

“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 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 2a

2

Titel der Szene:

Der photoelektrische Effekt

Videoclip oder Foto:

Kapitel 2a, Technischer Teil

Zeitintervall:

Autor:

Stefan Heusler, Annette Lorke

Editor:

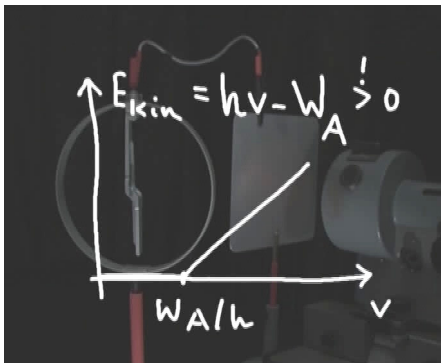
Stefan Heusler

Wissenschaftliche Schlagwörter:

Photoelektrischer Effekt, Quantisierung von Strahlung, Photonen

Beschreibung der Szene:

Wir zeigen unser Modell von Fröschen im Gefängnishof. Jedem Frosch entspricht ein Elektron in der Metallplatte. Wenn der Frosch entkommen will, muss er mit einem einzigen Sprung über die Mauer hüpfen. Wenn die Sprunghöhe der einzelnen Sprünge nicht groß genug ist, wird der Frosch niemals entkommen, auch wenn er tausend Mal springt. Die Sprunghöhe des Frosches entspricht der Photonenergie, die das Elektron absorbiert.



Anschließend wird der Photoeffekt experimentell demonstriert. Eine Metallplatte wird mit Elektronen geladen. Die Elektronen können nur dann von der Metallplatte entkommen, wenn sie ultraviolette Strahlung absorbieren. Weder blaue noch rote Strahlung kann die Elektronen aus der der Metallplatte herauslösen, auch wenn die Lichtintensität erhöht wird. Einstein hat als erster dieses Experiment richtig interpretiert: Jegliche Strahlung (sichtbares Licht, infrarot, ultraviolett, etc.) ist quantisiert, das heißt, dass sie aus einzelnen, kleinen

Energieportionen besteht. Diese Energieportionen nennt man Photonen. Nur wenn die Energie des einzelnen Photons groß genug ist, kann das Elektron aus der Metallplatte herausgelöst werden.

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

3

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

Einfaches Niveau

Stell Dir einen Frosch in einem Gefängnishof vor oder irgendein anderes Tier oder eine Person, die versucht, über die Gefängnismauer zu springen. Du kannst es auch selbst probieren. Du kommst über die Mauer nur dann, wenn Du hoch genug springst. Wenn Du nicht hoch genug springst, ist es egal, wie oft Du es probierst, Du wirst niemals über die Mauer kommen.

Albert Einstein hat für diese einfache Erklärung den Nobelpreis bekommen. Er hat verstanden, was passiert, wenn Licht auf eine Metallplatte leuchtet. In der Metallplatte sind viele Elektronen. Elektronen sind die negativ geladenen Träger des elektrischen Stroms, die sich im Metall frei bewegen können. Aber sie können nicht aus dem Metall in die Luft entkommen. Wenn Licht auf das Metall leuchtet, wird es von den Elektronen absorbiert. Das war schon vor Einsteins Erklärung bekannt. Elektronen absorbieren und emittieren ständig Strahlung. Licht kann man nur deswegen sehen, weil es ständig von Elektronen absorbiert und emittiert wird. Einsteins Entdeckung besteht darin, dass diese Absorption und Emission in einzelnen *Sprüngen* passiert. Das bedeutet, dass Licht aus einzelnen Energieportionen besteht, den so genannten *Photonen*, die einzeln mit den Elektronen reagieren. Das ist so ähnlich wie mit Regen, der auf ein Dach prasselt. Viele Regentropfen zusammen ergeben ein gleichmäßiges, kontinuierliches Geräusch. Aber nur unter dem ersten Eindruck hört man ein gleichmäßiges Geräusch. Nach einer Weile wird deutlich, dass in Wirklichkeit viele kleine Regentropfen jeweils einzelne, diskrete Klänge erzeugen.

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

4

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

Fortgeschrittenes Niveau

Die zentrale Idee, die zu der richtigen Interpretation des photoelektrischen Effektes geführt hat, ist die Beschreibung der Wechselwirkung von Licht mit Elektronen als einzelne elementare Reaktionen: Ein Elektron absorbiert ein Photon. Strahlung und Materie werden somit beide auf ähnliche Weise beschrieben, denn beide haben sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften.

Alle Elektronen haben dieselbe elektrische Ladung und die Ruhemasse $m_0 \neq 0$. Elektrischer Strom besteht aus vielen einzelnen Elektronen, die sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegen. Im Jahre 1905 hat Albert Einstein entdeckt, dass ein Lichtstrahl ähnlich beschrieben werden kann: Er besteht aus vielen einzelnen Photonen der Energie $E = h \cdot \nu$. Allerdings haben Photonen keine Ruhemasse ($m_0 = 0$) und bewegen sich daher im Vakuum immer mit derselben Geschwindigkeit, $c \approx 300.000 \text{ km/s}$. Aus der klassischen Elektrodynamik ist bekannt, dass ein Lichtstrahl mit der Energie E den Impuls $p = E/c$ hat. Kombiniert man beide Gleichungen erhalten wir:

$$E = p c = p \lambda \nu = h \nu$$

Wir können also einen Zusammenhang zwischen der Wellenlänge des Photons und seinem Impuls p_{phot} herleiten:

$$p_{\text{phot}} = \frac{h}{\lambda}$$

Lichtstrahlen zeigen Interferenzeffekte. Im Jahr 1923 nahm de Broglie an, dass jedem Objekt, das einen Impuls p hat, eine Wellenlänge $\lambda = h/p$ zugeordnet werden kann. Ein Elektron mit dem Impuls p hat dann ebenfalls eine Wellenlänge, und zwar:

$$\lambda = \frac{h}{p_{\text{elec}}} = \frac{h}{m v}$$

Die Wellenlänge von Leitungselektronen in Metallen bei Raumtemperatur ist etwa $\lambda \approx 10^{-10} \text{ m}$. De Broglie postulierte also, dass auch Elektronen Interferenzeffekte zeigen.

Bei Einstein und de Broglie waren nicht überragende mathematische Fähigkeiten entscheidend für die großen Entdeckungen, sondern der Mut, physikalische Phänomene aus ungewohnter Perspektive zu betrachten. Interferenzeffekte bei Elektronen wurden nach de Broglies Vorhersage experimentell nachgewiesen. De Broglie bekam für diese Entdeckung den Nobelpreis für Physik im Jahre 1929.

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

5

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

Weiterführende Informationen

Der photoelektrische Effekt wurde von Heinrich Hertz im Jahre 1886 erstmals experimentell beobachtet. Die richtige Interpretation des Experiments gelang Albert Einstein erst im Jahr 1905. Es dauerte einige Zeit, bis das Paradigma, dass Licht eine kontinuierliche Welle sei, über Bord geworfen wurde. Das liegt vielleicht auch daran, dass alle anderen experimentellen Ergebnisse gut mit dem Wellenbild beschrieben werden können.

Das Elektron wurde von Thompson im Jahre 1897 entdeckt. Für Thompson war das Elektron ein massives, geladenes Elementarteilchen. Ironie des Schicksals, beim Elektron dauerte es einige Zeit, bis das Paradigma, dass Elektronen einfach nur punktförmige Teilchen sind, über Bord geworfen wurde. De Broglie hat erst 1923 die Welleneigenschaften des Elektrons entdeckt.

Einstein und de Broglie haben beide keine neuen Gleichungen erfinden müssen, um zu ihren Resultaten zu gelangen, sondern alte Gleichungen neu interpretiert. Schon Max Planck hat die Beziehung zwischen Energie und Frequenz zur Herleitung seiner Formel für die Schwarzkörperstrahlung verwendet:

$$E = h \nu$$

1905 dann interpretierte Einstein diese Gleichung richtig durch seine Idee der Quantisierung von Strahlungsenergie. Mit der Quantisierung von Licht, stellte sich die Frage, welchen Impuls p ein einzelnes Photon trägt. Schon aus Maxwells Theorie des klassischen Elektromagnetismus ist die Beziehung $E = p c$ bekannt. In Kombination mit der Gleichung $E = h \nu$ ergibt sich:

$$E = p c = p \lambda \nu = h \nu$$

Daraus folgt die Beziehung:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

De Broglie postulierte, dass diese Gleichung nicht nur für Photonen gelte, sondern ganz allgemein. Jeder Gegenstand, der einen Impuls hat, besitzt Welleneigenschaften. Sogar ein Fußball hat eine Wellenlänge. Wieso sehen wir keine Interferenzeffekte bei einem makroskopischen Fußball? Die De-Broglie Wellenlänge des Fußballs ist sehr viel kleiner als der Radius des Fußball. Aufgrund von Dekohärenz verschwinden in der makroskopischen Welt die Interferenzeffekte. In letzter Zeit sind Doppelspaltexperimente mit sehr großen Molekülen möglich geworden. Hierbei muss die Dekohärenz, die durch störende Wechselwirkung des Quantensystems mit der Umgebung entsteht, mit viel Aufwand unterdrückt werden. Die Welleneigenschaften von Materie können so für immer größere Objekte nachgewiesen werden.

(<http://www.quantum.univie.ac.at/research/matterwave/c60/index.html>)

Internetseiten über Photoelektrischen Effekt und De Broglie Wellenlänge:

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

http://en.wikipedia.org/wiki/De_Broglie_wavelength (nur Englisch)