43 Allgemeine Relativitätstheorie

EINSTEIN brauchte nach der Veröffentlichung seiner Speziellen Relativitätstheorie zehn Jahre, um daraus sein Meisterwerk zu entwickeln, die Allgemeine Relativitätstheorie (ART), die er 1916 veröffentlichte. Einige Jahre vorher soll er einem Freund geschrieben haben, dass er noch nie in seinem Leben so hart gearbeitet habe. Obwohl das Newton'sche Gravitationsgesetz und die Spezielle Relativitätstheorie jeweils sehr gute Ergebnisse liefern, sind sie miteinander unvereinbar. Die Newton'sche Gravitation ist eine sofort wirkende Kraft, also unendlich schnell. Nach der Speziellen Relativitätstheorie können sich aber Informationen und somit auch Kräfte maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Deshalb suchte Einstein nach einer Theorie, mit der er die Gravitation und die Spezielle Relativitätstheorie unter einen Hut bringen konnte.

Anfang der 1920er-Jahre soll ein Journalist dem Astronomen EDDINGTON (siehe Kap. 43.6, S. 47) erzählt haben, er habe gehört, dass es auf der Welt nur drei Leute gäbe, die die Allgemeine Relativitätstheorie verstanden hätten. Eddington schwieg eine Weile und soll dann gesagt haben: *„Ich überlege, wer der Dritte sein könnte"*. Wahrscheinlich ist das nur eine gut erfundene Geschichte, aber sie verdeutlicht sehr gut, dass die mathematischen Formalismen der ART zu den schwierigsten Brocken der Physik gehören. Wir werden uns daher im Folgenden mit grundlegenden Überlegungen und vereinfachter Mathematik beschäftigen.

43.1 Träge und schwer
Das Äquivalenzprinzip

Unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes fallen alle Gegenstände gleich schnell, egal welche Masse sie haben. Das ist sehr verwunderlich!

F1 W1 Ohne Luftwiderstand fallen alle Gegenstände gleich schnell. Warum? Schwere Gegenstände werden doch stärker angezogen!

F2 W1 Die Masse hat zwei Erscheinungsformen! Welche sind das? Lies nach in Kap. 41.1, S. 26!

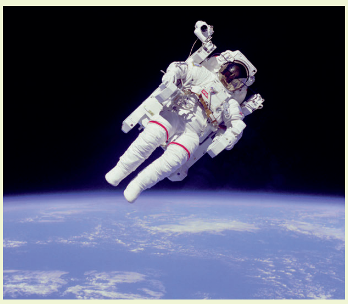
F3 S1 Nimm an, du befindest dich in einer Rakete, die konstant mit 10 m/s² beschleunigt. Könntest du einen Unterschied zu den Verhältnissen auf der Erde feststellen? Und wenn ja, wie?

F4 E1 In Abb. 43.1 siehst du, wie Wasser aus einer Plastikflasche mit Loch rinnt. Was passiert mit dem Strahl, wenn du die Flasche fallen lässt und warum?

Abb. 43.1

F5 S1 Du befindest dich in einem Aufzug, als das Seil reißt und die Kabine in die Tiefe stürzt. Wie würdest du das im Inneren bemerken?

F6 S1



Astronauten im All sind schwerelos, weil … ? Kannst du den Satz vervollständigen?

Abb. 43.2: Ein Astronaut bei einem Außeneinsatz schwebt schwerelos im All.

Im Rahmen der Newton'schen Physik hat die **Masse** zwei Erscheinungsformen (→ F2). Da ist einmal der Widerstand jedes Gegenstandes gegenüber Beschleunigungen, der durch die **träge Masse** verursacht wird. Auf der anderen Seite werden Objekte durch die Gravitation angezogen, die durch die **schwere Masse** verursacht wird. Für ein und denselben Gegenstand sind träge und schwere Masse immer exakt **gleich groß!**

Hat ein Körper die doppelte Masse, so wird er einerseits doppelt so stark von der Erde angezogen (schwere Masse m_S), er ist aber andererseits auch doppelt so schwer in Bewegung zu setzen (träge Masse m_T). Das gleicht sich immer exakt aus. Deshalb fallen unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes alle Gegenstände exakt gleich schnell (→ F1).

→ **Info:** Stillschweigend gleichgesetzt

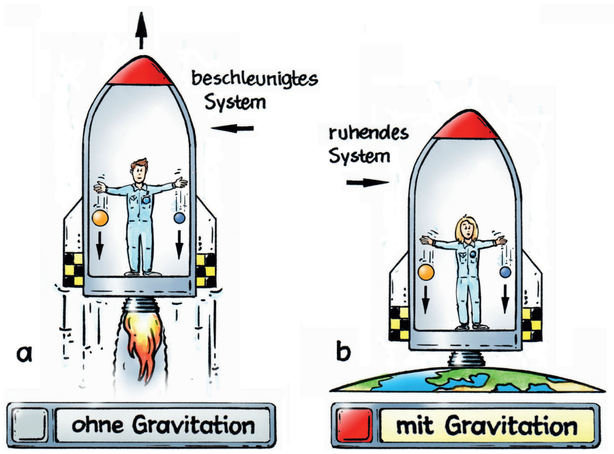


Abb. 43.3: Es ist nicht zu unterscheiden, ob ein Raumschiff fernab aller Himmelskörper beschleunigt (a) oder auf der Erde steht (b). Bei a wirkt die träge Masse, bei b die schwere (→ F3).

Seit GALILEI und NEWTON war diese Massengleichheit bekannt. Die Physiker registrierten diesen Umstand zwar, aber sie interpretierten ihn nicht. Erst EINSTEIN setzte fest: Es gibt **eine** Eigenschaft jedes Objekts, die sich einmal als träge und einmal als schwere Masse zeigt.

Anders gesagt: Träge und schwere Masse sind immer gleich groß, weil sie dasselbe und somit ununterscheidbar sind. Das nennt man das Äquivalenzprinzip. Diese Gleichheit der Massen hat bemerkenswerte Konsequenzen.

So ist es zum Beispiel unmöglich zu unterscheiden, ob eine **Rakete** im All mit 1*g* **beschleunigt** (Abb. 43.3 a) oder ob sie **auf der Erde steht.** Lässt man im Inneren der Rakete Gegenstände fallen, so verhalten sie sich in beiden Fällen völlig gleich (→ F3). Wenn du dich also in einer fensterlosen Rakete befindest, die mit 10 m/s² beschleunigt, könntest du das nicht feststellen (b).

Umgekehrt sind das **Schweben** im Weltall (Abb. 43.4 a) und der **freie Fall** (b) **nicht** voneinander **zu unterscheiden.** Würdest du mit einem Aufzug in die Tiefe stürzen, würdest du dich schwerelos fühlen (→ F5). Das Wasser in der fallenden Flasche würde nicht mehr ausrinnen, weil die Schwerkraft scheinbar verschwunden ist (→ F4). Und auch die Schwerelosigkeit der Astronauten kommt dadurch zu Stande, weil sie sich im freien Fall um die Erde befinden (→ F6) – und nicht, weil dort oben keine Gravitationskraft mehr herrscht. Tatsächlich liegt diese 400 km über der Erde immer noch bei 90 % im Vergleich mit der Erdoberfläche.

→ **Info:** Zero g

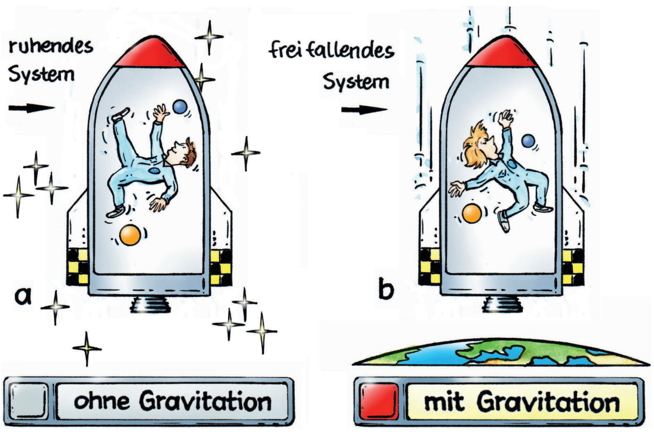


Abb. 43.4: Es ist nicht zu unterscheiden, ob ein Raumschiff fernab aller Himmelskörper im All schwebt (a) oder sich im freien Fall befindet (b). Bei a wirken weder träge noch schwere Masse, bei b heben sie einander genau auf (→ F4 bis → F6).

Mit dem Äquivalenzprinzip setzte Einstein träge und schwere Masse gleich. Er sah darin nicht eine Nebensache, sondern eine **fundamentale Eigenschaft des Universums.** Er leistete damit einen großen Beitrag für das generelles Prinzip der Physik, möglichst viele Phänomene unter einem einheitlichen Gesichtspunkt oder in einer einheitlichen Theorie zu vereinigen.

Aber Einstein blieb nicht bei der Mechanik stehen. Er erweiterte die Äquivalenz auf die gesamte Physik und setzte fest, dass **jedes beliebige Experiment** im Himmelslabor dieselben Resultate liefert wie im Erdlabor. Eine direkte Folge daraus ist, dass auch Licht im Gravitationsfeld abgelenkt

i Stillschweigend gleichgesetzt

In der Mechanik werden träge und schwere Masse immer **stillschweigend gleichgesetzt,** etwa wenn man die Erdbeschleunigung berechnet. Das **Gravitationsgesetz** (Kap. 10, „Big Bang 5") lautet:

$$F = m_s \frac{GM_s}{r^2}$$

M_s und m_s sind die **schweren Massen** der Erde und des Objekts, r der Abstand der Schwerpunkte und G die Gravitationskonstante ($6{,}673 \cdot 10^{-11}$ Nm²/kg²). Kurz kann man sagen: Gravitationskraft = schwere Masse × Stärke des Schwerefeldes.

Die **Bewegungsgleichung** (Kap. 7.3, „Big Bang 5") lautet $F = m_T \cdot a$ oder Kraft = träge Masse × Beschleunigung. Die Masse in dieser Gleichung ist die **träge Masse.** Sie gibt an, wie sehr sich das Objekt der Beschleunigung widersetzt. Wenn man gleichsetzt, erhält man:

$$m_s \frac{GM_s}{r^2} = m_T \cdot a \Rightarrow a = \frac{m_s}{m_T} \frac{GM_s}{r^2} \quad \text{oder}$$

Beschleunigung = schwere Masse/träge Masse × Stärke des Schwerefeldes. Weil träge und schwere Masse immer gleich groß sind, hängt die Beschleunigung im freien Fall nur von der Stärke des Gravitationsfeldes ab (→ F1).

i Zero g

In Bremen gibt es – einzigartig in Europa – einen Fallturm, der unter anderem von der European Space Agency (ESA) für Experimente in **Schwerelosigkeit** genutzt wird (siehe Kap. 7.1, „Big Bang 5"). Die Verhältnisse sind wie in einem fallenden Aufzug (→ F5). Für Menschen ist das auf Grund der hohen Beschleunigungen bei der Landung natürlich nicht geeignet. Beim Raumfahrertraining fliegt man zum Simulieren der Schwerelosigkeit mit einem Flugzeug entlang einer **Wurfparabel** (Abb. 43.5). An Bord wirkt es dann so, als ob es keine Gravitation mehr gäbe (Abb. 43.6).

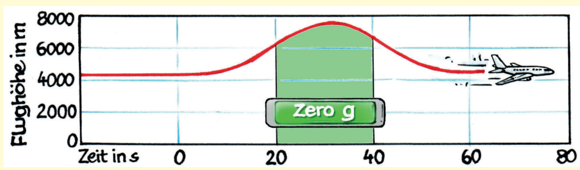


Abb. 43.5: Parabelflug: Der rechte, absteigende Teil im Zero-g-Bereich entspricht einem horizontalen Wurf.

Abb. 43.6: Schwerelosigkeit während eines Parabelfluges

werden muss. Diese erweiterte Form des Äquivalenzprinzips, die eine Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie bildet, lautet: Mit keinem wie auch immer gearteten Experiment kann man zwischen Trägheit und Schwere unterscheiden. Die Naturgesetze nehmen in allen Fällen die gleiche Form an.

→ **Info:** Fallende Photonen

i Fallende Photonen

Nimm an, dass ein Photon quer durch eine Rakete fliegt, während diese nach oben beschleunigt (Abb. 43.7). Aus Sicht eines Beobachters **von außen** fliegt das Photon **schnurgerade.** Weil die Rakete aber nach oben beschleunigt, gleicht die Photonenbahn aus Sicht eines Beobachters **innen einer Wurfparabel** (Abb. 43.8 a). Aus dem Äquivalenzprinzip folgt somit direkt, dass auch Licht im Gravitationsfeld abgelenkt werden muss (siehe auch Kap. 43.6, S. 46), und das ist auch tatsächlich der Fall.

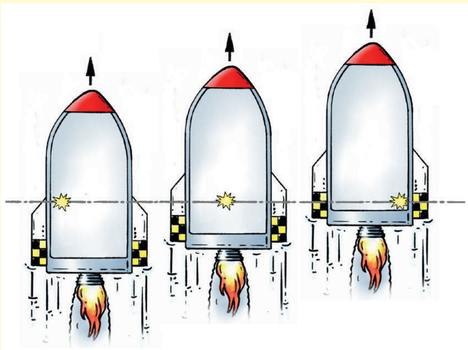


Abb. 43.7: Vorgang aus der Außensicht: Das Photon bewegt sich entlang einer Geraden.

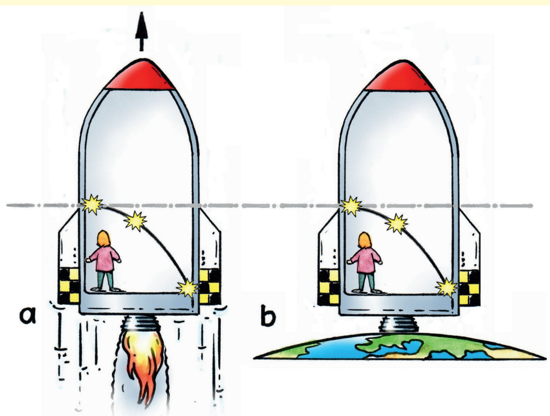


Abb. 43.8: a) Derselbe Vorgang aus Sicht eines Beobachters in der Rakete b) Auf Grund des Äquivalenzprinzips folgt daraus die Ablenkung eines Lichtstrahls im Gravitationsfeld.

Z Zusammenfassung

Zunächst vereinheitlichte Einstein träge und schwere Masse im Äquivalenzprinzip und erweiterte dieses dann auf alle beliebigen Experimente. Schweben im All und freier Fall sowie Beschleunigung durch eine Rakete und Beschleunigung durch die Gravitation wurden somit ununterscheidbar.

43.2 Wegtransformierte Gravitation

Lokale Inertialsysteme

Wir werden uns hier weitere Gedanken über Inertialsysteme machen und das Äquivalenzprinzip exakter formulieren. Dieser Abschnitt ist vertiefend und zum Verständnis der späteren Kapitel nicht zwingend notwendig – er kann auch übersprungen werden.

F7 W1 Was versteht man unter dem Begriff Inertialsystem? Ist ein ruhig fahrender Zug ein Inertialsystem? Ist ein frei fallendes System wie Abb. 43.4 b ein Inertialsystem?

F8 W1 Die Zentrifugalkraft ist eine so genannte Scheinkraft. Was ist damit gemeint? Lies nach in Kap. 17.6, „Big Bang 6“!

F9 S1 Du beklebst eine gewölbte Fläche, etwa einen Teller oder einen Trichter, mit Briefmarken. Werden diese exakt aneinanderpassen? Solltest du, damit sie gut passen, eher große oder kleine Marken verwenden?

F10 S1 Zwei unterschiedlich große Raumschiffe fallen frei auf die Erde zu (Abb. 43.9). Im Inneren befinden sich jeweils zwei Bälle. Was passiert mit den Bällen während des freien Falls? Gibt es Unterschiede zwischen a und b?

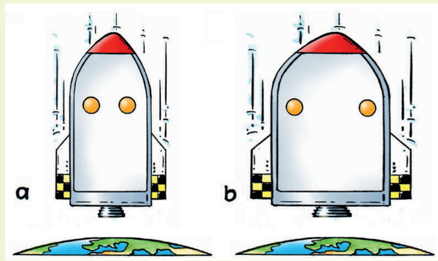


Abb. 43.9

Mit den **Inertialsystemen** ist das so eine Sache. Meistens wird dabei nämlich ein bisschen geschummelt. Auch wir haben in Kap. 38.2 (S. 7) gemogelt. Bezüglich des Inertialsystems gibt es verschiedene Definitionen (→ F7). Eine davon lautet: In Inertialsystemen gilt der Trägheitssatz (lat. iners = träge): Ist ein Gegenstand in Ruhe, dann bleibt er auch in Ruhe. Ist ein unbeschleunigt rollender Zug ein Inertialsystem? Genau genommen nein! Warum?

Nimm an, eine Kugel liegt auf einem Tisch. Wenn die Platte waagrecht und völlig eben ist und der Zug nicht beschleunigt, dann bleibt die Kugel liegen. Wenn du aber eine Kugel neben dem Tisch auslässt, fällt sie beschleunigt zu Boden. Der **Trägheitssatz gilt nur in horizontaler Richtung**, nicht aber vertikal. Salopp könnte man sagen, dass der unbeschleunigt rollende Waggon ein „zweidimensionales Inertialsystem“ ist. Gibt es Systeme, bei denen der **Trägheitssatz in allen drei Dimensionen gilt?** Ja, frei fallende beziehungsweise im All schwebende Systeme (siehe Abb. 43.4 und Abb. 43.10 b).

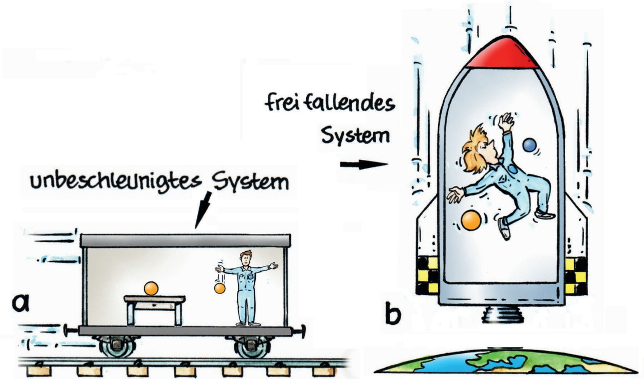


Abb. 43.10: a) Eine Kugel, die am Tisch liegt, bleibt liegen. Eine Kugel, die du auslässt, wird vertikal beschleunigt. Der Trägheitssatz ist in vertikaler Richtung nicht erfüllt.
b) Alle Objekte, die in Ruhe sind, bleiben in Ruhe. Der Trägheitssatz ist in allen Richtungen erfüllt.

Man kann sagen: In einem Gravitationsfeld frei fallende Bezugssysteme sind Inertialsysteme. Allerdings gilt das nur für kleine räumliche Ausdehnungen. Um das zu verstehen, sehen wir uns → **F10** an. Die beiden Bälle im Raumschiff fallen nicht parallel, sondern genau genommen in Richtung Erdmittelpunkt. Wenn das Labor klein ist (Abb. 43.11 a), fällt das nicht weiter ins Gewicht. Ist das Labor aber größer (b), dann merkt man, dass die Kugeln mit der Zeit aufeinander zudriften.

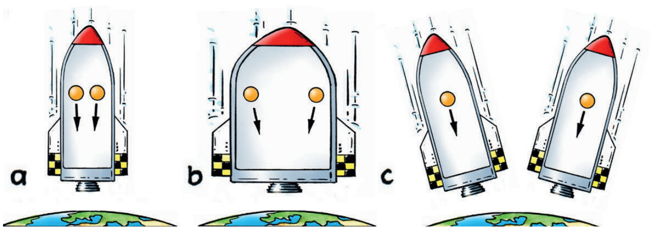


Abb. 43.11: a) Die Bälle fallen so gut wie parallel. b) Die Bahnen der Bälle laufen aufeinander zu. Diese Rakete ist kein Inertialsystem. c) Man kann das große System wieder durch zwei lokale Inertialsysteme ersetzen.

Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie gibt es also keine **großräumigen Inertialsysteme**, sondern nur **lokale Inertialsysteme.** Man könnte zum Beispiel die beiden Kugeln in zwei kleine Raketen stecken, die jeweils wieder ein Inertialsystem bilden (Abb. 43.11 c).

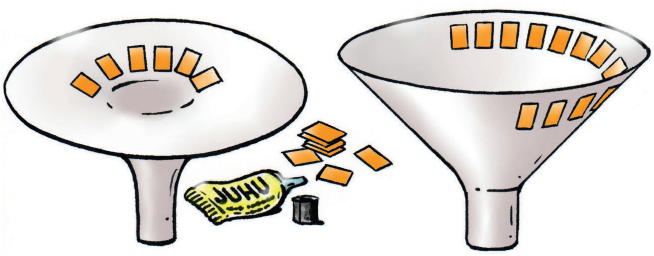


Abb. 43.12: Die Marken passen nicht exakt aneinander.

i Wegtransformieren

Stell dir vor, auf einer rotierenden Scheibe ist eine Kugel an einer Feder montiert (Abb. 43.13). Der Beobachter außen (a) sagt: „Die Kugel beschreibt eine Kreisbahn. Dazu ist eine **Zentripetalkraft F_{ZP}** notwendig, die nach innen zeigt.“ Der mitrotierende Beobachter (b) sagt: „Scheibe und Kugel sind in Ruhe. Alle Kräfte sind im Gleichgewicht. Die Federkraft wird von der **Zentrifugalkraft F_{ZF}** ausgeglichen, die von mir wegzeigt.“

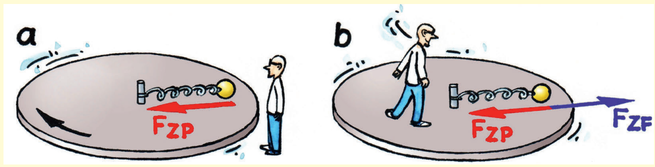


Abb. 43.13

Du siehst, dass die Zentrifugalkraft nur für einen rotierenden Beobachter existiert (→ **F8**). Man nennt sie daher auch eine **Scheinkraft**. Damit meint man generell **Kräfte**, die nur **in bestimmten Bezugssystemen existieren** und die man durch Änderung des Bezugssystems wegtransformieren kann. Damit meint man aber nicht, dass sie gar nicht existieren. Schließlich kannst du die Zentrifugalkraft in einer Kurve tatsächlich spüren.

Die Relation der lokalen Inertialsysteme zueinander wird durch die Zentralmasse bestimmt und kann sehr kompliziert sein. Du kannst dir das so vorstellen: Wenn du **Marken** auf eine gekrümmte Fläche klebst, werden diese an den Rändern niemals genau zusammenpassen (→ **F9**, Abb. 43.12). Je kleiner die Marken, desto besser passen sie. Dasselbe gilt für lokale Inertialsysteme. Je kleiner diese sind, desto besser passen sie an den Rändern zusammen.

Im Rahmen der ART wird die Gravitation ähnlich wie eine **Scheinkraft** behandelt: Durch Änderung des Bezugssystems kann man sie **wegtransformieren**, denn in einem frei fallenden System verschwindet sie (wie in Abb. 43.6, S. 39). Allerdings: Die Zentrifugalkraft lässt sich durch Ändern des Bezugssystems überall gleichzeitig, die **Gravitation** aber immer nur **lokal wegtransformieren.** Dieser lokale Charakter unterscheidet die Gravitation von den klassischen Scheinkräften der Mechanik.

→ **Info:** Wegtransformieren

Z Zusammenfassung

Im Rahmen der ART gibt es nur mehr lokale Inertialsysteme. Die Gravitation wird wie eine Scheinkraft behandelt, die durch Änderung des Bezugssystems wegtransformiert werden kann. Man kann sie aber immer nur in lokalen Systemen zum Verschwinden bringen, niemals global.

43.3 Ein Photon sieht wieder rot
Frequenzverschiebung im Gravitationsfeld

Was passiert mit einem Photon, das im Gravitationsfeld der Erde aufsteigt? Und was passiert, wenn es „auf die Erde fällt"? Es kann ja seine Geschwindigkeit nicht verändern, oder!?

F11 W1 Was versteht man unter Hebearbeit und Hebeenergie? Wie lautet die Gleichung dazu im homogenen Schwerefeld? Wie lautet sie im allgemeinen Fall? Lies nach in Kap. 8.2 und 10.2, „Big Bang 5"! Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Energie eines Photons und seiner Frequenz? Was ist das Planck'sche Wirkungsquantum? Lies nach in Kap. 33.3, „Big Bang 7"! Was versteht man unter Rotverschiebung? Lies nach in Kap. 42.1, S. 31.

F12 E1 Du weißt, was mit normalen Objekten in der Schwerkraft passiert. Aber was passiert mit Photonen, die im Schwerefeld der Erde aufsteigen (Abb. 43.14)? Fallen sie zurück? Was passiert, wenn du Photonen „auf die Erde fallen lässt"? Können Sie die Lichtgeschwindigkeit überschreiten? Oder verändern sie sich in anderer Weise? Aber wie? Und warum?

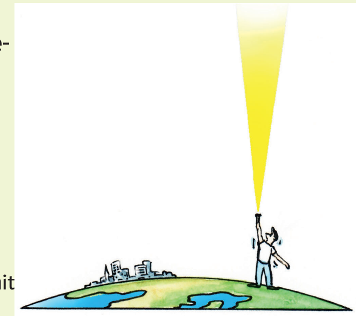


Abb. 43.14: Was passiert mit den Photonen?

Aus dem **Äquivalenzprinzip** folgt direkt, dass ein Lichtstrahl im Gravitationsfeld abgelenkt werden muss (Kap. 43.1, S. 40). Was ist aber, wenn man das Licht senkrecht nach oben schickt (→ **F12**)? Es kann ja nicht langsamer werden! Die SRT zeigt, dass man **Energie und Masse äquivalent** behandeln kann (siehe Kap. 41.2, S. 27). Man kann Photonen also eine Masse zuordnen.

Wenn man diese Idee im Rahmen des Äquivalenzprinzips ausbaut, wird klar, dass die Schwerkraft auch auf die **Photonen** wirken muss. Ein Photon, das im Schwerefeld der Erde aufsteigt, muss also Energie verlieren. Dadurch vermindert sich aufgrund von $E = hf$ auch seine Frequenz (Abb. 43.15). Das Aufsteigen eines Photons im Gravitationsfeld führt zu einer gravitativen Rotverschiebung. Wenn ein Photon nach unten geschickt wird, dann gewinnt es dabei an Energie und die Frequenz erhöht sich. Das „Fallen" eines Photons im Gravitationsfeld führt zu einer gravitativen Blauverschiebung.

Man kann die **Gleichung für die Frequenzverschiebung** für den speziellen Fall des homogenen Erdschwerefelds angeben oder für den allgemeinen Fall einer beliebigen Zentralmasse. Bei Rotverschiebung muss man das Minus einsetzen, bei Blauverschiebung das Plus.

→ **Info:** Frequenzverschiebung

Abb. 43.15: Beim Aufsteigen im Gravitationsfeld verlieren Photonen an Frequenz, und es kommt zur Rotverschiebung. Beim Absteigen kommt es zur Blauverschiebung. Der Effekt ist sehr übertrieben dargestellt.

F Formel: Frequenzverschiebung im homogenen Erdschwerefeld

$$f' = f\left(1 \mp \frac{gH}{c^2}\right)$$

g … Erdbeschleunigung, 9,81 m/s²
H … Hebehöhe [m]
c … Lichtgeschwindigkeit [m/s]

i Frequenzverschiebung

Die **Energie eines Photons** ist $E = h \cdot f$ (h ist das Planck'sche Wirkungsquantum mit $6{,}67 \cdot 10^{-34}$ Js). Die Photonen haben ein Massenäquivalent von $m = E/c^2 = hf/c^2$. Zum Aufsteigen im Gravitationsfeld ist eine **Hebearbeit** notwendig. Die Energie des Photons verringert sich um diesen Wert. Es gilt also dann:

$$E' = hf' = hf - W_H$$

Es gibt nun zwei Möglichkeiten, eine Gleichung für die Frequenzänderung abzuleiten. Man kann einmal von einem **homogenen Erdschwerefeld** ausgehen, in dem sich g während des Aufsteigens nicht ändert. Für die Hebearbeit gilt dann $W_H = mgH$ (→ **F11**). Wenn man oben einsetzt erhält man:

$$E' = hf' = hf - \frac{hf}{c^2}gH \text{ und } f' = f\left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)$$

Die andere Möglichkeit ist, eine Gleichung für den **allgemeinen Fall** aufzustellen, in dem ein Photon im Gravitationsfeld einer beliebigen Zentralmasse M (etwa der Erde oder eines Sterns) aufsteigt (→ **F11**). Dann gilt die Gleichung:

$$W_H = mGM\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_n}\right)$$

Wenn man annimmt, dass das Photon **dem Gravitationsfeld entkommt** ($r_n = \infty$), vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$W_H = m\frac{GM}{r}$$

Daraus folgt:

$$f' = f\left(1 - \frac{GM}{c^2 r}\right)$$

Schickt man das Licht nach unten, muss man in beiden Gleichungen das Minus durch ein Plus ersetzen.

F Formel: Frequenzverschiebung im inhomogenen Feld einer beliebiger Zentralmasse

$$f' = f\left(1 \mp \frac{GM}{c^2 r}\right)$$

G … Gravitationskonstante ($6{,}673 \cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2)
M … Zentralmasse [kg]
r … Abstand vom (Massen)Mittelpunkt der Zentralmasse [m]

Die **Rotverschiebung** wurde von Einstein bereits **1911** vorausgesagt, also noch vor der Fertigstellung seiner ART. Der Effekt ist aber auf der Erde extrem winzig. Selbst wenn du im Flugzeug sitzt und auf den Boden 10 km unter dir siehst, verändert sich die Frequenz des Lichts nur um rund ein Billionstel (siehe → **F33**, S. 53). Erst **1959** gelang den amerikanischen Physikern Robert Pound und Glen Rebka ein experimenteller Nachweis. Sie schickten dazu Gammastrahlung einen 20 m hohen Turm hinauf (Abb. 43.16).

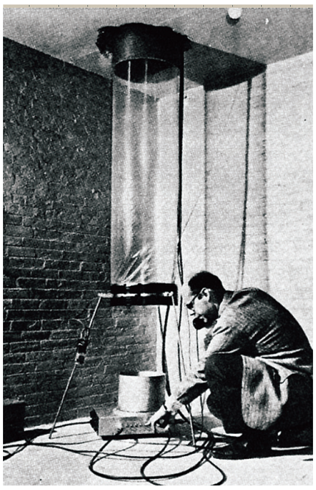


Abb. 43.16: Robert Pound am unteren Ende des Turms: Die Präzision des Experiments war beachtlicht. Bei einer Steighöhe von 20 m liegt der Faktor gH/c^2 bei winzigen $2 \cdot 10^{-15}$. Die Messergebnisse stimmten mit der Theorie innerhalb einer Messgenauigkeit von 1% überein.

Z Zusammenfassung

Steigen Photonen in einem beliebigen Schwerefeld auf, so verlieren sie Energie und ihre Frequenz sinkt. Das führt zu einer gravitativen Rotverschiebung. Im umgekehrten Fall erfahren die Photonen eine Blauverschiebung.

43.4 Eine neue „Lichtuhr“
Zeitveränderung im Gravitationsfeld

Auch im Rahmen der ART gehen Uhren nicht immer gleich schnell. Es hängt davon ab, ob sie sich in der Nähe einer Masse befinden oder nicht. Das hat gewichtige Auswirkungen auf das GPS!

→ **?:** Fragenbox

Aus der **Frequenzverschiebung von Licht** durch Auf- oder Absteigen im Gravitationsfeld (Kap. 43.3) folgt eine faszinierende Tatsache über den **Gang von Uhren**. Konstruieren wir in Gedanken eine Uhr, die von einem einfärbigen Lichtstrahl gesteuert wird. Nimm an, das Licht ist gelb und hat eine Frequenz von $5 \cdot 10^{14}$ Hz. Nach dieser Anzahl von Schwingungen springt der Zeiger um eine Sekunde weiter. Eine **Atomuhr** funktioniert ganz ähnlich. Verknüpfen wir das nun mit der Frequenzverschiebung im Gravitationsfeld.

F13 Jede periodische Schwingung, etwa die eines Lichtstrahls, kann als Uhr angesehen werden (Abb. 43.17).
S1 Person B blickt von oben auf A und vergleicht die Frequenz der beiden Lichtstrahlen. Sie schließt daraus auf die Ganggeschwindigkeit ihrer „Lichtuhr“ im Vergleich zu A. Was bemerkt sie? Und wie sieht es umgekehrt für A aus?

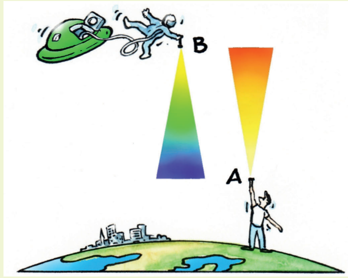


Abb. 43.17: Was passiert mit den Photonen?

F14 Was versteht man unter GPS? Wie funktioniert es?
W1 Welche Probleme könnten sich in Zusammenhang mit der Relativitätstheorie für diese Technik ergeben?

Person B sieht auf A hinunter (→ **F13**). Der Lichtstrahl von A ist rotverschoben, die Frequenz sinkt also. Seinen eigenen Lichtstrahl sieht B normal. Weil die Uhren von den Lichtstrahlen gesteuert werden, **sieht B** somit **die Uhr von A langsamer gehen** als seine eigene und sagt *„Deine Uhr geht langsamer!“* (Abb. 43.18). Wie ist es umgekehrt? A sieht zu B hinauf. Der Lichtstrahl von B ist blauverschoben und die Frequenz steigt. A sieht die Uhr von B schneller gehen als seine eigene und sagt *„Deine Uhr geht schneller!“* Der **Effekt** ist also **nicht symmetrisch** wie bei der Zeitdilatation (siehe Abb. 40.9, S. 19). Das bedeutet also unter dem Strich: Uhren in der Nähe einer Masse gehen langsamer. Verblüffend!

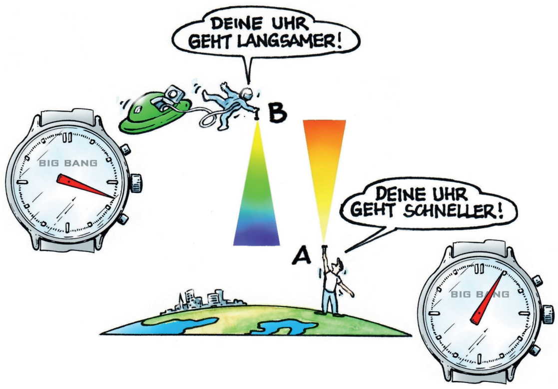


Abb. 43.18: In der Nähe einer Masse gehen Uhren langsamer.

Ausgehend von der Frequenzverschiebung im Gravitationsfeld (Kap. 43.3) können wir die Zeitveränderung von Uhren auch quantitativ ableiten. Man kann wiederum eine Gleichung für das **homogene Gravitationsfeld der Erde** aufstellen. Damit lässt sich berechnen, um wie viel eine Uhr schneller geht, wenn du sie um eine gewisse Höhe hebst. Die Gleichung für den **allgemeinen Fall** gibt den Gang einer Uhr an der Oberfläche einer Zentralmasse im Vergleich mit einer Uhr im Unendlichen an.

→ **Info:** Frequenzverschiebung -> S. 44

i Frequenzverschiebung

Bezeichnen wir die Frequenzen nicht mit *f* und *f'*, sondern entsprechend Abb. 43.18 mit f_A und f_B. Die Gleichung für die **Rotverschiebung** lautet daher:

$$f_A = f_B\left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)$$

Zwischen der Schwingungsdauer *T* und der Frequenz *f* besteht der Zusammenhang $T = 1/f$. Das ergibt also:

$$\frac{1}{T_B} = \frac{\left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)}{T_A} \Rightarrow T_A = T_B\left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)$$

Daraus folgt $T_A < T_B$. Die untere Uhr geht langsamer.

F Formel: Gravitative Zeitveränderung im homogenen Erdschwerefeld

$$T_A = T_B\left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)$$

g … Erdbeschleunigung, $g = 9{,}81\,\text{m/s}^2$
H … Hebehöhe [m]
c … Lichtgeschwindigkeit [m/s]
T_A und T_B … Zeit, die in der unteren und oberen Uhr vergeht [s]

F Formel: Gravitative Zeitveränderung im inhomogenen Feld einer beliebigen Zentralmasse

$$T_A = T_B\left(1 - \frac{GM}{c^2 r}\right)$$

G … Gravitationskonstante ($6{,}673 \cdot 10^{-11}\,\text{Nm}^2/\text{kg}^2$)
M … Zentralmasse [kg]
r … Radius der Zentralmasse [m]
c … Lichtgeschwindigkeit [m/s]
T_A und T_B … Zeit, die in der unteren und oberen Uhr vergeht [s]

Daraus folgt zum Beispiel, dass deine **Füße langsamer altern** als dein **Kopf**!!! Der Zeitunterschied liegt aber über dein ganzes Leben gesehen nur in der Größenordnung von weniger als einer Mikrosekunde. Kopfstand zu machen ist also keine sinnvolle Maßnahme, um Antiaging für das Gesicht zu machen. Wenn du am Meer wohnst, alterst du im Laufe deines Lebens etwa eine Millisekunde langsamer als jemand auf der Alm (siehe → F34, S. 53). Auch das kann man natürlich nicht merken. Es gibt aber eine verbreitete Alltagstechnik, bei der dieser Effekt deutlich wird, nämlich das GPS, also das **G**lobal **P**ositioning **S**ystem (→ F14; Abb. 43.19).

Rund **30 Satelliten mit Atomuhren** an Bord umkreisen die Erde und funken ihre Zeit. Weil sie von dir unterschiedlich weit weg sind, dauern die Laufzeiten verschieden lang. Dein Handy empfängt daher **leicht verschiedene Zeitangaben.** Daraus rekonstruiert es zunächst seinen Abstand zu den Satelliten und dann die Position auf der Erde auf wenige Meter genau. Im Rahmen der Relativitätstheorie gehen aber die Satellitenuhren etwas zu schnell. Ohne relativistische Korrektur würde dadurch eine **Ungenauigkeit von 500 m pro Stunde** entstehen (siehe → F35, S. 53), und du würdest vielleicht in einem Gestrüpp landen oder in einer Sackgasse!

→ **Info:** Genial einfach

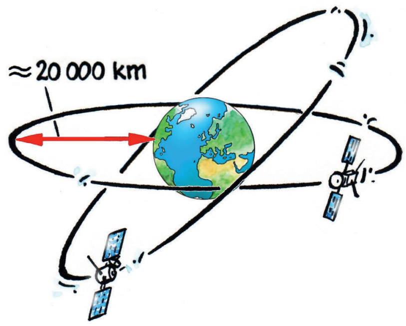


Abb. 43.19: Maßstabsgetreue Bahnen von zwei GPS-Satelliten

i Genial einfach

Auf die Uhren der **GPS-Satelliten** wirken zwei gegenläufige Effekte. Die Satelliten bewegen sich relativ zur Erdoberfläche mit 3874 m/s. Im Rahmen der SRT gehen dadurch ihre **Uhren langsamer** als auf der Erde. Es gilt:

$$\frac{t_S}{t_E} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0{,}999999999165 = 1 - 0{,}835 \cdot 10^{-10}$$

Im Rahmen der **ART** kommt es zu einem gegenläufigen Effekt. Durch die geringere Gravitation gehen nämlich die **Uhren schneller** als auf der Erde. Die Satelliten befinden sich 26.560 km (= r_S) vom Erdmittelpunkt entfernt. Rechnen wir exakt:

$$\frac{T_S}{T_E} = \frac{1}{\left(1 - \frac{GM}{c^2}\left(\frac{1}{r_E} - \frac{1}{r_S}\right)\right)}$$

Mit $M = 5{,}98 \cdot 10^{24}$ kg und $r_E = 6370$ km erhält man:

$$\frac{T_S}{T_E} = 0{,}000000000529 = 1 + 5{,}289 \cdot 10^{-10}$$

Dieser Effekt ist etwa **6-mal so groß** wie der durch die SRT. In Summe gehen die Satellitenuhren um den Faktor $4{,}45 \cdot 10^{-10}$ zu schnell. Nun sind die Techniker auf einen genial einfachen Trick gekommen: Die **Satellitenuhren** werden von vornherein **so eingestellt,** dass sie um den oben errechneten Faktor **zu langsam gehen.** Das gleicht sich genau aus. Konkret werden sie statt auf 10,23 MHz auf 10,229999995453 MHz geeicht. Von der Erde aus wirkt es dann später so, als hätten die Uhren im Orbit 10,23 MHz und man muss sich nicht mehr um die Relativitätstheorie kümmern.

Z Zusammenfassung

In der Nähe von Massen gehen Uhren langsamer. Im Alltag ist der Effekt nicht relevant, aber GPS wäre ohne relativistische Korrektur eine sinnlose Technik.

43.5 Verbeulter Raum
Längenveränderung und Raumkrümmung

Massen haben nicht nur einen Einfluss auf den Gang von Uhren, sondern auch auf Maßstäbe. Das führt zu dem, was man als Raumkrümmung bezeichnet.

F15 S1 Du befindest dich im freien Fall um die Erde und daher in einem Inertialsystem (Abb. 43.20). Mit einer Atomuhr und einem Maßstab misst du unaufhörlich die Lichtgeschwindigkeit, die natürlich immer gleich groß ist. Nun geht aber bei A die Uhr langsamer als bei B. Was folgt daraus für die Länge des Maßstabes?

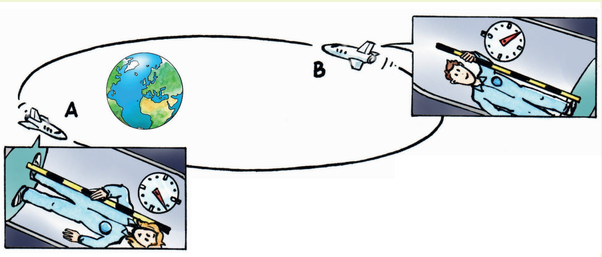


Abb. 43.20: Labor auf einer elliptischen Bahn um die Erde

F16 W1 Du vermisst Durchmesser und Umfang der Erdbahn und legst die Schnüre später irgendwo im Weltall – abseits von großen Massen – auf. Wie würden sie dann aussehen (Abb. 43.21)?

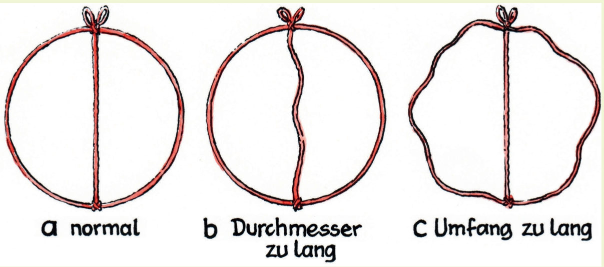


Abb. 43.21: Wie würden die Schnüre aussehen?

F17 W1 Welche Innenwinkelsumme haben Dreiecke? Welche Innenwinkelsumme hätte ein Dreieck mit einer Seitenlänge von 10.000 km, das du auf die Erdkugel malst? Und welchen Radius hätte ein Kreis von 40.000 km, den du auf die Erde malst?

Ausgehend von der gravitativen Zeitveränderung (Kap. 43.4) kann man einen Analogieschluss auf das **Verhalten von Maßstäben im Gravitationsfeld** ziehen. In einem um die Erde frei fallenden Labor misst du natürlich immer dieselbe Lichtgeschwindigkeit (→ F15). Wenn bei Punkt A die Zeit langsamer vergeht als bei B, du aber trotzdem denselben Wert für die Lichtgeschwindigkeit misst, dann muss dort der Maßstab kürzer sein. Daraus kann man schließen: Maßstäbe in der Nähe einer Masse sind kürzer. Der Faktor der Verkürzung muss genau so groß sein, wie der Faktor der Zeitverzögerung.

F Formel: Gravitative Längenveränderung im homogenen Erdschwerefeld

$$L_A = L_B\left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)$$

g … Erdbeschleunigung, $g = 9{,}81\,\mathrm{m/s^2}$
H … Hebehöhe [m]
c … Lichtgeschwindigkeit [m/s]
L_A und L_B … Länge eines nahen (A) und eines entfernten Maßstabes (B) [m]

F Formel: Gravitative Längenveränderung im Feld einer beliebigen Zentralmasse

$$L_A = L_B\left(1 - \frac{GM}{c^2 r}\right)$$

G … Gravitationskonstante ($6{,}673 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{Nm^2/kg^2}$)
M … Zentralmasse [kg]
r … Radius der Zentralmasse [m]
c … Lichtgeschwindigkeit [m/s]
L_A und L_B … Länge eines nahen (A) und eines entfernten Maßstabes (B) [m]

Wir haben den gravitativen Einfluss auf Längen durch einem Analogieschluss abgeleitet. Die exakte Berechnung erfordert großen mathematischen Aufwand. Die Vorhersage dieses Effektes ist **eines der wichtigsten Ergebnisse** der ART. Salopp gesagt muss also ein Maßstab am Berg etwas länger sein als im Tal. Aber wie überprüft man das? Bringst du die Maßstäbe zusammen, verschwindet ja der Unterschied! Um den Effekt der Längenveränderung zu überprüfen, muss man sich etwas anderes einfallen lassen.

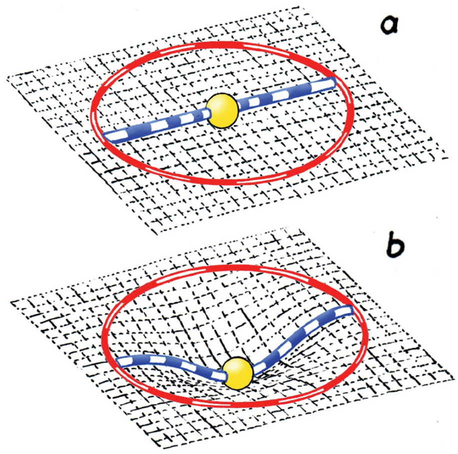


Abb. 43.22: Zwei mögliche Ansichten, um den zu großen Durchmesser zu erklären: a) Der Raum ist eben, aber die Maßstäbe schrumpfen. b) Die Maßstäbe sind gleich lang, aber der Raum ist gekrümmt

Nimm an, du vermisst Umfang und Durchmesser der Erdbahn (→ F16). Weil in der Nähe der Sonne die Maßstäbe schrumpfen, ist der **Durchmesser größer als erwartet** (Abb. 43.22 a). Weil das Schrumpfen nicht direkt durch das Heranbringen weiterer Maßstäbe messbar ist, kann man aber auch festsetzen, dass diese überall die gleiche Länge haben. Dann muss aber der Raum in der Umgebung der Sonne „gekrümmt" sein (Abb. 43.22 b). Auch in diesem Fall ist der Durchmesser größer als erwartet. Das ist das **berühmte Konzept der Raumkrümmung** in der Allgemeinen Relativitätstheorie. Diese zweite Deutung gibt nicht Aufschluss über das Verhalten von Maßstäben, sondern über die **Struktur des Raumes.**

→ Info: Nichteuklidische Geometrie

Es ist natürlich unmöglich, Umfang und Durchmesser der Erdbahn direkt mit Maßstäben zu messen. Der amerikanische Physiker Irwin Shapiro hatte aber **1965** eine geniale Idee, wie man die von der Sonne verursachte Raumkrümmung messen kann. Er ließ einen **Radarstrahl** an der **Venus** reflektieren und bestimmte so ihren Abstand (Abb. 43.25). Je näher sich die Venus – von der Erde ausgesehen – bei der Sonne befindet, desto größer muss der **zusätzlich zurückgelegte Weg** sein (b). Und genau das konnte man im Experiment belegen. Schickt man das Signal haarscharf an der Sonne vorbei, dann ist der Weg durch die Raumkrümmung 36 km länger, als man in einem flachen Raum erwarten könnte. Der Radarstrahl wird dabei auch leicht abgelenkt (siehe auch Abb. 43.29).

→ Info: Das Shapiro-Experiment

i Nichteuklidische Geometrie

Die **Geometrie,** die du in Mathematik lernst, ist die der Ebene. Sie geht auf den griechischen Mathematiker Euklid zurück (365 bis 300 v. Chr.) und heißt daher auch **euklidische Geometrie.** In dieser hat ein Dreieck eine Innenwinkelsumme von 180° und ein Kreis den Umfang $2r\pi$ (**→ F17**). Im Rahmen der ART gilt diese Geometrie auf Grund der Raumkrümmung aber nicht. Man spricht dann von **nichteuklidischer Geometrie.** In Abb. 43.23 siehst du zwei Beispiele dazu.

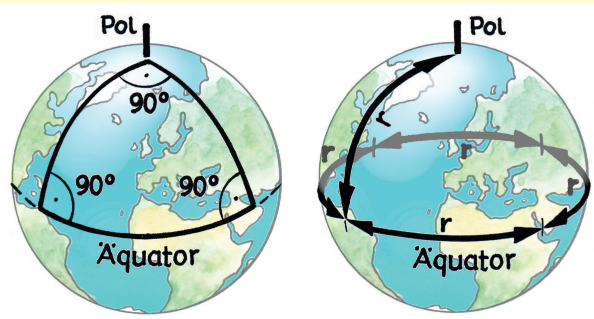


Abb. 43.23: a) Ein Dreieck mit einer Seitenlänge von 10.000 km hat auf der Erde eine Innenwinkelsumme von 270°. b) Ein Kreis mit einem Umfang von 40.000 km (= Erdumfang) hat einen Radius von 10.000 km. In diesem speziellen Fall gilt also $U = 4r$ und nicht wie gewohnt $U = 2r\pi \approx 6{,}18r$.

i Das Shapiro-Experiment

Die Zeitverzögerung des Radarsignals kann im Extremfall 240 µs betragen (siehe Abb. 43.24). Sie hat zwei Ursachen. 50 % des Effekts kommen dadurch zu Stande, dass in der Nähe der Sonne die **Uhren langsamer** gehen. Die anderen 50 % sind auf die **Raumkrümmung** zurückzuführen. 120 µs entspricht einem längeren Weg von $s = c \cdot t = 36$ km. Wenn du bedenkst, dass der Erdbahndurchmesser $1{,}5 \cdot 10^{11}$ m beträgt, ist das ein winziger Wert und er zeigt, wie schwach die Raumkrümmung ist.

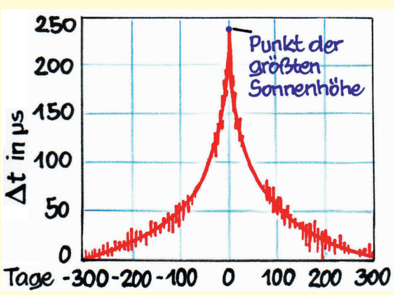


Abb. 43.24: Im Extremfall, wenn die Venus genau am Sonnenrand steht, macht die Zeitverzögerung 240 µs aus.

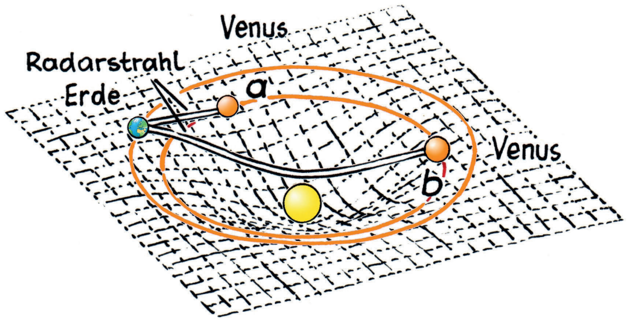


Abb. 43.25: Je näher die Venus von der Erde aus gesehen bei der Sonne steht, desto stärker macht sich die Raumkrümmung und somit die Signalverzögerung bemerkbar.

Z Zusammenfassung

In der Umgebung einer großen Masse ist der Raum gekrümmt. Es gilt daher die euklidische Geometrie nicht mehr. Das ist eine der wichtigsten Erkenntnisse der Allgemeinen Relativitätstheorie.

43.6 Verzerrte Galaxien
Lichtablenkung im Gravitationsfeld

Aus dem Äquivalenzprinzip folgt, dass Licht im Schwerefeld abgelenkt wird. Das sehen wir uns hier noch einmal genauer an.

→ ?: Fragenbox

Die **Lichtablenkung** durch das Fallen der Photonen im Gravitationsfeld ist **winzig.** Selbst am Rande der Sonne beträgt sie nur **0,875 Bogensekunden**, also weniger als 1/4000 Grad! Auch Einstein kam zunächst zu diesem Ergebnis, bevor er seine ART fertig entwickelt hatte. Hier hat er einen berühmten Fehler gemacht. Die tatsächliche Ablenkung ist doppelt so groß, nämlich **1,75 Bogensekunden** (**→ F21**), weil nicht nur Uhren langsamer gehen, sondern zusätzlich auch **der Raum gekrümmt ist.** Diese beiden Effekte werden auch beim Shapiro- Experiment gemessen (siehe links). Zu diesem richtigen Ergebnis kam Einstein 1915.

→ Info: Fallende Photonen 2

Die Lichtablenkung am Rand der Sonne ist ein guter Test für die Richtigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Ablenkung muss doppelt so groß sein, wie man an Hand der „fallenden Photonen“ aus klassischer Sicht – also ohne Einbeziehung der Raumkrümmung – berechnen kann. Wenn

F18 Welche zwei Effekte führen beim Shapiro-Experiment
W1 zur Zeitverzögerung? Lies auf S. 46 unten nach!

F19 Auf manchen Aufnahmen sind ferne Galaxien zu
E1 Bögen verzerrt (Pfeil in Abb. 43.26). Was könnte die Ursache dafür sein?

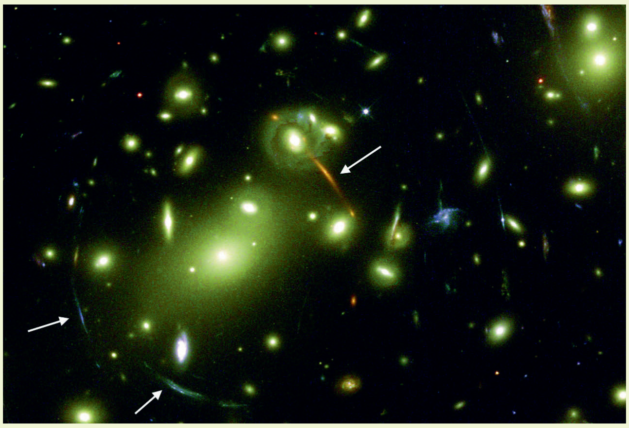


Abb. 43.26

F20 Manche Sterne, die man mit dem Hubble-Teleskop
E1 aufgenommen hat, zeigen eigenartige Licht-Ringe (Abb. 43.27)! Wie könnten diese entstanden sein?

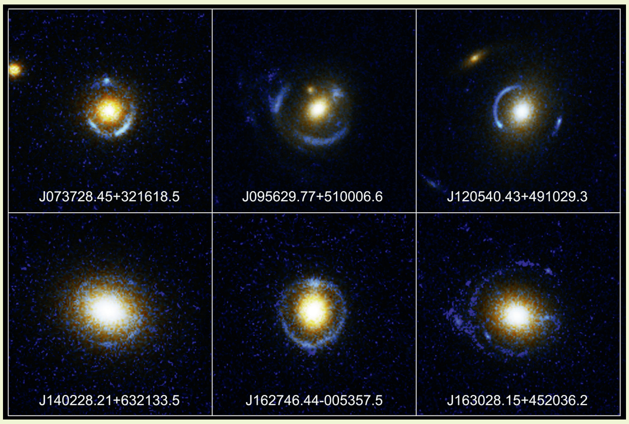


Abb. 43.27: Sechs Beispiele für Sterne, die eigenartige Ringe aufweisen

F21 Wenn ein Lichtstrahl am Rande der Sonne vorbeiläuft,
S1 dann wird er durch die Gravitation etwas abgelenkt (siehe Infobox Fallende Photonen, S. 40). Tippe, wie groß diese Ablenkung in Grad ist!

man diesen **Faktor 2** in einem Experiment messen kann, hat man einen Beleg dafür, dass der Raum wirklich gekrümmt ist, wie es die Allgemeine Relativitätstheorie voraussagt. Und tatsächlich konnte der englische Astronom Sir Arthur Eddington 1919 diesen Faktor 2 in der Ablenkung bestätigen. Bei einer totalen Sonnenfinsternis maß er, wie stark die Sterne durch die Anwesenheit der Sonne von ihrer normalen Position abgelenkt werden (Abb. 43.29). Am Sonnenrand betrug diese Ablenkung wie eben vorhergesagt 1,75 Bogensekunden.

i Fallende Photonen 2

Egal ob man nun sagt, dass die **Lichtablenkung** durch das Fallen der Photonen zu Stande kommt oder durch die in der Nähe der Sonne verlangsamte Zeit, es handelt sich um denselben Effekt. Bedenke, dass wir den verlangsamten Uhrengang aus der Tatsache abgeleitet haben, dass auch auf Photonen die Schwerkraft wirkt (Kap. 43.3 f., ab S. 42).

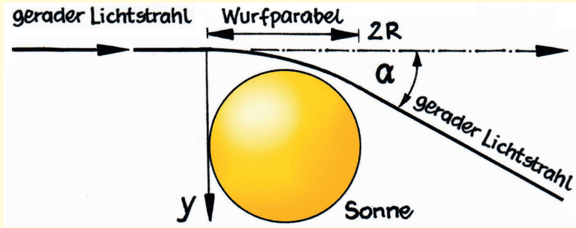


Abb. 43.28: Abschätzung der Lichtablenkung: Wir nehmen vereinfacht an, dass die Schwerkraft der Sonne nur im markierten Teil wirksam ist.

Durch das Schwerefeld werden die Photonen entlang einer **Wurfparabel** abgelenkt (Abb. 43.28). Daher gilt:

$$y = -\frac{a}{2}t^2, \text{ mit } a = \frac{GM}{R^2}$$

(siehe Kap. 5.4.1 und Kap. 10.2, „Big Bang 5"). Weil Ablenkung und somit Geschwindigkeit in y-Richtung minimal sind, gilt näherungsweise $x = ct$ bzw. $t = x/c$ und daher:

$$y(x) = -\frac{a}{2c^2}x^2 = \frac{GM}{2R^2c^2}x^2$$

Die **Lichtablenkung entspricht dem Anstieg *k* der Geraden** bei $x = 2R$:

$$y'(x) = \frac{GM}{R^2c^2}x \Rightarrow y'(2R) = \frac{2GM}{Rc^2} = k = \tan\alpha \approx \alpha$$

Für kleine Winkel gilt $\tan\alpha \approx \alpha$. Das Ergebnis ist also der gesuchte Winkel im Bogenmaß. Für die Sonne ($M = 2 \cdot 10^{30}$ kg; $R = 7 \cdot 10^{8}$ m) erhält man $2{,}43 \cdot 10^{-4}$ Grad oder 0,875″. Der tatsächliche Wert ist wegen der **Raumkrümmung doppelt so groß:**

$$\alpha = \frac{4GM}{Rc^2} = 1{,}75''$$

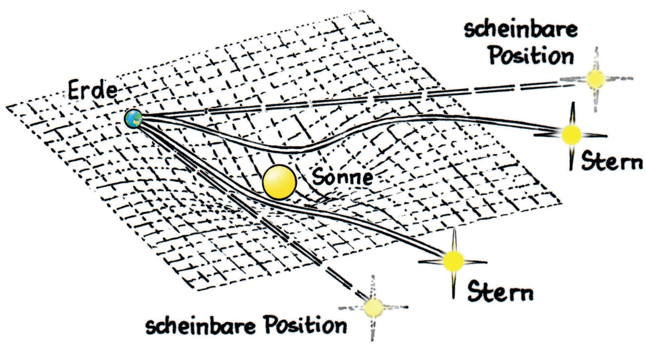


Abb. 43.29: Der Effekt der Lichtablenkung ist doppelt so groß, wie man zunächst erwarten würde. Er ist hier stark übertrieben dargestellt (siehe auch Abb. 43.35, S. 49).

Sogar am Rand einer so gewaltigen Masse wie der Sonne kann die Lichtablenkung nur mit Präzisionsexperimenten gemessen werden. Manchmal werden die Lichtstrahlen sehr entfernter Objekte aber von Galaxien oder gar Galaxienhaufen so stark abgelenkt, dass sie wieder zusammenlaufen (Abb. 43.30). Man spricht dann von **Gravitationslinsen.** Dabei kann es vorkommen, dass die Lichtquelle von der Erde aus gesehen nicht nur verschoben erscheint, sondern dass man **Mehrfachbilder** oder **bogenförmige Erscheinungen** sieht. Auf diese Weise kommen zum Beispiel die verzerrten Galaxienbögen zu Stande (→ F19). Die Ringe um manche Sterne (→ F20), die man Einstein-Ringe nennt, stammen von genau hinter diesen Sternen liegenden anderen Sternen. Imposant sind auch kreuzförmig angeordnete Mehrfachbilder von kosmischen Objekten (Abb. 43.31).

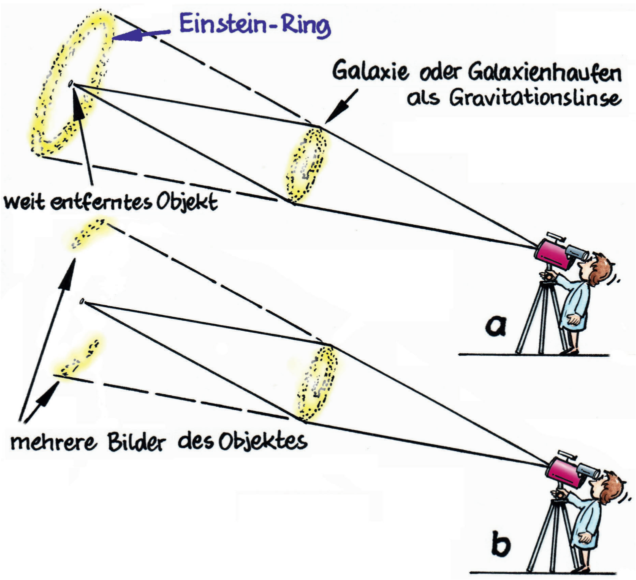


Abb. 43.30: Galaxien oder Galaxienhaufen können bei symmetrischen Verhältnissen das Licht eines Objekts so ablenken, dass dieses als Ring erscheint (a). Meistens sieht man aber Mehrfachbilder (b) oder bogenartige Erscheinungen.

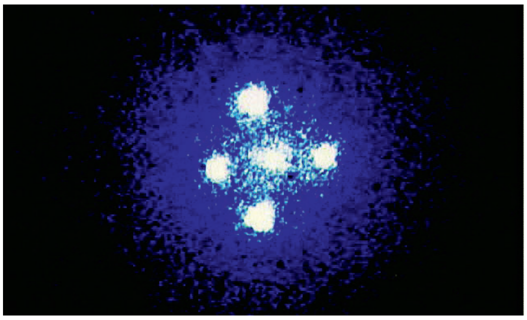


Abb. 43.31: Ein Quasar erscheint durch eine Galaxis im Vordergrund vierfach. Man nennt diese Erscheinung **Einsteinkreuz.** Quasare sind kosmische Objekte mit enorm starker Strahlung im Radiowellenbereich.

Die durch Gravitationslinsen entstehenden Bilder sind aber nicht nur effektvoll, sie haben auch einen wissenschaftlichen Sinn. Die Stärke der Lichtablenkung lässt nämlich einen Rückschluss darauf zu, wie groß der Prozentsatz der geheimnisumwobenen **dunklen Materie** (siehe Abb. 49.27, S. 108) in den als Linsen wirkenden Galaxien ist.

Z Zusammenfassung

Große Massen führen zur Ablenkung des Lichts. Sie ist auf die Verlangsamung der Zeit und die Krümmung des Raums zurückzuführen. Extrem massenreiche Objekte wie Galaxien oder Galaxienhaufen können als Gravitationslinsen wirken.

43.7 Die Legende vom Planeten Vulkan

Periheldrehung, Gravitationswellen und Thirring-Lense-Effekt

In diesem Abschnitt geht es um drei weitere astronomische Effekte, die aus der Allgemeinen Relativitätstheorie folgen.

F22 W1 Was besagen die Kepler'schen Gesetze? Warum ist das 1. Gesetz eine Idealisierung? Was bedeuten die Begriffe Perihel und Aphel? Lies nach in Kap. 9.3 und 10.3, „Big Bang 5". Was versteht man unter Interferenz? Lies in Kap. 18.6, „Big Bang 6" nach!

F23 W1 Der Planet Neptun wurde entdeckt, indem man Uranus genau beobachtete. Was stellte man dabei fest?

F24 S1 Auch die Gravitation breitet sich mit *c* aus. Nimm an, zwei Monde werden durch ein kosmisches Ereignis auseinandergeschleudert (Abb. 43.32 a). Du sitzt am linken Mond und der rechte befindet sich gerade in Position 2. Von welcher Stelle spürst du die Gravitation: Von 1, 2 oder 3? Und wie wäre das, wenn sich die Monde wieder aufeinander zubewegen (b)? Was folgt daraus für die kinetische Energie beim Aufprall?

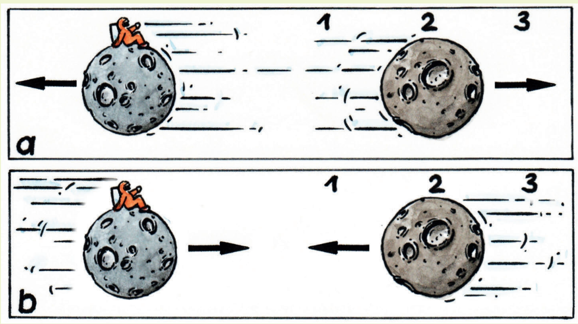


Abb. 43.32

F25 W1 Wie entstehen elektromagnetische Wellen? Lies nach in Kap. 28.1, „Big Bang 7"!

Das **1. Kepler'sche Gesetz** besagt, dass jeder Planet eine Ellipse um die Sonne beschreibt. Diese befindet sich dabei in einem der Brennpunkte (→ F22). Das ist allerdings eine Idealisierung. Erstens befindet sich nicht die Sonne, sondern der **gemeinsame Schwerpunkt** von Planet und Sonne im Brennpunkt. Zweitens beeinflussen einander alle Planeten gegenseitig, wodurch genau genommen kein einziger eine exakte Ellipse beschreibt. So konnte man aus den Unregelmäßigkeiten der **Uranusbahn** auf einen weiteren noch unbekannten Planeten schließen, den man **1846** tatsächlich fand und dem man den Namen **Neptun** gab (→ **F23**).

Auch **Merkur** beschreibt keine exakte Ellipsenbahn. Der Punkt der größten Sonnennähe, das Perihel, verschiebt sich bei jeder Umdrehung ein wenig (Abb. 43.33). Man spricht daher von der Periheldrehung des Merkurs. Einen Großteil davon konnte man mit dem Einfluss der anderen Planeten erklären. Es blieben aber unerklärbare **43 Bogensekunden pro Jahrhundert** über (rund 1/100 Grad). Wie bei Uranus vermutete man zunächst einen noch unentdeckten Planeten und nannte ihn **Vulkan.** Es war ein großer Erfolg Einsteins, dass er mit Hilfe der Relativitätstheorie die fehlenden Bogensekunden erklären konnte. Die Legende von Vulkan bestand trotzdem fort. In der Serie Star Trek ist dieser Planet die Heimat der **Vulkanier**.

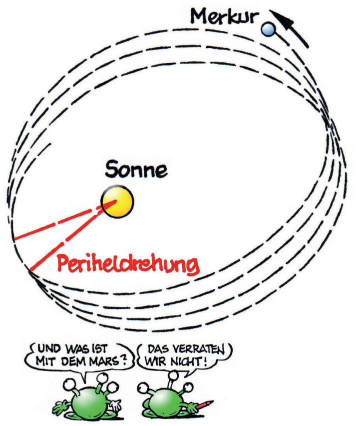


Abb. 43.33: Merkur beschreibt eine Art Rosettenbahn. Der Effekt ist sehr stark übertrieben dargestellt.

→ **Info:** Papiertrichter-Raumkrümmung

i Papiertrichter-Raumkrümmung

Die zusätzliche **Periheldrehung** entsteht einerseits durch die **relativistische Massenzunahme** des Merkur in Sonnennähe, weil dort seine Geschwindigkeit auf Grund des 2. Keplerschen Gesetzes etwas höher ist (→ **F22**). Andererseits entsteht sie durch die **Raumkrümmung.** Dieser Effekt lässt sich mit Hilfe eines eingeschnittenen Blatts Papier, das zu einem Trichter geformt wird, veranschaulichen (Abb. 43.34). Mit dieser Methode lässt sich auch anschaulich jener Teil der Lichtablenkung erklären, der durch die Raumkrümmung zu Stande kommt (Abb. 43.28, S. 47 und Abb. 43.35).

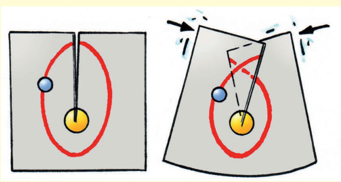


Abb. 43.34: Veranschaulichung der Periheldrehung

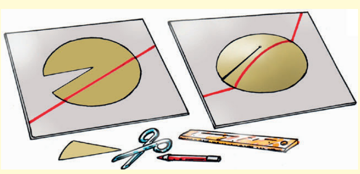


Abb. 43.35: Eine andere Möglichkeit, die Lichtablenkung durch die Raumkrümmung anschaulich zu machen (siehe auch Abb. 43.29)

Manchmal muss man in der Physik einen wirklich sehr langen Atem haben, bis theoretische Vorhersagen experimentell bestätigt werden. Im Jahr **1918** sagte Einstein die Existenz von **Gravitationswellen** voraus – sie sind quasi ein Spin-off seiner ART. Es dauerte 56 Jahre, bis sie indirekt und sogar fast 100 Jahre, bis sie direkt gemessen werden konnten. Aber was sind diese Gravitationswellen und wie entstehen sie? Überlegen wir uns das anhand der beiden auseinanderfliegenden Monde in → **F24**.

Im Rahmen der ART breiten sich Änderungen des Gravitationsfeldes mit Lichtgeschwindigkeit aus. Was bedeutet das für den Mond, der von dir wegfliegt (Abb. 43.32 a)? Die Information über die Stärke seiner Anziehungskraft bewegt sich mit *c* und benötigt eine gewisse Zeit zu dir. Währenddessen bewegt sich der Mond aber weiter. Du spürst seine Gravitation daher aus kürzerer Entfernung (also von Position 1) und daher **mit größerer Kraft,** als es seiner momentanen Position 2 eigentlich entsprechen sollte. Wenn die Monde abgebremst wurden und wieder aufeinander zufliegen (Abb. 43.32 b) ist es umgekehrt. Du spürst die Gravitation des anderen Mondes aus größerer Entfernung (3) und daher **mit kleinerer Kraft**, als es seiner momentanen Position (2) entspricht. Unter dem Strich bleibt also: Die Monde werden beim Wegfliegen stärker gebremst als sie beim Zurückfliegen beschleunigt werden und prallen mit etwas geringerer Geschwindigkeit wieder auf. Wo ist die fehlende kinetische Energie? Sie wurde in Form von **Gravitationswellen** abgestrahlt!

i Doppelneutronenstern

1974 entdeckte man zwei **Neutronensterne**, die einander umlaufen (Abb. 43.36, siehe auch Abb. 43.37). Auch eine Kreisbahn ist eine beschleunigte Bewegung. Daher strahlen beide Neutronensterne **Gravitationswellen** ab und verlieren an kinetischer Energie. Sie „spiralen" dadurch aufeinander zu, wodurch sich ihre Rotationsgeschwindigkeit erhöht, ähnlich wie eine Eisläuferin, die eine Pirouette macht und dabei die Arme anzieht (siehe Kap. 17.4, „Big Bang 6"). Die **Abnahme der Rotationsdauer** deckt sich genau mit der Vorhersage durch die ART (Abb. 43.36), weshalb das als indirekter Beleg gilt. Wieso nur indirekt? Weil man ja die Wellen selbst nicht gemessen hat.

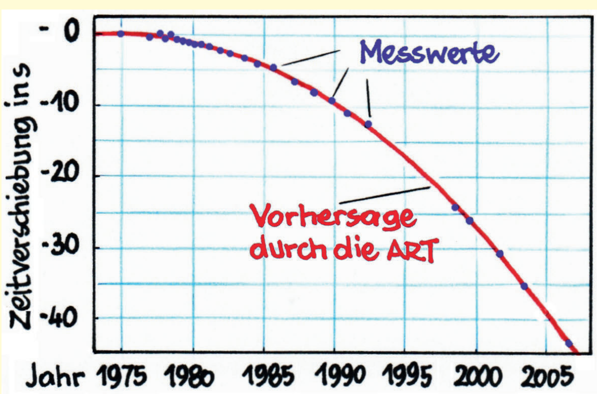


Abb. 43.36

Generell ist es so, dass beschleunigte Massen Gravitationswellen aussenden. Es ist ähnlich wie bei **elektromagnetischen Wellen**, die immer durch beschleunigte elektrische Ladungen entstehen (→ F25). Allerdings besitzen Massen als „Ladungseinheit der Gravitation“ nur positive Vorzeichen. Die in Form von Gravitationswellen abgestrahlte Energie ist normalerweise exorbitant gering. Es ist daher leider noch komplette Zukunftsmusik – vergleichbar dem elektromagnetischen Funk – eine Sender-Empfänger-Anlage für Gravitationswellen auf der Erde aufzubauen. Messbare Gravitationswellen werden allerdings von einander umkreisenden **Neutronensternen** oder **Schwarzen Löchern** ausgesendet (Abb. 43.37). Die dabei entstehende Strahlung konnte man **1974** zum ersten Mal **indirekt** nachweisen, indem man die Rotationsgeschwindigkeit von zwei Neutronensternen unter die Lupe nahm.

→ **Info:** Doppelneutronenstern

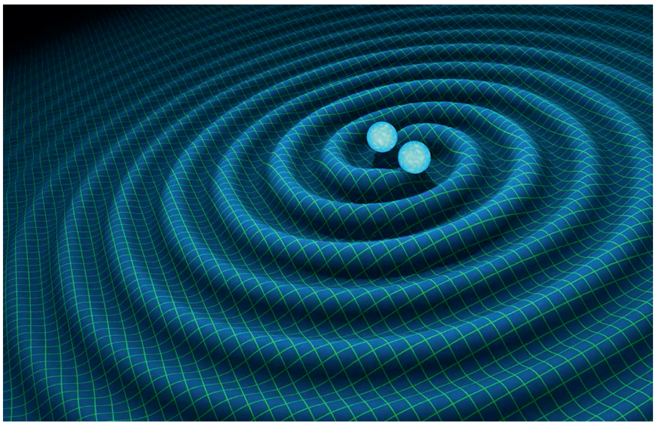
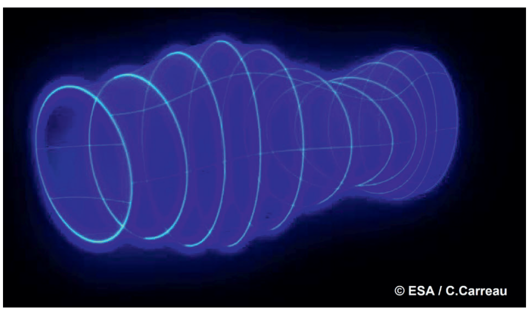


Abb. 43.37: Künstlerische Darstellung der Entstehung von Gravitationswellen, wenn zwei sehr massenreiche Objekte einander umkreisen

Um zu verstehen, wie man Gravitationswellen **direkt** nachweisen kann, muss man sich vorher ihren Effekt auf Objekte überlegen. Gravitationswellen schwingen transversal und verzerren Dinge abwechselnd der Höhe und der Breite nach (Abb. 43.38). Diese **Verformungen** sind aber selbst bei starken Ereignissen extrem winzig. Ein Ring mit einem Durchmesser von 1 m würde nur etwa 10^{-21} m verzerrt werden. Zum Vergleich: Ein Proton hat einen Durchmesser von 10^{-15} m und ist somit 1 Million mal größer. Um solche winzigen Schwankungen zu messen, muss man sehr tief in die Trickkiste greifen: Man verwendet dazu riesige **Interferometer**.

→ **Info:** LIGO

Abb. 43.38: Übertriebene Darstellung der Verformung von Ringen, wenn Gravitationswellen vorbeiziehen



LIGO

LIGO ist ein Akronym für **L**aser **I**nterferometer **G**ravitational-Wave **O**bservatory. Bei einem **Interferometer** nutzt man allgemein die Interferenzeigenschaften von Lichtwellen aus (→ F22). Mit so einem Ding versuchte man zum Beispiel Ende des 19. Jahrhunderts den vermeintlichen Ätherwind zu messen (siehe Abb. 38.19, S. 9). Weil die Verzerrungseffekte durch Gravitationswellen so winzig sind, ist ein LIGO mit einer Armlänge von 4 km allerdings ein **Riesending**!

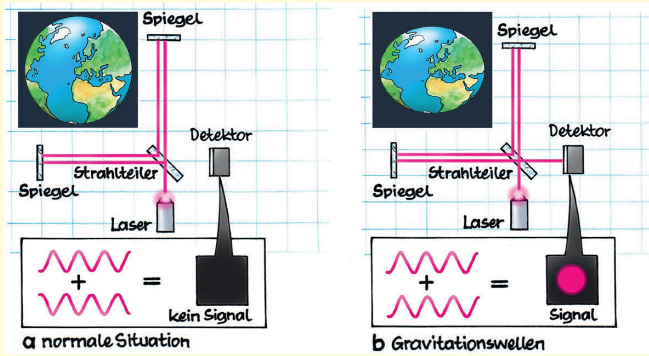


Abb. 43.39: Wie ein LIGO fuktioniert: Die Arme sind jeweils 4 km lang. Im Normalzustand herrscht am Detektor destruktive Interferenz. Beim Detektieren von Gravitationswellen kommt es auch zu konstruktiven Interferenzen.

In **Ruhe** ergibt sich am Detektor **kein Signal** (Abb. 43.39 a). Wenn eine **Gravitationswelle** vorbeistreicht, beginnt die ganze Erde und mit ihr auch das Interferometer zu wobbeln. Dadurch erhält man am Detektor ein sich veränderndes, ganz **signifikates Signal** (Abb. 43.39 b und Abb. 43.40). Damit man normale Erschütterungen rausfiltern kann, gibt es in den USA zwei LIGOs im Abstand von etwa 3000 km. Nur wenn beide dasselbe Signal empfangen wie in der Abbildung unten, handelt es sich tatsächlich um Gravitationswellen – und nicht um einen Traktor vor dem Labor.

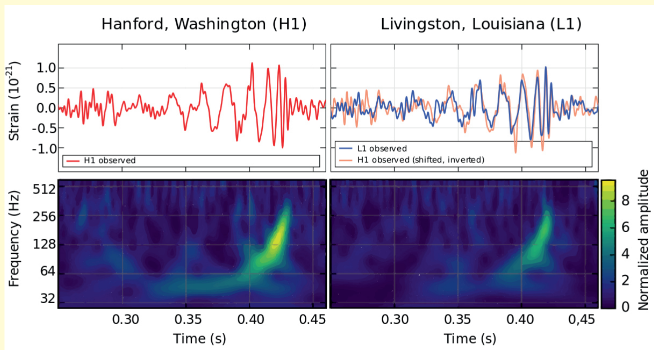


Abb. 43.40: Gravitationswellensignale bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher aus dem Jahr 2016

Damit konnte man 2016 erstmals direkt die Gravitationswellen messen, die zwei umeinander rotierende und sich letztlich verschmelzende **Schwarze Löcher** erzeugten (Abb. 43.40). Dafür gab es gleich im Jahr darauf den Physik-Nobelpreis für die Hauptakteure.

Abb. 43.41: Durch den Thirring-Lense-Effekt zieht die rotierende Erde den Raum mit sich und Satellitenbahnen sind nicht geschlossen.

Es gibt noch einen weiteren Effekt, der sich aus der ART ergibt, und auf den wir noch einen kurzen Blick werfen. Salopp gesagt verhält sich der **Raum** um eine rotierende Masse, etwa die Erde, ähnlich wie klebriger Sirup und wird mit der **Drehung mitgezogen**. Dieser Effekt wurde von den österreichischen Physikern HANS THIRRING und JOSEPH LENSE bereits **1918** vorhergesagt. Er führt unter anderem dazu, dass Satellitenbahnen nicht ganz geschlossen sind (Abb. 43.41). Auch hier musste man sehr lange auf die experimentelle Bestätigung warten. Der Nachweis gelang nämlich erst **2004** mit Hilfe von zwei Satelliten. Die **Abweichungen** sind **winzig.** Sie machen in einem ganzen Jahr nur etwa 1 m aus und werden von vielen anderen Effekten überlagert. Auch hier war die Messung also eine technische Meisterleistung.

Z Zusammenfassung

Mit der ART kann man die zusätzliche Periheldrehung des Merkurs erklären. Sie sagt weiters die Existenz von Gravitationswellen voraus, und dass rotierende Massen den Raum mit sich ziehen. Alle diese Vorhersagen konnten experimentell belegt werden.

43.8 Faszinierende Objekte
Schwarze Löcher und Wurmlöcher

Die wohl faszinierendsten Objekte im gesamten Universum sind Schwarze Löcher. Ihre Existenz folgt aus der Allgemeinen Relativitätstheorie, aber sie sind so unbegreiflich, dass zunächst nicht einmal Einstein an sie glauben wollte.

F26 W1 Wie lautet das Gravitationsgesetz? Was versteht man unter der Fluchtgeschwindigkeit? Was versteht man unter Gezeitenkräften? Lies nach in Kap. 10.1, 10.3 und 10.4, „Big Bang 5“!

F27 S1 Schwarze Löcher haben deshalb eine so verheerende Wirkung, weil ihre Masse so groß ist! Richtig oder falsch? Kannst du deine Antwort begründen? Und wie groß wäre ein Schwarzes Loch mit der Masse der Erde?

So lange im Inneren eines Sterns die **Kernfusion** abläuft (Kap. 46.2, S. 70), entsteht durch die enorme Hitze ein Gegendruck zur Gravitationskraft. Wenn der „Treibstoff“ verbraucht ist und die Fusion zum Stillstand kommt, hängt das weitere Schicksal des Sterns von seiner Masse ab (Abb. 48.17, S. 96). Hat er viele Sonnenmassen, passiert etwas Unglaubliches. Es ist so unglaublich, dass es sogar EINSTEIN zunächst für unmöglich hielt. Die Gravitation ist dann so stark, dass sie durch nichts aufgehalten werden kann. Der Stern stürzt zu einem **Punkt unendlich hoher Dichte zusammen.** Ein **Schwarzes Loch** wurde geboren!

Seine Gravitation ist so gigantisch, dass innerhalb des so genannten **Schwarzschildradius** nicht einmal das Licht entkommen kann. Deshalb sind Schwarze Löcher schwarz! Ihre verheerende Wirkung kommt aber nicht durch die große Masse zu Stande (→ **F27**), sondern durch den kleinen Radius! Dadurch kann man sich dem Massenzentrum viel stärker nähern, wodurch Gravitations- und Gezeitenkräfte extrem anwachsen.

→ **Info:** Point of no return

i Point of no return

Die **Fluchtgeschwindigkeit** (→ **F26**) um der Gravitation einer Masse zu entkommen lautet allgemein:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

(siehe Kap. 10.3, „Big Bang 5“). Die benötigte Fluchtgeschwindigkeit v wächst also an, wenn man sich dem Massenzentrum nähert. Je kleiner der Abstand r, desto größer v. Bei welchem Abstand zu einem **Schwarzen Loch** würde die Fluchtgeschwindigkeit c betragen?

$$c = \sqrt{\frac{2GM}{R_S}} \Rightarrow R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

R_S ist der so genannte **Schwarzschildradius**, benannt nach dem Astronomen KARL SCHWARZSCHILD. Alles, was sich einmal innerhalb von R_S befindet, kann **nie wieder heraus**, nicht einmal das Licht. Objekte, die kleiner sind als ihr Schwarzschildradius, sind Schwarze Löcher. Wäre die Erde ein Schwarzes Loch, was sie natürlich niemals sein kann, würde ihr Schwarzschildradius bloß rund 1 cm betragen (→ **F27**). Unvorstellbar!!!

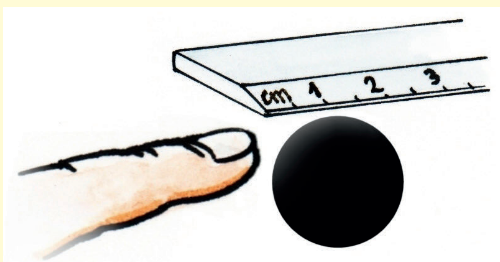


Abb. 43.42: So klein ist der Schwarzschildradius der Erde! In dieser winzigen Kugel würden sich $6 \cdot 10^{24}$ kg befinden!!!

In der Nähe von Massen vergeht die Zeit langsamer (Kap. 43.4, S. 43). Für einen Beobachter, der sehr weit weg ist (genau genommen unendlich weit), würde der Kollaps immer langsamer und langsamer werden, bis schließlich der Stern am Schwarzschildradius gleichsam einfriert. Deshalb nannte man Schwarze Löcher bis 1967 **gefrorene Sterne.** Gleichzeitig würde auch die Rotverschiebung immer stärker werden. Obwohl der Stern von außen gesehen nie völlig in sich zusammenfällt, würde seine Leuchtkraft trotzdem auf null absinken.

→ **Info:** „Gefrorene“ Zeit

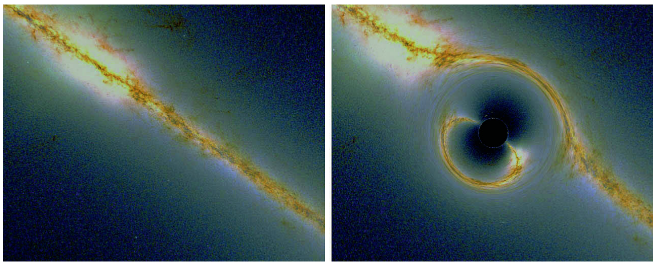


Abb. 43.43: Schwarze Löcher sind die stärksten Gravitationslinsen, die es gibt. Die Milchstraße in einer Simulation ohne und mit Schwarzem Loch im Vordergrund

„Gefrorene“ Zeit

Die Gleichungen in den Kap. 43.3 bis 43.5 sind **Näherungen,** die für $R_S/r << 1$ gelten. Um das „Einfrieren der Zeit“ am Schwarzschildradius zu zeigen, brauchen wir eine genauere Gleichung. Aus der SRT folgt für die **Zeitdilatation** (Kap. 40.2, S. 17):

$$t' = t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Nimm an, ein Labor fällt mit $v_0 = 0$ aus unendlich großer Entfernung auf eine zentrale Masse zu. An der Oberfläche wird es mit:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

ankommen – das entspricht der Fluchtgeschwindigkeit. Wenn man diese Geschwindigkeit dem **Äquivalenzprinzip** entsprechend in die Gleichung für die Zeitdilatation einsetzt, erhält man:

$$t' = t\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}$$

t' ist die Zeit, die im Abstand r vergeht, t die Zeit, die in unendlicher Entfernung vergeht. Diese Gleichung unterscheidet sich von jener in Kap. 43.4, S. 44, durch einen zusätzlichen Term. Wenn du nun R_S einsetzt, erhältst du:

$$t' = t\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2}\,\frac{c^2}{2GM}} = 0$$

Verglichen **mit einer Uhr im Unendlichen** steht am Schwarzschildradius die Zeit still.

Wie findet man aber etwas, was man gar nicht sehen kann? Man kann Schwarze Löcher bisher nur indirekt belegen. Sie könnten etwa als **Gravitationslinsen** wirken (Abb. 43.43) und aus Verzerrungen könnte man auf sie rückschließen. Weiters können sich um Schwarze Löcher so genannte **Akkretionsscheiben** bilden (Abb. 43.44), die eine charakteristische, extrem energiereiche Strahlung abgeben. Sehr gängig ist auch die **kinematische Methode.** Dabei untersucht man die Bahnen von sichtbaren Objekten und schließt dann auf die Masse der unsichtbaren. So vermutet man im Zentrum der Galaxie M87 ein gigantisches Schwarzes Loch mit einigen Milliarden Sonnenmassen (Kap. 42.1, S. 31).

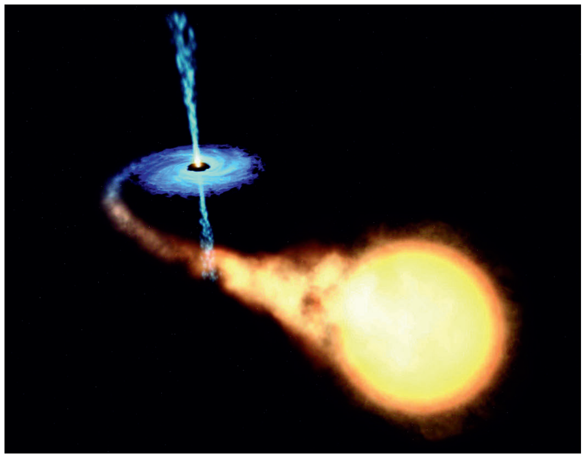


Abb. 43.44: Ein Schwarzes Loch saugt das Gas seines Doppelstern-Partners an und es bildet sich eine rotierende Gasscheibe aus. Durch die Beschleunigung des Gases entsteht eine charakteristische Strahlung.

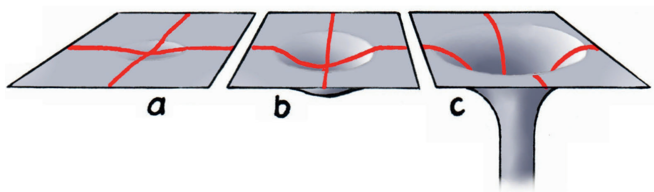


Abb. 43.45: Mit zunehmender Dichte eines Objekts wird auch die Raumkrümmung stärker (a + b). Bei Schwarzen Löchern wird sie unendlich groß (c).

Man kann sich die Krümmung des Raums als eine Art Delle vorstellen (Kap. 43.5, S. 45). Je größer die Dichte des Objekts, desto tiefer wird diese Delle. Bei einem Schwarzen Loch wird die Raumkrümmung unendlich groß. Das entspricht einem **Trichter mit senkrechten Wänden** (Abb. 43.45 c). Der Durchmesser einer Kreisbahn um ein Schwarzes Loch wäre also unendlich groß! Die beiden Linien in Abb. 43.45 c wären unendlich lange! Faszinierend! Natürlich ist in allen diesen Darstellungen eine Dimension weggelassen. In Wirklichkeit krümmt sich nicht der zweidimensionale, sondern der dreidimensionale Raum. Das sprengt allerdings unsere Vorstellungskraft.

Setzt man zwei solcher Trichter zusammen, so entsteht das, was man ein **Wurmloch** nennt. Wurmlöcher könnten als Abkürzung zwei entfernte Bereiche des Universums verbinden (43.46 a) oder, was noch unheimlicher klingt, sogar zwei

parallele Universen (b). Auf diese Weise könnte man vielleicht in wenigen Minuten zum Rande der Milchstraße, in den Andromeda-Nebel oder in ein völlig anderes Universum reisen, ohne dass man dabei **lokal** gesehen die Lichtgeschwindigkeit überschreitet. Klar, dass fast kein Science-Fiction-Film ohne Wurmlöcher auskommt!

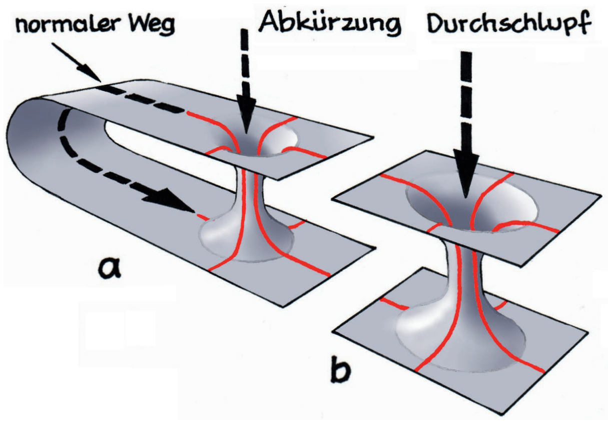


Abb. 43.46: Ein Wurmloch verbindet als Abkürzung zwei Teile des Universums (a) oder zwei verschiedene Universen (b).

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Allgemeine Relativitätstheorie **nicht zur Annahme** von Wurmlöchern **zwingt**, sie lässt aber deren Existenz zu. Wurmlöcher sind also mögliche, aber sehr spekulative Objekte, für deren Existenz es bislang keinerlei Belege gibt.

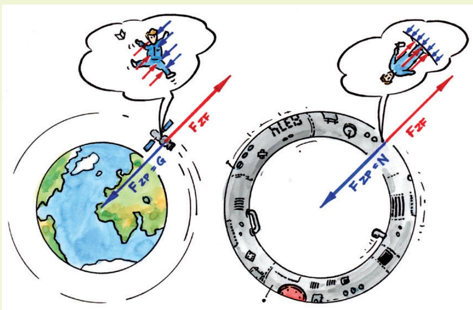
Z Zusammenfassung

Schwarze Löcher sind ausgebrannte und danach kollabierte Sterne, die sogar das Licht verschlucken und den Raum unendlich stark krümmen. Ihre Existenz folgt aus der ART, aber es gibt bislang nur indirekte Belege. Wurmlöcher sind ebenfalls im Rahmen der ART mögliche Objekte, aber sehr spekulativ und bisher völlig unbelegt..

Grundlagen zur Allgemeinen Relativitätstheorie

F28 W1 Neben der Zentrifugalkraft gibt es noch eine zweite Scheinkraft in rotierenden Systemen. Welche? → L

Abb. 43.47: Schwerelosigkeit und 1 g entstehen scheinbar auf gleiche Weise



F29 S1 Ein Astronaut fühlt sich schwerelos, weil sich die Zentripetalkraft (die Gravitation) und Zentrifugalkraft genau aufheben (Abb. 43.47 links). In einer ringförmigen Raumstation kann man durch Drehung eine künstliche Gravitation erzeugen (rechts). Dann heben sich Zentripetalkraft (Druck vom Boden) und Zentrifugalkraft genau auf. Aber wie können Schwerelosigkeit und künstliche Gravitation auf scheinbar gleiche Weise zu Stande kommen? Das ist doch paradox! → L

F30 S1 Kannst du die Sachen mit den lokalen Inertialsystemen aus Sicht der Gezeitenkraft erklären? → L

F31 S1 Du lässt eine Kugel auf den Boden fallen. Versuche diesen einfachen Vorgang aus Sicht der klassischen Mechanik sowie der ART zu beschreiben. Wer befindet sich im Inertialsystem? → L

F32 S1 Vergleiche die Rotverschiebung durch das Beschleunigen des Raumschiffs (→ F3, Kap. 42.1, S. 31) mit der Rotverschiebung im Gravitationsfeld! Welche Gemeinsamkeiten gibt es? → L

F33 W1 Um welchen Faktor verändert sich die Frequenz von Licht, wenn es von der Erdoberfläche 10 km aufsteigt? Wie viel Hertz entspricht das absolut? → L

F34 W1 Schätze ab, um wie viele Sekunden dein Kopf im Laufe deines Lebens schneller altert als deine Füße. Schätze ab, um wie viele Sekunden jemand im Laufe seines Lebens langsamer altert, wenn er am Meer wohnt und nicht auf 2000 m Seehöhe. → L

F35 W1 Kannst du abschätzen, wie groß der Fehler des GPS ohne relativistische Korrektur wäre? → L

F36 S1 Ein Astronaut stürzt in ein Schwarzes Loch. Wie sieht der Vorgang aus Sicht des Astronauten und aus der einer unendlich weit entfernten Person aus? → L

F37 S1 Der Warp-Antrieb der Enterprise funktioniert mit Materie und Antimaterie. Aber er hat auch mit der Raumkrümmung zu tun! Wie könnte man mit Hilfe einer „Designer-Raumkrümmung“ scheinbar c überschreiten? → L

F38 W1 Der Nachweis der gravitativen Rotverschiebung (Abb. 43.16, S. 43) erfolgte mit Hilfe des Mössbauer-Effekts. Was versteht man darunter? Besorge dir Informationen aus dem Internet.

F39 W1 Mit dem Maryland-Experiment konnten 1976 zwei Effekte der Relativitätstheorie belegt werden. Wie wurde dieses Experiment durchgeführt? Besorge dir dazu Informationen aus dem Internet.

F40 W1 Warum enden manche Sterne als Weiße Zwerge, und manche als Neutronensterne oder Schwarze Löcher? Lies in Kap. 48.2 f. ab S. 92 nach.

43 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 (Abb. 8 a). Für eine Person auf der Scheibe drehen sich die Fahnen scheinbar im Uhrzeigersinn, und der Ball fliegt daher eine Rechtskurve (Abb. 8 b). Die Corioliskraft wirkt quer zur Flugrichtung. Suche im Internet danach, wie diese Kraft das Wetter beeinflusst!

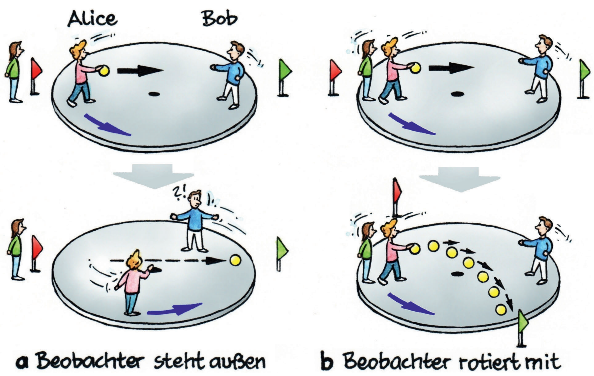


Abb. 8

F29 Im ersten Fall (Abb. 9 links) greifen Zentrifugal- und Zentripetalkraft (Gravitation) an jedem einzelnen Atom deines Körpers an und heben einander dort auf. Das macht dich schwerelos. Im zweiten 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.

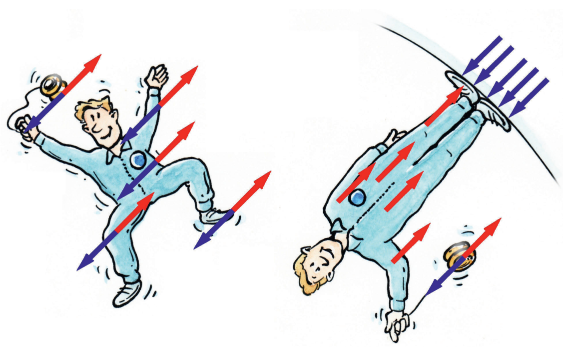


Abb. 9

F30 Unter einer Gezeitenkraft (siehe Kap. 10.4, „Big Bang 5") versteht man allgemein, dass die Gravitationskraft an einem Objekt nicht überall gleich groß ist. Sie kommt zu Stande, 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 ruhst 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 wirkt auf den Ball und dich keine Gravitation mehr. Die Bodenreaktionskraft verschwindet aber nicht. Sie bescheunigt dich nach oben. Es ist so, als wärst du in einer Rakete.

F32 Nach dem Äquivalenzprinzip kann zwischen Beschleunigung und Gravitation nicht unterschieden werden. Solange das Raumschiff beschleunigt, ist die Rotverschiebung durch den Doppler-Effekt völlig äquivalent zur Rotverschiebung im Gravitationsfeld. Du musst dir Abb. 42.2 b (S. 31) nur um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht vorstellen.

F33 Bei H = 10 km ergibt gH/c^2 $1{,}1 \cdot 10^{-12}$. Die Frequenz von grünem Licht liegt bei etwa $6 \cdot 10^{14}$ Hz. Absolut macht also die Frequenzverschiebung 654 Hz aus. Das klingt recht viel, aber verglichen mit den 600 Billionen 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 (= $2{,}1 \cdot 10^9$ s). Der Faktor gH/c^2 ist $1{,}96 \cdot 10^{-16}$. Mit den „Stehsekunden" deines Lebens multipliziert ergibt das dann $4{,}1 \cdot 10^{-7}$ 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 ($3{,}15 \cdot 10^9$ s), dann ist der Unterschied $6{,}87 \cdot 10^{-4}$ 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 wäre $4{,}44 \cdot 10^{-10}\,c \cdot T$ = 13,3 cm $\cdot\, T$ (in Sekunden). Während jeder Sekunde Messzeit fiele ein Fehler der Positionsbestimmung in der Größe von 13 Zentimetern an, in einer Stunde fast 500 Meter.

F36 Von außen gesehen bleibt der Astronauten am Schwarzschildradius hängen. Auf Grund der enormen Rotverschiebung ist er aber nicht mehr zu sehen. Für den fallenden Astronauten hat der Schwarzschild-Radius keine besondere Bedeutung. Allerdings würde er durch die Gezeitenkräfte (Kap. 10.4, „Big Bang 5") 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 (Abb. 10) 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!

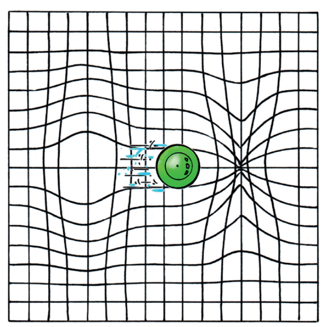


Abb. 10