



Lehrplananbindung: Ph 9.2 Atome – Aufbau der Atome

Kompetenzen: Neben den Fachkenntnissen liegt der Schwerpunkt bei

Erkenntnisgewinnung	Fachmethoden beschreiben	Fachmethoden nutzen	Fachmethoden problembezogen auswählen u. anwenden
Kommunikation	Mit vorgegebenen Darstellungsformen arbeiten	Geeignete Darstellungsformen nutzen	Darstellungsformen selbstständig auswählen u. nutzen
Bewertung	Vorgegebene Bewertungen nachvollziehen	Vorgegebene Bewertungen beurteilen und kommentieren	Eigene Bewertungen vornehmen

Aufgabenbeispiel: Vertiefung - Aufbau der Materie

- a) Lies den folgenden Text über die Entwicklung unserer Modelle von Aufbau der Materie.
- b) Fasse die Informationen über Quarks, die du für wichtig hältst, zusammen.
- c) Finde eine Ungereimtheit hinsichtlich der Masse eines Protons, die nach der Lektüre im Raum steht.

Aus: Brian Greene, Das elegante Universum, Goldmann (2005)

*Die Feinstruktur des Universums:
Was wir über die Materie wissen*

Die alten Griechen nahmen an, das Universum bestehe aus winzigen »unzerteilbaren« Bausteinen, die sie *Atome* nannten. Wie die ungeheure Zahl von Wörtern einer alphabetischen Sprache auf den vielfältigen Kombinationen einer kleinen Zahl von Buchstaben beruht, so ergab sich nach Annahme der Griechen die gewaltige Vielfalt der materiellen Objekte ebenfalls aus Kombinationen einer kleinen Anzahl verschiedener und elementarer Bestandteile. Das war eine außerordentlich weitsichtige Vermutung. Mehr als zweitausend Jahre später halten wir sie noch immer für wahr, wenn sich auch mehrfach unsere Auffassung davon geändert hat, was denn nun die fundamentalen Bausteine sein sollen. Im neunzehnten Jahrhundert wiesen Wissenschaftler nach, daß viele vertraute Stoffe wie Sauerstoff und Kohlenstoff einen kleinsten erkennbaren Bestandteil besitzen. In der Tradition der Griechen nannten sie diese Bausteine *Atome*. Der Name blieb haften, doch die weitere Wissenschaftsgeschichte zeigte, daß dies eine irreführende Bezeichnung war, denn Atome sind durchaus »zerteilbar«. Anfang der dreißiger Jahre begründeten die Arbeiten von J.J. Thomson, Ernest Rutherford, Niels Bohr und James Chadwick das sonnensystemähnliche Atommodell, mit dem

die meisten von uns vertraut sind. Danach sind Atome keineswegs die fundamentalsten Bausteine der Materie, sondern Gebilde mit einem Kern, der seinerseits aus Protonen und Neutronen besteht und von einem Schwarm kreisender Elektronen umgeben ist.

Eine Zeitlang glaubten viele Physiker, Protonen, Neutronen und Elektronen seien nun wirklich die »Atome« der Griechen. Doch Experimentalphysiker am Stanford Linear Accelerator Center, die sich modernste technische Möglichkeiten zunutze machten, um die Tiefenstruktur der Materie zu erkunden, stellten 1968 fest, daß auch Protonen und Neutronen nicht fundamental sind. Vielmehr besteht jeder dieser Bausteine aus drei noch kleineren Teilchen, den *Quarks* – eine launige Bezeichnung, die der theoretische Physiker Murray Gell-Mann, nachdem er zuvor ihre Existenz postuliert hatte, einem Abschnitt aus dem Roman *Finnegan's Wake* von James Joyce entnommen hatte. Weiter stellten die Physiker am Teilchenbeschleuniger fest, daß die Quarks in zwei Spielarten auftreten, die man, nicht ganz so phantasievoll, *up* und *down* nannte. Ein Proton besteht aus zwei up-Quarks und einem down-Quark, ein Neutron aus zwei down-Quarks und einem up-Quark.

Alles, was wir in der irdischen Welt und im Himmel über uns erblicken, scheint aus Kombinationen von Elektronen, up-Quarks und down-Quarks zu bestehen. Es gibt keine experimentellen Ergebnisse, die darauf schließen lassen, daß irgendeines dieser Teilchen aus kleineren Bausteinen zusammengesetzt ist. Allerdings sprechen sehr viele Beweise dafür, daß das Universum selbst noch weitere Bestandteile aufzuweisen hat. Mitte der fünfziger Jahre fanden Frederick Reines und Clyde Cowan überzeugende experimentelle Hinweise auf eine vierte Art von fundamentalen Teilchen, das *Neutrino* – ein Teilchen, das bereits in den dreißiger Jahren von Wolfgang Pauli vorhergesagt worden war. Wie sich herausstellte, lassen sich Neutrinos sehr schwer nachweisen, weil sie geisterhafte Teilchen sind, die nur selten mit anderer Materie in Wechselwirkung treten: Ein Neutrino von durchschnittlicher Energie kann mühelos viele Billionen Kilometer Blei durchqueren, ohne in seiner Bewegung irgendwie beeinträchtigt zu werden. Das müßte Sie eigentlich sehr erleichtern, denn während Sie dies lesen, durchqueren Milliarden von Neutrinos, die von der Sonne ins All gesandt wurden, auf der einsamen Reise durch den Kosmos Ihren Körper und die Erde. Ende der dreißiger Jahre wurde von Physikern, die kosmische Strahlung (Teilchenschauer, die aus dem Weltall auf die Erde herabregnen) untersuchten, ein weiteres Teilchen entdeckt, das *Myon*, das mit dem

Elektron identisch ist, nur daß es rund 200mal so schwer ist. Da es nichts in der kosmischen Ordnung gab, kein ungelöstes Rätsel, keine maßgeschneiderte Nische, die die Existenz des Myons verlangt hätte, begrüßte der Teilchenphysiker und Nobelpreisträger Isidor Isaac Rabi die Entdeckung des Myons mit den wenig begeisterten Worten: »Wer hat denn das bestellt?« Indes, es war nun einmal da. Und weitere sollten folgen.

Mit immer leistungsfähigeren technischen Geräten ließen Experimentalphysiker Materieteilchen mit immer größeren Energien ineinanderkrachen, so daß vorübergehend Bedingungen entstanden, wie es sie seit dem Urknall nicht mehr gegeben hat. In den Trümmern dieser Kollisionen suchten sie nach neuen fundamentalen Bausteinen, die sie in die wachsende Liste der Teilchen eintragen konnten. Gefunden haben sie vier weitere Quarks – *charm*, *strange*, *bottom* und *top* –, außerdem einen noch schwereren Verwandten des Elektrons, das Tauon, und zwei weitere Teilchen mit ähnlichen Eigenschaften wie das Neutrino (das *Myon-Neutrino* und das *Tauon-Neutrino*, im Unterschied zum herkömmlichen Neutrino, das nun Elektron-Neutrino genannt wird). Diese Teilchen werden durch hochenergetische Kollisionen produziert, die meisten von ihnen haben nur eine sehr kurze Lebensdauer, und sie sind keine Bestandteile von Dingen, mit denen wir alltäglich zu tun haben. Doch selbst das ist noch nicht die ganze Geschichte. Jedes dieser Teilchen hat einen Antiteilchen-Partner – ein Teilchen, das die gleiche Masse hat, aber in anderer Hinsicht gegensätzliche Eigenschaften besitzt, zum Beispiel was die elektrische Ladung (aber auch die Ladungen in Hinblick auf andere noch zu erörternde Kräfte) angeht. So bezeichnet man das Antiteilchen eines Elektrons als *Positron*: Es hat haargenau die gleiche Masse wie ein Elektron, aber seine elektrische Ladung beträgt +1, während die des Elektrons –1 ist. Wenn sie zusammenkommen, können sich Materie und Antimaterie vernichten und dabei reine Energie erzeugen – das ist der Grund, warum es so außerordentlich wenig natürliche Antimaterie in der Welt um uns herum gibt.

Die Physiker haben erkannt, daß sich diese Teilchen zu einem bestimmten Muster anordnen; das zeigt die Tabelle 1.1. Die Materieteilchen gliedern sich säuberlich in drei Gruppen, die oft als *Familien* bezeichnet werden. Jede Familie enthält zwei Quarks, ein Elektron oder einen seiner Verwandten und eine Neutrinospielart. Die entsprechenden Teilchenarten haben in allen drei Familien gleiche Eigenschaften, ausgenommen die Masse, die von Familie zu Familie

größer wird. Das Fazit lautet, daß die Physiker die Struktur der Materie jetzt bei Größenverhältnissen von ungefähr einem milliardstel milliardstel Meter erforscht haben und nachweisen können, daß *alles*, worauf sie dabei bislang gestoßen sind – egal, ob es natürlich vorkommt oder künstlich in riesigen Teilchenbeschleunigern erzeugt wird –, einer Kombination von Teilchen aus diesen drei Familien und ihren Antimaterie-Teilchen entspricht.

Familie 1		Familie 2		Familie 3	
Teilchen	Masse	Teilchen	Masse	Teilchen	Masse
Elektron	0,00054	Myon	0,11	Tauon	1,9
Elektron-Neutrino	$<10^{-8}$	Myon-Neutrino	$<0,0003$	Tauon-Neutrino	$<0,033$
up-Quark*	0,0047	charm-Quark	1,6	top-Quark	189
down-Quark	0,0074	strange-Quark	0,16	bottom-Quark	5,2

* Die Quarkmassen sind im Gegensatz zu denen der anderen Teilchen nur indirekt (und modellabhängig) definiert, da Quarks in der Natur nicht als freie Teilchen auftreten.

Tabelle 1.1 *Die drei Familien von Elementarteilchen und ihre Massen (in Vielfachen der Protonenmasse). Die Werte der Neutrinomassen haben sich bisher jeder genaueren experimentellen Bestimmung entzogen.*

Wenn Sie einen Blick auf Tabelle 1.1 werfen, wird Ihre Verwirrung sicherlich noch größer sein als Rabis Befremden über die Entdeckung des Myons. Die Einteilung in Familien erweckt zumindest einen gewissen Anschein von Ordnung, ändert aber nichts daran, daß dem Betrachter zahllose »Warums« in den Sinn kommen. Warum gibt es so viele fundamentale Teilchen, obwohl die große Mehrheit der Dinge in der Welt um uns umher offenbar nur Elektronen, up-Quarks und down-Quarks braucht? Warum gibt es drei Familien? Warum nicht eine Familie oder vier oder irgendeine andere Zahl? Warum weisen die Teilchen eine scheinbar zufällige Streuung der Massen auf – warum wiegt beispielsweise das Tauon ungefähr 3520mal soviel wie ein Elektron? Und warum wiegt das top-Quark ungefähr 40 200mal soviel wie ein up-Quark? Das sind merkwürdige, scheinbar beliebige Zahlen. Sind sie dem Zufall zu verdanken, göttlichem Ratschluß, oder gibt es eine logische Erklärung für die fundamentalen Eigenschaften des Universums?

Lösungen

b) Individuelle Lösungen.

c) Tabelle 1.1 entnimmt man, dass die Massen der freien up- und down-Quarks (aus denen das Proton und das Neutron aufgebaut sind) um mehr als zwei Größenordnungen kleiner sind als die Masse eines Protons bzw. eines Neutrons.

Diese Beobachtung kann an dieser Stelle nur als ein faszinierendes Phänomen der Teilchenphysik stehen bleiben, verbunden mit der Information, dass die Teilchenphysiker eine schlüssige Erklärung dafür gefunden haben.

Zum Hintergrund:

In einem Proton bzw. Neutron existieren nicht nur die drei beschriebenen Quarks (die auch, da sie im Wesentlichen die Eigenschaften dieser Teilchen bestimmen, "Valenzquarks" genannt werden). Aus den Gluonen, den "Botenteilchen" der starken Wechselwirkung zwischen diesen Quarks, entstehen dauernd in größerer Zahl Quark-Antiquark-Paare, die sich sehr schnell wieder zu Gluonen vernichten. Diese virtuellen Quarks, auch "Seequarks" genannt, liefern den überwiegenden Teil der Masse des Protons und des Neutrons.

(vgl. z. B. Demtröder, *Experimentalphysik 4*, Springer (2004); S. 191ff oder www.solstice.de/grundl_d_tph/sm_et/sm_et_qua5.html;

graphische Darstellung: www.solstice.de/grundl_d_tph/sm_et/seevalquark.gif)