

2

Bausteine des Universums – Auf der Suche nach dem Unteilbaren

Vortragender: Robert Roth

Zusammenfassung: Klara Maria Neumann

Die Frage nach dem Elementaren ist alt. Woraus besteht die Welt? Woraus bestehen wir? Die Idee, alles, was ist, könnte nach einfachen Prinzipien und aus einfacher Grundsubstanz gebaut sein, fasziniert Menschen seit Jahrtausenden. Und seit Jahrtausenden gehen Menschen dieser Idee nach.

Anfangs waren derlei Gedanken mehr philosophischer Natur – im antiken Griechenland zum Beispiel. Die Griechen beantworteten die Frage nach dem Elementaren um 500 v. Chr. mit den „vier Elementen“: Feuer, Wasser, Erde und Luft. In China benannte man fünf solcher Elemente. Man beobachtete die gleichen vier wie in Griechenland, benannte zusätzlich aber noch das Metall.

Schließlich wurde in dieser Epoche ein Begriff geprägt, der bis heute im Zusammenhang mit dieser Frage aktuell ist. Etwa 400 v. Chr. urteilte der Grieche Demokrit, dass Materie aus kleinsten unsichtbaren Bausteinen aufgebaut sein muss und charakterisierte diese als Bausteine, aus

denen sich alles andere zusammensetzt, die aber selbst nicht mehr teilbar sind. Er nannte sie „Atomos“, woraus der heutige Begriff des Atoms abgeleitet ist.

Die Frage nach ebendiesen unteilbaren „Elementarteilchen“ hat nach Demokrits Ausspruch Generationen erst von Philosophen und dann von Physikern beschäftigt. Das Atom ist inzwischen ein fest etablierter Begriff der Physik. Schließlich stellte man aber fest, dass sich das Atom doch in noch kleinere Bestandteile zerlegen lässt. Als „Elementarteilchen“ wurden Protonen, Neutronen und Elektronen bekannt, aus denen Atome und damit alle Materie aufgebaut sein sollte. 1932 waren diese drei Teilchen mit ihrer jeweiligen Masse und Ladung bekannt. Sowohl das Periodensystem der Elemente als auch die Nuklidkarte waren mit dem Bekannten vollständig zu argumentieren, und damit war man überzeugt, das Rätsel der Menschheit von den elementarsten Bausteinen und ihrer Rolle in der Welt sei gelöst.

Diese Vorstellung allerdings musste man berichtigen, als man Fotoplatten auswertete, die in einem magnetischen Feld auf einem Berg gestanden hatten. Man untersuchte die Spuren, die die sogenannte Höhenstrahlung auf den Platten hinterlassen hatte. Man bestimmte Masse und Ladung der Verursacher der Linien und erhielt zum damaligen Zeitpunkt unerklärliche Ergebnisse. So fand man zum Beispiel ein positiv geladenes „Elektron“, also ein Teilchen von der Ladung eines Protons und der Masse eines Elektrons, das heute als Positron bekannt ist. Außerdem fand man völlig unerklärliche Arten von Teilchen, die wir mittlerweile als Myonen (Entdeckung 1937) und Pionen (1947–1950) kennen.

Strukturen im Kleinsten erforschen

Atome sind etwa 10^{-10} m, deren Kerne 10^{-14} m groß und die Nukleonen, aus denen sie bestehen, also Protonen und Neutronen (sowie die restlichen eben aufgeführten Teilchen) sind sogar noch kleiner: 10^{-15} m. Das ist längst außerhalb dessen, was das bloße menschliche Auge wahrzunehmen imstande ist; Menschen sind nur in der Lage, das sichtbare Licht, d. h. im Bereich von ca. 400–700 nm Wellenlänge, also 400×10^{-9} m bis 700×10^{-9} m, zu sehen. Die Auflösung von Mikroskopen ist auf Objekte von etwa der Größe der Wellenlänge begrenzt, in diesem Fall also rund 600×10^{-9} m. Selbst ein Atom ist schon kleiner.

Man benötigt, um zu Erkenntnissen über Strukturen auf atomarer Ebene zu gelangen, ein Elektronenmikroskop. Dieses nutzt aus, dass den oben beschriebenen Teilchen auch eine Wellenlänge zugeordnet werden kann. Diese ist nach dem Ansatz von de Broglie neben dem Planck'schen Wirkungsquantum h durch den Impuls p des Teilchens bestimmt: $\lambda = h/p$. Bestrahlt man eine Probe mit beispielsweise Elektronen der Energie $E = 10$ keV, so lässt sich dieser Energie eine Wellenlänge $\left(E = hf \Rightarrow E = h \frac{c}{\lambda} \right)$ von $\lambda = 0,01$ nm, also 10^{-11} m, zuordnen. Elektronen haben hierbei noch den entscheidenden technischen Vorteil, dass sie sich aufgrund ihrer Ladung durch ein elektrisches Feld einfach beschleunigen lassen. Das Elektronenmikroskop besitzt also ein Auflösungsvermögen von bis zu 10^{-11} m (s. Abb. 2.1).

Ähnlich lässt sich auch ein Beschleuniger wie der S-DALINAC an der Technischen Universität Darmstadt als „Rie-

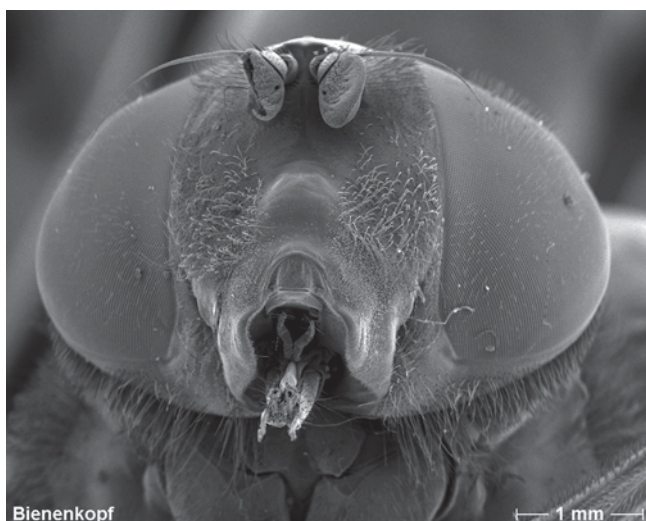


Abb. 2.1 Bienenkopf unter dem Elektronenmikroskop. (Mit freundlicher Genehmigung von A. Weick und G. Jourdan, Institut für Angewandte Physik, TU Darmstadt)

sen-Elektronen-Mikroskop“ nutzen. Elektronen können hier zum Beispiel auf $E = 100 \text{ MeV}$ beschleunigt werden, das entspricht einer Wellenlänge von $\lambda = 10 \text{ fm} = 10^{-14} \text{ m}$ und damit bereits der Größe eines Atomkerns (s. Abb. 2.2).

Mit größeren Anlagen, wie sie zum Beispiel an der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) zur Verfügung stehen, lässt sich das noch weiter steigern. Mit einer Energie von $E = 90 \text{ GeV}$ erreicht man Auflösungen bis $\lambda = 10^{-17} \text{ m}$. Eine weitere Steigerung ist möglich, indem man schwerere geladene Teilchen beschleunigt. Die Masse eines Bleikerns zum Beispiel hilft diesem auf Energien von $E = 6 \text{ TeV}$, das entspricht $\lambda = 10^{-19} \text{ m}$ in der Auflösung.



Abb. 2.2 Der lineare Elektronenbeschleuniger S-DALINAC am Institut für Kernphysik. (Mit freundlicher Genehmigung von N. Pietralla, Institut für Kernphysik, TU Darmstadt, Foto: U. Krebs)

Auch hier geht die Skala immer noch weiter. Der derzeit leistungsstärkste Beschleuniger, der Large Hadron Collider (LHC) am CERN, bringt Energien von $E=7$ TeV ($\lambda = 10^{-19}$ m) mit einem Proton und sogar $E=600$ TeV ($\lambda = 10^{-21}$ m) mit einem Bleikern zustande (s. Abb. 2.3). Allerdings kann man mit dem neu gewonnenen Mikroskop nicht nur vergrößern, sondern man gewinnt auch hoch-energetische Teilchen, mit denen sich Kollisionsexperimente durchführen lassen, die wichtige Daten über unser Modell vom Aufbau der Nukleonen, d. h. der Bestandteile des Atomkerns, liefern.

All diese Beschleuniger funktionieren nach dem gleichen Prinzip. Von einem elektrischen Feld werden Elektronen oder andere geladene Teilchen (Ionen) beschleunigt. Reicht

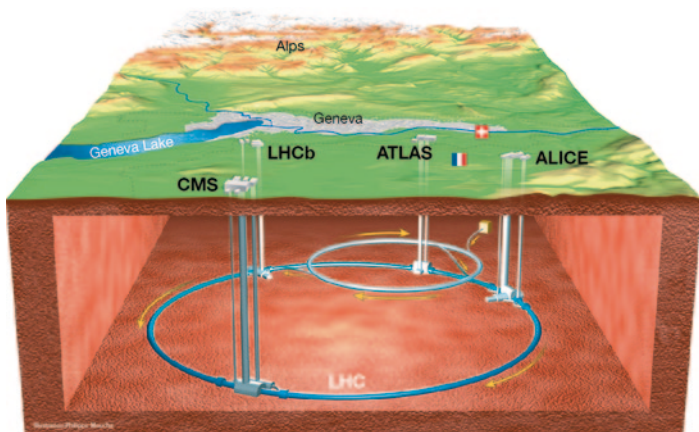


Abb. 2.3 Der LHC, der lineare Hadron Kollider, am CERN in der Nähe von Genf in der schematischen Übersicht. (© CERN, Foto: Philippe Mouche, <http://cds.cern.ch/record/1708847/>)

der Platz nicht für eine lange gerade Beschleunigungsstrecke, lassen sich die Elektronen mit magnetischen Feldern um Kurven lenken. Im S-DALINAC etwa durchlaufen Elektronen, um mit der dort maximal möglichen Energie ausgestattet zu werden, die Beschleunigungsstrecke dreimal. Die Experimente, die im Folgenden interessant sind, sind Kollisionsexperimente. Dabei lässt man also Teilchen mit hohen Energien aufeinander fliegen.

Das Ergebnis – die nach dem Stoß wegfliegenden Teilchen – wird zum Beispiel am LHC vom CMS-Detektor aufgefangen (s. Abb. 2.4). Dieser liefert aber zunächst verwirrende Ergebnisse: Bei einer Kollision zweier Teilchen weist er hinterher viel mehr Teilchen nach, offenbar können dabei neue Teilchen entstehen. Nach der Kollision von zwei



Abb. 2.4 Bild des CMS-Detektors am CERN mit dessen Hilfe, die nach einem Stoßexperiment wegfliegenden Teilchen nachgewiesen und später identifiziert werden können. (© CERN, for the benefit of the CMS Collaboration, Foto: Michael Hoch CMS-PHOTO-TRACKER-2014-001-2, <http://cds.cern.ch/record/1977415>)

Protonen etwa werden zwar auch zwei Protonen, aber zusätzlich noch ca. 100 weitere Teilchen registriert.

Dies geschieht, weil beim Aufprall Energie (nach $E = mc^2 = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$) teilweise in Ruhemasse m_0 umgewandelt wird. Allerdings entsteht ein Teilchen niemals aus dem Nichts. Es entsteht mit einem Teilchen auch immer das entsprechende Antiteilchen. Man spricht hierbei von Paarentstehung. Analog dazu lässt sich auch das Phänomen der Paarvernichtung (Ruhemasse wird in Energie umgewandelt) beobachten. So können aus der Kollision von

zum Beispiel zwei Teilchen sehr geringer Masse aber hoher Geschwindigkeit Teilchen größerer Masse mit kleiner Geschwindigkeit erzeugt werden. Die neu entstandenen Teilchen werden zunächst in den Detektoren über ihre Energie registriert und dann auf diese Weise auch identifiziert.

Quarks und Leptonen: Die Unteilbaren

So lassen sich durch die Kollision der beiden bereits erwähnten Bleiatome Bedingungen schaffen, wie sie in natura vermutlich zuletzt beim Urknall geherrscht haben. Denn bei diesem Versuch ist eine große Energiemenge auf ein sehr kleines Raumvolumen zusammengedrängt, d. h. die Energiedichte ist sehr groß.

Die Entstehung hunderter und aberhunderter verschiedener Teilchen ist zwar faszinierend, wirft aber eine neue Frage auf: Sind die bekannten „Elementarteilchen“ (Protonen, Neutronen, Elektronen) wirklich so elementar, wenn sozusagen aus ihnen andere und vor allem leichtere (unserem Verständnis nach kleinere) Teilchen entstehen können? Sind sie wirklich *unteilbar*? Ordnet man die Teilchen nach dem in diesem Zusammenhang wesentlichen Kriterium der Teilbarkeit, lassen sich folgende Kategorien unterscheiden: Die bereits bekannten Protonen und Neutronen bestehen aus Quarks; das macht sie zu so genannten Hadronen. Da es in beiden Fällen je drei Quarks sind, die das Teilchen bilden, gehören sie zur Subgruppe der Baryonen (sogenannte Mesonen bestehen aus nur zwei Quarks).


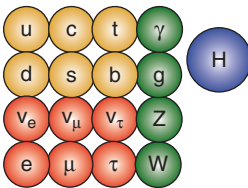





	Flavor	"Masse"	el. Ladung		
	u	up	0.002 GeV	+2/3 e ₀	
	d	down	0.005 GeV	-1/3 e ₀	
	s	strange	0.095 GeV	-1/3 e ₀	
	c	charm	1.25 GeV	+2/3 e ₀	
	b	bottom	4.2 GeV	-1/3 e ₀	
	t	top	174 GeV	+2/3 e ₀	

Abb. 2.5 Die sechs Quarks im Standardmodell mit den dazugehörigen Massen ausgedrückt als Energien gemäß der Einsteinschen Gleichung $E=mc^2$ sowie deren Ladung. 1 eV (sprich ElektronVolt) entspricht 1.6×10^{-19} J. Rechts alle Teilchen des Standardmodells

Den Begriff *Quark* hat vor allem der theoretische Physiker Murray Gell-Mann im Jahr 1964 geprägt. Heute sind sechs verschiedene Arten (man spricht auch von *Flavours*, also „Geschmäcker“) von Quarks bekannt. Nach dem Standardmodell der Teilchenphysik sind sie damit vollzählig (s. Abb. 2.5). Die Masse ist in GeV angegeben, dabei entspricht 1 GeV nach oben beschriebener Methode umgerechnet ca. 1 m_p (Protonenmasse). Zudem kommt auf jedes Quark noch ein Antiquark mit umgekehrter Ladung. Diese ist jeweils in Dritteln der Elementarladung e_0 angegeben, was die Ladung etwa eines Protons (zwei up- und ein down-Quark) von genau 1 e_0 erklärt.

Weiterhin kommen alle Arten von Quarks in jeweils drei verschiedenen „Farben“ vor. Dieser Begriff für ein Unter-

scheidungsmerkmal hat mit Wellenlängen wie beim Licht nichts zu tun. Er wird in Analogie zu den drei Grundfarben rot, grün und blau verwendet, die sich zu weißem Licht neutralisieren, wenn man sie alle addiert. Entsprechend ist ein Quark entweder „rot“, „grün“ oder „blau“ (Antiquarks: cyan, magenta, gelb) und ein Hadron stets „weiß“. Baryonen setzen sich also aus einem roten, einem blauen und einem grünen Quark zusammen. Zugleich bestehen Mesonen immer aus einer *Farbe* und der zugehörigen *Anti-Farbe*, sodass auch diese in Summe „farblos“ bzw. „weiß“ sind. Das bedeutet aber auch, dass Quarks nicht voneinander isoliert auftreten können, was den Begriff *Elementarteilchen* als *unteilbares Teilchen* problematisch macht. Dennoch erklärt diese Theorie die Paarerzeugung und -vernichtung, und zwar als Umverteilung der bereits vorher vorhandenen Quarks.

Es gibt sie aber doch, Teilchen, die keine Hadronen sind, also nicht aus Quarks bestehen, und trotzdem nicht mehr teilbar sind. Auf sie trifft die eigentliche Wortbedeutung von *Elementarteilchen* also doch noch zu. Sie heißen Leptonen. Auch hiervon gibt es sechs. Zu ihnen gehört auch eines der „alten“ Elementarteilchen, das Elektron.

Unabhängig davon, wie übersichtlich man all diese Teilchen auch immer einteilen mag, eine Problemstellung bleibt: Quarks und Leptonen sind keine Legosteine, die man aneinanderstecken kann, um Materie zu formen. Es muss etwas geben, was zwischen all diesen Teilchen als „Kleber“ wirkt: Die Wechselwirkungen. Das sind Kräfte, die generell zwischen Teilchen auf atomarer und subatomarer Ebene wirken. Hiervon unterscheiden wir vier:

Von der Schule zum Urknall

Saturday Morning Physics der TU Darmstadt in
Schülerbeiträgen

Kremser, E.; Walther, Th. (Hrsg.)

2016, XIV, 127 S. 63 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-47728-1