

Die Struktur von Proton und Neutron

VON PROF. DR. H. SCHOPPER

INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE
UND DES KERNFORSCHUNGSZENTRUMS KARLSRUHE

Es wird ein kurzer Überblick über den Stand der Erforschung der Struktur von Proton und Neutron gegeben. Die bisherigen Ergebnisse wurden durch die Streuung schneller Elektronen gewonnen.

I. Einleitung

Bei der Erforschung des Makrokosmos wird versucht, in immer größere Tiefen des Weltraumes vorzustoßen. Die entferntesten zur Zeit bekannten Objekte, z. B. die Radio-Quelle 3C/295, sind von der Erde etwa 10^{27} cm entfernt. In den Mikrokosmos ist man bis zu kleinsten Dimensionen von etwa 10^{-14} cm eingedrungen.

Das letzte Ziel bei der Erforschung des Weltraums besteht, soweit es die Grundlagenforschung angeht, darin, den Aufbau und die Entstehung des Kosmos zu verstehen, während die Elementarteilchen-Physik die Struktur der Materie und ihrer Bestandteile zu klären versucht. Die Ideen zur Entstehung und Umformung der Elementarteilchen sind ganz eng verbunden mit den Vorstellungen über den Ursprung und die Entwicklung des Kosmos. Der Fortschritt bedingt immer kostspieligere Instrumente: Riesige optische und Radio-Teleskope sowie Satellitenobservatorien auf der einen, immer größere Beschleuniger auf der anderen Seite.

In den vergangenen Jahren ist es gelungen, einige entscheidende Schritte bei der Erforschung der Elementarteilchen-Struktur zu tun. Zum erstenmal konnte man zeigen, daß die Grundbausteine der Materie, das Proton und das Neutron, eine Struktur besitzen, also im strengen Sinn gar nicht elementar sind [1]. Obwohl sich die Fragestellungen und Methoden der Elementarteilchen-Physik weit von denen der klassischen Chemie entfernt haben, so mag es doch auch für Chemiker interessant sein, den derzeitigen Stand kennenzulernen. Schließlich waren es Chemiker wie Dalton und Avogadro, welche die ersten experimentellen Anhaltspunkte für eine atomistische Struktur der Materie fanden.

Allerdings stellten dann die Physiker fest, daß die von den Chemikern entdeckten Atome nur in Bezug auf chemische Methoden unzerlegbar sind. Es folgte die große Zeit der Physik der Atomhülle mit der gleichzeitigen Entwicklung der Quantenmechanik. Das Ergebnis war ein vollständiges Verständnis des Aufbaus der Atomhülle und der Kräfte, die sie zusammenhalten. Die Frage „was ist Materie“ wurde dabei jedoch nicht beantwortet, denn die berühmten Versuche von Rutherford zeigten, daß praktisch die gesamte Masse eines Atoms in seinem Kern vereinigt ist. Die längst noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen der Kernphysiker erwiesen, daß alle Atomkerne aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt sind, und es schien daher als ob diese beiden Teilchen, die Nukleonen, die letzten Bausteine der Materie seien. Zweifel tauchten jedoch auf, als man fand, daß das freie Neutron kein stabiles Teilchen ist, sondern sich mit einer Halbwertszeit von etwa 12 min unter Aussendung eines Elektrons und eines Neutrinos in ein Proton umwandelt [2]. Die Lage wurde noch verwickelter, als man nach 1945 zahlreiche, allerdings sehr kurzlebige, neue Elementarteilchen (Mesonen, Kaonen, Fremde Teilchen) entdeckte [3].

Aus verschiedenen Gründen vermutete man, daß alle diese Teilchen gar nicht elementar seien, sondern ihrerseits eine Struktur besäßen. Mit Hilfe der Streuung sehr schneller Elektronen an Protonen und Neutronen gelang es erstmals, eine solche Struktur von Elementarteilchen tatsächlich festzustellen [1]. Obwohl die bisherigen Ergebnisse noch keineswegs endgültig sind, ist

[1] R. W. Mc. Allister u. R. Hofstadter, *Physic. Rev.* **102**, 851 (1956); M. R. Yearian u. R. Hofstadter, *ibid.* **111**, 934 (1958).

[2] A. N. Sosnovsky et al., *Nuclear Physics* **10**, 395 (1958).

[3] W. S. C. Williams: *Introduction to Elementary Particles*. Academic Press, New York 1961.

jedoch schon jetzt ein wichtiger Tatbestand gesichert: Während man früher beim Vordringen in eine neue Größenordnung von kleinen Dimensionen neue Bausteine der Materie entdeckt hatte (Atome, Elektronen, Protonen und Neutronen), scheint dies hier nicht der Fall zu sein. Zwar führte auch die Untersuchung der Nukleonen zur Entdeckung neuer Teilchen – wie weiter unten noch ausgeführt werden soll – jedoch sind diese in keiner Weise elementarer als die bisher bekannten. Sie sind sogar extrem kurzlebig und können daher keinesfalls als letzte, unteilbare Bestandteile der Materie angesehen werden. Die Frage „was ist Materie“ scheint dadurch noch komplizierter geworden zu sein.

II. Indirekte Hinweise auf eine Struktur der Nukleonen

Die Entdeckung, daß das Neutron ein magnetisches Moment von $-1,91 \mu_K$ (μ_K = Bohrsches Kern-Magneton; das negative Vorzeichen bedeutet, daß Spin und magnetisches Moment entgegengesetzt gerichtet sind) besitzt, war zunächst sehr überraschend, da in der klassischen Physik ein magnetisches Moment stets auf Kreisströme zurückgeführt wird. Da das Neutron jedoch elektrisch neutral ist, schien es unverständlich, wie ein magnetisches Moment ohne elektrische Ladungen zustande kommen kann.

Jedoch auch beim Proton wurde ein anomales magnetisches Moment gefunden. Das gesamte magnetische Moment des Protons beträgt $+2,793 \mu_K$, während man auf Grund der Diracschen Theorie nur $+1 \mu_K$ erwarten sollte. Es fällt dabei auf, daß der anomale Anteil, nämlich $+1,79 \mu_K$, dem Absolutbetrag nach dem magnetischen Moment des Neutrons entspricht.

Das Zustandekommen der normalen Diracschen magnetischen Momente bei Elektron und Proton stellt man sich nach der relativistischen Quantenmechanik so vor, daß das Teilchen, auch wenn es kräftefrei ist, eine mikroskopische Zitterbewegung ausführt, die im Mittel kleine Kreisströme liefert. Diese Momente setzen also nicht eine Struktur der Teilchen voraus, sondern die Teilchen können wie in der klassischen Physik als punktförmig angesehen werden.

Ein prinzipielles Verständnis der anomalen Momente dagegen scheint nur unter der Annahme möglich zu sein, daß Proton und Neutron keine echten Elementarteilchen sind, sondern daß in ihrem Innern Kreisströme fließen [4]. Als Träger dieser Ströme kommen aber nicht Elektronen infrage, da aus vielen Gründen, die in jedem Lehrbuch über Beta-Zerfall diskutiert werden, Elektronen in Atomkernen nicht existieren können. Andere stabile Ladungsträger sind aber nicht bekannt. Nach dem Grundgedanken von Yukawas [5] Mesonentheorie ist die Struktur von Proton und Neutron nicht auf stationäre, sondern auf instabile Teilchen zurückzuführen, die nur für eine kurze Zeit im Innern von Proton und Neutron kreisen, aber bald wieder einge-

fangen werden. Als solche Teilchen kamen zunächst π -Mesonen in Betracht, die in drei Ladungszuständen existieren, nämlich positiv, negativ und neutral. Wir werden jedoch später sehen, daß heute neben den π -Mesonen weitere Teilchen zur Nukleonen-Struktur beitragen können.

Im einfachsten Fall kann ein Proton in ein π^+ -Meson und ein Neutron dissoziieren. In ähnlicher Weise dissoziiert ein Neutron in ein π^- -Meson und ein Proton. Die erzeugten π -Mesonen umgeben dabei die „nackten“ Nukleonen als Wolke (Abb. 1) [4]. Die Theorie sagt voraus, daß die Mesonen in Bahnen mit nicht verschwindendem Bahndrehimpuls erzeugt werden [4], d. h. sie

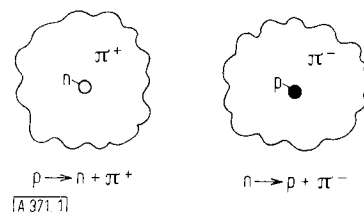


Abb. 1. Virtuelle Dissoziation der Nukleonen in Mesonenwolke und „nacktes“ Nukleon.

umkreisen das zurückbleibende Nukleon. Dabei entstehen Kreisströme, welche die anomalen magnetischen Momente verursachen. Wegen der entgegengesetzten Mesonenladung bei Proton und Neutron wird es auch verständlich, warum die anomalen Momente verschiedene Vorzeichen besitzen. Außerdem ist seit längerem bekannt [3], daß die zwischen den Nukleonen und Mesonen wirkenden Kernkräfte unabhängig von der elektrischen Ladung sind. Die Wahrscheinlichkeit für die Emission eines Mesons sollte daher bei Proton und Neutron die gleiche sein; dadurch wird es weiterhin verständlich, daß die beiden anomalen magnetischen Momente etwa den gleichen Absolutbetrag besitzen.

Außer den Zwischenzuständen, in denen sich ein Meson befindet, wird es auch solche geben, in die zwei oder mehrere Mesonen emittiert werden. Aber auch andere virtuelle Teilchen können auftreten. z. B. Kaonen oder Proton-Antiproton-Paare. Es gelang bisher nicht, aus der Theorie quantitative Aussagen über den Beitrag der verschiedenen virtuellen Zustände zur Gesamtstruktur der Nukleonen abzuleiten [4].

Wenn diese Vorstellung über das Zustandekommen der anomalen magnetischen Momente richtig ist, dann folgt daraus unmittelbar, daß die Nukleonen eine räumlich ausgedehnte Verteilung der elektrischen Ladung besitzen müssen. Man wird erwarten, daß im Zentrum ein nahezu punktförmiges „nacktes“ Nukleon sitzt, um das herum eine oder mehrere Wolken oder Schalen virtueller Teilchen angeordnet sind. Einzelheiten der Struktur lassen sich natürlich aus den magnetischen Momenten allein nicht ableiten, aber es läßt sich wenigstens mit der Heisenbergschen Unschärfe-Relation die zu erwartende Ausdehnung der Struktur grob abschätzen.

Die Zeit, nach der ein emittiertes Meson wieder eingefangen wird, ist gegeben durch $\Delta t \cdot \Delta E = h/2\pi$. Um die größtmögliche Zeit Δt zu bestimmen, müssen wir in diese Beziehung die kleinstmögliche Energie ΔE setzen.

[4] D. R. Yennie, D. G. Ravenhall u. M. M. Levy, Rev. mod. Physics 29, 144 (1957).

[5] H. Yukawa, Proc. physico-math. Soc. Japan 17, 48 (1935).

Diese ist durch die Ruhemasse m des virtuellen Teilchens gegeben zu $E = mc^2$. Die größte Entfernung, die ein Teilchen in der Zeit Δt zurücklegen kann, ist, wenn es sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, gleich der sogenannten Compton-Wellenlänge $\lambda/2\pi = \Delta t \cdot c = (h/2\pi)mc$. Für das π -Meson ist $\lambda/2\pi = 1,4 \cdot 10^{-13}$ cm. Dieser Wert gibt einen Anhaltspunkt für die zu erwartende räumliche Ausdehnung der Nukleonen.

III. Untersuchung der Nukleonen-Struktur durch Elektronen-Streuung

Bei Kristallen und Molekülen kann man die Struktur indirekt aus der Elektronen- oder Röntgenbeugung erschließen. Aus der Winkelverteilung der gestreuten Elektronen lassen sich dort Rückschlüsse auf die räumliche Anordnung der Streuzentren ziehen. Die Methode der Elektronenbeugung läßt sich ohne weiteres auf die Untersuchung der Nukleonenstruktur übertragen, allerdings muß die Wellenlänge der Elektronen dabei von der Größenordnung 10^{-13} cm sein, da eine Struktur nur dann aufgelöst werden kann, wenn ihre Details mit der Wellenlänge des benutzten Lichtes vergleichbar sind.

Eine zusätzliche Schwierigkeit tritt dadurch auf, daß die Elektronen nicht nur von der elektrischen Ladung des Protons gestreut werden, sondern es tritt auch eine Wechselwirkung zwischen dem magnetischen Moment des Elektrons und des Protons auf. Diese beiden Einflüsse müssen durch eine geeignete Analyse getrennt werden. Dazu muß ein theoretischer Zusammenhang zwischen der beobachteten Streuverteilung und der räumlichen Verteilung der Streuzentren bekannt sein [6].

Der Streuquerschnitt für die Ablenkung eines Elektrons durch ein punktförmiges Proton läßt sich leicht berechnen [4]. Kennt man diesen „Punktschuerschnitt“, dann kann daraus die Streuung an einem räumlich ausgedehnten Proton abgeleitet werden, indem man sich dieses aus vielen punktförmigen Teilchen zusammengesetzt denkt. Man braucht dazu nur die von den einzelnen Streuzentren herrührenden Streuwellen zu summieren. Da es sich um eine kohärente Streuung handelt, müssen die einzelnen Partialwellen phasenrichtig zusammengesetzt werden. Ein solches Vorgehen ist von der Röntgenstreuung her sehr gut bekannt. Bei der Untersuchung von Kristallen hat man es allerdings mit Streuzentren zu tun, die in einem regelmäßigen Gitter angeordnet sind, während bei den Nukleonen eine kontinuierliche Dichteverteilung zu erwarten ist. Die Verhältnisse sind daher eher mit der Röntgenstreuung an Molekülen im Gaszustand oder an Flüssigkeiten zu vergleichen.

Es ist zweckmäßig, aus den gemessenen Streuintensitäten nicht unmittelbar die räumliche Verteilung der Streuzentren abzuleiten, sondern zunächst den sogenannten Formfaktor zu bestimmen, der eine Funktion des auf das streuende Teilchen übertragenen Rückstoßimpulses q ist [4]. Mathematisch gesehen, verhalten sich der Formfaktor und die Dichteverteilung der streuenden Teilchen wie Fourier-Transformierte zueinander [*]. Auf die mathematische Formulierung wird verzichtet; dafür werden an Hand von Abbildung 2 die wichtigsten Eigenschaften des Formfaktors diskutiert, die uns spä-

[6] R. Hofstadter: High-Energy Electron Scattering Tables. Stanford University Press 1960.

[*] Bei der Röntgenbeugung spricht man auch vom Übergang zum Reziproken-Gitter.

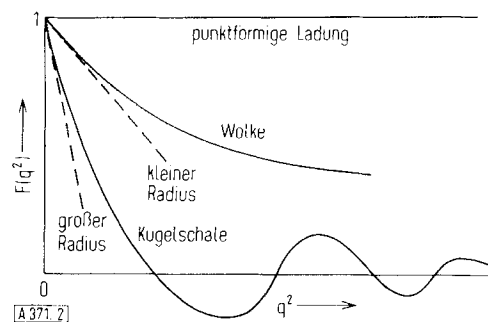


Abb. 2. Schematische Darstellung des Formfaktors F als Funktion des Rückstoßimpulses q für verschiedene Ladungsverteilungen. Je größer die Steigung (gestrichelte Tangente) am Punkt $q^2 = 0$, $F(q^2) = 1$ ist, um so größer ist der mittlere Radius der Verteilung.

ter eine Interpretation der Meßergebnisse ermöglichen sollen.

Zu einer punktförmigen Ladungsverteilung gehört ein konstanter Formfaktor (Abb. 2). Sind die Streuzentren räumlich verteilt, so fällt der Formfaktor mit zunehmendem q^2 um so stärker ab, je größer der mittlere Radius der Verteilung ist. Aus der Tangente am Punkt $q^2 = 0$ läßt sich der mittlere Radius \bar{r} unmittelbar ablesen, da gilt: $[\partial F / \partial q^2]_{q^2=0} = -\bar{r}/6$. Der Verlauf des Formfaktors bei hohen q -Werten gibt Aufschluß über Einzelheiten der Struktur. Eine diffuse Verteilung ergibt einen monoton abfallenden Formfaktor, während Dichteverteilungen mit scharfen Rändern oder gitterförmiger Anordnung zu Oszillationen des Formfaktors führen. Es läßt sich weiterhin leicht zeigen, daß der Wert des Formfaktors bei $q^2 = 0$ die gesamte Ladung angibt, die vom Formfaktor beschrieben wird. Die in Abbildung 2 gezeigten Formfaktoren beschreiben also jeweils eine Elementarladung. Eine Dichteverteilung, die sich aus einer diffusen Wolke und einem punktförmigen Kern zusammensetzt, würde durch einen Formfaktor charakterisiert werden, wie er in Abbildung 3 dargestellt ist.

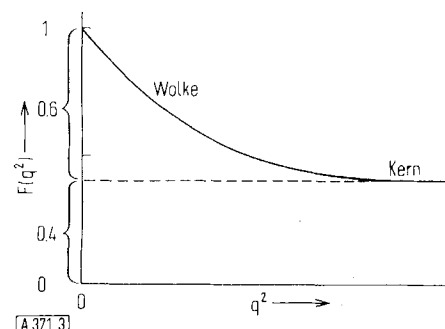


Abb. 3. Schematische Darstellung des Formfaktors F in Abhängigkeit vom Rückstoßimpuls q für eine kombinierte Ladungsverteilung. Die Ladung ist zu 40 % in einem punktförmigen Kern konzentriert, zu 60 % in einer diffusen Wolke verteilt.

Man muß aus den Streuexperimenten zwei Formfaktoren gewinnen, einen, der die Verteilung der elektrischen Ladung angibt und einen zweiten, der die Verteilung der magnetischen Dipolmomente beschreibt. Die Bestimmung beider Formfaktoren ist möglich, wenn man nicht nur die Streuung in Abhängigkeit vom Streuwinkel, sondern auch noch als Funktion der Energie der einfallenden Elektronen untersucht. Da die „elek-

trische“ und die „magnetische“ Streuung in verschiedener Weise von Winkel und Energie abhängen [4], ist eine Trennung der beiden Effekte möglich.

IV. Die Experimente

Wie oben auseinandergesetzt wurde, müssen die Elektronen, wenn man Einzelheiten der Nukleonenstruktur beobachten will, einer Wellenlänge von etwa 10^{-13} cm entsprechen. Dies bedeutet, daß die Elektronen Energien von einigen 100 MeV besitzen müssen. Die Nukleonenstruktur kann daher nur mit großen Elektronenbeschleunigern untersucht werden.

Die ersten bahnbrechenden Versuche wurden von *Hofstadter* und Mitarbeitern in Stanford (USA) vor etwa 7 Jahren mit einem Linearbeschleuniger bei einer maximalen Energie von zunächst etwa 500 MeV durchgeführt [1]. Vor etwa zwei Jahren wurden Versuche an der Cornell-Universität, Ithaca (USA), von *Wilson* und Mitarbeitern mit Hilfe eines Elektronen-Synchrotrons, also eines Kreisbeschleunigers, bei einer maximalen Energie von etwa 1400 MeV aufgenommen [7]. Kürzlich wurde auch in Orsay bei Paris [8] ein Elektronen-Linearbeschleuniger mit einer maximalen Energie von etwa 1000 MeV und in Cambridge (USA) ein Synchrotron mit 6000 MeV in Betrieb genommen. Erfreulicherweise wird es auch in Deutschland bald möglich sein, solche Versuche durchzuführen, da das Synchrotron in Hamburg (DESY) für eine maximale Energie von 6000 MeV gerade in Betrieb genommen wurde.

Als Beispiel für eine experimentelle Anordnung möchte ich kurz auf die Verhältnisse in Cornell eingehen, wo ich selbst Gelegenheit hatte mitzuarbeiten [7]. Die Anordnungen in Cambridge und in Hamburg sind im Prinzip ganz ähnlich.

In Abbildung 4 ist die experimentelle Anordnung schematisch dargestellt. Zwischen den Magneten des Syn-

chrotrons, die die Elektronen auf einer kreisförmigen Bahn halten, befinden sich gerade Abschnitte. In einem von diesen wurde eine Streukammer angebracht, in deren Zentrum sich ein Wasserstoff-Target befindet. Die Verwendung eines Targets im Innern der Maschine hat den Vorteil, daß die beim einmaligen Durchtritt durch das Target nicht gestreuten Elektronen in der Maschine im Kreise herumlaufen und mehrmals auf das Target treffen können. Man kann bis zu etwa 100 solcher Mehrfachdurchgänge erreichen. Die gestreuten Elektronen werden mit Hilfe eines Magnetspektrometers analysiert, um elastisch gestreute Elektronen von unelastisch gestreuten abzutrennen. Die Elektronen werden mit zwei Szintillationszählern und einem sogenannten Čerenkovzähler, mit dem sie von stets gleichzeitig vorhandenen π -Mesonen unterschieden werden können, nachgewiesen. An der Außenseite des Synchrotrons ist ein weiteres Spektrometer zu sehen, um die bei der Elektronenstreuung entstehenden Rückstoßprotonen gleichzeitig in Koinzidenz mit den Elektronen nachzuweisen. Dadurch kann die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messungen wesentlich erhöht werden.

Für die Untersuchung des Protons werden als Target entweder wasserstoffhaltige Substanzen (z. B. Polyäthylen) oder flüssiger Wasserstoff benutzt. Da es leider keine reinen Neutronen-Targets gibt, muß man für die Untersuchung des Neutrons Deuterium, am besten flüssig, verwenden. Außer der Streuung am Neutron tritt dabei natürlich auch die Streuung am Proton auf. Es läßt sich zeigen, daß man bei hohen Elektronenenergien die Bindung zwischen Neutron und Proton im Deuteron in erster Näherung vernachlässigen kann und daher die schon bekannte Streuung am Proton von der Streuung am Deuteron abziehen darf; es bleibt die Streuung am Neutron. Wie groß allerdings die Fehler bei einer solchen Subtraktion sind, ist bisher theoretisch noch nicht völlig geklärt; aus diesem und mehreren anderen Gründen sind daher die Ergebnisse für die Streuung am Neutron prinzipiell wesentlich unsicherer als diejenigen für das Proton [4].

Eine Hauptschwierigkeit bei den Messungen besteht darin, daß bei hohen Energien und großen Streuwinkeln die Streuwahrscheinlichkeit äußerst gering ist. Man erhält Zählraten von einigen Teilchen pro Stunde. Dies führt zu äußerst langen Meßzeiten, und die Beseitigung systematischer experimenteller Fehler ist sehr schwierig.

V. Die Meßergebnisse und ihre Deutung

Die Formfaktoren für die elektrische und magnetische Dichteverteilung im Proton, die sich aus den bisherigen Messungen [9] ableiten lassen, sind in Abbildung 5 dargestellt. Aus diesen Ergebnissen lassen sich unmittelbar einige qualitative Schlüsse ziehen, ohne daß man auf eine detaillierte Auswertung einzugehen braucht. Zunächst ist offenkundig, daß die Formfaktoren nicht konstant sind, woraus folgt, daß das Proton kein punktförmiges Teilchen ist. Aus den Steigungen am Punkt $q^2 = 0$ lassen sich die mittleren Radien bestimmen, und man erhält für die Verteilung der elektrischen Ladung

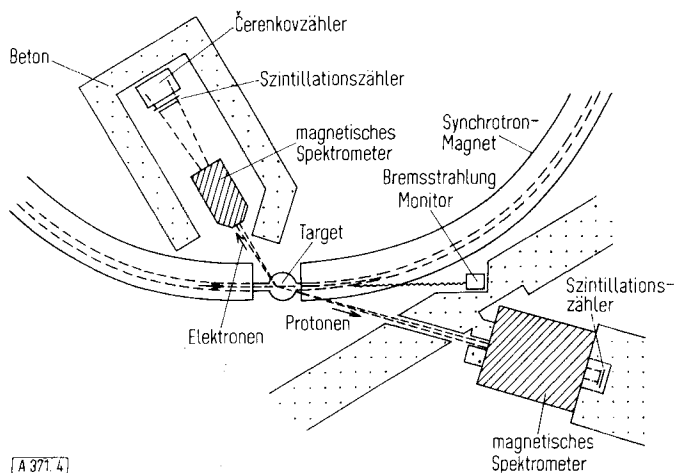


Abb. 4. Schema der experimentellen Anordnung zur Elektronenstreuung an Nukleonen [Cornell-Universität, Ithaca, N.Y. (USA)].

[7] D. M. Olson, H. F. Schopper u. R. R. Wilson, *Phys. Rev. Letters* 6, 286 (1961); R. M. Littauer, H. F. Schopper u. R. R. Wilson, *ibid.* 7, 141 (1961); K. L. Berkelman, M. Feldman, R. M. Littauer, G. Rouse u. R. R. Wilson, *Phys. Rev.* 130, 2061 (1963).

[8] P. Lehmann, R. Taylor u. R. W. Wilson, *Phys. Rev.* 126, 1183 (1962).

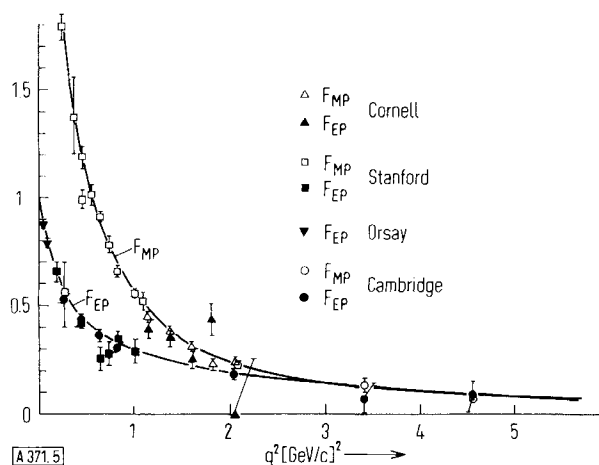


Abb. 5. Experimentelle Formfaktoren F des Protons als Funktion des Rückstoßimpulses q . F_{EP} = Formfaktor für die Verteilung der elektrischen Ladung; F_{MP} = Formfaktor für die Verteilung der magnetischen Dipolmomente.

des Protons $r_{EP} = 1,0 \cdot 10^{-13}$ cm und für die des magnetischen Dipols des Protons $r_{MP} = 1,0 \cdot 10^{-13}$ cm.

Die Radien für die beiden Verteilungen stimmen überraschenderweise, innerhalb der Unsicherheiten von etwa 10 %, überein. Weiterhin scheinen die neuesten Messungen bei sehr hohen q^2 -Werten darauf hinzuweisen, daß die beiden Formfaktoren monoton abfallen und nichts auf ihr Konstantwerden hindeutet [9]. Nach den Ausführungen in Abschnitt II würde dies bedeuten, daß das Proton keinen punktförmigen Kern besitzt.

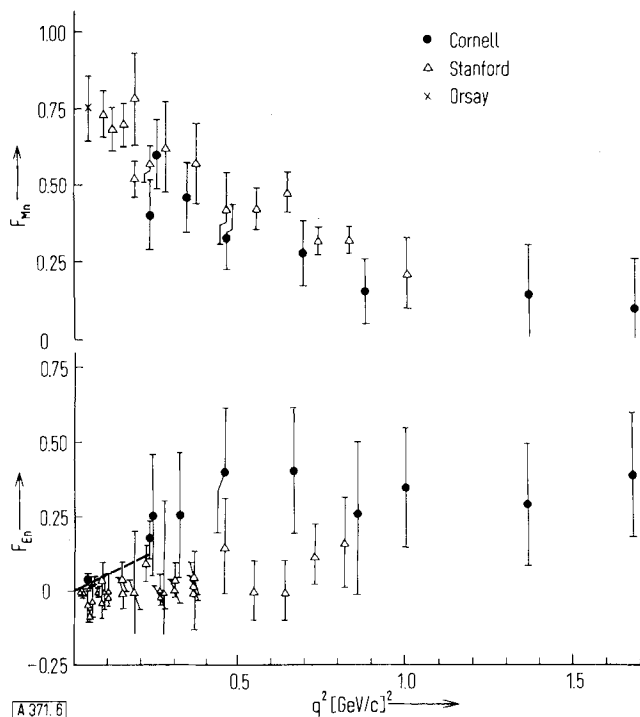


Abb. 6. Experimentelle Formfaktoren F des Neutrons als Funktion des Rückstoßimpulses q . F_{EN} = Formfaktor für die Verteilung der elektrischen Ladung; F_{MN} = Formfaktor für die Verteilung der magnetischen Dipolmomente.

[9] K. W. Chen, A. A. Cone, J. R. Dunning, S. G. Frank, N. F. Ramsey, J. Walker u. R. Wilson, *Physic. Rev. Letters* 11, 561 (1963).

[10] C. de Vries, R. Hofstadter, A. Johansson u. R. Herman, Vorabdruck aus *Physic. Rev.*

Die Ergebnisse für das Neutron (siehe Abb. 6) [7,8,10] sind noch sehr viel unsicherer als die für das Proton. Der Formfaktor für die Verteilung der elektrischen Ladung beginnt beim Wert Null, da das Neutron insgesamt keine elektrische Ladung besitzt. Die Steigung des Formfaktors am Beginn, und damit der Radius der Ladungsverteilung, ist seit längerem aus der Streuung thermischer Neutronen an Atom-Elektronen bekannt [4]. Es ergab sich $r_{EN} = 0,4 \cdot 10^{-13}$ cm. Der weitere Verlauf ist noch ungewiß, da sich die Messungen zum Teil widersprechen. Die durchweg kleinen Werte des Formfaktors deuten jedoch darauf hin, daß die lokalen Abweichungen von der elektrischen Neutralität im Innern des Neutrons nirgends sehr groß sind. Im Gegensatz dazu ist der Verlauf des magnetischen Formfaktors des Neutrons dem des Protons sehr ähnlich. Der daraus abgeleitete mittlere Radius $r_{MN} = 1,0 \cdot 10^{-13}$ cm stimmt sogar innerhalb der Meßfehler mit demjenigen des Protons überein.

Um weitere Einzelheiten über die Struktur aus dem Verlauf der Formfaktoren entnehmen zu können, sind recht komplizierte theoretische Überlegungen notwendig; eine endgültige Antwort kann bisher nicht gegeben werden. Jedoch folgten aus solchen Untersuchungen einige sehr wichtige und überraschende Konsequenzen.

Alle theoretischen Ansätze blieben bisher erfolglos, die versuchten, die experimentellen Radien von etwa $1 \cdot 10^{-13}$ cm dadurch zu erklären, daß die Nukleonen im wesentlichen aus π -Mesonenwolken bestehen würden [4]. Die π -Mesonen liefern stets zu große Radien. In dieser Situation wurde vor einigen Jahren der zunächst kühne Gedanke geäußert, daß nicht die π -Mesonen, sondern andere noch unbekannte Teilchen für die Nukleonen-Struktur verantwortlich seien (vgl. [11]). Da die Radien unmittelbar mit der Masse der Teilchen verknüpft sind (vgl. Abschnitt II), war es möglich, aus den gemessenen Radien die Masse des neuen Teilchens vorherzusagen. Sie ergab sich zu etwa dem drei- bis vierfachen Wert der π -Mesonenmasse. Ein solches Teilchen konnte bald bei verschiedenen Prozessen direkt beobachtet werden, so z. B. bei der Vernichtung von Antiprotonen mit Protonen [12]. Man kann sich das Teilchen als aus zwei π -Mesonen bestehend denken; es wurde daher zunächst als Di-Pion (heute ρ -Meson) bezeichnet. Etwas später wurde ein weiteres Teilchen entdeckt, das auch zur Nukleonen-Struktur beiträgt, aber aus drei π -Mesonen zusammengesetzt ist. Man nannte es zunächst Tri-Meson (heute ω -Meson). Beide Teilchen besitzen extrem kurze Lebensdauern von etwa 10^{-21} sec. Inzwischen wurden zahlreiche weitere Mesonen gefunden, die mit den bisher bekannten eine Familie zu bilden scheinen [12]. Die Symmetriestruktur dieser Familie zu verstehen, ist zur Zeit eine der interessantesten Fragen der Elementarteilchen-Physik.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Struktur von Proton und Neutron in mehreren Wolken mit Radien von etwa 10^{-13} cm besteht. Diese Wolken sind aus vir-

[11] S. Bergia, A. Stanghellini, S. Fubini u. C. Billi, *Physic. Rev. Letters* 6, 367 (1961); *Nuovo Cimento* 21, 155 (1961).

[12] Vgl. *Proceedings High Energy Conference, CERN 1962. Scientific Information Service 1962.*

tuellen ρ - und ω -Mesonen und vielleicht weiteren noch unbekannten Teilchen aufgebaut. Virtuell heißt, daß diese Teilchen sich jeweils nur für ganz kurze Zeit in der Wolke befinden und laufend vernichtet und erzeugt werden. Nur dadurch können so kurzlebige Teilchen wie das ρ - und ω -Meson überhaupt zur Struktur der Nukleonen beitragen. Wie sich die elektrischen Ladungen und die magnetischen Dipolmomente auf die einzelnen Wolken verteilen, ist bis jetzt nicht genau bekannt.

Die Entdeckung der neuen Mesonen bei der Untersuchung der Nukleonen-Struktur hat zu ganz neuen As-

pekten für das Verständnis der Kernkräfte – auch für den Zusammenhalt der Protonen und Neutronen in den Atomkernen – geführt. Die weitere Entwicklung ist noch nicht abzusehen.

Die bisherigen Untersuchungen haben keinen Hinweis auf die Existenz von letzten, unzerstörbaren Teilchen erbracht, vielmehr scheint sich beim Vordringen in immer kleinere Dimensionen alles in Abstraktion aufzulösen. Dies ist ein Ergebnis, das sicher auch von philosophischem Interesse sein dürfte.

Eingegangen am 22. Januar 1964 [A 371]

Intramolekulare Radikalreaktionen

VON DR. K. HEUSLER UND DR. J. KALVODA

CIBA AG., BASEL (SCHWEIZ)

In dieser Arbeit werden die sterischen Voraussetzungen für intramolekulare Radikalreaktionen und Einflüsse benachbarter funktioneller Gruppen auf den Reaktionsablauf diskutiert. Die Untersuchungen wurden hauptsächlich an Steroiden durchgeführt, einerseits weil hier die Geometrie des Ringgerüsts und die Substituentenabstände weitgehend feststehen; andererseits haben intramolekulare Radikalreaktionen in der Steroidchemie zur Substitution an nicht-aktivierten Kohlenstoffatomen auch praktische Bedeutung erlangt. Fast alle besprochenen Reaktionen beginnen mit der Bildung eines Sauerstoffradikals durch Oxydation eines Alkohols mit Bleitetraacetat oder Hypojodit.

A. Einleitung

Trotz der großen Zahl bekannter Radikalreaktionen sind die sterischen Voraussetzungen für den Angriff von Radikalen an gesättigten Verbindungen, die Natur und Geometrie der Übergangszustände bei derartigen Reaktionen, die Einflüsse benachbarter funktioneller Gruppen und oft auch die Bedeutung des Reaktionsmediums für den Reaktionsablauf weit weniger gut untersucht als bei heterolytischen Reaktionen. So ist z. B. die der S_N2 -Reaktion entsprechende Radikalsubstitution an einem Kohlenstoffatom bisher überhaupt nicht mit Sicherheit nachgewiesen worden [1] und die Fälle, in denen sich Nachbargruppen an homolytischen Reaktionen mit Sicherheit beteiligen, sind wenig zahlreich [2].

[1] Es ist allerdings nicht ausgeschlossen, daß es sich bei den von R. A. Ogg u. M. Polanyi, Trans. Faraday Soc. 31, 482 (1935), R. A. Herrmann u. R. M. Noyes, J. Amer. chem. Soc. 78, 5764 (1956), J. N. Pitts, R. S. Tolberg, u. T. W. Martin, ibid. 79, 6370, (1957), J. N. Pitts, D. D. Thompson u. R. W. Woolfolk, ibid. 80, 66 (1958), und J. E. Bujake, M. W. T. Pratt u. R. M. Noyes, ibid. 83, 1547 (1961), beschriebenen Reaktionen um Substitutionen dieses Types handelt.

[2a] J. E. Leffler, R. D. Faulkner u. C. C. Petropoulos, J. Amer. chem. Soc. 80, 5435 (1958).

[2b] J. C. Martin u. E. H. Drew, J. Amer. chem. Soc. 83, 1232 (1961).

[2c] W. G. Bentrude u. J. C. Martin, J. Amer. chem. Soc. 84, 1561 (1962); Chem. and Ind. 1959, 192.

[2d] R. H. Thompson u. A. G. Wylie, Proc. chem. Soc. (London) 1963, 65.

Die Kenntnisse über den Verlauf von Radikalreaktionen in Lösungen stammen hauptsächlich aus Untersuchungen bimolekularer homolytischer Reaktionen, häufig Kettenreaktionen, und sind 1957 von Walling zusammenfassend dargestellt worden [3]. Es ist der Zweck dieser Übersicht, auf einige neue Aspekte von Radikalreaktionen in Lösung – insbesondere auf stereochemische Probleme, Einflüsse benachbarter Gruppen und neue Möglichkeiten von Substitutionsreaktionen – hinzuweisen, deren Verständnis für eine präparative Verwendung solcher Umsetzungen von Bedeutung ist.

Wir haben für unsere Untersuchungen intramolekulare Radikalreaktionen gewählt, weil sie sich besonders gut zum Studium der sterischen Voraussetzungen und der Einflüsse benachbarter Gruppen eignen. Außerdem können bei intramolekularen Prozessen Reaktionstypen an Bedeutung gewinnen, deren intermolekulare Analoga aus Entropiegründen ungünstig sind. Die ge-

[2e] De Los F. De Tar u. A. Hlynsky, J. Amer. chem. Soc. 77, 4411 (1955).

[2f] G. W. Griffin u. E. J. O'Connel, J. Amer. chem. Soc. 84, 4148 (1962).

[2g] D. L. Tuleen, W. G. Bentrude u. J. C. Martin, J. Amer. chem. Soc. 85, 1938 (1963).

[3] Ch. Walling: Free Radicals in Solution. Wiley, New York 1957.