

“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/>

Künstlerischer Teil, Kapitel 5

2

Titel der Szene:

Das Virtuelle im Nichts

Videoclip oder Foto:

Kapitel 5, Künstlerischer Teil

Zeitintervall:

Autor:

Stefan Heusler, Annette Lorke

Editor:

Stefan Heusler

Wissenschaftliche Schlagwörter:

Quantenvakuum, Antiteilchen

Beschreibung der Szene:

Prof. Schwerelos und sein Assistent Nick betrachten gemeinsam ein Mammut, das über 18.000 Jahre alt ist. Dabei sprechen sie über Diracs Theorie für das Elektron, die er im Jahre 1928 entwickelt hat. Modelle und Theorien in der theoretischen Physik haben viel mit biologischer Evolution gemeinsam: Konkurrierende Theorien entwickeln sich entweder erfolgreich weiter oder werden vergessen und sterben aus. Von den ausgestorbenen Ideen bleiben nur noch die Knochen übrig. Aber zu ihrer Zeit hatte jede Theorie ihre Existenzberechtigung und ihren Sinn. Jeder Schritt in der wissenschaftlichen Evolution ist ein großes Abenteuer.



Diracs Theorie beschreibt das Elektron nur unvollständig und wurde durch die Experimente von Lamb zur Weiterentwicklung gezwungen. Die Messungen von Lamb am Wasserstoffatom stimmten nicht vollständig mit der mathematischen Vorhersage von Dirac überein. Die Weiterentwicklung von Diracs Theorie führte zur Quantenelektrodynamik, die – bislang – alle Eigenschaften des Elektrons richtig beschreibt. Die Schlüsselidee, die in Diracs Theorie gefehlt hatte, war die Selbstwechselwirkung des Elektrons, des Positrons und des Photons. Das bedeutet, dass sich das Elektron, das Positron und das Photon in ständiger Wechselwirkung mit dem Quantenvakuum befinden. Daher gibt es kein freies Elektron, Positron oder Photon.

Prof. Schwerelos und Nick versuchen, das Nichts experimentell herzustellen, was allerdings gar nicht so einfach ist. Anschließend entwickelt der Professor ein letztes Modell, um zu erklären, wie das Zusammenspiel von Elektronen, Positronen und Photonen mit dem Quantenvakuum aussehen könnte.

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

3

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 5, Künstlerischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Einfaches Niveau

Stell Dir tausende von polierten Metallkugeln vor. In jeder Kugel spiegeln sich alle anderen Kugeln wider. Eine reale Kugel „enthält“ alle anderen Kugeln als virtuelles Bild. Das virtuelle Bild aller Kugeln in der realen Kugel ist eine Metapher für das „Nichts“ oder die „Leere“. Niemand weiß, was „Nichts“ wirklich ist. In der Physik benutzt man ein Modell für das Nichts, das sich so wie die gespiegelten Kugeln verhält, die für unsere Augen und Messinstrumente unsichtbar sind. Wir können die virtuellen Kugeln nicht direkt beobachten. Nur wenn eine reale, sichtbare Kugel verwendet wird, können die anderen unsichtbaren Kugeln als Spiegelbilder auf der realen Kugel wahrgenommen werden. Das Nichts entfaltet seine Wirkung nur, wenn wir eine reale Metallkugel in es hineinlegen. Das Nichts koppelt an diese reale Kugel, indem tausende von unsichtbaren, virtuellen Kugeln sich auf der realen Kugel widerspiegeln.

Vielleicht fragst Du Dich, ob eine *virtuelle* und daher unsichtbare Kugel zu einer *realen* Kugel werden kann. Die virtuellen Elektronen, Positronen und Photonen enthalten alle Möglichkeiten, aber nur eine dieser Möglichkeiten wird real und beobachtbar. Es ist eine gute Frage, *welche* der Möglichkeiten real wird. Das weiß niemand so genau. Die Quantenmechanik erklärt dazu, dass jede Möglichkeit eine gewisse Wahrscheinlichkeit hat, real zu werden. Für eine einzelne Reaktion kann keiner das Resultat genau vorhersagen. Es verhält so ähnlich wie mit dem Würfeln. Vor dem Wurf weiß man nur, dass das Ergebnis eine Zahl zwischen eins und sechs sein wird. Man kann aber nicht vorhersagen, welche der sechs Seiten nach dem Würfeln oben liegen wird. Jede der sechs Zahlen kann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit gewürfelt werden.

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

4

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 5, Künstlerischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Fortgeschrittenes Niveau

1947 trafen sich bei der berühmten Shelter Island Konferenz die wichtigsten amerikanischen Physiker ihrer Zeit und diskutieren den Status der Quantenelektrodynamik. Während des zweiten Weltkriegs hatten Willis Lamb und Robert Retherford die Radartechnologie für militärische Zwecke weiter entwickelt. Als die Forschung sich nach dem Krieg wieder nicht-militärischen Zielen widmen konnte, erwiesen sich die Fortschritte in der Radartechnologie als äußerst wichtig für die genaue Vermessung des Wasserstoffspektrums. Kurz vor der Konferenz hatten Lamb und Retherford genügend experimentelle Daten gesammelt um zu zeigen, dass Diracs Theorie für das Wasserstoffatom nicht vollständig richtig sei. Ihre spektakulären Resultate zeigten eine winzige Abweichung von Diracs Vorhersagen. Dies war eines der heißesten Themen, die auf der Shelter Island Konferenz diskutiert wurde.

In Diracs Theorie wird das Elektron als ein punktförmiges Teilchen beschrieben, das das Coulomb Potential des Atomkerns spürt. Das Elektron und der Atomkern interagieren miteinander durch den Austausch von virtuellen Photonen. In seinem theoretischen Ansatz vernachlässigt Dirac das Potential, das durch das Elektron selbst erzeugt wird, sprich die Wechselwirkung des Elektrons mit sich selbst. Diese Selbstwechselwirkung kann als ein virtuelles Photon interpretiert werden, das das Elektron aussendet und selbst wieder absorbiert. Aus diesem Grund gibt es kein freies Elektron. Das Elektron ist von einer Wolke *virtueller* Teilchen umgeben, die sich in ständigem Austausch mit dem Elektron befinden. Dies ist die Wechselwirkung mit dem Quantenvakuum, die auch dann stattfinden würde, wenn es gar kein anderes reales Teilchen als das Elektron gäbe.

Die virtuellen Teilchen können jede beliebige Energie haben. Wenn z.B. ein virtuelles Photon der Energie $\Delta E = h \cdot \nu$ erzeugt werden soll, braucht man dafür allerdings mindestens die Zeit $\Delta t = h / \Delta E$. Es folgt die Energie-Zeit Unschärfe

$\Delta t \geq h / \Delta E$ $\Delta E \Delta t \geq h$ Für sehr kurze Zeiten können sehr hohe Energien im Quantenvakuum erzeugt werden. Virtuelle

Teilchen können nicht direkt beobachtet werden, sondern nur indirekt durch ihren Einfluss auf reale Teilchen.

In der Sprache des klassischen Elektromagnetismus führt die Selbstwechselwirkung des Elektrons zu einem Korrekturterm im $1/r$ Coulomb-Potential. Für das Elektron im Wasserstoffatom ist r der Abstand zwischen Elektron und Atomkern. Die experimentellen Ergebnisse stimmen sehr gut mit der Theorie überein wenn dieser Korrekturterm in der Theorie berücksichtigt wird.

Die ständige Wechselwirkung mit dem Quantenvakuum führt zu einer Überlagerung des freien Elektrons mit virtuellen Photonen und Elektron/Positron Paaren. Der Zustand mit virtuellen Teilchen ist im Vergleich zu dem Ein-Teilchen Zustand um den Faktor $\alpha \approx 1/137 \approx 0,0073$ (die so genannte Feinstrukturkonstante) unterdrückt. Weil die Wechselwirkung mit dem Quantenvakuum so klein ist, führt die Korrektur von Diracs Theorie, die allein den Ein-Elektron Zustand berücksichtigt, nur zu einer winzigen Änderung der Energieniveaus im Wasserstoffatom.

Internetseiten zur Shelter Island Konferenz und zur Lambverschiebung

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

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

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

5

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 5, Künstlerischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Weiterführende Informationen

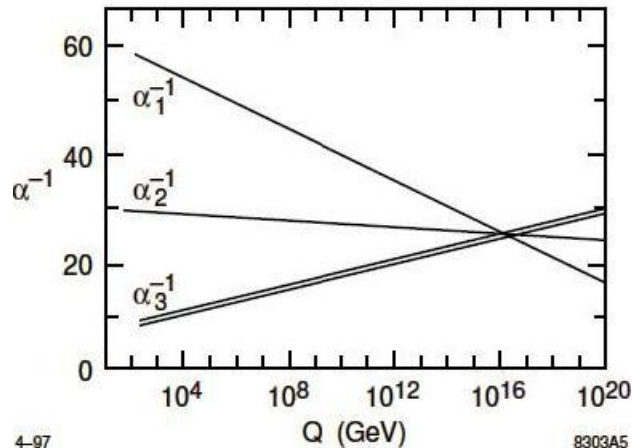
In Teilchenbeschleunigern werden Elektronen bis nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und nehmen enorm viel Energie auf. Je höher die Energie des realen Elektrons, desto wichtiger werden die virtuellen Teilchen. Die Tatsache, dass virtuelle Teilchen das $1/r$ Coulomb Potential modifizieren ist der Schlüssel zur theoretischen Erklärung der Lambverschiebung im Wasserstoffatom. Die Abweichungen vom Coulomb-Gesetz vergrößern sich, je höher die Energie des Elektrons wird. Die Anziehungskraft elektrisch geladener Teilchen hängt von ihrer Energie ab. Die Feinstrukturkonstante $\alpha/(2\pi) = e^2/(h^*c)$ hat den numerischen Wert $\alpha \approx 1/137$ nur bei niedriger Energie. Die *renormierte* elektrische Ladung e_R ist aufgrund der wachsenden Quantenfluktuationen bei höherer Energie eine Funktion der Energie. Die Feinstrukturkonstante ist also gar nicht konstant, sondern ebenfalls eine Funktion der Energie $\alpha(E)$ („running coupling“), die im Teilchenbeschleuniger gemessen werden kann. Auf der Energieskala der schwachen Wechselwirkung (der Resonanzenergie des Z^0 und der $W^{+/-}$ Bosonen) ist die elektrische Anziehung stärker, $\alpha(90 \text{ GeV}) \approx 1/127 \approx 0,0079$.

Je höher die Energie, desto stärker wird die Anziehungskraft des realen Elektrons. Immer mehr virtuelle Teilchen scheinen bei zunehmender Energie zu „erwachen“ und verstärken die elektrische Kopplung.

Die energieabhängige Kopplung („running coupling“) ist auch für die anderen Kräfte bekannt. Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik werden die schwache und starke Kraft ebenfalls durch Quantenfeldtheorien beschrieben, die sehr ähnlich wie die Quantenelektrodynamik hergeleitet werden. Die wichtigsten Prinzipien, die allen Quantenfeldtheorien zu Grunde liegen, sind (Eich-) Symmetrien und relativistische Invarianz. Es ist nicht möglich theoretisch vorherzusagen, *welche* Eichsymmetrie unsere Welt hat. Im Standardmodell wurde die Eichsymmetrie so festgelegt, dass die experimentellen Daten mit der Theorie übereinstimmen.

Während in der Quantenelektrodynamik für sehr hohe Energien die elektrische Kopplung stärker wird, nimmt die Kopplung bei der starken Wechselwirkung ab (so genannte asymptotische Freiheit). Im Gegensatz zu Photonen, die elektrisch neutral sind, wird die starke Wechselwirkung durch 8 verschiedene Arten von Gluonen vermittelt, die Farbladung tragen und sich gegenseitig anziehen bzw. abstoßen. Bei der schwachen Wechselwirkung sind es drei verschiedene Arten von Kopplungsteilchen, die so genannten W^+ , W^- und Z^0 Bosonen. Alle Kopplungsteilchen (die so genannten „Eichbosonen“) können nicht nur elektrische Ladung, sondern auch Hyperladung und Farbladung tragen. Wir bezeichnen mit α_1 , α_2 , α_3 die Kopplungsstärken der Hyperladung (α_1), der elektroschwachen Kraft (α_2) und der starken Kraft (α_3). Für niedrige Energien drehen sich Hyperladung und elektroschwache Kraft in eine Linearkombination, von der eine Richtung dem masselosen Photon entspricht und die anderen Richtungen den massiven W^+ , W^- und Z -Bosonen. Dies ist die so genannte „spontane Symmetriebrechung“. Energien, die deutlich über 90 GeV liegen, können die elektrische und die schwache Kraft in einer vereinheitlichten Theorie beschrieben werden. Dies ist die elektroschwache Theorie, die mit zwei Kopplungsstärken α_1 , α_2 beschrieben wird.

Gemäß dem Standardmodell werden bei extrem hohen Energien (etwa 10^{16} GeV) alle Kopplungsstärken α_1 , α_2 , α_3 etwa gleich groß. Dies ist bereits ein faszinierender



Hinweis darauf, dass bei diesen hohen Energien alle Kräfte (außer der Gravitation) durch eine einzige, vereinheitlichte Theorie beschrieben werden, der so genannten GUT-Theorie (grand unified theory).

Im Jahre 1991 wurde von Amaldi et.al. eine spektakuläre Entdeckung publiziert. Wenn das Standardmodell um eine weitere „Super“-Symmetrie erweitert wird, treffen sich die drei Kopplungsstärken *exakt* an einem Punkt. In einer „supersymmetrischen“ Theorie wird jedem Teilchen mit halbzahligen Spin ein Partnerteilchen mit ganzzahligen Spin zugeordnet. Supersymmetrie sagt also die Existenz eines Partner-Teilchens des Elektrons mit ganzzahligen Spin voraus, das allerdings noch nicht entdeckt worden ist.

Die Energieskala auf der alle Kopplungen sich exakt an einem Punkt treffen ist die so genannte GUT-Skala ($Q \approx 10^{16}$ GeV). Alle Kräfte außer der Gravitation werden durch eine einzige Kopplung beschrieben. Die Frage, ob unsere Welt supersymmetrisch ist oder nicht, bleibt weiterhin offen. Die nächste Generation von Teilchenbeschleunigern (z.B. ATLAS am CERN) könnte eine Antwort auf diese faszinierende Frage liefern.

Internetseiten über Eichbosonen

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

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

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

<http://motls.blogspot.com/2004/10/gauge-coupling-unification.html> (nur auf Englisch)