren. Er starb am 4. Oktober 1947 in Göttingen.

1918 erhielt Max Planck den Physik-Nobelpreis „in Anerkennung seiner Verdienste um die Entwicklung der Physik durch seine Entdeckung der Energiequanten.“

▷ Planckkonstante

Eckdaten

Nobelpreis für Physik

Siehe auch

## Planckkonstante \*\*

6.121

*Die Planckkonstante (oder auch: Plancksches Wirkungsquantum) ist eine fundamentale Naturkonstante, die in nahezu sämtlichen Formeln der Quantentheorie zu finden ist.*

Über das Wirkungsquantum ist beispielsweise die Energie eines Photons mit seiner Frequenz verknüpft.

▷ Max Planck (1858–1947) ▷ Naturkonstanten

Siehe auch

## Positron \*

6.122

*Fundamentales Teilchen. Als Antiteilchen des Elektrons hat es dieselbe Masse und dieselbe Lebenserwartung, es trägt aber eine entgegengesetzte Ladung und ist somit positiv geladen.*

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.

Das Positron ist das erste Antiteilchen, das entdeckt wurde. Vorhergesagt wurde die Existenz des Positrons 1928 durch Paul Dirac, als er die spezielle Relativitätstheorie mit der Quantentheorie verband. Vier Jahre 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.

▷ Antimaterie ▷ Carl Anderson (1905–1991) ▷ Elektron

Lebensdauer

Entdeckung

Siehe auch

6.123 **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“.

**Siehe auch** ▷ Antiproton ▷ Atomkern ▷ Ernest Rutherford (1871–1937) ▷ Neutron

6.124 **Quadrupolmagnet** \*\*

*= Vierpolmagnet. Magnet in Teilchenbeschleunigern zur Bündelung von Teilchenpaketen.*

**Aufbau** Quadrupolmagnete bestehen aus zwei Nord- und zwei Südpolen.

**Siehe auch** ▷ Beschleunigermagnete ▷ Dipolmagnet ▷ Fokussierung

6.125 **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.

**Verwicklungen** 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-antiblau 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).

▷ Asymptotische Freiheit ▷ Gluon ▷ Quarkgefangenschaft ▷ Quarks ▷ Standardmodell ▷ Starke Kraft Siehe auch

## Quantenelektrodynamik (QED) \*\* 6.126

*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

▷ Elektromagnetismus ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quantenflavordynamik (QFD) ▷ Richard P. Feynman (1918–1988) Siehe auch

## Quantenflavordynamik (QFD) \*\* 6.127

*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.*

▷ Elektromagnetismus ▷ Photon ▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell ▷  $W$  ▷  $Z$  Siehe auch

## Quantensprung \*\* 6.128

*Vorgang, bei dem sich die Quantenwelt des Mikrokosmos sprunghaft verändert.*

Von Quantensprüngen hört man immer wieder: Sie werden bei diplomatischen Verhandlungen gesichtet sowie in Wissenschaft und Technik. Doch Vorsicht! Zu Quantensprünge 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 aufgefressen sein. Kleinste Veränderungen

Betrachten wir ein Wasserstoff-Atom: Es besteht aus einem Atomkern Beispiel

(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

## 6.129 Quarkgefangenschaft \*\*

*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).*

Quarkgruppen

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.

Die Welt ist nicht bunt.

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: Antirrot, 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.

Siehe auch

▷ Asymptotische Freiheit ▷ Farbladung ▷ Gluon ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Quarks

## 6.130 Quark-Gluon-Plasma \*\*

*Zustand extrem hoher Energie, in dem Quarks und Gluonen als freie*

*Teilchen wechselwirken und nicht der Quarkgefangenschaft unterliegen.*

▷ Gluon ▷ Quarkgefangenschaft ▷ Quarks

Siehe auch

## Quarkmodell \*\*

6.131

*Will man die genaue Zusammensetzung von Teilchen beschreiben, die aus Quarks bestehen, so stehen verschiedene Stufen von Genauigkeit zur Verfügung.*

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.

Einfaches Quarkmodell

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.

Quarkmodell mit Seequarks

▷ Neutron ▷ Proton ▷ Quarks

Siehe auch

## Quarks \*

6.132

*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.

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.

Farbladung

Es gibt sechs verschiedene Quarksorten:

6 Quarksorten

- ▷ Up-Quark
- ▷ Down-Quark,
- ▷ Strange-Quark,
- ▷ Charm-Quark,
- ▷ Bottom-Quark und

▷ Top-Quark.

Name 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)

Siehe auch ▷ Bottom-Quark ▷ Charm-Quark ▷ Down-Quark ▷ Gluon ▷ Materieteilchen ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Strange-Quark ▷ Top-Quark ▷ Up-Quark

### 6.133 Radioaktivität \*\*

*Phänomen, bei dem sich Atomkerne in andere umwandeln.*

Entdeckung 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.

Siehe auch ▷ Atomkern ▷ Kernfusion ▷ Kernspaltung

### 6.134 Raum \*\*

*Raum ermöglicht, dass wir die gegenseitige Anordnung von Dingen wahrnehmen können. Nach der speziellen Relativitätstheorie sind Raum und Zeit zur Raumzeit verwoben.*

Siehe auch ▷ Raumzeit ▷ Relativitätstheorie ▷ Zeit

### 6.135 Raumzeit \*\*

*Nach der Relativitätstheorie können Raum und Zeit nicht mehr getrennt voneinander betrachtet werden. Sie verschmelzen zur Raumzeit.*

Siehe auch ▷ Raum ▷ Relativitätstheorie ▷ Zeit

### 6.136 Relativistischer Massezuwachs \*\*

*Relativistisches Phänomen, nach dem die Masse von Teilchen mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt.*

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.

Folge:  
Tempolimit

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.

In Teilchenbeschleunigern

▷ Masse-Energie-Äquivalenz ▷ Spezielle Relativitätstheorie

Siehe auch

## Relativitätstheorie \*\*

6.137

*Oberbegriff für die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie, durch die Albert Einstein unser Verständnis von Raum, Zeit, Energie und Masse revolutionierte.*

▷ Albert Einstein (1879-1955) ▷ Allgemeine Relativitätstheorie ▷ Spezielle Relativitätstheorie

Siehe auch

## RHIC \*\*

6.138

*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.*

RHIC ist die Abkürzung für „Relativistic Heavy Ion Collider“ (= relativistischer Zusammenstoß von Schwerionen).

Name

▷ Proton ▷ Quark-Gluon-Plasma ▷ Spin

Siehe auch

## Röntgen, Wilhelm C. (1845–1923) \*\*

6.139

*Deutscher Physiker. Wilhelm Conrad Röntgen entdeckte 1895 das nach ihm benannte energiereiche Licht.*

Wilhelm Conrad Röntgen wurde am 27. März 1845 in Lennep (heute Remscheid) geboren. Er starb am 10. Februar 1923 in München.

Eckdaten

Röntgen erhielt 1901 den ersten Physik-Nobelpreis „in Anerkennung der außergewöhnlichen Verdienste, die er sich durch die Entdeckung

Nobelpreis für Physik

der bemerkenswerten Strahlen, welche später nach ihm benannt werden, erworben hat.“

Siehe auch ▷ Elektromagnetisches Spektrum ▷ Licht ▷ Röntgenstrahlung

## 6.140 Röntgenstrahlung \*\*

*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.*

Siehe auch ▷ Elektromagnetisches Spektrum ▷ Synchrotronstrahlung ▷ Wilhelm C. Röntgen (1845–1923)

## 6.141 Rutherford, Ernest (1871–1937) \*\*

*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 Rutherfordsche Atommodell, nach dem die elektrisch positiven Atomkerne von elektrisch negativen Elektronen umgeben werden.*

Wirken 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.

Eckdaten Ernest Rutherford wurde am 30. August 1871 in Brightwater bei Nelson (Neuseeland) geboren und starb am 19. Oktober 1937 in Cambridge (England).

Nobelpreis Ernest Rutherford erhielt 1908 den Chemie-Nobelpreis für seine Erklärung der Radioaktivität.

Siehe auch ▷ Atom ▷ Atomkern ▷ Rutherfordscher Streuversuch ▷ Streuexperiment

## 6.142 Rutherfordscher 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.

▷ Ernest Rutherford (1871–1937) ▷ Streuexperiment

Siehe auch

## Schrödinger, Erwin (1887–1961) \*\*

6.143

*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

▷ Schrödingers Katze

Siehe auch

## Schrödingers Katze \*\*

6.144

*Gedankenexperiment, mit dem Erwin Schrödinger auf ein Problem bei der Interpretation der Quantentheorie hinwies.*

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).

Versuchsaufbau

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

Das Problem

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)

## 6.145 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.

Siehe auch ▷ Quantenflavordynamik (QFD) ▷ Standardmodell ▷ W ▷ Wechselwirkung ▷ Z

## 6.146 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 ▷ Quarks

## 6.147 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).

<http://www.slac.stanford.edu>

▷ SLC ▷ Teilchenphysikzentren

Im Web

Siehe auch

## SLC \*\*

6.148

*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.*

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.

Untersuchungen

Name

Zukunft

▷ Teilchenbeschleuniger weltweit

Siehe auch

## Speicherring \*\*

6.149

*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

Siehe auch

## Spezielle Relativitätstheorie \*

6.150

*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 ▷ Lichtgeschwindigkeit ▷ Masse-Energie-Äquivalenz ▷ Relativitätstheorie ▷ Zeitdilatation

Siehe auch

6.151 **Spin** \*\*

*Eigenschaft von Teilchen, die man sich in vielen Punkten wie eine Drehung der Teilchen um die eigene Achse vorstellen kann.*

Spin  
fundamentaler  
Teilchen

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.

Spin zusammen-  
gesetzter  
Teilchen

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.

Siehe auch [▷ Boson](#) [▷ Superstringtheorie](#) [▷ Supersymmetrie](#)

6.152 **Spurkammer** \*\*

*Teilchendetektor, mit denen die Bahn (Spur) von Teilchen vermessen werden kann. Oft kommen hier Drahtkammern zum Einsatz.*

Siehe auch [▷ Drahtkammer](#) [▷ Teilchendetektor](#)

6.153 **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 \(QCD\)](#) [▷ Quantenelektrodynamik \(QED\)](#) [▷ Quantenflavordynamik \(QFD\)](#) [▷ Teilchenfamilien](#) [▷ Wechselwirkung](#) [▷ Wechselwirkungsteilchen](#) [▷ Weltformel](#)

## Starke Kraft \*

6.154

*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

▷ Farbladung ▷ Gluon ▷ Quantenchromodynamik (QCD) ▷ Standardmodell  
▷ Wechselwirkung

Siehe auch

## Strange-Quark \*

6.155

*Fundamentales Teilchen des Standardmodells. Das Strange-Quark ist eines der sechs Quarks.*

Die Masse des Strange-Quarks ist mit  $100 \text{ MeV}/c^2$  rund 200-mal größer

Masse

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  $5 \times 10^{-8}$  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.

Siehe auch

▷ Bottom-Quark ▷ Charm-Quark ▷ Down-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Quarks  
▷ Top-Quark ▷ Up-Quark

## 6.156 Streuexperiment \*\*

*Sammelbezeichnung für physikalische Experimente, bei denen ein Objekt untersucht wird, in dem es mit anderen Objekten beschossen wird. Viele Experimente der Teilchenphysik sind Streuexperimente.*

Siehe auch

▷ Rutherford'scher Streuversuch ▷ Teilchendetektor ▷ Tief-inelastische Streuung

## 6.157 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 bis- sen sich selbst die klügsten Köpfe immer wieder Zähne aus. Zunächst muss eine ganz neue Mathematik entwickelt werden.

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.

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.

Der Zusatz „Super“ im Namen stammt daher, dass die Superstringtheorie eine supersymmetrische Welt beschreibt.

▷ Gravitationskraft ▷ Supersymmetrie ▷ Vereinheitlichung ▷ Weltformel

Teilchen als  
Strings

Dimensio-  
nenüberschuss

Super?

Siehe auch

## Supersymmetrie \*\*

6.158

*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 Teilchentypen 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.

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 supersymmetri-

Fermionen und  
Bosonen

Vereinigung

schen 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.

Konsequenzen

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.

Entdeckung

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.

Siehe auch

▷ Boson ▷ Vereinheitlichung ▷ Weltformel

## 6.159 Supraleitung \*\*

*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

## 6.160 Synchrotron \*\*

*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.*

Beispiel

Der Umfang eines Synchrotrons kann beachtliche Ausmaße annehmen.

So befindet sich der LHC am CERN in einem 27 Kilometer langen Tunnel.

▷ Kreisbeschleuniger ▷ Synchrotronstrahlung ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Zyklotron Siehe auch

## Synchrotronstrahlung \*\*

6.161

*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. Bedeutung

Synchrotronstrahlung entsteht immer, wenn geladene Teilchen durch ein Magnetfeld abgelenkt werden. Durch spezielle Magnetanordnungen (Wiggler und Undulatoren) lässt sich besonders intensive Synchrotronstrahlung erzeugen. Erzeugung

▷ Synchrotron Siehe auch

## Tau-Neutrino \*

6.162

*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

▷ Elektron-Neutrino ▷ Materieteilchen ▷ Myon-Neutrino ▷ Neutrinos ▷ Tauon Siehe auch

6.163 **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.

Siehe auch

▷ Elektron ▷ Materieteilchen ▷ Myon ▷ Tau-Neutrino

6.164 **Teilchen** \*

*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.

Drei  
Teilchensorten

Im Standard-Modell der Teilchenphysik unterscheidet man drei Teilchensorten:

- ▷ Materieteilchen,
- ▷ Wechselwirkungsteilchen und
- ▷ Higgs-Teilchen.

Siehe auch

▷ Higgs-Teilchen ▷ Materieteilchen ▷ Standardmodell ▷ Wechselwirkungsteilchen

## Teilchenbeschleuniger \*

6.165

*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.*

Teilchenbeschleuniger sind recht komplexe Maschinen, die aus vielen unterschiedlichen Elementen zusammengesetzt sind – darunter Magnete, Resonatoren, Vakuumpumpen und Teilchenquellen.

Beschleunigerelemente

▷ Kreisbeschleuniger ▷ Linearbeschleuniger ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit  
▷ Teilchendetektor ▷ Teilchenphysikzentren

Siehe auch

## Teilchenbeschleuniger weltweit \*\*

6.166

Zu den aktuell wichtigsten Teilchenbeschleuniger-Projekten zählen

- ▷ HERA bei DESY,
- ▷ LEP/LHC am CERN,
- ▷ das Tevatron am Fermilab sowie
- ▷ RHIC am BNL.
- ▷ HERA ▷ LEP ▷ LHC ▷ SLC ▷ Teilchenbeschleuniger ▷ Tesla ▷ Tevatron

Siehe auch

## Teilchendetektor \*

6.167

*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.*

Es gibt zahlreiche Typen von Teilchendetektoren, die jeweils auf unterschiedliche Aufgaben spezialisiert sind:

Typen

- ▷ 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.

Siehe auch ▷ Elektromagnetisches Kalorimeter ▷ Kalorimeter ▷ Myonkammer ▷ Nebelkammer ▷ Spurkammer

## 6.168 Teilchenfamilien \*

*Muster, nach dem die Teilchen im Standardmodell angeordnet sind. Das Standardmodell kennt drei Teilchenfamilien.*

Drei Familien Die drei Familien des Standardmodells sind:

- ▷ 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 3? 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.

Siehe auch ▷ Standardmodell

## 6.169 Teilchenpaket

*In Teilchenbeschleunigern werden Teilchen in kleinen Paketen von mehreren Millionen bis Milliarden Teilchen beschleunigt. Zwischen diesen Paketen befinden sich lange Lücken.*

Die englischsprachige Bezeichnung für Teilchenpaket lautet „bunch“.

Siehe auch ▷ Teilchenbeschleuniger

## 6.170 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
  - ▷ CERN ▷ DESY ▷ Fermilab ▷ KEK ▷ SLAC ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit
- Siehe auch

## Teilchenquellen \*\*

6.171

*Bestandteil eines Teilchenbeschleunigers.*

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.

Elektronenquellen

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.

Protonenquellen

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

Positronenquelle

PIA angesammelt. Von dort nehmen sie denselben Weg wie die Elektronen.

Siehe auch ▷ Teilchenbeschleuniger

## 6.172 Tesla \*\*

*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).*

Beispiele 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.

## 6.173 Tevatron \*\*

*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 Experimente am Tevatron sind CDF und D0.

Entdeckungen Zu den wichtigsten Forschungsergebnisse zählt die Entdeckung des Top-Quarks.

Siehe auch ▷ Fermilab ▷ Synchrotron ▷ Teilchenbeschleuniger weltweit ▷ Top-Quark

## 6.174 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 beschießt, 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.

▷ Experiment ▷ Standardmodell

Siehe auch

## Tief-inelastische Streuung \*\*

6.175

*Wenn Physiker beispielsweise mit Hilfe sehr energiereicher Elektronen das Innere von Protonen erkunden, spricht man von tief-inelastischer Streuung.*

▷ Gluon ▷ HERA ▷ Proton

Siehe auch

## Top-Quark \*

6.176

*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  $6 \times 10^{-25}$  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 steht dies für den Wert des Isospins des Teilchens.

Name

▷ Bottom-Quark ▷ Charm-Quark ▷ Down-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Quarks  
▷ Strange-Quark ▷ Up-Quark

Siehe auch

6.177 **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

6.178 **Undulator** \*\*

*Magnetanordnung zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung.*

**Einsatz** Wenn es Physiker auf die Erzeugung von Synchrotronstrahlung anlegen, dann verwenden sie bestimmte Magnetstrukturen, mit denen sie beschleunigte Elektronen auf einen Slamomkurs zwingen. Bei diesen Strukturen handelt es sich um Undulatoren und Wiggler.

**Aufbau und Funktionsweise** Ein Undulator besteht aus einer Folge von Magneten, 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.

**Siehe auch** ▷ Beschleunigermagnete ▷ Synchrotronstrahlung ▷ Wiggler

6.179 **Universum** \*\*

*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.

Was in diesen 13,7 Milliarden Jahren alles geschah, zeigt die folgende Übersicht:

Alter

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.

Siehe auch ▷ GUT ▷ Kosmologie ▷ Standardmodell ▷ Urknall

## 6.180 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.

Up-Quarks wurden 1964 von Murray Gell-Mann und George Zweig vorhergesagt und 1969 experimentell bestätigt.

Nachweis und Entdeckung

Ein hypothetisch freies Up-Quark würde unendlich lange existieren.

Lebensdauer

„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.

Name

▷ Bottom-Quark ▷ Charm-Quark ▷ Down-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Neutron  
▷ Proton ▷ Quarks ▷ Strange-Quark ▷ Top-Quark

Siehe auch

## Urknall \*\*

6.181

*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.*

▷ Allgemeine Relativitätstheorie ▷ Kosmologie ▷ Standardmodell ▷ Universum

Siehe auch

## Vakuum \*\*

6.182

*Umgangssprachlich ist das Vakuum ein Raum ohne Materie. Der Quantentheorie zufolge ist aber auch der leere Raum noch gefüllt.*

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 im Alltag

Quantentheoretisch ist sowieso mal wieder alles ganz anders. Hier ver-

Vakuum in der Quantentheorie

steht 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 ▷ Virtuelle Teilchen

## 6.183 Vereinheitlichung \*\*

*Theoretiker sind danach bestrebt, unterschiedliche Phänomene mit denselben Mustern zu erklären. Insbesondere versuchen sie, die verschiedenen Wechselwirkungen auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen.*

Beispiele 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.

Siehe auch ▷ Elektromagnetismus ▷ GUT ▷ Superstringtheorie ▷ Supersymmetrie

## 6.184 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 ▷ Teilchendetektor

## 6.185 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.

Siehe auch ▷ Vakuum

**W** \*

6.186

*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

▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell ▷ Wechselwirkungsteilchen ▷ Z

Siehe auch

**Wechselwirkung** \*

6.187

*Wechselwirkung liegt immer vor, wenn zwischen zwei Dingen etwas passiert. Die moderne Physik unterscheidet dabei vier fundamentale 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:

Vier Kräfte

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.

Im Standardmodell der Teilchenphysik wird das Zustandekommen der Wechselwirkungen über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen beschrieben.

Wechselwirkungsteilchen

▷ Elektromagnetismus ▷ Gravitationskraft ▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell  
▷ Starke Kraft ▷ Wechselwirkungsteilchen

Siehe auch

6.188 **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  $\triangleright$  Gluon  $\triangleright$  Graviton  $\triangleright$  Photon  $\triangleright$  Standardmodell  $\triangleright$  Teilchen  $\triangleright$  W  $\triangleright$  Wechselwirkung  $\triangleright$  Z

6.189 **Wellenlänge** \*\*

*Die Wellenlänge gibt den Abstand zweier Wellenberge einer an.*

Wellenlänge von Licht 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.

Siehe auch  $\triangleright$  Frequenz

6.190 **Welle-Teilchen-Dualismus** \*\*

*Der Welle-Teilchen-Dualismus beschreibt ein Phänomen in der Quantentheorie, nach dem Quanten in Messungen zwar als Teilchen dingfest 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

## Weltformel \*\*

6.191

*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.*

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?

Eine Formel?

▷ GUT ▷ Superstringtheorie ▷ Theorie ▷ Vereinheitlichung

Siehe auch

## Wiggler \*\*

6.192

*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 Wiggler 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

6.193 **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

6.194 **Z** \*

*Fundamentales Wechselwirkungsteilchen der schwachen Kraft.*

Details 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. 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.

Siehe auch ▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell ▷ W ▷ Wechselwirkungsteilchen

6.195 **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.

6.196 **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 Sinn-

lichkeit des Menschen verankert: Zeit und Raum existieren nicht an sich, sondern dienen dem Menschen als Ordnungsraaster. 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 \*\*

6.197

*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) ▷ Spezielle Relativitätstheorie

Siehe auch

6.198 **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

6.199 **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.

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

▷ Kreisbeschleuniger ▷ Synchrotron ▷ Teilchenbeschleuniger

Siehe auch



# 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.

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 millionstel Meter 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.

1803 **Atombeweis** \*\*

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.

### **Max Planck \*\***

1858-1947

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“.

### **Die Theorie des Lichts \*\***

1864

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.

### **Periodensystem \*\***

1869

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.

1879-1955

**Albert Einstein** \*\*

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“.

1895

**Entdeckung der Röntgenstrahlung** \*\*

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“.

1896

**Entdeckung der Radioaktivität** \*\*

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“.

### **Der Quantengedanke \*\***

1900

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“.

### **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.

### **Entdeckung des Atomkerns \***

1909

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 **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“.

### 1913 **Bohrs Atommodell** \*\*

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“.

## **Entdeckung des Protons** \*

1919

Der Brite Lord Ernest Rutherford (1871-1937) nennt den Kern des Wasserstoffs „Proton“.

## **Teilchennatur von Röntgenlicht** \*\*

1922

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“.

## **Die Taufe des Photons** \*\*

1926

Der amerikanische Chemiker Gilbert Newton Lewis (1875–1946) schlägt den Namen „Photon“ für das Teilchen des Lichts vor.

## **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.

## **Murray Gell-Mann** \*\*

1929

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 **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.

1932 **Nachweis des Neutrons** \*\*

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.

1932 **Nachweis des Positrons** \*

Der amerikanische Physiker Charles David Anderson (1905–1991) entdeckt das Positron, das Antiteilchen zum Elektron. Dieses Teilchen war vier Jahre zuvor von Paul Adrien Maurice Dirac (1902–1984) vorhergesagt worden.

Im Jahr 1936 erhält Anderson den Physik-Nobelpreis für diese Entdeckung.

1940 **Tscherenkow-Detektoren** \*\*

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“.

## **Entdeckung des Myons \*\***

1947

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.

## **Fertigstellung der Quantenelektrodynamik \*\***

1948

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“.

## **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 Blasenkammer“.

## **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“.

- 1957 **Ist das Universum spiegelsymmetrisch? \*\***  
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.
- 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 **Teilchenphysik wird schwer: Higgs \*\***  
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 das Standardmodell hätte ein massives Problem.
- 1964 **Vorhersage der Quarks \***  
Die amerikanischen Physiker Murray Gell-Mann (\*1929) und George Zweig (\*1937) bemerken zeitgleich, dass mithilfe dreier Quarks Ord-

nung 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“.

### **Nachweis der Quarks \***

1969

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“.

### **Supersymmetrie \*\***

1971

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.

1974 **Entdeckung des Charm-Quarks** \*\*

Mit dem J/Psi („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“.

1975 **Entdeckung des Tauons** \*\*

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“.

1977 **Entdeckung des Bottom-Quarks** \*\*

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).

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 mögli-

cher Kandidat, mit der sich alle bekannten Kräfte auf einheitliche Weise beschreiben lassen könnten.

### **Entdeckung der Ws und Zs \*\***

1983

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“.

### **Tevatron \*\***

1987

Mit dem Tevatron geht am Fermilab der zu dem Zeitpunkt energiereichste 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.

### **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  $W$ s und  $Z$ s) 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 **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 **Entdeckung des Tau-Neutrinos** \*\*

Am Fermilab gibt sich mit dem Tau-Neutrino das letzte der drei Neutrinos des Standardmodells der Teilchenphysik zu erkennen.

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 theorieelos 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 „kworks“ 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 Massemassen 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:  $9 \times 10^{-31}$  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.