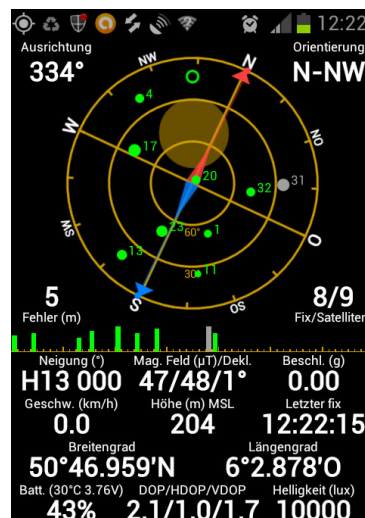


Experimentalphysik I, RWTH, WS 2022/2023, T. Hebbeker

January 30, 2023

SKRIPT-TEIL 11Nachdenken/Nachlesen:

Wie kann man Gravitationswellen nachweisen ?

Kleines Experiment: Global Positioning System GPS

Im Folgenden bezeichnet das Symbol m bei materiellen Objekten deren Ruhemasse ($m \equiv m_0$)¹.

5.4. Anwendungen: Relativistische Kinematik

Ein wichtiges Anwendungsfeld der speziellen Relativitätstheorie ist die experimentelle Elementarteilchenphysik an Beschleunigern, weil dort hohe Energien und Geschwindigkeiten auftreten.

In den meisten Fällen rechnet man die Lorentztransformationen in der Raum-Zeit nicht explizit durch, sondern benutzt Viererimpulse und nutzt aus:

- zeitliche Viererimpulserhaltung
- Lorentz-Invarianz von Skalarprodukten von Viererimpulsen.

¹Das in älteren Lehrbüchern benutzte zweifelhafte Konzept der bewegten Masse wird hier nicht angewandt.

Da in fast allen Formeln c auftritt, ist es einfacher, ein Einheitensystem zu wählen, in dem $c = 1$ gesetzt wird². Das bedeutet, dass Impulse, Massen und Energien die gleiche Einheit haben, z.B. eV.

Masse, Energie und Impuls sind verknüpft durch die Lorentzinvariante³:

$$m^2 = E^2 - \vec{p}^2 \quad (1)$$

Bei sehr großen Energien $E \gg m$ kann man einfach $|\vec{p}| = E$ nähern, im hochrelativistischen Grenzfall sind Rechnungen also viel einfacher als im klassischen Limes!

Die Lorentztransformationen für die Komponenten des Viererimpulses lauten:

$$E' = \gamma (E - \beta p_{\parallel}) \quad (2)$$

$$p'_{\parallel} = \gamma (p_{\parallel} - \beta E) \quad (3)$$

$$p'_{\perp} = p_{\perp} \quad (4)$$

wobei die Relativgeschwindigkeit von Inertialsystem S' relativ zu S durch β gegeben ist und γ der zugehörige Lorentz-Faktor ist, siehe Abb. 1. Hier ist p_{\parallel} (p_{\perp}) die Impulskomponente parallel (senkrecht) zur Boostichtung.

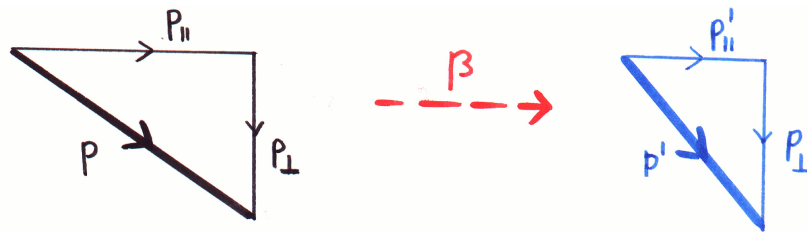


Abbildung 1: Lorentz-Boost von Inertialsystem S (links) zum System S' (rechts) [T.H.]

Die Umkehrung der Gleichungen (2) bis (4) lautet:

$$E = \gamma (E' + \beta p'_{\parallel}) \quad (5)$$

$$p_{\parallel} = \gamma (p'_{\parallel} + \beta E') \quad (6)$$

$$p_{\perp} = p'_{\perp} \quad (7)$$

Wenn das Teilchen in S' ruht ($\vec{p}' = 0$, somit $E' = m$), gilt also:

$$\beta (= \frac{v}{c}) = \frac{p_{\parallel}}{E} \quad \gamma (= \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}) = \frac{E}{m} \quad (8)$$

² $E : \text{eV}, \quad m : \text{eV}/c^2 \rightarrow \text{eV}, \quad p : \text{eV}/c \rightarrow \text{eV}$

³Die (Ruhe-)Masse m hat also in allen Bezugssystemen den gleichen Wert und charakterisiert das zugehörige Teilchen auf eindeutige Weise

Die erste Beziehung folgt aus Division von (6) durch (5), die zweite aus (5). Dabei sind E und \vec{p} Teilchen-Energie und -Impuls im System S ("Laborsystem"), aus dessen Sicht sich das Teilchen ja mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegt.

BEISPIEL: Relativistische Parameter für Proton mit $E_{kin} = 0.5 \text{ GeV}$.

Näherung: $m = 0.938 \text{ GeV} \approx 1 \text{ GeV}$.

Man berechnet für das Laborsystem S^4 :

$$E = m + E_{kin} = 1.50 \text{ GeV} \quad p = \sqrt{E^2 - m^2} = 1.12 \text{ GeV}$$

$$\beta = p/E = 0.745 \quad \gamma = E/m = 1.50$$

BEISPIEL: Proton in seinem Ruhesystem und im bewegten System (Annahme: $\beta = 0.99$, daraus folgt $\gamma = 7.09$).

Näherung: $m = 0.938 \text{ GeV} \approx 1 \text{ GeV}$.

Im Ruhesystem S' des Protons:

$$E' = 1 \text{ GeV} \quad p' = 0$$

Im Laborsystem S ($\gamma = 7.09$):

$$E = \gamma E' = 7.09 \text{ GeV} \quad p_{\parallel} = \beta \gamma E' = 7.02 \text{ GeV} \quad p_{\perp} = 0.$$

Ein wichtiger Begriff ist der des Schwerpunktsystems⁵. In diesem ist die Summe der Dreier-Impulse aller Teilchen null: $\sum \vec{p}_i = 0$. Das Quadrat der Summe aller Viererimpulse (Lorentzinvariante!) nennt man s . Es gilt im Schwerpunktsystem:

$$s = (\sum \underline{p}_i)^2 = (\sum E_i, \vec{0})^2 \equiv E_{cm}^2 \quad (9)$$

$\sqrt{s} = E_{cm}$ ist die zur Erzeugung neuer Teilchen verfügbare Energie!

BEISPIEL: p - p Kollision

Im Laborsystem seien die Teilchenenergien E_1 und E_2 . Die Protonen sollen auf einer geraden Linie aufeinander zufliegen. Schwerpunktsenergie?

⁴Der γ -Faktor bezieht sich ja immer auf eine Lorentztransformation; wenn diese nicht explizit angegeben ist, meint man die Transformation zwischen dem System, in dem das Teilchen sich bewegt und dessen Ruhesystem.

⁵= center of mass system

Die Viererimpulse der Protonen seien $\underline{p}_1 = (E_1, \vec{p}_1)$ und $\underline{p}_2 = (E_2, \vec{p}_2)$.

$$\begin{aligned}
 s &= (\underline{p}_1 + \underline{p}_2)^2 \\
 &= \underline{p}_1^2 + \underline{p}_2^2 + 2 \underline{p}_1 \underline{p}_2 \\
 &= m_p^2 + m_p^2 + 2 (E_1 E_2 - \vec{p}_1 \vec{p}_2) \\
 &= 2 m_p^2 + 2 \left(E_1 E_2 + \sqrt{E_1^2 - m_p^2} \sqrt{E_2^2 - m_p^2} \right) \\
 &= 2 \left(m_p^2 + E_1 E_2 + \sqrt{E_1^2 - m_p^2} \sqrt{E_2^2 - m_p^2} \right)
 \end{aligned}$$

In der zweitletzten Umrechnung wurde $\vec{p}_1 \vec{p}_2 = |\vec{p}_1| |\vec{p}_2| \cos 180^\circ = -|\vec{p}_1| |\vec{p}_2|$ benutzt.

Spezialfälle:

a) Mit $E \equiv E_1 = E_2 \gg m_p$: $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$ und $s = 4E^2$, $\sqrt{s} = 2E$:
 'Kollider' - z.B. der LHC am CERN mit maximal $\sqrt{s} = 14'000 \text{ GeV}$!

b) Für $E_1 \gg m_p$, $E_2 = m_p$: $\vec{p}_2 = \vec{0}$ und $s = 2E_1 m_p$: 'Fixed Target'. In diesem Fall wächst die Schwerpunktsenergie \sqrt{s} also nur mit der Wurzel der Protonenergie. CERN LHC: Ein Protonstrahl der Energie 7'000 GeV plus ruhendes Proton: $\sqrt{s} = 115 \text{ GeV}$!

BEISPIEL: Unbekanntes Teilchen Y zerfällt.

In einem Detektor werden dessen Zerfallsprodukte als vier Photonen ($m = 0$, also $E = |\vec{p}|$ wegen(1)) identifiziert und deren Dreier-Impulse (kartesische Koordinaten) gemessen:

$$Y \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4$$

$$\begin{aligned}
 \vec{p}_1 &= (4.853, 1.396, -2.877) \text{ GeV} & \vec{p}_2 &= (0.351, 0.071, -0.265) \text{ GeV} \\
 \vec{p}_3 &= (1.805, 0.434, -1.066) \text{ GeV} & \vec{p}_4 &= (1.381, 0.533, -0.957) \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

Welche Masse hat das zerfallende Teilchen Y ?

Im Laborsystem besagt die Viererimpulserhaltung:

$$\underline{p}_Y = \sum_1^4 \underline{p}_i \quad .$$

Die Masse des gesuchten Teilchens Y ist m_Y . Wegen der Invarianz des Vierer-Skalarproduktes gilt im Ruhesystem des Teilchens Y und in jedem anderen Inertialsystem

$$m_Y^2 = (\underline{p}_Y)^2 \quad .$$

Also

$$m_Y^2 = \left(\sum_1^4 \underline{p}_i \right)^2 \quad .$$

In diesem konkreten Fall ist die Summe der Viererimpulse

$$\begin{aligned}(E, \vec{p}) &= \sum_1^4 \underline{p}_i = \sum_1^4 (E_i, \vec{p}_i) = \left(\sum_i E_i, \sum_i \vec{p}_i \right) \\ &= (10.161, 8.390, 2.434, -5.165) \text{ GeV}\end{aligned}$$

Dabei ist $E_i = |\vec{p}_i|$ wegen der Masselosigkeit der Photonen. Es folgt:

$$m_Y \approx 0.5 \text{ GeV}$$

Es handelt sich um ein K^0 ($m = 498 \text{ MeV}$), das via

$$K^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 \rightarrow \gamma_1 + \gamma_3 + \gamma_2 + \gamma_4$$

zerfällt. Man kann leicht überprüfen, dass die invariante Masse der Photonpaare (1,3) und (2,4) jeweils gleich der π^0 -Masse ($= 135 \text{ MeV}$) ist.

Auf ganz ähnliche Weise kann man die Masse des Higgs-Teilchens über dessen Zerfall in vier Myonen bestimmen.

Ein auch *historisch* wichtiges Phänomen ist die elastische Streuung eines Photons an einem Elektron. Licht kann an geladenen Teilchen gestreut werden. Dabei zeigt sich der Teilchencharakter der elektromagnetischen Wellen, denn die Photonen verhalten sich wie punktförmige Objekte mit einem Viererimpuls, siehe Abb. 2

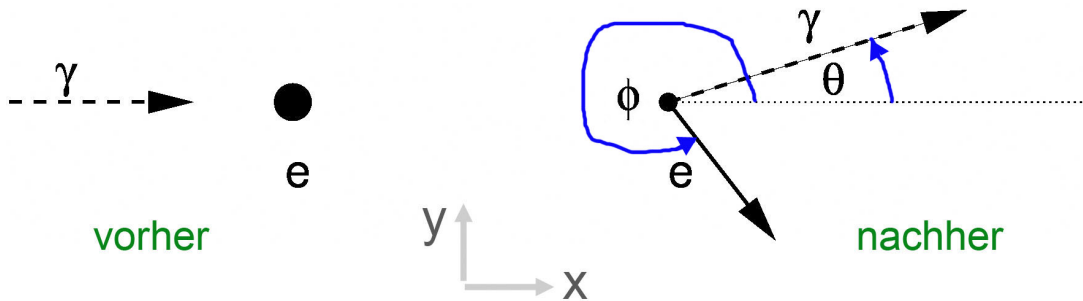


Abbildung 2: Compton-Streuung [T.H.]

Wir berechnen die Streukinematik im Ruhesystem des Elektrons. Das Photon und das Elektron haben vor der Wechselwirkung die Viererimpulse

$$\underline{p}_\gamma = (E_\gamma, E_\gamma, 0, 0) \quad \underline{p}_e = (m_e, 0, 0, 0) \quad (10)$$

Dieses System ist symmetrisch in Bezug auf die x -Achse. O.B.d.A. findet die Ablenkung in der x - y -Ebene statt:

$$\underline{p}'_\gamma = (E'_\gamma, E'_\gamma \cos \theta, E'_\gamma \sin \theta, 0) \quad \underline{p}'_e = (E'_e, p'_e \cos \phi, p'_e \sin \phi, 0) \quad (11)$$

θ und ϕ sind die Winkel der auslaufenden Teilchen in Bezug auf die Richtung des einfliegenden Photons, p'_e ist der Betrag des Impulses des angestoßenen Elektrons und dessen Gesamtenergie ist $E'_e = \sqrt{(p'_e)^2 + m_e^2}$.

Wir haben vier unbekannte Größen, $E'_\gamma, p'_e, \theta, \phi$, und vier Bestimmungsgleichungen:

$$\underline{p'_\gamma} + \underline{p'_e} = \underline{p_\gamma} + \underline{p_e} \quad (12)$$

von denen aber eine nichts nützt, da wir die z -Komponente des Impulses im Anfangszustand ja zu null definiert haben und schon in der Darstellung (11) die Erhaltung der z -Komponente ausgenutzt haben. Der Endzustand ist also nicht eindeutig bestimmt; es handelt sich um ein Quantenphänomen⁶!

Wir fixieren jetzt willkürlich E'_γ auf einen zulässigen Wert ($< E_\gamma$!) und berechnen alle anderen kinematischen Variablen, insbesondere den Photonstreuwinkel θ . Aus der Dreier-Impulserhaltung, siehe Gleichungen (10) - (12):

$$E_\gamma = E'_\gamma \cos \theta + p'_e \cos \phi \quad 0 = E'_\gamma \sin \theta + p'_e \sin \phi \quad (13)$$

folgt nach einigen Umformungen:

$$(p'_e)^2 = (E_\gamma)^2 - 2E_\gamma E'_\gamma \cos \theta + (E'_\gamma)^2 \quad (14)$$

Andererseits (Energieerhaltung, Gleichungen (10) - (12)):

$$(p'_e)^2 = (E'_e)^2 - m_e^2 = (E_\gamma - E'_\gamma + m_e)^2 - m_e^2 \quad (15)$$

Gleichsetzen von (14) und (15) gibt:

$$2 m_e (E_\gamma - E'_\gamma) = 2 E_\gamma E'_\gamma (1 - \cos \theta) \quad (16)$$

Diese Gleichung kann man nun nach θ bzw. $\cos \theta$ auflösen und erhält den gesuchten Zusammenhang zwischen Photonenergie nach dem Stoß und Streuwinkel:

$$\cos \theta = 1 - m_e \frac{E_\gamma - E'_\gamma}{E_\gamma E'_\gamma} \quad (17)$$

Man kann die Gleichung noch etwas umformen, indem man berücksichtigt, dass für Photonen gilt:

$$E_\gamma = h \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (18)$$

wobei $h = 6.58 \cdot 10^{-25} \text{ GeV s}$ das Plancksche Wirkungsquantum ist. In (16) müssen wir zunächst Potenzen von c (wieder) einfügen, da wir ins SI zurückkehren wollen:

$$m_e c^2 (E_\gamma - E'_\gamma) = E_\gamma E'_\gamma (1 - \cos \theta) \quad (19)$$

⁶Man kann im Rahmen der Quantenelektrodynamik die Wahrscheinlichkeit z.B. als Funktion des Winkels θ berechnen - hier interessiert uns aber ausschließlich die Zerfallsskinematik.

Dann bekommt man

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (20)$$

Also: Es tritt eine Wellenlängenverschiebung auf, die auf charakteristische Weise mit dem Streuwinkel variiert: Compton-Effekt.

Diese Rechnungen und entsprechende (bestätigende!) Experimente wurden zuerst von A.H. Compton durchgeführt, Anfang der 20er Jahre des 20. Jahrhunderts.

Der Faktor

$$\lambda_c \equiv \frac{h}{m_e c} = 2.4 \cdot 10^{-12} \text{ m} \quad (21)$$

heißt Compton-Wellenlänge (des Elektrons). Da der Wert sehr klein ist im Vergleich zur Wellenlänge sichtbaren Lichtes ($\sim 0.5 \mu\text{m}$) bedarf es Röntgenstrahlung für experimentelle Untersuchungen, wie Abb. 3 zeigt ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). Man erkennt zwei Peaks in der Verteilung der Wellenlänge, diese entsprechen den ungestreuten⁷ und den (an Elektronen) gestreuten Photonen.

5.5. Vom Aussehen bewegter Objekte

Wir betrachten jetzt bewegte Objekte oder machen fotografische Momentaufnahmen. Zwischen Kamera und Auge gibt es keinen prinzipiellen Unterschied, d.h. das Foto entspricht dem direkten visuellen Eindruck.

Es gibt aber einen wichtigen Unterschied zwischen:

a) **Bildaufzeichnung: Festgehalten werden hier Lichtsignale, die gleichzeitig⁸ im (punktförmigen) Auge ankommen, aber vom entfernten Objekt i.a. zu unterschiedlichen Zeiten an verschiedenen Orten emittiert wurden.**

b) Längenmessung: Gleichzeitiges Bestimmen der Koordinaten der beiden Enden, z.B. durch zwei gleichzeitig (aus Sicht des Messenden) von den Enden ausgesandte Lichtpulse, die von zwei in unmittelbarer Nähe der Endpunkte befindlichen Messstationen (Zeit, Ort) registriert werden, und anschließende Berechnung der Koordinatendifferenz, siehe Kapitel 5.2.6.

Im Folgenden diskutieren wir nur die mit a) verbundenen Effekte.

5.5.1. Längenänderung

Ein Stab kann verlängert oder verkürzt erscheinen, je nach Blickwinkel, siehe Abb. 4! Der Stab bewegt sich in beiden Bildhälften mit 90% der Lichtgeschwindigkeit. Eingezeichnet sind zwei Lichtstrahlen, vom Anfang und vom Ende des Stabes

⁷= nicht gestreut an Elektronen. Streuung an Protonen ist auch möglich und führt zu einer vernachlässigbar kleinen Wellenlängenänderung.

⁸das bedeutet: Belichtungszeit $\rightarrow 0$

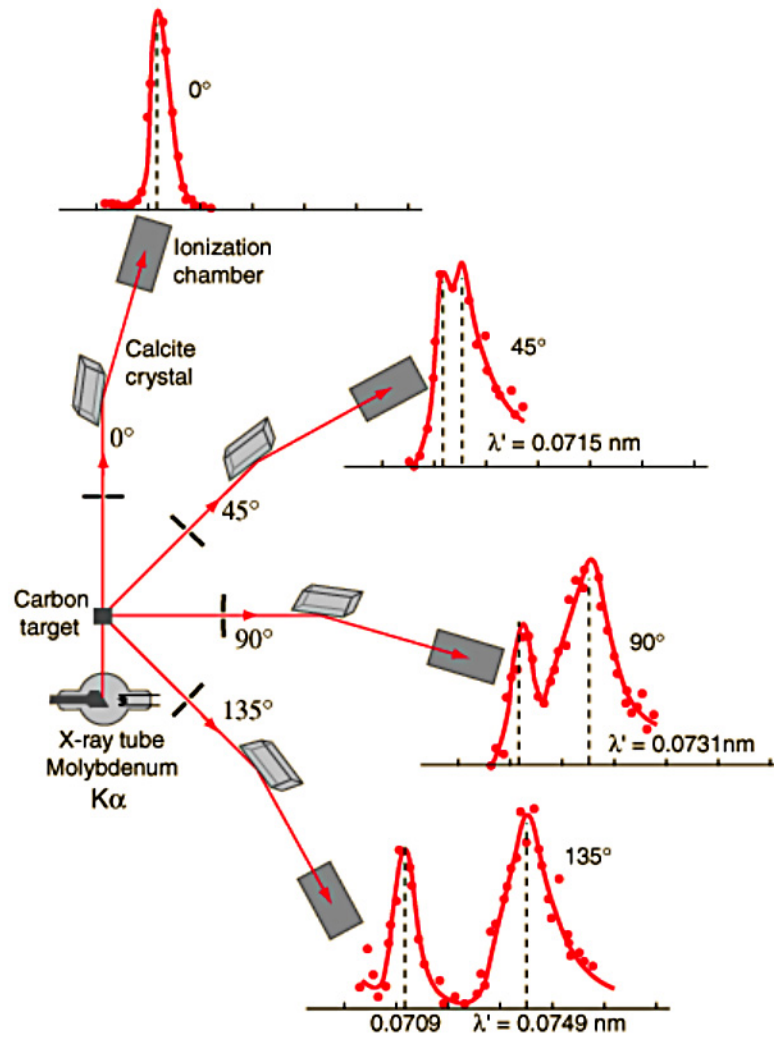


Abbildung 3: Compton-Effekt, gemessen von A. Compton [miniphysics.com]

ausgehend, die gleichzeitig die Kamera erreichen. Sowohl ‘Retardierung’ (also zeitli-

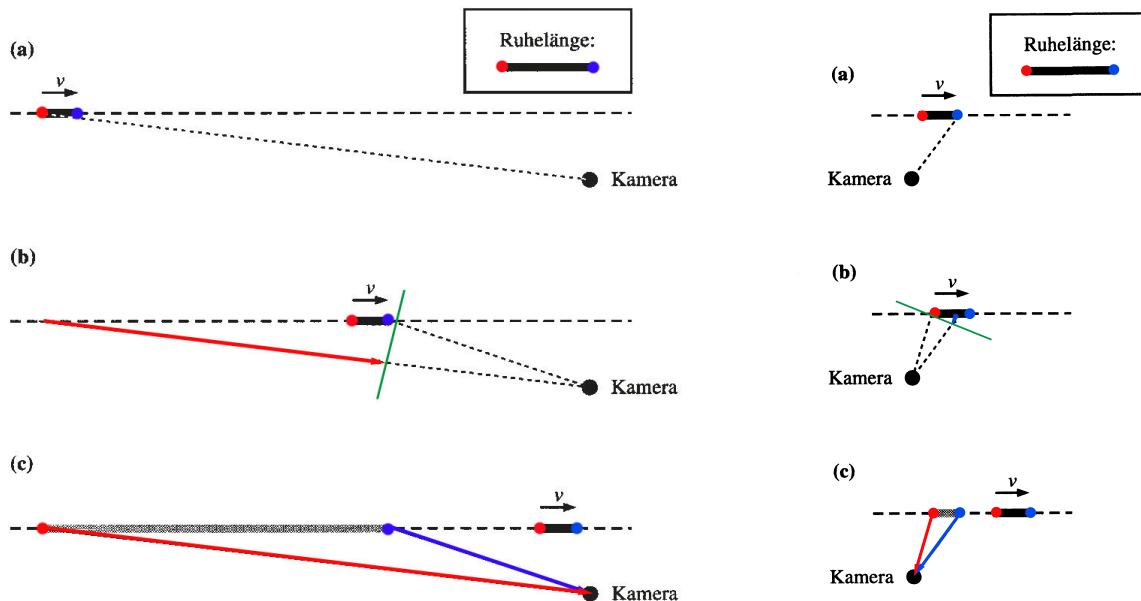


Abbildung 4: Schnell bewegter Körper: Längenänderung. Die Längenkontraktion, die man nicht einfach mit Lichtlaufzeiten erklären kann, ist schon eingezeichnet [U. Kraus]. Links: Stab fliegt fast in Richtung Kamera. Rechts: Stab entfernt sich, Kamera blickt ungefähr senkrecht zur Flugrichtung. Bild c) zeigt jeweils die fotografische Länge.

che Verzögerung wegen endlicher Lichtlaufzeit) als auch Längenkontraktion tragen bei. Bei Beobachtung des senkrecht zur Blickrichtung vorbeifliegenden Stabes (und nur dann):

$$L = \frac{L_0}{\gamma} \quad (22)$$

Das ist die Formel für die Längenkontraktion. Da man in dieser Situation die Lichtpulse von den beiden Stabenden gleichzeitig empfängt, entspricht dieses Foto einer Längenmessung.

5.5.2. Objektdrehung

Beobachtung senkrecht zur Flugrichtung, bei großem Abstand (Abb. 5): Ein Objekt (hier ein Holzbrett) erscheint gedreht! Das liegt daran, dass auch Licht von der linken Kante ($A_0 - B_0$) die Kamera erreicht. Der Drehwinkel ist - wie man nachrechnen kann - durch $\sin \theta = v/c \equiv \beta$ gegeben.

Man kann also auch die verdeckten Seiten sehen (wenn die Lichtabstrahlung in alle Richtungen erfolgt), wie Abb. 6 noch einmal an einem Quader zeigt!

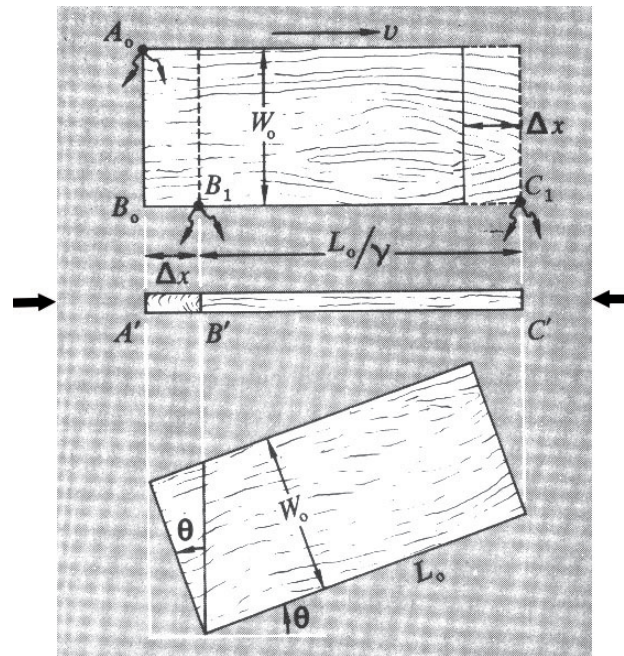


Abbildung 5: Schnell bewegtes Brett: Drehung. Der Beobachter blickt von vorn (im Bild ist das ganz unten) auf die Kante des Bretts und sieht die mit Pfeilen markierte Ansicht [French]. Es sieht also so aus wie die Projektion eines gedrehten Brettes auf die Blickrichtung (untere Bildhälfte).

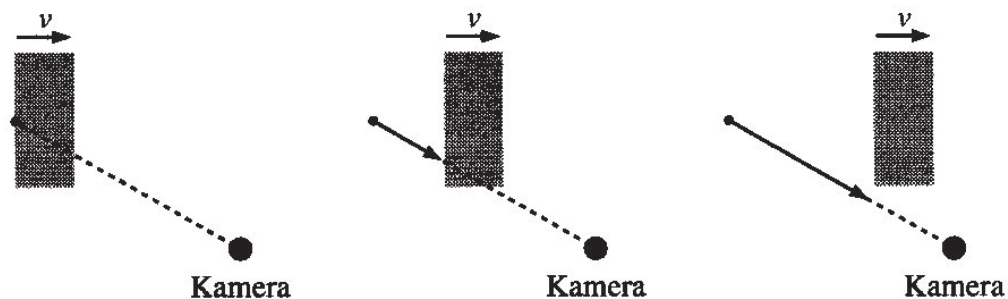


Abbildung 6: Schnell bewegter Körper: Sichtbarwerden verdeckter Seiten [U. Kraus]. Man kann diese Verzerrung z.B. wahrnehmen, wenn der Stab ein regelmäßiges Zebromuster aufweist, und die Streifen aus Beobachtersicht senkrecht verlaufen.

5.5.3. Verzerrung

Wenn der Abstand klein ist, gibt es zusätzlich Verzerrung wegen endlicher Lichtlaufzeiten, siehe Abb. 7.

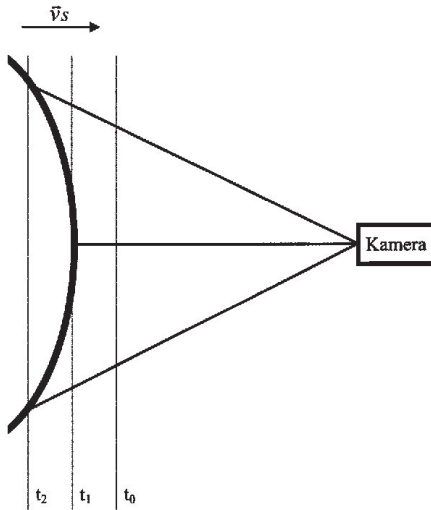


Abbildung 7: Schnell bewegter Körper: Verzerrung eines geraden Stabes [Backhaus]

Insgesamt tritt also eine Kombination dreier geometrischer Effekte auf (Längenänderung, Drehung, Verzerrung), die in Abb. 8 illustriert sind: Die Kamera nimmt - immer aus der gleichen Position und Richtung aus - einmal einen ruhenden und einmal einen vorbeifliegenden Würfel auf. Einstein kannte diese Effekte noch nicht, erst in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts verstand man diese.

SIMULATIONEN: schneller Vorbei-/Durchflug

brand.mpeg, illum_geom.mpeg

Backhaus et al

5.5.4. Farbveränderung

Dopplereffekt: Bei Annäherung nimmt die Frequenz um den Faktor

$$f = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \quad (23)$$

zu.

5.5.5. Intensitätsveränderung

Wenn die Frequenz um den Faktor f zunimmt, so steigt (ohne Beweis) die Intensität um den Faktor

$$F = f^5 \quad (24)$$

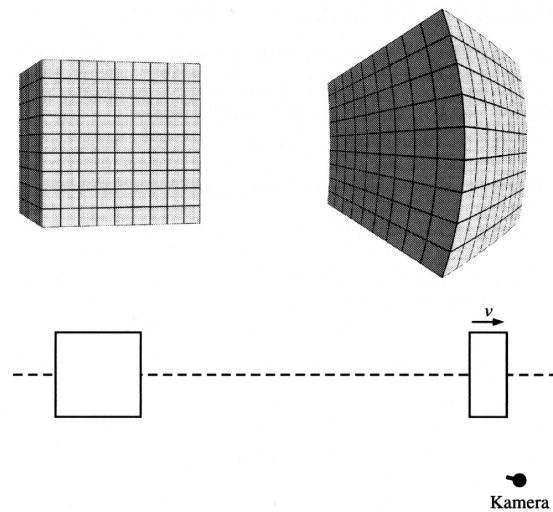


Abbildung 8: Wahrnehmung schnell bewegter Körper: links ruhender, rechts bewegter Würfel. Die Kameraposition und Ausrichtung ist in beiden Fällen gleich [U. Kraus]

6.0 Allgemeine Relativitätstheorie

Die von Einstein formulierte Theorie der Gravitation heißt 'Allgemeine Relativitätstheorie' = AR, im Englischen GR = General Relativity. Sie baut auf der SR (spezielle Relativitätstheorie) auf. Im Grenzfall verschwindender Gravitationsfelder wird aus der AR die SR. Da die Mathematik der AR nicht trivial ist, werden wir deren Inhalt und die Konsequenzen hier nur qualitativ vorstellen.

6.1 Grundlagen

Bisher haben wir immer über Inertialsysteme gesprochen. Man kann natürlich auch Kräfte, insbesondere auch die Gravitation, in diesen Inertialsystemen beschreiben.

Die Gravitation unterscheidet sich aber von den anderen Naturkräften in einem wesentlichen Punkt: Die 'Gravitationsladung' = schwere Masse m_s ist (modulo konst. Faktor) gleich der trägen Masse m_t . Dies ist mit hoher Genauigkeit experimentell überprüft worden⁹.

Die Trägheit eines Körpers beschreibt, wie schwer er 'vom rechten Wege' abzubringen ist; letzterer ist die Trajektorie des kräftefreien Körpers¹⁰, also eine ausgezeichnete Bahn im Raum, unabhängig von der Masse des Körpers. Damit stellt die Gleichheit $m_t = m_s$ einen Zusammenhang zwischen Gravitation und Raum her.

⁹Mikro-Satellit MICROSCOPE hat für zwei Massen aus unterschiedlichen Materialien die Beschleunigung im Erdgravitationsfeld gemessen; relative Unterschiede zwischen träger und schwerer Masse sind kleiner als $< 2 \cdot 10^{-14}$ (2017)

¹⁰keine Kräfte außer Gravitation

Das heißt, die Teilchenbahn wird durch Eigenschaften des Raumes bestimmt, und nicht durch die Teilcheneigenschaften.

Da die Unterscheidung zwischen ‘Gravitationskräften’ und ‘Scheinkräften’ durch *lokale* Messungen **nicht** möglich ist (siehe Experimente mit Aufzügen und dergleichen), ist die bisherige Definition des Inertialsystems zu eng gefasst. Das 1. Einsteinsche Postulat der SR kann auf andere Bezugssysteme verallgemeinert werden:

Einsteins Äquivalenzprinzip: Beschleunigte Bezugssysteme einerseits und Inertialsysteme mit Gravitationsfeldern andererseits sind lokal ununterscheidbar.

BEISPIEL: Interstellare Reise

Wenn die Rakete konstant mit g beschleunigt, kann man im Inneren diese nicht von einem am Erdboden geparkten Raumschiff unterscheiden.

BEISPIEL: Raumstation auf Erdumlaufbahn.

Die Experimentatoren in der Station können lokal keinen Unterschied zu einem kräftefreien Inertialsystem feststellen: Beschleunigung und Gravitation kompensieren sich exakt.

Wichtig ist, dass das Äquivalenzprinzip nur in einem (annähernd) homogenen Gravitationsfeld, also nur lokal anwendbar ist.

Das Äquivalenzprinzip und die notwendigen Modifizierungen der Newton-Theorie (→ **Retardierung der Felder**, wegen der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Kräfte) bilden die Grundlage für Einsteins 1915 veröffentlichte AR.

In der SR ist die Gesamtenergie E durch

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (25)$$

gegeben. Dazu kommt noch die potentielle Energie. In der AR übernimmt E (**bzw. E/c^2**) **die Rolle der Gravitationsladung**, anstelle von m . Für nichtrelativistische massive Teilchen ist $E/c^2 \approx m$, es ändert sich also praktisch nichts.

Für Photonen aber, für die $E/c^2 = m^{eff}$ gilt, bedeutet dies, dass auch sie Gravitationskräfte ausüben und die Gravitation spüren, d.h. sie ändern Energie und Richtung z.B. beim Vorbeifliegen an Himmelskörpern¹¹, Lichtstrahlen werden also gekrümmt!

Da aber Lichtstrahlen im Vakuum andererseits ‘gerade’ Linien und die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten *definieren* (Fermatsches Prinzip!), und Lichtsignale wesentlich für die Messung von Längen und Winkeln sind, bedeutet dies, dass der Raum gekrümmt ist. Das drückt sich mathematisch dadurch aus, dass das

¹¹Auch andere Energieformen, z.B. hat die in elektrischen und magnetischen Feldern und sogar die in Gravitationsfeldern (im Vakuum!) gespeicherte Energiedichte eine anziehende Wirkung auf Massen.

Skalarprodukt bzw. Quadrat eines Raumvektors und damit dessen Länge nicht mehr durch

$$|\vec{x}|^2 = \vec{x} \cdot \vec{x} = (x^1, x^2, x^3) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix} \quad (26)$$

gegeben ist, sondern mit einer verallgemeinerten ortsabhängigen 3x3-Matrix g ('Metrik', 'metrischer Tensor') berechnet werden muss:

$$\vec{x} \cdot \vec{x} = (x^1, x^2, x^3) \cdot g(x^1, x^2, x^3) \cdot \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix} \quad (27)$$

Der metrische Tensor hat also folgende allgemeine Gestalt, wobei alle Matrixelemente g_{ij} im Allgemeinen ortsabhängig sind:

$$g = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix} \quad (28)$$

Der Raum ist daher nicht mehr 'euklidisch' bzw. 'flach', sondern 'Riemannsch' bzw. 'gekrümmt'¹².

Ein einfaches Beispiel für einen gekrümmten Raum stellt die Kugeloberfläche dar, siehe Abb. 9. Es ist ein zweidimensionaler Raum. 'Sichtbar' wird die Krümmung erst bei Einbettung in den 3-dimensionalen euklidischen Raum. Auf der Kugeloberfläche stellt man die Krümmung z.B. dadurch fest, dass die Winkelsumme im Dreieck nicht 180° beträgt.

Wir können diese Raumkrümmung lokal nicht erkennen, genauso wenig wie ein Erdbewohner lokal durch physikalische Experimente die Krümmung der Erdoberfläche erkennen kann.

Der Kugelradius R ist in diesem Beispiel ein Maß für die Krümmung. Kleine Abstände auf der Kugeloberfläche berechnet man in Winkelkoordinaten (geographische Breite θ und Länge ϕ) nach

$$d^2 = R^2 (\Delta\theta)^2 + R^2 \sin^2 \theta (\Delta\phi)^2 \quad (29)$$

wobei ϕ den Längengrad angibt und die Breitengrade so definiert sind, dass $\theta = 90^\circ$ am Äquator. Also sieht die Metrik in den Winkelkoordinaten θ und ϕ hier so aus:

$$g = \begin{pmatrix} R^2 & 0 \\ 0 & R^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (30)$$

Nun könnte man vermuten, dass es eine geeignete Transformation

$$\theta, \phi \rightarrow x_1, x_2 \quad (31)$$

¹²Genauer: die 4-dim. Raum-Zeit ist gekrümmt, Skalarprodukte werden nicht mehr durch die einfache Formel $(x^0)^2 - \vec{x}^2$ beschrieben. Wir betrachten hier aber nur den räumlichen Teil.

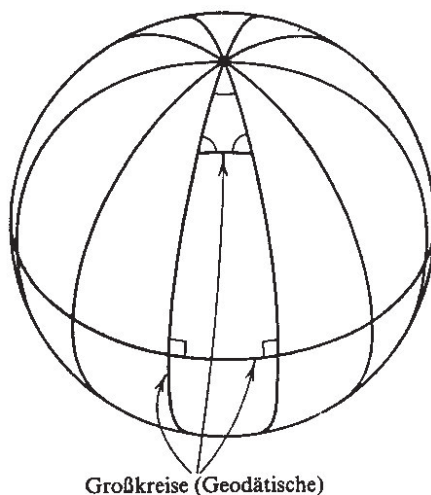


Abbildung 9: Gekrümmte Kugeloberfläche [Berry]

so gibt, dass in den neuen Koordinaten g zur Einheitsmatrix wird. Wie aber schon C.F. Gauß zeigte, ist dies nicht möglich, die Kugeloberfläche **ist** ein gekrümmter 2-dim. Raum.

Man beachte, dass (nur) lokal die Geometrie auch hier durch die euklidischen Formeln beschrieben werden kann, also

$$d^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 \quad (32)$$

gilt, wenn $\theta \approx \text{const}$ und wir definieren $\Delta x = R \Delta\theta$ und $\Delta y = R \sin \theta \Delta\phi$.

Die Krümmung des dreidimensionalen Orts-Raumes kann man (da uns ein entsprechender 4-dimensionaler höherdimensionaler Orts-Raum nicht zugänglich ist) nur schwer visualisieren. Am ehesten gelingt das für die Umgebung einer Punktmasse mit Hilfe eines Gummimembran-Modells (2-dim. Raum eingebettet in 3-dim. Überraum, projiziert auf 2-dim. Papierebene!), siehe Abb. 10.

VERSUCH

Gummituch und Kugeln. Versuch einer Veranschaulichung der Raumkrümmung und ihrer Wirkung.

Durch die Gravitation werden Maßstäbe verändert. Das folgt aus der Verlangsamung von Uhren (s.u.) und dem lokalen Wert der Lichtgeschwindigkeit, der überall zu c gemessen wird, Längen werden verkürzt. Die Veränderung der Metrik kann man einerseits so darstellen wie oben, indem man die Längen unverändert lässt und den Raum 'verbiegt'; ein äquivalenter Standpunkt ist der eines flachen Raumes mit geschrumpften Maßstäben, wie Abb. 11 veranschaulicht.

Das Einsteinsche Gravitationsgesetz hat die Form

$$\boxed{\tilde{G}_{\mu\nu} = G_N \cdot T_{\mu\nu}} \quad (33)$$

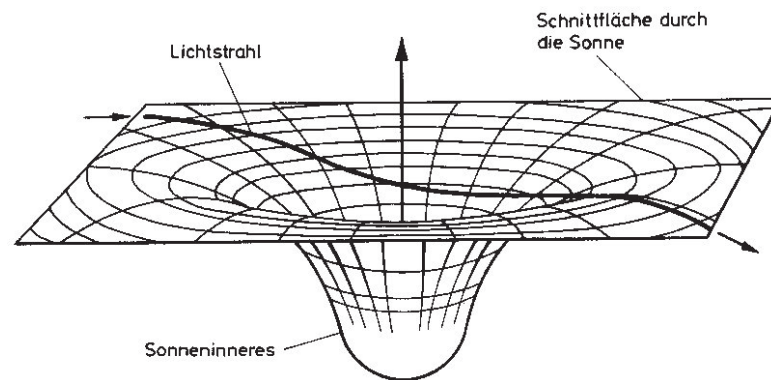


Abbildung 10: Raumkrümmung durch Gravitationsfelder [Sexl]. Lichtstrahlen folgen dem 'schnellsten' Weg (Fermatsches Prinzip). Das führt unter anderem dazu, dass wegen der Verlangsamung der Uhren (und damit scheinbar auch der Lichtgeschwindigkeit) im Gravitationsfeld das Licht der Sonne 'ausweicht'.

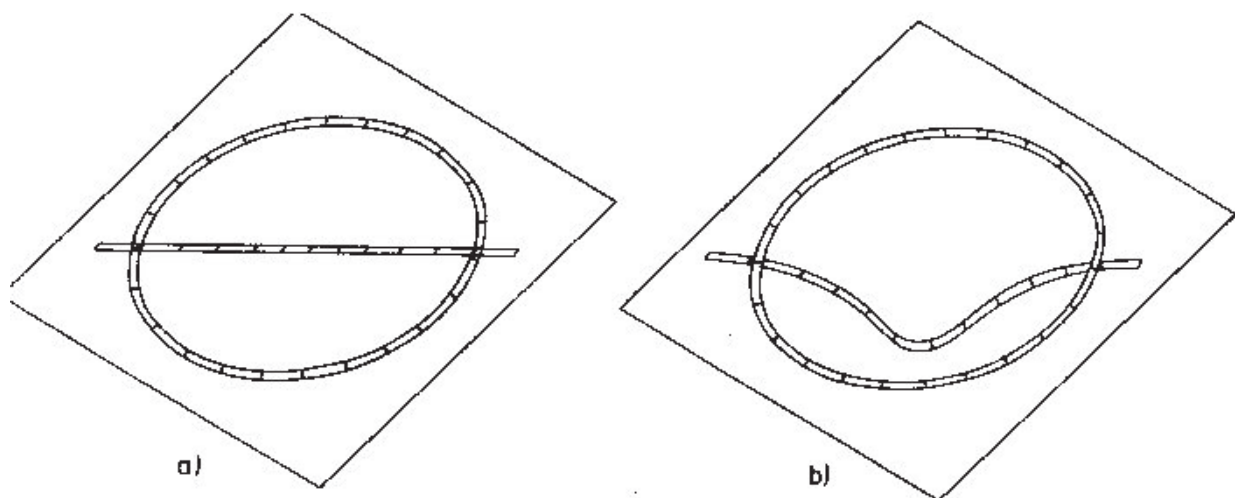


Abbildung 11: Metrik des gekrümmten Raumes [Sexl]. Links: Maßstäbe werden verkürzt, um die zentrale Linie in den Kreis einzupassen. Rechts: Alternativ wird der Raum gekrümmt dargestellt.

Auf der linken Seite steht eine Matrix $\tilde{G}_{\mu\nu}$, die die Raumeigenschaften beschreibt (hier geht der metrische Tensor g ein); diese ist proportional zum **Einstein-Tensor** $G_{\mu\nu}$ der die Raumkrümmung beschreibt. Wir werden ihn hier nicht weiter diskutieren können.

Auf der rechten Seite steht der **Energie-Impulstensor** T , der die Quellen der Gravitation beinhaltet. μ, ν sind Viererindizes (0, 1, 2, 3). In Worten: Materie und Energie bestimmen die Krümmung des Raumes, die wiederum die Bewegung der Materie vorgibt: "Matter tells space how to bend, space tells matter how to move" (John Archibald Wheeler). Interpretation: ein Planet bewegt sich um die Sonne nicht aufgrund einer direkt zwischen den beiden Himmelskörpern wirkenden Kraft, sondern weil die Sonne den Raum krümmt, und der Planet sich dann diesen Raumeigenschaften entsprechend bewegt, siehe Abb. 10.

Einstein hat zeitweise einen additiven Term $\sim \Lambda g_{\mu\nu}$ in die linke Seite der Gleichung (33) eingeführt, mit dem metrischen Tensor $g_{\mu\nu}$ (in der vierdimensionalen Raum-Zeit) und der **kosmologischen Konstanten** Λ , die (sofern sie positiv ist) einen abstoßenden (!) gravitativen Effekt bewirkt. Motivation für Einstein war, so ein vermeintlich statisches Universum vor dem Kollaps zu bewahren, in einem expandierenden Universum (Hubble und Lemaitre, 1920er Jahre) ist das aber nicht nötig, da die kinetischen Energien der auseinanderfliegenden Galaxien den 'Big Crunch' (zumindest einige Milliarden Jahre lang) verhindern.

Im Jahr 2011 wurde der Physik-Nobelpreis verliehen an S. Perlmutter, B.P. Schmidt und A. Riess für die Entdeckung einer (scheinbaren ?) beschleunigten (!) Expansion des Universums. Diese kann möglicherweise mit der kosmologischen Konstanten erklärt werden, deswegen steht sie heute wieder 'hoch im Kurs'.

6.2 Voraussagen und Tests

6.2.1. Licht und Gravitation

6.2.1.1. Schwarzschildradius und schwarze Löcher

Die Fluchtgeschwindigkeit¹³, die ein Teilchen mindestens benötigt, um von einem kugelförmigen Himmelskörper (Radius r , Masse M) entgegen der Gravitationskraft wegzufiegen zu können, ist in der klassischen Mechanik gegeben durch

$$\frac{1}{2} v^2 = G_N \frac{M}{r} \quad (34)$$

(Gleichsetzen von kinetischer und potentieller Energie). Mit kleiner werdendem Radius (aber *fester Masse*) wächst v , bis zum Grenzwert $v = c$; der zugehörige Wert für r ist der **Schwarzschildradius**¹⁴:

$$r_S = \frac{2 G_N}{c^2} M \quad (35)$$

¹³2. kosmische Geschwindigkeit

¹⁴Karl Schwarzschild, 1915

Diese Gleichung erhält man auch bei relativistischer Rechnung. Man beachte, dass der Schwarzschildradius schneller mit der Masse wächst als z.B. der Radius einer Kugel konstanter Dichte ($r \propto M^{1/3}$).

Bedeutung: Ist $r \leq r_S$, kann selbst Licht das Himmelsobjekt nicht mehr verlassen, von außen kann es nur noch durch seine Gravitationswirkung wahrgenommen werden: schwarzes Loch.

BEISPIEL: Schwarzschildradius eines Riesensterns

Nehmen wir an, ein Stern habe eine konstante Dichte von $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. Die folgende Tabelle zeigt, wie physikalischer Radius

$$r = \left(\frac{3 M}{4 \pi \rho} \right)^{1/3} \quad (36)$$

und Schwarzschildradius (ausgedrückt in Sonnenradien $r_{sun} = 6.96 \cdot 10^8 \text{ m}$) mit der Masse des Sterns (in Sonnenmassen, $m_{sun} = 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$) zunehmen.

| M/m_{sun} | r/r_{sun} | r_S/r_{sun} |
|-------------|------------------|---------------------|
| 1 | 1.1 | $4.2 \cdot 10^{-6}$ |
| 10^9 | $1.1 \cdot 10^3$ | $4.2 \cdot 10^3$ |

Das bedeutet, dass wir am Himmel keine extrem massereichen Sterne (mit $m > 10^9 m_{sun}$) sehen können, selbst wenn sie existieren könnten¹⁵!

BEISPIEL: Schwarzschildradius für verschiedene Himmelskörper

Der Schwarzschildradius r_S und das Verhältnis zum wahren Radius r einiger Himmelskörper:

| | r_S | r_S/r |
|----------------|-------|---------------------|
| Erde | 9 mm | $1.3 \cdot 10^{-9}$ |
| Sonne | 3 km | $4 \cdot 10^{-6}$ |
| Neutronenstern | 3 km | 0.3 |

Würde man also die Erde auf knapp 1 cm komprimieren, könnten die Marsianer nur den kreisenden Erdmond sehen. . .

Beim Entweichen von Strahlung von einem Stern, der radial größer ist als der zugehörige Schwarzschildradius ist, wird das Licht zwar nicht langsamer, aber der Verlust an Energie (Photonen bewegen sich entgegen der Gravitationskraft, s.u.) spiegelt sich in der Frequenzabnahme bzw. Wellenlängenzunahme wieder, s.u.

Schwarze Löcher sind auf verschiedene Weisen im Kosmos nachgewiesen worden. Man vermutet, dass alle Galaxienzentren ein (sehr massereiches) schwarzes Loch

¹⁵maximale bekannte Sternmasse $\sim 300 m_{sun}$.

enthalten. Auch schwere Sterne können sich am Ende ihres Lebens in schwarze Löcher transformieren.

BEISPIEL: Schwarzes Loch in der Mitte der Milchstraße

Aus der schnellen Bewegung der Sterne in der Nähe des Zentrums der Milchstraße (Bahnradien = mehrere Lichttage, Umlaufzeiten = einige Jahre) schließt man auf eine Zentralmasse von etwa 4 Millionen Sonnenmassen, die nicht leuchtet, siehe Abb. 12. Für diese Entdeckung wurde 2020 die Hälfte des Physik-Nobelpreises an Andrea Ghez und Reinhard Genzel verliehen.

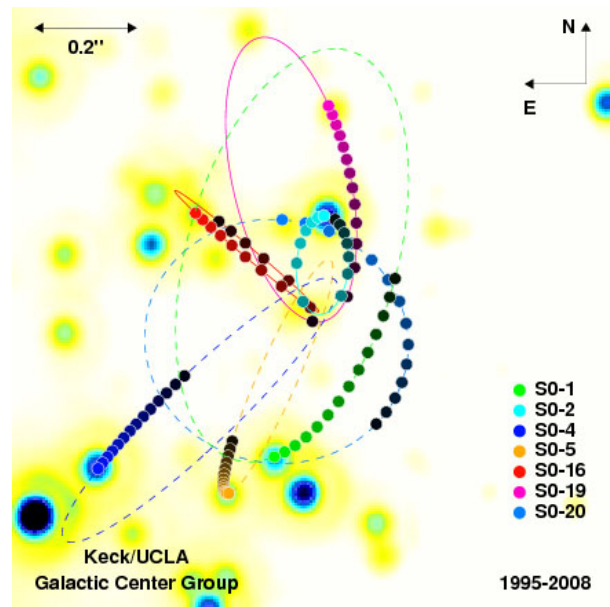


Abbildung 12: Schwarzes Loch Sgr A* [Keck/UCLA]

ANIMATION: Sternbewegung um Sagittarius A*

BEISPIEL: Schwarzes Loch im Zentrum der Galaxie M87

6.2.1.2. Frequenzverschiebung und Uhrenverlangsamung im Gravitationsfeld

Beim 'Fallen' oder 'Steigen' von Photonen im konstanten Gravitationsfeld gewinnen/verlieren sie Energie, damit ändert sich ihre Wellenlänge bzw. Frequenz:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta E}{E} = \frac{m g h}{E} = \frac{g h}{c^2} \quad (37)$$

Dabei wurde die effektive Photonmasse $m = E/c^2$ benutzt.

BEISPIEL: Turmexperiment von Pound, Rebka (1960) und Pound, Snider (1964)

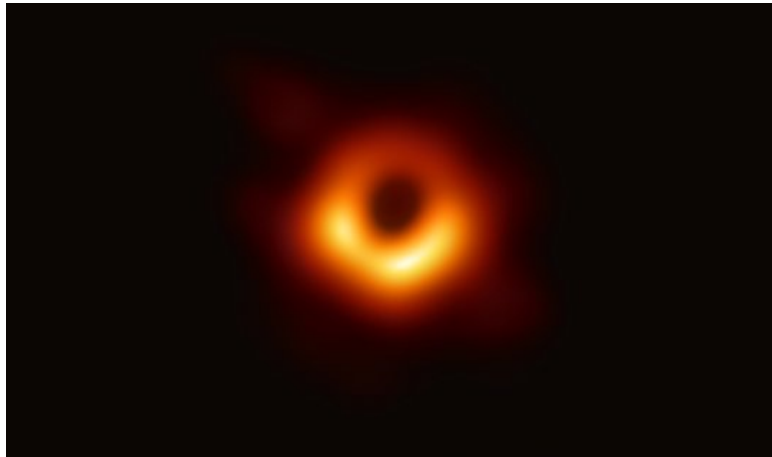


Abbildung 13: Schatten des schwarzen Lochs im Zentrum von M87. Mit Radioteleskopen aufgenommenes Bild, es zeigt die heiße Akkretionsscheibe um das schwarze Loch. [Event-Horizon-Telescope]

= erster Nachweis dieses Effektes: 20 m hoher Turm in Harvard, Gamma-Strahlung. Frequenzverschiebung¹⁶ $\Delta\nu/\nu = 2.5 \cdot 10^{-15}$.

Apparaturen, die Signale mit fester Frequenz aussenden, sind Uhren. Wir stellen uns Atomuhren vor, die im Takt des Elektronenumlaufes Lichtwellen abstrahlen. Jeder Wellenberg definiert ein 'Tick-Tack', siehe Abb. 14. Ein weit von der Erde entfernter Beobachter B empfängt von A eine kleinere Frequenz als von B, da die Photonen im Gravitationsfeld Energie ($E \sim \nu$) verlieren. Wegen $c = \nu \times \lambda$ vergrößert sich die Wellenlänge, siehe Abb. 14. Also:

Uhren werden in Gravitationsfeldern verlangsamt.

BEISPIEL: Hafele-Keating-Experiment

Das schon in Kapitel 5.3.3 vorgestellte Experiment von J. Hafele und R. Keating ergab, dass nach einer Erdumkreisung in ca. 10 km Höhe die Uhren an Bord des Flugzeuges knapp 200 ns vorgehen, in Einklang mit den Rechnungen. Um den Gravitationseffekt vom Geschwindigkeitseffekt (SR) zu trennen, wurden die Zeitverschiebungen für Ost- und Westflug addiert, dabei fällt der SR-Effekt in guter Näherung heraus.

BEISPIEL: Atomuhr auf dem Turm des Kölner Doms, 1999.

Diese geht nach gut einer Woche um 7 ns vor, relativ zu einer 80 m tiefer aufgestellten Uhr: dies hat man durch Messungen verifiziert.

6.2.1.3. Lichtablenkung im Gravitationsfeld

Außer der richtigen Berechnung der Merkur-Periheldrehung (s.u.) erlebte die AR

¹⁶gemessen via Mößbauer-Effekt

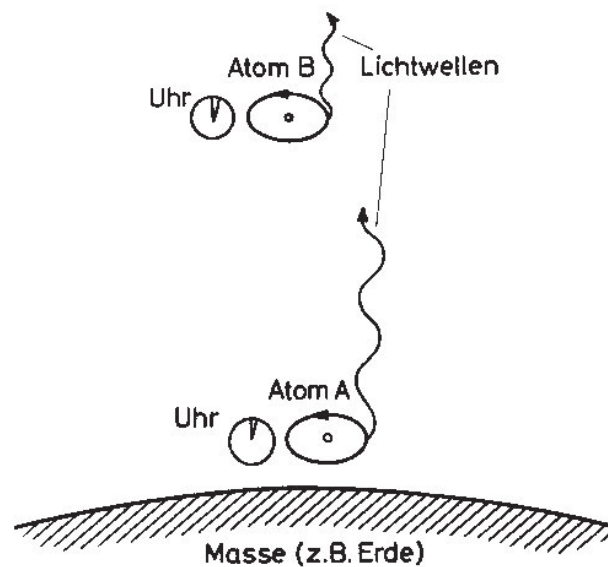


Abbildung 14: Pound-Rebka-Experiment [Sexl]. Das von der unteren Uhr A emittierte Signal kommt bei B mit einer vergrößerten Wellenlänge an.

einen großen Triumph, als die von Einstein berechnete Ablenkung des Lichts durch die Sonne durch Beobachtungen im Jahre 1919 bestätigt wurde, siehe Abb. 15.

Die ersten (allerdings nicht sehr genauen und heute umstrittenen) Messungen wurden von A.S. Eddington et al. während einer Sonnenfinsternis gemacht. Heute ist der Effekt mit einer relativen Genauigkeit von besser als 1% gemessen worden.

Erste Rechnungen von Einstein ergaben:

$$\delta' = \frac{r_S}{r} \quad (38)$$

Dabei ist r_S der Schwarzschildradius der Sonne und r der kleinste Abstand des Lichtstrahles vom Sonnenzentrum. Die zur Formel (38) führende Rechnung kann man nachvollziehen, wenn man die Newtonsche Bahn (Hyperbel) eines Teilchens mit $v = c$ und der 'Photonmasse' E/c^2 berechnet¹⁷.

Später hat er die Rechnung in der AR wiederholt und den korrekten Wert

$$\delta = 2 \frac{r_S}{r} = 1.75'' = 8.5 \cdot 10^{-6} \quad (39)$$

gefunden.

Spektakulär sind die in jüngerer Zeit fotografierten Lichtablenkungen entfernter Galaxien an **Gravitationslinsen** in Form von Galaxienhaufen, siehe Abb. 16 und Abb. 17. Bei idealer Geometrie (Lichtquelle und Linse punktförmig, beide zusam-

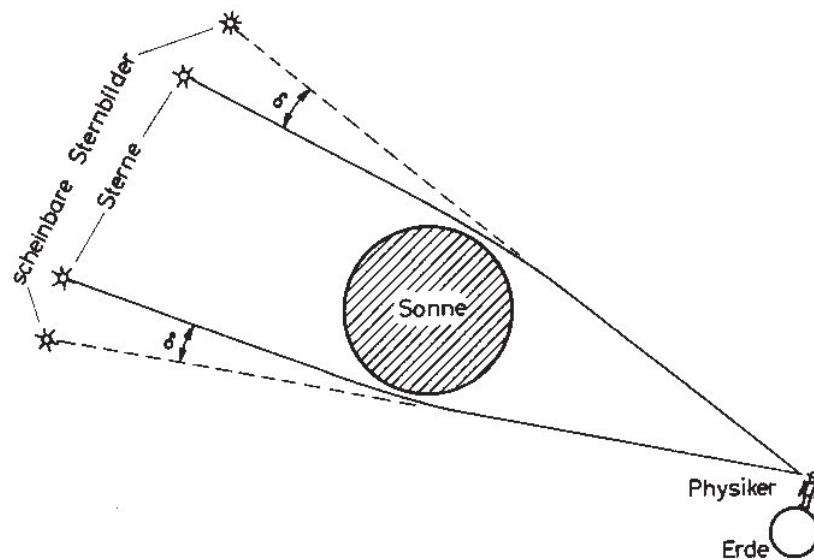


Abbildung 15: Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne [Sexl]

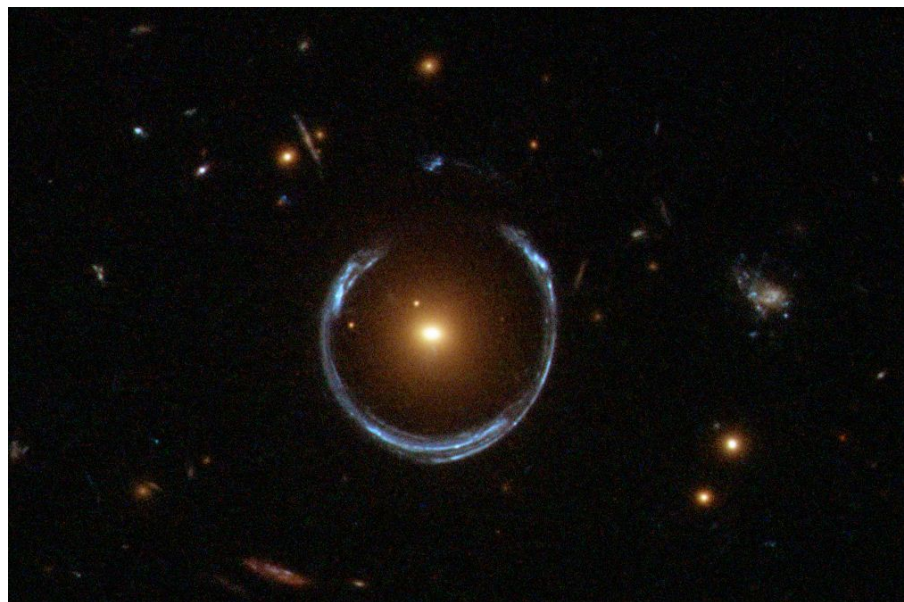


Abbildung 16: Gravitationslinseneffekt [HST]

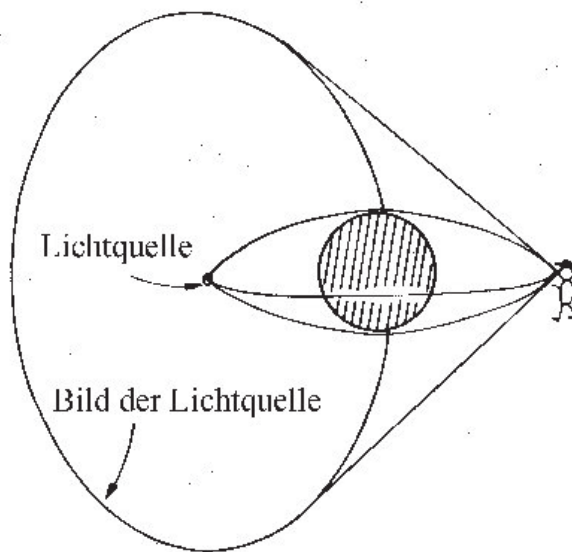


Abbildung 17: Prinzip der Entstehung eines Einstein-Rings [Sexl]

men mit Beobachter auf einer Linie) beobachtet man einen Einstein-Ring

6.2.2. Abweichungen vom Newtonschen Gravitationsgesetz

6.2.2.1. Periheldrehung des Merkur

In der klassischen Mechanik bewegen sich die Planeten, insbesondere Merkur, auf raumfesten Ellipsenbahnen um die Sonne (genauer: den gemeinsamen Schwerpunkt).

Die Relativitätstheorie sagt ein langsames Rotieren der großen Halbachse der Ellipse im Raum voraus, so dass eine rosettenförmige Bahn resultiert. Man spricht von der 'Periheldrehung', siehe Abb. 18.

Es gibt zwei Beiträge zu diesem Effekt (beide von gleicher Größenordnung):

- SR: In den Bewegungsgleichungen ist der γ -Faktor zu berücksichtigen (für die Merkur-Umlaufgeschwindigkeit $v = 47 \text{ km/s} \rightarrow \gamma - 1 = 1.3 \cdot 10^{-8}$).
- AR: Die Gravitations-Energiedichte in der Umgebung der Sonne modifiziert das Gravitationspotential.

Der Gesamteffekt wird in der Relativitätstheorie zu

$$\omega_{\text{Merkur}}^R = 43''/\text{Jahrhundert} \quad (40)$$

vorausgesagt, das ist sehr wenig!

¹⁷Der Winkel wurde schon 1801 von J.G. von Söldner berechnet, indem er Lichtkorpuskeln eine Masse zuwies.

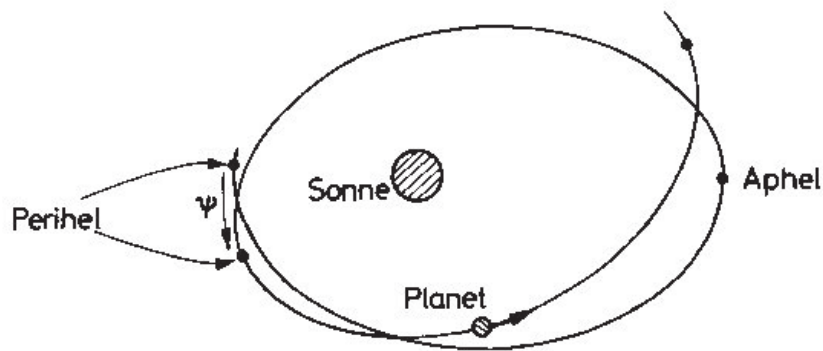


Abbildung 18: Periheldrehung einer Planetenbahn [Sexl]

Dazu kommen ‘bekannte’ Störungen durch die Präzessionsbewegung der Erdachse, durch die Abplattung der Sonne und durch die anderen Planeten, die man (in der klassischen Mechanik!) berechnen kann zu

$$\omega_{Merkur}^K = 5558''/\text{Jahrhundert} \quad (41)$$

Beobachtet wird:

$$\omega_{Merkur} = 5601''/\text{Jahrhundert} \quad (42)$$

in schöner Übereinstimmung mit der Summe der beiden berechneten Terme. Alle Zahlen sind mit einer Genauigkeit von besser als $1''/\text{Jahrhundert}$ bestimmt¹⁸.

6.2.3. Gravitationswellen

Ein schwingender elektrischer Dipol $p = d \cdot q$ aus zwei Ladungen q mit entgegengesetzten Vorzeichen im Abstand r strahlt elektromagnetische Wellen ab, mit der Leistung:

$$P \sim \frac{1}{\epsilon_0 c^3} \ddot{p}^2 \quad (43)$$

wobei ϵ_0 = die Dielektrizitätskonstante ist.

Aus Gravitationsladungen kann man entsprechende schwingende Dipolmomente nicht aufbauen, da es keine unterschiedlichen Vorzeichen gibt und eine einzelne hin- und herschwingende Masse (→ Dipolmoment!) den Impuls nicht erhalten würde.

¹⁸Die Diskrepanz $\omega^K - \omega$ war schon 1860 bekannt und wurde erst 1915 durch die AR aufgelöst! Bis dahin vermutete man einen weiteren inneren Planeten ‘Vulkan’ als Ursache. . .

Gravitationswellen können aber von schwingenden Quadrupolen¹⁹ mit Quadrupolmoment Q abgestrahlt werden, wie Einstein 1916 vorhersagte:

$$P \sim \frac{G_N}{c^5} \ddot{Q}^2 \quad (44)$$

Wegen der Kleinheit des Vorfaktors in (44) ist die Strahlungsleistung in irdischen und auch in vielen kosmischen Systemen gering, so dass bis 2015 ein direkter Nachweis nicht gelungen ist.

BEISPIEL: Gravitationswellenabstrahlung der Erde

Erde umkreist Sonne: $P \sim 200$ W.

Ein Doppelsternsystem aus zwei umeinander rotierenden Neutronensternen im Abstand von ca 10^6 km haben die Astronomen R.H. Taylor and J.H. Hulse²⁰ viele Jahre lang beobachtet. Aus der kontinuierlichen Abnahme der kinetischen Energie des Systems haben sie **indirekt** auf die abgestrahlten Gravitationswellen geschlossen; die so gemessene Strahlungsleistung stimmt mit der berechneten überein, siehe Abb. 19.

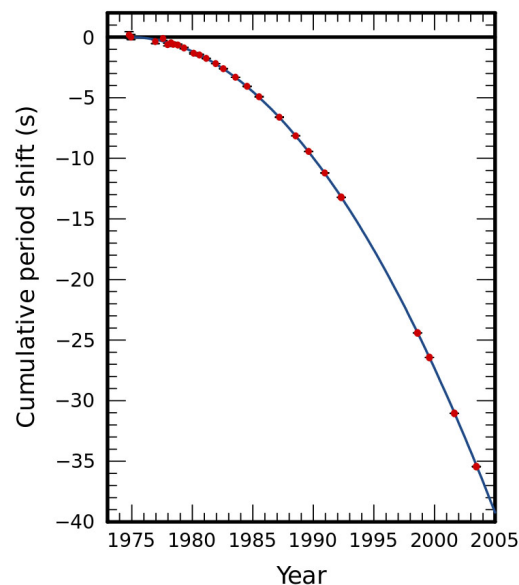


Abbildung 19: Zunahme der Umlaufperiode (genauer: Verfrühung des Periastrons) für das Doppel-Pulsarsystem PSR 1513+16 (Messung und Theorie) [Wikipedia]. Die Periode beträgt etwa 7.5 Stunden. Rote Punkte = Messungen. Blaue Linie = Vorhersage der allgemeinen Relativitätstheorie.

¹⁹Quadrupolmoment charakterisiert Massenverteilung, mathematisch ist das ein Tensor bzw. eine Matrix. Bei Abweichung von Kugelgestalt tritt ein Quadrupolmoment Q auf. Auch eine hantelförmige Massenverteilung besitzt ein Quadrupolmoment $Q \neq 0$!

²⁰erhielten zusammen 1993 den Nobelpreis für Physik

Derzeit suchen mehrere Gravitationswellendetektoren in Form von gigantischen Michelson-Interferometern auf der Erde nach direkten Signalen, u.a. GEO600 bei Hannover, siehe Abb. 20. Ankommende Quadrupolstrahlung verbiegt einen Kreisring nacheinander in die eine und die andere Richtung, siehe Abb. 21, und versetzt die Spiegel eines Interferometers relativ zueinander in Schwingungen, die sich durch das Interferenzmuster zu erkennen geben. Eine äußerst hohe Empfindlichkeit ist nötig, denn selbst ein Supernova-Ausbruch in unserer Milchstraße bewegt die Spiegel nur um $\Delta l/l \sim 10^{-18}$.

Anfang 2016 - 100 Jahre nach Einsteins Vorhersage - hat die LIGO-Kollaboration über ein in zwei Interferometern (Armlängen 4 km) gleichzeitig beobachtetes Gravitationswellensignal berichtet, das von zwei miteinander verschmelzenden schwarzen Löchern stammen könnte. Diese sind etwa 1 Milliarde Lichtjahre entfernt und haben innerhalb eines Sekundenbruchteils eine Energie von ungefähr $E = 3 m_{\text{Sonne}} c^2$ in Form von Gravitationswellen emittiert. Das zugrundeliegende Modell zeigt Abb. 22. Aufgetragen ist die relative Längenänderung der Interferometerarme, $\Delta l/l$ ('strain') als Funktion der Zeit. Der Physik-Nobelpreis des Jahres 2017 wurde für den Nachweis der Gravitationswellen vergeben und ging an Rainer Weiss und Barry C. Barish, den früheren Leiter und den Leiter des LIGO-Projektes 2015, und an den theoretischen Physiker Kip S. Thorne.



Abbildung 20: GEO600 Interferometer bei Hannover [GEO600]

Im Jahr 2017 wurde das Verschmelzen zweier Neutronensterne in einer Entfernung von ca. 100 Millionen Lichtjahren sowohl mit Gravitationswellen als auch im elektromagnetischen Spektrum quasi gleichzeitig detektiert (Ereignis GW170814). Daraus folgt, dass sich beide Wellenarten gleich schnell, also mit der Lichtgeschwindigkeit c ausbreiten.

Ein leistungsstarkes europäisches Interferometer zur Messung von Gravitationswellen wird derzeit geplant. Möglicherweise wird das als gleichseitiges Dreieck kon-

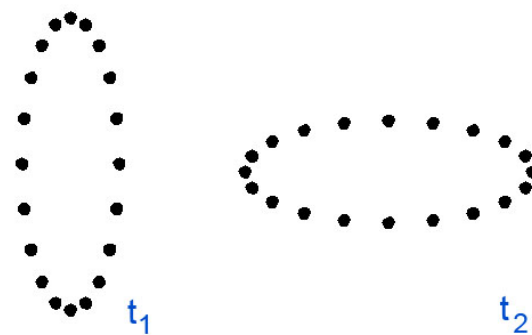


Abbildung 21: Gravitationswellen verformen einen Kreis [Wikipedia].

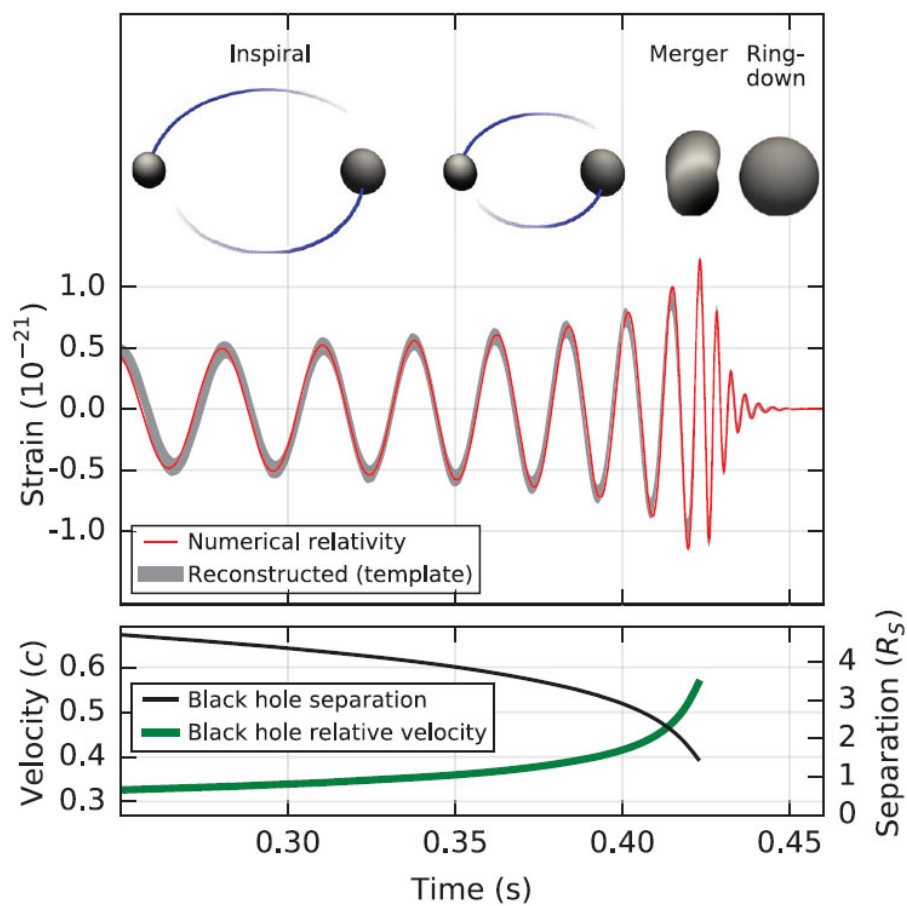


Abbildung 22: Möglicher Ursprung der mit LIGO gemessenen Gravitationswellen: zwei verschmelzende schwarze Löcher. [LIGO]

zipierte Einstein-Teleskop in der Aachener Umgebung unterirdisch aufgebaut werden.