

“QED – Materie, Licht und das Nichts”

1

Wissenschaftliches Gebiet und Thema:

Physikalische Eigenschaften von Licht

Titel/Jahr:

“QED – Materie, Licht und das Nichts” (2005)

Filmstudio:

Sciencemotion

Regisseur:

Stefan Heusler

Webseite des Films:

<http://www.sciencemotion.de/>

Beschreibung des Films:

Die DVD hat zwei Teile. Im künstlerischen Teil (30 Min.) besucht das Puppens Duo Nick & Prof. Schwerelos auf ebenso charmante wie eigenwillige Weise das Gedankengebäude, das Einstein & Co. uns hinterlassen haben. Die beiden etwas verschrobeneren Wissenschaftler experimentieren, entwickeln Modelle, simulieren am Computer und haben jede Menge Spaß dabei, ohne dass zwangsläufig jede Idee gut oder jede Aussage vollkommen wasserdicht wäre. In rasantem Tempo werden so Modellvorstellungen zum Thema *Licht* aus den verschiedenen Physikepochen spielerisch präsentiert. Den roten Faden spinnen dabei zwei Naturkonstanten: Die Lichtgeschwindigkeit c und das Planck'sche Wirkungsquantum h .



Der technische Teil der DVD (120 Min.) beschreibt in einer Kombination aus Bildern und Formeln einzelne Bausteine zur Entwicklung der modernen Theorie der Wechselwirkung von Licht mit Materie, der Quantenelektrodynamik (QED). Die Modelle und Experimente des künstlerischen Teils werden in ca. 30 einzelnen Sequenzen weiter vertieft. Für etwa die Hälfte der technischen Sequenzen reicht Schulmathematik aus.

Link zur Trailer Webseite

<http://www.sciencemotion.de/>

DVD kaufen:

Die DVD kann für EUR 20,00 zzgl. Versandkosten per E-Mail bestellt werden über <http://www.sciencemotion.de/>

Technischer Teil, Kapitel 1f

2

Titel der Szene:

Spezielle Relativitätstheorie

Videoclip oder Foto:

Kapitel 1f, Technischer Teil

Zeitintervall:

Autor:

Stefan Heusler, Annette Lorke

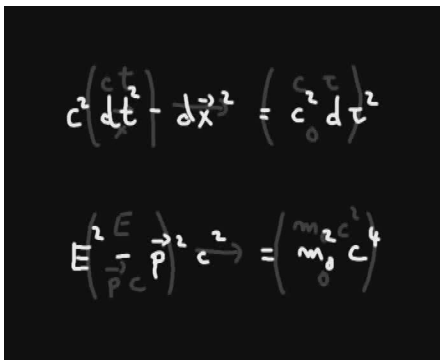
Editor:

Stefan Heusler

Wissenschaftliche Schlagwörter:

Raumzeit, Relativität, Zeitdilatation

Beschreibung der Szene:



$$c^2 dt^2 - d\vec{x}^2 = c^2 d\tau^2$$

$$E^2 - \vec{p}^2 c^2 = m_0^2 c^4$$

Was ist ein Abstand? Die Geometrie in einem flachen, dreidimensionalen Raum ist seit Euklid bekannt. Die Zeitkomponente wird in der euklidischen Geometrie allerdings völlig ignoriert.

Es war Einstein, der verstand, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum eine Naturkonstante ist. Diese Idee ermöglichte es ihm, eine Formel für Abstände in *Raumzeit* herzuleiten, bei der die Zeitkomponente mit berücksichtigt ist. Mit Hilfe der Raumzeit-Geometrie konnte er den Zusammenhang zwischen Ruhemasse und Energie beweisen.

In der Szene werden diese wichtigen Gleichungen der speziellen Relativitätstheorie erklärt.

Autor: Stefan Heusler, Annette Lorke
E-Mail: sciencemotion@web.de

3

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 1f, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Einfaches Niveau

Stell Dir vor, dass Du eine kleine Schwester hast, die genau zwei Jahre jünger ist als Du. Wenn Du 15 Jahre alt wärest, wäre sie 13 Jahre alt. Wenn Du 17 Jahre alt wärest, wäre sie 15. Obwohl sich das Alter von Dir und Deiner Schwester ständig ändert, bleibt Euer *Altersunterschied* immer derselbe. Der Altersunterschied ist *unabhängig* von der fortschreitenden Zeit. Das gilt übrigens nur dann, wenn sich weder Du noch Deine Schwester mit extrem hohen Geschwindigkeiten bewegen, aber dieses Detail ignorieren wir hier.

Es war ein großer wissenschaftlicher Fortschritt, als man Dinge in der Natur entdeckte, die sich mit fortschreitender Zeit *nicht ändern*. Diese Dinge sind die so genannten *Naturkonstanten*. Wenn Du Dein Körpergewicht jeden Tag misst, ändert es sich von Zeit zu Zeit. Offensichtlich ist das keine Naturkonstante. Dein Alter ändert sich von Jahr zu Jahr. Offensichtlich ist das keine Naturkonstante. Sogar der Altersunterschied zwischen Dir und Deiner Schwester ist keine Naturkonstante. Auf den ersten Blick scheint es, als könnte es eine sein, da sich der Altersunterschied nicht mehr ändert. Aber hinter Naturkonstanten verbirgt sich viel mehr, als auf den ersten Blick erkennbar ist. Was war der Altersunterschied zwischen Euch vor 1000 Jahren? Euren Altersunterschied gab es noch gar nicht, da ihr noch nicht geboren ward. Die Naturkonstanten existierten aber bereits. Sie haben sich bis heute seit mindestens 13 Milliarden Jahren nicht verändert.

Das Licht bewegt sich sehr schnell, im Vakuum etwa 300.000 Kilometer pro Sekunde. Das Licht im Vakuum kann man nicht überholen. Albert Einstein hat entdeckt, dass die Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum eine Naturkonstante ist. Da diese Geschwindigkeit unverändert bleibt, müssen Raum und Zeit relativ sein, das heißt, sie hängen vom Verhältnis zwischen Deiner Bewegungsgeschwindigkeit v und der Lichtgeschwindigkeit c , also v/c , ab. Da die Lichtgeschwindigkeit extrem groß ist, ist Deine Geschwindigkeit im Vergleich extrem klein. Im täglichen Leben kannst Du nicht spüren, dass Raum und Zeit relativ sind, da das Verhältnis v/c einfach viel zu klein (fast Null) ist, um eine Wirkung zu haben. Allerdings gibt es auch Ausnahmen: Das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit eines Satelliten und der Lichtgeschwindigkeit spielt eine wichtige Rolle, wenn man die Bewegung des Satelliten um die Erde beschreiben will. Man braucht Einsteins spezielle Relativitätstheorie, um die Bahn des Satelliten berechnen zu können.

Autor: Stefan Heusler, Annette Lorke
E-Mail: sciencemotion@web.de

4

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 1f, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Fortgeschrittenes Niveau

Wenn man im Auto das GPS-Navigationssystem einschaltet, wird die Position und Bewegung durch Satelliten verfolgt. Auf jedem Satelliten befindet sich eine hochpräzise Atomuhr, die in regelmäßigen zeitlichen Abständen Impulse für Radiosignale gibt, die von Kontrollstationen auf der Erde empfangen werden. Heutzutage kreisen 24 amerikanische Satelliten um die Erde (das entsprechende europäische Programm heißt „Galileo“, siehe hierzu http://de.wikipedia.org/wiki/Galileo_%28Satellitennavigation%29). Die Orbits der Satelliten sind so gewählt, dass von fast jedem Punkt auf der Erde Signale von mindestens vier Satelliten empfangen werden können. Ohne Kenntnis der Raumzeit-Geometrie, wie sie von Einstein eingeführt wurde (sowohl spezielle als auch allgemeine Relativitätstheorie), könnte dieses ursprünglich vom US-Militär entwickelte System nicht funktionieren.

Wenn angenommen würde, die Zeit sei absolut und der Raum sei flach (euklidische Geometrie), wäre die Position, die der Satellit berechnet, schlicht falsch. Der Fehler würde jeden Tag um ein paar Kilometer wachsen. Millionen von GPS-Nutzen hängen somit von der Kenntnis der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie ab.

Im Prinzip spielen zwei Effekte eine Rolle:

1. Zeitdilatation/Zeitdehnung:

Die Satelliten bewegen sich auf einer Höhe von 20.000 km über der Erdoberfläche mit einer Geschwindigkeit von $w = 4 \text{ km/s}$ (das entspricht 14.400 km pro Stunde, der Satellit umkreist somit zweimal täglich die Erde). Wenn auf dem Satelliten eine Sekunde verstrichen ist, dann ist auf der Erde mehr als eine Sekunde vergangen. Diese *Zeitdehnung* lässt sich mit der folgenden Formel berechnen:

$$\frac{1 \text{ s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1 \text{ s}}{\sqrt{1 - \left(\frac{4}{300000}\right)^2}} = 1 \text{ s} + 8,9 \cdot 10^{-11} \text{ s}$$

In der zusätzlichen Zeit, die aufgrund der Zeitdehnung verstreicht, bewegt sich die Radiowelle um die zusätzliche Distanz von 2,7 cm. Wenn wir die Zeitdilatation ignorieren würden, würde der Fehler in der Positionsbestimmung um 2,7 cm pro Sekunde zunehmen (etwa 2,3 Kilometer pro Tag). Bei dieser groben Abschätzung haben wir zur Vereinfachung nicht berücksichtigt, dass die Position von mindestens drei Satelliten bestimmt wird.

2. Gravitation:

Das Gravitationspotential ist 20.000 km über der Erdoberfläche deutlich schwächer als auf der Erdoberfläche. Nehmen wir einmal an, wir würden aus 20.000 km Höhe auf die Erdoberfläche fallen. Wie viel Energie aus dem Gravitationspotential würden wir dabei gewinnen? Newton hat das Gravitationspotential $V(R)$ bei einem Abstand R vom Erdmittelpunkt beschrieben durch:

$$V(R) = G \frac{M}{R}$$

G ist Newtons Gravitationskonstante und M die Masse der Erde.

Auch die Radiowellen, die vom Satelliten emittiert werden gewinnen Energie im Gravitationspotential der Erde. Sei $r \approx 6400$ km der durchschnittliche Radius der Erde und $s \approx 20.000$ km der Abstand zwischen dem Satelliten und der Erdoberfläche. Dann ist $r + s \approx 26.400$ der durchschnittliche Abstand des Satelliten zum Erdmittelpunkt. Durch Kombination der Beziehung zwischen Frequenz und Energie des Photons $E = h \cdot \nu$ (h ist das Plancksche Wirkungsquantum) mit der Beziehung zwischen Masse und Energie $E = m \cdot c^2$ erhalten wir die Frequenzvergrößerung des Photons, das zur Erdoberfläche fliegt, durch:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{V(r+s) - V(r)}{c^2}$$

Die Masse der Erde beträgt ungefähr $6 \cdot 10^{24}$ kg. Newtons Gravitationskonstante G ist experimentell bestimmt worden als $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$. Mit diesen Zahlenwerten erhalten wir für die Frequenzvergrößerung $\Delta \nu$ durch das Gravitationspotential:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \nu}{\nu} = 5 \cdot 10^{-10}$$

Für nichtmilitärische Zwecke senden die Satelliten Radiowellen mit der Frequenz $1,575 \text{ GHz}$ ($1,575 \cdot 10^9$ Schwingungen pro Sekunde). Durch das Gravitationspotential vergrößert sich diese Frequenz um $0,79 \text{ Hz}$, wenn die Radiowelle auf der Erde empfangen wird.

Die gesamte Frequenzverschiebung ergibt sich aus der Summe der Effekte von Zeitdehnung und Gravitation ($w = 4 \text{ km/s}$ ist die Geschwindigkeit des Satelliten):

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{V(r+s) - V(r)}{c^2} + \left(\sqrt{1 - \left(\frac{w}{c}\right)^2} - 1 \right) =$$

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{1}{c^2} \left(\frac{w}{c} \right)^2 + o \left[\left(\frac{w}{c} \right)^4 \right] = 5 \cdot 10^{-10} - 0,9 \cdot 10^{-10} = 4,1 \cdot 10^{-10}$$

Die Radiowellen gewinnen Energie im Gravitationspotential. Daher vergrößert sich ihre Frequenz. Der Effekt aus dem Gravitationspotential wird durch die Zeitdehnung ein wenig kompensiert. Durch die Zeitdehnung wird die Frequenz, die auf der Erde empfangen wird, kleiner. Insgesamt wird die Frequenz der Radiowelle, die mit $1,575 \text{ GHz}$ vom Satelliten gesendet wird, um $0,65 \text{ Hz}$ größer, wenn sie auf der Erde gemessen wird.

Internetseite über Spezielle Relativitätstheorie:

http://de.wikipedia.org/wiki/Spezielle_Relativit%C3%A4tstheorie

Relativität und GPS: http://de.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System

Der Artikel von Neil Ashby über GPS und Relativität ist ebenfalls empfehlenswert:

<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2003-1/>

Autor: Stefan Heusler, Annette Lorke
E-Mail: sciencemotion@web.de

6

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 1f, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Weiterführende Informationen

Die spezielle Relativitätstheorie ist ein Paradebeispiel für die Hartnäckigkeit von Vorurteilen in der Wissenschaftsgeschichte. Einstein musste zwei Paradigmen – oder besser Vorurteile – ignorieren, um die spezielle Relativitätstheorie zu entdecken:

- A. Das erste Vorurteil: Die Zeit ist absolut
 B. Das zweite Vorurteil: Elektromagnetische Wellen können sich unmöglich durch das Vakuum fortbewegen. Sie brauchen dazu ein Medium, den so genannten Äther.

A. Schon 5 Jahre vor Einstein hat der holländische Physiker Lorentz die korrekten Transformationsgleichungen zwischen zwei Koordinatensystemen, die sich relativ zueinander mit der Geschwindigkeit v bewegen, formuliert (sie so genannten Lorentz-Transformationen). Allerdings wäre ihm nicht einmal im Traum eingefallen, dass Zeit relativ ist, und daher konnte er seine Gleichungen nicht richtig interpretieren.

B. Elektromagnetismus wurde im 19. Jahrhundert unter dem Paradigma erforscht, dass der Äther existiert. Ähnlich wie Schall- und Wasserwellen wurde angenommen, dass sich auch elektromagnetische Wellen nur durch einen materiellen Stoff fortbewegen könnten.

Einstein ignorierte diese beiden Vorurteile, als er über Licht nachdachte. Er behauptete, dass Zeit relativ sei und sich das Licht auch durch das Vakuum fortbewegen könne. Darüber hinaus erklärte er, dass Lichtwellen im Vakuum immer dieselbe Geschwindigkeit haben.

In zwei Koordinatensystemen, die sich relativ zueinander in x -Richtung mit der Geschwindigkeit v bewegen, erreicht das Licht, das zur Zeit $t = t' = 0$ am Punkt $x = x' = 0$ startet, die Position x (x') nach einer Zeit t (t'):

$x^2 - c^2 t^2 = x'^2 - c^2 t'^2$ Da c konstant ist, finden wir als Lösung für die Transformation zwischen dem Koordinatensystem (c^*t, x) und (c^*t', x') die Lorentztransformationen:

$$x' = \frac{x + vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad t' = \frac{t + \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

In differentieller Form folgt aus diesen Gleichungen leicht die relativistische Addition von zwei Geschwindigkeiten:

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx + v dt}{dt + \frac{v}{c^2} dx} = \frac{\frac{dx}{dt} + v}{1 + \frac{v}{c^2} \frac{dx}{dt}}$$

Hierbei ist $w' = dx'/dt'$ die Geschwindigkeit, die im gestrichenen Koordinatensystem beobachtet wird, und $w = dx/dt$ die Geschwindigkeit im ungestrichenen Koordinatensystem. Diese Gleichung zeigt, dass c die Maximalgeschwindigkeit ist. Wenn wir für w die Lichtgeschwindigkeit wählen, $w = c$, finden wir für die Geschwindigkeit im gestrichenen Koordinatensystem, das sich relativ zum ungestrichenen mit v bewegt, die Geschwindigkeit w' als:

$$w' = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c$$

Wegen $w = w' = c$ folgt aus der Lorentztransformation, dass die Lichtgeschwindigkeit in beiden Bezugssystemen dieselbe ist, unabhängig von der Relativgeschwindigkeit v .