

Das Atom und seine Bestandteile

Martin Schumacher*

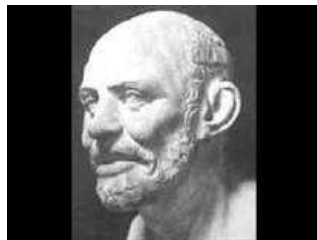
II. Physikalisches Institut der Universität Göttingen
Friedrich-Hund-Platz 1
D-37077 Göttingen, Germany

Zusammenfassung

Das 20. Jahrhundert kann mit Recht als das Jahrhundert der atomaren und subatomaren Physik bezeichnet werden, deren Vollendung aber auch zu Beginn des 21. Jahrhunderts noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden kann. Trotzdem hat sich zum jetzigen Zeitpunkt ein Stadium der Vollendung ergeben, das eine zusammenfassende Rückschau erlaubt. Im folgenden wird über die Entwicklung unserer Kenntnisse über das Atom und seine Bestandteile berichtet, die von den Anfängen der Atomtheorie in der Antike bis zum Higgs-Boson führt.

1 Der Atombegriff der Antike

$\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ = das Unteilbare



Leukipp 5. Jahrh. v. Ch.



Demokrit: ca 460 - ca 400 v. Chr.

1. Atome sind unveränderlich und undurchdringlich
2. Sie kommen in unterschiedlichen Gestalten vor und bewegen sich im leeren Raum
3. Die makroskopischen Körper und ihre wahrnehmbaren Eigenschaften entstehen durch die Zusammensetzung der Atome

Der Atombegriff geht auf die antike Naturphilosophie zurück (griech. $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$, das Unteilbare). Nach dieser Wortbedeutung sind Atome die kleinsten, unzerlegbaren Bestandteile der Materie. Der antike Atomismus wurde durch Leukip (5. Jahrh. v. Ch.) und Demokrit (circa 460 - circa 400 v. Ch.) begründet. Danach sind die Atome unveränderlich und absolut undurchdringlich, kommen in sehr unterschiedlichen Gestalten vor und

*angefertigt für allgemeine Hörer im August 2017

bewegen sich im leeren Raum. Die makroskopischen Körper und ihre wahrnehmbaren Eigenschaften entstehen durch die Zusammensetzung der Atome und ihre Einwirkung auf unsere Sinnesorgane. Aristoteles (384 - 322 v. Chr.) kritisierte den Atomismus und vertrat eine Kontinuumstheorie der Materie. In der Neuzeit übernahmen Galileo Galilei (1564 - 1642) und Isaak Newton (1643 - 1727) den Atomismus, anders als René Descartes (1596 - 1650), der eine Kontinuumstheorie der Materie bevorzugte.

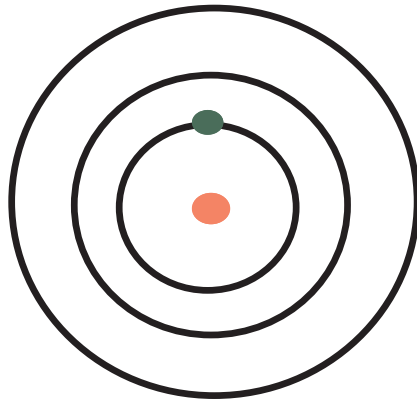
2 Übersicht zur historischen Entwicklung

1808 Dalton	Multiple Proportionen
1811 Avogadro	Molekültheorie der Gasgesetze
1815 Prout	Massenzahlen Vielfache des Wasserstoffs
1865 Loschmidt	Größe von Molekülen
1868 Mendeleev	Periodensystem
1869 Hittorf	Kathodenstrahlen
1895 Röntgen	X-Strahlen
1896 Becquerel	Radioaktivität
1897 J.J. Thomson	Elektron identifiziert
1900 Planck	$E = h\nu$
1903 J.J. Thomson	Atommodell (Plumpudding)
1909 Rutherford	Atomkern
1905 Einstein	$E = mc^2$
1913 Bohr	Atommodell (quantisierte Bahnen)
1926 Schrödinger	Wellenmechanik

Ob es Atome gibt, war lange umstritten, bis sich Ende des 18. Jahrhunderts Befunde zugunsten ihrer Existenz ergaben. Die ersten Hinweise kamen aus der Untersuchung chemischer Reaktionen, die zeigten, dass die Atome sich immer in einem bestimmten Massenverhältnis zu Molekülen verbinden. Eine erste Abschätzung der Größe von Atomen ergab sich aus den Eigenschaften von Gasen. Die Berechnung der Beziehung zwischen Druck und Volumen hängt von der Größe der Moleküle ab. Im Jahre 1897 konnte John Joseph Thomson nachweisen, dass Kathodenstrahlen aus Elektronen bestehen. Dies führte ihn zu der Vermutung, dass Atome Elektronen enthalten. Zur Erklärung führte er das "Plumpudding-Modell" ein, in dem das Atom aus einer großen Kugel besteht, in die die Elektronen eingebettet sind.

Streuexperimente im Labor von Ernest Rutherford zeigten 1911, dass Atome einen extrem kleinen Atomkern besitzen, an dem α -Teilchen um zum Teil sehr große Winkel abgelenkt werden können. Ein hierauf aufbauendes Planetenmodell führt zu der Schwierigkeit, dass es nicht stabil ist, da kreisende Elektronen nach der Elektrodynamik kontinuierlich Licht abstrahlen und damit Energie verlieren. Zur Lösung des Problems entwickelte Bohr sein Atommodell von 1913, das wesentlich auf Quantisierungsbedingungen beruht, von denen die in der Tabelle angegebene von Planck 1900 entdeckt worden war.

3 Das Bohrsche Atommodell von 1913

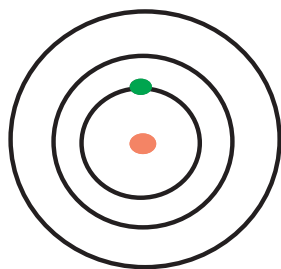


Niels Bohr

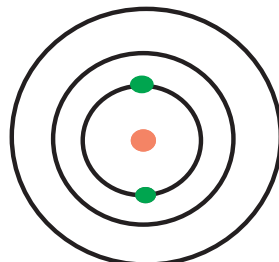
Im Bohrschen Modell umkreist das Elektron des Wasserstoffatoms einen sehr kleinen Atomkern, der nahezu die gesamte Masse des Atoms enthält. Quantengesetze bestimmen die Bahnen, auf denen das Elektron sich stabil bewegen kann. Durch Übergänge von höheren zu niedrigeren Bahnen werden die Spektrallinien ausgesandt.

Bohr nahm als Ausgangspunkt das Rutherfordsche Atommodell. Um Atome beschreiben zu können, die trotz kreisender Elektronen stabil sind, löste Bohr sich teilweise von der Gültigkeit der klassischen Mechanik und Elektrodynamik. Er nahm an, dass es für Elektronen im Atom bestimmte Bahnen gibt, auf denen sie in stabiler Form den Kern umkreisen, ohne elektromagnetische Wellen zu erzeugen, und dass andere Bahnen in der Natur nicht vorkommen. Strahlung gibt ein Atom nur beim Übergang eines Elektrons von einer der erlaubten Bahnen höherer Energie in eine andere mit niedrigerer Energie ab, wobei die Energiedifferenz als Energie eines Photons abgestrahlt wird. Diese Photon-Energie ist durch das Plancksche Wirkungsquantum h multipliziert mit der Frequenz ν des Photons gegeben. Für die Auswahl der stabilen Bahnen legte Bohr fest, dass das Elektron auf einer Kreisbahn einen Drehimpuls besitzt, der ein ganzzahliges Vielfaches einer atomaren Einheit beträgt, die gleich dem Planckschen Wirkungsquantum h geteilt durch (2π) ist. Mit Hilfe dieses Modells konnte Bohr die Frequenzen der von einem Wasserstoffatom ausgesandten Spektrallinien mit großer Genauigkeit berechnen. Die Anwendung des Bohrschen Modells auf andere Atome führte jedoch zu Schwierigkeiten, die erst durch Schrödinger 1926 überwunden werden konnten.

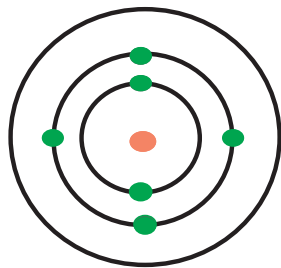
4 Atome und die Schrödinger-Gleichung



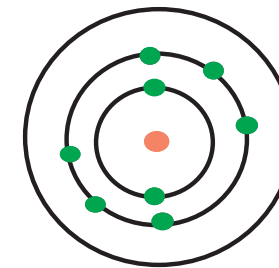
Wasserstoff



Helium



Kohlenstoff



Sauerstoff



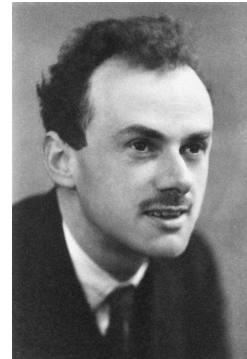
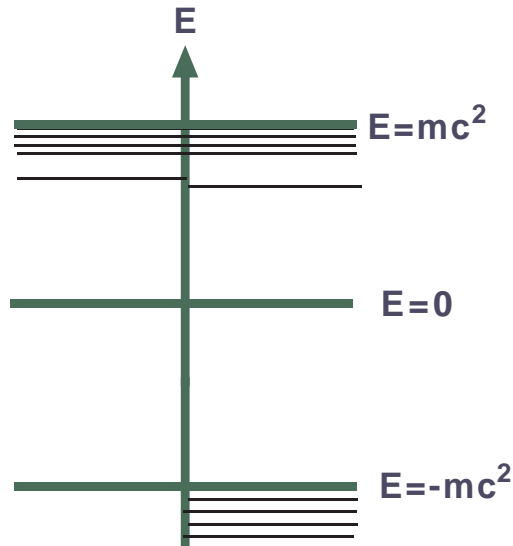
Erwin Schrödinger
Die Schrödinger-Gleichung
beschreibt alle chemischen
und optischen
Eigenschaften des Atoms

Die Schrödinger-Gleichung beschreibt die Elektronen im Atom durch stehende Wellen, die die Bohrschen Bahnen ersetzen. Die Bohrschen Auswahlkriterien für die zugelassenen stabilen Zustände werden durch die Forderung ersetzt, dass die stehenden Wellen auf einen endlichen Bereich im Raum beschränkt sind. Im Wasserstoff-Atom stimmen die vorhergesagten Energie-Niveaus mit denen des Bohrschen Modells überein. Die stehenden Wellen lassen sich als Aufenthalts-Dichten der Elektronen interpretieren. Die Schrödinger-Gleichung enthält alle optischen und chemischen Eigenschaften der Atome. Genaue Rechnungen sind allerdings nur in einfachen Fällen möglich, da zum Teil erhebliche mathematische Schwierigkeiten auftreten. Eine prinzipielle Begrenzung der Anwendbarkeit besteht darin, dass eine nichtrelativistische Kinematik zugrunde liegt. Das bedeutet, dass die Begrenzung der Geschwindigkeit des Elektrons durch die Lichtgeschwindigkeit außer Betracht gelassen wird. Dies ist vor allem bei den inneren Elektronen-Schalen schwerer Atome von Bedeutung, in denen sich die Elektronen in Bereichen mit hoher elektrischer Feldstärke bewegen und somit hohe Geschwindigkeiten erlangen.

5 Berücksichtigung der Relativitätstheorie durch Dirac

Schrödinger 1926

Dirac 1928



Paul Dirac

$$E = \pm \sqrt{(\vec{p}c)^2 + (mc^2)^2}$$

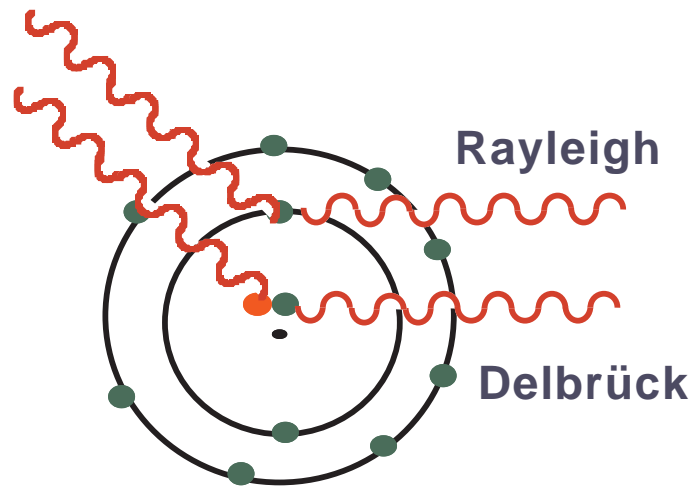
Negative Energiezustände!

Wie verändert sich die Welt durch negative Energiezustände?

In der Figur sind die Energieniveaus eines Atoms nach Schrödinger (links) und nach Dirac (rechts) aufgetragen, wobei die Ruheenergie $E = mc^2$ mit einbezogen wird. Die gebundenen Zustände des Elektrons im Atom liegen unterhalb der Linie $E = mc^2$ und stimmen bei geringen Bindungsenergien im nichtrelativistischen und relativistischen Fall überein. Der niedrigste Zustand ist im relativistischen Fall stärker gebunden als im nichtrelativistischen Fall. Im relativistischen Fall findet man Zustände negativer Energie unterhalb der Linie $E = -mc^2$.

Eine Lösung des Problems der Einbeziehung der Relativitätstheorie in die Wellenmechanik gelang Paul Dirac, indem er von einer relativistischen Beziehung zwischen der Energie des Elektrons E und dessen Impuls \vec{p} ausging. Er brachte die zunächst quadratische Gleichung in eine anwendbare Form, indem er die Wurzel aus dem quadratischen Ausdruck zog (siehe Gleichung). Danach ließ sich die Gleichung analog zur Schrödinger-Gleichung auswerten. Entscheidend neu allerdings ist, dass die Wurzel ein positives und ein negatives Vorzeichen besitzt. Das negative Vorzeichen beinhaltet, dass Elektronen negative Energien besitzen können. Da solche Elektronen nicht beobachtet werden, schlug Dirac die Existenz von Antielektronen vor, die eine positive Energie, eine positive elektrische Ladung aber eine identische Masse besitzen. Diese Positronen genannten Teilchen bilden mit den Elektronen negativer Energie Elektron-Positron-Paare, die im allgemeinen nicht beobachtet werden können. Es gibt aber Bedingungen, bei denen von den Elektron-Positron-Paaren beobachtbare physikalische Wirkungen ausgehen. Physikalische Untersuchungen dieser Art gehörten zu meinem eigenen Forschungsgebiet, über das im folgenden berichtet werden soll.

6 Rayleigh (1871) und Delbrück (1933) Streuung



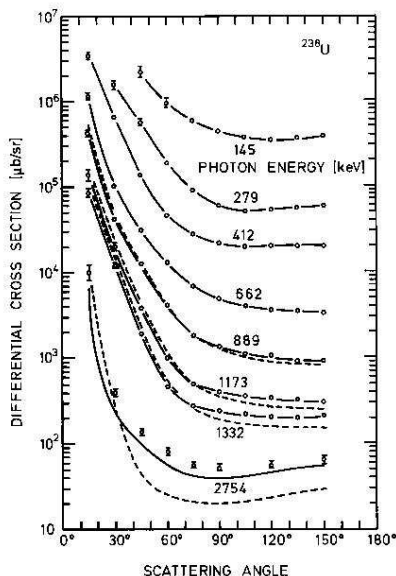
Photonen treffen auf das Atom und verlassen es mit veränderter Richtung. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. die Streuung an der Elektronenhülle = Rayleigh-Streuung
2. die Streuung an den Elektron-Positron-Paaren = Delbrück-Streuung

Im Jahre 1871 ging Rayleigh der Frage nach, warum der Himmel blau ist, obgleich die Luft keine blaue Farbe besitzt. Die Antwort ist, dass das Sonnenlicht an den Luftmolekülen gestreut wird und diese Streuung um so intensiver ist, je kürzer die Wellenlänge oder - gleichbedeutend - je größer die Energie der Photonen ist. Wählt man die Photonenenergie einige Hundert-Tausend bis Millionen mal größer als die des sichtbaren Lichtes, dann kann Rayleigh-Streuung an den inneren Elektronen eines schweren Atoms, z.B. eines Uran-Atoms beobachtet werden. Gleichzeitig ist auch die Streuung an den virtuellen Elektron-Positron-Paaren möglich. Hierauf hat erstmalig Max Delbrück im Jahre 1933 hingewiesen. Deshalb wird dieser Vorgang Delbrück-Streuung genannt. Delbrück-Streuung kann dazu benutzt werden, die Existenz und die Eigenschaften der Elektron-Positron-Paare zu untersuchen. Erste Versuche wurden bis in die 1960er Jahre ohne Erfolg unternommen. Erst danach gab es geeignete Photon-Detektoren, mit denen solche Experimente möglich waren. Ferner standen mathematische Methoden und Computer zur Verfügung, mit denen diese Streuvorgänge genau berechnet werden konnten.

7 Differentieller Wirkungsquerschnitt

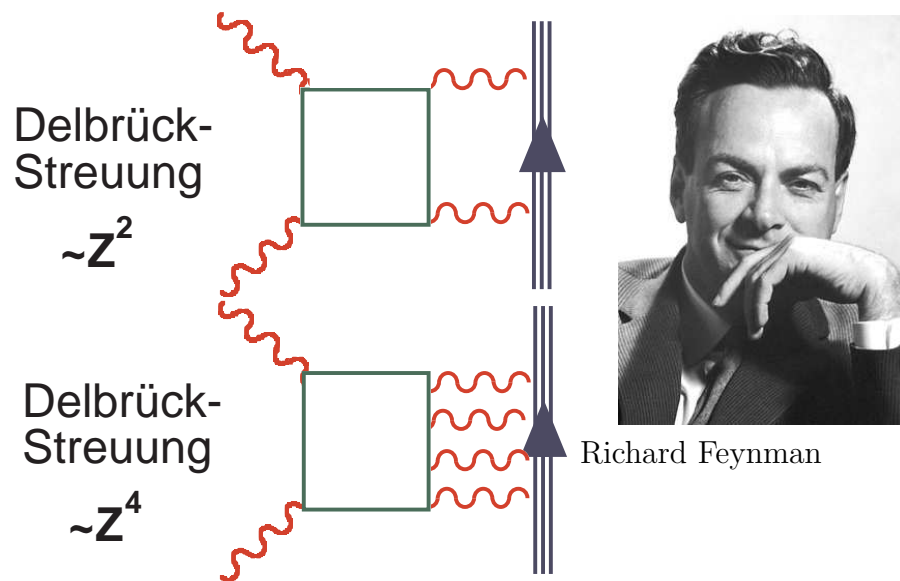
A.I. Mülstein, M. Schumacher/Physics Reports 243 (1994) 183-214



- 64 Messpunkte
- gestrichelt: Nur Rayleigh-Streuung
- durchgezogen: Rayleigh- und Delbrück-Streuung

Von 1966 bis 1968 führte ich in den USA kernphysikalische Experimente aus mit Apparaturen, die auch für den Nachweis der Delbrück-Streuung geeignet waren. Ich begann deshalb damit, mich neben der Kernphysik mit diesem Thema zu beschäftigen. Dabei war mir vom Beginn an klar, dass Rayleigh-Streuung und Delbrück-Streuung immer gemeinsam auftreten, so dass beide Vorgänge sowohl experimentell als auch theoretisch gleichzeitig untersucht werden müssen. Mein Vorgehen bestand deshalb darin, dass ich Photonen mit unterschiedlicher Energie auswählte in der Erwartung, dass bei niedrigen Energien die Rayleigh-Streuung der dominierende Prozess ist und bei höheren Energien die Delbrück-Streuung. Gleichzeitig kooperierte ich mit Theoretikern, die die Rayleigh-Streuung sehr exakt berechnen konnten und anderen Theoretikern, die Präzisionsrechnungen zur Delbrück-Streuung ausführten. Das Ergebnis dieser Arbeiten wird in der Figur beschrieben, in der die Streuintensität über dem Ablenkungswinkel für verschiedene Photon-Energien aufgetragen sind. Bei Energien von 145 bis 662 keV sind die Messpunkte mit jeweils einer Kurve in Übereinstimmung, die nur die Rayleigh-Streuung beinhaltet. Dies beweist, dass die Rechnungen zur Rayleigh-Streuung sehr genau sind. Bei den Energien 889, 1173 und 1332 keV sehen wir eine gestrichelte und eine durchgezogene Kurve, die sich darin unterscheiden, dass die gestrichelte Kurve nur die Rayleigh-Streuung beinhaltet, während die durchgezogene Kurve daneben auch die Delbrück-Streuung enthält. Erst die Berücksichtigung der Delbrück-Streuung führt zu einer Übereinstimmung mit dem Experiment. Dies beweist eindeutig, dass die Delbrück-Streuung nachgewiesen wurde. Eine Besonderheit tritt bei der Energie 2754 keV auf, wo zum einen ein sehr großer Beitrag der Delbrück-Streuung angezeigt wird und zum anderen die Rechnung nicht exakt mit dem Experiment übereinstimmt. Offenbar gibt es einen weiteren Effekt, der im folgen untersucht werden soll.

8 Feynman-Graphen



Um zu einer Erklärung der Diskrepanz bei der Photon-Energie 2754 keV zu gelangen, benutzen wir eine Beschreibung der Delbrück-Streuung, die auf Feynman zurückgeht. Feynman beschreibt die zeitlichen Abläufe von Teilchen-Reaktionen mit Hilfe von Graphen, die graphischen Fahrplänen nicht unähnlich sind. Die Dreifachlinien beschreiben die Existenz eines Atomkerns, die wegen des Fortschreitens der Zeit durch von unten nach oben laufende Linien dargestellt wird. Bei der Delbrück-Streuung erzeugt ein Photon in Kernnähe ein virtuelles Elektron-Positron-Paar, das durch Austausch von zwei, vier oder mehr virtuellen Photonen mit der Ladung des Kerns Rückstoß auf den Kern überträgt. Danach vernichtet das Elektron-Positron-Paar und sendet dabei das gestreute Photon aus. Die bisher vorliegenden Rechnungen zur Delbrück-Streuung berücksichtigen nur den Zwei-Photonen-Austausch und sind deshalb unvollständig. Bei diesem Anteil steigt die Amplitude mit dem Quadrat der Kernladung an. Der fehlende Anteil steigt mit der vierten Potenz der Kernladung an, und kann mit Hilfe dieses Unterschiedes identifiziert werden. Die entsprechenden Experimente führten zu einer Erklärung der beobachteten Diskrepanz bei 2754 keV.

9 Teilchen ohne Eigenschaften



Schwinger (rechts) erhält von Einstein (links) die erste Albert-Einstein Medallie für besondere Leistungen in den Naturwissenschaften.

- Schwinger (1957): Teilchen ohne Eigenschaften müssen zumindest Masse besitzen, da sie sonst nicht erkennbar wären.

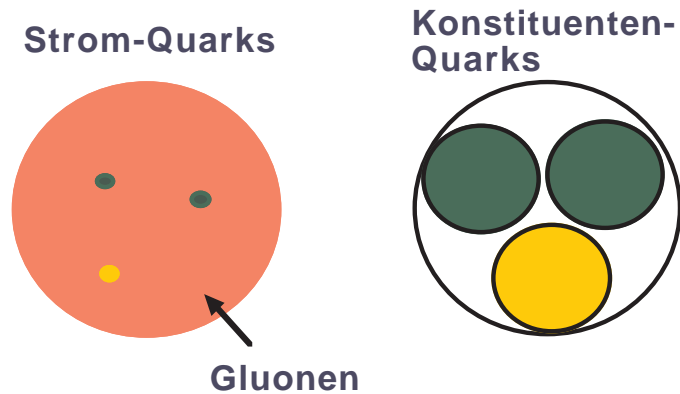
Das sigma-Meson ist ein solches Teilchen.

- Higgs (1964): Das Higgs-Boson ist ein weiteres Teilchen dieser Art.

Diese Teilchen können anderen Teilchen Masse vermitteln.

Wir machen jetzt einen Sprung und wenden uns den Kernbausteinen Proton und Neutron zu. In diesem Zusammenhang ist Julian Schwinger von besonderer Bedeutung, der auf dem Bild bei der Entgegennahme des Albert-Einstein-Preises zu sehen ist. Schwinger kam bei seinen theoretischen Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass sogenannte skalare Teilchen, d.h. Teilchen ohne Eigenschaften, zumindest eine Masse besitzen müssen, sonst würden sie gar nicht existieren. Skalare Teilchen sind danach mit dem Prozess der Masseerzeugung eng verbunden und sind möglicherweise dafür verantwortlich, dass die anderen Teilchen auch eine Masse erhalten. Julian Schwinger entdeckte bei seinen Untersuchungen 1957 das σ -Meson als möglichen Kandidaten, 1964 fügte Peter Higgs das später nach ihm benannte Higgs-Boson hinzu. Proton und Neutron bestehen aus drei Quarks, deren Masse in einem ersten Schritt durch das Higgs-Boson vermittelt wird. Dabei entstehen allerdings nur 2% der beobachteten Masse, der Rest wird durch das σ -Meson vermittelt. Der experimentelle Nachweis dieser Teilchen wird später beschrieben.

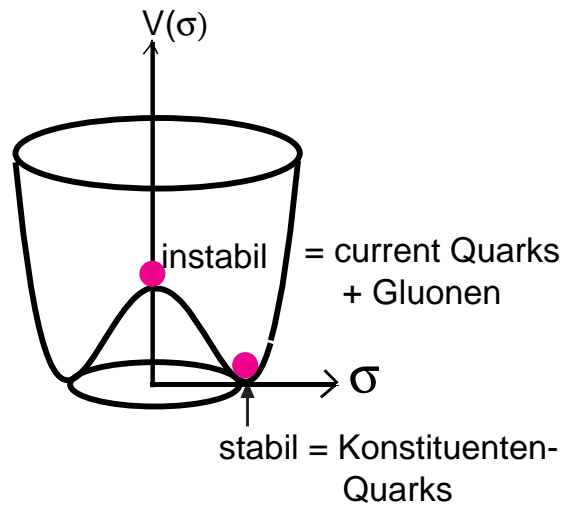
10 Struktur von Proton und Neutron



Proton und Neutron bestehen aus je 3 Quarks. Die Strom-Quarks besitzen eine kleine Masse, die vom Higgs-Boson erzeugt wird. Masselose Gluonen koppeln an die Quarks und aneinander. Dieser Zustand ist instabil, da die Gluonen sehr große Kräfte auf die Quark-Antiquark-Paare des Dirac-Sees ausüben. Die Konstituenten-Quarks entstehen, indem sich die Quark-Antiquark-Paare an die Quarks anlagern und dabei die Gluonen absorbieren.

Wir versuchen zunächst, das Nukleon durch elementare Teilchen zu beschreiben, das sind die Strom-Quarks, deren Massen durch das Higgs-Boson vermittelt werden und die an die Quarks gekoppelten Gluonen. Die dazugehörige Ladung der Quarks heißt Farbladung. Sie kommt in den drei Versionen rot, grün und blau vor. Für große Abstände sind die drei Quarks zusammen farbneutral. Es gibt Bestrebungen, die Masse der Nukleonen aus diesem Current-Quark-Gluonen-Bild zu berechnen, indem man Computer-Simulationen ausführt, allerdings bisher mit geringem Erfolg. Ein weiterer wesentlicher Nachteil dieses Vorgehens ist, dass offenbar das Current-Quark-Gluon-Nukleon nicht stabil ist, da die mit den Gluonen verbundenen starken Kräfte auf die Quark-Antiquark-Paare des Dirac-Sees wirken. Dies hat zur Folge, dass sich die Current-Quarks mit einem Mantel aus Quark-Antiquark-Paaren umgeben und dabei die Gluonen in die Struktur integrieren. Auf diese Weise entstehen die Konstituenten-Quarks, deren Masse angenähert gleich $1/3$ der Nukleon-Masse ist. Die in die Struktur integrierten Gluonen treten nicht mehr in Erscheinung. Statt dessen findet man Mesonen - insbesondere das σ -Meson -, das an die Konstituenten-Quarks koppelt und anziehende Kräfte zwischen den Konstituenten-Quarks vermittelt.

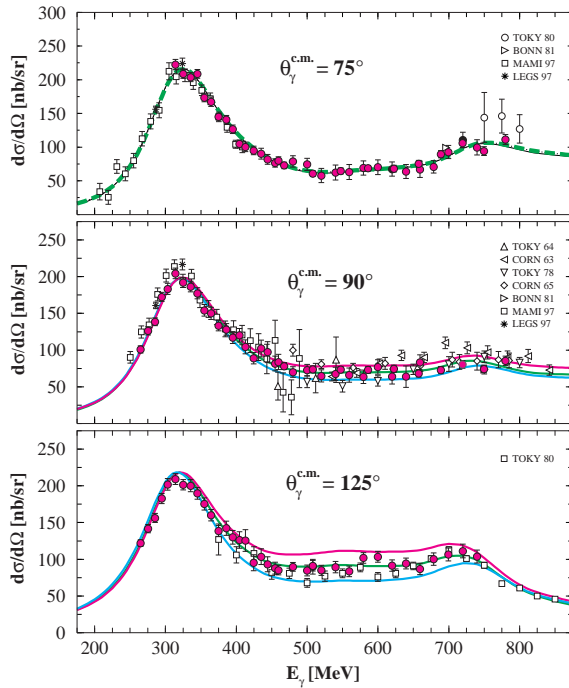
11 Der Stabilitäts-Sombrero des σ -Mesons



Das aus current(Strom)-Quarks und Gluonen bestehende Nukleon ist instabil. Durch Anlagerung von Quark-Antiquark-Paaren entstehen größere "effektive" Massen der Quarks. Dem Stabilitätswert des σ -Feldes entspricht die Masse des Konstituenten-Quarks und des σ -Mesons.

Der Stabilitätssombrero dient allgemein zur Beschreibung von Phasen-Übergängen von einem instabilen Zustand in einen stabilen Zustand. Ein Beispiel ist der Magnetismus eines Ferromagneten. Wenn alle am Magnetismus beteiligten Elektronenspins in beliebige Richtungen zeigen, verschwindet der Magnetismus. Wenn alle diese Elektronenspins in dieselbe Richtung zeigen, liegt der ferromagnetische Zustand vor. Unterhalb der kritischen Temperatur ist der Zustand mit beliebig gerichteten Elektronenspins instabil, der ferromagnetische Zustand dagegen stabil. Der instabile und der stabile Zustand können durch den Stabilitätssombrero beschrieben werden. Im Falle des Nukleons entspricht die Current-Quark-Gluon-Mode dem instabilen Zustand und die Konstituenten-Quark-Meson-Mode dem stabilen Zustand. Als Parameter tritt hier anstelle der Magnetisierung das σ -Feld auf. Der Erwartungswert des σ -Feldes bezeichnet den Stabilitätspunkt. Die Masse des σ -Mesons und damit auch die Nukleon-Masse sind diesem Erwartungswert proportional.

12 Experimenteller Nachweis des σ -Mesons



Streuung von Photonen am Proton. Alle Datenpunkte wurden in einem Experiment gewonnen. Im unteren Bild zeigt sich der Effekt des σ -Mesons. Nimmt man für die Rechnung verschiedene Massen an, so ergeben sich deutlich verschiedene Vorhersagen. Die obere Kurve entspricht einer Masse von 800 MeV, die mittlere von 600 MeV und die untere von 400 MeV.

In der Konstituentenquark-Meson-Phase, also der stabilen Phase, ist das σ -Meson Bestandteil der Konstituenten-Quarks. Eine besondere Eigenschaft des σ -Mesons ist, dass es gleichzeitig an zwei Photonen koppelt. Dabei ist bei einem Streuvorgang das von der Quelle kommende einlaufende Photon das erste dieser beiden Photonen und das nach dem Streuvorgang ausgesandte Photon das zweite. Das σ -Meson ist damit einem hell leuchtenden Punkt auf dem Konstituenten-Quark ähnlich. Diese besondere Eigenschaft macht es möglich, das σ -Meson nachzuweisen. Dazu wurde am Elektronen-Beschleuniger in Mainz eine umfangreiche Apparatur aufgebaut, zu der mehrere europäische Universitäten (Mainz, Göttingen, Tübingen, Genua, Gent, Glasgow) beigetragen haben. Mit dieser Apparatur konnte die Streuung von Photonen in einem großen Energie- und Winkelbereich gemessen werden. Wie erwartet, zeigte sich bei großen Energien und großen Winkeln ein starker Beitrag des σ -Mesons, dessen Masse in Übereinstimmung mit dem erwarteten Wert bestimmt werden konnte. Einzelheiten werden auf der vorhergehenden Figur beschrieben. Die Figur zeigt die Streuintensität für drei Winkel von 75, 90 und 125. Die drei verschiedenfarbigen Kurven wurden für verschiedene angenommene σ -Meson-Massen berechnet. Bei dem Streuwinkel 125 wird die Abhängigkeit der berechneten Kurve von der angenommenen σ -Meson-Masse deutlich, so dass hier diese Masse aus den Messdaten entnommen werden kann.

13 Nobelpreise für Englert&Higgs (2013), Nambu (2008)



Englert

Higgs

Nambu

Die Entdeckung des σ Meson erlaubt eine Neuinterpretation der Nobelpreis-Arbeit von Nambu. Dies geschieht in der Arbeit:

“Nambu’s Nobel Prize, the σ meson and the mass of visible matter”

Martin Schumacher, Ann. Phys. (Berlin) 215-226 (2014)

Im Jahre 1961 veröffentlichte Nambu zusammen mit seinem jüngeren Kollegen Jonas-Lasinio eine Arbeit, die heute generell als Prototyp für eine Beschreibung der Masseerzeugung durch spontane Symmetriebrechung gilt. Darunter muss man sich einen Vorgang vorstellen, wie er durch den Stabilitätssombbrero des σ -Mesons beschrieben wird. Da das σ -Meson nicht bekannt war und bezweifelt wurde, dass es existiert, blieb diese Theorie unvollständig. Trotzdem erhielt Nambu für diese Arbeit 2008 den Nobelpreis für Physik mit der Begründung, dass Nambu zumindest ein Beispiel für den Vorgang der Symmetriebrechung gegeben habe. Die eigentliche Theorie der Massenerzeugung durch Symmetriebrechung wird dagegen Englert und Higgs zugeschrieben, die im Jahre 2013 nach der Entdeckung des Higgs-Bosons 2012 den Nobelpreis bekommen haben. Meine Arbeit “Nambu’s Nobel Prize, the σ -meson and the mass of visible matter”, Martin Schumacher, Ann. Phys (Berlin) 215 - 266 (2014) korrigiert diese Auffassung mit dem Hinweis, dass nach dem durch uns erfolgten Nachweis des σ -Mesons die Masse-Erzeugung des Nukleon in zwei Schritten erfolgt, die von einem formalen Standpunkt aus äquivalent sind. Die kleine elementare current-Quark-Masse wird vom Higgs-Boson vermittelt und die grosse zusätzliche Masse der Konstituenten-Quarks durch das σ -Meson.

RETROSPECT – Highlights from recent Annalen der Physik issues

NOBEL LECTURE

Volume 526 | Issue 5–6 | Pages 201–210 (2014)

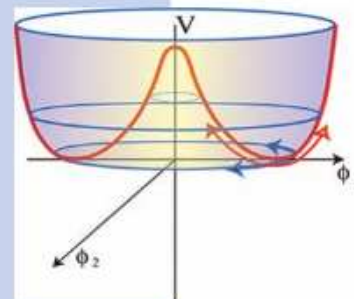
The BEH mechanism and its scalar boson

(free access)

F. Englert

DOI: 10.1002/andp.201400881

The theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles was recently confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider. In his Nobel lecture, F. Englert gives an overview of this research which has led to the Nobel Prize in Physics in 2013 which he shared with Peter W. Higgs.



NOBEL LECTURE

Volume 526 | Issue 5–6 | Pages 211–213 (2014)

Evading the Goldstone theorem

(free access)

P. W. Higgs

DOI: 10.1002/andp.201400882

Peter W. Higgs describes in detail his interest from 1960 in the work of Nambu and Goldstone and the background events leading to the papers of 1964 that showed how one can evade the Goldstone theorem using a gauge theory. He also discusses how these ideas have been developed by others to culminate in the electroweak theory of the Standard Model.



REVIEW ARTICLE

Volume 526 | Issue 5–6 | Pages 215–226 (2014)

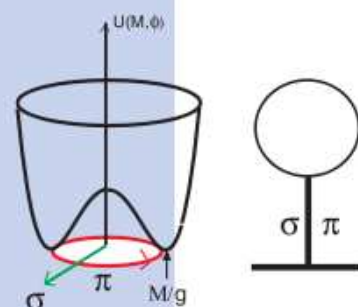
Nambu's Nobel Prize, the σ meson and the mass of visible matter

(free access)

Martin Schumacher

DOI: 10.1002/andp.201400077

The electroweak Higgs boson has been discovered in ongoing experiments at the LHC, leading to a mass of this particle of 126 GeV. This Higgs boson mediates the generation of mass for elementary particles, including the mass of elementary (current) quarks. These current-quark masses leave 98% of the mass of the atom unexplained. This large fraction is mediated by strong interaction, where instead of the Higgs boson the σ meson is the mediating particle. Though already introduced in 1957 by Schwinger, the σ meson has been integrated out in many theories of hadron properties because it had not been observed and was doubted to exist. With the observation of the σ meson in recent experiments on Compton scattering by the nucleon at MAMI (Mainz) it has become timely to review the status of experimental and theoretical researches on this topic.



14 Retrospect

Nach der Entdeckung des σ -Mesons durch unser Experiment in Mainz publizierte ich 2014 eine Arbeit, in der die Theorie von Nambu und Jona-Lasinio und damit auch die Begründung für Nambus Nobelpreis neu bewertet wurde. Diese Arbeit trägt den Titel “Nambu’s Nobel Prize, the σ meson and the mass of visible matter”. Da ich unsicher war, welche Zeitschrift für diese Arbeit geeignet sein würde, versuchte ich es mit den Annalen der Physik, die zu Anfang des 20. Jahrhundert alle Arbeiten Einsteins veröffentlicht hatte. Da ich bisher noch nicht in dieser Zeitschrift veröffentlicht hatte, hatte ich naturgemäß noch keine schlechte Erfahrung mit dieser Zeitschrift gemacht. Nach einigen Tagen des Wartens erhielt ich eine Nachricht des Herausgebers mit der Mitteilung, dass der Verlag sehr an meiner Arbeit interessiert sei und man sie gern zusammen mit den Nobel-Lectures von Englert und Higgs veröffentlichen würde. Die Arbeit wurde danach noch zu zwei Referenten gesandt, die aber keine wesentlichen Einwände hatten. Für mich war diese positive Erfahrung keineswegs selbstverständlich, da meine in der Arbeit dargelegte Interpretation der Ergebnisse Nambus der gängigen Auffassung widersprach. Zu meiner Freude wurde meine Arbeit zusammen mit denen von Englert und Higgs in einem RETROSPECT - “Highlight from recent Annalen der Physik issues” als besonders wichtig bewertet.