

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: kleiner Wissensdurst

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

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Notkestraße 85
22607 Hamburg

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

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

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Notkestraße 85
22607 Hamburg

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

Inhaltsverzeichnis

1	Teilchen und Kräfte	13
1.1	Man nehme...	13
1.1.1	Universum selbstgemacht *	13
1.1.2	Drei Säulen des Universums *	14
1.2	Elektron, Neutrino, Quarks und Konsorten	15
1.2.1	4 Freunde sollt Ihr sein *	15
1.2.2	Antimaterie *	15
1.2.3	Drei Familien *	16
1.3	Was die Welt zusammenhält – Kräfte	16
1.3.1	Der Zaubertoaster *	17
1.3.2	Vier Kräfte *	17
1.3.3	Briefe schreiben bewegt *	18
1.3.4	Wechselwirkungsteilchen *	19
1.4	Massive Korrektur – Der Higgs-Mechanismus	20
1.4.1	Eine Welt ohne Masse *	20
1.4.2	Der Higgs-Mechanismus *	20
2	Teilchen beschleunigen	23
2.1	Wozu beschleunigen?	23
2.1.1	Physik in Hamburgs Unterwelt *	23
2.1.2	Energie erhöhen *	24
2.2	Wie beschleunigen?	25
2.2.1	Die Grundidee: Spannung *	25
2.2.2	Korrektur der Grundidee: Magnetfelder *	25
2.3	Kreis- und Linearbeschleuniger	26

2.3.1	Krumm gelaufen... *	26
2.3.2	...oder geradeaus? *	27
2.3.3	Synchrotron und Speicherring *	27
3	Teilchen streuen	29
3.1	Um die Ecke geschaut	29
3.1.1	Streu-Experiment I: Um die Ecke geschaut *	29
3.1.2	Streu-Experiment II: Reingeschaut *	31
3.1.3	Streu-Experiment III: Neues gemacht *	32
3.2	Vom Atomkern zu den Quarks	32
3.2.1	Der Kern der Dinge *	32
3.2.2	HERA *	33
3.3	Moderne Streuexperimente	34
3.3.1	Teilchennachweis *	34
3.3.2	Großdetektoren *	34
4	Lexikon	37
4.1	Antimaterie *	37
4.2	Antiteilchen *	37
4.3	Atom *	38
4.4	Atomkern *	39
4.5	Bottom-Quark *	39
4.6	CERN *	39
4.7	DESY *	40
4.8	Down-Quark *	41
4.9	Elektrische Ladung *	42
4.10	Elektromagnetische Kraft *	42
4.11	Elektron *	43
4.12	Elektronenvolt *	43
4.13	Elektron-Neutrino *	44
4.14	Elektroschwache Kraft	44
4.15	Gluon *	45
4.16	Gravitationskraft *	45
4.17	HERA *	46
4.18	Higgs-Teilchen *	47
4.19	ILC	48
4.20	Kalorimeter *	48
4.21	Kreisbeschleuniger *	48
4.22	Lebensdauer *	49
4.23	LHC *	49

4.24	Licht *	50
4.25	Lichtgeschwindigkeit *	50
4.26	Linearbeschleuniger *	51
4.27	Masse *	51
4.28	Materieteilchen *	52
4.29	Molekül *	52
4.30	Myon *	53
4.31	Myon-Neutrino *	53
4.32	Neutrinos *	53
4.33	Neutron *	54
4.34	Nobelpreis *	54
4.35	Photon *	54
4.36	Positron *	55
4.37	Proton *	56
4.38	Quarks *	56
4.39	Schwache Kraft *	57
4.40	Spezielle Relativitätstheorie *	57
4.41	Standardmodell *	57
4.42	Starke Kraft *	58
4.43	Strange-Quark *	59
4.44	Tau-Neutrino *	59
4.45	Tauon *	60
4.46	Teilchen *	60
4.47	Teilchenbeschleuniger *	61
4.48	Teilchendetektor *	61
4.49	Teilchenfamilien *	62
4.50	Teilchenpaket	62
4.51	Top-Quark *	62
4.52	Up-Quark *	63
4.53	W *	63
4.54	Wechselwirkung *	64
4.55	Wechselwirkungsteilchen *	64
4.56	Z *	65
A Zeitleiste		67
-400:	Geburt der Atomidee *	67
1897:	Entdeckung des Elektrons *	67
1909:	Entdeckung des Atomkerns *	67
1919:	Entdeckung des Protons *	68
1930:	Vorhersage des Elektron-Neutrinos *	68

1932: Nachweis des Positrons *	68
1956: Nachweis des Elektron-Neutrinos *	68
1964: Vorhersage der Quarks *	68
1969: Nachweis der Quarks *	69
2008: Start des LHC *	69

B Fragen und Antworten	71
B.1 Aus wie vielen Quarks bestehen Protonen? **	71
B.2 Gibt es magnetische Monopole? ***	71
B.3 Gibt es noch mehr Teilchensorten? *	72
B.4 In wie viel Kilogramm Eisen stecken ein Kilo Elektronen? *	73
B.5 Ist das Vakuum wirklich leer? **	73
B.6 Kann etwas schneller sein als Licht? *	74
B.7 Warum kann das Standardmodell nicht stimmen? *	74
B.8 Was bedeutet „Elektron“? *	76
B.9 Was ist die Supersymmetrie? *	76
B.10 Was ist die Weltformel? **	77
B.11 Was ist dunkle Materie? **	77
B.12 Was sind Strings? **	78
B.13 Was suchen Physiker am Südpol? **	78
B.14 Was verbrigt sich hinter der QED? ***	79
B.15 Welche Arten von Beschleunigern gibt es? *	80
B.16 Welche Theorien stecken im Standardmodell der Teilchenphysik? **	81
B.17 Werden die Teilchen in neuen Beschleunigern schneller? *	82
B.18 Wer erfand die Atome? *	82
B.19 Wer gab dem Photon seinen Namen? *	83
B.20 Wer ist „Higgs“? *	83
B.21 Wie alt ist die Quantentheorie? **	84
B.22 Wie flott sind Sie bei einer Bewegungsenergie von 250 Milliarden Elektronenvolt? *	85
B.23 Wie heißt der weltweit größte Beschleuniger? *	85
B.24 Wie lange braucht Licht von der Erde zur Sonne? *	86
B.25 Wie schwer sind Neutrinos? *	86
B.26 Wie spricht man „Quark“ richtig aus? *	86
B.27 Wie viele Teilchensorten gibt es? *	87
B.28 Wie viel wiegen Quarks? *	88
B.29 Wie viel wiegt ein Elektron? *	89

B.30	Wie weit ist ein Quantensprung? **	89
B.31	Wie weit schaffte es ein Elektron im Beschleuniger HE- RA? *	90
B.32	Wofür bekam Albert Einstein den Nobelpreis? *	91
B.33	Woher stammt der Name „Quark“? *	91
B.34	Wo wurde das Gluon entdeckt? *	91

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 Drei Säulen des Universums *

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.

Elektron, Neutrino, Quarks und Konsorten 1.2

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

4 Freunde sollt Ihr sein * 1.2.1

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

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

Antimaterie * 1.2.2

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 Ge-

wissheit: Man irrte. Mit dem Positron wurde das „positive Elektron“ gefunden.

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

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

1.2.3 **Drei Familien** *

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

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

Die schweren Teilchen entstehen in kosmischen Katastrophengebieten wie etwa Urknällen und 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.

1.3 **Was die Welt zusammenhält – Kräfte**

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.

Vier Kräfte *

1.3.2

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

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

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

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 Bummerang zu, gleiten sie wieder aufeinander zu.

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

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

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

Abbildung 1.3: Wesensverändernder Mützenwurf.

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

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 aller kleinsten Teilchen aber nur eine sehr, sehr kleine Rolle. So ist die Schwerkraft zwischen zwei Elektronen mehr als eine Milliarde Milliarde Milliarde Milliarde

Mal schwächer als die elektromagnetische Abstoßung. So genau sind selbst Hochpräzisions-Experimente nicht. In der Summe fällt die Schwerkraft aber schon ins Gewicht, weil sich Massen nur anziehen und nicht auch schon mal abstoßen.“

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.

1.4.1 Eine Welt ohne Masse *

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

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

Keine Masse? Klasse, sagen sich diejenigen, bei denen der Jahresbeitrag für Weight Watchers demnächst fällig ist. Doch masselose Objekte haben eine tödliche Eigenschaft: Sie sind ständig mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs. Masse hingegen macht träge und bremst. Wenn alle Teilchen mit Lichtgeschwindigkeit durchs Universum jagen würden, gäbe es zwar keinen Stillstand, aber auch kein Leben: Quarks und Elektronen würden keine Atome bilden. Atome weder Moleküle, Sterne noch Sie!

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

1.4.2 Der Higgs-Mechanismus *

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

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

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

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.

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.

Korrektur der Grundidee: Magnetfelder *

2.2.2

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

Immer wieder ist es notwendig, geladene Teilchen umzulenken. Dies ist etwa in Kreisbeschleunigern der Fall, in denen die Teilchen auf einer kreisförmigen Bahn immer wieder dieselben Beschleunigungsstrecken durchlaufen. Oder aber, wenn die Teilchen von einem Beschleuniger in

einen anderen geleitet oder zu kompakten Strahlen gebündelt werden sollen.

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

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

Abbildung 2.1: Torwandschießen mit Henry Lorentz.

2.3 Kreis- und Linearbeschleuniger

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

2.3.1 Krumm gelaufen... *

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.

Synchrotron und Speicherring *

2.3.3

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.

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.

Streu-Experiment I: Um die Ecke geschaut *

3.1.1

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.

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

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 Signalen. 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 *

3.1.2

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“.

3.1.3 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.

3.2 Vom Atomkern zu den Quarks

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.

3.2.1 Der Kern der Dinge *

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.

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.

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, 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.

HERA *

3.2.2

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?

3.3 Moderne Streuexperimente

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

3.3.1 Teilchennachweis *

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

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

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.

Lexikon

Antimaterie *

4.1

Antimaterie ist aus Antiteilchen aufgebaut, so wie „normale“ Materie aus normalen Teilchen besteht.

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.

Anti-Atome

▷ Antiteilchen

Siehe auch

Antiteilchen *

4.2

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

Vernichtung	Treffen ein Teilchen und sein Antipartner aufeinander, so können sich beide vollständig in Energie umwandeln. Dabei werden gigantische Energien frei. 80 Kilogramm Antiprotonen würden ausreichen, den jährlichen Energieverbrauch Deutschlands zu decken. Zur Energiegewinnung oder als Waffe taugt das aber nicht wirklich: Es befinden sich keine größeren Mengen Antimaterie in unmittelbarer Nähe zur Erde und für die Antimaterie, die in Teilchenbeschleuniger geschaffen wird, muss weit mehr Energie zur Erzeugung aufgebracht werden, als wieder gewonnen werden kann.
Vorhersage und Entdeckung	1928 sagte Paul Adrien Maurice Dirac die Existenz von Antimaterie voraus. Vier Jahre später gab es das erste Photo vom Positron, dem Antipartner zum Elektron.
Siehe auch	▷ Antimaterie ▷ Positron

4.3 Atom *

Objekte, aus denen chemische Elemente (wie z.B. Wasserstoff oder Eisen) aufgebaut sind. Atome bestehen aus einem elektrisch positiven geladenen Atomkern, um den sich Elektronen bewegen.

Atommodelle	In den einfachsten Modellen bewegen sich die Elektronen wie in einem Planetensystem auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen um den Kern. Nach der Quantentheorie kann aber nicht mehr von genau definierten Bahnen gesprochen werden; es können nur noch Wahrscheinlichkeiten für den Aufenthaltsort der Teilchen berechnet werden.
Entdeckung	Schon die alten Griechen Demokrit und sein Lehrer Leukipp dachten vor über zweitausend Jahren, dass es so etwas wie Atome geben müsse. Überzeugende experimentelle Indizien fand dann John Dalton im 19. Jahrhundert: Mit ihnen ließen sich einige physikalische und chemische Eigenschaften von Materie elegant erklären.
Größe	Der Durchmesser von Atomen liegt bei rund 10^{-10} Metern: Man muss also zehn Milliarden Atome aneinander reihen, um eine Strecke von einem Meter zu erhalten.
Name	Das griechische Wort „atomos“ bedeutet unteilbar. Mittlerweile haben sich Atome aber als durchaus teilbar herausgestellt. In ihrem Zentrum befindet sich ein Kern, der aus Protonen und Neutronen aufgebaut sind, die wiederum aus Quarks und Gluonen bestehen.
Siehe auch	▷ Atomkern ▷ Elektron ▷ Quarks

Atomkern *

4.4

Objekt, das sich im Zentrum eines Atoms befindet. Atomkerne sind elektrisch positiv geladen und aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt. Diese bestehen wiederum aus Quarks und Gluonen.

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

Entdeckung

Mit einem Durchmesser von rund 10^{-14} Metern sind Atomkerne etwa zehntausend Mal kleiner als Atome. Man müsste hunderttausend Milliarden Kerne aneinander reihen, um eine Strecke von einem Meter zu erhalten.

Abmessung

▷ Atom ▷ Neutron ▷ Proton ▷ Quarks

Siehe auch

Bottom-Quark *

4.5

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

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

Lebensdauer

Das englische „Bottom“ bedeutet so viel wie „am Grund“ oder „unten“. Wie bei den Up- und Down-Quarks steht dies für den Wert des Isospins des Teilchens. Der entsprechende Partner zum Bottom-Quark ist das Top-Quark.

Name

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

Siehe auch

CERN *

4.6

CERN ist das europäische Zentrum für Atom-, Kern- und Teilchenphysik in der Nähe von Genf. Es beherbergt unter anderem den Teilchenbeschleuniger LHC.

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.

Geschichte und Größe

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	▷ LHC

4.7 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. Po-

sitronen) 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

▷ HERA

Siehe auch

Down-Quark *

4.8

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

Die Masse des Down-Quarks entspricht etwa $6 \text{ MeV}/c^2$ und ist damit gut zehnmal größer als die des Elektrons. Die Masse der Quarks lässt sich nicht so leicht angeben wie die anderer Teilchen, weil Quarks immer nur in Gruppen und nie einzeln vorgefunden werden. Daher lässt sich nur aus der Masse der Gruppen auf die der Bestandteile schließen. Up-Quarks wurden 1964 von Murray Gell-Mann und George Zweig vorhergesagt und 1969 experimentell bestätigt.

Masse

Mithilfe der Lebensdauer des Neutrons lässt sich die des Down-Quarks auf einige hundert Sekunden schätzen.

Nachweis und Entdeckung

Lebensdauer

„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.

Name

▷ Bottom-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Neutron ▷ Proton ▷ Quarks ▷ Strange-Quark ▷ Top-Quark ▷ Up-Quark

Siehe auch

4.9 Elektrische Ladung *

Die elektrische Ladung eines Teilchens gibt an, wie stark dieses der elektromagnetischen Kraft ausgesetzt ist. Je größer diese Ladung, um so stärker spürt ein Teilchen andere elektrische Ladungen.

Zwei Typen Die elektrische Ladung kann positiv und negativ sein. Gleichnamig geladene Teilchen stoßen sich ab, und entgegengesetzt geladene Teilchen ziehen sich an.

Ladungsquantelung Eines der letzten, großen Rätsel der modernen Physik ist die Frage, wieso die elektrischen Ladungen von Elektronen und Protonen bis auf ein Vorzeichen übereinstimmen. Einen offensichtlichen Grund dafür gibt es nicht, haben die beiden Teilchensorten doch eigentlich nichts miteinander gemein. Wir können uns aber recht glücklich schätzen, dass dem so ist. Denn nur aufgrund dieser Übereinstimmung sind elektrisch neutrale Atome möglich, in denen die negativen Ladungen der Elektronen die des positiven Kernes exakt aufheben. Wären die beiden Ladungen nur geringfügig verschieden, würden sich alle Atome anziehen oder abstoßen: Eine Welt, wie wir sie kennen, wäre unmöglich.

Millikans Öltröpfchenversuch Die Ladungsquantelung wurde im Jahr 1909 vom amerikanischen Physiker Robert Andrews Millikan (1868-1953) entdeckt: Als er die elektrischen Ladungen von Öltröpfchen untersuchte, stellte er fest, dass sie bei allen Öltröpfchen dem ganzzahligen Vielfachen der Ladung des Elektrons entsprachen. Für diese Entdeckung erhielt Millikan 1923 den Nobelpreis für Physik („für seine Arbeiten zur elektrischen Elementarladung und zum photoelektrischen Effekt“).

Siehe auch ▷ Elektromagnetische Kraft

4.10 Elektromagnetische Kraft *

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.

Funktionsweise Nach der Quantenelektrodynamik erfolgt die elektrische Kraft über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen mit dem Namen Photon.

Siehe auch ▷ Elektrische Ladung ▷ Photon ▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell ▷ Starke Kraft ▷ Wechselwirkung

Elektron *

4.11

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.

Details

Der Zerfall eines Elektrons in ein anderes Teilchen wurde bisher nicht beobachtet. Es scheint stabil zu sein.

Lebensdauer und Zerfall

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.

Nachweis und Entdeckung

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.

Name

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

Siehe auch

Elektronenvolt *

4.12

In der Teilchenphysik gebräuchliche Einheit für die Energie.

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

von einem Volt beschleunigt, so gewinnt es eine Energie von einem Elektronenvolt.

Siehe auch

4.13 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

4.14 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.

▷ Schwache Kraft

Siehe auch

Gluon *

4.15

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.

Gluonen wurden 1979 am PETRA-Beschleuniger bei DESY entdeckt. Dort beobachtete man beim Zusammenprall von Elektronen mit Positronen immer wieder drei Bündel von Teilchen. Für eine Erklärung dieses Phänomens einigten sich die Wissenschaftler auf das Folgende: Beim Zusammenstoß entstehen ein Quark und ein Antiquark, von denen eines ein Gluon aussendet, bevor aus allen drei Teilchen zahlreiche weitere Teilchen entstehen, die sich zu Bündeln formen.

Entdeckung

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.

Farbe der Gluonen

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

Name

▷ Starke Kraft ▷ Wechselwirkungsteilchen

Siehe auch

Gravitationskraft *

4.16

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

Eigenschaften

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 Allerkleinsten problemlos unter den Teppich gekehrt werden können. Es gibt aber auch noch einen zweiten Grund für ihre Omnipräsenz: Im Gegensatz zur schwachen und starken Kraft hat die Gravitationskraft eine unendliche Reichweite, das heißt: Sie ziehen auch noch dann ihre Schwiegermutter an, selbst wenn sich diese auf der anderen Seite des Universums befindet.

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 ▷ Masse ▷ Wechselwirkung

4.17 **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 aufein-

anderprallen ließ. Damit ist es möglich, Strukturen im Proton zu untersuchen, die mit 0,000.000.000 000.000.000,5 Metern 2.000-mal kleiner sind als das Proton selbst. HERA bot damit den weltweit schärfsten Blick ins Proton überhaupt. Ende Juni 2007 wurde die Anlage angeschaltet, die Auswertung der gesammelten Daten wird aber weit über 2010 hinaus andauern.

Experimentiert wurde bei HERA an unterschiedlichen Stellen: H1 (im Norden), HERMES (im Osten) und ZEUS (im Süden). In diesen Experimenten muss sich das Standardmodell seit HERAs Inbetriebnahme 1992 kritischen Tests unterziehen.

Und so kommt's zum Namen:

- ▷ Hadron: Zu den Hadronen zählen Protonen, also die aus Quarks zusammengesetzten Kerne des Wasserstoffatoms. Das Proton wiegt im Ruhezustand knapp 1 Milliarde Elektronenvolt und wird in HERA auf das 820-fache seiner Ruhemasse beschleunigt.
- ▷ Elektronen: Als zweiten Teilchentyp verwenden die HERA-Forscher Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen. Die Elektronen haben eine Energie von rund 500.000 Elektronenvolt vor der Beschleunigung und knapp 30 Milliarden hinterher.
- ▷ Ring-Anlage: HERA bildet einen geschlossenen Ring mit einer Länge von 6,3 Kilometern. An zwei Stellen prallen Protonen und Elektronen rund zehn Millionen Mal in der Sekunde aufeinander.
- ▷ DESY

Experimente

Name

Siehe auch

Higgs-Teilchen *

4.18

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.

Nachweis

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

Name

- ▷ Masse ▷ Standardmodell ▷ Teilchen

Siehe auch

4.19 **ILC**

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.

Siehe auch ▷ Teilchenbeschleuniger

4.20 **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 ▷ Teilchendetektor

4.21 **Kreisbeschleuniger** *

Typ eines Teilchenbeschleunigers. In Kreisbeschleunigern durchlaufen Teilchen dieselben Beschleunigungsstrecken mehrfach, um so Umlauf für Umlauf auf immer höhere Energien gebracht zu werden. Dies unterscheidet sie von geraden Linearbeschleunigern.

Beispiele Der erste Kreisbeschleuniger war das Zyklotron. Heute kommen vornehmlich Synchrotrons zum Einsatz.

Name Moderne Kreisbeschleuniger wie das Synchrotron sind nicht kreisrund: Sie bestehen vielmehr aus geraden Beschleunigungsstrecken, die über kurvige Verbindungsstücke zu einer geschlossenen Struktur angeordnet sind.

▷ Linearbeschleuniger ▷ Teilchenbeschleuniger

Siehe auch

Lebensdauer *

4.22

Mittlere Zeitdauer, bis ein Teilchen zerfällt.

Da in der Quantenwelt der Zufall regiert, ist die *mittlere* Zeitdauer gemeint. So beträgt die Lebensdauer eines freien Neutrons (wenn es sich also außerhalb eines Atomkerns befindet) knapp 15 Minuten, das heißt: Es zerfällt im Durchschnitt nach knapp 15 Minuten. Wann aber das Neutron zerfällt, auf das Sie mit dem Finger zeigen, wissen Sie nicht: Es kann nur wenige Sekunden überleben. Es können aber auch einige Tage bis zu seinem Ableben verstreichen.

Statistische Größe

Resonanzen sind die kurzlebigsten Teilchen, die Physiker beobachtet haben. Für sie ist selbst ein Augenschlag eine Ewigkeit. So existieren Resonanzen gerade mal 10^{-24} Sekunden, bevor sie das Zeitliche segnen. In dieser Zeitspanne legt Licht gerade einmal den Durchmesser eines Atomkernes zurück. Mit einer Uhr stoppen kann man diese Zeit nicht. Physiker bleibt nur die Möglichkeit, indirekt auf die Lebenserwartung von Resonanzen zu schließen.

Extrem kurzlebig: Resonanzen

Siehe auch

LHC *

4.23

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?

Experimente	▷ 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.
GRID	Wenn der LHC und seine Experimente in Betrieb sind, werden jährlich rund 15 Millionen Gigabyte an Daten produziert. Diese Daten werden mit Hilfe eines Grids gespeichert und Wissenschaftlern zur Auswertung zur Verfügung gestellt.
Name	LHC ist die Abkürzung für Large Hadron Collider (= großer Hadronen-Zusammenstoßer).
Siehe auch	▷ CERN ▷ Kreisbeschleuniger

4.24 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	▷ Lichtgeschwindigkeit ▷ Photon ▷ Spezielle Relativitätstheorie

4.25 Lichtgeschwindigkeit *

Licht breitet sich im Vakuum mit einer Geschwindigkeit von 299.792.458 Metern pro Sekunde aus. Somit braucht das Licht von der Sonne bis zur Erde – je nach Jahreszeit – rund 8 Minuten. Nach der speziellen Relativitätstheorie ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum das absolute Tempolimit: Nichts kann schneller sein.

Lichtgeschwindigkeit in Materie	Durch Materie bewegt sich Licht mit einer geringeren Geschwindigkeit als durch das Vakuum. So beträgt die Lichtgeschwindigkeit im Wasser nur rund 75 Prozent und die in Diamant nur 41 Prozent des Wertes im Vakuum. In Materie ist es somit für massive Teilchen prinzipiell auch möglich, schneller als das Licht zu sein. Dabei wird eine besondere
---------------------------------	--

Form von Strahlung ausgesendet, die Tscherenkow-Strahlung, die in bestimmten Detektoren zum Nachweis der Teilchen genutzt wird.

▷ Licht ▷ Spezielle Relativitätstheorie

Siehe auch

Linearbeschleuniger *

4.26

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 ▷ Teilchenbeschleuniger

Siehe auch

Masse *

4.27

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 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

Schwere und träge Masse

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

4.28 **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.

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

4.29 **Molekül** *

Aus Atomen zusammengesetztes Objekt.

Siehe auch ▷ Atom

Myon *

4.30

Fundamentales Teilchen. Das Myon ist mit dem Elektron verwandt und ebenso elektrisch negativ geladen, seine Masse ist jedoch 207-mal größer.

Ein Myon im Ruhezustand zerfällt im Schnitt nach rund zwei milliostel Sekunden in ein Elektron, ein Elektron-Anti-Neutrino und ein Myon-Neutrino.

Lebensdauer und Zerfall

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)

Nachweis und Entdeckung

▷ Elektron ▷ Materieteilchen ▷ Myon-Neutrino ▷ Tauon

Siehe auch

Myon-Neutrino *

4.31

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

Neutrinos *

4.32

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

4.33 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 ▷ Atomkern ▷ Proton

4.34 Nobelpreis *

Auszeichnung für außergewöhnliche wissenschaftliche Leistungen.

Siehe auch

4.35 Photon *

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.

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

▷ Wechselwirkungsteilchen

Positron *

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

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 Jahr später gab es das erste Bild vom Positron – geschossen von Charles D. Anderson mit Hilfe einer Nebelkammer und eines starken Magnetfeldes. Für diese Fund bekam Anderson den Physik-Nobelpreis.

Siehe auch ▷ Antimaterie ▷ Elektron

4.37 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 ▷ Atomkern ▷ Neutron

4.38 Quarks *

Typ von fundamentalen Teilchen. Das Standard-Modell der Teilchenphysik unterscheidet sechs verschiedene Quarksorten.

Aus Quarks sind unter anderem die Bestandteile von Atomkernen, Protonen und Neutronen, zusammengesetzt. Im einfachsten Modell bilden drei Quarks ein Proton oder Neutron.

Farbladung Quarks sind – neben Gluonen – die einzigen Teilchen, die über die starke Kraft wechselwirken. Dazu tragen die Teilchen eine Farbladung, aufgrund derer sie Gluonen, die Wechselwirkungsteilchen der starken Kraft, austauschen können.

6 Quarksorten Es gibt sechs verschiedene Quarksorten:

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

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 ▷ Down-Quark ▷ Gluon ▷ Materieteilchen ▷ Strange-Quark

▷ Top-Quark ▷ Up-Quark

Schwache Kraft *

4.39

Die schwache Kraft ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Sie wirkt zwischen schwachen Ladungen.

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.

Unruhestifter

Die Wechselwirkungsteilchen, die an diesen identitätsverändernden Maßnahmen beteiligt sind, heißen W-Plus, W-Minus und Z-Null.

Wechselwirkungsteilchen

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.

Vorhersage und Entdeckung

▷ Standardmodell ▷ W ▷ Wechselwirkung ▷ Z

Siehe auch

Spezielle Relativitätstheorie *

4.40

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.

▷ Lichtgeschwindigkeit

Siehe auch

Standardmodell *

4.41

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 [▷ Materieteilchen](#) [▷ Teilchenfamilien](#) [▷ Wechselwirkung](#) [▷ Wechselwirkungsteilchen](#)

4.42 Starke Kraft *

Die starke Kraft ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Sie wirkt zwischen Farbladungen und wird über den Austausch von Gluonen beschrieben.

Eigenschaften 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.

Funktionsweise 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.

Reichweite 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.

Stärke 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“.

Theorie Theoretisch beschrieben wird das Ganze durch die Quantenchromodynamik.

Siehe auch [▷ Gluon](#) [▷ Standardmodell](#) [▷ Wechselwirkung](#)

Strange-Quark *

4.43

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 als die des Elektrons. Die Masse der Quarks lässt sich nicht so leicht angeben wie die anderer Teilchen, weil Quarks immer nur in Gruppen und nie einzeln vorgefunden werden. Daher lässt sich nur aus der Masse der Gruppen auf die der Bestandteile schließen.

Masse

Verbindungen, die aus Strange-Quarks bestehen, sind instabil und zerfallen nach kurzer Zeit. Da sich dabei ein Strange-Quark in ein leichteres Quark verwandeln muss, dieser Vorgang der schwachen Kraft aber eher selten passiert, existieren Teilchen aus Strange-Quarks länger als zunächst vermutet. Dies kam den Physikern zunächst seltsam vor. Daher nannten sie solche Teilchen schon „seltsam“, bevor sie wussten, dass ein Strange-Quark im Inneren steckt. Die Lebensdauer des Strange-Quarks kann man aus den Lebensdauern der seltsamen Quark-Gruppen auf 5×10^{-8} Sekunden schätzen.

Lebensdauer

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.

Nachweis und Entdeckung

Das Strange-Quark ist Bestandteil so genannter seltsamer (engl. strange) Teilchen, welche den Physikern aufgrund ihrer seltsamen Zerfallsarten (u.a. lange Lebensdauern) aufgefallen waren.

Name

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

Siehe auch

Tau-Neutrino *

4.44

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

Name

Enrico Fermi geprägt. Er bedeutet auf Italienisch „kleines Ungeladenes“.

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

4.45 **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

4.46 **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 ▷ Wechselwirkungsteil-

chen

Teilchenbeschleuniger *

4.47

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 ▷ Teilchendetektor

Siehe auch

Teilchendetektor *

4.48

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, Spurrkammern (Vertexdetektoren, Drahtkammern, Driftkammern, Proportionalkammern) zur Vermessung von Teilchenbahnen,
- ▷ Kalorimeter zur 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.

▷ Kalorimeter

Siehe auch

4.49 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

4.50 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

4.51 Top-Quark *

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.

Masse

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.

Lebensdauer

Die Lebensdauer des Top-Quark beträgt rund 6×10^{-25} Sekunden.

Entdeckung

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.

„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 ▷ Down-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Quarks ▷ Strange-Quark Siehe auch
▷ Up-Quark

Up-Quark *

4.52

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.

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. Masse

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 ▷ Down-Quark ▷ Materieteilchen ▷ Neutron ▷ Proton ▷ Quarks Siehe auch
▷ Strange-Quark ▷ Top-Quark

W *

4.53

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 Zerfall

rund 0,3 Billionstel Billionstel Sekunden auch in kürzester Zeit.

Name	Der Buchstabe „W“ leitet sich von der ursprünglichen Bezeichnung „Weakon“ ab („weak“ ist die englische Bezeichnung für schwach).
Entdeckung	Die beiden Ws wurden 1968 durch die Theorie der elektroschwachen Vereinigung vorhergesagt und 1983 am CERN entdeckt.
Siehe auch	▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell ▷ Wechselwirkungsteilchen ▷ Z

4.54 Wechselwirkung *

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

Vier Kräfte Auch Elementarteilchen wechselwirken unterschiedlich und lassen sich auf diese Weise unterscheiden. Physiker haben dabei vier unterschiedliche Kräfte ausgemacht. Ob man dabei „Kraft“ oder „Wechselwirkung“ sagt, ist jedem frei gestellt:

1. Quarks haften über die starke Kraft zusammen.
2. Elektrisch geladene Teilchen üben Kräfte über die elektromagnetische Kraft aufeinander aus.
3. Und über die schwache Kraft können Teilchen unter anderem ihren Typ ändern. Dann wird beispielsweise aus einem Elektron ein Neutrino, oder aus einem Charm-Quark ein Down-Quark.
4. Teilchen mit Masse ziehen sich über die Gravitationskraft an.

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

Siehe auch ▷ Gravitationskraft ▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell ▷ Starke Kraft ▷ Wechselwirkungsteilchen

4.55 Wechselwirkungsteilchen *

Das Zustandekommen von Wechselwirkungen wird im Standard-Modell der Teilchenphysik durch den Austausch von Wechselwirkungsteilchen beschrieben: Photonen, Ws, Zs und Gluonen.

Siehe auch ▷ Gluon ▷ Photon ▷ Standardmodell ▷ Teilchen ▷ W ▷ Wechselwirkung ▷ Z

Z *

4.56

Fundamentales Wechselwirkungsteilchen der schwachen Kraft.

Über den Austausch von Wechselwirkungsteilchen mit Namen Z (sowie der Ws) wird das Zustandekommen der schwachen Kraft erklärt. Zs sind elektrisch neutral und wiegen rund 90-mal so viel wie Protonen. Diese große Masse ist ein Grund dafür, dass die schwache Kraft nur über eine geringe Reichweite verfügt.

Details

Zs können in zahlreiche andere Teilchen zerfallen und tun dies nach rund 0,3 Billionstel Billionstel Sekunden auch.

Zerfall

Das Z wurde 1968 durch die Theorie der elektroschwachen Vereinigung vorhergesagt und 1983 am CERN entdeckt.

Vorhersage und Entdeckung

▷ Schwache Kraft ▷ Standardmodell ▷ W ▷ Wechselwirkungsteilchen

Siehe auch

Zeitleiste

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.

Entdeckung des Elektrons *

1897

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“.

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.

1919 **Entdeckung des Protons** *

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

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 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.

1956 **Nachweis des Elektron-Neutrinos** *

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“.

1964 **Vorhersage der Quarks** *

Die amerikanischen Physiker Murray Gell-Mann (*1929) und George Zweig (*1937) bemerken zeitgleich, dass mithilfe dreier Quarks Ordnung in das damalige Gewirr der über 100 „Elementar“-Teilchen einkehren kann. Drei weitere Quarktypen kommen später hinzu.

Gell-Mann erhält 1969 den Physik-Nobelpreis „für seine Beiträge und

Entdeckungen hinsichtlich der Klassifikation der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen“.

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“.

Start des LHC *

2008

Am Forschungszentrum CERN nimmt der LHC seinen Forschungsbetrieb auf. In diesem Teilchenbeschleuniger der Superlative werden Protonen mit einer noch nie erreichten Energie von jeweils 7 Billionen Elektronenvolt aufeinander stoßen. Ziel ist es dabei unter anderem, das Higgs-Teilchen zu finden, dessen Existenz für die Erklärung der Masse der Teilchen benötigt wird.

Fragen und Antworten

Aus wie vielen Quarks bestehen Protonen?

**

B.1

Kommt darauf an, wie genau Sie es nehmen.

Im einfachsten Modell bestehen Protonen lediglich aus drei Quarks. Aber schon dieses Modell muss verfeinert werden, wenn Ihnen daran liegt, dass die drei Quarks nicht auseinander fallen. Dazu sollten Sie davon ausgehen, dass zwischen den Quarks so genannte Gluonen wirken, die Wechselwirkungsteilchen der starken Kraft. Jetzt sind es schon drei Quarks und eine Handvoll Gluonen.

Doch es wird noch komplexer. Denn aus den Gluonen, die sich die Quarks austauschen, können für kurze Momente Quark-Antiquark-Paare entstehen. Zwischen diesen Quarks wirken wieder Gluonen, die wieder ... und so weiter und so fort. Die drei Hauptquarks sind demnach in einem See zahlreicher anderer Quarks eingebettet.

Ein Proton ist also – obwohl winzig klein – ein hochkomplexes System. Es ist noch nicht genau verstanden, was da im Proton alles vorgeht. Ein Ziel von DESYs größter Teilchenbeschleuniger-Anlage HERA ist es gerade, dies zu ändern.

Gibt es magnetische Monopole? ***

B.2

Solange keine entdeckt werden, kann das niemand genau sagen.

Zerteilt man einen Magneten, so hält man danach nicht etwa den Nordpol in der einen Hand und den Südpol in der anderen. Nein, es entstehen erneut zwei vollständige Magnete. Auch wenn man wieder und wieder den Magneten zerbricht: Magnetismus kommt anscheinend immer mit zwei Polen daher – als Dipol. Im Gegensatz zur elektrischen Ladung hat man noch keine magnetische Ladung gefunden – so sehr Physiker auch danach Ausschau halten. Die Suche nach magnetischen Monopolen ist ein Standardvorgang in fast allen modernen Teilchenphysikexperimenten.

Und wieso sucht man überhaupt danach? Seit 1931 weiß man, dass theoretisch aus der Existenz magnetischer Monopole die Tatsache folgt, dass elektrische Ladungen immer ein Vielfaches der Ladung des Elektrons sind. Dafür kennt man sonst keinen Grund. Das ließ den Entdecker dieser Tatsache, Paul Dirac, 50 Jahre später zu dem Ausspruch hinreißen: „Theoretisch müsste es eigentlich Monopole geben, denn der mathematische Beweis ist so schön.“

B.3 Gibt es noch mehr Teilchensorten? *

Das wird derzeit untersucht.

61 Sorten sind den Teilchenphysikern bekannt. Doch weltweit suchen Forscher nach weiteren Teilchen. Denn so erfolgreich die moderne Naturwissenschaft und das Standardmodell der Teilchenphysik auch sind: Man kann sich niemals in der 100-prozentigen Gewissheit wähen, wirklich alles zu wissen.

So wird vermutet, dass es so genannte supersymmetrische Teilchen gibt. Wenn dies der Fall wäre, würde sich die Zahl der Teilchen auf einen Schlag verdoppeln.

Bei aller Unsicherheit gibt es jedoch ein beeindruckendes Indiz dafür, dass es zumindest nicht mehr als jene drei Teilchenfamilien gibt, welche das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt.

Zur ersten Familie zählen die Teilchen, aus denen der Großteil unserer Welt besteht: Elektronen, Elektron-Neutrinos und die Up- und Down-Quarks. Alle Atomkerne, Atome und Moleküle und auch Ihr Körper sind nur aus diesen Teilchen aufgebaut. Zusätzlich gibt es aber zu jedem dieser vier Teilchen zwei Partner, die sich im Wesentlichen nur durch eine höhere Masse auszeichnen. Macht zusammen drei Teilchenfamilien.

Warum es drei sind, weiß niemand. Untersuchungen am CERN haben

jedoch bereits 1983 gezeigt: Es gibt nur $2,998 \pm 0,029$ Neutrinoarten, und damit wohl auch nur drei Familien.

Doch man sollte auch hier das Kleingedruckte nicht übersehen: Gäbe es Neutrinos, die so schwer wie Kalzium-Atome wären, ist auch eine vierte Teilchenfamilie denkbar. Wie gesagt: 100-prozentige Gewissheit gibt es nicht.

In wie viel Kilogramm Eisen stecken ein Kilo Elektronen? *

B.4

In knapp vier Tonnen Eisen.

Kurze Überschlagsrechnung gefällig? Gut:

1. Ein Elektron ist knapp 2.000 mal leichter als ein Proton oder Neutron.
2. Im Atom gehört zu jedem Proton ein Elektron.
3. Bei mittelschweren Elementen wie etwa Eisen kommt Pi mal Daumen auf jedes Proton ein Neutron.
4. Damit wiegt ein komplettes Eisenatom etwa 4.000 mal mehr als seine Elektronen. 1 Kilogramm Elektronen bedeuten daher etwa 4.000 Kilogramm Eisenatome.

Diese Näherung gilt für alle Atome, bei denen die Zahl der Neutronen und Protonen etwa gleich sind – stets braucht man rund 4.000 Kilogramm eines Elementes für ein Kilogramm Elektronen.

Ist das Vakuum wirklich leer? **

B.5

Mitnichten.

Doch dem Namen nach schon. Denn: Vakuum ist, wo nichts ist. Wenigstens meinten dies die alten Römer. So steht das lateinische Wort „vacuus“ für „leer“. Den Vakuumtechniker packt bei dieser Definition die Ehrfurcht, denn eine solche Leere kann selbst mit den besten Vakuumpumpen nicht erreicht werden. Auch das Vakuum im Universum ist nicht perfekt. Es beinhaltet immer noch einige Wasserstoffmoleküle pro Kubikmeter.

Und selbst wenn es den Technikern gelänge, auch das letzte Atom und Molekül aus einem Behältnis zu entfernen, so wäre es immer noch nicht leer. Denn seit der Quantenfeldtheorie weiß man, dass es kein perfektes

(= teilchenfreies) Vakuum geben kann. So steckt selbst das reinste Vakuum voller Teilchen. Dabei bilden sich Teilchen-Antiteilchen-Paare, die etwa 0,000 000 000 000 000 000 01 Sekunden nach ihrer Entstehung auch schon wieder verschwinden. Ein ständiges Geben und Nehmen mit Namen „Quantenfluktuation“. Das Universum borgt sich dazu Energie, lebt ständig auf Pump und zerstört so das Nichts.

B.6 Kann etwas schneller sein als Licht? *

Ja, es kann – aber nicht ohne Folgen.

Dass die Lichtgeschwindigkeit ein absolutes Tempolimit darstellt, gilt nur für Licht, das sich im Vakuum ausbreitet. Dort ist es immer mit knapp 300.000 Kilometern pro Sekunde unterwegs. Nach der Relativitätstheorie kann auch nichts schneller sein.

Licht breitet sich aber langsamer als 300.000 Kilometer pro Sekunde aus, wenn es durch ein lichtdurchlässiges Hindernis wie Wasser oder Diamant scheint. So hat Licht in Wasser nur noch eine Geschwindigkeit von 225.563 Kilometern pro Sekunde. In Diamant sind es sogar nur 123.957 Kilometer pro Sekunde. Solche Geschwindigkeiten werden von Teilchen nach Zusammenstößen in Beschleunigern locker erreicht. Diese Teilchen sind dann schneller als das Licht.

Nicht ohne Folgen: Wenn ein Flugzeug die Schallmauer durchbricht, gibt es einen Überschallknall. Beim Licht ist es ein Überlichtblitz, die so genannte Tscherenkow-Strahlung. Diese ist charakteristisch für die Art und Geschwindigkeit des Überlicht-Teilchen und wird von Physikern zur Bestimmung der Teilchenart genutzt.

Wenn es also heißt: „Nichts ist schneller als das Licht“, müsste man pedantisch ein „im Vakuum“ ergänzen.

B.7 Warum kann das Standardmodell nicht stimmen? *

Es gibt da einige Macken.

Das Standardmodell der Teilchenphysik steckt voller Rätsel. Da ist zunächst einmal diese Unzahl fundamentaler Teilchen. Zählt man alle zusammen, so kommt man auf eine Summe von 61 Teilchen. Das klingt nicht sonderlich fundamental. Überzeugender wäre es, wenn es nur

einige wenige Elementarteilchentypen gäbe, aus denen sich der Rest zusammensetzt.

Aber nicht nur die Teilchen selbst, auch ihre Masse und die Stärken ihrer Wechselwirkungen fallen im Standardmodell vom Himmel. Wie in einem Lückentext müssen hier rund 20 Werte von den Physikern in Experimenten bestimmt und dann per Hand in die Theorie eingesetzt werden. Die Wissenschaftler hätten nichts dagegen, wenn es auch hier nur ein, zwei Werte gäbe.

Und dann ist da ja auch noch die Schwerkraft. Obwohl wir sie in unserem Leben ständig spüren, bleibt sie im Standardmodell außen vor. Bisher ist es den Theoretikern nicht gelungen, auch die Schwerkraft über den Austausch von Kraftteilchen funktionieren zu lassen.

Das bedeutet nun nicht, dass die Schwerkraft theorielos ist: Die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt sie durch die Krümmung des Raumes. So kreist die Erde um die Sonne, weil diese den Raum eindellt und auf diese Weise unseren Planeten gefangen hält. Die Vorhersagen dieser Theorie decken sich hervorragend mit dem Experiment – zumindest bei großen Abständen. Denn bisher konnte man das Gravitationsgesetz nur bis zu einem Abstand von einem Millimeter exakt vermessen – der ist „riesig“ für das Standardmodell.

Physiker wissen aber auch ohne Messung, dass es bei sehr kleinen Abständen zu Problemen kommen muss. Dies liegt an so genannten Vakuum-Quantenfluktuationen. Denn nach der Quantentheorie kann sich das Universum Energie borgen. Je mehr Energie dabei geliehen wird, umso schneller muss sie zurückgezahlt werden. Dies alles geschieht in zeitlichen Größenordnungen von milliardstel milliardstel milliardstel Sekunden.

Dies bedeutet nun, dass das Vakuum nicht glatt ist – wie die allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt, sondern dass der Raum bei winzigsten Abmessung unangenehm spitz und scharfkantig gekrümmt ist. Quanteneffekte mischen die Raumzeit bei kleinen Abständen zu so genanntem Quantenschaum auf. Konkret bedeutet dies, dass die Gleichungen, mit denen man bisher versuchte, Quantentheorie und Schwerkraft unter einen Hut zu bringen, unendliche Ergebnisse hervorbrachten. Und das ist Unsinn.

B.8 Was bedeutet „Elektron“? *

Das Wort „Elektron“ hat griechischen Ursprung und bedeutet „Bernstein“.

Diese Bezeichnung hat 1891 der britische Physiker George Johnstone Stoney (1826–1911) für die Einheit der Elektrizität vorgeschlagen. Denn schon seit der Antike ist bekannt, dass sich Bernstein elektrisch auflädt, wenn man daran reibt. Entdeckt wurde das Elektron im Jahr 1897 vom Joseph John Thomson.

B.9 Was ist die Supersymmetrie? *

Der Supersymmetrie zufolge soll es mehr als doppelt so viele Teilchensorten geben, wie man bisher gesichtet hat.

Aufs Engste verbunden ist diese Verdoppelung mit der Tatsache, dass die Welt der Elementarteilchen in zwei Lager geteilt ist: in so genannte Fermionen (darunter fallen die Materieteilchen) und in Bosonen (die Wechselwirkungsteilchen).

Treten diese Teilchensorten im Rudel auf, so legen sie ein sehr unterschiedliches Verhalten an den Tag. So können mehrere Materieteilchen (also Fermionen) nicht in ein und demselben Zustand verweilen. Daraus folgt beispielsweise, dass die Elektronen eines Atoms nicht gleichzeitig im Zustand niedrigster Energie verharren können, sondern in fein säuberlich geordneten Schalen um den Kern angeordnet sind. Für Bosonen gilt diese Einschränkung nicht.

Die Supersymmetrie vereint nun die ungleichen Brüder: Danach gibt es zu jedem Fermion (Materieteilchen) ein entsprechendes Boson (Wechselwirkungsteilchen) und umgekehrt.

Gefunden wurden diese Super-Teilchen noch nicht. Aber Namen haben sie schon: Den Superpartnern der Materieteilchen stellt man ein „s“ vorweg. Die supersymmetrischen Zwillinge der Wechselwirkungsteilchen bekommen ein „ino“ hinten angestellt. Und so tummeln sich in der supersymmetrischen Welt Selektrenen, Gluinos, Squarks und Higgsinos.

Hier einige supersymmetrische Paare:

- ▷ Elektron – Selektion
- ▷ Neutrino – Sneutrino
- ▷ Quark – Squark
- ▷ Gluon – Gluino

- ▷ Photon – Photino
- ▷ Higgs – Higgsino

Was ist die Weltformel? **

B.10

Eines wohl sicher: keine Formel.

Die einen nennen sie Weltformel, die anderen allumfassende Theorie ohne freie Parameter. Gemeint ist in beiden Fällen das Gedankengerüst, das die wirklich fundamentalen Bausteine des Universums und alle in ihm wirkenden Kräfte beschreiben soll.

Ob dabei eine einzige Formel zu Tage treten wird, darf jedoch bezweifelt werden. Es wird vielmehr eine ganze Ansammlung von Konzepten sein, die angeben, aus welchen fundamentalen Objekten das Universum besteht und wie diese miteinander in Wechselwirkung treten. Das alles wird sich kaum in eine einzige Formel pressen lassen.

So steht Einsteins oft zitiertes „ E gleich m mal c Quadrat“ auch nicht für die gesamte Relativitätstheorie. Die Formel ist vielmehr ein Ergebnis zahlreicher Prinzipien und vieler Rechenschritte. Es reicht keineswegs aus, diese Formel zu kennen, um die ganze spezielle Relativitätstheorie zu verstehen.

Was ist dunkle Materie? **

B.11

Dunkel nennen Physiker Materie, die sie nicht direkt sehen können, deren Existenz sie aber indirekt vermuten.

Astronomen und Kosmologen wissen nicht, woher 90 Prozent der Masse im Universum stammt. Dass es diese 90 Prozent gibt, haben die Forscher unter anderem aus den Drehbewegungen von Galaxien erschlossen. Die müssten nämlich anders rotieren, wenn nur all das Masse hätte, was man auch sehen kann.

Es gibt zahlreiche Theorien dazu, aus welchen Dingen dunkle Materie besteht. Zu den vielen Kandidaten für die dunkle Materie zählen die so genannten WIMPs („weakly interacting massive particle“ oder: schwach wechselwirkende schwere Teilchen).

Auch DESY sucht nach diesen hypothetischen Teilchen – und zwar mit dem Neutrino-Teleskop ICECUBE im Ewigen Eis des Südpols. Dabei

konzentrieren sich die Forscher nicht auf den Kosmos. Vielmehr wird vermutet, dass sich WIMPs auch tief im Inneren der Erde aufhalten.

B.12 Was sind Strings? **

Strings sind winzige Fäden, aus denen sich manche Forscher das Universum zusammengesetzt denken.

Für Stringtheoretiker sind Elektronen und Quarks keine punktförmigen Teilchen, sondern winzige Fäden, die unentwegt hin- und herschwingen. Mit diesem Ansatz wollen die Wissenschaftler eine allumfassende Theorie schaffen, die alle Kräfte beschreibt. Im Gegensatz zum aktuellen Standardmodell der Teilchenphysik wäre dann auch die Schwerkraft mit von der Partie.

Das Wort „String“ kommt aus dem Englischen und bedeutet „Saite“. Und hier spielt die Musik: Die Superstrings schwingen auf verschiedene Arten und bilden so die unterschiedlichen Teilchen, ganz so, wie die Saiten einer Geige auch unterschiedliche Töne hervorbringen können. Strings sind dabei sogar im Vergleich zu Atomkernen zwergenhaft. Sie besitzen eine Länge von gerade einmal 10^{-34} Metern. Das bedeutet: Im Verhältnis zu einem Stecknadelkopf sind sie kleiner als der Stecknadelkopf im Vergleich zum Universum. Das ist so winzig, dass wir sie wohl niemals direkt beobachten werden können – auch nicht mit den Teilchenbeschleunigern der Zukunft.

B.13 Was suchen Physiker am Südpol? **

Neutrinos. Genauer gesagt: kosmische Neutrinos aus den entlegeneren Winkeln unseres Universums.

Kosmische Neutrinos zu beobachten ist nicht gerade einfach. Denn Neutrinos sind zwar extrem häufig, aber auch äußerst zurückhaltend, wenn es darum geht, mit anderen Teilchen zu wechselwirken – in jeder Sekunde rasen Ihnen 200 Milliarden Neutrinos durch den Kopf, ohne dass Sie es merken.

Um die Geisterteilchen dennoch zu orten, haben sich Wissenschaftler das Neutrino-Teleskop einfallen lassen, und das größte, ICECUBE, befindet sich am Südpol. Von der Neutrino-Teleskopie erhoffen sich die Wissenschaftler, das eine oder andere Geheimnis der Kosmologie zu lüften, wie z.B. das der dunklen Materie.

Die Idee hinter den Neutrino-Teleskopen: Manchmal verrät sich ein Neutrino beim Durchfliegen der Erde durch eine seltene Reaktion mit einem Atom, bei der ein anderes Elementarteilchen erzeugt wird, ein Myon. Es fliegt in dieselbe Richtung wie das Neutrino. Wer also die Herkunft des Neutrinos ergründen möchte, kann stattdessen die Flugbahn des Myons messen. Und das geht am besten in Wasser oder – wie im Fall von ICECUBE – in Eis, wo die Myonen schneller sind als das Licht und eine Art „Überlichtblitz“ abgeben, vergleichbar mit dem Überschallknall eines Düsenjets. Ein Neutrino-Teleskop besteht nun aus einer räumlichen Anordnungen einzelner Detektorkugeln, die in langen Ketten tief ins Wasser oder Eis versenkt werden, und die Lichtblitze der Myonen registrieren.

Nun soll ein solches Teleskop allerdings Neutrinos aufzeichnen, deren Reise nach Möglichkeit außerhalb unserer Galaxis ihren Anfang nahm. Doch diese sind in der Minderheit gegenüber denen, die in der Atmosphäre entstanden sind. Um diese „Fehlalarme“ so gering wie möglich zu halten, sind die Detektorkugeln nach oben abgeschirmt, registrieren also nur Myonen, die unter ihnen im Erdinnern entstanden sind.

Dennoch ist unter Tausenden von Neutrino-Ereignissen vielleicht gerade mal eines, was für die Astrophysiker von Interesse sein könnte.

Was verbrigt sich hinter der QED? ***

B.14

Die Theorie von Licht und Co.

Zutaten: Für eine Quantenelektrodynamik (QED) brauchen Sie die schon etwas abgehangene Theorie des Elektromagnetismus (Maxwell: 1861–1864), sowie die eher frische spezielle Relativitätstheorie (Einstein: 1905) und Quantentheorie (Planck, Schrödinger, Heisenberg & Co, 1900–1927).

Die Zubereitung erfordert einiges Geschick. Die ersten Versuche, die Zutaten zu vermengen, mögen Ihnen zwar viel versprechend erscheinen; es könnten aber ungegenießbare Unendlichkeiten im Theoriemix gären, wie auch schon Paul Dirac im Jahre 1927 feststellen musste. Halten Sie sich daher lieber an das Kochkunststück von Tomonaga, Feynman und Dyson, denen es um 1946 gelang, die unschön ausgeflockten Unendlichkeiten aufzulösen. Ihr Trick mit dem Namen „Renormierung“ wird seitdem in allen Theorieküchen der Teilchenphysik verwendet. Er wurde 1956 mit dem Nobelpreis belohnt.

Der Aufwand mag abschrecken, er lohnt aber allemal: Sie erhalten ei-

ne leckere Theorie, deren Vorhersagen in überwältigender Weise mit den Ergebnissen der Experimente übereinstimmen; man kann die QED sogar als genaueste bisher ausgedachte Theorie bezeichnen. Sie beschreibt, wie geladenen Teilchen elektromagnetisch miteinander wechselwirken und was Licht ist.

Die QED kommt in den unterschiedlichsten Variationen daher: Chef de Cuisine Richard Feynman hat sich dazu eigens eine Sprache ausgedacht, die Feynman-Diagramme, mit denen sich komplizierteste Reaktionen aus der Welt des Mikrokosmos berechnen lassen.

Zubereitungszeit: rund 17 Jahre Temperatur: 15 bis 25 Grad Celsius Kalorien: 0

Welche Arten von Beschleunigern gibt es?

B.15 *

Geradeaus und krumm.

Wer einen Teilchenbeschleuniger bauen will, steht zunächst vor einer grundlegenden Frage: geradeaus oder krumm? Waren die ersten Teilchenbeschleuniger noch gerade (oder linear), kam man recht schnell auf die Idee, Teilchenbeschleuniger als geschlossene Ringe zu bauen. Dies brachte einen wesentlichen Vorteil mit sich. Denn die Energie der Teilchen konnte so Schritt für Schritt, also Umlauf für Umlauf erhöht werden.

Der einfachste **Linearbeschleuniger** besteht aus zwei Platten, an denen eine elektrische Spannung anliegt. Geladene Teilchen werden von der anders geladenen Platte angezogen. Auf diese Weise werden auch die Elektronen in einem Fernseher beschleunigt. Um eine höhere Beschleunigung zu erreichen, können mehrere Platten hintereinander geschaltet werden.

Der Nachteil von Linearbeschleunigern: Man kann die einzelnen Elemente nicht mehrfach verwenden wie bei einem Ringbeschleuniger.

Ein **Synchrotron** besteht aus mehreren Linearbeschleunigern, die zu einem Ring angeordnet sind. In den Kurven sorgen Magnetfelder dafür, dass die Teilchen den richtigen Weg nehmen. Mit zunehmender Teilchenenergie muss die Stärke der Magnetfelder dabei erhöht werden, damit die Teilchen auf der vorgesehenen Bahn bleiben. Die Magnetfelder werden also mit der Energie der Teilchen synchronisiert, was zum Namen „Synchrotron“ führt..

Ein **Speicherring** ist die Weiterentwicklung des Synchrotrons. Nach der Beschleunigung können die Teilchen in ihm für mehrere Stunden oder sogar Wochen gespeichert werden. Die lange Verweildauer der Teilchen im Ring ist ein großer Vorteil von Speicherringen. Die Teilchen haben so mehrfach die Möglichkeit, miteinander zu kollidieren. Denn wenn sich in einem Beschleuniger zwei Teilchenpakete durchdringen, ist damit noch nicht gesagt, dass die Teilchen auch miteinander wechselwirken. Häufig passiert einfach gar nichts, die Teilchen fliegen dann einfach aneinander vorbei.

Welche Theorien stecken im Standardmodell der Teilchenphysik? **

B.16

QCD und QFD.

„Standardmodell der Teilchenphysik“ heißt jene Ansammlung von Ideen und Theorien, die sich bereit seit Jahren in der Teilchenphysiker-Gemeinde größter Anerkennung erfreut. Nach dem Standardmodell der Teilchenphysik gibt es Materieteilchen, die über Kräffeteilchen miteinander in Wechselwirkung stehen.

Wie diese Wechselwirkungen vonstatten gehen, wird dabei durch zwei Theorien beschrieben: Da ist auf der einen Seite die Quantenchromodynamik (QCD). Sie ist für die starke Kraft zuständig. Auf der anderen Seite findet man die Vereinigung von elektromagnetischer und schwacher Kraft zur elektroschwachen Kraft. Diese Vereinigung wird mathematisch in der so genannten Quantenflavordynamik (QFD) formuliert.

Sowohl die Quantenchromodynamik als auch die Quantenflavordynamik sind so genannte Quantenfeldtheorien. Dieser Theorietyp ergibt sich automatisch, wenn man die spezielle Relativitätstheorie mit der Quantentheorie verbindet. Während die spezielle Relativitätstheorie Vorgänge bei sehr hohen Energien und Geschwindigkeiten beschreibt, gilt die Quantentheorie insbesondere für winzige Objekte – wie es Elementarteilchen nun mal sind. In relativistischen Quantenfeldtheorien werden beide Denkmuster gekoppelt, um sinnvolle Aussagen über kleinste Teilchen bei hohen Energien zu machen. Aus diesen Theorien folgt dann etwa die Existenz von Antimaterie.

B.17 Werden die Teilchen in neuen Beschleunigern schneller? *

Kaum.

In allen Teilchenbeschleunigern bewegen sich Elektronen oder Protonen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit durch die Röhren. Dennoch unterscheiden sich die Teilchen in ihren Energien zuweilen erheblich. Denn doppelte Energie heißt bei weitem nicht doppelte Geschwindigkeit. Die Relativitätstheorie macht einem da einen Strich durch die Rechnung.

Denn wenn man ein Teilchen beschleunigt, so braucht man immer mehr Energie, je näher man an die Lichtgeschwindigkeit heranrückt. Diese Geschwindigkeit selbst kann nie erreicht werden, weil dazu eine unendliche Menge an Energie vonnöten wäre.

Doch schauen wir uns die Geschwindigkeiten der Elektronen in den einzelnen Teilchenbeschleunigern genauer an:

- ▷ HERA (in Ruhestand): 27,5 Milliarden eV (299.789.673 m/s)
- ▷ LEP (durch Nachfolger LHC ersetzt): 100 Milliarden eV (299.791.692 m/s)
- ▷ ILC (in Planung): 250 Milliarden eV (299.792.152 m/s)

Die Tabelle zeigt: Obwohl die Elektronen beim ILC gegenüber denen in HERA die zehnfache Energie besitzen werden, wird sich die Geschwindigkeit nur um 0,08 Promille erhöhen. ILCs Elektronen wären dann aber auch schon mit 99,9999-prozentiger Lichtgeschwindigkeit unterwegs.

Nicht zuletzt deshalb interessieren sich Teilchenphysiker auch nicht sonderlich für die Geschwindigkeit ihrer Teilchen. Für sie zählt die Energie alleine; schließlich nennen sie ihre Disziplin auch „Hochenergiephysik“ und nicht „Hochgeschwindigkeitsphysik“.

B.18 Wer erfand die Atome? *

Das griechische Gelehrtengepann Leukipp von Milet und Demokrit von Abdera.

Der Überlieferung zufolge gingen Leukipp von Milet (im 5. Jahrhundert v. Chr.) und Demokrit von Abdera (ca. 460 bis 371 v. Chr.) als Erste davon aus, dass die Welt aus Unteilbarem zusammengesetzt sei. Das Unteilbare heißt auf Griechisch „atomos“ und kam für die beiden

in unterschiedlichster Form daher: Die einen Atome waren spitz und eckig, die anderen rund und gebogen.

Auch für die Verbindungen der Atome zu Größerem ließen sich Leukipp und Demokrit einiges einfallen: So bestanden harte Körper aus Atomen mit Haken und Ösen, in flüssigen Stoffen schmiegt sich die Atome sanft umeinander.

Aber die Atomidee hatte ihre Widersacher. Darunter auch einer der Größten der Antike: Aristoteles (384 v. Chr. bis 322 v. Chr.). Ihm behagten die Atome ganz und gar nicht und so stellte er ihnen die Elemente Wasser, Feuer, Luft und Erde als Urstoffe entgegen. Aristoteles Meinung sollte bis ins Mittelalter die vorherrschende bleiben.

Wer gab dem Photon seinen Namen? *

B.19

Der Amerikaner Gilbert N. Lewis.

Wir schreiben das Jahr 1926. Vor fünf Jahren erhielt Albert Einstein den Nobelpreis für die Erklärung des Photoeffekts. Er ging dabei davon aus, dass Licht seine Energie nur in Portionen abgeben oder aufnehmen kann. Diese Portionen nannte er „Lichtquanten“, den Namen „Photon“ benutzte er nicht.

Der fiel zum ersten Mal 1926, als der amerikanische Chemiker Gilbert N. Lewis in einem Brief an das Wissenschaftsmagazin Nature schrieb: „*I therefore take the liberty of proposing for this hypothetical new atom, which is not light but plays an essential part in every process of radiation, the name photon.*“ (“Ich nehme mir daher die Freiheit heraus, für dieses hypothetische, neue Atom, das nicht Licht ist und dennoch eine wichtige Rolle bei Strahlungsvorgängen spielt, den Namen Photon vorzuschlagen.“)

Wer ist „Higgs“? *

B.20

„Higgs“ zählt zu den Meistgesuchten in der Teilchenphysik. Dabei hält er sich die meiste Zeit in Schottland auf.

Das Higgs-Feld sei überall, heißt es. Und es Sorge für unsere Masse. Zwei Aussagen, für die es nur – wenn auch überzeugende – Indizien gibt. Doch Physiker suchten bisher vergeblich nach dem so genannten Higgs-Teilchen, durch das sich das Higgs-Feld verraten soll.

Dabei gibt es die Theorie zum Teilchen schon eine ganze Weile. Ende der 1960er Jahre zeigte der schottische Physiker Peter Higgs, wie man den Teilchen im Standardmodell eine Masse geben könne. Das war auch dringend nötig. Denn es gab da zwar eine schöne theoretische Beschreibung, wie die Teilchen miteinander wechselwirken. Diese funktionierte aber nur bei masselosen Teilchen. Higgs brachte durch seinen Trick wieder alles ins Lot.

Gefunden wurde das Teilchen aber noch nicht, so sehr sich die Forscher auch bemühen. Das Higgs sei selbst zu schwer, um mit heutigen Teilchenbeschleunigern gefunden zu werden, sagen Physiker und betonen ihre Zuversicht, dass das Teilchen spätestens mit der nächsten Teilchenbeschleuniger-Generation ins Rampenlicht geholt werde – ein Schicksal, das dann auch Peter Higgs gewiss wäre.

B.21 Wie alt ist die Quantentheorie? **

Über 100 Jahre.

Angefangen hatte alles im Jahr 1900. Damals setzte Max Planck den Quantengedanken zum ersten Mal auf die physikalische Tagesordnung. Er musste. Denn nur so gelang ihm eine Erklärung für die Strahlung, die von einem heißen Körper wie einer glühenden Herdplatte ausgesendet wird. Richtig wohl fühlte sich Max Planck bei der Vorstellung jedoch nie: Dass die Natur Sprünge mache und dass Energie nur in Paketen aufgenommen und abgegeben werden könne, behagte ihm nicht. Albert Einstein war da skrupelloser. Er griff 1905 die Idee von den Quanten auf, um den so genannten photoelektrischen Effekt zu erklären. Physiker um ihn herum rümpften damals noch ihre Nase aufgrund dieses Wagemuts.

Richtige Quantentheorien kamen jedoch erst in den 1920er Jahren auf. Damals formulierten Erwin Schrödinger und Werner Heisenberg die Mechanik (jener Teil der Physik, der sich mit der Bewegung von Körpern beschäftigt) im Sinne der Quanten neu. Das Ergebnis ist die Quantenmechanik.

Im Laufe der Zeit wurde dann auch die Elektrodynamik (jener Teil der Physik, der sich mit elektromagnetischen Phänomenen beschäftigt) quantenformuliert und die spezielle Relativitätstheorie mit eingebaut. Einer der Höhepunkte dieser Entwicklung ist das Standardmodell der Teilchenphysik, in dem ein Großteil aller Quantenerkenntnisse zusammengefasst sind.

Wie flott sind Sie bei einer Bewegungsenergie von 250 Milliarden Elektronenvolt? *

B.22

Schlappe 12 Zentimeter pro Stunde.

Beim zukünftigen Linearbeschleuniger ILC sollen Elektronen mit jeweils rund 250 Milliarden Elektronenvolt unterwegs sein. Klingt nach viel, wäre auch Weltrekord. Doch wenn Sie selbst diese Energie hätten, wären Sie mit enttäuschend schlappen 12 Zentimetern pro Stunde unterwegs.

Dies ist die Geschwindigkeit einer Masse von 70 Kilogramm mit einer Bewegungsenergie von 250 Milliarden Elektronenvolt. Jede Nacktschnecke hält da locker mit.

Sind Teilchenphysiker also Hochstapler? Oder haben sie sich einfach verrechnet? Mitnichten! Denn in Ihrem Körper ist die Energie auf Milliarden Milliarden Elektronen verteilt. In Teilchenbeschleunigern hingegen ist die Energie auf ein einzelnes Teilchen konzentriert. Damit erreichen die Forscher beim Zusammenstoß dieser Teilchen einen Zustand, wie er in den ersten Momenten des Universums herrschte.

Wie heißt der weltweit größte Beschleuniger? *

B.23

LHC.

Der größte Teilchenbeschleuniger, den Physiker bisher gebaut haben, heißt LEP bei Genf. Oder besser: hieß. Denn im November 2000 wurde der 27 Kilometer lange Beschleuniger stillgelegt. Mehr als zehn Jahre lang drehten hier Elektronen und deren Antiteilchen, die Positronen, ihre Runden. Dabei konnte das Standardmodell der Teilchenphysik auf Herz und Nieren untersucht werden.

Mittlerweile wurden Beschleuniger und die Teilchendetektoren demonstert und mit der Tunnel mit neuer Technik gefüllt: Ab 2007 sind es dann Protonen, die die Physiker aufeinanderprallen lassen – im LHC, dem *Large Hadron Collider*. Der LHC wird nicht nur der weltweit längste Beschleuniger sein, sondern auch der mit der höchsten Energie.

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

Etwas mehr als acht Minuten.

Licht braucht eben auch seine Zeit. Schließlich legt es „nur“ 299.792,458 Kilometer in der Sekunde zurück.

Und weil im Weltall das Licht immer diese Geschwindigkeit hat, werden astronomische Entfernungen auch in Zeiteinheiten gemessen. Die bekannteste Einheit nach diesem Prinzip ist das Lichtjahr (rund 9 Billionen Kilometer). Die Sonne ist demnach acht Lichtminuten (rund 150 Millionen Kilometer) von der Erde entfernt. Würde sie in diesem Augenblick erlöschen, so ginge bei uns das Licht erst in acht Minuten aus.

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

Das wüssten Neutrinophysiker auch gerne. Nur eines scheint gewiss: Neutrinos wiegen etwas, aber nicht viel.

Die genaue Masse der Neutrinos hat man noch nicht bestimmt. Denn Neutrinos sind ebenso häufig wie zurückhaltend: So durchdringen zwar jede Sekunde 60 Milliarden Neutrinos jeden Quadratzentimeter Ihres Körpers, aber die Teilchen reagieren so schwach mit Materie, dass im Schnitt erst ein Bleiblock von 100 Lichtjahren Länge ausreicht, um die Teilchen einzufangen. Das macht Neutrinoexperimente äußerst schwierig. Die Neutrinomasse blieb daher lange im Dunklen.

Als Wolfgang Pauli die Existenz der Neutrinos 1930 vorhersagte, dachte er noch an eine Masse in der Nähe der des Elektrons. Aber schon bald mehrten sich die Vermutungen, dass das Neutrino vielleicht masselos sei. Und so ging das Standardmodell der Teilchenphysik lange von masselosen Neutrinos aus. Aber das ist falsch.

Denn neueste Ergebnisse am Sudbury-Neutrino-Observatorium in Kanada haben nun ergeben, dass Neutrinos nicht masselos sind. Schätzungen zeigen aber, dass sie über 50.000-mal leichter sind als Elektronen.

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

„kwork“ oder „kwark“?

Als wäre es nicht schon kompliziert genug, sich die subatomaren Teilchen überhaupt vorzustellen, sorgt schon die Aussprache ihrer Namen für Kopfzerbrechen: „kwork“ oder „kwark“? Das ist hier die Frage. Vermeintlich eine Frage zwischen Englisch und Deutsch. Doch auch die Anglo-Amerikaner unterliegen prinzipiell der Qual der Wahl.

Einer sollte es genau wissen, der Benenner selbst. Und so schreibt der Teilchentheoretiker Murray Gell-Mann in seinem Buch „Das Quark und der Jaguar“, dass ihm bei der Teilchentaufe zunächst der Klang des Wortes in den Sinn gekommen sei. Und dieser Klang entsprach „kwork“.

Erst danach sei er bei einem seiner „gelegentlichen Streifzüge“ durch den Roman „Finnegans Wake“ des Schriftstellers James Joyce auf das Wort „quark“ gestolpert. Der Satz hieß „Three quarks for Muster Mark“.

„quark“ stand nun aber nicht im Einklang zu „kwork“. Denn „quark“ wird hier eindeutig als Reimwort zu „Mark“ verwendet und müsste daher wie das deutsche Milchprodukt ausgesprochen werden.

Eine Brücke musste her, und die fand Gell-Mann im Alkohol. So beschreibt der Roman „Finnegans Wake“, auf den sich Gell-Mann bezieht, den Traum eines Gastwirts mit Namen Humphrey Chimpden Earwicker. Wer nun wie Earwicker den Großteil seiner Zeit hinter der Bar verweilt, träumt auch nachts davon. Joyce lässt daher in seinem Roman immer wieder Sätze auftauchen, die mit der Bestellung von Getränken zusammenhängen. Wer nun von Earwicker „Three *quarts* for Muster Mark“ fordert, muss damit rechnen, drei Biere zu bekommen. Und hier ist die Lösung: Zum einen wird das „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 Masse-messen gar mit einem Goldatom aufnehmen.

Wie viel wiegt ein Elektron? *

B.29

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 9 Kilogramm.

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 9 Kilogramm oder in der mit Nullen geizenden wissenschaftlichen Schreibweise: 9×10^{-31} Kilogramm. Damit zählen Elektronen zu den leichtesten Teilchen, die das Standardmodell zu bieten hat: 2.000-mal leichter als ein Wasserstoffatom, das Atom mit der geringsten Masse. Nur Neutrinos wiegen noch weniger.

Nach der speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein entsprechen sich Masse und Energie eines ruhenden Teilchens. Ein Elektron gewinnt dann an Masse, wenn man es auf hohe Energien beschleunigt. Aus diesem Grund waren die Elektronen in DESYs Beschleuniger HERA am Ende 60.000-Mal so schwer wie in Ruhe. Sie wogen dann mehr als ein Schwefelatom.

Wie weit ist ein Quantensprung? **

B.30

Ganz schön kurz.

Zu den Quantensprüngen zählen die kleinsten Veränderungen, die ein physikalisches System durchmachen kann. Nehmen wir als Beispiel ein

Atom: Dort umkreisen Elektronen einen Kern, was aber nicht auf beliebigen Bahnen erfolgen kann. Vielmehr stehen den Elektronen nur bestimmte Möglichkeiten zur Verfügung. Zwischen diesen Möglichkeiten gibt es verbotene Zonen. Die sind für die Elektronen Tabu.

Wenn ein Elektron nun seine Bahn ändert – zum Beispiel weil sein Atom durch Lichteinstrahlung Energie gewonnen hat, muss das Teilchen auf eine andere Bahn springen. Denn in der Tabuzone dazwischen darf es sich ja nicht aufhalten.

Ein solcher Quantensprung ist damit der kleinste Sprung, den das Elektron machen kann. Mit großen Schritten hat er nicht viel zu tun. Wenn Ihnen also demnächst jemand etwas von einem Quantensprung in einer politischen Verhandlung oder bei der Neuentwicklung eines Produkts erzählen will, seien Sie auf der Hut! Vielleicht weiß er, wie klein ein Quantensprung sein kann.

Wie weit schaffte es ein Elektron im Beschleuniger HERA? *

B.31

Einmal bis zur Grenze des Sonnensystems und zurück – wenn es geradeaus flöge, anstatt in DESYs Beschleuniger HERA Runde um Runde zu kreisen.

Im Tunnel des Ringbeschleunigers HERA waren Elektronen fast mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs. Bei einer durchschnittlichen Verweildauer von zehn Stunden legten sie knapp elf Milliarden Kilometer zurück. 10.792.428.228, um genau zu sein. Nach etwa zehn Stunden entledigen sich die Beschleunigerphysiker der Elektronen: der Teilchenstrahl war dann nach etlichen Zusammenstößen mit anderen Teilchen zu schlecht für gute Forschung geworden.

In den zehn Stunden seines HERA-Daseins hätte das Elektron auch dem gut fünf Milliarden Kilometer entfernten Planeten Pluto einen Besuch abstatten können. Aber von solchen Ausflügen konnte es in HERA nur träumen: Magnetfelder sorgten dafür, dass aus dem 6,3 Kilometer langen Tunnel kein Entrinnen ist.

Wofür bekam Albert Einstein den Nobelpreis? *

B.32

Nicht für seine Relativitätstheorie, sondern für seine frühen Beiträge zur Quantentheorie.

1905 griff Albert Einstein die Idee des deutschen Physikers Max Planck auf, nach der Licht Energie nur in Portionen – den so genannten Quanten – abgeben und aufnehmen könne. Mit diesem Ansatz gelang es Einstein, den „Photoeffekt“ zu erklären.

In der Nobelpreisbegründung von 1921 heißt es dann auch: „für seine Dienste in der theoretischen Physik, vor allem für die Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effektes“.

Woher stammt der Name „Quark“? *

B.33

Aus dem Roman „Finnegan’s Wake“ von James Joyce.

Der Name dieser Elementarteilchen geht auf den Physiker Murray Gell-Mann zurück. Er bezieht sich dabei auf eine Zeile aus dem Roman „Finnegan’s Wake“ von James Joyce. Dort heißt es „Three quarks for Muster Mark“. Wahrscheinlich sind damit drei Biere gemeint. So ganz klar wird das jedoch nicht. Denn der Roman wird dem eher unverständlichen Genre zugerechnet.

Im selben Jahr wie Gell-Mann hatte auch der amerikanische Physiker George Zweig entdeckt, dass mit weiteren subnuklearen Teilchen Ordnung in das Teilchenchaos gebracht werden könnte. Er taufte diese Objekte Asse (aces). „KworkQuark“ bedankt sich beim Lauf der Zeit für seinen Namen und fände die Bezeichnung „ÄisAss“ sehr gewöhnungsbedürftig.

Wo wurde das Gluon entdeckt? *

B.34

Bei DESY in Hamburg.

Im Jahr 1979 nahm der 2,3 Kilometer lange Beschleuniger PETRA bei DESY seinen Betrieb auf. Schon bald zeigten sich Mercedes-Sterne auf den Bildschirmen der Physiker. Dabei handelte es sich um drei gebündelte Teilchenstrahlen, von den Physikern „Jets“ genannt.

Die Erklärung der Physiker für diese Mercedes-Sterne: Einer der drei Jets stammt von einem Gluon, die beiden anderen von jeweils einem

Quark. Damit war bei PETRA die erste Sichtung der Gluonen gelungen, der Wechselwirkungsteilchen der starken Kraft.