

Lösungen

23 Das elektrische Feld

F26 Es kann keine elektrischen Ladungen ohne elektrische Felder geben. Ein geladener Körper kann nur deshalb erkannt werden, weil er ein Feld besitzt. Es wäre, als würde man fragen, ob es Masse ohne Gravitationsfeld geben kann. Auch das ist unmöglich.

F27 Das Wasserstoffatom besteht aus einem Elektron und einem Proton. Diese befinden sich in einem mittleren Abstand von etwa 10^{-10} m. Die elektrische Kraft beträgt daher

$$F = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-10})^2} \text{ N} \approx -2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

Du könntest also das Elektron mit Leichtigkeit ablösen. Ein typischer Abstand für Protonen im Kern ist $1,5 \cdot 10^{-15}$ m. Nehmen wir einen Heliumkern. Die elektrische Kraft zwischen den beiden Protonen beträgt

$$F = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(1,5 \cdot 10^{-15})^2} \text{ N} \approx 100 \text{ N}$$

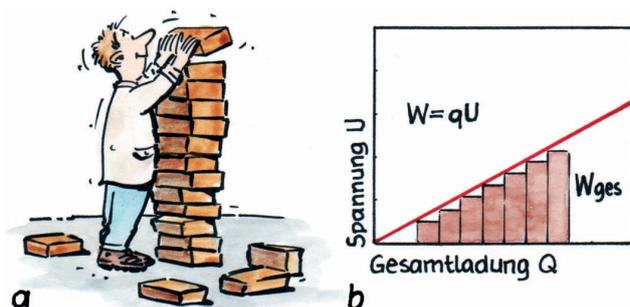
Das entspricht der Kraft, mit der 10 kg von der Erde angezogen werden. Es wäre möglich, aber sehr anstrengend, auch nur 2 Protonen mit Daumen und Zeigefinger zusammenzuhalten. Bei Elementen mit mehr Protonen wäre es schlichtweg unmöglich. Wodurch werden die Kerne zusammengehalten? Durch die Starke Wechselwirkung, die zwischen allen Kernbausteinen wirkt und die um den Faktor 100 größer ist als die elektrische Abstoßung.

F28 In der Tabelle siehst du die in Batterien (Alkaline 1,5V) gespeicherten Energien. Die Energie einer D-Batterie reicht aus, um 1 kg auf den Everest zu heben. Beeindruckend!

Ladung/Typ	Energie $E_{\text{pot}} = Q \cdot U$	„Hubhöhe“ von 1 kg
4 000 C/AAA	6 kJ	600 m
9 400 C/AA	14,1 kJ	1410 m
28 000 C/C	42 kJ	4200 m
59 500 C/D	89,3 kJ	8930 m

F29 Für den Transport einer Ladung ist die Arbeit $W = q \cdot U$ nötig. Durch den Transport wächst aber der „elektrische Höhenunterschied“ zwischen den Platten. Es ist ähnlich wie beim Stapeln von Ziegeln (siehe Abb. a). Für den nächsten Ladungstransport muss mehr Energie aufgewendet werden und so weiter (b). Weil eine Einzelladung (q) im Vergleich zur Gesamtladung (Q) verschwindend klein ist, sind die Rechtecke sehr schmal. Die „Treppenfunktion“ kann durch eine Gerade geglättet werden (b) und die Gesamtarbeit entspricht dann der Fläche des Dreiecks:

$$W_{\text{ges}} = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$



a) Mit jedem Ziegel auf dem Stapel wird die Arbeit für den nächsten größer.

b) Die schmalen Rechtecke geben die Arbeit pro verschobener Einzelladung (q) an. Die Dreiecksfläche entspricht der Gesamtarbeit W_{ges} .

F30 Wenn beim Umlegen des Schalters die Ladungen in 5 ms abfließen, ergibt sich für die elektrische Leistung $P = W/t = 72\,000 \text{ W}$! Damit könnte man ein ganzes Fußballstadion beleuchten – aber eben nur 5 ms lang. Die Spannung an den Elektroden beträgt etwa 2 000 V. Es fließen daher $I = P/U = 36 \text{ A}$ durch den Körper.

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2} \Rightarrow C = \frac{2W}{U^2} = \frac{720}{2000^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,18 \text{ mF}$$

F31 Das Leuchten entsteht durch das starke elektrische Feld. Dadurch liegen die Enden der Lampe auf einem unterschiedlichen elektrischen Potenzial und es besteht ein Spannungsunterschied zwischen den beiden Enden. Wenn dieser Unterschied stark genug ist, reicht er aus, um einen Strom in der Lampe anzuregen – die Lampe leuchtet. Weil es sich um ein elektromagnetisches Wechselfeld handelt, braucht man auch keinen „Nachschub“ an Elektronen. Die Elektronen im Gas der Lampe schwingen einfach hin und her.

F32 Im Fall b wird das Haus von vier Blitzableitern überzogen. Diese wirken daher in Näherung wie ein Faraday'scher Käfig. Sie leiten nicht nur den Blitz ab, sondern halten auch das Innere des Hauses weitgehend feldfrei. Dadurch sind zum Beispiel auch elektrische Geräte weitgehend geschützt.

F33 Die elektrische Kraft bewirkt zum Beispiel, dass Elektronen und Protonen einander anziehen und somit Atome entstehen. Ohne elektrische Kraft gäbe es also gar keine chemischen Elemente. Außerdem beruhen auf ihr alle chemischen Bindungen und somit die Festigkeit der Materie, also auch des Sessels, auf dem du sitzt und des Bodens, auf dem du stehst. Die elektrische Kraft hat zwar auf den ersten Blick für dich keine direkte Bedeutung, aber ohne sie wäre das Universum nur eine Ansammlung umher-schwirrender Elementarteilchen oder Materiekumpen.

F34 Durch das Rutschen wurden das Kind und somit auch seine Haare durch Reibung elektrisch aufgeladen. Die Haare haben daher einen Ladungsüberschuss. Weil gleichnamige Ladungen einander abstoßen, entfernen sich die Haare so weit wie möglich voneinander und stehen dadurch ab. Man könnte es auch so sagen: Die Haare zeigen die Richtung des elektrischen Feldes an.

F35 Nimm an, der Radius des Kreises ist R . Wenn du doppelt so weit weggehst ($2r$), verdoppelt sich der Radius des Kreises, und seine Fläche vervierfacht sich (wegen $A = 2\pi \cdot R$). Gleiche Lichtmenge auf vierfacher Fläche ergibt ein Viertel an Intensität. Wenn die Wand dreimal so weit weg ist, dann ist die Intensität bereits auf ein Neuntel abgesunken. Die Lichtintensität an der Wand ist also proportional zu $1/r^2$. Im Prinzip ist das genau dasselbe, was auch in Abb. 23.15 dargestellt ist. Dadurch lässt sich der Faktor $1/r^2$ im Coulomb-Gesetz begründen.

24 Elektrische Ströme und Magnetfelder

F16 Zerteilt man einen Magneten, so erhält man nicht einen einzelnen Nord- und Südpol, sondern zwei vollständige Magnete. Das lässt sich mit Hilfe der Elementarmagnete erklären. Ein Magnet ist also immer ein Dipol. 1931 konnte allerdings PAUL DIRAC auf theoretischem Weg zeigen, dass die elektrischen Ladungen immer ein Vielfaches der Elektronenladung sind, falls es magnetische Monopole gibt. Außerdem gibt es Überlegungen, dass Monopole kurz nach dem Urknall entstanden sein könnten. Da magnetische Monopole eine sehr hohe Masse besitzen sollten, kann man sie nicht in Teilchenbeschleunigern erzeugen. Man bräuchte dazu etwa 10^{25} eV, aber selbst der Teilchenbeschleuniger LHC liefert nur etwa 10^{13} eV. Man könnte also höchstens etwaige vom Urknall übrig gebliebene Monopole feststellen.

F17 Eine Messung der Strahlungswerte bei Apollo 11 hat ergeben, dass die Astronauten auf der gesamten Mission einer Belastung von etwa 6 Millisievert (mSv) ausgesetzt waren. Mit dieser Einheit kann man die energetische Belastung des Organismus bei ionisierender Strahlung angeben, etwa wenn eine Person mit Röntgenapparaten oder radioaktiven Stoffen zu tun hat oder Astronaut ist. Vom Gesetz her ist es erlaubt, dass die Belastung in einzelnen Jahren auch mal 50 mSv betragen darf. Das würde also rund 8 Mondflüge in einem Jahr erlauben. Der sofortige bis baldige Tod würde überhaupt erst bei einer kurzzeitigen Belastung von 8000 mSv auftreten.

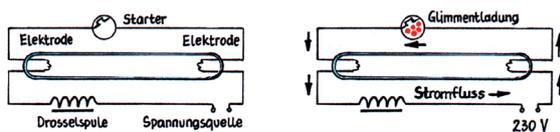
F18 Wie der Name schon sagt, nutzt man bei diesem Herdtyp die Induktion: Unter der Glaskeramik befindet sich eine Induktionsspule, die von einem sehr hochfrequenten Strom durchflossen wird. Das führt zu Wirbelströmen im Boden des Topfes. Der Vorteil bei diesem Herd ist der, dass die Herdplatte nur warm wird, wenn ein Topf auf ihr steht.

F19 Weil sie die Elementarmagnete des unmagnetischen Eisenstücks im Magnetfeld ausrichten. Der Effekt ist mit der elektrischen Polarisierung vergleichbar (siehe Kap. 21.1.4, „Big Bang 1“).

F20 Eine Spule hat dann eine Induktivität von 1H, wenn sie bei der Änderung von 1A pro Sekunde eine Selbstinduktionsspannung von 1 V erzeugt.

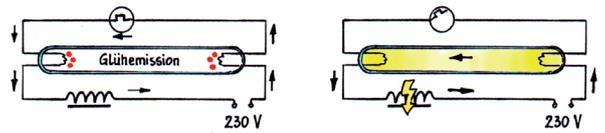
F21 Den Teilchen müssten dazu 10^{25} eV zugeführt werden, das macht also $10^{25} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ J bzw. $1,6 \cdot 10^6$ J. Für $Dm = DE/c^2$ ergibt das $1,8 \cdot 10^{-11}$ kg. Aus $r = (m \cdot v)/(B \cdot Q)$ folgt ein Radius von $3,3 \cdot 10^{15}$ m – das ist rund $1/3$ eines Lichtjahres.

F22 Das Bild zeigt den schematischen Aufbau einer Leuchtstoffröhre. Der Starter besteht aus einer Glimmlampe. Darunter versteht man ein gasgefülltes Lämpchen mit zwei Elektroden, das bei hohen Spannungen aufgrund des Gases leitend wird. Das Besondere an dieser Glimmlampe ist, dass die Elektroden Bimetallstreifen sind. Der Startvorgang läuft so ab: Nach dem Einschalten liegt, da durch die Röhre noch kein Strom fließt, die volle Netzspannung am Starter an und die Glimmlampe zündet (Abb. rechts).



Die Bimetallstreifen erwärmen und verbiegen sich, so dass beide Kontakte kurzgeschlossen werden. Nun fließt ein großer Strom durch die Heizwendeln in der Leuchtstoffröhre. Diese beginnen zu glühen und senden Elektronen aus, die das Gas in der Röhre mit Ladungsträgern anreichern (Abb. links). Die nun fehlende Glimmladung im Starter lässt das Bimetall abkühlen, wodurch sich

der Kontakt wieder öffnet. Dadurch fällt der Strom in der Drosselsspule schnell ab, und durch Selbstinduktion entsteht eine kurzzeitig hohe Spannung, die das mit Ladungsträgern angereicherte Gas in der Röhre zündet (Abb. rechts).



Ein verbreitetes Gerücht ist, dass Leuchtstofflampen beim Einschalten viel Energie verbrauchen würden. Richtig ist, dass kurzzeitig ein Einschaltstrom fließt, der höher als im Betrieb ist. Der Energieinhalt ist jedoch unbedeutend, weil der Startvorgang nur Sekundenbruchteile dauert. Eine Ausschaltdauer unter ca. 10 Minuten bewirkt jedoch, dass sich die Lebensdauer verkürzt und zu einem früheren Neukauf führen kann.

F23 Generell gilt: Ein veränderliches Magnetfeld erzeugt Strom. In Abb. 24.30 gelingt das, indem der relativ zur Spule bewegt wird. In Abb. 24.44 verändert sich beim Ein- oder Ausschalten rechts für kurze Zeit der Strom. Er fährt quasi rauf oder runter. Dadurch verändert sich das Magnetfeld in der rechten Spule und somit auch in der linken für kurze Zeit und die Nadel schlägt aus. Ist der Stromkreis offen oder geschlossen, ist die Nadel ganz ruhig. Die beiden Spulen stellen im Prinzip Primär- und Sekundärspule eines Transformators dar (siehe Kap. 25.3).

F24 Die Welt wäre ohne Strom – zumindest ohne Strom aus der Steckdose! Dass ein veränderliches Magnetfeld einen Strom hervorruft, ist die Grundlage der Versorgung mit elektrischer Energie, denn auf diesem Prinzip basieren die Generatoren in den Kraftwerken. Außerdem müssen die Spannungen hinauf- und hinuntertransformiert werden können (siehe Kap. 25.3) und auch dazu wird die elektromagnetische Induktion benötigt.

25 Grundlagen der Elektrotechnik

F19 Durch den Wechselstrom wird in der Spule die Selbstinduktionsspannung $U_{\text{ind}} = -L \cdot dI/dt$ induziert. Zur Berechnung von R_L gehen wir davon aus, dass diese Spannung der angelegten Spannung $U(t)$ entgegenwirkt. Die angelegte Spannung muss die induzierte kompensieren und steht nicht voll zur Verfügung:

$$U(t) = U_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t) = -U_{\text{ind}} + I(t) \cdot R$$

Wenn man den Ohm'schen Widerstand vernachlässigt, erhält man $U_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t) = -U_{\text{ind}} = L \cdot dI/dt$. Wie man sich durch Einsetzen in die Gleichung überzeugen kann, folgt daraus für den Strom:

$$I(t) = -\frac{U_{\text{max}}}{\omega \cdot L} \cos(\omega \cdot t) = -I_{\text{max}} \cos(\omega \cdot t)$$

Für den induktiven Widerstand ergibt sich daher:

$$R_L = \frac{U_{\text{max}}}{I_{\text{max}}} = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \omega \cdot L$$

Um den kapazitiven Widerstand zu berechnen, berücksichtigen wir, dass die von der augenblicklichen Ladung Q des Kondensators hervorgerufene Spannung Q/C gleich der angelegten Spannung $U(t)$ sein muss. Wenn man andere Widerstände vernachlässigt, gilt daher $Q/C = U_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ oder $Q = C \cdot U_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t)$. Für den Ladestrom $I(t)$ folgt daraus: $I(t) = dQ/dt = \omega \cdot C \cdot U_{\text{max}} \cdot \cos(\omega \cdot t)$. Für den kapazitiven Widerstand ergibt sich dann:

$$R_C = \frac{U_{\text{max}}}{I_{\text{max}}} = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Für die Momentanleistung gilt allgemein: $P(t) = I(t) \cdot U(t)$. Nun setzen wir Stromstärke und Generatorspannung ein und nehmen an, dass diese eine Phasenverschiebung von φ aufweisen:

$$P(t) = [I_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \cdot U_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t)]$$

Dieser Ausdruck lässt sich umformen:

$$P(t) = I_{\max} \cdot U_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ = \frac{1}{2} I_{\max} \cdot U_{\max} [\cos \varphi - \cos(2\omega \cdot t - \varphi)]$$

Für den Verbraucher ist der zeitliche Mittelwert P ausschlaggebend, die Wirkleistung. Da $\cos(\omega \cdot t - \varphi)$ zwischen -1 und $+1$ schwankt, ist der Mittelwert über die Zeit null. Für die Wirkleistung P ergibt sich daher:

$$P = \frac{1}{2} I_{\max} \cdot U_{\max} \cdot \cos \varphi = I_{\text{eff}} \cdot U_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi$$

F20 WERNER VON SIEMENS erkannte, dass der Restmagnetismus des Eisenkerns genügt, um das Aufschaukeln zu starten. Dreht sich dann die Spule in dem noch vorhandenen, schwachen Magnetfeld, so entsteht ein kleiner Induktionsstrom, der den Elektromagneten verstärkt, und so weiter. Warum ist dieses Aufschaukeln nicht grenzenlos? Das Magnetfeld erreicht eine Sättigung, wenn alle Elementarmagnete des Kerns ausgerichtet sind.

F21 Der durch den Kurzschluss sehr hohe Strom fließt durch das Magnetfeld. Dabei wird eine Lorentz-Kraft auf ihn ausgeübt. Der springende Punkt: Als Reaktion auf die Ablenkung des Stromes tritt eine Gegenkraft auf (3. Newton'sches Axiom). Die führt zu einem Drehmoment, das den Zylindermagneten in Rotation versetzt. Die Symmetrie der Konstellation wird dadurch nicht verändert, so dass die Bedingungen für eine kontinuierliche Bewegung, die Rotation, erhalten bleiben.

F22 Wird der Universalmotor mit Wechselstrom betrieben, dann ändert sich gleichzeitig die Flussrichtung des Stroms im Elektromagneten und in der Leiterschleife. Dadurch bleibt die Richtung der Lorentz-Kraft gleich. Du kannst das mit der Drei-Finger-Regel überprüfen. Ändere die Richtung von Strom und Magnetfeld, und der Mittelfinger zeigt wieder in dieselbe Richtung.

F23 Der Widerstand der Leitungen ist $R = (\rho \cdot l) / A$ (Kap. 22.4, „Big Bang 1“) und beträgt daher bei 100 km 10Ω . Die Leistung von Rheinfeldern beträgt $1,2 \cdot 10^8 \text{ W}$. Der Leistungsverlust bei 220 kV beträgt daher $P_v = (P^2 \cdot R) / U^2 \approx 1,2 \cdot 10^8 \text{ W}$ oder rund 2,5%, bei 380 kV nur $2,9 \cdot 10^6 \text{ W}$ oder 0,8%. Absolut gesehen verliert man durch die höhere Spannung rund $2 \cdot 10^6 \text{ W}$ weniger, also 2 Millionen Watt! Das entspricht dem Verbrauch von etwa 3000 Haushalten!

F24 Eine Turbine liefert etwa $3 \cdot 10^7 \text{ W}$. Wenn beim Hochtransformieren 2% verloren gehen, sind das $6 \cdot 10^5 \text{ W}$ bzw. J/s. Wasser hat eine spezifische Wärmekapazität von $4190 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Um 1l Wasser von 20 auf 100°C zu erwärmen, benötigt man daher $3,35 \cdot 10^5 \text{ J}$. Der Trafo wäre ein prima Wasserkocher, weil er das nämlich in weniger als 0,5s schafft. Die Wärmeverluste sind also gigantisch. Deshalb müssen Großtrafos sehr gut gekühlt werden. Meistens passiert das durch Öl, weil das gleichzeitig als Isolator wirkt.

F25 230V und 9,9A ergeben bei einem Leistungsfaktor von 0,87 1980W. Die 2kW sind daher etwas aufgerundet. 2kW entsprechen $2/0,736 \text{ W} = 2,71 \text{ PS}$. $\arccos(0,87) = 29,5^\circ$ und

$$\tan(29,5^\circ) = 0,57 = \frac{R_L}{R} \cdot R_L \text{ ist also } R \cdot 0,57. R_{\text{ges}} = \frac{R_L}{R}$$

F26 Weil $\cos \varphi = \cos(-\varphi)$.

F27 Der Trenntrafo hat ein Übersetzungsverhältnis von 1:1. Weil aber keiner der beiden Pole der Sekundärspule geerdet ist, kann man gefahrlos einen Pol berühren, weil der Stromkreis trotzdem nicht geschlossen ist (Abb.). Man darf allerdings nicht gleichzeitig beide Pole berühren.



F28 Niemals an elektrischen Geräten basteln oder sie reinigen, solange sie unter Spannung stehen. Solange kleine Kinder im Haus sind, alle Steckdosen mit einer Kindersicherung versehen. Defekte Elektroinstallationen sofort vom Fachmann reparieren lassen! Beschädigte elektrische Kabel dürfen nicht verwendet werden. Mit Isolierband zu flicken ist unzulässig. Keine am Netz hängenden elektrischen Geräte (Föhn, Radio) neben der Badewanne. Sich niemals in die Nähe von Hochspannungsleitungen begeben, etwa, indem man auf einen Waggon klettert. Warum ist der elektrische Strom für den Menschen gefährlich? Der Körper steuert seine Funktionen durch sehr schwache elektrische Ströme, welche über die Nerven weitergeleitet werden. Wenn nun ein Strom von außen die Körperströme überlagert, kommt es zu Fehlfunktionen der angesteuerten Körperorgane, zum Beispiel zur Verkrampfung der Muskeln oder zum lebensgefährlichen Herzkammerflimmern. Schon bei einer Stromstärke von nur 30 mA während 0,2 Sekunden durch den Körper kommt es zu den genannten Erscheinungen.

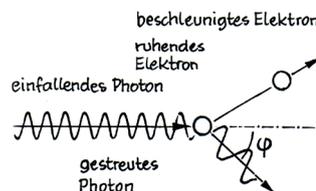
F29 Der Ohm'sche Zusammenhang lautet $R = U/I$, und somit gilt $U = I \cdot R = 0,03 \text{ A} \cdot 1000 \Omega = 30 \text{ V}$. Ab dieser Spannung sollte man lieber vorsichtig sein. In der Praxis werden Gefahrenhinweise aber schon ab 24 Volt aufgeführt.

F30 Bei 10000V würde im Extremfall nach $I = U/R$ eine Stromstärke von 10 A durch deinen Körper fließen. Das wäre absolut tödlich. Die Stromstärke bei einem Weidezaun ist aber auf 0,01A begrenzt. Daher ist es zwar für Menschen unangenehm, den Zaun zu berühren, aber trotzdem ziemlich harmlos. Die hohe Spannung ist nötig, um die meist große Zaunlänge von bis zu mehreren Kilometern zu überbrücken. Es ist nur ein Pol an den Zaun angeschlossen. Der Erdnagel wirkt als Erdung und schließt den Stromkreis über die Erde.

F31 Einen elektrischen Schlag bekommst du dann, wenn Strom durch deinen Körper fließt. Dieser fließt aber wiederum nur, weil es eine elektrische Spannung gibt. Deshalb wird der elektrische Schlag sowohl durch den Strom als auch durch die Spannung verursacht.

26 Grundlagen der elektromagnetischen Wellen

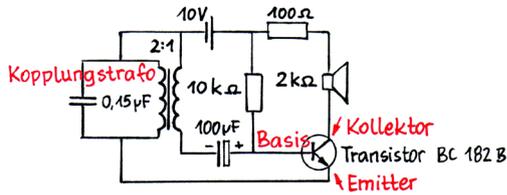
F15 Als Compton-Effekt bezeichnet man einen Prozess, bei dem die Wellenlänge der Photonen bei der Streuung an den Elektronen um einen Wert $\Delta \lambda$ vergrößert wird (Abb.). Das bedeutet, dass die Photonen dabei Energie an die Elektronen abgeben, wodurch die Photonen-Frequenz sinkt. Compton-Streuung tritt immer dann auf, wenn die Energie des Photons mit der Ruheenergie des Elektrons vergleichbar ist, also bei etwa 100 keV bis ca. 10 MeV. Das ist nur bei Röntgen- oder Gammastrahlung der Fall.



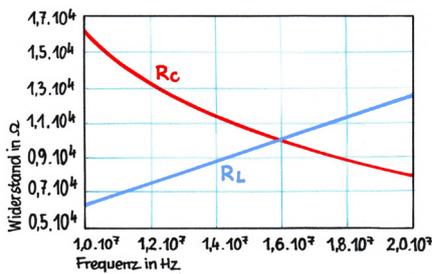
F16 Es wird zwischen 87,5 und 108 MHz gesendet. Wenn man diese Werte in die Thomson'sche Formel einsetzt und nach C auflöst, erhält man $2,17 \cdot 10^{-14}$ bis $3,31 \cdot 10^{-14} \text{ F}$.

F17 Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiterbauelement, das zum Schalten und Verstärken von Strömen und Spannungen verwendet wird. Er hat die Schichtfolge npn oder pnp. Der Kollektorstrom ist um ein Vielfaches größer als der Basisstrom. Durch den Kopplungstrafo, dessen zweite Spule gleichzeitig jene des Schwing-

kreises ist, wird die Basis des Transistors im richtigen Moment mit positiver Spannung versorgt und kann über den Emitter dem Schwingkreis elektrische Energie zuführen. Die Werte sind hier so gewählt, dass ein hörbarer Ton entsteht (Abb.). Obwohl diese Anordnung ziemlich komplex ist, macht sie trotzdem nichts anderes, als das System Pendel, Anker und Gewichte in einer Pendeluhr, nämlich zum richtigen Zeitpunkt dem System Energie zuzuführen und somit eine ungedämpfte Schwingung zu erzeugen.



F18 Die Berechnung ergibt $1,59 \cdot 10^7$ Hz (siehe Abb.).



F19 Wenn du dein Ende der Stange bewegst, komprimiert sich das Material etwas, und diese Kompressionswelle kann mit maximal Lichtgeschwindigkeit durch die Stange laufen, erst dann kann sich das Ende auf dem Mond bewegen. Du erzeugst also eine Longitudinalwelle. Gäbe es eine völlig unkomprimierbare Substanz, so würden sich beide Enden gleichzeitig bewegen, und du könntest Information zum Mond – und überall hin – unendlich schnell übertragen. Die Relativitätstheorie verbietet also interessanterweise indirekt, dass es unkomprimierbare Stoffe gibt und somit „Stangentelefone“, die schneller als herkömmliche Handys sind, denn diese übertragen mit Lichtgeschwindigkeit!

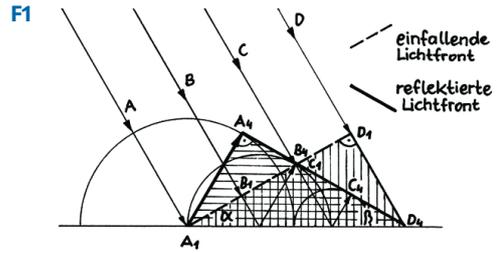
F20 a) Am Rand können die Elektronen nicht schwingen, weil sie sonst aus der Antenne austreten würden.

b) Weil sich die Enden der Antenne wie die Platten des Kondensators wechselweise unterschiedlich laden, sagt man zu ihr auch Dipol! Die Stromstärke in der Mitte der Antenne hat einen Schwingungsbauch (maximale Amplitude) und ist am Rand null (Amplitude null). Das ist die Grundschwingung einer stehenden Welle. Die Länge dieser Grundschwingung entspricht der halben Wellenlänge ($\lambda/2$) der fortschreitenden elektromagnetischen Welle, und daher kommt die Bezeichnung „ $\lambda/2$ -Dipol“.

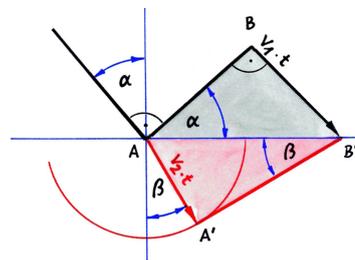
c) Die Grundschwingung einer schwingenden Saite entspricht ebenfalls einer stehenden Welle mit der halben Wellenlänge (siehe Kap. 13.5; „Big Bang 1“). Allerdings ist diese Schwingung transversal. Auch die Grundschwingungen in einer beidseitig geschlossenen Röhre entsprechen einer stehenden Welle mit der halben Wellenlänge. Diese Schwingung ist wie beim $\lambda/2$ -Dipol longitudinal.

F21 Die Empfangsantenne beginnt selbst zu strahlen, so wie auch ein Resonanzkörper bei einem Musikinstrument Schall abstrahlt. Dadurch ist aber die Schwingung sehr stark gedämpft. Bei einer stark gedämpften Schwingung ist wiederum das Resonanzverhalten nicht sehr scharf ausgeprägt (siehe Abb. 26.22 c + d). Mit anderen Worten: Der Unterschied zwischen der idealen und nicht-idealen Anregungsfrequenz macht nicht so einen großen Unterschied.

27 Einige Licht-Phänomene



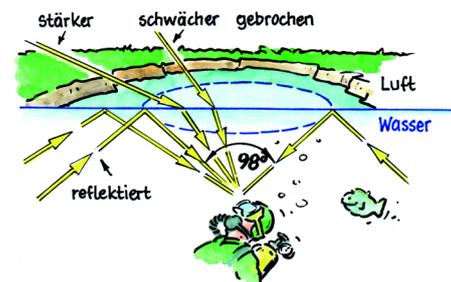
F3 Nimm an, dass eine Wellenfront mit v_1 auf ein anderes Medium trifft, in dem die Geschwindigkeit kleiner ist (v_2). Der linke Strahl in der Abbildung ist bereits bei A aufgetroffen und hat im neuen Medium eine Elementarwelle erzeugt (rot). Der rechte Strahl hat gerade die Grenze bei B' erreicht. Seine „Elementarwelle“ ist daher noch ein Punkt. Die neue Wellenfront ist die Einhüllende und somit die Tangente von B' an die Elementarwelle.



Jetzt brauchen wir nur noch drei Dinge: 1) Der Weg ist allgemein $v \cdot t$. Deshalb können wir die Wege BB' und AA' durch diesen Ausdruck ersetzen. 2) Aus geometrischen Gründen kann man die Winkel zum Lot auch in den Dreiecken ABB' und $AA'B'$ einzeichnen. 3) Der Sinus eines Winkels ist Gegenkathete durch Hypotenuse. Und nun setzen wir ein:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{BB'}{AA'} = \frac{v_1 \cdot t}{v_2 \cdot t} = \frac{v_1}{v_2}$$

F7 Man kann nur unter einem Öffnungswinkel von rund 98° aus dem Wasser sehen (siehe Abb. und \rightarrow F29), weil flacher auf das Wasser treffende Strahlen totalreflektiert werden. Weil die Brechung der Strahlen umso stärker ist, je flacher sie auf die Wasseroberfläche treffen, wird die Oberwasserwelt zusammengestaucht.



F27 Sichtbares Licht regt in den Atomen und Molekülen des Glases die Elektronen zu Quantensprüngen an. IR bringt aber die Atome als Ganzes zum Schwingen. Diese Schwingung bedeutet eine Erwärmung des Glases. Die EM-Welle wird also absorbiert und ihre Energie in Wärme umgewandelt.

$$\text{F29} \quad \frac{\sin \alpha}{\sin 90} = \frac{\sin \alpha}{1} = \frac{c_1}{c_2} \Rightarrow \alpha = \arcsin \left(\frac{c_1}{c_2} \right)$$

Für Wasser und Luft ergibt das $48,8^\circ$ und für Quarzglas und Luft $42,5^\circ$ (siehe auch \rightarrow F7).

F30 Schwarz bei der additiven Farbmischung bedeutet, dass keine Pixel leuchten. Du siehst dann das nackte Display – dunkler geht es nicht. Bei der subtraktiven Farbmischung bedeutet Weiß, dass man den Hintergrund sieht, also das nackte Blatt. Wenn der Farbdruck auf gefärbtem Papier erfolgt, dann gibt es kein Weiß.

F31 Durch die Schwerkraft ist die Lamelle unten dicker als oben, bildet also einen Keil. Dadurch wird von oben nach unten der zusätzlich zurückgelegte Weg (ACB in Abb. 27.31) immer größer, wodurch jeweils andere Farben verstärkt und ausgelöscht werden. Daher das vertikale Streifenmuster. Oben ist die Lamelle schwarz, also superdünn, und wird bald reißen.

F32 Bei Brillen und Objektiven möchte man Doppelbilder natürlich vermeiden. Diese könnten durch Mehrfachreflexionen im Glas entstehen, ähnlich wie in Abb. 27.31. Deshalb werden Glasoberflächen entspiegelt. Das geschieht durch eine dünne aufgedampfte Schicht eines durchsichtigen Materials, das eine kleinere optische Dichte als das Glas besitzt. Dadurch kommt es an beiden Grenzschichten zum Phasensprung. Wenn die Schichtdicke genau bei $\lambda/4$ einer bestimmten Wellenlänge liegt, beträgt somit der Gangunterschied $\lambda/2$. Diese Farbe wird durch destruktive Interferenz aus dem Spektrum gelöscht. Meistens stimmt man diese Schicht auf grünes Licht ($\lambda = 550 \text{ nm}$) ab. Die benötigte Schichtdicke beträgt daher knapp 140 nm . Im Reflexlicht fehlt Grün und der Rest leuchtet in der Komplementärfarbe Purpur.

F33 Diese verspiegelten Kunststofffolien sind durchsichtig, weil die Metallschicht extrem dünn ist. Der Effekt ist ähnlich wie bei Blattgold und belegt, dass sehr dünne Metallschichten durchsichtig sind.

28 Energieübertragung durch EM-Wellen

F18 Um eine Röntgenaufnahme zu machen, muss das Objekt zwischen Röntgenquelle und Aufnahmeggerät sein (Abb. 28.16). Selbst wenn Superman mit seinen Augen Röntgenstrahlen erzeugen könnte, müsste er dann mit Überlichtgeschwindigkeit auf die andere Seite laufen, damit er sie wieder empfangen kann. Natürlich könnte er die Rückstreutechnik verwenden. Dann könnte er zwar angezogene Menschen nackt sehen, aber nicht durch Wände, wie im Film immer dargestellt.

F21 Nein. Das sichtbare Licht der Leuchtstoffröhren ist kein Effekt der Temperaturstrahlung. Gase senden Linienspektren aus (Abb. 32.12) und können daher bei Zimmertemperatur, je nach Gasart, in jeder beliebigen Farbe leuchten.

F22 Wenn du in einem Wasserbecken eine große Welle erzeugst und wartest, dann wird sich diese nach einer gewissen Zeit in immer kleinere Wellen aufteilen. Warum? Weil sich die Energie auf alle Arten von Wellen aufteilt, und von den kleinen Wellen passen viel mehr hinein. Diese Aufteilung der Energie müsste nach klassischer Ansicht auch mit Licht im Inneren eines Hohlkörpers erfolgen. Die klassische Kurve in Abb. 28.6 geht daher bei kurzen Wellenlängen Richtung unendlich. Es müsste UV-Licht entstehen und dann sogar Röntgen- und Gammastrahlung. Man spricht daher von einer Ultraviolett Katastrophe. Tatsächlich tritt sie aber nicht ein. Kurzwellige Photonen besitzen eine höhere Energie und daher können zwar beliebig viele kurze Wasserwellen, aber nicht beliebig viele kurze Lichtwellen entstehen.

F23 Wäre das Universum ein völlig perfekter Schwarzer Strahler, wäre es auch völlig homogen. Wäre es völlig homogen, dann hätten aber auch keine Galaxienhaufen entstehen können, denn diese weichen ja augenscheinlich von der Homogenität ab. Die leichten Schwankungen im Schwarzkörperspektrum (Abb. 28.7) sind also quasi die Kondensationskeime zur Entstehung von Strukturen und somit auch des Lebens gewesen.

F24 Die Sonne sendet ja kein Linienspektrum aus, sondern eine Mischung aus allen Farben. Das Maximum des Sonnenlichts liegt zwar im grünblauen Bereich (Abb. 28.5), aber die Mischung aller Farben nehmen wir trotzdem als gelb-weiß wahr. Aus diesem Grund kann ein Schwarzer Strahler für unsere Augen niemals grün sein.

F25 In den Nahrungsmitteln selbst stellte man nur Veränderungen fest, die auch bei anderen Kochmethoden auftreten. Beim Erwärmen von Gemüse hat die Mikrowelle sogar den Vorteil, dass weniger Flüssigkeit verloren geht und durch die kurze Kochzeit mehr Vitamine erhalten bleiben. Die wohl einzige Gefahr sind Salmonellen. Diese werden erst ab etwa 70°C abgetötet. Beim Auftauen kann es leicht passieren, dass in der Mitte der Speise diese Temperatur nicht überschritten wird.

F26 Die Frequenzveränderung beträgt $\Delta f \approx 2f \cdot (v_{\text{Obj}}/c)$. Bei 150 km/h ($41,67 \text{ m/s}$) beträgt die Frequenzveränderung daher $555,6 \text{ Hz}$.

F27 Nicht jeder schwarze Gegenstand muss zwangsläufig auch ein Schwarzer Körper im Sinne des physikalischen Fachbegriffs sein. Es kann zum Beispiel sein, dass das Objekt zwar im sichtbaren Wellenlängenbereich die Strahlung sehr gut absorbiert, im Infraroten aber schlecht. In diesem Fall wäre das Objekt schwarz, aber kein Schwarzer Strahler. Umgekehrt können aber nicht schwarze Objekte in sehr guter Näherung Schwarze Strahler sein. Das trifft zum Beispiel auf alle Sterne zu.

F28 Die Farbe der Sonne hängt ausschließlich von ihrer Oberflächentemperatur ab, die wiederum eine Folge der Kernfusion tief im Inneren ist. Das Licht des Scheinwerfers wird, wie das eben Schwarze Strahler machen, vollkommen absorbiert. Es ändert aber an der Oberflächentemperatur nichts und somit auch nicht an der Farbe der Sonne.

F29 Nein! Wärmestrahlung ist elektromagnetische Strahlung, die ein Körper aufgrund seiner Temperatur aussendet. Das ist ja bei der Erzeugung der EM-Wellen durch ein Magnetron nicht der Fall. Außerdem werden hier nur Wellen in einem sehr eng begrenzten Frequenzbereich erzeugt.

F30 Der 2. Hauptsatz der Wärmelehre besagt, dass Wärme nur von selbst von Orten mit höherer Temperatur auf solche mit niedrigerer Temperatur überfließt. Das gilt auch für die Temperaturstrahlung. Deshalb kann der Brennpunkt niemals eine höhere Temperatur bekommen als die Sonnenoberfläche. Er kann maximal so heiß werden wie diese.

29 Informationsübertragung durch EM-Wellen

F10 CDs und DVDs soll man von innen nach außen putzen, damit dabei eventuell entstehende Kratzer quer zu den Daten-Spuren liegen. Befindet sich der Kratzer genau in Spurrichtung, wird eine längere Datenstrecke unlesbar gemacht und kann trotz Redundanz nicht mehr richtig rekonstruiert werden.

F20 Ja, aber nur selten! Damit ein Gespräch zustande kommen kann, muss der Hauptverbindungsrechner des Netzbetreibers ständig wissen, in welcher Funkzelle (Abb. 29.18) sich das Handy gerade befindet. Dazu meldet es sich zunächst beim Einschalten an und meldet sich anschließend in regelmäßigen Abständen. Erfolgen keine nennenswerten Ortsveränderungen, so werden lediglich etwa jede halbe Stunde Impulse von weniger als einer Sekunde ausgesendet. Die Abstände werden kürzer, wenn man sich über größere Entfernungen bewegt und dabei Funkzellen wechselt. Lege ein eingeschaltetes Handy auf ein Radiogerät. Anhand der Geräusche beim Senden kannst du diese Signale überprüfen.

F22 Die Dezimalzahl 123 ist binär dargestellt 01111011. Probe: $1 + 2 + 8 + 16 + 32 + 64 = 123$. Nun verknüpfen wir die zu übertragende Information mit dem Spreizcode. Dazu musst du das zu übertragende Signal vorher ebenfalls aufspreizen, nämlich auf 11111111 00000000. Dann geht es los:

	11111111	XOR	01111011	=	10000100
	00000000	XOR	01111011	=	01111011
Probe:	10000100	XOR	01111011	=	11111111
	01111011	XOR	01111011	=	00000000

F24 1. Wenn man Sprache oder Musik direkt aussenden wollte, gäbe es landesweit nur ein einziges „Programm“, weil dieses den kompletten Niederfrequenzbereich beanspruchen würde. Jedes andere Programm würde den gleichen Frequenzbereich belegen und stören. Es wäre so, also würden viele Menschen gleichzeitig sprechen und nebenbei spielen gleichzeitig einige Bands.
 2. Es gilt $\lambda = c/f$. Je kleiner die Frequenz, desto größer ist die Wellenlänge und desto länger muss die Antenne sein. Würde man also in Niederfrequenz senden, wären riesige Antennen erforderlich.
 3. Der Empfängerschwingkreis kommt nur dann in Resonanz, wenn er genau auf die Sendefrequenz eingestellt ist. Würde man Sprache oder Musik direkt senden, könnte man den Empfangskreis nicht gut oder gar nicht auf die Frequenz abstimmen.
 4. Stereoübertragung wäre nicht möglich, weil dazu die Signale beim Empfänger wieder getrennt werden müssen.
 5. Die Vielfachnutzung einer Lichtwellenleiter- oder Funkverbindung für einige Hundert gleichzeitig geführter Telefongespräche oder mehrerer Fernsehprogramme wäre ohne raffinierte Modulationsverfahren undenkbar.

F25 Die Aussage, dass das Innere feldfrei ist, gilt nur für elektrostatische Felder, nicht aber für elektromagnetische Wechselfelder. EM-Wellen können in das Auto sowohl eindringen als auch aus diesem ausstrahlen. Wenn das nicht so wäre, könnte man in ein Auto weder hinein- noch aus diesem hinaussehen, weil auch Licht eine EM-Welle ist. Außerdem wäre es dann unmöglich, im Auto mit dem Handy zu telefonieren (natürlich wegen der Verkehrssicherheit nur über Freisprechanlage!).

30 Welle und Teilchen

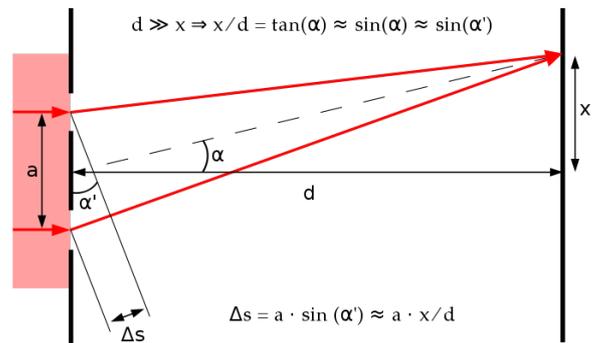
F10 Einstein bekam 1921 den Nobelpreis für seine Erklärung des Photoeffektes. Auch für seine Relativitätstheorie hätte er den Preis mehr als verdient, aber die war damals dem Komitee offenbar noch nicht ganz geheuer.

F13 Rote Lichtphotonen haben über den Daumen nur halb so viel Energie wie blaue (siehe Tab. 30.1). Sie sind daher nicht in der Lage, das Fotopapier chemisch zu verändern und somit zu schwärzen.

F17 Im Grunde ist ein Teilchenbeschleuniger etwas Ähnliches wie ein Elektronenmikroskop. Damit man eine gute „Auflösung“ bekommt (Abb. 30.21), braucht man kurze Wellenlängen. Dazu muss man aufgrund der De-Broglie-Wellenlänge die Teilchen sehr stark beschleunigen und benötigt daher dementsprechend große Teilchenbeschleuniger.

F24 a) Aus der Abbildung unten ergibt sich $\sin \alpha = \Delta s/a$ und $\tan \alpha = x/d$. Weil der Schirm sehr weit weg ist, kann man die Annäherung für kleine Winkel anwenden, also $\sin \alpha \approx \tan \alpha$. Daraus folgt $x \approx (s \cdot d)/a$. Das erste Nebenmaximum auf dem Schirm, also den ersten hellen Streifen abseits der Mitte, findet man gerade dort, wo der Gangunterschied s der beiden Wellen genau λ beträgt. Für den Ort des ersten Nebenmaximums ergibt sich damit

$x_H = (d \cdot \lambda)/a$. Dieser Abstand gilt in Näherung auch zwischen den weiteren Nebenmaxima – zumindest in der Nähe der Mitte. Weiter außen wird der Abstand aber dann größer, wie du in Abb. 30.12 gut sehen kannst.



Verhältnisse beim Doppelspalt

b) Aus **F24 a** folgt $x_H \sim \lambda$. Je kleiner die Wellenlänge wird, desto kleiner wird der Abstand der Streifen. Weil die Wellenlängen, die man Materieteilchen zuordnen kann, sehr klein sind (siehe Tab. 30.2), sinkt dadurch auch der Abstand der „Helligkeitsmaxima“ stark ab. Bei Fußballmolekülen liegen die Streifen um den Faktor 10^6 enger beieinander als bei Licht, und das macht die Experimente natürlich extrem haarig.

F25 Da Elektronen als Welle eine viel kleinere Wellenlänge besitzen als sichtbares Licht, können auch Objekte weit kleiner als ein Mikrometer betrachtet werden. Der Vergrößerungsfaktor kann bis zu 300 000 betragen (100 000 beim Rasterelektronenmikroskop). Tiefenschärfe und Plastizität des Bildes sind klare Vorteile. Die Präparation ist aber aufwendig (sehr dünne Probenschichten bei Transmissionstechnik), die Probe muss chemisch präpariert werden bzw. erhält einen Metallüberzug, es wird Hochvakuum benötigt, die Probe muss wasserlos und darf nicht lebendig sein. Die Kosten und der apparative Aufwand sind hoch. Logischerweise sind die Bilder nicht farbig und müssen nachkoloriert werden.

F26 Man kann den Spalt in Gedanken in zwei Teile teilen. Die Strahlen aus den beiden Hälften interferieren dann miteinander. Eine dunkle Stelle findest du am Schirm dort, wo es zu jedem Strahl aus der einen Hälfte einen Strahl aus der anderen Hälfte gibt, der einen Gangunterschied von $\lambda/2$ aufweist. Dann kommt es zur destruktiven Interferenz. Geht man noch weiter nach außen, beträgt der Gangunterschied eine ganze Wellenlänge, was zur konstruktiven Interferenz führt. Man spricht vom 1. Nebenmaximum.

F27 Es gibt viele Erhaltungssätze, die durch die Entstehung von Teilchen aus dem Nichts nicht verletzt werden dürfen. Einer davon ist, dass die Ladung in einem abgeschlossenen System immer konstant sein muss. Wenn ein Elektron ($-$) und ein Positron ($+$) entstehen, dann bleibt die Gesamtladung erhalten, weil sich $+$ und $-$ aufheben. Würden aber zum Beispiel zwei Elektronen entstehen, dann würde sich die Nettoladung verändern, und das ist nicht möglich. Aus diesem Grund können immer nur Teilchen-Antiteilchen-Paare entstehen, weil diese entweder elektrisch neutral sind oder gegengleich geladen.

F28 Rechnen wir in Größenordnungen und nehmen für deine Masse wahrscheinlich etwas hoch gegriffen 10^2 kg an. Die Tür soll eine Breite von 1 m haben, wodurch Δx 0,5 m entspricht. Für die Geschwindigkeitsunschärfe ergibt sich dann:

$$\Delta v \geq \frac{h}{4\pi \cdot m \cdot \Delta x} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{4\pi \cdot 100 \cdot 0,5} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 10^{-38} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Diese Geschwindigkeitsunschärfe ist zu vernachlässigen und für dich im Alltag auch nicht bedrohlich.

$$F29 \Delta v \geq \frac{h}{4\pi \cdot m \cdot \Delta x} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{4\pi \cdot 10^{-30} \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{m}{s} \approx 100 \frac{m}{s}$$

Die Geschwindigkeitsunschärfe nach dem Durchgang durch den Spalt ist 20-mal so groß wie die Geschwindigkeit des Teilchens. Die weitere Bahn ist überhaupt nicht vorherzusagen.

F30 In diesem Fall ergibt die Rechnung eine Unschärfe von etwa $10^{-4} m/s$. Das Teilchen fliegt also mehr oder weniger gerade weiter, allerdings in dem breiten Korridor von 1 m. Auch hier kann man schwer von einer Bahn sprechen (vergleiche mit F29).

F31 Für die Geschwindigkeits-Ort-Unschärfe ergibt sich

$$\Delta v \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi \cdot m} = 5 \cdot 10^{-38} Js = 2,3 \cdot 10^{-19} \frac{m}{s} \cdot 2,3 \cdot 10^{-19} m$$

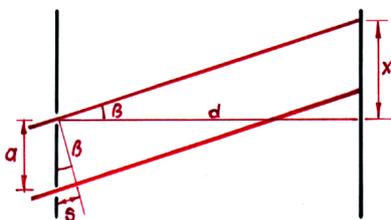
Die Unschärfen für Δv und Δx liegen also zahlenmäßig im Bereich von 10^{-19} . Bei großen Objekten ist die Messgenauigkeit also nicht durch die Unschärferelation begrenzt, sondern nur durch messtechnische Probleme.

F32 Die Energie von Photonen ergibt sich aus $E = h \cdot f$ (Kap. 30.3). Aus der Relativitätstheorie ergibt sich für Photonen des Weiteren der Zusammenhang $E = p \cdot c$ (dabei ist p der Photonenimpuls). Weiter gilt $c = f \cdot \lambda$. Wenn man diese drei Gleichungen kombiniert, erhält man:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{E/p}{E/h} = \frac{h}{p}$$

De Broglies kühne, aber später bestätigte Hypothese war es, dass der Zusammenhang $\lambda = h/p$ nicht nur für Photonen gilt, sondern auch für Materieteilchen.

F33 Wenn der Beobachtungsschirm relativ weit vom Doppelspalt entfernt ist, ist der Winkel β zum Beobachtungspunkt von beiden Spalten aus derselbe. Man kann dann also mit folgendem Bild arbeiten (Abb.):



Dabei ist a der Spaltabstand, d der Abstand des Beobachtungsschirms vom Doppelspalt, x die Entfernung des Beobachtungspunktes auf dem Schirm vom Mittelpunkt und s der Gangunterschied der Wellen von den beiden Spalten zum Beobachtungspunkt. Aus der Abbildung ergibt sich: $\sin \beta = s/a$ und $\tan \beta = x/d$. Weil der Schirm sehr weit weg ist, kann man die Annäherung für kleine Winkel anwenden, also $\sin \beta \approx \tan \beta$. Daraus folgt $x \approx (s \cdot d)/a$. Ein Maximum auf dem Schirm findet man gerade dann, wenn der Gangunterschied s der beiden Wellen ein ganzzahliges Vielfaches einer ganzen Wellenlänge ist ($s = n \cdot \lambda$). Für die Orte der Maxima findet man also:

$$x_{\max n} = n \cdot \lambda \cdot \frac{d}{a}$$

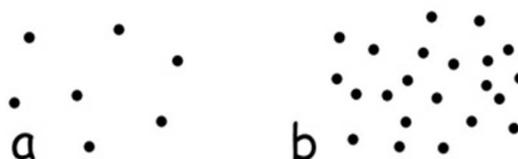
Ein Minimum findet sich auf dem Schirm, wenn der Gangunterschied ein ungerades Vielfaches der halben Wellenlänge ist:

$$x_{\min n} = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{d}{a}$$

F34 Plausibel wird die Speckle-Entstehung, wenn man die Unebenheiten der beleuchteten Oberfläche als neue Streuzentren betrachtet. Von diesen gehen Kugelwellen unterschiedlicher Phase aus, die dann auf der Netzhaut interferieren. Dabei entsteht eine räumliche Struktur mit zufällig verteilten Intensitätsminima und -maxima. Die Voraussetzung für das Auftreten von Speckle-Mustern ist, dass die Oberfläche Rauheiten in der Größenordnung

der Wellenlänge des Laser-Lichts aufweist (bei sichtbarem Licht: einige 100 nm). Bei extrem glatten Flächen tritt das Speckle-Muster daher nicht oder kaum auf.

F35 Bei der Ausbreitung von Licht ist in diesem Fall die Energie nicht kontinuierlich über den Raum verteilt, sondern in einer endlichen Zahl von Energiequanten lokalisiert. Licht ist also ein Strom von Energiepaketen. Bei gleicher Frequenz bedeutet intensiveres Licht das Auftreten von mehr Lichtquanten pro Zeiteinheit, aber nicht das Auftreten von energiereicheren Photonen.



Licht mit geringerer (a) und höherer Intensität (b) im Teilchenmodell

F36 a) Man könnte ja glauben, dass die Heisenberg'sche Unschärferelation eine Folge des Unvermögens der Physiker ist, Impuls und Ort eines Teilchens experimentell gleichzeitig beliebig exakt zu messen. Wie aber das Beispiel in der INFO Frequenzunschärfe zeigt, tritt das Problem auch dann auf, wenn man gar keine Messung vornimmt, sondern lediglich versucht, gleichzeitig den Wellen- und Teilcheneigenschaften eines Photons mathematisch gerecht zu werden. Die Unschärferelation gibt also eine Eigenschaft des Universums an und tritt auch ohne Messung auf. b) Es gibt eine Grenze dessen, was wir über das Universum wissen können, und diese ist durch die Unschärferelation bestimmt. Eine genauere Bestimmung ist nicht möglich, und zwar nicht, weil die Messapparaturen schlecht gebaut sind, sondern weil sich das Universum quasi auf einer quantenmechanischen Ebene nicht genau in die Karten schauen lässt.

31 Das moderne Atommodell

F18 Natrium: $[Ne]3s^1$, ein Valenzelektron; Chlor: $[Ne]3s^23p^5$, 7 Valenzelektronen; Brom: $[Ar]4s^2(3d^{10})4p^5$, 7 Valenzelektronen; Argon: $[Ne]3s^23p^6$, 8 Valenzelektronen; Krypton: $[Ar]4s^2(3d^{10})4p^6$, 8 Valenzelektronen.

F19 Die letzte Gruppe ganz rechts im Periodensystem bezeichnet man als Edelgase. Diese sind farb-, geruchlose und atomare Gase, die kaum Verbindungen eingehen. Der Grund hierfür ist, dass die Energieniveaus des Atoms abgeschlossen, das heißt vollständig mit Elektronen aufgefüllt sind. Die vorletzte Gruppe im Periodensystem nennt man Halogene. Diese sind sehr reaktionsfreudig, weil nur noch ein Valenzelektron zur Vollbesetzung der Schale fehlt.

F20 Pro Schale sind maximal $2 \cdot n^2$ Elektronen möglich (n = Hauptquantenzahl). Auf der ersten Schale finden also 2 Elektronen Platz, auf der zweiten 8, auf der dritten 18, auf der vierten 32 und so weiter.

F21 Welche Naturkonstanten kommen in der Formel

$$f_R = \frac{m_e \cdot e^4}{8 \epsilon_0^2 \cdot h^3}$$

vor? Die Masse eines Elektrons (m_e), die Ladung eines Elektrons (e), die elektrische Feldkonstante (ϵ_0) und das Planck'sche Wirkungsquantum (h).

F22 Der gesunde Menschenverstand sagt, dass $\Delta x \leq x$ sein muss. Zum Beispiel ist die Angabe, in der runden Box befinden sich 200 ± 20 Kugeln, sinnvoll. Die Angabe 200 ± 210 Kugeln ist sinnlos, weil ja dann zwischen -10 und 410 Kugeln in der Box wären, und was soll man sich unter -10 Kugeln vorstellen? Ähnlich ist es mit Impuls und Impulsunschärfe. Die Impulsunschärfe kann nie größer werden als der eigentliche Wert. Daraus folgt aber, dass mit dem

Wachsen der Unschärfe zwangsläufig auch der Impuls wachsen muss (siehe INFO Lokalisationsenergie, Kap. 31.2). Dafür gibt es aber leider keine Analogie mit Kaugummikugeln.

F23 Gold hat eine Massenzahl von etwa 197. Daher ergibt sich für den Durchmesser des Gold-Atomkerns

$$d = 2r \approx 2,4 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A} \approx 1,4 \cdot 10^{-14} \text{ m.}$$

F24 Ein Mol Gold hat 197 g. Die Dichte ρ von Gold beträgt $19,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ oder $19300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Aus $\rho = m/V$ folgt $V = m/\rho$. Das Volumen von 1 Mol Gold beträgt daher $0,197 \text{ kg} / (19300 \text{ kg/m}^3) \approx 10^{-5} \text{ m}^3$. Das Volumen eines einzelnen Goldatoms beträgt daher $10^{-5} \text{ m}^3 / (6 \cdot 10^{23}) = 1,7 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$. Die Seitenlänge des „Gold-Würfels“ und somit auch sein Durchmesser beträgt

$$d = \sqrt[3]{1,7 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3} = 2,6 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

F25 Das Verhältnis Atom zu Atomkern beträgt bei Gold

$$\frac{2,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}}{1,4 \cdot 10^{-14} \text{ m}} \approx 18400 : 1.$$

Wenn der Kern 1 cm groß wäre, dann wäre das gesamte Goldatom 18600 cm oder 186 m groß.

F26 Wenn etwa 50000 Teilchen um 20° abgelenkt werden, dann werden statistisch gesehen nur rund 50 Teilchen um 120° abgelenkt. Das Verhältnis beträgt also 1000 : 1. Daraus kann man schließen, dass sehr viele Teilchen durch die Goldfolie fliegen müssen, damit man auch sehr starke Ablenkungen messen kann.

F27 a) Darunter versteht man die potenzielle Energie eines einzigen Elektrons, wenn dieses im Spannungsfeld von 1V verschoben wird. Seine Energie beträgt dann

$$E_{\text{pot}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1\text{V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV.}$$

b) Man kann ohne Rechnung überlegen. 1 eV ist die Energie, die nötig ist, um 1 Elektron im Spannungsfeld von 1V zu verschieben. Wenn für die Ablösung des Elektrons 13,6 eV notwendig sind, muss das Spannungsfeld auch 13,6V betragen. Oder rechnerisch: Zum Ablösen des Elektrons ist eine Energie von 13,6 eV notwendig. Aus $E_{\text{pot}} = Q \cdot U$ folgt daher $U = E_{\text{pot}}/Q = 13,6 \text{ eV}/1e = 13,6\text{V}$.

F28 Es gibt keinen „wirklichen“ Atomradius. Das Orbital dünnt sich salopp gesagt nach außen hin immer weiter aus, endet aber so gesehen niemals. Ein Atom hat also keine Haut und es ist Geschmackssache, wo man den Radius definiert. Beim Wasserstoffatom gibt man meistens den Bohr'schen Radius an, bei dem die radiale Wahrscheinlichkeitsdichte am größten ist.

32 Licht als Träger von Energie

F1 Nehmen wir vereinfacht an, dass die ausgesendeten Photonen eine durchschnittliche Frequenz von $5,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ haben (siehe Tab. 30.1). Nach $E = h \cdot f$ haben sie daher eine Energie von etwa $3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. 10W entsprechen 10J/s. Bei einem geschätzten Wirkungsgrad von 20% ist die Lichtleistung daher 2J/s, und dafür braucht man $5,5 \cdot 10^{18}$ Photonen pro Sekunde, also 5,5 Trillionen Photonen. Beachtlich!

F18 Man kann erkennen, ob der Stern ein Magnetfeld besitzt oder nicht (Zeeman-Effekt, siehe Kap. 31.4), weiter seine Temperatur und die Zusammensetzung seiner Atmosphäre (siehe Kap. 32.1).

F19 Wenn ein Stern sehr heiß ist, dann ist die maximale Strahlungsintensität in den ultravioletten Bereich geschoben. Den Großteil der ausgesendeten Strahlung kannst du gar nicht sehen, aber der Stern sieht auf einem Foto blau aus.

F20 Die Leuchtstoffröhre! Das liegt daran, dass eine Glühbirne 95% der elektrischen Energie in Wärme umwandelt und nur 5% in Licht. Wegen dieser geringen Effizienz wurde der Verkauf innerhalb der EU verboten. Bei einer Leuchtstoffröhre werden immerhin rund 20% in Licht umgewandelt. Bei gleicher Leistung gibt also eine Leuchtstoffröhre wesentlich mehr sichtbares Licht ab als eine Glühbirne.

F21 Der Vorteil des blauen Lasers ist seine kürzere Wellenlänge. Deshalb können Blu-ray-Discs noch viel dichter beschrieben werden als DVDs (siehe Abb. 32.29). Während auf eine DVD maximal 8,5GB passen, lassen sich auf einer Blu-ray-Disc bis zu 50GB an Daten unterbringen.

F22 Dass sich der Mond durch die Gezeitenreibung jedes Jahr rund 3,8cm von der Erde entfernt.

F23 Photonen sind Bosonen! Wären sie Fermionen, dann könnte es ja kein Laserlicht geben, denn dieses besteht aus völlig identischen Lichtteilchen, die sich in beliebig großer Zahl an einer bestimmten Stelle befinden können – das können nur Bosonen.

F24 In der klaren Luft kann man Laserstrahlen nicht von der Seite sehen. Erst durch den Nebel werden sie sichtbar.

F25 Es gilt $\Delta E = h \cdot f$. Andererseits gilt $c = f \cdot \lambda$ und daher $f = c/\lambda$. Daraus folgt $\Delta E = h \cdot c/\lambda$. Wenn man nun die Wellenlängen an den Grenzen des sichtbaren Bereichs einsetzt, erhält man rund $5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ bzw. $2,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Ein eV entspricht $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Man kann daher generell die Photonen von Quantensprüngen sehen, bei denen die Differenz der Energieniveaus zwischen etwa 1,6 und 3,1eV liegt.

F26 Im Prinzip handelt es sich hier um das typische Esoterik-Blabla. Was immer damit auch gemeint sein soll, der Begriff „Quantensprung“ ist auf jeden Fall falsch verwendet, nämlich für einen großen oder ungewöhnlichen Fortschritt, eine neue Stufe einer Entwicklung. In der Physik bezeichnet man als Quantensprung die Änderung des Energieniveaus eines Quants, also etwas extrem Winziges.

F27 a) Aus $E = h \cdot f$ folgt $\Delta E = h \cdot \Delta f$. Außerdem folgt aus $\Delta E \cdot \Delta t \approx h/13$ wiederum $\Delta E \approx h/(13 \cdot \Delta t)$. Durch Gleichsetzen und Umformen erhält man $\Delta f \approx 1/(13 \cdot \Delta t)$. Wenn man Δt mit 10^{-8} s annimmt, ergibt sich für Δf etwa 10^7 s^{-1} . Weil die Frequenz selbst aber bei mindestens 10^{14} s^{-1} liegt, fällt diese Ungenauigkeit nicht ins Gewicht.

b) Die Lichtgeschwindigkeit c beträgt $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Daher gilt $s = c \cdot t = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 10^{-8} \text{ s} = 3 \text{ m}$. Dieser 3 m lange Wellenzug entspricht dem Photon.

F28 Damit an einer bestimmten Stelle zum Beispiel immer ein heller Streifen entsteht, müssten dort die Lichtwellen der beiden Lampen immer konstruktiv oder bei einem dunklen Streifen immer destruktiv interferieren. Dazu braucht man aber kohärentes Licht, das allerdings von einer normalen Lampe nicht ausgestrahlt wird. Mit zwei Lasern könnte man den in Abb. 32.33 dargestellten Effekt tatsächlich erzeugen. Allerdings würden die hellen und dunklen Streifen so nahe beieinander liegen, dass man sie mit freiem Auge trotzdem nicht sehen könnte.

F29 Aus thermodynamischer Sicht würde das spontane Verbrennen des darin chemisch gebundenen Kohlenstoffs mit dem Sauerstoff zu CO_2 zu einem stabileren Zustand führen. Ohne Aktivierung, also eine ausreichend große Energiezufuhr wie das Entzünden des Holzes, wird dies aber nicht passieren. Das unverbrannte Holz plus Sauerstoff entsprechen dabei der Kugel in Abb. 32.21b. Durch Aktivierung, also Hitze, geht das Holz in den verbrannten Zustand über und es entsteht Asche und CO_2 . Deshalb befindet sich das

„System Sauerstoff und Holz“ im metastabilen Zustand – der aber Gott sein Dank doch sehr stabil ist und nie von selbst in den noch stabileren Zustand übergehen kann.

F30 Im Glühdraht einer Lampe kommt es durch die dichte Packung der Atome zur gegenseitigen Beeinflussung der Orbitale. Deshalb erzeugt eine Glühlampe ein kontinuierliches Spektrum (Abb. 32.34 oben). Leuchtende Gase erzeugen Linienspektren (unten).

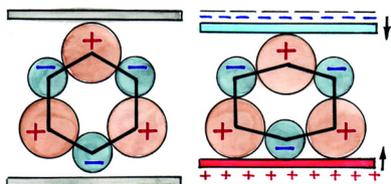
33 Fortgeschrittene Quantenmechanik

F3 Es handelt sich hier um ein Wortspiel. i ist definiert als $\sqrt{-1}$ und eine sogenannte imaginäre Zahl, also keine reale Zahl. Daher also die zweideutige Aufforderung „Werde real!“. π ist eine irrationale Zahl, kann also nicht durch einen Bruch dargestellt werden. Daher die Aufforderung „Werde rational!“, was man aber auch als „Denk doch mal vernünftig!“ interpretieren kann.

F10 Es gibt insgesamt nur 4 Grundkräfte, die in Tab. 1 aufgelistet sind.

Grundkraft (Wechselwirkung)	relative Stärke	Reichweite
Starke Kraft	1	$\approx 10^{-15}$ m
elektromagnetische Kraft	10^{-2}	unendlich
Schwache Kraft	10^{-5}	$\approx 10^{-18}$ m
Gravitation	10^{-38}	unendlich

F16 Die präzise Steuerung der Sonde im Nanometer-Bereich erfolgt durch Piezo-Kristalle in Form einer Röhre. Diese Kristalle haben eine ganz besondere Eigenschaft: Wenn man sie staucht, dann kann man Spannung erzeugen (siehe Abb.).



Das wird beim Zündmechanismus mancher Feuerzeuge oder Gasanzünder verwendet.

Umgekehrt kann man die Länge dieses Kristalls verändern, wenn man unterschiedliche Spannungen anlegt. Und genau so funktioniert die Feinststeuerung bei einem Rastertunnelmikroskop.

F17 Der Begriff **Bit** ist eine Wortkreuzung aus **binary digit**, das bedeutet übersetzt Binärzahl. Ein Bit kann nur die Werte 1 oder 0 annehmen. Alle Computer arbeiten letztlich nur auf Bit-Basis. Ein Byte besteht zum Beispiel aus 8 Bit und mit diesem kann man bereits 256 Zahlen darstellen (2^8 beziehungsweise 0 bis 255). Unter einem **Qubit** versteht man ein **Quantenbit**. Während ein Bit nur die Werte 0 oder 1 haben kann, kann ein Qubit alle Werte von 0 bis 1 gleichzeitig annehmen, weil Quanten in Überlagerungszuständen vorkommen können. Qubits sind die Grundlage der Quantencomputer.

F18 Wenn Alice ihre Messung gleich zu Beginn vornimmt und ihr Ergebnis sofort zu Bob funkt, dann jagt die Nachricht quasi dem Photon nach und beide kommen ziemlich gleichzeitig bei Bob an – nach rund 100 000 Jahren.

F19 Wir wissen aus Erfahrung, dass man niemals lebend tote Katzen sieht! Wir wissen auch, dass man Quanten durch Wellenfunktionen sehr gut beschreiben kann. Dieses mathematische Konzept ist experimentell extrem gut belegt. Mehr wissen wir nicht! Der Rest ist Interpretation und daher Geschmackssache! Jede der Interpretationen liefert einen anderen Blickwinkel auf das Gedankenexperiment, ändert aber am Ergebnis nichts. Nach der Kopenhagener Deutung ist die Katze tatsächlich in einem Mischzustand, solange du nicht in der Box nachsiehst. Erst durch das Nachschauen „entscheidet“ sich, ob die Katze lebendig ist oder nicht. Nach der Viele-Welten-Interpretation siehst du beim Öffnen in einem Universum eine tote und in einem anderen Universum eine lebende Katze. Auch nach der Dekohärenz-Deutung wissen wir zwar erst beim Hineinschauen, ob die Katze tot ist oder nicht. Aber sie war schon vor dem Hineinschauen tot oder lebendig. Das ist der große Unterschied zur Kopenhagener Deutung.

F20 Nein, es handelt sich hier um keinen quantenmechanischen Mischzustand. Die Person, die die Überraschung in einer der Fäuste verborgen hält, weiß ja, in welcher sie sich befindet. Man kann zwar in bestimmten Fällen darüber streiten, wer als Beobachter durchgeht, aber in diesem Fall ist es ganz klar, dass die Person, die die Überraschung in der Faust versteckt hat, als Beobachter gilt.

F21 Das quantengenaue Abtasten wird durch die Heisenberg'sche Unschärferelation verhindert. Also „erfand“ man den „Heisenberg-Kompensator“, der diese Messprobleme ausgleicht (siehe Abb. 30.38).

F22 Ein Mensch hat etwa 10^{28} Atome. Nehmen wir an, dass man zur Beschreibung eines Atoms 1 Kilobyte Daten braucht. Für einen ganzen Menschen bräuchte man daher 10^{28} kB. Das entspricht 10^{25} Megabyte oder 10^{22} Gigabyte. Runden wir auf und sagen, dass auf eine normale DVD 10 GB Daten passen. Die Datenmenge, um einen Menschen exakt zu beschreiben, beträgt daher 10^{21} oder 1 Trilliarde volle DVDs. Eine DVD hat rund 1 mm Höhe. Wenn man diese DVDs stapelt, dann kommt man auf 10^{18} m oder 100 Lichtjahre ($1 \text{Lj} = 10^{16}$ m) weit. Zum nächsten Stern, Proxima Centauri, sind es nur etwa 4 Lichtjahre!

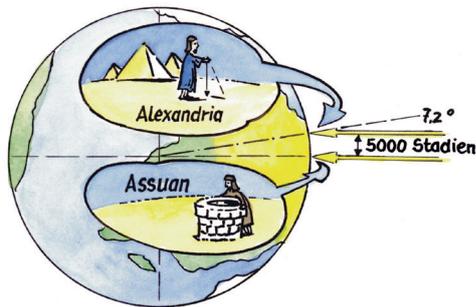
F23 20 Gbit/s sind 20 Gigabit pro Sekunde, also $20 \cdot 10^9$ b/s. 1 Byte besteht aus 8 bit. $20 \cdot 10^9$ b/s sind also $2,5 \cdot 10^9$ Byte/s. Wenn die Übertragungsrate in ferner Zukunft um den Faktor 10^9 gesteigert wird, dann wären das $1,5 \cdot 10^{18}$ Byte/s. Weil jedoch 10^{31} Byte übertragen werden müssen (\rightarrow F22), braucht man dazu $10^{31} \text{Byte} / (1,5 \cdot 10^{18} \text{Byte/s}) \approx 6,7 \cdot 10^{12}$ s. Wenn man durch die Sekunden eines Jahres dividiert, kommt man auf etwa 200 000 Jahre, die das Übertragen der Daten dauern würde. Recht unpraktisch!

F24 Es müssen in Summe 10^{31} Byte übertragen werden. Damit das in 10 Sekunden passieren kann, müssen also 10^{30} Byte pro Sekunde übertragen werden. Weil bei 5G maximal $2,5 \cdot 10^9$ Byte/s übertragen werden, müsste man also die Übertragungsrate um den Faktor $(10^{30} \text{Byte/s}) / (2,5 \cdot 10^9 \text{Byte/s}) = 4 \cdot 10^{20}$ erhöhen. Das wäre also eine Geschwindigkeitssteigerung um den Faktor 400 Trillionen.

F25 An diesem Beispiel wird deutlich, wie schwer der Begriff „Beobachter“ eigentlich zu definieren ist. Hier beobachtet eigentlich gar niemand – oder wenn man so will, sind die „Beobachter“ die beiden Filter. Schon alleine die Tatsache, dass durch sie die Photonen markiert sind und man feststellen könnte, durch welchen Spalt sie gegangen sind, genügt, dass das Interferenzmuster verschwindet.

34 Weltbilder vor 1905

F1 ERATOSTHENES (etwa 282 bis 202 v. Chr.) war ein bedeutender Mathematiker und Astronom seiner Zeit und wahrscheinlich der Erste, der den Erdumfang berechnet hat (etwa um 250 v. Chr.). Seine Methode war bestechend einfach. An einem bestimmten Tag spiegelte sich im heutigen Assuan in Ägypten die Sonne in einem tiefen Brunnen – sie stand also genau senkrecht. Eratosthenes maß am selben Tag in Alexandria, das am selben Längengrad im Norden liegt, den Einfallswinkel des Sonnenlichts und kam auf $7,2^\circ$. Das ist etwa $\frac{1}{50}$ eines Kreisumfanges. Deshalb muss zwischen Assuan und Alexandria $\frac{1}{50}$ des Erdumfanges liegen. Den Abstand zwischen den beiden Städten maß er mit 5000 Stadien, was für den Erdumfang 250 000 Stadien ergab. Man weiß heute nicht, wie lang die Einheit Stadion tatsächlich war. Der berechnete Wert für den Erdumfang dürfte aber umgerechnet zwischen 35 000 und 45 000 km gelegen und somit dem heute bekannten Wert von etwa 40 000 km sehr nahe gekommen sein.

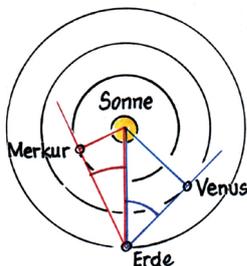


Methode zur Bestimmung des Erdumfangs nach ERATOSTHENES. Der Winkel ist übertrieben groß dargestellt

F9 Es ist wie in einem fahrenden Zug. Weil sich alles gleich schnell bewegt (also die Erde, die Person und der fallen gelassene Gegenstand), kann man diese Bewegung nicht feststellen.

F17 Belege, die bereits in der Antike bekannt waren: Die Erde wirft bei jeder Mondfinsternis einen kreisförmigen Schatten; bei Schiffen tauchte zuerst das Segel auf; wenn man nach Süden oder Norden reist, dann sieht man fremde Sternbilder.

F18 Das ist ein weit verbreiteter Irrtum. Erstens hätte er das nur mit einer Umrundung machen können, die aber erst FERNANDO MAGELLAN 1519 gelang. Zweitens glaubte man zu seiner Zeit schon lange nicht mehr an eine scheibenförmige Erde.



F19 Die Bahnen von Merkur und Venus liegen innerhalb der Erdbahn. Der Winkel zwischen Sonne und Venus kann 44° niemals überschreiten (Abb.). Deshalb ist die Venus entweder kurz nach Sonnenuntergang als „Abendstern“ oder kurz vor Sonnenaufgang als „Morgenstern“ zu sehen. Natürlich ist die Venus aber ein Planet und kein Stern.

F20 Individuelle Lösung

F21 Seit 2018 geht man von 79 Jupitermonden aus, wovon 69 einen Namen tragen (Stand 2020).

F22 Wir nehmen vereinfacht an, dass die Planetenbahnen Kreise sind. Für die Kreisbahn ist eine Zentripetalkraft notwendig (Kap. 11.6, „Big Bang 1“), die von der Gravitationskraft kommt:

$$F_{ZP} = F_G = \frac{m \cdot v^2}{r} \Rightarrow F_G \sim \frac{v^2}{r}$$

Die Geschwindigkeit v ist Weg pro Zeit. Bei einem Planeten bietet es sich an, für die Geschwindigkeit den Bahnumfang durch die Umlaufzeit zu nehmen, also

$$v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \sim \frac{r}{T}$$

Wenn man oben einsetzt, erhält man

$$F_G \sim \frac{v^2}{r} = \frac{r^2}{T^2} = \frac{r}{T^2}$$

Und nun greift man auf Keplers 3. Gesetz zurück. Wenn wir eine Kreisbahn annehmen, dann wird aus der großen Halbachse a der Radius r und es gilt $T^2 \sim r^3$. Das setzen wir noch einmal ein:

$$F_G \sim \frac{r}{T^2} \sim \frac{r}{r^3} = \frac{1}{r^2}$$

F23 Licht legt in $3,3 \cdot 10^{-16}$ s $9,9 \cdot 10^{-8}$ m zurück. Wenn man nun um 90° dreht, vertauschen sich die Laufzeiten, was in Summe einen Unterschied $2 \cdot 10^{-7}$ m ergibt, das entspricht rund $\frac{1}{3}$ der Wellenlänge.

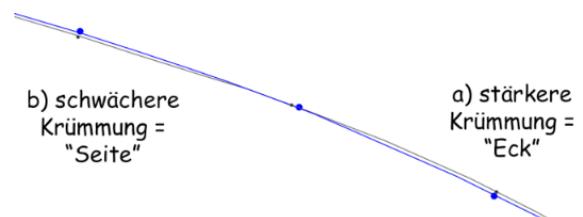
F24 Mit der Glasplatte bei c erreicht man, dass beide Lichtstrahlen dieselbe Menge an Glas durchlaufen. Das ist deshalb wichtig, weil man beim Originalexperiment mit weißem Licht arbeitete, das eine extrem kurze Kohärenzlänge aufweist. Deshalb mussten die beiden Lichtwege so gleich wie möglich sein.

F25 Wie würde die Venus in einem geozentrischen Universum aussehen? Würde sich die Venusbahn innerhalb der Sonnenbahn befinden, dann müsste die Venus, weil sie sich ja immer in der Nähe der Sonne befindet und somit von hinten beleuchtet wird, entweder sichelförmig sein oder dunkel. „Vollvenus“ wäre aber unmöglich. Dafür müsste nämlich die Erde zwischen Venus und Sonne liegen. Würde sich die Venusbahn aber außerhalb der Sonnenbahn befinden, dann wäre die Venus von vorne beleuchtet und müsste immer eine Art „Vollvenus“ sein. Dafür wäre in diesem Fall „Neuvenus“ ausgeschlossen. Galilei konnte aber alle Phasen sehen, und das ist nur in einer heliozentrischen Welt möglich.

F26 a) Neumond; b) Sonnenfinsternis; c) Vollmond; d) Mondfinsternis. Die Bahn des Mondes um die Erde ist um etwa 5° zur Erdbahn (Ekliptik) geneigt. Deshalb liegt bei Voll- und Neumond meistens der Mond ober- oder unterhalb der Erdbahn, und daher kommt es dann zu keinen Finsternissen.

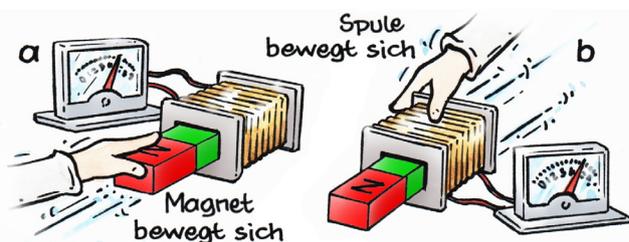
F27 Die Lösung ist c. Die Mondbahn entspricht am ehesten einem 12-Eck. Allerdings ist der Effekt in Abb. 34.24 sehr stark übertrieben dargestellt.

In der Abb. unten siehst du eine maßstabsgetreue Abbildung der Mondbahn.



35 Relativitätsprinzip und Gleichzeitigkeit

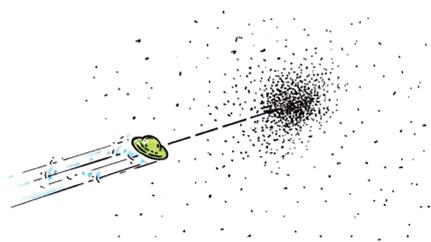
F12 Im Fall a (Abb.) würde man sagen, dass der bewegte Magnet ein veränderliches Magnetfeld verursacht, das wiederum ein elektrisches Feld erzeugt (siehe Kap. 24.1). Dieses übt eine Kraft auf die Elektronen im Leiter aus. Im Fall b würde man sagen, der Leiter bewegt sich im Magnetfeld. Durch die Lorentzkraft (Kap. 24.2) kommt es zu einer Verschiebung der Ladungen und somit zur Induktionsspannung.



F13 Nein! Beim GPS bestimmt man seine verändernde Position **relativ zu den Satelliten**, also zu etwas außerhalb des Flugzeugs. Du bestimmst also nicht deine absolute Geschwindigkeit, sondern die relative in Bezug auf die Satelliten.

F14 Von 1983 stammt die genaueste und momentan gültige Definition des Meters. Dabei gibt man die Zeit an, die das Licht benötigt, um die Strecke von einem 1 Meter im Vakuum zurückzulegen. Diese Zeit ist unglaublich kurz, nämlich $\frac{1}{299\,792\,458}$ stel einer Sekunde. Es gilt allgemein $\text{Geschwindigkeit} = \text{Weg}/\text{Zeit}$. Nachdem man nun Weg und Zeit miteinander verknüpft hat, ist somit auch die Lichtgeschwindigkeit definiert.

F15 Durch die Bewegung kommt es zu einer scheinbaren Verzerrung des Raums. Für ein extrem schnell bewegtes Raumschiff sind die Sterne daher nicht gleichmäßig verteilt, sondern erscheinen in dem Teil des Raums konzentriert, auf den es sich zubewegt (Abb.).



F16 Individuelle Lösung

F17 Optische Verzerrungen würden auch auftreten, wenn die beiden Grundannahmen nicht richtig wären, weil diese der Effekt einer endlichen Lichtgeschwindigkeit sind.

F18 Weil sich jedes Signal maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann und somit die Reihenfolge von jedem System die gleiche sein muss.

F19 Nein! Es ist ähnlich wie bei **F13**. Der Äther würde ja, wenn er existierte, die Naturgesetze *lokal* beeinflussen. So würde sich Licht in unterschiedliche Richtungen unterschiedlich schnell bewegen. Die Hintergrundstrahlung beeinflusst aber die Naturgesetze nicht. Außerdem kann man seine Bewegung nach wie vor nicht absolut bestimmen, sondern nur relativ zum Universum.

F20 Unbeschleunigte Bewegungen sind relativ. Wie groß die gemessene Geschwindigkeit eines Objekts ist, hängt von der Wahl des Bezugssystems ab. Wenn man sich mit dem Objekt mitbewegt, hat dieses die Geschwindigkeit null. Weil es unendlich viele

Möglichkeiten gibt, das Bezugssystem so zu wählen, dass die Geschwindigkeit größer als null ist, aber nur eine Möglichkeit dafür, dass die Geschwindigkeit exakt null ist, ist der Ruhezustand ein Sonderfall der Bewegung.

F21 Ruhe und gleichförmige Bewegung sind äquivalent (siehe **F20**). Daher darf es auch keinen Unterschied machen, ob die Induktionsspannung durch die Bewegung des Magneten, der Spule oder eine Kombination beider Bewegungen zu Stande kommt. Die Induktion ist wiederum ein elektromagnetisches Phänomen. Daher kann man sagen, dass die Spezielle Relativitätstheorie Ruhe und Bewegung mit Elektrizität und Magnetismus vereint!

F22 a) Der Abstand Erde-Sonne beträgt $1,5 \cdot 10^{11}$ m. Nehmen wir vereinfacht an, dass die Erdbahn kreisförmig ist. Der Umfang beträgt dann $2 \cdot r \cdot \pi = 9,42 \cdot 10^{11}$ m. Dafür benötigt die Erde ein Jahr, also etwa $3,14 \cdot 10^7$ s. Die Geschwindigkeit der Erde um die Sonne beträgt daher rund 30 000 m/s oder 30 km/s.

b) Die Lichtgeschwindigkeit beträgt $3 \cdot 10^8$ m/s. Die Bahngeschwindigkeit der Erde ist $3 \cdot 10^4$ m/s (**F22 a**) und somit 1/10 000 oder 0,01% der Lichtgeschwindigkeit. Wenn sich Licht 10 m weit bewegt, dann hat sich die Erde in dieser Zeit um 1 mm bewegt.

c) Im Prinzip ist es ähnlich wie beim Schirm. Die senkrechte Geschwindigkeit wäre in diesem Fall die Lichtgeschwindigkeit und die vertikale Geschwindigkeit die der Erde um die Sonne. Im Gegensatz zu den Tropfen wächst aber die Geschwindigkeit des Lichts nicht an, weil c nicht überschritten werden kann. Wie groß ist der Winkel, um den man das Fernrohr kippen muss? Es gilt:

$$\tan \alpha = \frac{v_{\text{Erde}}}{c} \quad \text{und}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v_{\text{Erde}}}{c}\right) = \arctan(10^{-4}) = 5,73 \cdot 10^{-3}^\circ = 20,63''$$

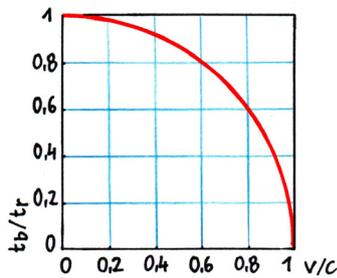
Man muss also das Fernrohr um den winzigen Winkel von knapp 21 Bogensekunden kippen.

F23 Bradley beobachtete einen Stern im Zenit und nutzte den Effekt der Aberration des Lichts aus (siehe **F22**). Durch die Erdbewegung scheint die Position des Sternes im Zenit immer etwas in Bewegungsrichtung der Erde verschoben zu sein. Der Stern beschreibt daher im Laufe eines Jahres eine kleine Ellipse am Himmel, eine Miniaturkopie der Erdbahn. Aus der Bahngeschwindigkeit der Erde und dem Winkel der Verschiebung konnte Bradley schon damals eine Schätzung der Lichtgeschwindigkeit abgeben, die nur etwa 1,2% über dem heute als richtig angesehenen Wert lag.

F24 Der Effekt kann dann auftreten, wenn sich der Jet mit sehr hoher Geschwindigkeit – also einem hohen Prozentsatz von c – schräg auf dich zubewegt. In diesem Fall läuft er seiner Lichtwelle nach. Aus Sicht der Erde kann es dann so wirken, also würde der Jet die Lichtgeschwindigkeit überschreiten. Man kann also „sehen“, dass der Jet 5-fache Lichtgeschwindigkeit hat, man kann aber „beobachten“, dass er natürlich in Wirklichkeit c nicht überschreitet.

36 Zeitdehnung und Raumschrumpfung

F15 Wenn du beide Achsen gleich skalierst, dann liegen die Punkte auf einem Viertelkreis! Überrascht!? Wir haben die Zeitdehnung ja mit Hilfe der Lichtuhr abgeleitet (Abb. 36.6). Der Viertelkreis im Graph ist im Prinzip nichts anderes als das rechte obere Viertel der Kugelwelle.

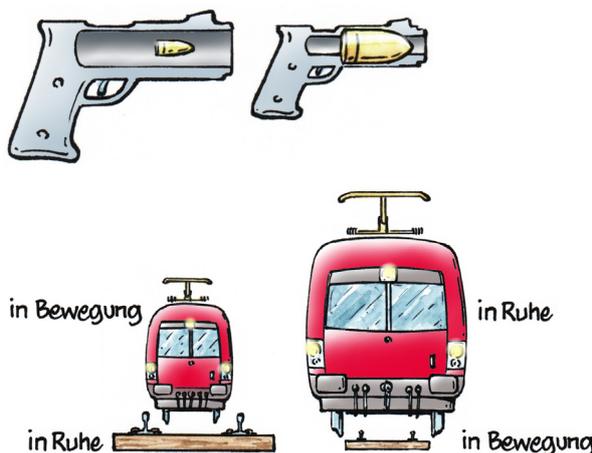


F16 Du benötigst für die Fahrt 4,62 h oder 16 615 s. Wenn du mit einer Tabellenkalkulation rechnest, ergibt sich eine Zeitdifferenz von winzigen $1,2 \cdot 10^{-10}$ s. Mit dem Flugzeug benötigst du für 600 km 2 400 s. Das ergibt eine Zeitdifferenz von $8,4 \cdot 10^{-10}$ s.

F17 Die Halbwertszeit eines Myons beträgt 1,5 μ s. Wenn es sich mit 0,995 c bewegt, kommt es in dieser Zeit etwa 450 m weit. Für 10 km bräuchte das Myon etwa 22,2 Halbwertszeiten. Welcher Bruchteil der Teilchen erreicht die Erde? $(\frac{1}{2})^{22,2} = 2,08 \cdot 10^{-7}$. Nur eines von fast 5 Millionen Myonen könnte den Boden erreichen (rechne nach). Bezieht man die SRT ein, sieht es anders aus. Aus Sicht der Erde altern die Myonen um den Faktor 10 langsamer. Die Halbwertszeit beträgt 15 μ s und die Myonen brauchen 2,2 Halbwertszeiten. $(\frac{1}{2})^{2,2} = 0,22$. Es schafft also rund jedes fünfte Myon auf die Erde. Man kann daher um den Faktor $0,22/2,08 \cdot 10^{-7} \approx 10^6$ mehr Myonen messen, als man aus nicht relativistischer Sicht erwarten könnte.

F18 Nein! Zwar sind schnell bewegte Objekte längenverkürzt, aber sehen kannst du das nicht. Das liegt an der Lichtlaufzeit (Kap. 35.2). Diese führt zu Verzerrungen und hebt den Effekt der Verkürzung auf. In den Abbildungen in Kap. 35.2 wurde die Längenkontraktion bereits stillschweigend berücksichtigt. Sehen kann man sie aber trotzdem nicht. Das beste Beispiel ist der Würfel in Abb. 35.13. Er sieht nicht verkürzt aus, allerdings eigenartig verdreht.

F19 Aus der Sicht der Pistole würde die Kugel schrumpfen und somit eine zu lose Führung entstehen. Aus Sicht der Patrone würde die Pistole schrumpfen und sie würde stecken bleiben (Abb.). Aus der Sicht der Schienen würde der Zug geschrumpft erscheinen und nach innen entgleisen (Abb.). Aus Sicht des Zugs würden die Schienen schrumpfen und er würde außen entgleisen. In beiden Fällen würde die Querkontraktion zu Paradoxien führen.



F20 Der Radfahrer bzw. der Lichtstrahl braucht für die Strecke SBS länger als für SAS:

$$t_{SAS} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = t_{SBS}$$

Wenn man nun aber die Lorentz-Kontraktion mit einbezieht, verkürzt sich die Strecke SBS um den Faktor

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

und dadurch wird $t_{SAS} = t_{SBS}$. LORENTZ verzichtete bei seiner Erklärung aber nicht auf den Äther, und deshalb konnte er die Relativitätstheorie nicht entwickeln.

F21 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.

37 Relativistische Masse und Energie

F10 Ein Proton hat eine Masse von $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Seine dynamische Masse wächst aber im LHC um den Faktor 7454 auf $1,24 \cdot 10^{-23}$ kg an. Für die Geschwindigkeit des Teilchens kann man c einsetzen. Für die magnetische Induktion ergibt sich dann

$$B = \frac{m \cdot c}{Q \cdot r} = 5,43 T$$

Tatsächlich liegt sie sogar bei 9T, weil die Bahn keine Kreisbahn ist, sondern eher einem Vieleck gleicht. Durch die Knicke werden etwas stärkere Felder benötigt.

F11 Es gilt $E_{kin} = m_d \cdot c^2 - m \cdot c^2 = (m_d - m) \cdot c^2$. Weiter gilt

$$m_d = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

oder als Reihe genähert

$$m_d = m \cdot \left(1 + \frac{1v^2}{2c^2} + \frac{3v^4}{8c^4} + \frac{15v^6}{48c^6} \dots \right)$$

Für $v \ll c$ kann man die Reihe nach dem zweiten Glied abbrechen. Daher ergibt sich dann

$$E_{kin} = (m_d - m) \cdot c^2 = \left(m + \frac{m}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2} - m \right) \cdot c^2 = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

F12 Photonen existieren nur bei c. Man kann sie also nicht einfangen und in Ruhe betrachten. Man sagt daher, dass Photonen keine Ruhemasse besitzen. Die Masse, die man Photonen zuordnen kann, haben sie aufgrund ihrer Energie. Energie hat eine Masse!

F13 $1eV = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J. Die Bindungsenergie eines Deuterons beträgt daher $2,14 \cdot 10^6$ eV. Die Bindungsenergie von Kernen ist also um den Faktor 10^6 größer als die Bindungsenergie in Molekülen. Daher sind Kernumwandlungsprozesse auch wesentlich energiereicher als chemische Prozesse.

F14 Zwischen Kraft und Impuls besteht folgender Zusammenhang (siehe Kap. 9.4, „Big Bang 1“):

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dt}$$

In der relativistischen Mechanik ist aber die Masse nicht konstant. Daher gilt:

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} + v \cdot \frac{dm}{dt}$$

Nehmen wir nun ein Proton, das schon eine sehr hohe Geschwindigkeit besitzt, sagen wir 0,99999 c. Das ist im LHC leicht zu erreichen. Weil die Geschwindigkeit nun praktisch nicht mehr zu vergrößern ist, kann man $dv/dt = 0$ setzen und für $v = c$ einsetzen. Eine auf dem Weg $dx = c \cdot dt$ auf das Proton wirkende Kraft F erhöht zwar nicht die Geschwindigkeit, aber Energie, Masse und Impuls:

$$dE = F \cdot dx = c \cdot \frac{dm}{dt} \cdot c \cdot dt = c^2 \cdot dm$$

Daraus folgt:

$$\int dE = c^2 \int dm \Rightarrow \Delta E = c^2 \cdot \Delta m$$

F15 Falls du geantwortet hast, dass beide Fahrzeuge einen Massenzuwachs erfahren haben, dann bist du einem weit verbreiteten Irrtum aufgesessen. Die Masse eines Gegenstandes erhöht sich nicht immer, wenn ihm Geschwindigkeit hinzugefügt wird. Die Masse ändert sich aber immer, wenn ihm Energie zugeführt wird. Was soll das bedeuten?

Das Elektroauto führt seine Energiequelle mit sich, es wird ihm von außen keinerlei Energie zugeführt. Was das Auto an Masse dazugewinnt, verliert in gleichem Maße seine Batterie. Für einen ruhenden Beobachter bleibt daher die Masse des Elektroautos immer gleich groß.

Der O-Bus bekommt Energie von außen zugeführt. Daher wächst seine Masse tatsächlich an. Dafür verliert das Kraftwerk im selben Ausmaß an Masse, wie die des Busses steigt. Dieselben Verhältnisse liegen bei einem Teilchenbeschleuniger vor, etwa beim LHC. Daher kann tatsächlich die Masse eines beschleunigten Protons beliebig hoch anwachsen.

F16 Aus Sicht des Zuschauers ist das Auto ein abgeschlossenes System. Was die Feder an Energie und Masse verliert, muss das restliche Auto an Masse und Energie gewinnen. Aus Sicht der Puppe verliert die sich entspannende Feder an Energie und somit an Masse, während das Auto seine Masse behält. In Summe sinkt also die Masse ab.

F17 Photonen dürfen keine Ruhemasse m haben, denn sonst wäre ihre dynamische Masse m_D bei Lichtgeschwindigkeit unendlich groß. Photonen existieren nur bei Lichtgeschwindigkeit. Man kann sie nicht einfangen und abwiegen.

38 Vertiefendes zur SRT

F7 Die relativistische Energie lautet $E = m \cdot c^2$ und der Impuls allgemein $p = m \cdot v$. Wenn man nun für m die dynamische Masse einsetzt und umformt, erhält man $E^2 = m^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2$. Das ist die relativistische Energie-Impulsbeziehung. Weil Photonen keine Ruhemasse haben, vereinfacht sich diese Beziehung zu $E = p \cdot c$. Daraus folgt für den Impuls der Photonen

$$p = \frac{E}{c} = \frac{m \cdot c^2}{c} = m \cdot c.$$

F9 Nimm an, dass sich eine Lichtquelle mit der Geschwindigkeit v von dir entfernt. In Analogie mit einer sich entfernenden Quelle bei einer Schallwelle kann man daher die Frequenz so anschreiben:

$$f_B = f_Q \cdot \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$$

(siehe Kap. 14.3, „Big Bang 1“). Bei hohen Geschwindigkeiten muss man aber zusätzlich die Zeitdehnung berücksichtigen. Vergrößert sich der Abstand zwischen Quelle und Beobachter, dann sinkt aus Sicht des Beobachters die Frequenz f_R um den Faktor

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Oben eingesetzt ergibt das also

$$f_B = f_R \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c}}$$

Wir ersetzen nun $\frac{v}{c}$ durch a .

$$f_B = f_R \cdot \frac{\sqrt{1 - a^2}}{1 + a} = f_R \cdot \frac{\sqrt{1 - a^2}}{\sqrt{(1 + a)^2}} = f_R \cdot \frac{\sqrt{(1 - a) \cdot (1 + a)}}{\sqrt{(1 + a) \cdot (1 + a)}} = f_R \cdot \sqrt{\frac{1 - a}{1 + a}}$$

Wenn man nun wieder einsetzt, erhält man

$$f_B = f_R \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$$

Weil EM-Wellen kein Medium zur Ausbreitung benötigen, spielt es keine Rolle, ob sich die Quelle oder der Beobachter bewegen. Bei Annäherung geht man von folgender Gleichung aus:

$$f_B = f_R \cdot \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$$

wodurch in der Endgleichung die Vorzeichen in Zähler und Nenner vertauscht sind.

F10 Wenn du auf eine Ampel zufliegst, dann ist das rote Licht blauverschoben. Rotes Licht hat eine Wellenlänge von etwa 650 nm (bzw. $f = c/\lambda = 4,6 \cdot 10^{14}$ Hz), grünes von etwa 550 nm ($5,5 \cdot 10^{14}$ Hz). Man kann die Gleichung zum relativistischen Doppler-Effekt auch so anschreiben:

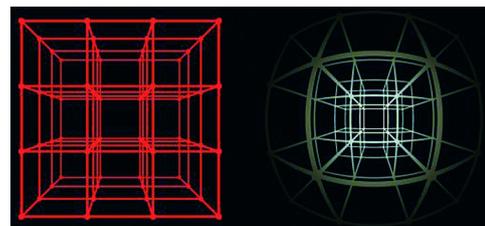
$$\frac{f_B}{f_Q} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} = \frac{5,5}{4,6} = 1,2$$

Daraus folgt:

$$\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \approx 1,44 \Rightarrow v = c \cdot \frac{1,44 - 1}{1,44 + 1} = 0,18c$$

Du hast also die vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit von 0,1c um satte 80% überschritten.

F11 Der Doppler-Effekt ist nicht berücksichtigt. Bei Annäherung kommt es zur Blauverschiebung und zu einer Erhöhung der Intensität, weil mehr Licht gleichzeitig auf dich trifft. Bei einem thermischen Spektrum ist die Auswirkung des Doppler-Effekts besonders einfach zu beschreiben: Es ergibt sich wieder ein thermisches Spektrum, aber mit einer höheren Temperatur. In der Abbildung links siehst du ein ruhendes Gitter mit etwa 1300 Kelvin. Wenn das Gitter mit 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit herankommt (rechts), ist das Spektrum blauverschoben und wirkt, als wäre seine Temperatur sehr stark erhöht. Am größten ist sie in der Bildmitte: Mit 5600 Kelvin ist das Gitter dort so hell wie die Sonne!



F12 Man kann es auch so sehen: Man bewegt sich immer mit Lichtgeschwindigkeit durch die Raum-Zeit. Im Extremfall, also bei c , bewegt sich ein Objekt nur mehr durch den Raum und gar nicht mehr durch die Zeit.

F13 Die Straßenbahn bekommt Energie von außen zugeführt. Daher wächst ihre Masse an. Diese verliert das Kraftwerk im selben Ausmaß. Solche Verhältnisse liegen bei einem Teilchenbeschleuniger vor (siehe Kap. 42.1). Das Elektroauto führt seine Energiequelle mit sich, es wird ihm keine Energie von außen zugeführt. Was das Auto an Masse gewinnt, verliert in gleichem Maße seine Batterie. Für einen ruhenden Beobachter bleibt daher die Masse des Elektroautos gleich groß. Diese Verhältnisse liegen auch bei der relativistischen Rakete vor. Die Restmasse und die Masse der Strahlung müssen immer gleich groß sein, also $m_{ges} = m + m_s$.
→ INFO Photonenantrieb

F14 Sie würde in die Galilei-Transformation übergehen (überprüfe). Die Effekte der speziellen Relativitätstheorie ergeben sich aus der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit.

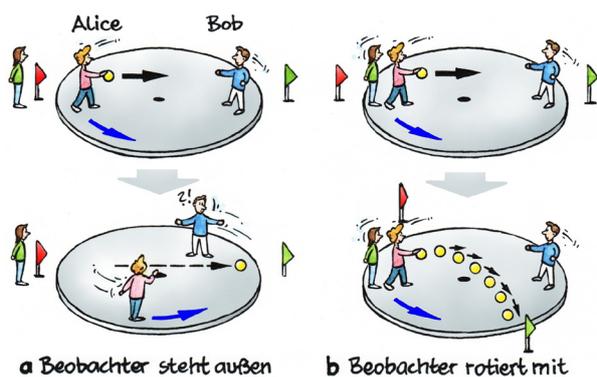
F15 Wenn du dich dem Auto mit dem Sticker schnell, also wirklich sehr schnell annäherst, dann ist die Farbe des Stickers blauverschoben und kann somit tatsächlich blau werden. Wie schnell musst du dafür fahren? Wir nehmen den Fall mit der geringstmöglichen Frequenzverschiebung und somit auch der geringsten Relativgeschwindigkeit an. Das ist der Fall, wenn die rote Farbe des Stickers eine Wellenlänge von $6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ (650 nm) hat und das Blau, das du aufgrund deiner erhöhten Geschwindigkeit wahrnimmst, 490 nm. Zusätzlich gilt $f = c/\lambda$. Du kannst nun die Frequenz berechnen oder argumentieren, dass $f \sim 1/\lambda$ ist und daher

$$x = \frac{f_B}{f_Q} = \frac{\frac{1}{\lambda_B}}{\frac{1}{\lambda_Q}} = \frac{\lambda_Q}{\lambda_B} = \frac{650 \text{ nm}}{490 \text{ nm}} = 1,33.$$

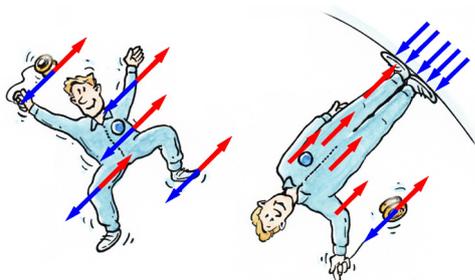
Daraus folgt $x^2 \approx 1,77$. Daher müsste die Annäherungsgeschwindigkeit $v_{BQ} = c \frac{(x^2 - 1)}{(x^2 + 1)} = \frac{0,77}{2,77} c \approx 0,28 c$ betragen. Das ist tatsächlich viel zu schnell!

39 Allgemeine Relativitätstheorie

F28 Die Corioliskraft wirkt auf bewegte Gegenstände und man kann sie mit einem Wurf auf einer rotierenden Scheibe erklären. Für die Person außen fliegt der Ball geradewegs zur anderen Fahne (a). Für eine Person auf der Scheibe drehen sich die Fahnen scheinbar im Uhrzeigersinn, und der Ball fliegt daher eine Rechtskurve (b). Die Corioliskraft wirkt quer zur Flugrichtung. Suche im Internet danach, wie diese Kraft das Wetter beeinflusst!



F29 Im ersten Fall (Abb. links) greifen Zentrifugal- und Zentripetalkraft (Gravitation) an jedem einzelnen Atom deines Körpers an und heben dort einander auf. Das macht dich schwerelos. Im Fall rechts greift die Zentrifugalkraft ebenfalls an jedem Atom deines Körpers an, aber die Zentripetalkraft (Normalkraft) der Raumstation drückt nur auf deine Füße. Dadurch wird dein Körper verformt und das kannst du spüren.



F30 Unter einer Gezeitenkraft (siehe Kap. 13.4, „Big Bang 1“) versteht man allgemein, dass die Gravitationskraft an einem Objekt nicht überall gleich groß ist. Sie kommt zustande, wenn das Gravitationsfeld nicht homogen ist. Die Feldlinien sind dann nicht parallel, sondern laufen aufeinander zu. Ein lokales Inertialsystem muss so klein sein, dass die Gezeitenkraft praktisch keine Rolle spielt, dass also die Inhomogenität verschwindend klein ist.

F31 Aus Sicht der klassischen Mechanik ruhest du in einem Inertialsystem. Die Gravitationskraft und die Bodenreaktionskraft, die auf deine Füße drückt, heben einander auf. Auf den Ball wirkt nur die Gravitationskraft, deshalb fällt er zu Boden. Aus Sicht der ART sieht es umgekehrt aus. Hier ist nämlich jenes System das Inertialsystem, in dem die Gravitationskraft verschwindet, und das ist das System, das mit dem Ball mitfällt. Von diesem System aus gesehen wirken auf den Ball und dich keine Gravitation mehr. Die Bodenreaktionskraft verschwindet aber nicht. Sie beschleunigt dich nach oben. Es ist so, als wärst du in einer Rakete.

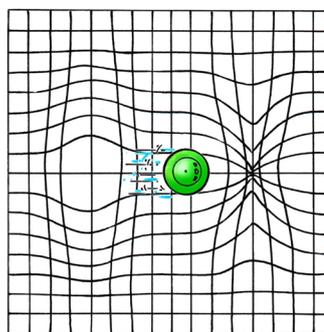
F32 Nach dem Äquivalenzprinzip kann zwischen Beschleunigung und Gravitation nicht unterschieden werden. So lange das Raumschiff beschleunigt, ist die Rotverschiebung durch den Dopplereffekt völlig äquivalent zur Rotverschiebung im Gravitationsfeld. Du musst dir Abb. 38.2b nur um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht vorstellen.

F33 Bei $H = 10 \text{ km}$ ergibt $g \cdot H/c^2 = 1,1 \cdot 10^{-12}$. Die Frequenz von grünem Licht liegt bei etwa $6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Absolut macht also die Frequenzverschiebung 654 Hz aus. Das klingt recht viel, aber verglichen mit den 600 Milliarden Hertz von grünem Licht nicht mal ein Tropfen auf den heißen Stein.

F34 Nimm an, du bist 1,8 m groß, lebst 100 Jahre und stehst davon 66 Jahre ($= 2,1 \cdot 10^9 \text{ s}$). Der Faktor $g \cdot H/c^2$ ist dann $1,96 \cdot 10^{-16}$. Mit den „Stehsekunden“ deines Lebens multipliziert ergibt das dann $4,1 \cdot 10^{-7} \text{ s}$. Um diese Zeit altert dein Kopf schneller als die Füße. Wenn zwischen Meer und Alm 2000 m liegen und du rechnest mit 100 Jahren ($3,15 \cdot 10^9 \text{ s}$), dann ist der Unterschied $6,87 \cdot 10^{-4} \text{ s}$.

F35 Während einer Messdauer T wäre der Fehler in der Zeitbestimmung $4,44 \cdot 10^{-10} T$, und der entsprechende Fehler in der Längenbestimmung $4,44 \cdot 10^{-10} c \cdot T = 13,3 \text{ cm} \cdot T$ (in Sekunden). Während jeder Sekunde Messzeit fiel ein Fehler der Positionsbestimmung in der Größe von 13 Zentimetern an, in einer Stunde fast 500 Meter.

F36 Von außen gesehen bleibt der Astronaut am Schwarzschildradius hängen. Aufgrund der enormen Rotverschiebung ist er aber nicht mehr zu sehen. Für den fallenden Astronaut hat der Schwarzschildradius keine besondere Bedeutung. Allerdings würde er durch die Gezeitenkräfte (Kap. 13.4, „Big Bang 1“) immer mehr in die Länge gezogen und quasi „spaghettisiert“ werden. Er würde seinen Aufprall am Schwarzen Loch daher gar nicht mehr erleben.



F37 Die Idee besteht darin, den Raum selbst zu verzerren. Wenn der Raum lokal so verzerrt werden kann, dass er sich vor dem Raumschiff zusammenzieht und dahinter ausdehnt, so gleitet das Schiff zusammen mit der entsprechenden Raumzone nach vorn, wie ein Surfbrett auf einer Welle. Die SRT wird nicht verletzt, weil sich das Raumschiff lokal nicht schneller als c bewegt. Aber für einen solchen Antrieb ist Materie mit negativer Energie nötig. Niemand weiß, was man sich darunter vorzustellen hat. Außerdem wären die benötigten Energiemengen illusorisch hoch!

F38 Beim Zerfall bestimmter Atomkerne entsteht Gammastrahlung (siehe Kap. 41.1), eine kurzwellige elektromagnetische Strahlung, noch energiereicher und kurzwelliger als Röntgenstrahlung. Sendet der Atomkern sie aus, so haben die Gammaphotonen zwar keine Masse, aber einen Impuls und übertragen ihn bei ihrem „Abflug“ auf der Kern als Rückstoß. Dadurch verliert das Gammaquant selber Energie und seine Frequenz vermindert sich. RUDOLF MÖSSBAUER (im Englischen fälschlich Mössbauer) erfand nun einen Trick, um den Rückstoß zu unterbinden, indem er die emittierenden Atome in einen Kristallverband zwang. Die im Kristallgitter festgesetzten Atome reagieren dann wie ein im Vergleich zum Gammaphoton riesiger massereicher Gegenstand, der den Rückstoß auf viele Atome verteilt und quasi neutralisiert. Man kann dann Emission und Absorption der Gammaquanten kombinieren und so deren Energieänderung äußerst genau messen. Das war eine Voraussetzung für ein Experiment von GLEN REBKA und ROBERT POUND, die einen Mößbauer-Versuchsaufbau in die Senkrechte stellten und bereits bei einem Abstand von 20 Metern zwischen Quelle und Absorber bemerkten: Das Gravitationsfeld der Erde führt zu einer messbaren Energieänderung der Lichtquanten beim Durchlaufen des Höhenunterschiedes!

F39 Auch beim Maryland-Experiment wurden wieder Atomuhren durch die Gegend geschickt, diesmal drei Atomuhren in 10 000 Metern Höhe auf einer Art Rundkurs, die mit drei Uhren am Boden verglichen wurden. Um den Geschwindigkeitseffekt so gering zu halten wie möglich, verwendete man langsame Propellerflugzeuge. Gemessen wurde wieder der Gesamtzeitunterschied über die gesamte Flugdauer von rund einem halben Tag. Wie erwartet kam man auf einen wenige Nanosekunden kleinen Zeitverzug der bewegten Uhren. Zusätzlich wurde aber während des Flugs dauernd durch sehr kurze Laserimpulse, die vom Flugzeug zurückgeworfen wurden, der Zeitunterschied kontrolliert. Hierbei stellten die Forscher der Universität von Maryland fest, dass die Uhren oben schneller gingen und immer mehr Vorsprung herausholten, und zwar aufgrund des Gravitationseffektes! Insgesamt handelte es sich um über 50 Nanosekunden, der Effekt ist also rund zehnmal so groß wie die Verzögerung durch die Geschwindigkeitszunahme. Die sich daraus netto ergebenden etwa 45 Nanosekunden Vorsprung passen sehr gut zum theoretisch durch die Relativitätstheorien vorausgerechneten Wert.

40 Die Struktur der Atomkerne

F13 E_{kin} von 5 MeV sind umgerechnet $8 \cdot 10^{-13}$ J. Nehmen wir an, dass das α -Teilchen völlig zentral auf den Kern trifft. Es läuft dann quasi den Potenzialberg hinauf (40.6 rechts), bis es zum Stillstand kommt. Nach dem Energiesatz wird dabei die kinetische Energie in potenzielle umgewandelt und man kann sie gleichsetzen. Die potenzielle elektrische Energie ist in Analogie zur potenziellen Gravitationsenergie (Kap. 39.3) durch

$$E_{\text{pot}} = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r}$$

gegeben. Das α -Teilchen hat die Ladungszahl 2, der Goldkern 79. Wenn man nun $E_{\text{kin}} = E_{\text{pot}}$ setzt und umformt, erhält man

$$r = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{E_{\text{pot}}} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 79 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{8 \cdot 10^{-13}} \text{ m} = 4,6 \cdot 10^{-14} \text{ m}$$

Der Radius des Goldkerns ist

$$r = 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{79} = 5,15 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Selbst bei einem zentralen Stoß prallt das α -Teilchen nicht am Kern auf.

F15 Wasser hat eine Massenzahl von $1+1+16=18$. Ein Mol Wasser hat also 18 g. Im Schnapsglas befinden sich etwa 1,1 Mol Wasser oder $6,6 \cdot 10^{23}$ Wassermoleküle und somit $13,2 \cdot 10^{23}$ H-Atome.

Die relative Häufigkeit von Deuterium ist $0,00015 (= 1,5 \cdot 10^{-4};$ Tab. 40.2). Daher befinden sich im Schnapsglas etwa $1,32 \cdot 10^{24} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \approx 2 \cdot 10^{20}$ Deuterium-Atome.

F16 Die elektrische Kraft kann man mit der Gleichung

$$F_E = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

berechnen. Die Proportionalitätskonstante ist $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$. Daraus ergibt sich $F_E = 40 \text{ N}$.

F17 Die Massen der Einzelteile eines C-12-Atoms haben $12 \cdot 0,00055 \text{ u} + 6 \cdot 1,00728 \text{ u} + 6 \cdot 1,00867 \text{ u} = 12,1023 \text{ u}$. Ein C-12-Atom hat exakt 12 u. Der Massendefekt beträgt daher etwas über 0,8%.

F18 Ähnlich wie bei den Elektronen können sich auch bei den Nucleonen nur jeweils 2 in einem Orbital aufhalten. Bei He-4 befinden sich jeweils zwei Protonen und Neutronen im niedrigsten Energiezustand. Das macht den Kern so stabil.

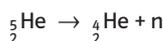
F19 Nur, wenn man die Kerne mit einer elektromagnetischen Welle von 42,5 MHz bestrahlt, können die Spins umklappen. Anders gesagt: Nur bei dieser Frequenz kommen die Kerne in Resonanz. Daher auch die Bezeichnung Magnetresonanztomographie.

41 Radioaktivität

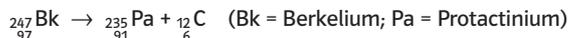
F14 Es gibt viele Möglichkeiten. Eine davon ist mit Hilfe von Uran-238. Dieses zerfällt über viele Zwischenschritte in Blei-206 (siehe Abb. 41.20). U-238 hat eine Halbwertszeit von $4,5 \cdot 10^9$ Jahren (Tab. 41.3). Nach dieser Zeit ist die Hälfte von U-238 zerfallen und dafür eine genau gleich große Menge an Pb-206 entstanden. Und genau das kann man in Gesteinsproben messen. Es gibt aber noch viele andere, zum Teil sehr komplizierte Messmethoden, die alle zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen.

F17 Neben den klassischen Zerfällen, die in allen Büchern zu finden sind, gibt es auch folgende Fälle:

Spontane Nukleonemission: Atomkerne mit sehr hohem Protonenüberschuss können ein Proton abgeben, Atomkerne mit hohem Neutronenüberschuss können Neutronen abgeben. Beispiel:



Clusterzerfall: Statt einzelner Nucleonen oder Helium-4-Kerne werden in sehr seltenen Fällen auch größere Atomkerne emittiert. Beispiele:



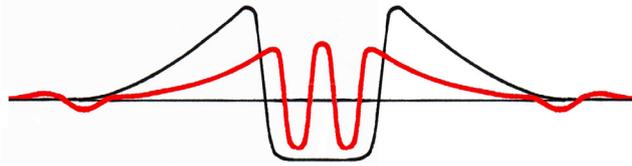
Warum kommt die Emission von Heliumkernen mit Abstand am Häufigsten vor? Weil sie auf ihre Masse bezogen eine enorm große Bindungsenergie aufweisen (Abb. 40.13) und der Prozess daher energetisch sehr günstig ist.

F18 Beim inversen β -Zerfall wird aus Proton und Elektron ein Neutron. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn ein Neutronenstern entsteht (siehe Kap. 45.3).

F19 Das kann man nur mit Hilfe der Energieunschärfe $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/13$ erklären. Das Proton „leiht“ sich die nötigen 1,8 MeV und bekommt sie aus dem Massendefekt des Kerns wieder zurück.

F20 Der β -Zerfall deutet darauf hin, dass Neutronen und Protonen keine fundamentalen Teilchen sind. Tatsächlich bestehen sie aus Quarks (siehe Kap. 43.2.2).

F21 Die Abbildung zeigt schematisch die Wellenfunktion ψ (Psi; siehe Kap. 33.1) eines α -Teilchens. Diese sinkt außerhalb des Potenzialtopfs nicht auf null ab. Das Quadrat des Betrages dieser Funktion, also $|\psi|^2$, nennt man die Wahrscheinlichkeitsdichte. Die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen an einer bestimmten Stelle anzutreffen, ist proportional zu $|\psi|^2$ und auch außerhalb nicht null. Daher gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass das α -Teilchen den Kern verlassen kann.



Potenzialtopf (schwarz) und Wellenfunktion (rot) eines α -Teilchens

F23 Die Formel für die Halbwertsdicke lautet $I(s) = I_0 \cdot e^{-\ln(2) \frac{s}{d_{1/2}}}$. Wenn du für $s = d_{1/2}$ einsetzt, vereinfacht sich die Formel zu $I(s) = I_0 e^{-\ln(2)}$. Weil $e^{-\ln(2)}$ exakt 0,5 ist, sinkt also die Intensität brav auf 0,5 bzw. 50 % ab.

F24 Jede Halbwertsdicke halbiert die Intensität. Damit diese auf $\frac{1}{10}$ absinkt, muss also gelten $\frac{1}{2^n} = \frac{1}{10}$, wobei n die Anzahl der Halbwertsdicken ist. Es gilt daher $2^n = 10$ und $n = \log_2(10) = 3,32$. Bei 3,32 Halbwertsschichten ist also der Wert auf $\frac{1}{10}$ abgesunken. Für $\frac{1}{100}$ ergibt die Rechnung 6,64, also den doppelten Wert. Man benötigt also einer Dicke von 3,32 cm und 6,64 cm Blei, um eine γ -Strahlung von etwa 1 MeV abzuschirmen.

F25 Es ist der β^- -Zerfall eines einzelnen Neutrons dargestellt. Man kann diesen auch so sehen: Das d-Quark im Neutron wandelt sich in ein u-Quark um und sendet dabei ein W^- -Boson aus. Das Nukleon hat danach zwei u-Quarks und ein d-Quark und ist somit ein Proton. Das W^- -Boson zerfällt in ein Elektron (e^-) und ein Anti-Elektron-neutrino ($\bar{\nu}_e$). Netto ergibt sich die Reaktion $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$.

F26 Wenn die Masse der Protonen größer wäre als die der Neutronen, dann könnten freie Protonen spontan wie 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!

F27 Damit ist gemeint, dass nach 6 Jahren nur noch die Hälfte des medizinischen Wissens gültig ist. Das ist wahrscheinlich übertrieben, hat aber einen wahren Kern: Neue Techniken führen relativ rasch zu neuen Erkenntnissen. Würdest du gerne zu einem Arzt gehen, der vor 30 Jahren das Studium beendet und sich seitdem nicht mehr fortgebildet hat? Sicher nicht!

42 Energie aus den Atomkernen

F12 12 Stunden entsprechen 43 200 Sekunden. Wenn ein Liter Milch mit 100 Bq strahlt, dann sind das in Summe $4,32 \cdot 10^6$ Zerfälle. Hat ein β -Teilchen 1 MeV ($= 1,6 \cdot 10^{-13}$ J), beträgt die gesamte an den Körper abgegebene Energiemenge $6,9 \cdot 10^{-7}$ J. Hat der Mensch 75 kg, dann sind das $9,2 \cdot 10^{-9}$ J/kg bzw. Gray (siehe Kap. 41.2). Die relative biologische Wirkung von β -Strahlung liegt bei 1. Daher ergeben sich für die zusätzliche Belastung $9,2 \cdot 10^{-9}$ Sv, also rund 9 Nanosievert. Im Vergleich mit der jährlichen Belastung von 4,3 mSv ist das verschwindend klein. Das Vernichten der Milch nach der Tschernobyl-Katastrophe war also wirklich eine sehr große Vorsichtsmaßnahme.

F13 Die Oberfläche einer Kugel ist $4r^2 \cdot \pi$. Die Erde hat einen Radius von $6,37 \cdot 10^6$ m und somit eine Oberfläche von $5,1 \cdot 10^{14}$ m². Weil $\frac{2}{3}$ der Oberfläche von Wasser bedeckt sind und diese eine durchschnittliche Tiefe von 3 km hat, beträgt das „Meer-volumen“ etwa 10^{18} m³ und seine Masse 10^{21} kg. Wasser hat eine Molmasse von 18 g ($18 \cdot 10^{-3}$ kg). Im Meer befinden sich daher etwa $5,6 \cdot 10^{22}$ Mol Wasser und somit etwa $3,4 \cdot 10^{46}$ Moleküle und $6,8 \cdot 10^{46}$ Wasserstoffatome. Deuterium hat eine relative Häufigkeit von $1,5 \cdot 10^{-4}$ (Tab. 40.5). In den Meeren befinden sich daher etwa 10^{43} Deuterium-Atome. Pro Deuteriumatom werden bei der Fusion 7,2 MeV frei. Das macht für alle im Meer befindlichen Deuteriumatome $10^{43} \cdot 7,2 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ J = $1,2 \cdot 10^{31}$ J. Die Energie reicht daher theoretisch für

$$t = \frac{1,2 \cdot 10^{31} \text{ J}}{10^{13} \frac{\text{J}}{\text{s}}} = 1,2 \cdot 10^{18} \text{ s} = 38 \cdot 10^9 \text{ Jahre}$$

Die Energie würde also noch 38 Milliarden Jahre ausreichen, viel länger, als die Sonne noch brennt.

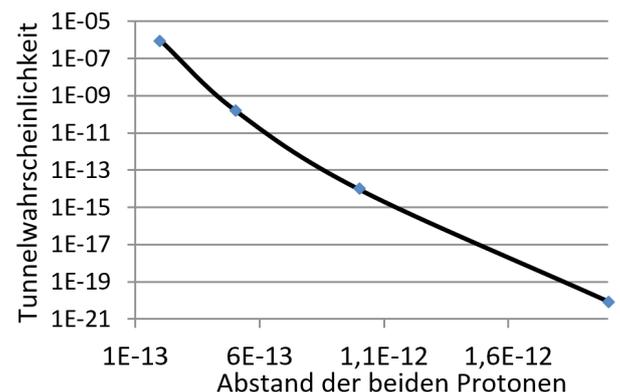
F15 Man nennt dieses bläuliche Leuchten die Tscherenkow-Strahlung. Salopp gesagt ist es die elektromagnetische Strahlung, die entsteht, wenn sich geladene Teilchen in Materie mit höherer Geschwindigkeit als Lichtgeschwindigkeit bewegen. Im Vakuum beträgt die Lichtgeschwindigkeit etwa 300 000 km/s, in Wasser jedoch nur etwa 225 000 km/s.

Wenn sich ein geladenes Teilchen, etwa eines, das durch radioaktive Prozesse entsteht, durch ein nichtleitendes Medium bewegt, wird elektromagnetische Strahlung erzeugt. Im Normalfall interferieren die Wellen von benachbarten Atomen destruktiv und löschen sich aus, so dass makroskopisch keine Strahlung auftritt. Wenn sich jedoch geladene Teilchen in einem Medium schneller als das Licht in diesem bewegen, also in diesem Fall mit über 225 000 km/s, löschen sich die Wellen benachbarter Atome nicht mehr aus, und es ergibt sich eine gemeinsame kegelförmige Wellenfront ergibt. Der Effekt ist ähnlich wie ein Überschallkegel in der Luft (siehe Abb. 17.24 d, „Big Bang 1“).

F16 Je kleiner die Energie der Protonen, desto kleiner ist auch die Tunnelwahrscheinlichkeit. Warum? Weil sich dann die Teilchen aufgrund der abstoßenden elektrischen Kraft nicht so stark nähern können. Wenn die Energie etwa von 5,8 auf 2,9 keV absinkt, sich also halbiert, halbiert sich auch der Abstand x , auf den sich die Protonen nähern können. Die Tunnelwahrscheinlichkeit sinkt dabei aber nicht auch auf die Hälfte ab, sondern etwa um einen Faktor 10^{-5} . Die Tunnelwahrscheinlichkeit hängt also sehr sensibel vom erreichten Abstand der Protonen ab.

F17 Die Tunnelwahrscheinlichkeit liegt dann bei $9 \cdot 10^{-7} \approx 10^{-6}$. Nur rund jedes millionste Proton kann daher durchtunneln. Oder umgekehrt gesagt: Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Proton in diesem Abstand tunnelt, liegt bei einem Millionstel.

F18 Weil die Tunnelwahrscheinlichkeit viele Größenordnungen umfasst, muss die y-Achse logarithmisch dargestellt werden.

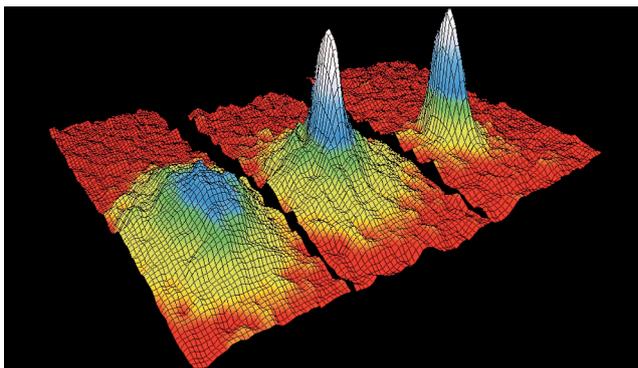


F19 Tab 42.4 zeigt, dass mit zunehmender Energie die Fusionswahrscheinlichkeit sehr stark anwächst. Das entspricht der rechten gestrichelten Kurve mit der Beschriftung Tunneleffekt. Protonen mit geringerer Geschwindigkeit und somit Energie sind viel häufiger vorhanden, allerdings ist dann die Wahrscheinlichkeit auch geringer, dass sie tunneln. Protonen mit höherer Geschwindigkeit und Energie sind viel weniger vorhanden, allerdings ist dann die Wahrscheinlichkeit wesentlich größer, dass sie tunneln. Beim Gamow-Peak treffen beide Wahrscheinlichkeiten so zusammen, dass die Fusionsrate am größten ist.

43 Teilchenphysik und Standardmodell

F21 Zu den Baryonen zählen dummerweise die Nukleonen, also Protonen und Neutronen der Materie, wie wir sie kennen. Ein gründliche Reinigung würde die faktisch komplette Enterprise entfernen, übrig blieben nur sonstiger Teilchenabfall sowie Photonen und die Elektronenreste der Atomhüllen.

F25 Auch ganze Atome wirken nach außen hin entweder wie Bosonen oder wie Fermionen. Bei ersteren ergibt die Summe aller Teilchenspins einen ganzzahligen Gesamtspin und das Pauli-Verbot gilt daher nicht. Wenn man solche Stoffe auf unter 10^{-6} Kelvin abkühlt, dann entsteht eine neue, exotische Materie: das Bose-Einstein-Kondensat. Dabei vereinigen sich alle beteiligten Teilchen zu einem einzigen Superteilchen. Die einzelnen Atome sind nicht mehr voneinander zu unterscheiden.



Entstehung eines Bose-Einstein-Kondensats. Auf der senkrechten Achse ist die Anzahl der Teilchen eingezeichnet. Deren Konzentration nimmt mit der Zeit zu (von links nach rechts)

F26 Es gilt $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ und daher $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$. Deshalb kann man das Zerfallsgesetz auch so aufschreiben:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$$

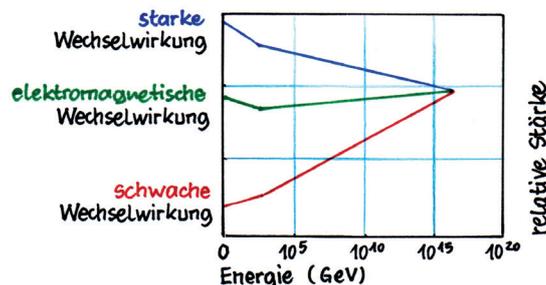
Nach der mittleren Lebensdauer t hat sich die Anzahl der Teilchen auf N_0/e verringert. Es gilt daher

$$\frac{N_0}{e} = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} \Rightarrow \ln\left(\frac{1}{e}\right) = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t \Rightarrow t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$$

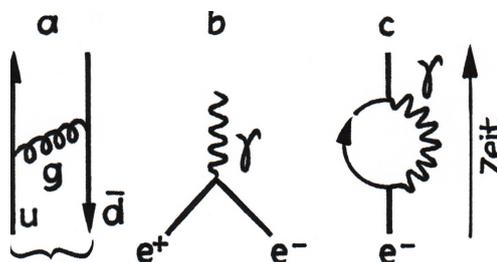
F27 Bei der schwachen Kraft steht die Wechselwirkung im Vordergrund. Man kann aber trotzdem sagen, dass die schwache Kraft u-Quark, Elektron und Anti-Elektronenutrino im d-Quark zusammenhält. Sie ist aber so schwach, dass dieses nach rund 15 min zerfällt und mit ihm auch das Neutron.

F28 Nicht nach dem heutigen Wissensstand! Das Elektron könnte nur in Teilchen zerfallen, die eine geringere oder gar keine Masse haben, also Neutrinos, Photonen oder die hypothetischen Gravitonen. Alle diese Teilchen sind aber nicht geladen. Daher wäre der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung verletzt.

F29 Die Stärken der einzelnen Kräfte verändern sich mit der Energie. Die in Tab. 43.7 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 (siehe Abbildung). Solche Energien haben kurz nach dem Urknall geherrscht.



F30 Abbildung a) zeigt nur eine der Möglichkeiten. Anti-Teilchen werden als in der Zeit zurücklaufend dargestellt.



F31 Eigentlich ist ja nicht das Higgs-Teilchen für die Masse verantwortlich, sondern das Higgs-Feld. Das Higgs-Teilchen bekommt seine Masse quasi von seinem eigenen Feld.

F32 Sleptonen, Zino, Photino, Higgsino und Gravitino.

F35 Die Tassenaufschrift beinhaltet alles, was man nach dem Standardmodell über die Welt weiß, in Formelschreibweise: Die erste Zeile zeigt die vier Naturkräfte (elektrische und magnetische Kraft, Starke und Schwache Wechselwirkung). Die zweite Zeile beschreibt, wie diese Kräfte mit den Bausteinen der Materie (Leptonen und Quarks) wechselwirken, die dritte, wie sie ihre Masse vom Higgs-Boson erhalten, die vierte Zeile das Higgs-Boson selbst.

44 Vom Leben und Sterben der Sterne

F12 Der Begriff Fixstern ist historisch und wurde früher zur Abgrenzung gegenüber Wandelsternen (heute als Planeten bezeichnet) und Schweifsternen (Kometen) verwendet. Fixsterne sind keineswegs fix am Himmel, sondern sie bewegen sich, wenn auch sehr langsam. So werden in 10 000 Jahren manche der heutigen Sternbilder kaum mehr erkennbar sein. Mit bloßem Auge sind am Himmel etwa 3 000 bis 6 000 Sterne zu erkennen. Jedes Jahr entstehen im Schnitt in unserer Milchstraße rund drei bis fünf neue Sterne. In unserer Milchstraße gibt es geschätzte 100 Milliarden Sterne (10^{11}). Weil es etwa 100 Milliarden Galaxien im sichtbaren Universum gibt, kommt man über den Daumen auf 100 Trilliarden Sterne (10^{22}). Ein Pulsar ist ein schnell rotierender Neutronenstern, der vor allem Radiowellen aussendet. Liegt die Erde im Strahlungsfeld, empfängt man wie von einem Leuchtturm regelmäßig wiederkehrende Signale, daher die Bezeichnung.

F13 Die Gleichung für die Fallstrecke bei konstanter Fallbeschleunigung lautet

$$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$$

(Kap. 6.4.1, „Big Bang 1“). Bei einer kontrahierenden Wolke entspricht die Fallstrecke dem Radius r der Wolke. Für die Kontraktionszeit gilt

$$t = \sqrt{\frac{2r}{g}}$$

Durch Gleichsetzen von Gewicht und Gravitationskraft erhält man

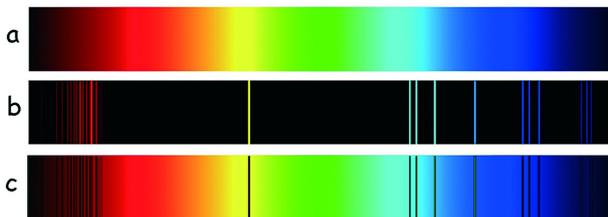
$$m \cdot g = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} \Rightarrow g = \frac{G \cdot M}{r^2}$$

Oben eingesetzt ergibt das für die Kontraktionszeit

$$t = \sqrt{\frac{2r^3}{G \cdot M}}$$

Wenn man für den Radius $1,5 \cdot 10^{18} \text{ m}$ einsetzt (150 LJ) und für die Masse $1,4 \cdot 10^{34} \text{ kg}$ (≈ 7000 Sonnenmassen), erhält man für die Kontraktionszeit $2,7 \cdot 10^{15} \text{ s}$ oder etwa 85 Millionen Jahre.

F14 JOSEF VON FRAUNHOFER entdeckte 1815 im Spektrum der Sonne dunkle Linien (wie in der Abbildung c), deren Ursprung man damals aber noch nicht verstand. Erst um 1860 fand GUSTAV KIRCHHOFF die Erklärung dafür: Die fehlenden Linien werden von Gasen verursacht, die sich in der Sonnen- und Erdatmosphäre befinden. Nehmen wir ein Heliumatom in der Sonnenatmosphäre und einen Lichtstrahl, der in Richtung Erde fliegt. Dieser beinhaltet zunächst noch alle Frequenzen. Helium absorbiert nun ganz bestimmte Farben und strahlt sie nach Sekundenbruchteilen wieder aus. Die Abgabe des Lichts erfolgt in alle Richtungen und deshalb wird die Lichtintensität in Richtung Erde stark geschwächt. Wir auf der Erde sehen daher schwarze Linien im Spektrum (siehe Kap. 28.2).



a) Kontinuierliches Spektrum, wie es von einem Festkörper oder sehr dichtem Gas ausgesendet wird. b) Linienspektrum von Helium. c) Ein Absorptionsspektrum ist ein kontinuierliches Spektrum, dem einige Linien fehlen.

F15 Im Sommer 2006 wurde Pluto der Planetenstatus aberkannt. Erstens ist seine Bahn deutlich elliptisch und stärker zur Ekliptik geneigt als die der anderen Planeten. Außerdem passt er als Gesteinsplanet von seinem Aufbau her nicht zum Entstehungsmodell der inneren und äußeren Planeten. Die neue Definition eines Planeten lautet seit 2006 so: Planeten sind Objekte, die die Sonne umkreisen, genug Masse haben, damit ihre eigene Schwerkraft sie annähernd kugelförmig macht, und die ihre kosmische Nachbarschaft von anderen Objekten freigeräumt haben. Letzteres trifft auf den Pluto nicht zu. Deshalb gilt er nur noch als sogenannter Zwergplanet.

F17 Nein! Es entsteht zum Beispiel beim Siliziumbrennen Nickel, das schwerer ist als Eisen: $\text{Si-28} + \text{Si-28} \rightarrow \text{Ni-56} + \gamma$. Nickel zerfällt aber als β -Strahler sehr schnell zu Eisen. Außerdem können schwerere Elemente durch den Einfang von langsamen Neutronen entstehen, aber nicht in wesentlicher Größenordnung.

F18 Nehmen wir an, die Planeten würden alle 5000 Jahre in einer Reihe liegen. Wenn das so wäre, dann müsste die Zahl 5000 ein ganzzahliges Vielfaches der Planetenumlaufbahnen sein. Die Tab. zeigt aber, dass das nicht der Fall ist. Generell müssten, wenn es zu einer zyklisch wiederkehrenden Linearkonstellation kommt, die Umlaufzeiten von jeweils zwei Planeten in einem ganzzahligen Verhältnis stehen. Auch das ist nicht der Fall.

Planet	Umlaufzeit [a]	5 000 a/Umlaufzeit
Merkur	0,240 846 7	20 760,093 5
Venus	0,615 197 3	8 127,473 90
Erde	1	5 000
Mars	1,880 847 6	2 658,375 94
Jupiter	11,862 615	421,492 226
Saturn	29,447 498	169,793 712
Uranus	84,016 846	59,511 874 6
Neptun	164,79 132	30,341 403 9

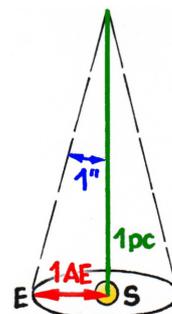
F19 Die Bahn eines ungestörten Planeten hängt von seiner Geschwindigkeit und der Masse des Zentralgestirns ab. In Abb. 44.21 b und d nähert sich der kleine Planet aber jeweils einem der beiden großen. Dadurch wirkt auf ihn nicht nur die Gravitation des Sterns, sondern auch die eines der großen Planeten, was zu einer Bahnablenkung führt. Stünden die Umlaufzeiten in ganzzahligem Verhältnis, würden sich die Planeten regelmäßig treffen und der Effekt würde sich so lange aufschaukeln, bis der Planet aus seiner Bahn geworfen wird. Aus diesem Grund kann es in stabilen Planetensystemen niemals wiederkehrende Linearkonstellationen geben.

Aus ähnlichem Grund gibt es Lücken in den Saturnringen (Abb. 44.22). Sie entstehen dort, wo die entsprechenden Umlaufzeiten der Gesteinsbrocken in einem ganzzahligen Verhältnis zur Umlaufdauer eines großen Saturnmondes stehen. Sollte sich doch einmal ein Brocken dorthin verirren, fliegt er nach einiger Zeit wieder raus.

45 Einführung in die Kosmologie

F21 Die kosmischen Mikrowellen entstehen durch Temperaturstrahlung. In der Akustik würde man von einem Rauschen sprechen. Ein Mikrowellenherd erzeugt aber Wellen einer ganz bestimmten Frequenz. Das würde einem Ton entsprechen.

F22 Ein Parsec (pc) ist definiert als die Entfernung eines Sterns, der von der Erde aus gesehen – auf Grund ihrer Bahn um die Sonne – eine jährliche Parallaxe von genau einer Bogensekunde ($1''/3\,600$) aufweist (siehe Abb. 17). Die Entfernung Erde-Sonne (1 astronomische Einheit; 1 AE) beträgt 149,6 Milliarden Meter. Daraus kann man ableiten, dass 1 pc 3,26 Lichtjahren entspricht. 1 Mpc ist entspricht daher 3,26 Millionen Lichtjahren. Ein Parsec ist also eine Entfernungsangabe und keine Zeitangabe. Die Aussage „Das Schiff machte den Korsalflug in weniger als 12 Parsec!“ ist unsinnig und vergleichbar mit: „Mein Auto machte die Fahrt von Wien nach Salzburg in weniger als 100 km!“



F23 Aus der **Quantenmechanik** folgt die Heisenberg'sche Unschärferelation:

$$\Delta p \cdot \Delta x = \frac{h}{4\pi} \Rightarrow \Delta p = \frac{h}{4\pi \cdot \Delta x}$$

Gemeinsam mit der Speziellen Relativitätstheorie folgt daraus, dass selbst Teilchen ohne Ruhemasse wie die Photonen durch das Einsperren eine Masse erhalten. Denn es gilt einerseits $E = m \cdot c^2$ und andererseits $E = p \cdot c$ (siehe **F7**, Kap. 37). Daraus folgen

$$m \cdot c^2 = E = \Delta p \cdot c = \frac{h \cdot c}{4\pi \cdot \Delta x}$$

und

$$\Delta x = \frac{h}{4\pi \cdot m \cdot c}$$

Verkleinert sich die Ortsunschärfe, wächst also die Masse an. Aus der allgemeinen Relativitätstheorie lässt sich der Schwarzschildradius ableiten: $R_S = 2G \cdot m/c^2$. Die Frage ist nun, wann die Ortsunschärfe kleiner als der Schwarzschildradius wird. Wir ersetzen daher R_S durch Δx und formen um: $m = \Delta x \cdot c^2/2G$. Wenn man nun oben einsetzt, erhält man

$$\Delta x = \frac{h}{4\pi \cdot m \cdot c} = \frac{h}{4\pi \cdot \frac{\Delta x \cdot c^2}{2G} \cdot c}$$

Daraus folgt

$$\Delta x = \sqrt{\frac{G \cdot h}{2\pi \cdot c^3}} = l_p$$

Das nennt man die Planck-Länge.

F24 Jede ruhende Masse erzeugt eine lokale, positive Krümmung, also salopp gesagt eine Delle. Die kinetische Energie, die durch das Auseinanderfliegen der Galaxien besteht, liefert aber einen „negativen Krümmungsbeitrag“. Sind beide Beiträge gleich groß, dann heben sie einander exakt auf, und das Universum ist flach. Ist der Beitrag durch die Masse größer, ist das Universum geschlossen, ist der durch die kinetische Energie größer, dann ist das Universum global gesehen negativ gekrümmt.

F25 Nein! In geschätzten 2,5 bis 4 Milliarden Jahren werden wir sogar mit dem Andromedanebel kollidieren. Durch die Expansion des Raumes werden die Galaxien mitgezogen. Durch die gegenseitige Anziehung kann es aber vorkommen, dass Galaxien aufeinander zutreiben. So entstehen auch die filamentartigen Strukturen, die die Galaxien im Universum bilden. Das Hubble-Gesetz ist nur ein Mittelwert über sehr viele Werte.

F26 Die Planck-Länge ist

$$l_p = \sqrt{\frac{G \cdot h}{2\pi \cdot c^3}}$$

und daher $1,6 \cdot 10^{-35}$ m. Das Volumen einer Kugel mit diesem Radius beträgt $1,7 \cdot 10^{-104}$ m³. Aus dem Schwarzschildradius $R_S = 2G \cdot m/c^2$ folgt für diese Kugel eine Masse von $1,1 \cdot 10^{-8}$ kg. Vernachlässigt man den Zwischenraum, dann haben in einem Kubikmeter $5,8 \cdot 10^{103}$ Kugeln Platz, die eine Gesamtmasse von $6,2 \cdot 10^{95}$ kg haben. Das ist die „Energiedichte des Vakuums“. Energiedichte deshalb, weil man dieser Masse über $E = m \cdot c^2$ eine Energie zuschreiben kann.

Was ist das generelle Problem bei dieser Abschätzung? Streng genommen ist die Vakuumsenergiedichte unendlich, da ja beliebig hohe Energie für entsprechend kurze Zeit entstehen kann. Deshalb wird bei den Berechnungen einfach die Plancklänge als kleinstmögliche Länge verwendet. Technisch gesehen ist das also ein „cut-off“.

F27 Nein! Der Äther würde ja, wenn er existierte, die Naturgesetze *lokal* beeinflussen. So würde sich Licht in unterschiedliche Richtungen unterschiedlich schnell bewegen. Die Hintergrundstrahlung beeinflusst aber die Naturgesetze nicht. Außerdem kann man seine Bewegung nach wie vor nicht absolut bestimmen, sondern nur relativ zum Universum.

F28 a) Ein Jahr hat $60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365$ s, also $3,1536 \cdot 10^7$ s. Ein Lichtjahr entspricht daher der Entfernung von $3,1536 \cdot 10^7$ s $\cdot 3 \cdot 10^8$ m/s = $9,46 \cdot 10^{15}$ m.

b) Es gilt $\tan(1'') = 1 \text{ AE} / 1 \text{ pc}$ und daher

$$1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ AE}}{\tan\left(\frac{1}{3600}\right)} = \frac{1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}}{4,84813 \cdot 10^{-6}} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m.}$$

Das entspricht wiederum etwa 3,26 LJ.

F29 Es gilt $v = H \cdot r$. Der Raum, der von der Erde 1 Mpc entfernt ist (also etwa 3,26 Millionen LJ), entfernt sich von uns mit etwa $70 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}} \cdot 1 \text{ Mpc} = 70 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Wenn an dieser Stelle eine Galaxis relativ zum Raum ruht, dann hat sie dieselbe Geschwindigkeit.

F30 + F31 Die Hubble-Konstante hat etwa den Wert $70 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$ oder 70 km/s pro Mpc. Ein Stück Raum, das sich in der Entfernung von $3,1 \cdot 10^{22}$ m befindet, entfernt sich also von uns mit 70 000 m/s. Daher gilt

$$H = \frac{70\,000 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,1 \cdot 10^{22} \text{ m}} \approx 2,2 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

oder anders gesagt $2,2 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ pro m. Zwei Punkte im Weltraum, die 1 m voneinander entfernt sind, driften also mit der absurd winzigen Geschwindigkeit von $224 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ auseinander.

F32 Wenn du annimmst, dass unsere Sonne ein „Durchschnittstyp“ ist, kannst du aus den Punkten 1) bis 3) die Masse des sichtbaren Universums errechnen: $2 \cdot 10^{30} \cdot 10^{11} \cdot 10^{11} \text{ kg} = 2 \cdot 10^{52} \text{ kg}$. Der sichtbare Teil macht aber nur etwa 5 % aus (siehe Abb. 45.29). Der tatsächliche Wert ist also 20-mal größer, nämlich $4 \cdot 10^{53}$. Mit dieser extrem einfachen Abschätzung kommt man gut auf den Wert, der auch in Tab. 45.1 angegeben ist.