

47 Teilchenphysik und Standardmodell

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand Oktober 2012)

Spin, Fermionen und Bosonen

A1 Herbert Pietschmann schreibt in seinem Buch „Geschichten zur Teilchenphysik“ (Ibera 2007, S. 85) folgendes: „In der Quantenwelt haben wir oft keine Wahl. Entweder wir machen uns gar keine Vorstellungen (was für optische Menschen schwierig ist), oder unsere Vorstellungen sind falsch. Der einzige Ausweg ist, sich eine falsche Vorstellung zu machen und immer dazu zu denken, wo sie falsch ist.“ Wende dieses Zitat auf den Elektronenspin an.

A2 Wie beeinflusst das Pauli-Verbot den Schalenbau der Atome? Warum verleiht es den Elementen ihre chemischen Eigenschaften?

A3 Erkläre, wie die Zacken in Abb. 1 zu Stande kommen! Warum steigt die Höhe der Zacken immer mehr an? Warum sinkt der Durchmesser der Atome zwischen den Zacken jedoch wieder ab? Warum hat etwa Helium einen kleineren Durchmesser als Wasserstoff?

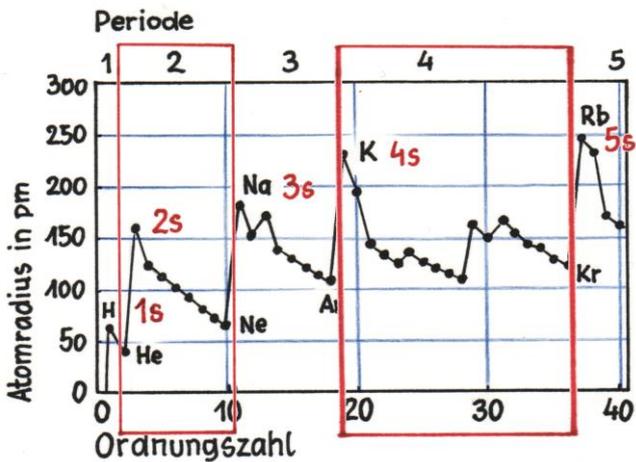


Abb. 1: Ordnungszahl und Atomgröße der Elemente (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 34.24, S. 74, BB7).

A4 Was würde mit Licht passieren, wenn Photonen ebenfalls Fermionen wären (natürlich kann das niemals passieren)? Hilf dir mit Tab. 1!

Fermionen	Bosonen
Für diese gilt das Pauli-Verbot. Sie sind nach dem italienischen Physiker ENRICO FERMI benannt.	Für diese gilt das Pauli-Verbot nicht. Sie sind nach dem indischen Physiker SATYENDRA NATH BOSE benannt.
Elektron, Spin $\frac{1}{2}$ Proton, Spin $\frac{1}{2}$ Neutron, Spin $\frac{1}{2}$	Photon, Spin 1

Tabelle 1: Die prominentesten Fermionen und Bosonen.

A5 Sind Hadronen Fermionen oder Bosonen? Sieh nach in Abb. 2 und stelle eine Verbindung zum Large Hadron Collider (LHC) her!

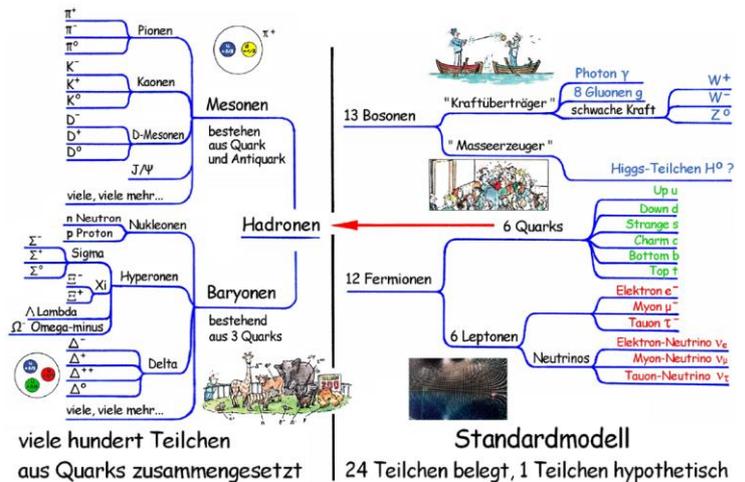


Abb. 2: Überblick über den Teilchenzoo (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.42, S. 89).

A6 Welche Probleme werden bei der technischen Umsetzung eines Lichtschwerts auftreten? Überlege weiters, was an dem folgenden Zitat aus Wikipedia "problematisch" ist: "Da die Jedi traditionell nur das Lichtschwert als Waffe benutzen, in einer Welt die hauptsächlich von Schusswaffen regiert wird, mussten sie ihre übernatürlichen Fähigkeiten soweit schulen, dass sie die Schüsse dieser Waffen ablenken oder zurückwerfen konnten."



Abb. 3 (Foto: RandomDan; Quelle: Wikipedia)

Leptonen und Quarks

A7 Dein eigener Körper und alles, was dich auf der Welt umgibt, setzt sich aus nur drei Elementarteilchen zusammen. Welche sind das?

A8 Lange Zeit war nicht klar, ob sich Neutrinos (siehe Kap. 48.2.1) mit Lichtgeschwindigkeit bewegen oder nicht. Dann entdeckte man, dass sich Neutrinos ineinander umwandeln können. Zum Beispiel kann sich ein Elektron-Neutrino, das von der Sonne kommt, auf dem Flug zur Erde in ein Myon-Neutrino umwandeln. Damit war klar, dass sich Neutrinos *nicht* mit c bewegen können. Warum? Verwende die Gleichung $t_b = t_r \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ aus der SRT (siehe Kap. 38.2, BB8).

A9 Im Jahr 2011 wurde im Rahmen des OPERA-Experimentes scheinbar gemessen, dass sich Neutrinos etwas schneller als das Licht bewegen. Später konnte dieses Ergebnis jedoch auf einen Messfehler zurückgeführt werden - Neutrinos sind *nicht* überlichtschnell! Auf jeden Fall kursierten im Internet nach der vermeintlichen Entdeckung jede Menge Neutrinowitze, unter anderem auch die folgenden zwei:

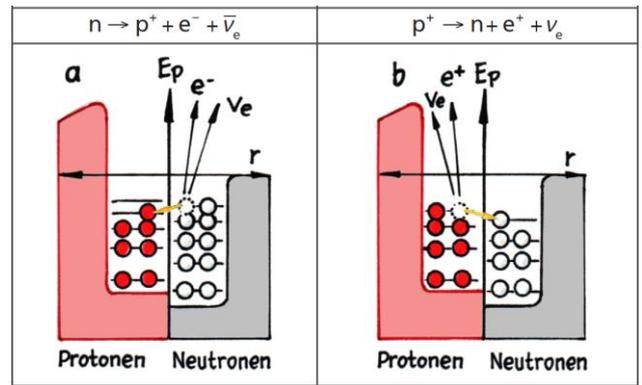
"Neutrino!" - "Wer ist da?" - "Toc, toc."

"Um auf die andere Seite zu kommen! Warum überqueren Neutrinos die Straße?"

Worauf spielen diese beiden Witze an?

A10 Wenn im Kern zu viele Neutronen oder Protonen sind, kommt es zum β -Zerfall. Dabei kann man zwei Fälle unterscheiden: Ein Neutron kann in ein Proton, ein Elektron und in eine Anti-Elektronneutrino zerfallen (siehe Tab. 2a). Ein Proton kann in ein Neutron, ein Positron (Anti-Elektron) und ein Elektronneutrino zerfallen (siehe Tab. 5b).

Ein einzelnes Neutron, also eines, das sich nicht in einem Kern befindet, kann ebenfalls so wie in Fall a zerfallen. Ein einzelnes Proton kann jedoch *nicht* so wie in Fall b zerfallen. Diesen Zerfall gibt es nur in Atomkernen. Warum? Hilf dir mit Tabelle 3. Die Neutrinomasse liegt im Bereich von 10^{-36} kg.



Tab. 2: Schematische Darstellung von β -Zerfall (a) und β^+ -Zerfall (b). Die Kernenergie sinkt, weil das zerfallende Nukleon auf ein niedrigeres Niveau springt (siehe auch Abb. 45.7, S. 60).

Teilchen	Masse in kg	Ladung	relative Masse
Neutron (n)	$1,675 \cdot 10^{-27}$	neutral	1838,7
Proton (p^+)	$1,673 \cdot 10^{-27}$	plus	1836,2
Elektron (e^-)	$9,109 \cdot 10^{-31}$	minus	1

Tab. 3

A11 Wenn Protonen ein bisschen schwerer wären als Neutronen (also genau umgekehrt, als es tatsächlich ist), dann könntest du diese Zeilen nicht lesen. Warum? Die Antwort ist etwas komplexer und hat mit dem gesamten Universum zu tun. Überlege mit Hilfe von A10.

A12 Beim radioaktiven Zerfall eines bestimmten Isotops wird immer *exakt dieselbe Energiemenge* frei. Deshalb müssen die Bewegungsenergie und auch die Geschwindigkeit des ausgesendeten Teilchens immer gleich groß sein. Bei α -Teilchen ist das auch so (Abb. 4a). Bei β -Teilchen ist aber die gemessene Geschwindigkeit fast immer geringer als die erwartete (b). Aber wo gehen Impuls und somit auch Energie "verloren"? Hilf dir mit Tab. 2.

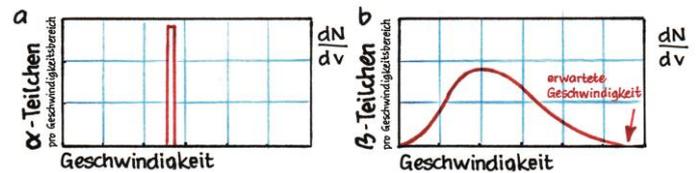


Abb. 4: Geschwindigkeit von α - und β -Teilchen. Die β -Teilchen verletzen scheinbar den Energiesatz (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.9, S. 77).

A13 Du stehst an einem wunderschönen Abend in der Natur und beobachtest den Sonnenuntergang. Du hast aber keine romantischen Gefühle und schätzt lieber ab, wie viele Son-

nenneutrinos jede Sekunde pro cm^2 durch deinen Körper fliegen. Gehe dazu folgendermaßen vor:

a Die Sonne hat eine Leistung von $3,9 \cdot 10^{26}$ W. Die Proton-Proton-Reaktion in Abb. 17 macht rund 90 % der Fusionsvorgänge in der Sonne aus. Gehe vereinfacht von 100 % aus. Bei dieser Reaktion werden (inklusive der Zerstrahlung der Positronen e^+) in Summe $4,2 \cdot 10^{-12}$ J an Energie freigesetzt. Wie viele solcher Reaktionen müssen daher pro Sekunde in der Sonne ablaufen? Wie viele Neutrinos (ν_e) werden dabei freigesetzt?

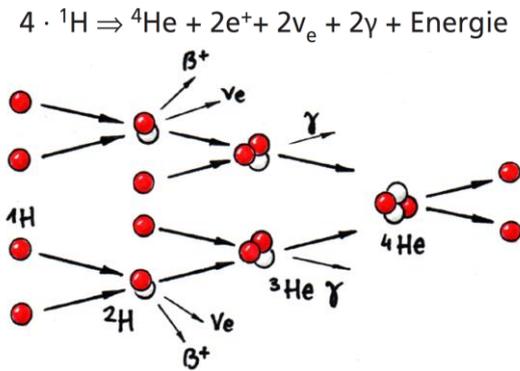


Abb. 5: Die Proton-Proton-Reaktion, die in unserer Sonne über 90 % der freigesetzten Energie ausmacht (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 46.15, S. 71).

b Der Abstand Erde-Sonne beträgt etwa 150 Milliarden Meter. Schätze ab, wie viele Neutrinos pro Sekunde auf der Erde durch einen Quadratzentimeter Fläche fliegen, der normal zur Achse Erde-Sonne steht. Diese Anzahl fliegt daher auch durch jeden Quadratzentimeter deines Körpers.

A14 Auf failbook.failblog.org findet man diverse Neutrino-witze (siehe auch A9). Welchen physikalischen Hintergrund haben die beiden folgenden?

a A neutrino saunters up to the bar and orders a drink. "How much?" he asks. The bartender says: "For you, no charge".

b A neutrino walks into a bar. The bartender says: "We don't serve your kind here". The neutrino says: "I'm just passing through."

A15 Mit dem Super-Kamiokande kann man die Richtung bestimmen, aus der die Neutrinos kommen (siehe Abb. 6). Warum ist das wichtig?

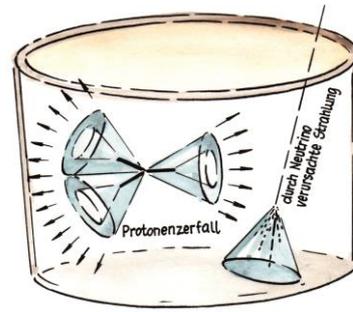


Abb. 6: Ein "eingefangenes" Neutrino (links) erzeugt einen Strahlungskegel, der einen Rückschluss auf die Flugrichtung zulässt. Rechts sieht man einen hypothetischen Protonenzerfall (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.30, S. 85).

A16 Im Jahr 1959 wurde am CERN ein berühmtes Experimente zur Zeitdilatation durchgeführt (Abb. 7). Zur Messung wurden Myonen verwendet. Diese Elementarteilchen sind salopp gesagt schwere Elektronen, die allerdings instabil sind und in Ruhe mit einer Halbwertszeit von etwa $1,5 \mu\text{s}$ zerfallen. Berechne mit Hilfe der Abbildung, auf welche Geschwindigkeit die Myonen beschleunigt wurden. Verwende dazu die Gleichung für die Zeitdilatation aus A8.

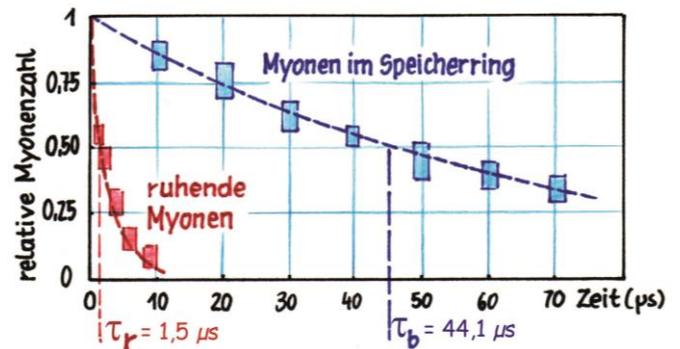
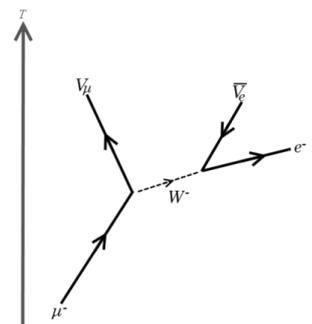


Abb. 7 zu A14: Zerfallskurve von ruhenden Myonen und von Myonen im Speicherring des CERN (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 40.12, S. 20).

A17 Was ist in dem Feynman-Diagramm in Abb. 8 dargestellt? Schreibe die Gleichung dazu auf!

Abb. 8 zu A18 (Quelle: Wikipedia)



A18 Freie Myonen sind instabil und zerfallen. Dabei gibt es drei Möglichkeiten. Meistens läuft der Zerfall so ab (siehe A17): $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$.

Zusätzlich kann beim Zerfall mit einer Wahrscheinlichkeit von 1,4 % noch Gammastrahlung entstehen

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e + \gamma$$

oder mit einer Wahrscheinlichkeit von $3,4 \cdot 10^{-5}$ ein Elektron-Positron-Paar

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^+ + e^-.$$

Wenn Myonen also zerfallen können, warum kann man dann davon sprechen, dass sie elementar sind?

A19 Durch die kosmische Strahlung entstehen etwa 10 km über der Erdoberfläche Myonen. Sie haben eine Halbwertszeit (τ) von rund $1,5 \mu\text{s}$ (siehe auch A16) und eine Geschwindigkeit von etwa $0,995 c$. Welcher Teil der Myonen könnte die Erdoberfläche erreichen, wenn die SRT nicht gälte? Welcher Teil erreicht sie tatsächlich? Verwende für den Zerfall der Myonen die Gleichung $N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{\tau}}$. Die Lichtgeschwindigkeit beträgt etwa $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

A20 a Rechne die Masse eines Protons ($1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) in MeV/c^2 um. c beträgt etwa $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ und 1 eV entspricht $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

A20 b Was bedeutet der Begriff Leptonen? Warum ist er aus heutiger Sicht nicht sehr glücklich gewählt? Argumentiere mit Hilfe von Tab. 4 und dem Ergebnis von A20 a!

tivitätstheorie. Gib das Ergebnis in Elektronvolt an ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Das Planck'sche Wirkungsquantum hat den Wert $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

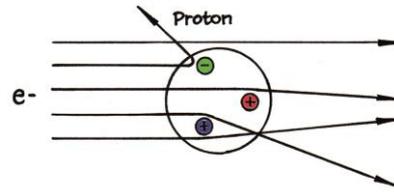


Abb. 9: In Streuexperimenten konnte man 1969 die innere Struktur von Protonen belegen (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 48.12, S. 76, BB8).

A22 In Abb. 10 siehst du, aus welchen Quarks ein Proton besteht. Welche Masse müsste ein Proton daher besitzen? Welche besitzt es tatsächlich? Hilf dir mit Tab. 5 und der Antwort auf A20 a. Wie kann man die Diskrepanz erklären?

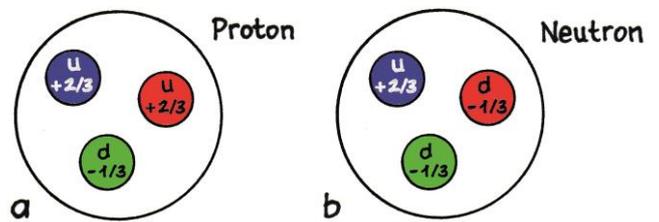


Abb. 10: Protonen und Neutronen sind keine Elementarteilchen, sondern setzen sich aus drei Quarks zusammen (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 48.11, S. 75, BB8).

Leptonen, Spin 1/2					
Name	Ladung	entdeckt	Ruhemasse MeV/c^2	mittlere Lebensdauer in s	
Elektron e^-	-1	1897	0,511	stabil	normale Materie
Elektron-Neutrino ν_e	0	1956	$< 0,46 \cdot 10^{-4}$	stabil	
Myon μ^-	-1	1937	106	$2,2 \cdot 10^{-6}$	Materie in höherem Energiezustand
Myon-Neutrino ν_μ	0	1962	< 5	stabil	
Tauon τ^-	-1	1974	1777	$3,4 \cdot 10^{-13}$	
Tauon-Neutrino ν_τ	0	2000	< 164	stabil	

Tab. 4: Überblick über die Leptonen. Neutrinos sind stabil, können aber oszillieren (siehe auch Tab. 47.3, S. 76).

Quarks, Spin 1/2					
„Geschmack“	Ladung	entdeckt	Ruhemasse MeV/c^2		
Up u	+2/3	≈ 1970	3	normale Materie	
Down d	-1/3	≈ 1970	6		
Strange s	-1/3	≈ 1970	105	Materie in höherem Energiezustand	
Charm c	+2/3	1974	1200		
Bottom b	-1/3	1977	4250		
Top t	+2/3	1995	171000		

Tab. 5: Überblick über die Quarks (siehe auch Tab. 47.4, S. 78).

A21 In Streuexperimenten konnte man 1969 in Stanford die innere Struktur von Protonen belegen (siehe Abb. 9). Quarks verhalten sich wie punkartige geladene Teilchen. Welche Energie ist notwendig, um Strukturen in der Größe eines Zehntel Protonendurchmessers zu untersuchen (10^{-16} m)? Verwende die Gleichungen $\lambda = h/p$ und $E = p \cdot c$. Die zweite Gleichung, die einen Zusammenhang zwischen Energie und Impuls eines Teilchens angibt, folgt aus der Speziellen Relativitätstheorie.

A23 Die Folge "In der Hand von Terroristen" aus der Serie Star Trek wird auf de.memory-alpha.org folgendermaßen beschrieben:

"Die Enterprise dockt an der Remmler-Phalanx an, um eine überfällige Säuberung des Schiffes von Baryon-Partikeln durchführen zu lassen. Diese entstehen durch den Warp Kern und sind eine normale Begleiterscheinung der Funktionen eines Raumschiffs. Allerdings ist der eingesetzte Baryonenstrahl viel stärker als üblich, denn durch die vielen Reisen, die die Enterprise als Flaggschiff der Sternenflotte unternimmt, haben sich auch mehr Baryonen an Bord des Schiffes angesammelt. Die Besatzung der Enterprise wird aus diesem Grund auf den Planeten Arkaria evakuiert, in dessen Orbit sich die Remmler-Phalanx befindet."

Was ist zu dieser Handlung zu sagen? Überlege dir dazu, woraus Baryonen bestehen und welches die "prominentesten" sind (siehe Abb. 2).

A24 In Abb. 11 siehst du, woraus nach heutiger Sicht das Universum besteht. Was könnte mit "Dunkler baryonischer Materie" und "Dunkler nichtbaryonischer Materie" gemeint sein? Hilf dir auch mit der Antwort auf A23!

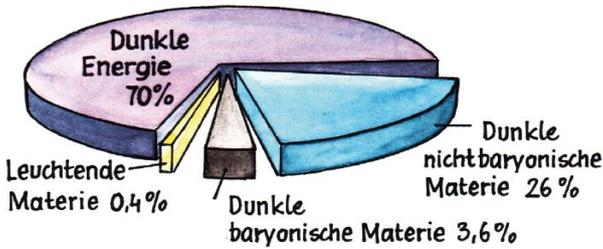


Abb. 11: Woraus aus heutiger Sicht das Universum besteht. Nur der mickrige Anteil von 0,4 % zeigt sich uns in Form von Sternen und Galaxien (Grafik: Janosch Slama; siehe Abb. 49.29, S. 109).

A25 Wenn ein Teilchen keine Eigenschaften besitzt, die ein Vorzeichen tragen, dann ist es sein eigenes Antiteilchen. Das prominenteste Beispiel ist das Photon, das sein eigenes Antiteilchen ist. Das Neutron hat ebenfalls keine Ladung. Ist das Neutron sein eigenes Antiteilchen? Hilf dir mit Abb. 12.

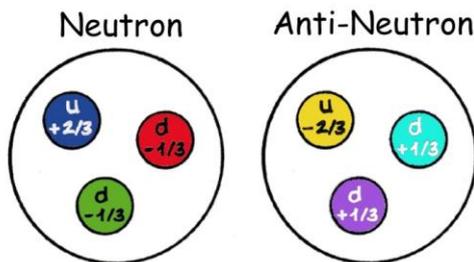


Abb. 12 (Grafik: Janosch Slama und Martin Apolin)

A26 Nach dem Urknall sind gleich viel Teilchen und Antiteilchen entstanden. Heute sind nur mehr die Teilchen übrig. Es ist nicht geklärt, wie es zur Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie gekommen ist. Aber eines ist klar: Es muss sie gegeben haben, sonst würdest du nicht hier sitzen! Dann hätten sich nämlich Teilchen und Antiteilchen wieder komplett zerstrahlt. Einen möglichen Ansatz liefert die GUT (Grand Unified Theory, Kap. 48.3). In einigen Varianten der GUT kommen X-Bosonen vor. In Abb. 13 siehst du ein Modell, das erklären könnte, warum die Antiteilchen nach und nach verschwunden sind. Wie wäre das abgelaufen?

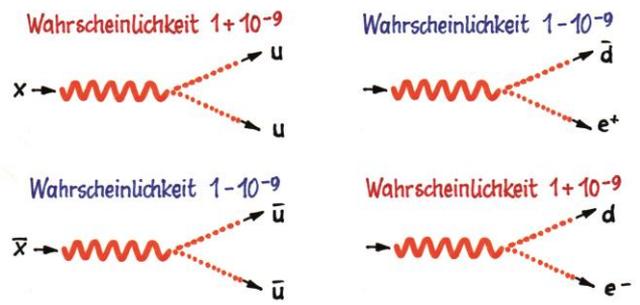


Abb. 13 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 49.20, S. 105)

Wechselwirkungsteilchen

A27 Welche Wechselwirkungen sind in Abb. 14 dargestellt?

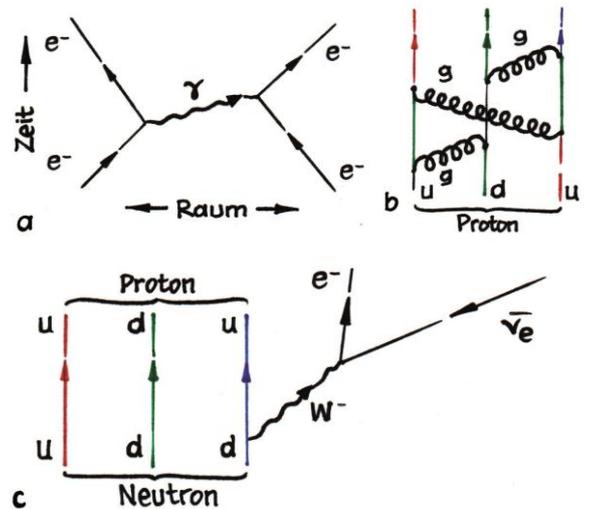


Abb. 14 zu A27 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.19, S. 81).

A28 a Schätze allgemein die maximale Reichweite Δs von virtuellen Teilchen anhand ihrer Masse ab. Verwende dazu die Gleichungen $\Delta E = mc^2$ und $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{13}$.

A28 b Die schwache Wechselwirkung wird durch virtuelle W^+ , W^- und Z^0 -Bosonen vermittelt. Sie beträgt nur rund 10^{-18} m. Schätze mit Hilfe der Formel aus A28 a ihre Masse in kg ab und vergleiche sie mit der Masse von Protonen ($1,7 \cdot 10^{-27}$ kg).

A28 c Rechne die Masse der Bosonen der schwachen Wechselwirkung in GeV/c^2 um (siehe A20 a).

A29 Wie kann das Higgs-Teilchen eine Masse haben, wenn es doch für die Erzeugung der Masse verantwortlich sein soll?

A30 Warum ist es nicht möglich, freie Quarks zu beobachten? Erkläre mit Hilfe von Abb. 15.

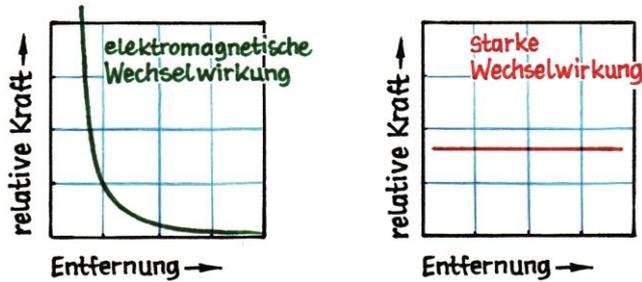


Abb. 15 zu A30 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.20, S. 82).

Vereinheitlichung von Kräften

A31 Welche Kräfte wurden als Erste vereinheitlicht? Und was kann man sich darunter vorstellen? Verwende für deine Antwort Abb. 16.

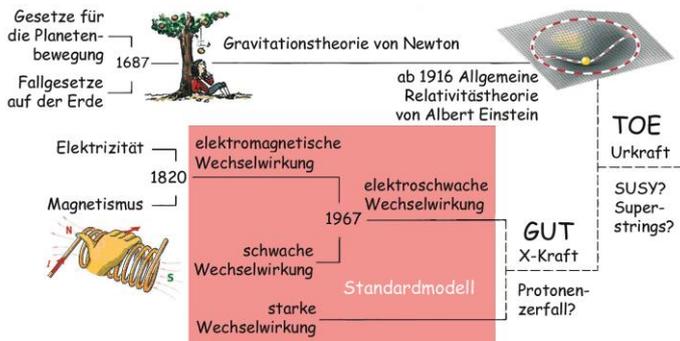


Abb. 16: Bereits erfolgte und vielleicht erfolgende Vereinheitlichungen der Kräfte. Der farbig markierte Bereich wird durch das Standardmodell beschrieben. Die Grand Unified Theory (GUT) und die Theory Of Everything sind noch Zukunftsmusik (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.27, S. 84).

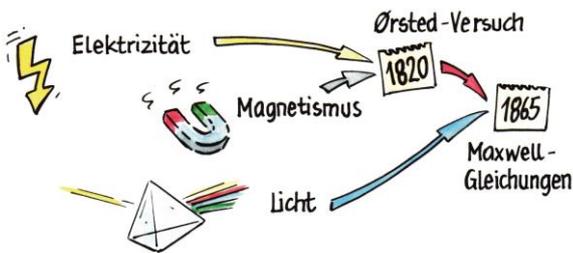


Abb. 17 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 28.10, S. 17, BB7).

A32 In manchen Physikbüchern gibt es kein Kapitel „Optik“, obwohl die Physik des Lichts sehr wohl besprochen wird. Unter welchem Kapitel muss man in diesem Fall nachschlagen? Überlege weiters, welcher Zusammenhang zwischen den Abb. 16 und 17 besteht.

A33 a Ein einzelnes Proton kann *nicht* gemäß der Gleichung $p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ zerfallen, weil die Zerfallsprodukte eine grö-

ßere Masse hätten (siehe A10). In einigen Varianten der Großen Vereinheitlichten Theorie (GUT) wird aber ein Protonenzerfall eines einzelnen Protons vorhergesagt, der neben zahlreichen anderen Arten so ablaufen könnte: $p \rightarrow e^+ + \pi^0$. Überprüfe mit Hilfe von Tabelle 4 und dem Ergebnis von A20 a, warum diese Reaktion rein theoretisch ablaufen kann. Ein π^0 hat eine Masse von $135 \text{ MeV}/c^2$.

A33 b Wieso kann ein einzelnes Proton nicht im Rahmen des Standardmodells wie in A33 a in ein Positron und ein Pion zerfallen? Sieh dir dazu Tab. 6 und die Legende an!

	B	L
p	1	0
n	1	0
e^-	0	1
ν_e, ν_μ, ν_τ	0	1
π^+, π^0, π^-	0	0

Tab. 6: Baryonenzahl B und Leptonenzahl L sind Quantenzahlen der Elementarteilchen. Nach dem Standardmodell ist die Baryonen- und Leptonenzahl eine absolute Erhaltungsgröße. Bei Antiteilchen haben B und L negative Vorzeichen.

A33 c Wenn im Rahmen der GUT sogar ein Proton zerfallen kann, kann dann auch ein Elektron zerfallen? Hilf dir mit Tab. 4, 5 und 7 und mit Abb. 2.

Wechselwirkung	Austauschteilchen	Reichweite in m	Masse in GeV/c^2	relative Stärke	Spin	betroffene Teilchen
starke	8 Gluonen	10^{-15}	0	1	1	Quarks
elektromagnetische	Photon	∞	0	10^{-2}	1	geladene Teilchen
schwache	W^+, W^-, Z^0	10^{-18}	$W^\pm 80,4$ $Z^0 91,2$	10^{-15}	1	Quarks und Leptonen
gravitative	Graviton	∞	0	10^{-38}	2	alle

Tab. 7: Die fundamentalen Wechselwirkungen und ihre Austauschteilchen. Die Gravitation wird nicht durch das Standardmodell beschrieben.

A34 Wie ist es möglich, drei Kräfte in einer GUT zu vereinigen, wenn diese doch so unterschiedlich große Stärken aufweisen (siehe Tab. 7)?

Teilchenbeschleuniger

A35 Im Large Hadron Collider (Abb. 18). lässt man unter anderem Protonen aufeinander prallen und untersucht die dabei neu entstandenen Teilchen.

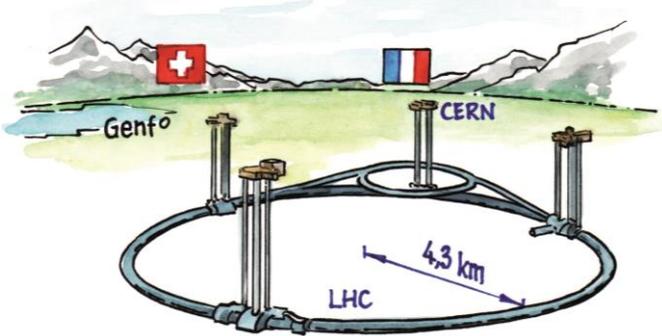


Abb. 18: Der größte Teilchenbeschleuniger der Welt an der Grenze zwischen der Schweiz und Frankreich (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 26.11, S. 106, BB6).

a Forme zunächst die Lorentz-Kraft $F_L = I \cdot s \cdot B$ (Kap. 31.2, BB7) für einzelne Ladungen um, sodass du nicht Stromstärke und Leiterlänge, sondern Ladung und Geschwindigkeit einsetzen kannst. Verwende dabei die Formeln $I = Q/t$ und $v = s \cdot t$.

b Damit das Teilchen auf einer Kreisbahn bleibt, muss die Lorentz-Kraft als Zentripetalkraft (Kap. 11.6, BB5) wirken. Die Formel für die Zentripetalkraft lautet $F_z = \frac{mv^2}{r}$. Setze beide Gleichungen gleich und berechne allgemein die benötigte magnetische Induktion für das Aufrechterhalten einer bestimmten Kreisbahn. Verwende dazu dein Ergebnis aus A5 a.

c Berechne, wie groß die magnetische Induktion sein muss, um die Protonen im LHC auf ihrer Kreisbahn zu halten. Verwende dazu Abb. 18, Tab. 3 und das Ergebnis aus A35 b. Der Wert der Elementarladung beträgt $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Nimm an, dass sich die Protonen mit $0,999999991 c$ bewegen ($c =$ Lichtgeschwindigkeit). Bei dieser Geschwindigkeit erfahren die Protonen eine relativistische Massenzunahme (Kap. 41.1) um den Faktor 7454!

d Vergleiche den berechneten Wert der magnetischen Feldstärke der Magneten im LHC mit der Stärke des magnetischen Feldes der Erde. Diese liegt bei etwa $5 \cdot 10^{-5}$ Tesla.

A36 Am LHC werden Protonen auf beinahe Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und zur Kollision gebracht. Die Protonen müssen daher gegenläufig kreisen. Die Ablenkung der Protonen erfolgt durch Elektromagnete. Wie ist es aber möglich, dass man mit diesen die Protonen in die richtige Richtung ablenken kann, obwohl sie sich in die Gegenrichtung bewegen? Die Richtung der Lorentzkraft kehrt sich dann ja um! Überlege mit Hilfe von Abb. 19. Zeichne die Richtung des Magnetfeldes innerhalb der Spulen ein und überlege, in welche Richtung die Protonen abgelenkt werden. Überlege weiters, was das Besondere am Aufbau dieser beiden Spulen ist.

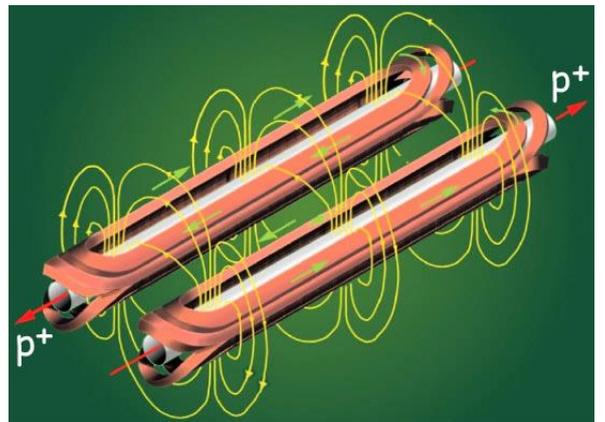


Abb. 19: Die Magnetfelder der Ablenkspulen am LHC (Quelle: CERN).

Hilfe zu A1: Meistens wird der Teilchenspin mit der Analogie eines kleinen rotierenden Balls erklärt. Du musst dir aber im Klaren sein, dass das nur eine bildliche Hilfskonstruktion ist. Der Ort eines Quants ist generell „unscharf“, und diese können daher auch keine kleinen rotierenden Bälle sein. Man kann zwar Quanten einen Drehimpuls zuordnen, aber so, wie es das Bild des rotierenden Teilchens suggeriert, ist es auf der anderen Seite ganz sicher nicht. Leider gibt es kein besseres Bild davon.

Hilfe zu A2: Gäbe es das Pauli-Verbot nicht, dann würden sich alle Elektronen in der untersten Schale befinden. Es gäbe kein Periodensystem: Die Elemente würden ihre typischen chemischen Eigenschaften verlieren. Alle Atome könnten sich dann mit allen Atomen verbinden, und die Größe von Molekülen wäre nach oben hin nicht begrenzt. Leben in der uns gewohnten Form könnte sich unter diesen Bedingungen nicht entwickeln. Außerdem würden ohne Pauli-Verbot die Elemente mit zunehmender Ordnungszahl kleiner werden, weil die Elektronen durch die Erhöhung der Protonenzahl näher an den Kern herangezogen werden. Uran-Atome wären somit am kleinsten. Das Pauli-Verbot verleiht also gemeinsam mit der Unschärferelation der Materie ihr Volumen!

Hilfe zu A3: Immer mit dem „Eröffnen“ eines weiteren s-Orbitals steigt der Atomradius sprunghaft an. Weil Atome mit höherer Ordnungszahl mehr Elektronen in den Schalen haben, müssen diese daher auch immer größer werden, und daher werden die „Neues-s-Orbital-Zacken“ immer höher. Warum aber sinkt zwischen den Zacken die Atomgröße wiederum ab? Weil mit Zunahme der Ordnungszahl auch die Anzahl der Ladungen im Kern steigt. Dadurch werden die Elektronen in der Hülle stärker angezogen, und die Orbitale werden kleiner.

Hilfe zu A4: In diesem Fall würde für sie auch das Pauli-Verbot gelten, und es könnten sich nicht beliebig viele Photonen an einer Stelle aufhalten. Licht könnte daher nicht beliebig hell sein. Auch ein Laser wäre unmöglich: Das wichtigste Merkmal eines Lasers ist ja, dass alle Photonen exakt dieselbe Energie (also dieselbe Wellenlänge bzw. dieselbe Farbe) haben. Auch einfarbiges Licht wäre nicht möglich, eben weil keine zwei Photonen dieselbe Energie, also dieselbe Farbe aufweisen dürften. Sich kreuzende Lichtstrahlen würden

quasi voneinander abprallen. Dann wäre man der Möglichkeit ein Lichtschwert zu bauen, allerdings ein Stückchen näher gerückt.

Hilfe zu A5: Hadronen sind aus Quarks zusammengesetzt, die zu den Fermionen gehören. Daher sind Hadronen ebenfalls Fermionen. Im Large Hadron Collider lässt man z. B. Protonen (also Hadronen) aufeinander prallen - daher der Name.

Hilfe zu A6: Erstens fliegen Photonen so lange, bis sie auf ein Hindernis aufprallen, das ihre Energie absorbiert. Lichtschwerter können daher nicht einfach nach einem Meter enden. Zweitens gehören Photonen zu den Bosonen und wechselwirken unter normalen Umständen nicht miteinander. Ein Kampf mit Lichtschwertern wäre daher ähnlich wie ein Kampf mit den Lichtstrahlen von Taschenlampen. Aus demselben Grund kann man auch keine Projektile oder gar Schüsse aus Laserpistolen ablenken (siehe Zitat aus Wikipedia).

Hilfe zu A7: "Normale" Materie (also Materie, die nicht in Teilchenbeschleunigern oder in der Höhenstrahlung entsteht) besteht aus Atomen, die sich wiederum aus Elektronen, Neutronen und Protonen zusammensetzen. Davon ist aber nur das Elektron elementar. Neutronen und Protonen bestehen wiederum aus den nach heutigem Wissenstand elementaren up- und down-Quarks. Die Antwort lautet daher: Alles besteht nur aus up- und down-Quarks sowie Elektronen. Ist es nicht phantastisch, was man damit alles "zusammenbauen" kann?

Hilfe zu A8: Würden Neutrinos mit Lichtgeschwindigkeit fliegen, würde für sie aus unserer Sicht keine Zeit vergehen, denn für $v = c$ würde $t_b = t_r \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = t_r \sqrt{1 - 1} = 0$ gelten. Wenn sie aber nicht altern, wäre ihr Zustand eingefroren. Dadurch könnten sie sich aber auch nicht umwandeln, denn das setzt das Fließen von Zeit voraus.

Hilfe zu A9 Es wird darauf angespielt, dass sich Neutrinos, sollten sie mit Überlichtgeschwindigkeit unterwegs sein, eventuell in der Zeit zurückbewegen könnten, womit das Prinzip von Ursache und Wirkung auf den Kopf gestellt würde.

Hilfe zu A10: Bei Reaktion a sind die Massen der Zerfallsprodukte in Summe kleiner als die des Neutrons. Ein Neutron hat $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg. Die Zerfallsprodukte haben $1,673 \cdot 10^{-27}$ kg.

$^{27}\text{kg} + 9,109 \cdot 10^{-31}\text{ kg} + 10^{-36}\text{ kg} \approx 1,674 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$. Die restlichen $0,001 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ werden über $E = mc^2$ als Energie frei.

Bei Reaktion b sind die Massen der Zerfallsprodukte in Summe jedoch größer als die des Protons. Ein Proton hat $1,673 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$. Die Zerfallsprodukte haben $1,675 \cdot 10^{-27}\text{ kg} + 9,109 \cdot 10^{-31}\text{ kg} + 10^{-36}\text{ kg} \approx 1,676 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$. Es fehlt also eine Masse von etwa $0,003 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$. Wenn sich das Proton im Atomkern befindet, kann es die fehlende Masse über $E = mc^2$ aus der überschüssigen Energie des Kerns bekommen.

Hilfe zu A11: Wenn die Masse der Protonen größer wäre als die der Neutronen, dann könnten freie Protonen spontan wie in Tab. 2 b zu Neutronen zerfallen. Protonen sind aber nichts anders als Wasserstoffkerne. Wenn alle Protonen zu Neutronen zerfallen, dann könnte auch kein Wasserstoff existieren, und die Sterne hätten keinen Brennstoff. Die Sterne würden nicht leuchten, und es könnten auch keine höheren Elemente entstehen. Schlechte Aussichten für Leben im Universum!

Hilfe zu A12: Die Sache mit dem β -Zerfall erschien lange Zeit so rätselhaft, dass der große Niels Bohr sogar am Energieerhaltungssatz zu zweifeln begann. Wolfgang Pauli hatte aber 1930 eine Idee. Er sagte voraus, dass beim β -Zerfall ein unbekanntes Teilchen entstehen muss, das den fehlenden Impuls besitzt (siehe Tab. 2). Und so ist es auch! Dieses Teilchen nennt man heute Neutrino.

Hilfe zu A13 a: Die Sonne hat eine Leistung von $3,9 \cdot 10^{26}\text{ W}$ bzw. J/s . Es müssen daher pro Sekunde sagenhafte $3,9 \cdot 10^{26}\text{ J} / 4,2 \cdot 10^{-12}\text{ J} = 9,3 \cdot 10^{37}$ Reaktionen wie in Abb. 5 dargestellt ablaufen. Deshalb entstehen pro Sekunde in der Sonne $1,86 \cdot 10^{38}$ Neutrinos.

Hilfe zu A13 b: Die Oberfläche einer Kugel berechnet man mit $O = 4r^2\pi$. Weil wir die Oberfläche in Quadratcentimetern haben wollen, rechnen wir die Entfernung gleich vorher um: 150 Milliarden Meter = $1,5 \cdot 10^{11}\text{ m} = 1,5 \cdot 10^{13}\text{ cm}$. Das ergibt eine Kugeloberfläche von etwa $2,8 \cdot 10^{27}\text{ cm}^2$. In Summe fliegen $1,86 \cdot 10^{38}$ pro Sekunde durch die gesamte Kugeloberfläche und daher $1,86 \cdot 10^{38}$ Neutrinos / $2,8 \cdot 10^{27}\text{ cm}^2 \approx 6,6 \cdot 10^{10}$ Neutrinos/cm².

Hilfe zu A14 a: Es geht hier um die Doppeltbedeutung von „no charge“. Einerseits bedeutet es „gratis“, andererseits „ohne Ladung“. Neutrinos haben keine Ladung!

Hilfe zu A14 b: Es wird darauf angespielt, dass Neutrinos praktisch nicht mit Materie wechselwirken.

Hilfe zu A15: Bei der Fusion in der Sonne entstehen Neutrinos (siehe A13). Wenn man die Richtung der Neutrinos im Superkamiokande feststellen kann, dann weiß man, ob die detektierten Neutrinos aus der Sonne stammen. Die anderen Neutrinos kommen von kosmischen Objekten und Ereignissen jenseits unseres Sonnensystems.

Hilfe zu A16: Um die Geschwindigkeit zu berechnen, müssen wir uns zuerst noch Gedanken über die Halbwertszeit (τ) machen. Wenn von dir aus gesehen für das Myon die Zeit halb so schnell vergeht, dann verdoppelt sich seine Halbwertszeit; wenn die Zeit ein Drittel so schnell vergeht, verdreifacht sich die Halbwertszeit und so weiter. Aus $t_b =$

$$t_r \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ folgt daher } \tau_b = \frac{\tau_r}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

und somit, wenn du umformst, $\tau_r = \tau_b \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Die Formel aus A8 ändert sich daher zu $\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_r}{\tau_b}\right)^2}$. Die Halbwertszeiten betragen laut

Abbildung 7 $1,5\text{ }\mu\text{s}$ und $44,1\text{ }\mu\text{s}$. Für den Faktor v/c ergibt das dann $0,99942137$. Die Myonen waren bei diesem Experiment also mit $0,9942\text{ c}$ unterwegs, also mit $99,42\%$ der Lichtgeschwindigkeit.

Hilfe zu A17: Dieses Diagramm zeigt den Zerfall eines Myons. Netto läuft dieser so ab: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$. Das freie Myon zerfällt also in ein Elektron, ein Myon neutrino und ein Anti-Elektron neutrino. Antiteilchen werden in Feynman-Diagrammen als zeitlich zurücklaufend eingezeichnet. Das ist nur eine Konvention. Natürlich vergeht für diese Teilchen die Zeit nicht rückwärts.

Hilfe zu A18: Der Zerfall ist nicht eindeutig, weil es drei verschiedene Möglichkeiten gibt. Besteht das Myon nun zum Beispiel aus einem Elektron und zwei Neutrinos oder zwei Elektronen und einem Positron und zwei Neutrinos? Deshalb hat man sich auf den Standpunkt gestellt, dass das Myon elementar ist.

Hilfe zu A19: Ohne SRT (klassisch): Welche Strecke fliegen die Myonen in der Halbwertszeit? Es gilt $s = v \cdot t$. Die Strecke beträgt daher $0,995 \cdot 3 \cdot 10^8\text{ m/s} \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}\text{ s} = 447,75\text{ m} \approx 450\text{ m}$. Die Strecke zur Erde (10 km) entspricht daher $10.000\text{ m} / 450\text{ m} = 22,2$ Halbwertszeiten. Es gilt daher $N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^t = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{22,2} = N_0 \cdot 2,08 \cdot 10^{-7}$. Es würde in diesem Fall also weniger als ein Millionstel der entstehenden Myonen auf der Erdoberfläche ankommen. Gälte

die SRT nicht, könnte man auf der Erdoberfläche praktisch keine Myonen messen.

Mit SRT: Bei $0,995 c$ wächst die Halbwertszeit um den Faktor $1/\sqrt{1-v^2/c^2} \approx 10$ an. Die Halbwertszeit beträgt daher aus Sicht des ruhenden Beobachters, also aus Sicht der Erde, etwa $15 \mu\text{s}$. Welche Strecke fliegen die Myonen in der Halbwertszeit? $0,995 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 4477,5 \text{ m} \approx 4500 \text{ m}$. Die Strecke zur Erde (10 km) entspricht daher $10.000 \text{ m} / 4500 \text{ m} = 2,2$ Halbwertszeiten. Es gilt $N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{2,2} = N_0 \cdot 0,22$. Tatsächlich kommt also knapp ein Viertel (22 %) aller Myonen auf der Erde an. Man kann daher um den Faktor $0,22/2,08 \cdot 10^{-7} \approx 10^6$ mehr Myonen messen, als man aus nichtrelativistischer Sicht erwarten könnte.

Hilfe zu A20 a: Die Energie von 1 MeV entspricht $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. Weiters gilt $E = mc^2$. Das Proton hat daher die Energie $1,673 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ J} = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 941 \text{ MeV}$. Weil man durch Umformen der Formeln $m = E/c^2$ erhält, kann man auch schreiben, die Masse des Protons beträgt $941 \text{ MeV}/c^2$.

Hilfe zu A20 b: Der Begriff Leptonen leitet sich vom griechischen "leptos" ab, was so viel wie "leicht" bedeutet. Leptonen sind also "leichte Teilchen". Das 1974 entdeckte Tauon hat jedoch eine Masse von $1777 \text{ MeV}/c^2$. Es ist somit fast doppelt so massenreich wie ein Proton (siehe A20 a) und geht daher eigentlich nicht mehr als "leichtes Teilchen" durch. Man hat aber die Bezeichnung trotzdem gelassen.

Hilfe zu A21: Damit man eine Struktur in der Größe von 10^{-16} m untersuchen kann, muss die Wellenlänge zumindest in derselben Größenordnung oder darunter liegen. Wenn man die erste Gleichung nach p umformt ($p = h/\lambda$) und in die zweite einsetzt, erhält man $E = hc/\lambda$. Wenn man die bekannten Werte einsetzt, erhält man für $E = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 10^{-16} \text{ J} \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ J} = 13 \cdot 10^9 \text{ eV} = 13 \text{ GeV}$. Als man die Quarkstruktur der Protonen belegte, verwendete man Elektronen mit einer Energie von 20 GeV - man ging also auf Nummer sicher!

Hilfe zu A22: Ein Proton besteht aus zwei up-Quarks und einem down-Quark. Die Masse eines Protons müsste daher $12 \text{ MeV}/c^2$ betragen (siehe Tab. 3). Tatsächlich liegt sie aber bei etwa $941 \text{ MeV}/c^2$! Der größte Teil der Masse von Protonen - und übrigens auch von Neutronen - wird von der Feldenergie gebildet.

Hilfe zu A23: Baryonen bestehen aus drei Quarks. Daher gehören auch Neutronen und Protonen zu den Baryonen. Daher ist der Plot Quatsch. Wenn man die Enterprise von Baryonen reinigt, bleibt nichts mehr übrig.

Hilfe zu A24: Baryonische Materie (= Baryonen) besteht aus drei Quarks. Daher gehören auch Neutronen und Protonen zu den Baryonen. Dunkle baryonische Materie ist daher normale Materie, die aber nicht sichtbar ist. Kandidaten dafür sind kalte Gase, Staubwolken und Braune Zwerge. Dunkle nichtbaryonische Materie besteht, wie der Name vermuten lässt, *nicht* aus Baryonen, also nicht aus herkömmlicher Materie. Die Wissenschaftler sind sich noch nicht im Klaren darüber, woraus diese besteht.

Hilfe zu A25: Nein! Dafür gibt es mehrere Gründe. Einer davon ist, dass das Neutron aus drei Quarks besteht, die geladen sind (mit den Farbladungen rot, grün und blau). Das Antineutron besteht aus drei Antiquarks (mit den Farbladungen gelb, purpur und magenta; siehe Abb. 12 rechts), deren Ladung sich von der der "Neutronen-Quarks" unterscheidet.

Hilfe zu A26: In diesem Modell wird angenommen, dass X- und Anti-X-Bosonen nicht mit gleicher Wahrscheinlichkeit in Quarks, Leptonen und deren Antiteilchen zerfallen sind. Zum Beispiel sind die Reaktionen $X \rightarrow u+u$ und $\bar{X} \rightarrow d+e^-$ um 2 Milliardstel wahrscheinlicher als die Reaktionen $X \rightarrow \bar{d} + e^+$ und $\bar{X} \rightarrow \bar{u} + \bar{u}$. Aus diesem Grund ist ein Überschuss an u- und d-Quarks sowie Elektronen übergeblieben, aus denen heute die Materie besteht.

Hilfe zu A27: a) Abstoßung zweier Elektronen durch den Austausch eines virtuellen Photons - elektromagnetische Wechselwirkung; b) Zusammenhalt der Quarks im Proton durch den Austausch von virtuellen Gluonen - starke Wechselwirkung; c) β^- -Zerfall eines Neutrons - schwache Wechselwirkung.

Hilfe zu A28 a: Gehe von der Gleichung $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{13}$ aus. Damit ein virtuelles Teilchen aus dem Nichts entstehen kann, ist zumindest die Energie $\Delta E = mc^2$ nötig. Wenn du oben einsetzt und nach Δt auflöst, erhältst du $\Delta t \geq \frac{h}{13mc^2}$. Die Obergrenze für die Geschwindigkeit, die ein Teilchen erreichen kann, ist c . Aus $c = \Delta s / \Delta t$ folgt $\Delta s = c \cdot \Delta t \leq \frac{h}{13mc}$.

Hilfe zu A28 b: Aus $\Delta s \leq \frac{h}{13mc}$ folgt $m \geq \frac{h}{13\Delta s}$. Daraus folgt $m \geq \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{13 \cdot 10^{-18} \cdot 3 \cdot 10^8} \text{ kg} = 1,7 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$. Die Masse dieser virtuellen Bosonen ist also rund 100-mal so groß wie die der Protonen!

Hilfe zu A28 c: Die Energie von 1 GeV entspricht $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot 10^9 = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ J}$. Weiters gilt $E = mc^2$. Die Bosonen haben daher eine Energie von $1,7 \cdot 10^{-25} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ J} = 1,53 \cdot 10^{-8} \text{ J} \approx 96 \text{ GeV}$. Weil man durch Umformen der Formeln $m = E/c^2$ erhält, kann man daher auch schreiben, die Masse des Bosons beträgt $96 \text{ MeV}/c^2$. Die in der Literatur angegebene Masse ist etwas geringer. Wir haben allerdings nur mit Hilfe der Reichweite abgeschätzt.

Hilfe zu A29: Es wechselwirkt mit seinem eigenen Feld und erhält dadurch seine Masse.

Hilfe zu A30: Warum kann man niemals freie Quarks beobachten? Im Gegensatz zur elektromagnetischen Kraft sinkt die starke nicht ab, wenn man den Abstand der Teilchen erhöht (Abb. 15 rechts), weil die Gluonen untereinander eine Anziehung ausüben. Anders gesagt: Während zum Ablösen eines Elektrons von einem Proton endlich viel Energie nötig ist, wäre zum Ablösen eines Quarks von einem anderen unendlich viel Energie nötig. Je weiter man zwei Quarks „auseinander zieht“, desto größer ist die Energiemenge, die man in das System stecken muss. Bei einem Abstand von 10^{-15} m ist die investierte Energie so hoch, dass ein neues Quark-Antiquark-Paar entsteht (Abb. 20), aber kein freies Quark.

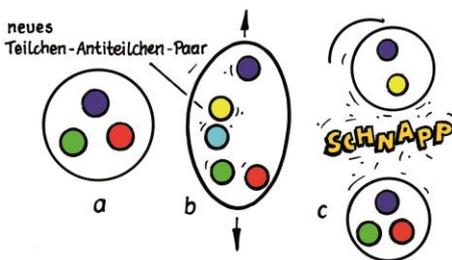


Abb. 20: Wenn man ein Proton (a) "auseinander zieht" (b), dann entstehen keine einzelnen Quarks, sondern zusätzliche Mesonen, etwa π -Teilchen (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 47.21, S. 82).

Hilfe zu A31: Die erste Vereinheitlichung geht auf ISAAC NEWTON zurück. Seit der Antike dachte man ja, dass alle Himmelsobjekte quasi auf der Himmelskugel angeklebt sind. NEWTON fiel angeblich bei der Beobachtung des Mondes der berühmte Apfel auf den Kopf. Das führte ihn zur Idee, dass der Mond und alle anderen Himmelsobjekte so wie der Apfel der Gravitation unterworfen sind.

Hilfe zu A32: Die Entdeckungen von ØRSTED vereinigten Elektrizität und Magnetismus zum Elektromagnetismus (siehe Abb. 16 und 17). Die Entdeckungen MAXWELLS vereinigten Elektromagnetismus und Licht. Daher muss man in manchen Büchern unter Elektromagnetismus nachschlagen, um die Optik zu finden.

Hilfe zu A33 a: Die Masse eines Protons beträgt nach unserer Abschätzung $941 \text{ MeV}/c^2$ (siehe A20 a), Positron und Elektronenneutrino haben in Summe $0,511 + 135 \approx 135,5 \text{ MeV}/c^2$, und das geht sich locker aus.

Hilfe zu A33 b: Nach dem Standardmodell sind Baryonen- und Leptonenzahl eine absolute Erhaltungsgröße. Deshalb ist die Reaktion $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ nicht möglich, weil die Baryonenzahl vorher 1 ist und nachher 0. Bei der Leptonenzahl ist es genau umgekehrt.

Hilfe zu A33 c: Elektronen können natürlich nur in Teilchen zerfallen, die in Summe maximal dieselbe Masse haben. Elektronen sind mit etwa $0,5 \text{ MeV}/c^2$ sehr leicht. Alle leichteren Teilchen, wie das Elektron-Neutrino (siehe Tab. 4) bzw. die Wechselwirkungsteilchen Gluon, Photon oder das hypothetische Graviton sind aber nicht geladen. Daher wäre der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung verletzt. Fazit: Nach heutigem Wissensstand können Elektronen nicht zerfallen! Man müsste dazu neue Teilchen entdecken!

Hilfe zu A34: Die Stärken der einzelnen Kräfte verändern sich mit der Energie. Die in Tab. 7 angegebenen Werte stimmen nur für niedrige Energien. Im Rahmen der SUSY (die auch ein Vorschlag zur GUT ist) dürften bei etwa 10^{17} GeV alle Kräfte gleich groß sein (Abb. 21 nächste Seite). Solche Energien haben kurz nach dem Urknall geherrscht.

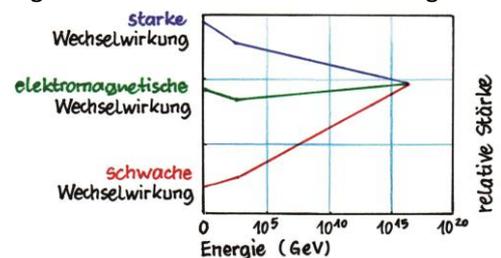


Abb. 21 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A35 a: $F_L = I \cdot s \cdot B = \frac{Q}{t} \cdot v \cdot t \cdot B = Q \cdot v \cdot B$

Hilfe zu A35 b: Aus $\frac{mv^2}{r} = QvB$ folgt $B = \frac{mv}{Qr}$.

Hilfe zu A35 c: Für v können wir c einsetzen, weil der Fehler, der dadurch entsteht, minimal ist. Die Protonenmasse beträgt $1,673 \cdot 10^{-27}$ kg (siehe Tab. 3). Für die Protonen bei fast Lichtgeschwindigkeit im LHC ergibt sich daher eine Masse von $1,25 \cdot 10^{-23}$ kg. Die Elementarladung ist $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, der Radius der Kreisbahn beträgt 4,3 km oder $4,3 \cdot 10^3$ m. Wenn man alle Werte in $B = \frac{mv}{Qr}$ einsetzt, erhält man für die magnetische Induktion 5,4 Tesla. Tatsächlich liegt sie sogar bei 9 T. Das ist deshalb so, weil die Bahn keine Kreisbahn ist, sondern eher einem Vieleck gleicht. Durch die Knicke werden etwas stärkere Felder benötigt.

Hilfe zu A35 d: Die magnetische Feldstärke der LHC-Magnete liegt um den Faktor 10^5 höher als die des Erdmagnetfeldes, ist also etwa 100.000-mal so groß.

Hilfe zu A36: Mit *einer* Spule ist es nicht zu schaffen, beide Protonenströme in die richtige Richtung abzulenken. Dann könnte man z. B. nur die im Uhrzeigersinn kreisenden Protonen in die richtige Richtung ablenken, aber nicht die, die gegen den Uhrzeigersinn kreisen. Deshalb muss es für jede der beiden Röhren *einen eigenen* Magneten geben. Die Richtung des Magnetfeldes ist mit den schwarzen Pfeilen markiert (siehe Abb. 22). Die roten Pfeile zeigen die Bewegungsrichtung der Protonen an. Diese entspricht daher der technischen Stromrichtung. Mit der rechten Hand kann man nun die Richtung der Lorentzkraft ermitteln. In beiden Fällen zeigt diese nach rechts vorne.

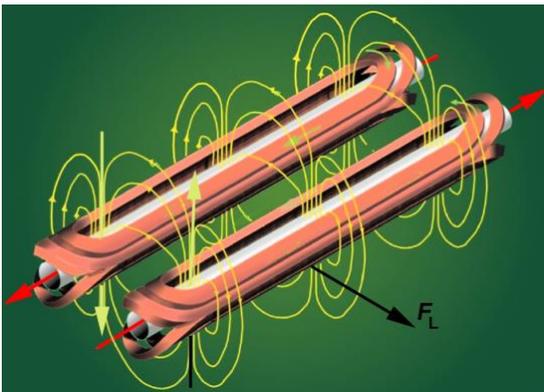


Abb. 22: Die Magnetfelder der Ablenkspulen am LHC sowie die daraus resultierende Lorentzkraft (Quelle: CERN).

Was ist das Besondere an den Spulen? Man würde intuitiv erwarten, dass die Protonen von Pol zu Pol normal zur Wicklungsebene der Spulen fliegen, also quasi durch den „Spulentunnel“ (Abb. 23 a). Allerdings würden sie dann parallel

zu den Feldlinien fliegen und nicht abgelenkt werden. Am LHC fliegen die Protonen zwischen den Polen durch (b). Die Spulen sind daher in Querrichtung sehr gestreckt – sie sind viel dicker als sie lang sind. Sie haben vorne und hinten einen Einlass, damit die Protonen nicht gegen die Wicklungen prallen. Auf diese Weise werden die Protonen brav abgelenkt.

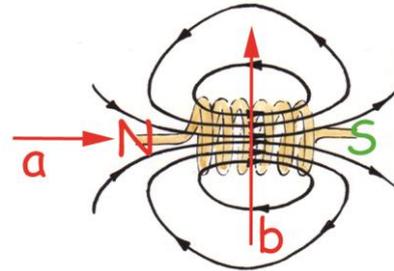


Abb. 23 (Grafik: Janosch Slama und Martin Apollin)