39 Relativitätsprinzip und Gleichzeitigkeit

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand Juli 2012)

Das moderne Relativitätsprinzip, Lichtgeschwindigkeit

A1 Nimm eine große Zahl der weltbesten Experimentalphysiker, gib ihnen die beste Ausrüstung und bringe sie ins All. Jeder von ihnen soll mit seinen Geräten in einem Labor ohne Fenster experimentieren (Abb. 1). Auch wenn sie kreuz und quer fliegen, solange sie unbeschleunigt sind, können sie mit keinem Experiment innerhalb feststellen, ob sie sich bewegen oder nicht. Sie könnten nur die relativen Bewegungen zueinander feststellen, etwa wenn es Fenster gäbe.

Abb. 1 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 39.11, S. 6)

Nimm aber nun mal an, in diesem Stückchen All gibt es Weltraum-GPS. Dann könnte man doch seine Geschwindigkeit absolut bestimmen, oder nicht? Wäre dann das moderne Relativitätsprinzip nicht widerlegt?

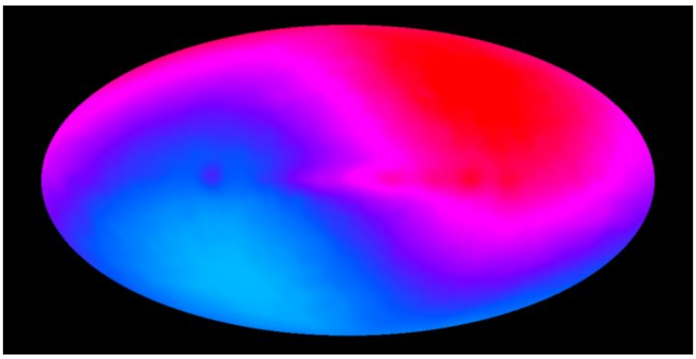

Abb. 2: Die Hintergrundstrahlung, aufgenommen durch den Satelliten COBE. Durch die Bewegung der Erde relativ zum Universum kommt es zu einer Doppler-Frequenzverschiebung. In den gängigen Abbildungen wird diese Frequenzverschiebung weggerechnet.

A2 Die so genannte kosmische Hintergrundstrahlung ist ein Beleg für den Urknall (Abb. 2; siehe auch Kap. 50.1, BB8). Ihr Ursprung liegt knapp 400.000 Jahre nach dem Big Bang, als der Kosmos auf rund 3000 K abgekühlt war und durchsichtig wurde. Sie ist daher gewissermaßen der Fingerabdruck des frühen Universums. Die Mikrowellenstrahlung trifft mit praktisch vollkommen gleicher Wellenlänge aus allen Richtungen des Universums auf uns. Durch die Bewegung der Erde relativ zum Kosmos kommt es aber zum Doppler-Effekt, wodurch die Frequenz der Hintergrundstrahlung je nach Blickrichtung rot- oder blauverschoben ist. Ist die Hintergrundstrahlung damit nicht so etwas wie ein "neuer Äther"?

A3 Der Ruhezustand ist nichts anderes als ein Sonderfall der Bewegung! Was ist mit dieser Aussage gemeint?

A4 Die spezielle Relativitätstheorie vereinheitlicht Ruhe und Bewegung mit Elektrizität und Magnetismus! Was ist damit gemeint? Verwende für deine Erklärung Abb. 3!

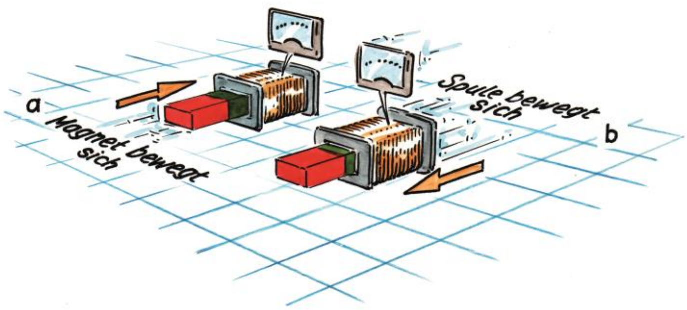

Abb. 3: Schiebt man einen Magneten in eine Spule (a) oder die Spule über einen Magneten (b), lässt sich eine Induktionsspannung messen. Aus deren Höhe lässt sich aber nicht ableiten, was sich bewegt. Es kommt nur auf die Relativgeschwindigkeit an. Das Relativitätsprinzip gilt also nicht nur für die Mechanik, sondern auch für die Elektrodynamik und generell für alle Naturgesetze (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 39.7, S. 11).

A5 a Der Jupiter benötigt etwa 12 Jahre, um die Sonne einmal zu umkreisen. Verglichen mit der Erde ist er daher fast bewegungslos. Einer seiner Monde (Io, den schon Galilei entdeckte) hat eine Umlaufzeit von 1¾ Tagen.

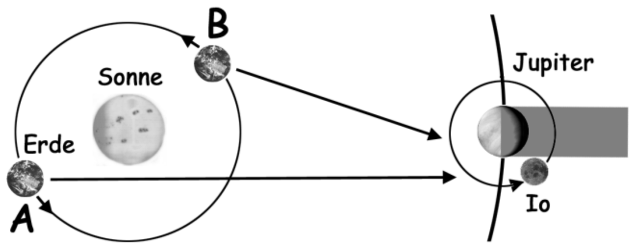

Abb. 4 (Grafik: Martin Apolin)

Wieso war der Dänische Astronom Ole Rømer bereits 1676 in der Lage, aus der Beobachtung der Umlaufzeit des Jupiter-Mondes die Geschwindigkeit des Lichts abzuleiten? Überlege dazu, was mit der Umlaufzeit des Io aus Sicht der Erde passiert, während sich diese um die Sonne bewegt (siehe Abb. 4 auf der vorigen Seite).

A5 b OLE RØMER wusste bereits, dass der Durchmesser der Erdbahn etwa $3 \cdot 10^{11}$ m beträgt. Berechne mit Hilfe der Antwort auf A5 a die Lichtgeschwindigkeit.

A6 a Die Erde ist rund 150 Milliarden Meter von der Sonne entfernt. Schätze ab, mit welcher Geschwindigkeit sie sich um die Sonne bewegt.

b Bei welchem Prozentsatz der Lichtgeschwindigkeit (etwa $3 \cdot 10^8$ m/s) liegt die Bahngeschwindigkeit der Erde? Wie weit bewegt sich die Erde, wenn sich das Licht um 10 m bewegt?

c Nimm an, du stehst im Regen, und die Regentropfen fallen senkrecht (Abb. 5 links). Wenn du nun zu laufen beginnst, addieren sich die Laufgeschwindigkeit und die Fallgeschwindigkeit der Tropfen, und diese kommen von schräg rechts. Fällt der Regen tatsächlich schräg? Ansichtssache - für die bewegte Person schon. Für eine ruhende Person fällt der Regen aber nach wie vor senkrecht. Diese scheinbare Ablenkung nennt man Aberration. Das heißt wörtlich übersetzt eigentlich Verirrung.

Abb. 5 (Grafik: Janosch Slama; Abb. 3.13, S. 22, BB5)

Dieser Effekt tritt auch bei Licht auf. Wenn du einen Stern anvisierst, der sich exakt über dir befindet (also im Zenit), dann musst du das Fernrohr um einen kleinen Winkel kippen, damit der Stern genau in der Mitte des Bildes ist. Schätze diesen Winkel ab und verwende dabei das Ergebnis aus 6b.

A7 Im Jahre 1725 konnte der englische Astronom JAMES BRADLEY mit Hilfe der Beobachtung eines bestimmten Sterns die Lichtgeschwindigkeit mit einer Abweichung von nur 1,2 % des heutigen Wertes abschätzen. Wie könnte er das gemacht haben? Überlege mit Hilfe der Antwort auf A6 c!

A8 Die erste nichtastronomische (terrestrische) Messung der Lichtgeschwindigkeit führte der französische Physiker ARMAND FIZEAU 1849 durch (Abb. 6). Das aus der Lichtquelle austretende Licht wurde durch einen halbdurchlässigen Spiegel in den Strahlengang eingespiegelt und an einem ebenen Spiegel, der 8,63 km entfernt war, reflektiert. Danach gelangte es durch ein rotierendes Zahnrad zum Beobachter. Wieso kann man durch Verändern der Drehgeschwindigkeit des Zahnrades die Lichtgeschwindigkeit bestimmen?

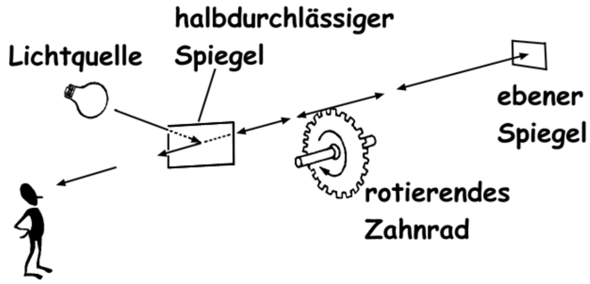

Abb. 6 (Grafik: Martin Apolin)

A9 Seit 1983 ist es sinnlos geworden, die Messung der Lichtgeschwindigkeit noch exakter durchzuführen. Warum? Hilf dir mit Kapitel 2.3, Seite 12 in BB5!

A10 Dein Raumschiff wird von einem Meteor verfolgt (Abb. 7). Wie verändern sich dessen Relativgeschwindigkeit und Energie, wenn du das Raumschiff beschleunigst? Dein Raumschiff wird von einem Photon verfolgt (b). Wie ist es in diesem Fall?

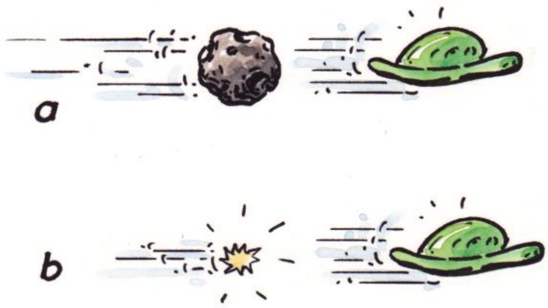

Abb. 7 (Grafik Janosch Slama; siehe auch Abb. 42.2, S. 31).

© Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG, Wien 2010. | www.oebv.at | Big Bang 8 | ISBN: 978-3-209-04868-4

Beobachten und sehen

A11 Alles, was du in diesem Moment siehst, ist in der Vergangenheit passiert! Was ist damit gemeint?

A12 In Abb. 8 siehst du links ein ruhendes Gitter. Rechts siehst du dasselbe Gitter, wenn es sich mit 90 % der Lichtgeschwindigkeit (0,9 c) nähert. Wie könnte es zu den seltsamen Verzerrungen kommen? Verwende für deine Erklärung auch Abb. 9.

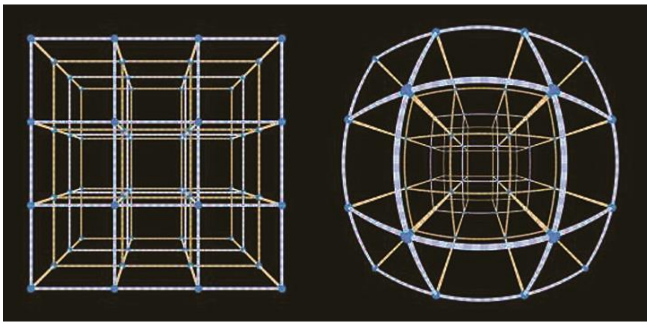

Abb. 8 (Quelle: www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de; siehe auch Abb. 39.10, S. 12).

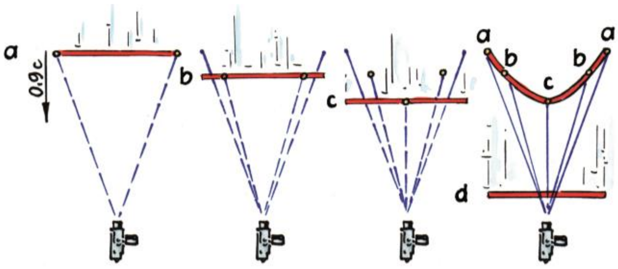

Abb. 9: Ein Stab bewegt sich mit 0,9 c auf eine Kamera zu (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 39.12, S. 13).

A13 Die siehst aus dem vorderen Fenster deines Raumschiffs, als dieses plötzlich auf beinahe Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Was passiert dabei mit den Sternen? Hilf dir mit den Abbildungen 8 und 9.

A14 Stell dir vor, ein Lichtjahr (LJ) von der Erde entfernt befindet sich auf einem Planetoiden eine Raumstation. Eines Tages bricht von dort ein Raumschiff zur Erde auf. Während der ganzen Flugzeit bewegt es sich mit 80 % der Lichtgeschwindigkeit, also mit 0,8 *c*. Wie lange benötigt das Raumschiff bis zur Erde? Mit welcher scheinbaren Geschwindigkeit für einen *Zuseher* auf der Erde fliegt es dabei? Mit welcher Geschwindigkeit fliegt es für einen *Beobachter*? Hilfe dir mit den Abb. 10 bis 12!

Abb. 10: Das Raumschiff startet...

Abb. 11: ... und fliegt von der Erde aus gesehen seiner eigenen Lichtwelle nach.

Abb. 12: Etwas später erreicht auch das Raumschiff die Erde (Grafiken: Martin Apolin).

A15 Aus dem Kern der Radiogalaxie 3c 120 wird ein Gasstrahl ausgestoßen, der sich scheinbar mit Überlichtgeschwindigkeit bewegt. Wie kann man das Phänomen qualitativ erklären? In welche Richtung relativ zu dir muss sich der Jet bewegen, damit dieser Effekt auftreten kann? Verwende für deine Erklärung A14!

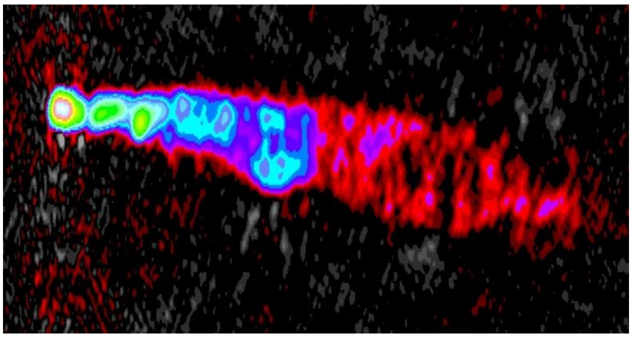

Abb. 13: Der Jet der Radiogalaxie 3c 120 (500 Millionen LJ von der Erde entfernt) in einer Falschfarbendarstellung (Quelle: NRAO).

A16 Warum wurde von Einstein der Begriff *beobachten* in die Physik eingeführt? Was ist eigentlich damit gemeint, wenn man sagt "du kannst *beobachten*, dass..."? Verwende für deine Erklärung Abb. 14.

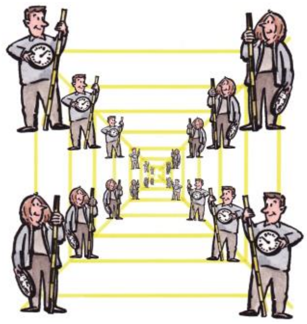

Abb. 14 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 39.15, S. 13)

A17 Ein Stab fliegt mit hoher Geschwindigkeit auf dich zu (Abb. 15). Was kannst du *beobachten* und was kannst du *sehen*? Hilf dir mit der Abbildung!

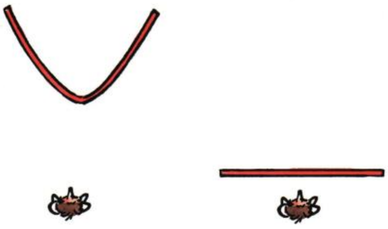

Abb. 15 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 39.16, S. 13)

A18 Während du auf der Terrasse sitzt und frühstückst, *siehst* du, dass die Sonne aufgeht. Was kannst du *beobachten*?

Relativität der Gleichzeitigkeit

A19 Wann sind Ereignisse an zwei verschiedenen Orten gleichzeitig? Man kann sich mit einem Lichtblitz helfen (Abb. 16). Wenn du diesen genau in der Mitte zwischen zwei Orten auslöst (C), dann braucht das Licht für beide Strecken gleich lang und kommt daher zur selben Zeit bei A und B an. Du könntest mit dem Lichtblitz zum Beispiel zwei Stoppuhren starten (das wären die Ereignisse).

Abb. 16: Wenn die Strecken AC und CB gleich lang sind, erreicht der Lichtblitz A und B gleichzeitig (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 39.18, S. 14).

Nun kann man aber im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie zeigen, dass Gleichzeitigkeit relativ ist. Wenn für einen ruhenden Beobachter die Lichtstrahlen bei A und B gleichzeitig auftreffen, kann es einen dazu bewegten Beobachter geben, bei dem der Lichtstrahl zuerst bei A und dann bei B auftrifft oder auch umgekehrt. Daher formuliert man: Ob zwei Ereignisse an verschiedenen Orten gleichzeitig stattfinden oder nicht, hängt vom Bewegungszustand des Beobachters ab.
Nimm einmal an, dass man durch Verschränkung von Quanten (siehe Kap. 36.3, BB7) tatsächlich Information übertragen könnte. Was passiert nun, wenn du die Relativität der Gleichzeitigkeit mit einbeziehst? Knifflig!

A20 Ob zwei Ereignisse an verschiedenen Orten gleichzeitig stattfinden oder nicht, hängt vom Bewegungszustand des Beobachters ab. Wieso kann aber die Reihenfolge von Ereignissen, zwischen denen ein Kausalzusammenhang besteht, *nicht* umgedreht werden? Warum kann zum Beispiel eine Tasse, die vom Tisch fällt und zerbricht, für einen vorbeirasenden Beobachter nicht zerbrechen, bevor sie runterfällt?

A21 Im All fliegen drei Weltraumgleiter. Die Piloten in den beiden äußeren Schiffen synchronisieren ihre Uhren durch einen Lichtblitz, der vom mittleren Schiff ausgeht (Abb. 17). Was passiert aus deiner Sicht, wenn sich die Raumgleiter während des Synchronisierens nach rechts bzw. nach links bewegen? Welche der Uhren geht dann vor? Versuche die Situationen zu skizzieren.

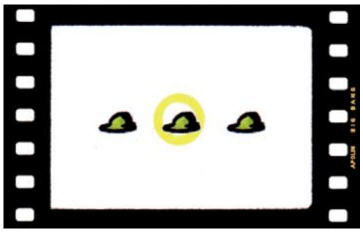

Abb. 17 (Grafik: Janosch Slama)

A22 Stell dir vor, ein Freund lässt einen Stab so fallen, dass beide Enden gleichzeitig aufkommen (Abb. 18 links). Um wie viel später beginnt das rechte Ende des Stabes zu fallen, wenn sich dein Freund mit 0,6 *c* nach rechts an dir vorbeibewegt (Abb. 19 rechts)? Nimm dazu an, dass der Stab im Ruhesystem 2 m lang ist. Hilf dir mit der Definition der Gleichzeitigkeit in Abb. 16. Stelle dir vor, dass von der Hand zwei Lichtstrahlen zu den Enden ausgehen, und dass die Enden zu fallen beginnen, wenn der Lichtstrahl sie erreicht.

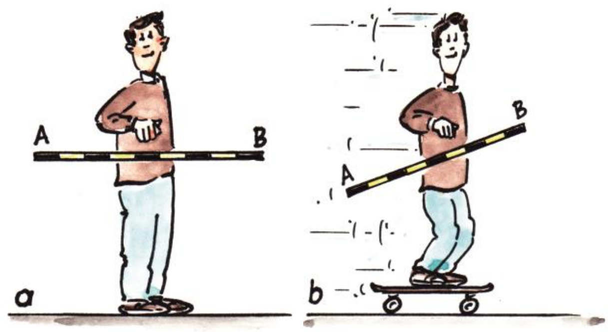

Abb. 18: Je nach Bewegungszustand fällt der Stab gerade oder schief. Der Effekt ist sehr übertrieben dargestellt. Der Stab rechts ist durch die Lorentzkontration auf 1,6 m geschrumpft (Kap. 41.4). (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 39.21, S. 15).

Hilfe zu A1: Nein! Auch beim Weltraum-GPS bestimmt man seine verändernde Position *relativ* zu den Satelliten, also zu etwas *außerhalb des Labors*. Du bestimmst also nicht deine absolute Geschwindigkeit, sondern die relative in Bezug auf die Satelliten. Du könntest z. B. auch argumentieren, dass das gesamte GPS-System an dir vorbeifliegt. Außerdem ist der springende Punkt gar nicht der, dass man seine Relativgeschwindigkeit messen kann, sondern dass in allen Labors die Naturgesetze durch dieselben Gleichungen beschrieben werden. Oder, einfacher gesagt: Bei unbeschleunigten Bewegungen laufen alle Experimente normal ab.

Hilfe zu A2: Nein! Es ist ähnlich wie bei A1. Der Äther würde ja, wenn er existierte, die Naturgesetzte *lokal* beeinflussen. So würde sich Licht in unterschiedliche Richtungen unterschiedlich schnell bewegen. Die Hintergrundstrahlung beeinflusst aber die Naturgesetzte nicht. Außerdem kann man seine Bewegung nach wie vor nicht absolut bestimmen, sondern nur relativ zum Universum.

Hilfe zu A3: 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.

Hilfe zu A4: Ruhe und gleichförmige Bewegung sind äquivalent (siehe A3). 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!

Hilfe zu A5 a: Der Eintritt des Mondes Io in den Schatten Jupiters ist ein periodisch wiederkehrendes Signal (ähnlich wie eine Schall- oder Lichtwelle). Daher tritt auch bei Relativbewegung der Doppler-Effekt auf. Wenn sich die Erde dem Jupiter nähert (Abb. 4A), werden die Verdunklungen etwas häufiger auftreten als 1¾ Tage. Das entspricht beim akustischen Doppler-Effekt einem höheren Ton. Wenn sie sich die Erde wieder entfernt (B), treten die Verdunklungen etwas seltener auf. Das entspricht einem niedrigeren Ton. Diese Verzögerungen addieren sich am entferntesten Punkt der Erdbahn zu 996 Sekunden, weil dann das Licht noch zusätzlich den Erdbahndurchmesser durchlaufen muss. Wenn man diesen kennt, kann man *c* berechnen.

Hilfe zu A5 b: Weil man aus den Verzögerungen der Umlaufzeit des Jupiter-Mondes Io wusste, dass das Licht zum Durchqueren der Erdbahn 996 s benötigt, konnte man die Lichtgeschwindigkeit mit $c = s/t = 3\cdot10^{11}$ m/996 s = $3{,}01\cdot10^{8}$ m/s berechnen, was bereits auf etwa 1 % mit dem heutigen Wert übereinstimmt.

Hilfe zu A6 a: Der Abstand Erde-Sonne beträgt $1{,}5\cdot10^{11}$ m. Nehmen wir vereinfacht an, dass die Erdbahn kreisförmig ist. Der Umfang beträgt dann $2\cdot r\cdot\pi = 9{,}42\cdot10^{11}$ m. Dafür benötigt die Erde ein Jahr, also etwa $3{,}14\cdot10^{7}$ s. Die Geschwindigkeit der Erde um die Sonne beträgt daher 30.000 m/s oder 30 km/s.

Hilfe zu A6 b: Die Lichtgeschwindigkeit beträgt $3\cdot10^{8}$ m/s. Die Bahngeschwindigkeit der Erde ist $3\cdot10^{4}$ m/s (siehe A6 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.

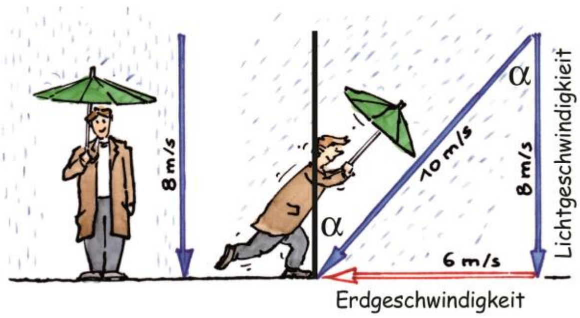

Abb. 19: Analogie zwischen der Aberration der Regentropfen und der Aberration des Lichts. (Grafik: Janosch Slama; Abb. 3.13, S. 22, BB5)

Hilfe zu A6 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. Der Winkel, um den man den Schirm bzw. das Fernrohr kippen muss, ist in Abb. 19 rechts eingetragen. Es gilt: $\tan\alpha = v_{Erde}/c$ und $\alpha = \arctan(v_{Erde}/c) = \arctan(10^{-4}) = 5{,}73\cdot10^{-3}° = 20{,}63''$. Man muss also das Fernrohr um den winzigen Winkel von knapp 21 Bogensekunden kippen. Beachte: Eine Bogensekunde ist bloß der 3600ste Teil eines Grads. Das ist absurd wenig!

Hilfe zu A7: Er beobachtete einen Stern im Zenit und nutzte den Effekt der Aberration des Lichts aus (siehe A6). 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.

Hilfe zu A8: Wenn sich das Rad langsam dreht, kann der Beobachter das Licht sehen, weil es beim Rückweg durch dieselbe Zahnradlücke passt. Wenn sich das Rad mit zunehmender Geschwindigkeit zu drehen beginnt, ist ab einer bestimmten Drehzahl das Licht nicht mehr zu sehen, weil dann das reflektierte Licht durch den nächsten Zahn des Rades abgedeckt wird. Wenn man die Drehzahl weiter steigert, gelangt aber das reflektierte Licht wieder zum Beobachter, weil es nun genau die nächste Zahnradlücke passieren kann. Wenn man die Drehgeschwindigkeit und den Abstand der Zähne und des Spiegel kennt, kann man daraus die Lichtgeschwindigkeit abschätzen.

Hilfe zu A9: 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 Meter im Vakuum zurückzulegen. Diese Zeit ist unglaublich kurz, nämlich 1/299 792 458stel einer Sekunde. Es gilt allgemein Geschwindigkeit = Weg / Zeit. Nachdem man nun Weg und Zeit miteinander verknüpft hat, ist somit auch die Lichtgeschwindigkeit definiert und kann daher nicht mehr genauer gemessen werden.

Hilfe zu A10: Wenn du von einem Meteor verfolgt wirst und die Geschwindigkeit erhöhst, dann sinkt seine Relativgeschwindigkeit und mit ihr seine Energie. Wie ist das, wenn du von einem Photon verfolgt wirst? Wenn du Licht als Welle betrachtest, dann muss sich auf Grund des Doppler-Effekts die Frequenz verringern - die Geschwindigkeit des Lichts kann sich aber natürlich nicht verändern! Egal wie stark du beschleunigst, das Photon prallt immer mit *c* auf! Die Frequenz des Photons verschiebt sich aber in Richtung des roten Bereichs des Spektrums, und man spricht daher von Rotverschiebung. Mit der Frequenz verringert sich auch seine Energie. Würde das Raumschiff im Retourgang beschleunigen, dann käme es zu einer Blauverschiebung. Beim relativistischen Doppler-Effekt spielt auch die Zeitdehnung eine Rolle.

Hilfe zu A11: Auf Grund der endlichen Geschwindigkeit des Lichts ist alles, was du in diesem Moment siehst, bereits Vergangenheit. Über den Daumen braucht Licht für einen Meter 3 Nanosekunden ($3 \cdot 10^{-9}$ s). Bei kleinen Entfernungen ist die Zeitverzögerung somit minimal. Aber bei Himmelsobjekten ergeben sich zum Teil unglaublich tiefe Blicke in die Vergangenheit, teilweise bis knapp an den Urknall heran.

Hilfe zu A12: Wenn man sich relativ zu einem Objekt mit einer Geschwindigkeit nahe *c* bewegt, führen die unterschiedlichen Lichtlaufzeiten zu optischen Verzerrungen. Natürlich ginge alles so schnell, dass man dazu eine Kamera mit Supersupersuperzeitlupe benötigen würde. Überlegen wir mit Hilfe eines Stabes, der sich quer mit sehr hoher Geschwindigkeit auf eine Kamera zu bewegt (Abb. 9). Exemplarisch sind 5 Lichtstrahlen eingezeichnet, die alle zur selben Zeit bei der Kamera eintreffen (d). Je weiter außen am Stab die Strahlen ausgehen, desto länger brauchen sie zur Kamera, desto früher wurden sie daher ausgesandt und desto weiter sieht man sie daher in der Vergangenheit. Dadurch wird der Stab scheinbar zu einer Hyperbel verzerrt. Diese hyperbolische Verzerrung gilt generell für Linien quer zur Bewegungsrichtung, also auch für das Gitter in Abb. 8.

Hilfe zu A13: 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 (siehe Abb. 20).

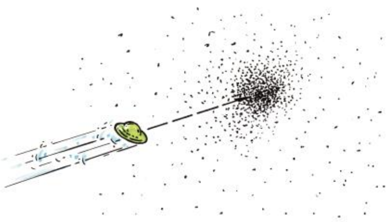

Abb. 20 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A14: Wenn das Raumschiff mit 0,8 *c* fliegt, dann benötigt es für die Strecke von 1 LJ die Zeit $t = s/v$ = 1,25 Jahre. Das Licht selbst benötigt von der Raumbasis 1 Jahr. Das heißt, dass ein *Zuseher* auf der Erde den Start des Raumschiffs mit einem Jahr Verzögerung sieht. Zwischen dem scheinbaren Start und der Ankunft auf der Erde vergehen nur 0,25 Jahre. Wenn er die Entfernung kennt, schließt er daraus, dass das Raumschiff mit vierfacher Lichtgeschwindigkeit geflogen ist. Ein *Beobachter* stellt fest, dass das Raumschiff mit einer tatsächlichen Geschwindigkeit von 0,8 c fliegt, weil er die Lichtlaufzeit berücksichtigt.

Hilfe zu A15: Der Effekt kann dann auftreten, wenn sich der Jet mit sehr hoher Geschwindigkeit (also einem hohen Prozentsatz von c) schräg auf dich *zu*bewegt. In diesem Fall läuft er seiner Lichtwelle nach (ähnlich wie das Raumschiff in A14). Nehmen wir an, der Jet fliegt unter 45 ° mit 0,8 c auf dich zu (Abb. 21). Wenn die Spitze 1 LJ weit geflogen ist, dann hat sie sich gleichzeitig um rund 0,7 LJ nach rechts bewegt. Für 1 LJ braucht die Spitze des Jets die Zeit $t = s/v$ = 1 LJ/0,8 c = 1,25 J. Von der Spitze muss das Licht aber auch eine Stecke von 0,7 LJ weniger bis zur Erde laufen. Aus der Sicht der Erde sieht es daher so aus, als hätte die Spitze für die 0,7 LJ Annäherung eine Zeit von 1,25 J - 0,7 J = 0,55 J benötigt. Es würde für dich daher so aussehen, als wäre die Spitze mit $v = s/t$ = 1 LJ/0,55 J = 1,8 c nach rechts unterwegs.

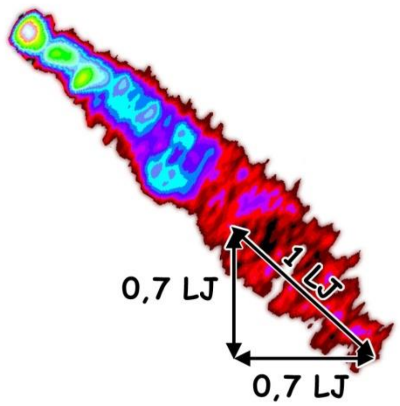

Abb. 21 (Grafik: NRAO und Martin Apolin).

Hilfe zu A16: Man sieht schnell bewegte Objekte hyperbolisch verzerrt (Abb. 8 und 9), sie sind es aber nicht wirklich. Es handelt sich quasi um optische Täuschungen, die durch unterschiedliche Lichtlaufzeiten zu Stande kommen. Diese Effekte sind zwar eindrucksvoll, machen aber die Beschreibung schnell bewegter Objekte komplizierter. Einstein hatte deshalb die Idee, dass man jedes Inertialsystem mit einem virtuellen Netz von Beobachtern versieht, die nur Ereignisse in ihrer nächsten Nähe messen (Abb. 14) und dann später berichten. Dafür wird der Begriff *beobachten* verwendet. Wenn also zu lesen ist „du kannst *beobachten*, dass …“ ist eigentlich damit gemeint „die Helfer in deinem Inertialsystem können messen, dass ...“.

Hilfe zu A17: Abb. 22 ist ein Ausschnitt aus Abb. 9. Du *siehst* einen hyperbolisch verzerrten Stab, der noch weit entfernt ist (links), aber du *beobachtest*, dass der Stab schon knapp vor dir und unverzerrt ist. Die *Beobachtung* stimmt mit der tatsächlichen Form und Position überein.

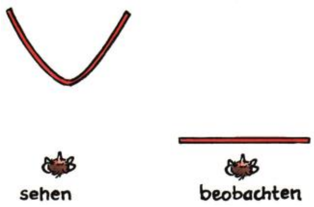

Abb. 22 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 39.16, S. 13)

Hilfe zu A18: Du kannst *beobachten*, dass die Sonne vor über 8 Minuten aufgegangen ist! Das Licht benötigt von der Sonne zur Erde 498 s oder etwas über 8 min. Beim *Beobachten* wird die Lichtlaufzeit berücksichtigt und der Zeitpunkt des Aufgehens der Sonne gewissermaßen korrigiert.

Hilfe zu A19: Man könnte mit der Speziellen Relativitätstheorie so argumentieren: Wenn A in deinem System *vor* B misst, gibt es einen relativ zu dir bewegten Beobachter, der sieht, dass A *nach* B misst. Gäbe es eine Informationsübertragung in Nullzeit von A zu B, so wäre das aus der Sicht des bewegten Systems eine Nachricht in die Vergangenheit, also Hellsehen! B würde also die Information bekommen, bevor sie A überhaupt geschickt hat. Nachrichten in die Vergangenheit führen aber immer zu Paradoxien (siehe Kap. 40.3).

Hilfe zu A20: Die maximale Geschwindigkeit, mit der Information übertragen werden kann, ist c. Auch die Tasse kann nur mit $v < c$ vom Tisch fallen und zerbrechen. Daher muss bei Ereignissen, zwischen denen ein Kausalzusammenhang besteht, eine kurze Zeit vergehen, und zwar in *allen* Systemen, und daher kann die Reihenfolge solcher Ereignisse nicht umgedreht werden.

Hilfe zu A21: Wenn sich die Raumgleiter nach rechts an dir vorbeibewegen (Abb. 23), dann erreicht das Signal das linke Schiff zuerst, und diese Uhr würde daher vorgehen. Wenn sich die Raumgleiter nach rechts bewegen (Abb. 24), dann wäre es genau umgekehrt.

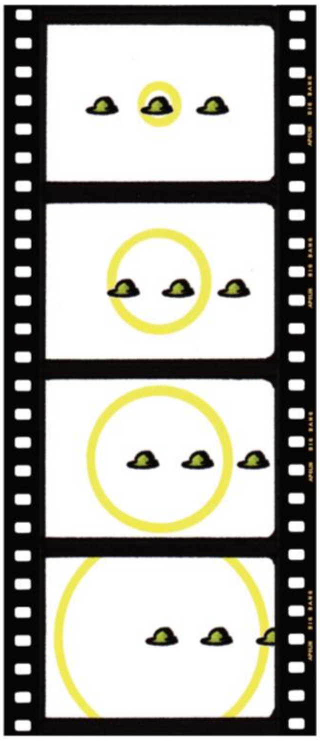

Abb. 23

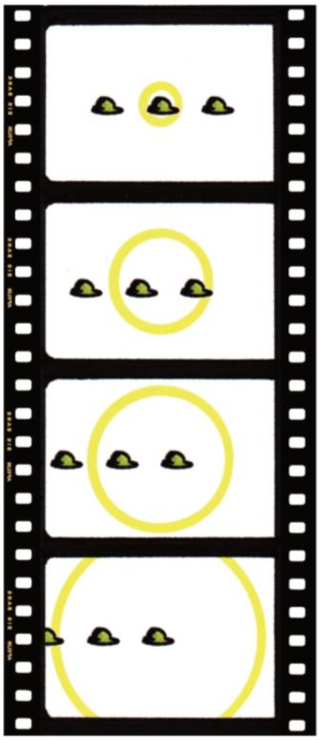

Abb. 24

(Grafiken: Janosch Slama; siehe auch Abb. 39.20, S. 15)

Hilfe zu A22: Bedenke, dass dein Freund von dir aus gesehen nach rechts an dir vorbeifährt (System I'). Das linke Ende des Stabes bewegt sich in deinem Bezugssystem (I) gemäß der Gleichung $x = x_L + v \cdot t$ (1) und das rechte gemäß $x = x_R + v \cdot t$ (2) an dir vorbei. x_M soll in der Mitte des Stabes liegen: $x_M = (x_L + x_R)/2$. d soll die halbe Stablänge sein: $d = (x_R - x_L)/2$. Nimm an, dass der Lichtstrahl von der Mitte des Stabes zum Zeitpunkt $t = 0$ abgeschickt wird. Die Bewegung des nach links laufenden Photons ist dann in I durch $x = x_M - c \cdot t$ (3) gegeben, die des nach rechts laufenden Photons durch $x = x_M + c \cdot t$ (4).

Um nun den Zeitpunkt zu berechnen, zu dem der Lichtstrahl am linken Ende ankommt (= zu dem das linke Ende zu fallen beginnt), musst du (1) und (3) gleichsetzen und nach t auflösen. Weil es der Zeitpunkt ist, an dem der Lichtstrahl am linken Ende ankommt, verpassen wir der Zeit den Index L: $x_L + v \cdot t_L = x_M - c \cdot t_L$. Durch Umformen bekommst $v \cdot t_L + c \cdot t_L = x_M - x_L = d$. Daraus folgt $t_L = d/(c + v)$.

Um den Zeitpunkt zu berechnen, zu dem der Lichtstrahl am rechten Ende ankommt (= zu dem das rechten Ende zu fallen beginnt), musst du (2) und (4) gleichsetzen und nach t auflösen: $x_R + v \cdot t_R = x_M + c \cdot t_R$. Durch Umformen bekommst du $c \cdot t_R - v \cdot t_R = x_R - x_M = d$. Daraus folgt $t_R = d/(c - v)$.

Die Zeitdifferenz, die zwischen dem Fallen des linken und rechten Endes liegt, ergibt sich dann aus $\Delta t = t_R - t_L = \frac{d}{(c-v)} - \frac{d}{(c+v)} = \frac{d(c+v)}{(c^2-v^2)} - \frac{d(c-v)}{(c^2-v^2)} = \frac{dc+dv-dc+dv}{(c^2-v^2)} = \frac{2dv}{(c^2-v^2)}$.

Wenn du nun berücksichtigst, dass d (also die halbe Stablänge) durch die Lorentz-Kontraktion von 1 m auf 0,8 m geschrumpft ist und dass $v = 0{,}6\,c$ beträgt und c rund $3 \cdot 10^8$ m/s, erhältst du für die Zeitverzögerung $5 \cdot 10^{-9}$ s. Der Effekt in Abb. 18 ist also extrem verstärkt dargestellt.