

“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 4a

2

Titel der Szene:

Das Atom und das Sonnensystem

Videoclip oder Foto:

Kapitel 4a, Technischer Teil

Zeitintervall:

Autor:

Stefan Heusler, Annette Lorke

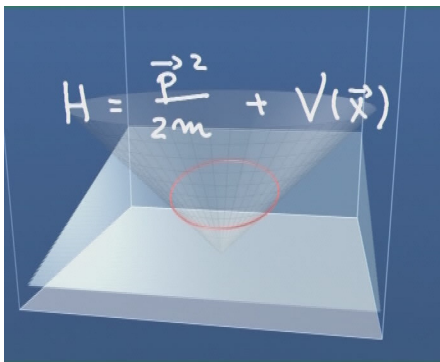
Editor:

Stefan Heusler

Wissenschaftliche Schlagwörter:

Sonnensystem, Atommodell, Kepler und Newton, Ellipsen

Beschreibung der Szene:



Wir zeigen, dass eine Ellipse als Schnitt durch einen Kegel mit einer Ebene entsteht. Die Lösung für Newtons Bewegungsgleichungen für die Erde, die um die Sonne rotiert, ist eine Ellipse. Die Gravitationskraft zwischen Erde und Sonne hängt nur von ihrem Abstand r zueinander ab und ist proportional zu $1/r^2$. In klassischer Physik hat Newtons Gravitationsgesetz eine auffallende Ähnlichkeit zum Coulomb'schen Kraftgesetz, das für die Elektrizitätslehre entwickelt wurde: Zwei elektrisch geladene Teilchen erfahren

ebenfalls eine Kraft, die von ihrem Abstand zueinander abhängt und proportional zu $1/r^2$ ist. Für ein Atom, das aus einem positiv geladenen Atomkern und negativ geladenen Elektronen besteht, liefern Newtons klassische Bewegungsgleichungen die gleiche Lösung wie im Fall der Gravitationskraft. Aus Sicht der klassischen Physik würde das Atom einem „Sonnensystem“ gleichen, bei dem der Atomkern die Rolle der Sonne und die Elektronen die Rolle der Planeten übernehmen.

Im Gegensatz zum Sonnensystem funktioniert Newtons klassische Theorie für das Atom nicht. Die Energie des Elektrons im Atom kann sich nur in Stufen und nicht kontinuierlich ändern. Die portionierte Änderung der Elektronenenergie entspricht der quantisierten Energie von Photonen. Daher musste eine neue Theorie entwickelt werden, die Quantenmechanik heißt.

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

3

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 4a, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Einfaches Niveau

Astronomie ist die älteste Wissenschaft. Vor über 350 Jahren fand Johannes Kepler einfache Gesetze, die die Bewegung der Planeten um die Sonne beschreiben. Das wichtigste Kepler'sche Gesetz besagt:

Die Planeten bewegen sich um die Sonne auf Ellipsenbahnen. In einem Brennpunkt der Ellipse befindet sich die Sonne.

Wenn Du nicht weißt, was eine Ellipse ist, dann nimm eine Taschenlampe und beleuchte damit in einem dunklen Raum die Wand. Das Licht, das Du auf der Wand siehst, hat eine ovale Form. Der Rand des Ovals ist eine Ellipse.

Noch viel wichtiger als die Tatsache, dass die Planeten auf Ellipsen um die Sonne kreisen, ist die Aussage, dass die Planeten überhaupt um die Sonne kreisen. Zu Keplers Zeiten waren die meisten Menschen noch nicht der Auffassung, dass die Sonne der Mittelpunkt unseres Sonnensystems ist.

Isaac Newton hatte eine der wirklich großen Entdeckungen der Wissenschaftsgeschichte gemacht, indem er die Bewegung der Erde um die Sonne *berechnete*. Durch diese Rechnung zeigte er, dass mathematische Gleichungen und Beobachtungen in der Natur sehr viel miteinander zu tun haben. Durch Newtons Erfolg entwickelt sich die Naturwissenschaft rapide weiter. Seit dieser Zeit sind viele weitere Zusammenhänge zwischen mathematischen Formeln und Beobachtungen in der Natur entdeckt worden.

Mathematische Formeln sind die *Sprache*, in der die Gesetze der Natur beschrieben werden können. Zum Beispiel hat Newton entdeckt, dass die Kraft zwischen Erde und Sonne umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstands ist. Durch diese Entdeckung konnte er die Bewegung der Erde um die Sonne berechnen. Das Ergebnis seiner Berechnung waren Ellipsenbahnen für alle Planeten.

Erst 200 Jahre später wurden Beobachtungen gemacht, die nicht mit Newtons Theorie erklärt werden konnten. Das Atom kann nicht als kleines Sonnensystem beschrieben werden, in dem die Elektronen um den Atomkern auf Ellipsen kreisen.

Wenn ein mathematisches Modell im Widerspruch zu experimentellen Beobachtungen steht, muss das Modell weiterentwickelt und der Wirklichkeit angenähert werden. Aus dieser Notwendigkeit heraus entwickelte sich die Quantenmechanik als Verallgemeinerung der klassischen Mechanik zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Durch die Quantenmechanik stimmen die experimentellen Beobachtungen zu den Eigenschaften von Atomen nun gut mit den mathematischen Berechnungen der Atome überein.

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

4

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 4a, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Fortgeschrittenes Niveau

Newton konnte die Ellipsenbahnen der Planeten um die Sonne durch zwei überraschen einfache Ideen berechnen:

- Die Kraft F *beschleunigt* die Erde mit Masse m . Die Beschleunigung der Erde ist direkt proportional zu der Kraft und verläuft in dieselbe Richtung wie die Kraft.
- Die Gravitationskraft ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands zwischen Erde und Sonne.

Übersetzt in mathematische Gleichungen lauten diese beiden Ideen:

$$\begin{array}{ll} \text{A.} & \vec{F} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \\ \text{B.} & \vec{F} = G \frac{mM}{|\vec{r}|^2} \end{array}$$

Hier ist m die Masse der Erde und M die Masse der Sonne. Wir nehmen an, dass die Masse von Erde und Sonne jeweils auf einen einzigen Punkt konzentriert ist. Als Ursprung des Koordinatensystems wählen wir den Schwerpunkt des Systems „Sonne und Erde“. Da die Sonne sehr viel schwerer als die Erde ist, können wir diesen Schwerpunkt auch gut an die Position der Sonne selbst annähern. Dann ist $|r|$ der Abstand zwischen Erde und Sonne. Mit der Kombination der Gleichungen A. und B. können wir die Zeitentwicklung des Abstandsvektors zwischen Erde und Sonne berechnen, während die Erde die Sonne umkreist.

Newton hat diese Gleichungen nicht nur geraten, sondern auch noch gelöst und Ellipsen als mögliche Orbits gefunden. Außerdem entdeckte er, dass die Summe aus der Bewegungsenergie ($1/2 \cdot \text{Masse} \cdot \text{Geschwindigkeit}^2$) und der potentiellen Energie ($V = -G \cdot M / |r|$ bei der Position $|r|$) der Erde erhalten bleibt.

Mathematisch können wir das dadurch ausdrücken, dass die Energie H keine Funktion der Zeit ist. Die Ableitung von H nach t muss also verschwinden. In der Tat können wir dies mit Newtons

$$\begin{aligned} H &= \frac{m}{2} \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right)^2 + mV(|\vec{r}|) \\ \frac{dH}{dt} &= m \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right) \left(\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \right) + m \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right) \frac{dV(|\vec{r}|)}{d\vec{r}} = 0 \end{aligned}$$

Gesetz A. ganz allgemein zeigen.

$$m \left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right) = - m \frac{dV(|\vec{r}|)}{d\vec{r}} = \vec{F}$$

Das Kraftfeld zeigt in die Richtung der größten Steigung des Potentials (siehe auch Kapitel 4a zum Gradientenfeld).

All diese Ideen und Gleichungen gelten auch im klassischen Elektromagnetismus. Wir müssen nur folgendes ersetzen:

- Die Ladung im Gravitationsfeld ist die "Masse". An ihre Stelle tritt die elektrische Ladung, die positiv oder negativ sein kann.
- Die Gravitationskonstante G muss durch die entsprechende Konstante für die elektrische Kraft ersetzt werden.

Die Kraft zwischen zwei geladenen Teilchen ist umgekehrt proportional zum Abstandskadrat, genau wie im Fall der Gravitation.

Allerdings versagt Newtons Theorie komplett für die Beschreibung des Elektrons, das sich um den Atomkern „herumbewegt“. Im Gegensatz zu den Orbits im Sonnensystem sind im Atom nicht alle Zahlenwerte für die Energie H erlaubt. Nur sehr spezielle Werte von H sind möglich, die von der Atomsorte abhängen. Als Modell für H müssen wir daher eine Energietreppe als unstetige Funktion wählen, weil H keine stetige Funktion mehr ist.

Wie können wir aus der Energie H , die klassisch eine stetige Funktion ist, eine unstetige Energietreppe machen? Wie kommen wir von der klassischen Mechanik zur Quantenmechanik? Die Antwort steht in engem Zusammenhang zum *Kommutator* zwischen Ort und Impuls.

Internetseiten über Kepler & Newton und die wissenschaftliche Revolution

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

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

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

Internetseite über das Atom

<http://de.wikipedia.org/wiki/Atom>

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

6

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

Weiterführende Informationen:

Die klassische Theorie des Atoms versagt aus zwei Gründen:

1. Wenn das Elektron ein punktförmiges, um den Atomkern kreisendes Teilchen wäre, würde es beschleunigt. Eine beschleunigte Ladung strahlt wie ein Hertz-Dipol permanent Energie ab. Das Atom wäre aus der Sicht des klassischen Elektromagnetismus instabil.
2. Das Elektron würde aus der Sicht der klassischen Mechanik jede beliebige Energie haben dürfen. Das Energiespektrum im Atom ist aber diskret. Nur bestimmte Energiewerte sind erlaubt.

Es ist faszinierend, dass eine einzige Idee ausreicht, um all diese Probleme zu lösen. Wenn postuliert wird, dass die Orts- und Impulskoordinaten nicht kommutieren, sondern der Kommutator proportional zum Planck'schen Wirkungsquantum ist, erhalten wir automatisch diskrete Energieniveaus.

$$H = \frac{\vec{p}^2}{2m} + m V(|\vec{r}|), \quad \vec{p} = m \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right)$$

$$[r_k, p_l] = i \frac{h}{2\pi} \delta_{kl}$$

Die Höhe der so bestimmten Energieniveaus stimmt gut mit den gemessenen Werten überein.