

“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 Puppentheater Nick & Prof. Schwerelos auf ebenso charmante wie eigenwillige Weise das Gedankengebäude, das Einstein & Co. uns hinterlassen haben. Die beiden etwas verschrobene 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 2b

2

Titel der Szene:

Schwarzkörperstrahlung

Videoclip oder Foto:

Kapitel 2b, Technischer Teil

Zeitintervall:

Autor:

Stefan Heusler, Annette Lorke

Editor:

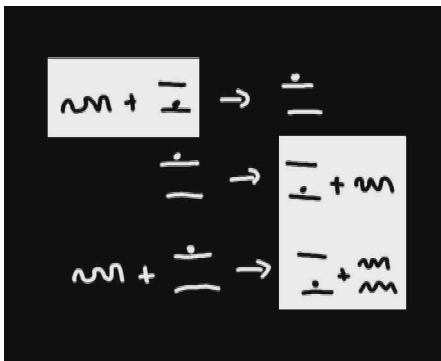
Stefan Heusler

Wissenschaftliche Schlagwörter:

Schwarzkörperstrahlung, Photonen, Quantisierung von Strahlung, Planck'sches Wirkungsquantum

Beschreibung der Szene:

Wir leiten die Formel für Schwarzkörperstrahlung auf der Grundlage her, dass Licht in Energieportionen (Photonen) quantisiert ist und Elektronen im Atom ihre Energie in Stufen ändern. Wenn die Energiedifferenz zwischen zwei Energiestufen eines Elektrons mit der Photonenenergie übereinstimmt, können zwei verschiedene Prozesse stattfinden. In der ersten Reaktion absorbiert das Elektron ein Photon und springt auf ein höheres oder angeregtes Energieniveau. In der zweiten Reaktion emittiert das Elektron ein Photon und fällt auf ein niedrigeres Energieniveau.



Es ist wichtig zu wissen, dass die Emission eines Photons entweder „spontan“ oder „stimuliert“ sein kann. Diese Unterscheidung wurde zuerst von Einstein gemacht. Sie gab den Hinweis auf eine mögliche Herleitung der Formel für die Schwarzkörperstrahlung.

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

3

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 2b, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Einfaches Niveau

Licht besteht aus sehr vielen kleinen Energieportionen, den so genannten Photonen. Die Photonen variieren in ihrer Energie. Zum Beispiel haben die Photonen im blauen Licht mehr Energie als im roten Licht. Diese Energieportionen werden von den Elektronen im Atom absorbiert und emittiert. Ein Atom besteht aus einem positiv geladenen, sehr kleinen Atomkern und einer großen Wolke von negativ geladenen Elektronen um den Atomkern herum. Wenn ein Elektron ein Photon absorbiert, gewinnt es an Energie. Wenn es ein Photon emittiert, verliert es an Energie. Wir visualisieren diesen Prozess mit einer großen Treppe, auf der das Elektron hinauf- und hinabhüpfen kann. Die Sprunghöhe hängt von der Energie des Photons ab. Nur wenn die Energie des Photons mit der Energiedifferenz zwischen zwei Stufenhöhen übereinstimmt, kann das Elektron sich auf der Energietreppe bewegen.

In jedem Atom sind die Stufenhöhen der Energietreppe unterschiedlich. Darum können die Atome nur sehr spezifische Photonen absorbieren und emittieren, je nach den Höhenunterschieden auf der Energietreppe. Darum hat zum Beispiel Kochsalz (NaCl) eine sehr spezifische Farbe, wenn Du es verbrennst. Die spezifischen Farben charakterisieren ein Atom und entstehen, weil Photonen einer spezifischen Energie emittiert werden.

Ein *Schwarzer Körper* ist ein Objekt, das alle Arten von Photonenenergie absorbieren und emittieren kann und daher aus vielen verschiedenen Atomen besteht, die alle möglichen Stufenhöhen auf verschiedenen Energietreppen aufweisen. Die *Schwarzkörperstrahlung* heißt die Mischung aus verschiedenen Photonen, die von dem Schwarzen Körper in Abhängigkeit seiner Temperatur ständig absorbiert bzw. emittiert werden.

Die Schwarzkörperstrahlung ist eine gute Näherung für die Strahlung, die von Materialien, die aus mehreren verschiedenen Atomen bestehen, emittiert wird. Daher benötigen Wissenschaftler keine Detailkenntnisse über ein solches Objekt, um die Beschaffenheit seiner Strahlung zu beschreiben. Dafür braucht man nur seine Temperatur zu kennen. Zum Beispiel kann die Strahlung, die von der Sonnenoberfläche ausgeht, gut als Schwarzkörperstrahlung beschrieben werden. Beim heißen Kaffee in der Tasse benötigt man keine Angaben über dessen Inhaltsstoffe, um Aussagen über seine Strahlung zu machen. Der einzige Unterschied zwischen der Strahlung von der Sonnenoberfläche und vom Kaffee ist die Temperatur. Die Sonnenoberfläche hat eine Temperatur von etwa 5000 °C und emittiert daher Photonen im sichtbaren Bereich. Der heiße Kaffee hat eine Temperatur von etwa 50 °C und emittiert daher Strahlung im unsichtbaren Infrarotbereich (Wärmestrahlung).

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

4

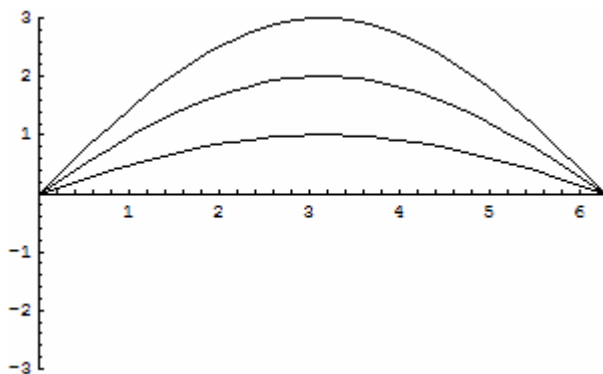
Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 2b, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Fortgeschrittenes Niveau

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war die Schwarzkörperstrahlung ein wichtiges Thema in der Physik. Das große Problem bestand darin, dass die klassische Theorie des Lichts bzw. der elektromagnetischen Strahlung nicht mit den experimentellen Resultaten übereinstimmte. Max Planck und Albert Einstein fanden eine Lösung des Problems, die zu einem Eckpfeiler in der Entwicklung der Quantenmechanik wurde.

Der Einfachheit halber benutzen wir als Modell für den Schwarzen Körper ein eindimensionales Objekt der Länge $L = 2\pi \approx 6,28$. In der klassischen Physik wird Licht als kontinuierliche elektromagnetische Welle aufgefasst. Wir betrachten elektromagnetische Wellen, die an den Rändern $x = 0$, $x = L$ unseres Schwarzen Körpers verschwinden. Wir beschreiben das elektrische Feld $E[x]$ als

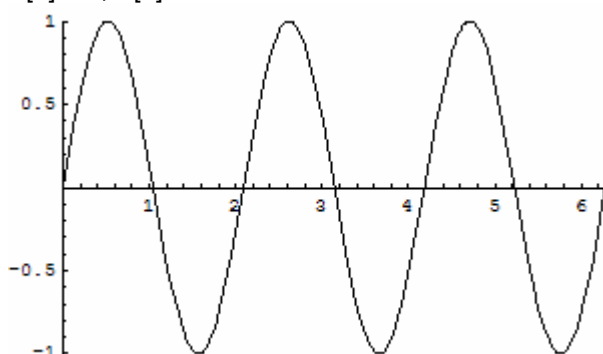
$$E[x] = E_0 \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} x\right]$$



In der Abbildung zeigen wir das elektrische Feld mit der Wellenlänge λ , die doppelt so groß wie der Schwarze Körper ist, $\lambda = 2 \cdot L$. Dies ist die größtmögliche Wellenlänge, die die Randbedingungen $E[0] = 0$, $E[L] = 0$ erfüllt. Die Abbildung stellt die Amplitude mit drei verschiedenen Werten dar, $E_0 = 1, 2, 3$. Im klassischen Elektromagnetismus hängt die Energie des Feldes sowohl von

der Wellenlänge λ als auch von der Amplitude E_0 ab. Je größer die Amplitude E_0 , desto größer ist die Energie, die in dem elektrischen Feld enthalten ist. Für $E_0 = 0$ gibt es überhaupt keine Welle. Die Energie ist daher gleich null. Entscheidend ist nun, dass im klassischen Elektromagnetismus *jeder* Wert für E_0 möglich ist. Das erweist sich in der Quantenmechanik als falsch, da die Energie quantisiert ist. E_0 kann sich nur in Stufen ändern.

Es gibt mehr Lösungen für das elektrische Feld $E[x]$, die die Randbedingungen $E[0] = 0$, $E[L] = 0$ erfüllen.



In diesem Bild zeigen wir eine Welle, bei der genau 3 Wellenlängen ($\lambda = 1/3 \cdot L$) in den schwarzen Körper hineinpasse. Das elektrische Feld wird in diesem Fall beschrieben durch:

$$E_6[x] = E_0^6 \sin[3x]$$

Auf der rechten Seite der Gleichung bezeichnen wir mit E_0^n die Amplitude der Welle mit der Wellenlänge $\lambda = 1/3 \cdot L = 2/6 \cdot L$. Im Bild haben wir das Beispiel $E_0^6 = 1$ gewählt. Je kürzer die Wellenlänge, desto größer ist die Energie des elektrischen Feldes. Im Allgemeinen können wir schreiben:

$$E_n[x] = E_0^n \sin\left[\frac{n}{2} x\right], \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Aufgrund der Definition des Schwarzen Körpers können *alle* Wellenlängen, die die Randbedingungen $E[0] = 0$, $E[L] = 0$ erfüllen, im Schwarzen Körper angeregt werden ($\lambda = 2L/n$, $n = 1, 2, 3, \dots$).

Wenn wir die Energie des elektrischen Feldes aller dieser Wellenlängen addieren, erhalten wir einen divergierenden Ausdruck, da immer kleinere Wellenlängen immer mehr Energie enthalten. Dies ist die so genannte Ultraviolett-Katastrophe, da ein divergierender Ausdruck nichts mit dem gemessenen Strahlungsspektrum zu tun hat.

Um dieses Problem zu lösen, haben einige Wissenschaftler argumentiert, dass die Amplituden E_0^n der Strahlung mit sehr hoher Energie ($n \gg 1$) klein sein sollten. In der klassischen Thermodynamik wird dies durch den so genannten Boltzmann-Faktor beschrieben. Diese Annahme ist für sehr hohe Energie korrekt ($n \rightarrow \infty$). Allerdings reicht dieses Argument der klassischen Physik nicht aus, um die richtige Formel für endliches n ($1 < n < \infty$) herzuleiten.

Es war Max Planck, der schließlich die richtige Formel fand. Er musste für die Herleitung eine neue Konstante einführen, das *Planck'sche Wirkungsquantum*: $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Die Einheit dieser Konstante ist „Energie mal Zeit“.

Es war Albert Einstein, der dann die richtige *Interpretation* zu Max Plancks Ergebnis fand: Die Lichtenergie (ganz allgemein, jegliche Strahlung) besteht aus einzelnen Portionen, sie ist quantisiert. Zum Beispiel besteht rotes Licht aus sehr vielen einzelnen Photonen der Energie $E = h \cdot \nu$. Die Frequenz von rotem Licht beträgt etwa $4,3 \cdot 10^{14}$ Oszillationen pro Sekunde. Die Energie, die ein solches Lichtquantum enthält, ist:

$$E_{\text{Rot}} = h \nu_{\text{Rot}} = (6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}) \left(4,3 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}\right) = 2,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Im Gegensatz zur klassischen Theorie kann die Amplitude E_0^n für die rote Lichtwelle in der Quantenfeldtheorie nicht kontinuierlich verändert werden, sondern nur in Portionen. Die kleinstmögliche Energieportion, um die das Lichtfeld verändert werden kann, entspricht der Energie E_{Rot} des einzelnen Photons.

Internetseiten über die Schwarzkörperstrahlung und Max Planck

http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_Körper

http://de.wikipedia.org/wiki/Max_Planck

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

6

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 2b, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Weiterführende Informationen

Max Planck hat die richtige Formel für die Schwarzkörperstrahlung hergeleitet, obwohl er das Licht als eine klassische elektromagnetische Welle betrachtet hatte. Die Strahlungsenergie ist proportional zur Frequenz und dem Quadrat der Amplitude. Da die Amplitude jeden beliebigen Wert annehmen kann, kann die klassische Strahlungsenergie kontinuierlich verändert werden. Max Planck konnte die korrekte Formel aus einer *Entropiebetrachtung* der Strahlung herleiten. Bei der Herleitung musste Planck allerdings eine neue Konstante einführen. Durch Vergleich mit dem experimentell bestimmten Spektrum der Schwarzkörperstrahlung fand er für diese Konstante den Wert $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J*s}$, das so genannte Planck'sche Wirkungsquantum.

Diese Entdeckung markiert die Geburtsstunde der Quantenmechanik. Max Planck war sich der Bedeutung seiner Entdeckung bewusst, auch wenn er die Folgen noch nicht absehen konnte. Das Planck'sche Wirkungsquantum gibt ein Maß für die Energieskala, ab der die diskontinuierliche Struktur von Materie und Strahlung sichtbar werden muss. Jegliche Strahlung ist gemäß $E = h \cdot \nu$ quantisiert.

Für jegliche Form von Materie können der Ort x und der Impuls p nicht gleichzeitig bestimmt werden. Stattdessen sind Ort x und Impuls p Operatoren des Kommutators:

$$[x, p] = xp - px = i \frac{h}{2\pi}$$

Die weiteren Entwicklungen zur Quantenmechanik nach Plancks Formelherleitung der Schwarzkörperstrahlung waren zunächst Einsteins Entdeckung der Quantisierung von Strahlung und danach das Postulat des Kommutators von Ort und Impuls für Materie, der die Atomphysik revolutionierte. Durch die Kombination der Kommutatorrelation mit der klassischen Mechanik von Newton kann das quantisierte Energiespektrum im Atom erfolgreich beschrieben werden.