

Interner Bericht
DESY F1-71/6
Juli 1971

DESY-Bibliothek

22. SEP. 1971

Die Erforschung der Struktur der Materie mit
Elektronenbeschleunigern

von

Willibald Jentschke und Paul Söding

Die Erforschung der Struktur der Materie mit Elektronenbeschleunigern

Willibald Jentschke und Paul Söding

Einleitung

Die Frage nach der fundamentalen Struktur der Materie ist schon immer ein zentrales Problem der Physik und der Naturphilosophie gewesen. Bis ins 19. Jahrhundert hinein gab es hierüber allerdings nur Spekulationen. Erst mit der Entdeckung der chemischen Elemente, der Moleküle und der Atome wurde der erste Schritt zu einer empirischen Aufklärung des Aufbaus der Materie getan. Alle Materialien, mit ihren verschiedenen Molekülen, wurden als aus etwa 100 verschiedenen Arten von Atomen aufgebaut erkannt. Dann gelang zu Anfang dieses Jahrhunderts der Blick ins Innere des Atoms. Man fand, daß die verschiedenen Atome keine letzten Urbausteine der Materie darstellen, sondern daß sie aufgebaut sind aus einem winzigen elektrisch positiv geladenen Kern, etwa 10^{-12} cm im Durchmesser, umgeben von einem oder mehreren negativ geladenen Elektronen, deren verschiedene Anordnungen die chemischen Eigenschaften des Atoms bestimmen.

Zwischen 1930 und 1940 wurde der Aufbau der Atomkerne geklärt. Es zeigte sich, daß alle Atomkerne aus nur zwei verschiedenen Arten von Teilchen, den elektrisch positiv geladenen Protonen und den neutralen Neutronen, zusammengesetzt sind. Man lernte, die starken Kräfte, die Protonen und Neutronen im Atomkern zusammenhalten, technisch zu nutzen. Die Anzahl der Urbausteine aller Materie schien ziemlich klein: Das Proton und das Neutron, zusammen auch die Nukleonen genannt, den wesentlichen Teil der Masse unserer Materie darstellend; dazu das leichtere Elektron. Hinzu kam als einziges weiteres Elementarteilchen noch das Lichtquant oder Photon, das Quantum des elektromagnetischen Feldes.

Ab 1945 aber erfolgte eine bis heute anhaltende Bevölkerungsexplosion der Elementarteilchen, ausgelöst durch die Inbetriebnahme der großen Protonen- und Elektronenbeschleuniger, an denen man neue Teilchen in großer Zahl entdeckte. Insbesondere wurden mehr als

100 verschiedene Elementarteilchen mit Eigenschaften ganz ähnlichen denen des Protons und Neutrons gefunden; diese sogenannten "Hadronen" sind offensichtlich eng mit den Nukleonen verwandt, wenn sie auch wegen ihrer Instabilität am Aufbau der gewöhnlichen Materie nicht beteiligt sind. Es sieht ganz so aus, als gäbe es einen Stoff, den wir "hadronische Materie" nennen, und als seien die Nukleonen Proton und Neutron nur zwei von vielen verschiedenen Formen, in denen diese hadronische Materie existieren kann.

Die Frage ist nun, was die Natur dieser hadronischen Materie ist. Anders gesagt, woraus bestehen die Nukleonen - und damit der größte Teil aller Materie? Gibt es vielleicht im Inneren dieser "Elementarteilchen" noch feinere Substrukturen? Besteht die hadronische Materie in ihrer Vielfalt von Erscheinungsformen als Elementarteilchen etwa aus wenigen einfachen Bausteinen, so daß wir vielleicht doch wieder zu dem intuitiv befriedigenden Bild des Aufbaus aller Materie aus einer kleinen Anzahl verschiedener Elementarbausteine zurückkommen? Und können wir uns solche Erkenntnisse nutzbar machen?

Auf diese Fragen haben wir zwar noch keine befriedigende Antwort, doch sehr interessante Entwicklungen und Resultate beginnen sich auf Grund der Forschungen an den großen Teilchenbeschleunigern abzuzeichnen. Wir wollen in diesem Aufsatz zeigen, wie man die Aufdeckung der grundlegenden Struktur unserer Materie heute angeht, und welchen Stand man bei diesen noch ganz im Fluß befindlichen Untersuchungen erreicht hat.

Das Elektron als Sonde

Will man den Aufbau eines kleinen Teilchens wie eines Moleküls, Atoms, Atomkerns oder "Elementarteilchens" untersuchen, so kann man zwischen einer brutalen und einer feineren Methode wählen. Die brutale Methode besteht in der Zerlegung des Teilchens in seine Bestandteile. Die feinere Methode bedient sich der Bestrahlung mit Licht oder Elektronen; aus der Beobachtung der durch das Teilchen

abgelenkten oder "gestreuten" Strahlung kann man auf den Aufbau des Teilchens zurückschließen. Diese Methode ist schon zu Anfang des Jahrhunderts zur Aufdeckung der atomistischen Struktur der gewöhnlichen Materie und der Struktur der Atome selbst angewendet worden; die dazu benötigte Röntgenstrahlung wurde mittels der damaligen Form des Hochenergie-Elektronenbeschleunigers, der Röntgenröhre, hergestellt. Auch die Elementarteilchenphysik hat sich bisher vorzugsweise dieser Streumethode bedient. Diese und ihre Ergebnisse sollen deshalb als erstes diskutiert werden. In jüngster Zeit erlauben es die größeren Beschleuniger, auch die Elementarteilchen heftiger anzugehen. Auch hierzu bedient man sich der Streuung von Elektronen. Auf die dabei gewonnenen sehr überraschenden Resultate werden wir im letzten Teil dieses Aufsatzes eingehen.

Um die Struktur eines Teilchens "abzutasten", benötigen wir vor allem eine als Sonde dienende Strahlung. An diese Sonde müssen wir folgende Anforderungen stellen: (i) Sie muß klein sein. - (ii) Sie soll in die zu untersuchende Struktur eindringen, diese dabei aber möglichst wenig stören. - (iii) Ihre Wechselwirkung mit der zu untersuchenden Struktur sollte bekannt sein, um die unbekannte Struktur mittels bekannter Kräfte abzutasten. - (iv) Sie muß technisch handhabbar sein.

Diese Forderungen werden durch Elektronenstrahlen am besten erfüllt. Das Elektron ist klein; nach heutiger Kenntnis ist sein Radius höchstens 10^{-14} cm groß. Es tritt mit Materie durch die relativ schwachen elektrischen Anziehungs- oder Abstoßungskräfte zwischen geladenen Körpern sowie durch magnetische Kräfte in Wechselwirkung. Diese Kräfte sind so schwach, daß zum Beispiel im Wasserstoffatom das Elektron etwa 10^7 mal in jeder Sekunde durch den Kern, der hier nur aus einem einzelnen Proton besteht, hindurchfliegt, ohne daß sich mehr ereignet als höchstens eine Ablenkung der Bahn des Elektrons (Abb.1). Ferner sind diese elektromagnetischen Kräfte theoretisch gut bekannt und berechenbar. Und schließlich sind Elektronen stabile Teilchen und daher zum Experimentieren gut geeignet. Aus diesen Gründen sind Strahlen von Elektronen die idealen Sonden zur Untersuchung des Aufbaus der Nukleonen. Deshalb werden diese Untersuchungen auch vorzugsweise an Elektronenbeschleunigern durchgeführt.

Was passiert nun, wenn ein Strahl von Elektronen auf ein Proton trifft? Wir wollen uns das Proton zunächst als eine punkt-förmige positive elektrische Ladung vorstellen. Die Bahnen der negativ geladenen Elektronen werden dann abgelenkt, und zwar um verschiedene Winkel je nachdem, wie nahe das Elektron am Proton vorbeifliegt. Wir beobachten eine breit gestreute Winkelverteilung der abgelenkten Elektronen (Abb.2a).

Nun nehmen wir an, das Proton sei räumlich ausgedehnt. Jetzt kommt eine wichtige Eigenschaft der Elektronen ins Spiel. Der Physiker De Broglie hat 1924 gefunden, daß Strahlen von Elektronen sich oft nicht einfach wie eine Partikelstrahlung verhalten, sondern daß sie auch Welleneigenschaften zeigen können. Dies ist ähnlich wie bei den Lichtstrahlen, deren Welleneigenschaften ja schon seit mehr als 100 Jahren bekannt sind. Es ist gerade diese Analogie zu den Lichtwellen, die zum Beispiel im Elektronenmikroskop ausgenutzt wird. Ebenso wie die Lichtwellen können auch Elektronenwellen ganz verschiedene Wellenlängen λ haben; und zwar ist λ um so kleiner, je größere Geschwindigkeit und damit kinetische Energie die Elektronen haben.

Sofern nun die Wellenlänge λ sehr viel größer als die Ausdehnung des Protons ist, wirkt dieses auf die Elektronenwelle weiterhin wie eine Punktladung. Die Welle ist gewissermaßen zu grob, um die Ausdehnung der Ladung zu bemerken (Abb.2b).

Jetzt wollen wir eine Elektronenwelle betrachten, deren Wellenlänge nicht größer als die Ausdehnung der ablenkenden Ladung ist. Die über die Ladungsstruktur hinstreichende Welle kann an jedem einzelnen Punkt der Ladungsstruktur bei ihrem Auftreffen abgelenkt werden. Was sieht nun ein weit entfernter Beobachter (Abb.2c)? Er mißt die Summe aller Teilwellen, die an allen möglichen Punkten der Ladungsstruktur abgelenkt wurden. Die gesamten Laufwege zwischen Elektronenquelle und Beobachter sind aber für alle diese Teilwellen verschieden. Diese Laufwegunterschiede können nun zu einer Schwächung oder völligen Auslöschung der resultierenden Welle am Beobachtungsort führen, wenn die Wellenberge einer der Teilwellen mit den Wellentälern einer anderen Teilwelle am Beobachtungsort zusammenfallen. Man bezeichnet dies als Interferenz der Wellen. Es ist im Prinzip der gleiche Vorgang, wie er von der Beugung des Lichts an kleinen Objekten bekannt ist.

Erstaunlicherweise ist es nun gerade diese Interferenz, deren Beobachtung uns ziemlich direkten Aufschluß über Größe, Form und Struktur der streuenden Ladungsverteilung zu geben vermag. Wir sahen bereits, daß eine im Vergleich zur Wellenlänge kleine streuende Struktur in alle Richtungen, ungehindert durch Interferenz, streuen

kann. Hat der Streukörper ungefähr die Ausdehnung einer Wellenlänge der Elektronenwellen, so ist die Laufwegdifferenz für kleine Ablenkungswinkel zwar noch immer klein; für große Winkel aber kommen die Laufwegunterschiede in die Größenordnung einer halben Wellenlänge, so daß die Streuung hier durch Interferenz unterdrückt wird (Abb.2c). Ist schließlich der Streukörper mehrere Wellenlängen groß, so erreichen die Laufwegunterschiede schon für kleine Streuwinkel die Größe $\lambda/2$, so daß Interferenz eintritt. Wir sehen also, daß die Streuung desto mehr auf kleine Winkel in der Nähe der Vorwärtsrichtung beschränkt bleibt, je größer die streuende Ladungsverteilung im Vergleich zur Wellenlänge der Elektronenwellen ist. Umgekehrt kann man bei bekannter Wellenlänge aus der Winkelverteilung der gestreuten Elektronen auf die Größe der Ladungsverteilung schließen (Abb.3).

Weitere Information erhält man aus feineren Einzelheiten der Winkelverteilung der gestreuten Elektronen. Zum Beispiel macht sich eine scharf definierte Oberfläche der streuenden Ladungsverteilung durch Maxima und Minima in der Streuverteilung bemerkbar. Dies ist analog zum Auftreten von Maxima und Minima bei der Beugung von Licht an einem scharf begrenzten Spalt. Eine gleichmäßig verlaufende Streuverteilung deutet dagegen auf eine streuende Struktur mit diffuser, verwaschener Begrenzung hin (Abb.3). Ganz allgemein kann man, wenn man die Streuwinkelverteilung für alle Winkel und Wellenlängen der Elektronen gemessen hat, daraus die genaue Ladungsverteilung des streuenden Objekts mittels des mathematischen Verfahrens der Fouriertransformation exakt berechnen.

Der Blick ins Innere des Protons

Wie geht nun das Streuexperiment vor sich? Wir benötigen dazu Elektronenstrahlen vieler verschiedener Wellenlängen, insbesondere aber solcher sehr kleiner Wellenlänge, um möglichst feine Details aufzulösen. Ein Elektronenstrahl der Energie 7,5 GeV (d.h. der Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von $7,5 \times 10^9$ V annimmt), wie ihn das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg liefern kann, hat eine Wellenlänge von $\lambda = 0,16$ F (1 F (Fermi) = 10^{-13} cm ist die in der Kern- und Elementarteilchen-

physik übliche Längeneinheit). Der augenblicklich energiereichste Elektronenbeschleuniger befindet sich in Stanford in den U.S.A.; er beschleunigt bis auf 20 GeV, entsprechend $\lambda = 0,06$ F. Ein Elektronenstrahl aus dem Beschleuniger wird nun auf eine Probe von flüssigem Wasserstoff gerichtet. Die an den Protonen der Wasserstoffatome abgelenkten Elektronen werden mittels eines Elektronenteleskops beobachtet, das aus magnetischen Linsen zur Sammlung und Fokussierung der Elektronenstrahlen sowie aus Zählern zu ihrem schließlichen Nachweis und zur Identifizierung besteht. Das Teleskop ist schwenkbar, um verschiedene Beobachtungswinkel einstellen zu können. Man läßt die nachzuweisenden Elektronen noch durch Magnetfelder laufen, in denen sie je nach ihrer Energie verschieden stark abgelenkt werden. Dies dient dazu, die elastisch gestreuten Elektronen, das heißt solche die lediglich an den Protonen abgelenkt worden sind, nicht mit solchen hier unerwünschten Elektronen zu verwechseln, die außer einer Ablenkung noch andere Prozesse unter Abgabe von Energie in der Wasserstoffprobe ausgelöst haben. Abb.4 zeigt eine solche Meßanordnung.

Das Endresultat dieser Messungen, die an verschiedenen Beschleunigern bei vielen verschiedenen Energien oder Wellenlängen λ durchgeführt wurden, zeigt Abb.5. Man findet eine Ladungsdichteverteilung des Protons, die im Zentrum am größten ist und nach außen hin ganz allmählich abfällt. Im Abstand von $0,5$ F vom Zentrum des Protons ist sie auf etwa 10 % ihres Wertes im Zentrum abgefallen; bei 1 F auf 1 %. Das Proton hat also eine diffuse, verwaschene Ladungsverteilung ohne definierten Rand. Ferner scheint bei kleinen λ und großen Streuwinkeln die Intensität auf Null abzusinken. Das bedeutet nach Abb.3, daß es im Zentrum des Protons einen kleinen, festen, einen gewissen Bruchteil der elektrischen Ladung auf sich vereinigenden "harten Kern" (der wie eine Punktladung wirken würde) offenbar nicht gibt.

Hiernach unterscheidet sich das Proton in seinem Aufbau also ganz erheblich sowohl vom Atom, mit seinem kleinen zentralen Kern, als auch vom Atomkern mit seiner zwar ^{ziemlich} gleichförmig ausgeschmierten, aber mit einem relativ scharfen Rand versehenen Ladungsverteilung.

Das Proton erscheint vergleichsweise merkwürdig strukturlos. Eine so unmittelbare Deutung wie die der Struktur der Atome oder Atomkerne ist daher hier nicht möglich.

Neben seiner Ladung hat das Proton auch Magnetismus; es wirkt wie ein winziger Magnet. Die Elektronenstreuung gestattet auch die Messung der räumlichen Verteilung des Magnetismus im Proton. Das liegt daran, daß das Elektron ebenfalls magnetisch ist und durch magnetische Kräfte abgelenkt wird. Die Ablenkung durch Magnetismus und durch die elektrische Ladung kann experimentell unterschieden werden, doch wollen wir hier nicht auf die Einzelheiten eingehen. Das Ergebnis der Versuche ist, daß der Magnetismus im Proton nahezu ebenso verteilt ist wie die elektrische Ladung.

Schließlich kann man statt des Protons auch das Neutron untersuchen. Man ersetzt dazu die Probe aus gewöhnlichem Wasserstoff durch eine aus Deuterium. Die Atomkerne des Deuteriums bestehen aus je einem Proton und einem Neutron. Würde das Neutron die Elektronen ebenso ablenken wie das Proton, so sollte die Streuung an der Deuteriumprobe identisch sein mit der an der Wasserstoffprobe. Tatsächlich ist das nicht der Fall, was ja wegen der elektrischen Neutralität des Neutrons auch klar ist. Aus den beobachteten Unterschieden der Streuung am Deuterium und am Wasserstoff kann man nun auf die Wirkung des Neutrons allein zurückschließen. Man findet dann, daß das Neutron praktisch überhaupt keine Ladungsstruktur hat. Das ist nicht etwa wegen des Fehlens einer Ladung selbstverständlich; denn auch ein Atom ist ja als Ganzes elektrisch neutral, obwohl es in seinem Innern durchaus Ladungen gibt. Im Neutron dagegen scheinen sich die positiven und die negativen Ladungen überall etwa gegenseitig zu kompensieren. Dagegen finden wir auch im Neutron Magnetismus, und merkwürdigerweise ist der Magnetismus im Neutron räumlich wiederum ebenso verteilt wie Ladung und Magnetismus im Proton.

Die wahrscheinliche Deutung

Ein vollständiges Verständnis der beschriebenen Resultate ist noch nicht erreicht. Eins scheint allerdings sicher zu sein, unab-

hängig davon, was immer auch die "wahre" Natur der Materie des Protons oder Neutrons ist: Diese Materie ist ständig von einem Schwarm, einer "Wolke", von Mesonen, insbesondere Pi-Mesonen, umgeben. Die Pi-Mesonen sind die leichteste Form hadronischer Materie, etwa 7 mal leichter als die Nukleonen, aber noch 270 mal schwerer als Elektronen. Sie treten in Beschleunigerexperimenten bei der Kollision von Elementarteilchen sehr häufig als instabile Reaktionsprodukte auf. Man schreibt ihnen die Rolle einer Art von Kitt zu, der zum Beispiel die Protonen und Neutronen im Atomkern zusammenhält. Diese Pi-Mesonen-Wolke umgibt und durchdringt das Proton und Neutron ständig und gehört gewissermaßen fest zu ihm. Es deutet nun alles darauf hin, daß man mit den beschriebenen Untersuchungen durch Elektronenstreuung lediglich die Ausdehnung und Dichteverteilung dieser Pi-Mesonen-Wolke gemessen hat. Man weiß aus der Beobachtung freier Pi-Mesonen, daß diese elektrisch geladen sind, so daß Elektronen an ihnen abgelenkt werden. Man vermutet überdies, daß auch der Magnetismus der Nukleonen ^{zu einem großen Teil} durch die Bewegung dieser Mesonen in der Wolke zustandekommt, ähnlich wie der Magnetismus eines Elektromagneten durch bewegte elektrische Ladungen in seinen Kupferdrähten erzeugt wird. Auf diese Weise wird die ähnliche Verlung von Ladung und Magnetismus im Nukleon plausibel.

Nach dieser Vorstellung ist also die gemessene Ausdehnung der Nukleonen nichts anderes als die Ausdehnung ihrer sie umgebenden Mesonenwolke. Das die vorbeifliegenden Elektronen ablenkende elektromagnetische Kraftfeld dieser elektrisch geladenen Wolke (Abb.6a) hat nun aber, nach den Vorstellungen der modernen Physik, nicht nur Wellen-, sondern auch Teilcheneigenschaften. So weiß man ja etwa, daß das Licht - ebenfalls ein elektromagnetisches Feld - außer seiner Welleneigenschaft auch Quanten- oder Partikeleigenschaften zeigt. Das gleiche gilt für jedes elektromagnetische Feld. Bei den hohen Energien, mit denen wir es bei den beschriebenen Versuchen zu tun haben, treten diese Teilchenaspekte sogar in den Vordergrund. Wir beschreiben daher den obigen Sachverhalt besser so, daß zwischen dem Pi-Meson der Wolke und dem Elektron ein Lichtquant oder Photon ausgetauscht wird, wobei das Elektron durch den Rückstoß des Photons abgelenkt wird (Abb.6b). Das Photon tritt in dieser Beschreibungsweise an die Stelle des elektromagnetischen Feldes.

Ein weiteres Prinzip der modernen Physik veranlaßt uns, die Beschreibung nochmals abzuändern. Statt zu sagen, ein zum Beispiel positiv geladenes Meson sende ein Photon aus und fliege dann weiter, kann man auch sagen, daß ein positives und ein negatives Meson aufeinandertreffen und sich gegenseitig vernichten, wobei ein Photon entsteht. Zunächst scheint dies ein ganz anderer Sachverhalt zu sein, da ja die beiden Fälle durch Messung der Flugrichtung der Mesonen unterschieden werden könnten. Es ist nun aber auf Grund der quantenmechanischen Unschärferelation prinzipiell unmöglich, die Flugrichtung eines Mesons in der Wolke zu beobachten; der Versuch einer solchen Beobachtung würde einen so tiefen Eingriff darstellen, daß die Bewegungen in der Mesonenwolke dadurch vollständig abgeändert würden. Deshalb sind in der Tat beide Betrachtungsweisen einfach als äquivalent anzusehen. Damit haben wir das Bild der Abb.6c für den Streuvorgang.

Nun treten positive und negative Pi-Mesonen besonders häufig in einer Art von gepaartem Zustand von relativ scharf definierter Energie auf. In diesem Paarzustand umkreisen sie sich gewissermaßen ganz regelmäßig; sie bilden ein metastabiles System, das eine kurze Zeit lang (etwa 10^{-23} sec) bestehen kann, ehe es etwa in ein Photon zerstrahlt (Abb.6d). Solche metastabilen Teilchensysteme nennt man auch "Resonanzen"; dieses $\pi^+ \pi^-$ -System speziell heißt ρ -Resonanz. Je größer nun die Energie dieses Resonanzsystems ist, desto weniger lange kann es bestehen; und je kürzer es existiert, desto weniger weit kann es sich vom Zentrum des Protons entfernt haben in dem Augenblick, wo es mit dem gestreuten Elektron ein Photon austauscht. Die vom Elektron "gesehene" Ausdehnung der Mesonenwolke sollte daher desto kleiner sein, je größer die Energie der ρ -Resonanz ist. Auf Grund der durch die Elektronenstreuung gemessenen Ausdehnung der Mesonenwolke (siehe Abb.5) hatten einige Theoretiker daher bereits vor der ersten direkten Beobachtung der ρ -Resonanz vorhergesagt, daß die Resonanzenergie etwa 0,7 GeV sein müßte. Es war ein Triumph für die theoretische Elementarteilchenphysik, daß kurze Zeit darauf tatsächlich die ρ -Resonanz bei der richtigen Energie in direkten Experimenten gefunden wurde. Dies ist eine sehr willkommene Bestätigung für die beschriebenen relativ abstrakten Überlegungen, die

davon ausgingen, daß die gemessenen Ladungs- und Magnetismusverteilungen der Nukleonen durch ihre Mesonenwolken bestimmt sind. Es bleibt aber zunächst weiter im Dunkeln, was nun eigentlich wirklich im Innern, durch die Mesonenwolke verborgen, des Protons und Neutrons ist.

Resonanzzustände des Protons

Weitergehende Aufschlüsse über die Struktur des Protons und Neutrons erhält man durch eine andere Art von Elektronenstreuversuchen, die sogenannte unelastische Elektronenstreuung. Im Gegensatz zu der bereits beschriebenen elastischen Streuung stellt man hierbei die Magnetfelder des Nachweisteleskops für die abgelenkten Elektronen so ein, daß auch Elektronen erfaßt werden, die eine kleinere Geschwindigkeit und Energie haben als die ursprünglich vom Beschleuniger her eingeschossenen. Diese Elektronen sind in dem Streuprozess also nicht nur abgelenkt worden, sondern haben außerdem von ihrer ursprünglichen Energie E einen Teil an das Proton oder Neutron abgegeben. Abb. 7 zeigt das Ergebnis dieses Experiments, wenn man etwa das Teleskop auf einen festen Streuwinkel Θ einstellt und die Anzahl der gestreuten Elektronen als Funktion ihrer Energie E' mißt. Neben der elastischen ($E' = E$) beobachtet man jetzt unelastische Streuung ($E' < E$), die allerdings schwächer ist. Bemerkenswert ist aber vor allem, daß für bestimmte Energien E' , also bei bestimmter Energieabgabe, Maxima der Streuung auftreten. Wie ist das zu deuten?

Wir erwähnten bereits, daß die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen dem Elektron und der Ladungsverteilung der Mesonenwolke des Protons quantenmechanisch durch den Austausch von Photonen beschrieben wird. Diese Photonen müssen nun auch die Energie übertragen, die bei der unelastischen Streuung vom Elektron an das Proton abgegeben wird. Die Energie des Photons ist in diesem Falle also gleich der Differenz $E - E'$. Der Energie eines Photons entspricht nun stets eine ganz bestimmte Frequenz des elektromagnetischen Wellenfeldes, die durch seine Energie, dividiert durch die Plancksche Konstante $h = 4.1 \times 10^{-24}$ GeV·sec, gegeben ist. Bei der unelastischen Streuung wird also das Proton von einer elektrischen Welle einer ganz bestimmten, von der Energieübertragung abhängigen Frequenz,

getroffen. Die Maxima der Streuwahrscheinlichkeit in Abb.7 bei ganz bestimmten Frequenzen des erregenden Feldes werden daher als Resonanzstellen gedeutet, an denen die Schwingungsfrequenz der elektromagnetischen Welle mit einer Eigenfrequenz der hadronischen Materie des Protons übereinstimmt, so daß die Wahrscheinlichkeit für die Energieübertragung an das Proton durch Resonanz erhöht wird.

Wir erkennen also, daß das Proton verschiedene Resonanzzustände bei verschiedenen Frequenzen oder Energien haben muß. Das gleiche wird auch für das Neutron beobachtet. Diese Resonanzzustände sind wohl ganz analog zu den angeregten Zuständen der Atome. Letztere gehen nach einer gewissen mittleren Lebensdauer des Zustands durch Ausstrahlung von Photonen wieder in den normalen, den "Grundzustand", über. Die angeregten Zustände der Nukleonen geben ihre überschüssige Energie meist dadurch ab, daß sie eines oder mehrere Pi-Mesonen aus der Wolke abstoßen und dabei wieder in den Zustand eines normalen Protons zurückkehren.

Die Kenntnis der Existenz dieser resonanten Zustände der hadronischen Materie ist sicher ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis des Aufbaus des Protons und Neutrons. Was es letzten Endes ist, das diese resonanten Bewegungen ausführt, ist noch ungeklärt. Die im folgenden beschriebenen Versuche geben uns aber vielleicht einen ersten Einblick.

Eine mögliche punktförmige Substruktur der Materie

Wir wollen uns jetzt einer letzten Art von Strukturuntersuchungen der nuklearen Materie zuwenden, der Elektronenstreuung im sogenannten "tief-unelastischen Bereich" (siehe Abb.7). Hierbei handelt es sich um Streuvorgänge, bei denen das abgelenkte Elektron sehr viel Energie an das streuende Nukleon abgibt, insbesondere wesentlich mehr, als der Ruheenergie des Nukleons von 0,94 GeV entspricht. Was erwarten wir hieraus an Neuem zu lernen?

Bei näherer Betrachtung zeigt sich, daß die elastische und die schwach-unelastische Streuung, die wir bisher diskutiert haben, uns

nur Auskunft über die zeitlich gemittelten Verteilungen von Ladung und Magnetismus der Nukleonen, und über ihre Resonanzzustände, geben kann. Das liegt daran, daß an diesen Streuvorgängen das Nukleon in seiner Gesamtheit beteiligt ist, wie wir es im Detail für die elastische Streuung erörtert haben (siehe auch Abb.8). Man nennt diese Art von Streuung auch kohärent. Daraus ergibt sich aber zwangsläufig, daß der Streuvorgang insgesamt mindestens so lange dauert, wie nötig ist, um eine kollektive Aktion des gesamten, sich ja über einen gewissen Raumbereich erstreckenden Nukleons zu ermöglichen. Das Nukleon wird durch einen solchen Streuvorgang in seiner inneren Struktur entweder gar nicht geändert (es erfährt nur als Ganzes einen gewissen Rückstoß), oder aber es wird zu kollektiven Resonanzbewegungen angeregt.

Vielleicht zeigt sich uns aber im Nukleon eine ganz neue Struktur, wenn es uns gelingt, gewissermaßen eine Momentaufnahme zu machen. Es könnte ja rasch veränderliche Strukturen geben, von denen wir mit den bisherigen Methoden infolge zu langer "Belichtungsdauer" nichts bemerken konnten. Nehmen wir etwa einmal an, das Proton hätte noch kleinere, sich aber rasch durcheinander bewegende Bestandteile. Für eine "Momentaufnahme" mit einem Elektronenstrahl muß die Stoßdauer kurz sein im Vergleich zu der Zeit, in der sich die Bestandteile einmal durch das Proton bewegen. Dann ist aber der Stoß bereits wieder vorüber, ehe er das gesamte Proton erfaßt hat; er erfaßt also nur einen kleinen Teil des Protons, etwa ein einzelnes der Bestandteile (Abb.8).

Ein solcher Stoß eines Elektrons erfordert notwendig einen sehr hohen Energieübertrag. Er muß zum Beispiel ausreichen, die Kräfte zu überwinden, die die einzelnen Bestandteile aufeinander ausüben, weil es andernfalls doch wieder nur zu einem kollektiven Auffangen der Rückstoßbewegung durch das gesamte Proton und damit zu einem Stoß großer Dauer käme. Wenn aber ein einzelnes der Bestandteile die Rückstoßenergie aufnimmt, so ist die Kohärenz gestört. Die Streuung hat dann zunächst nur an diesem einen der Bestandteile stattgefunden, und das Elektron hat bereits den Bereich des Protons wieder verlassen, bevor sich die Wirkung des Stoßes infolge der Wechselwirkung des gestoßenen Bestandteils mit den übrigen

durch das ganze Proton hindurch ausbreiten kann. Daß hierzu eine große Energieübertragung nötig ist, sagt uns auch die Unschärfere-lation der Quantenmechanik: Um die bei einem Stoß übertragene Ener-gie festzulegen, wird eine Zeitdauer benötigt, die desto kleiner sein kann, je ungenauer man die Energie festlegt. Für eine kurze Stoßdauer muß man also große Energieunterschiede zulassen. Die optimale Zeitauflösung bei einem Elektronenstrahl von 20 GeV Ener-gie beträgt etwa 10^{-25} sec (in dieser Zeit legt das Licht eine Strecke von nur 0,03 F zurück). Die Beobachtung tief-unelastischer Streuprozesse bietet also die Chance, durch Stöße von sehr kurzer Dauer "Momentbilder" der streuenden Struktur zu erhalten.

Die Versuche mit sehr hohen Energieübertragungen sind in erster Linie während der letzten zwei Jahre am 20 GeV-Elektronenbeschleu-niger in Stanford, aber auch am 7,5 GeV-Beschleuniger bei DESY in Hamburg und am 10 GeV-Beschleuniger der Cornell-Universität in den U.S.A. durchgeführt worden. Hierbei zeigte sich ein wirklich über-raschendes Ergebnis (Abb.9): Bei hoher Energieabgabe hängt die ge-streute Intensität der Elektronen nur noch sehr schwach vom Streu-winkel ab. Das bedeutet ja (Abb.3), daß wir jetzt nicht mehr eine breit ausgeschmierte Ladungsverteilung beobachten wie bei der ko-härenten Streuung, sondern daß sich bei diesen "Momentaufnahmen" anscheinend kleine, möglicherweise punktförmige Ladungsträger zei-gen.

Man hat für diese vermutlichen Partikel im Innern des Protons den Namen "Partonen" erfunden. Über ihre weitere Natur ist vorläufig noch nicht viel bekannt. Könnten sie identisch mit den Pi-Mesonen sein? Das scheint ausgeschlossen, denn aus Details der beobachteten Elektronenstreuung folgt, daß die Partonen offenbar - im Gegensatz zu den Pi-Mesonen - einen Eigendrehimpuls haben, und daß vermutlich ihre elektrische Ladung kleiner als die (mit der "Elementarladung" übereinstimmende) Ladung der Pi-Mesonen ist. Man sieht die Partonen auch im Neutron. Möglicherweise handelt es sich hier um eine neue Art von Teilchen, die fundamentaler sind als das Proton und das Neutron, und die vielleicht die eigentlichen Bausteine der hadroni-schen Materie darstellen. Falls dies zutrifft, könnten die Partonen identisch sein mit den ^{seit} ~~V~~langem vergeblich gesuchten "Quarks" - hypothe-tischen Teilchen, deren Existenz viele der Eigenschaften der Reso-nanzen hadronischer Materie erklären würde und die sich hier als Partonen bei der Elektronenstreuung vielleicht zum ersten Mal im Experiment direkt bemerkbar gemacht haben.

Der beste Weg zur Bestätigung und weiteren Untersuchung der Partonen wäre natürlich, ein aus einem Proton bei dem Elektronenstreuprozess herausgeschlagenes Parton direkt in einer Nachweisapparatur aufzufangen und seine Eigenschaften dort zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden großflächige Funkenkammern und weitere Zähler in der Nähe der Protonenproben aufgestellt. Diese Nachweisgeräte werden in Koinzidenz mit dem Teleskop für die gestreuten Elektronen geschaltet, das heißt sie werden in dem Augenblick nach Teilchen abgesucht, wo ein tief-unelastischer Stoß eines Elektrons stattgefunden hat. So hofft man die Partonen oder andere Bruchstücke des Protons gezielt aufzuspüren. Leider fand man dabei bisher kein Parton, sondern lediglich bereits bekannte Teilchen, wie Pi-Mesonen, ρ -Resonanzen, und Nukleonen in verschiedenen Resonanzzuständen. Es könnte sein, daß die Anziehungskräfte der Partonen untereinander so stark sind, daß bereits vor dem Herausfliegen aus dem Proton andere Partonen von dem angestoßenen eingefangen werden und so ein neues, "gewöhnliches" Teilchen aus hadronischer Materie entsteht, das wir dann in der Nachweisapparatur finden. In diesem Fall bedarf es vielleicht noch langer Suche, bis ein einzelnes Parton tatsächlich einmal direkt nachgewiesen werden kann.

Andererseits ist aber auch nicht auszuschließen, daß der aus den Ergebnissen der Experimente gezogene Schluß über die Existenz punktförmiger Bestandteile der Nukleonen voreilig war. Weitere experimentelle und theoretische Untersuchungen hierzu sind in mehreren Laboratorien im Gang. Insbesondere von den geplanten Experimenten an den in Stanford und Hamburg in Bau befindlichen Elektronen-Speicherringen erhofft man sich wesentliche Fortschritte. Wie auch immer die endgültige Deutung der Beobachtungen einmal aussehen wird: Es scheint klar, daß wir im Begriff stehen, eine neue Schicht von Phänomenen im Bereich der allerkleinsten Dimensionen und der allerstärksten Kräfte aufzudecken.

Bildunterschriften

Abb. 1. Wasserstoffatom mit positiv geladenem Proton im Zentrum, umgeben von dem sich mit etwa $1/100$ Lichtgeschwindigkeit bewegenden Elektron. Die mittlere räumliche Verteilung des Elektrons ist durch die "Wolke" angedeutet. Das Proton erscheint in diesem Bild punktförmig; sein Durchmesser beträgt nur etwa 1 F ($= 1/100\,000$ des Atomdurchmessers). Das Elektron stößt jedoch etwa 10 Millionen mal in jeder Sekunde gegen den Kern und fliegt durch ihn hindurch.

Abb. 2. (a) Streuung von Elektronen an einem punktförmigen Proton. - (b) Streuung von Elektronen großer Wellenlänge an einem ausgedehnten, aber im Vergleich zur Wellenlänge kleinen Proton. - (c) Streuung von Elektronen an einem Proton, wenn die Wellenlänge ebensogroß oder kleiner als die Ausdehnung des Protons ist. Der Laufwegunterschied der am Punkt A und am Punkt B des Protons gestreuten Teilwellen zwischen Elektronenquelle und Beobachter ist gerade gleich einer halben Wellenlänge. Daher löschen sich die Teilwellen am Beobachtungsort gegenseitig aus. Für einen kleineren Ablenkwinkel θ wären die Laufwegunterschiede kleiner, so daß keine völlige Auslöschung einträte.

Abb. 3. Einfluß von Größe und Oberflächenbeschaffenheit einer streuenden Ladungsverteilung auf die Winkelabhängigkeit der Elektronenstreuung. Aufgetragen ist die beobachtete Intensität der gestreuten Elektronen im Vergleich zu derjenigen (berechenbaren) Intensität, die man für ein punktförmiges strukturloses Proton erwarten würde.

Abb. 4. Prinzip einer Anordnung zur Messung der Streuung hochenergetischer Elektronen an Protonen. Die Linsen sind besonders geformte Magnetfelder, die als Elektronenlinsen wirken; das "Prisma" ist ein homogenes Magnetfeld, das (ähnlich wie ein Prisma) Teilchen verschiedener Wellenlänge (oder Energie) verschieden stark ablenkt. Die Länge dieser Elektronenteleskope beträgt bis zu 50 m.

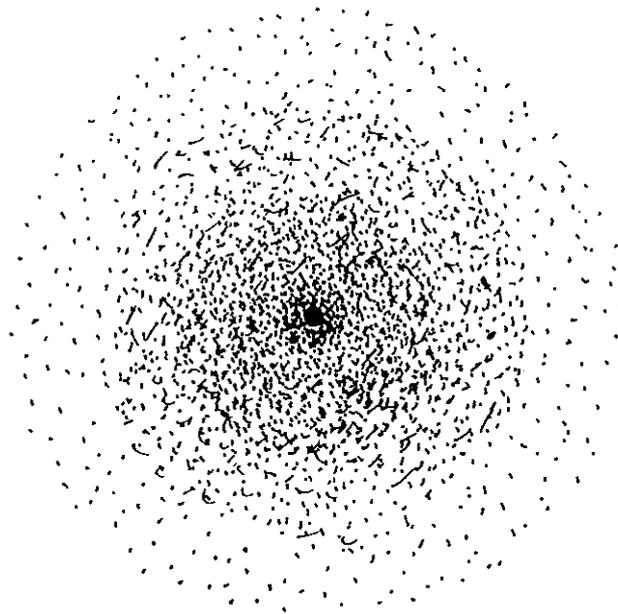
Abb. 5. Beobachtete Streuwinkelverteilung für eine bestimmte Energie und die daraus abgeleitete Verteilung der Ladung im Proton. (Man findet stets die gleiche Ladungsverteilung, unabhängig von der Energie der Elektronen, sofern die Wellenlänge λ genügend klein zur Abtastung der Verteilung ist.)

Abb. 6. Streuung des Elektrons an der Pi-Mesonen-Wolke eines Protons.

Abb. 7. Resonanzanregung des Protons durch unelastische Streuung von Elektronen von etwa 5 GeV Energie. Aufgetragen ist die relative Anzahl der unter einem bestimmten Winkel gestreuten Elektronen als Funktion der im Stoß übertragenen Energie, oder der dieser Energie entsprechenden Frequenz des ausgetauschten Photons. Auf den Resonanzbereich folgt bei Energieübertragungen von etwa 1 GeV und darüber das Gebiet der tief-unelastischen Streuung. Die von Null verschiedene Breite der gemessenen Energieverteilung der "elastisch gestreuten" Elektronen rührt von nie ganz vermeidbaren Meßungenauigkeiten her. (Die Messungen wurden von G. Weber und Mitarbeitern am Hamburger Elektronensynchrotron DESY durchgeführt.)

Abb. 8. Elastische und Resonanzstreuung (kohärent): Das gesamte Proton nimmt am Streuprozess teil. - Tief-unelastische Streuung (inkohärent): Ein einzelnes der möglichen Bestandteile des Protons wird vom Elektron getroffen; nur dieses macht eine Rückstoßbewegung. Die dabei übertragene Energie ist groß im Vergleich zur mittleren potentiellen Energie des Teilchens. Die Streuung hängt jetzt nur von den Eigenschaften des getroffenen kleinen Teilchens ab, und nicht von den Eigenschaften des ganzen Protons.

Abb. 9. Beobachtete Intensität der gestreuten Elektronen (relativ zur berechneten Intensität für ein punktförmiges Proton) bei der tief-unelastischen Streuung von Elektronen der Energie 16 GeV ($\lambda = 0,08 \text{ F}$) an Protonen, als Funktion des Streuwinkels. Zum Vergleich ist die Intensität der elastischen (kohärenten) Streuung angegeben. Der flache Verlauf der Intensität bei großer Energieübertragung wird als Anzeichen für kleine punktförmige Objekte im Proton gedeutet. Die relative Intensität der Streuung an diesen punktförmigen Objekten ist kleiner als 1, da ihre Ladung nur einen Bruchteil der Ladung des Protons beträgt.



|—100 000 F—|
(= 10^{-8} cm)

Abb. 1

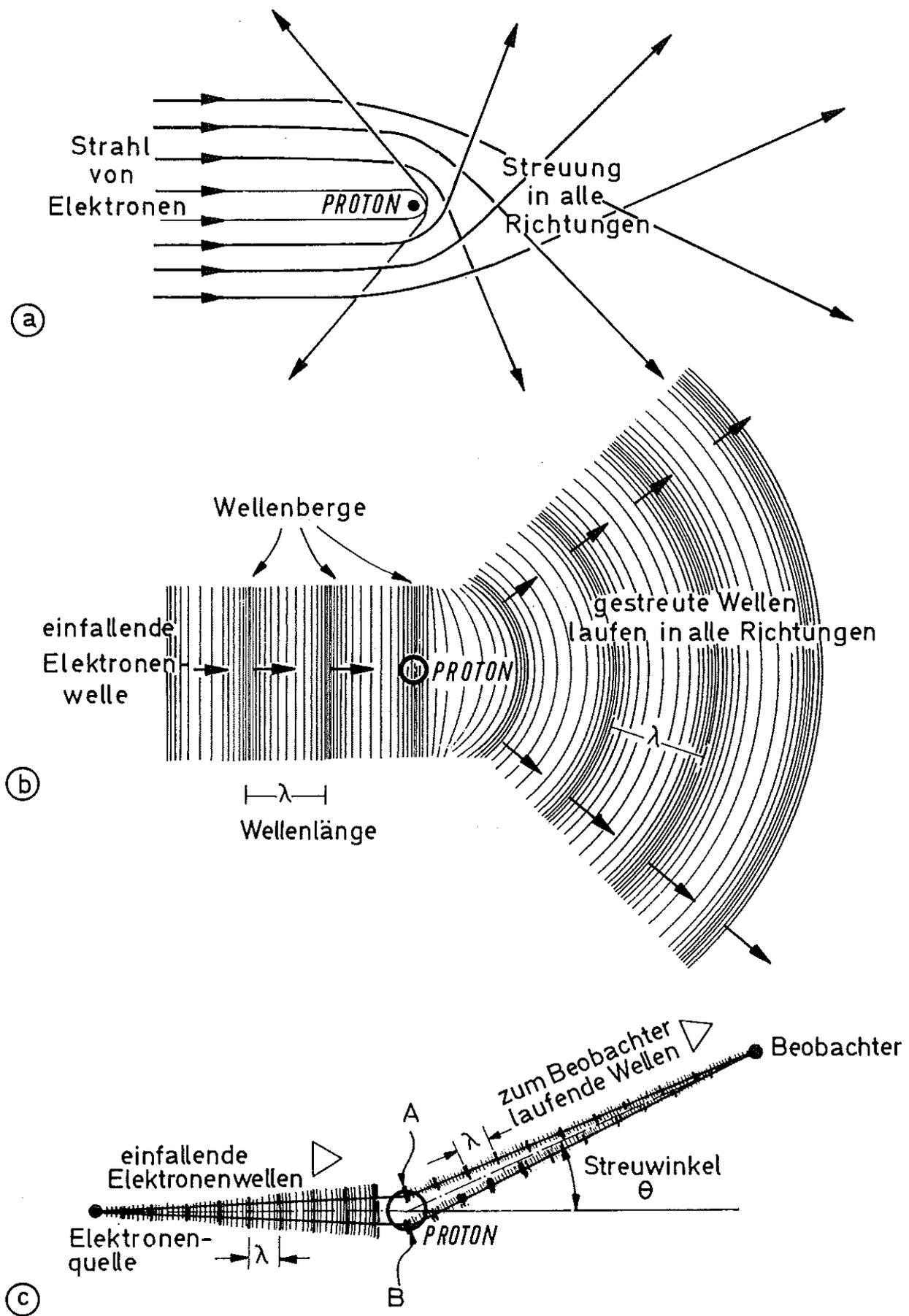


Abb. 2

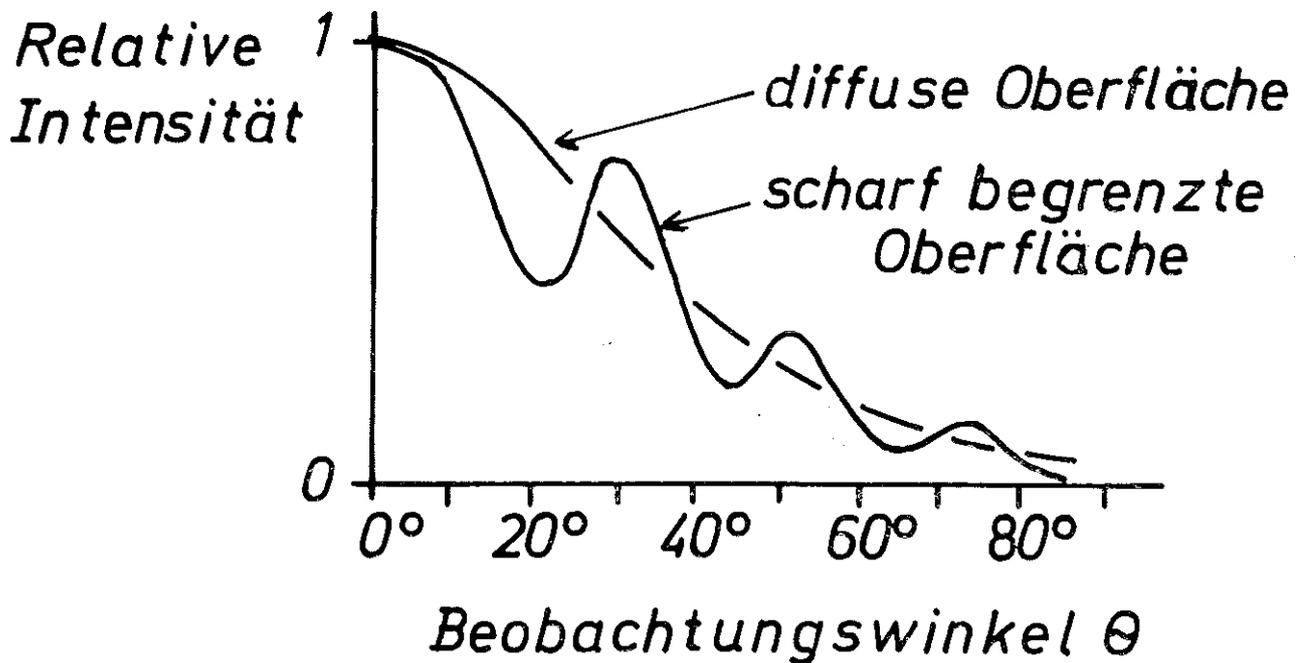
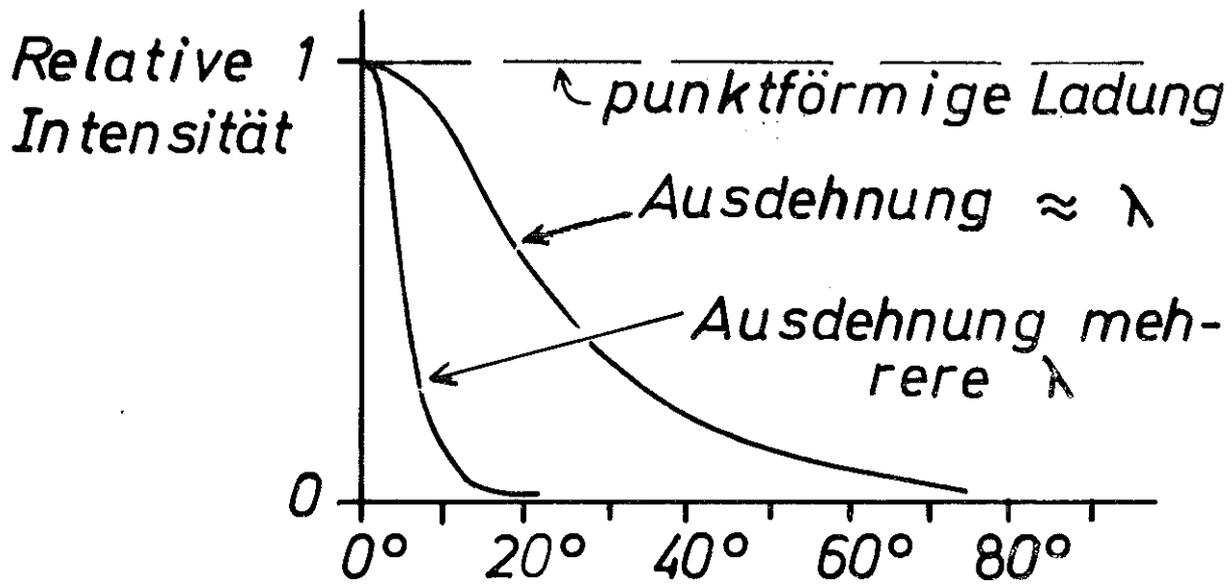


Abb. 3

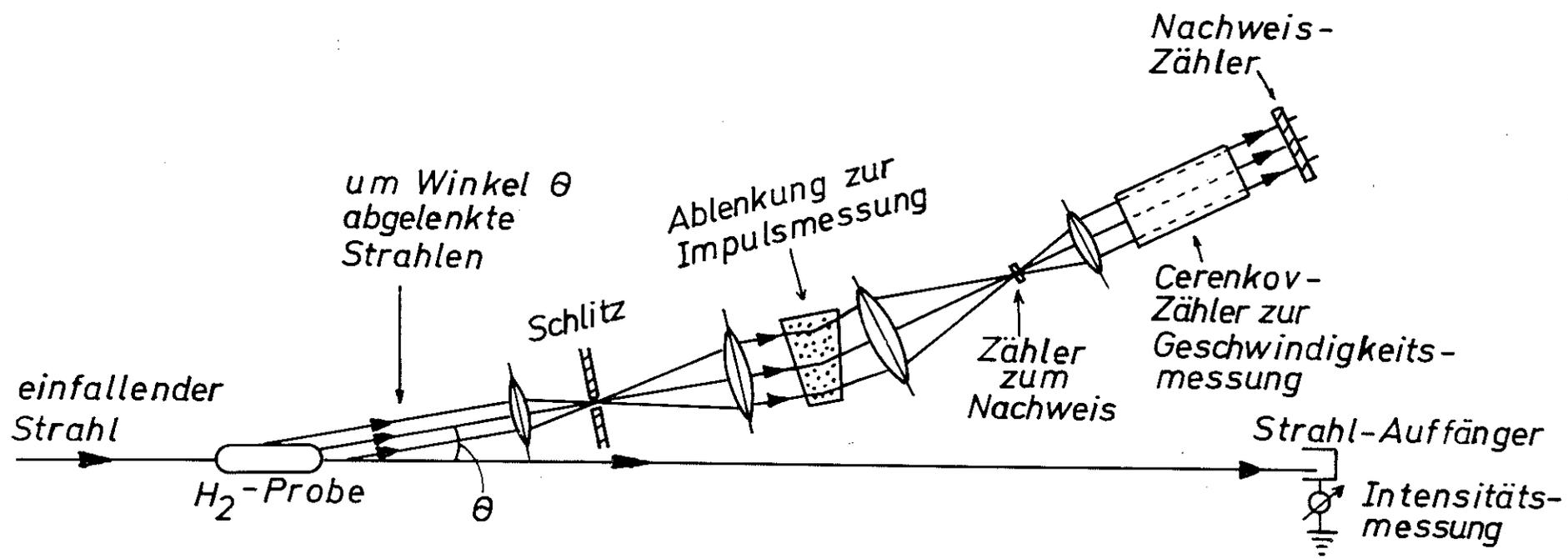


Abb. 4

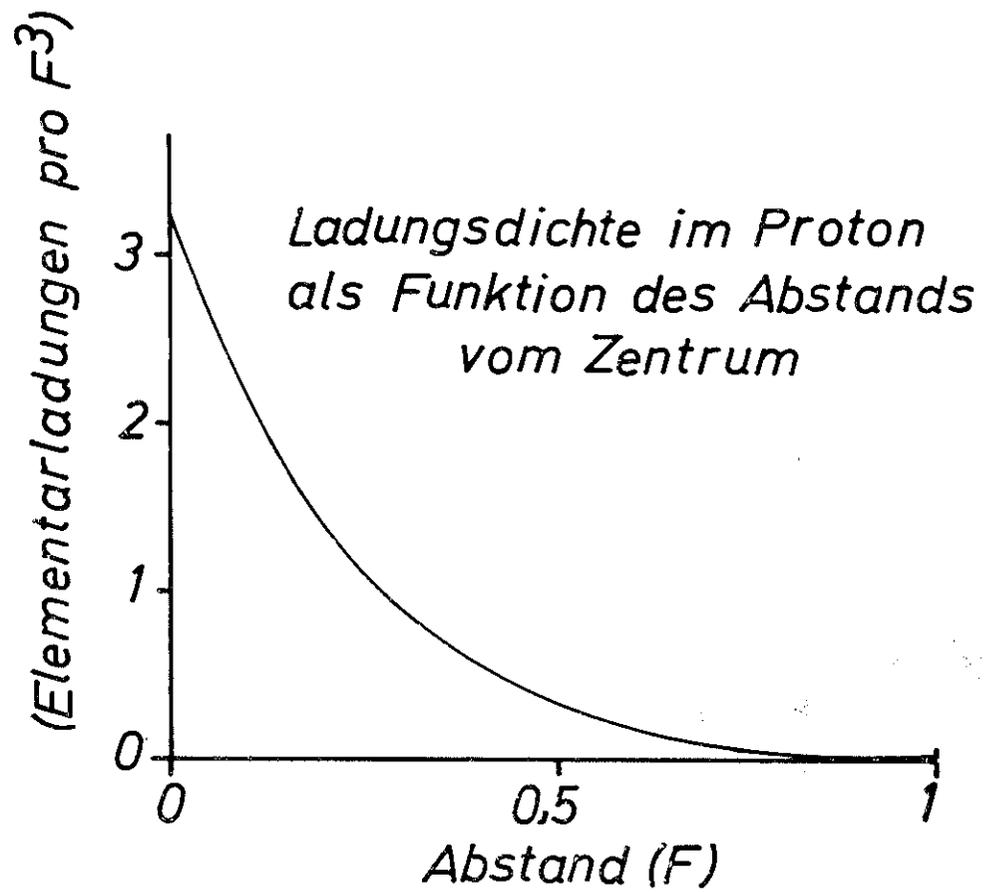
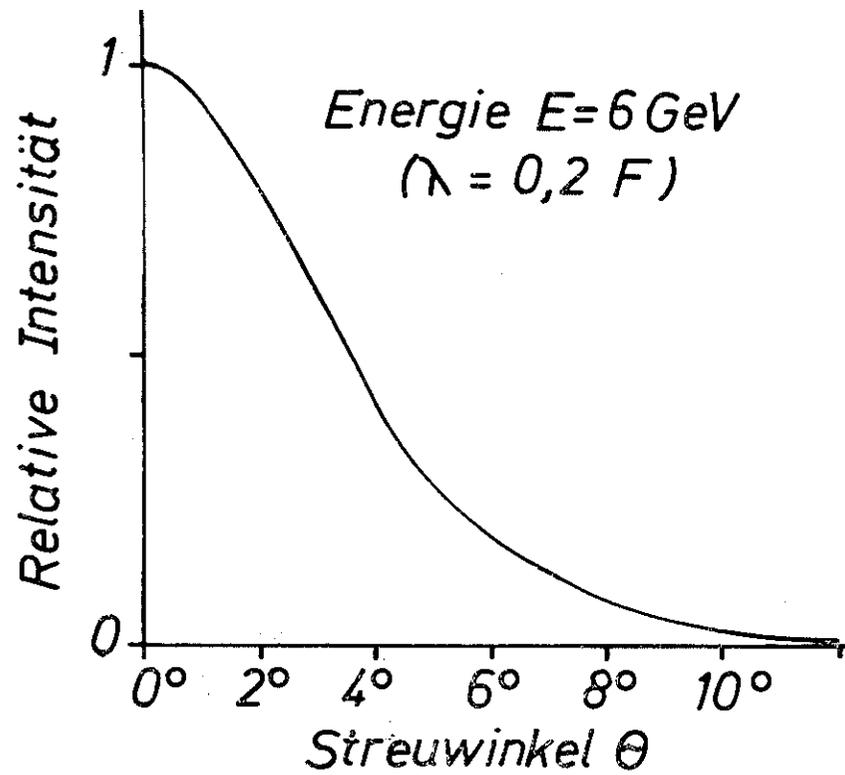


Abb. 5

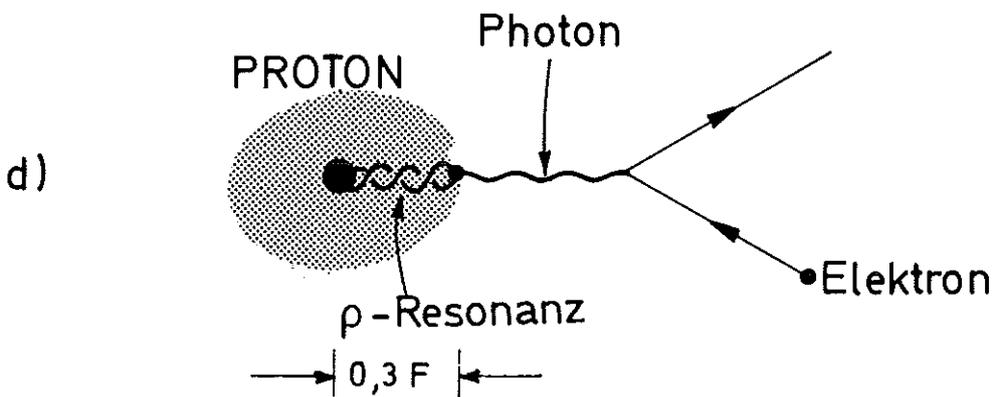
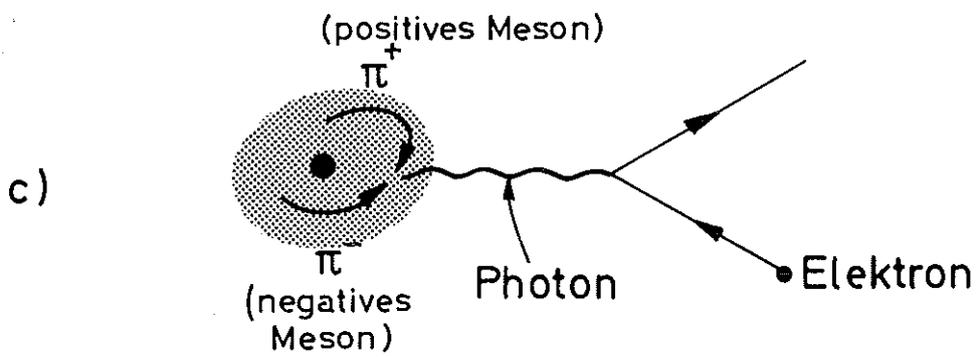
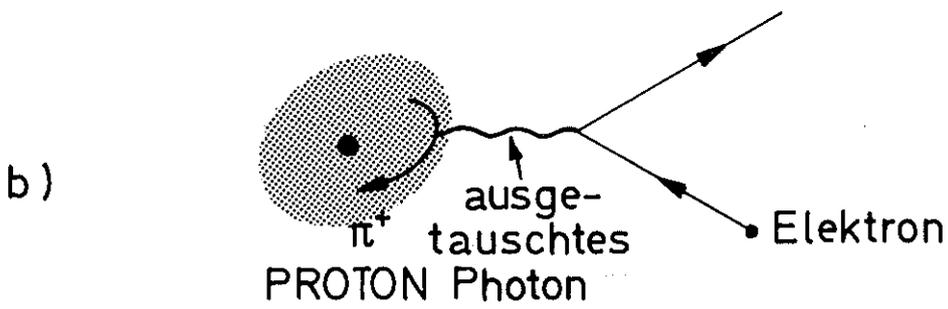
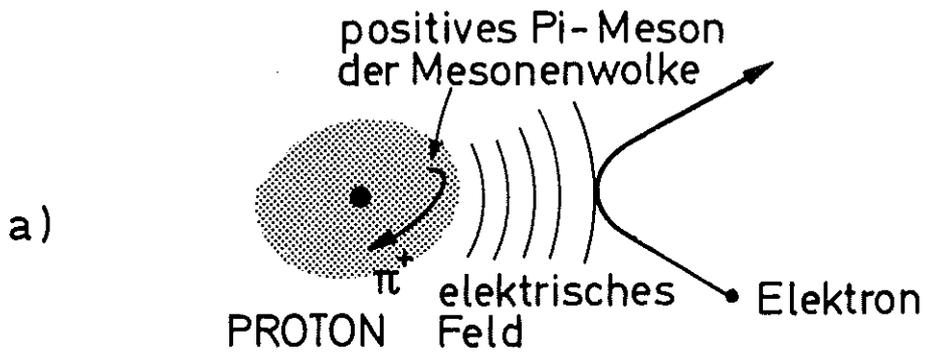


Abb. 6

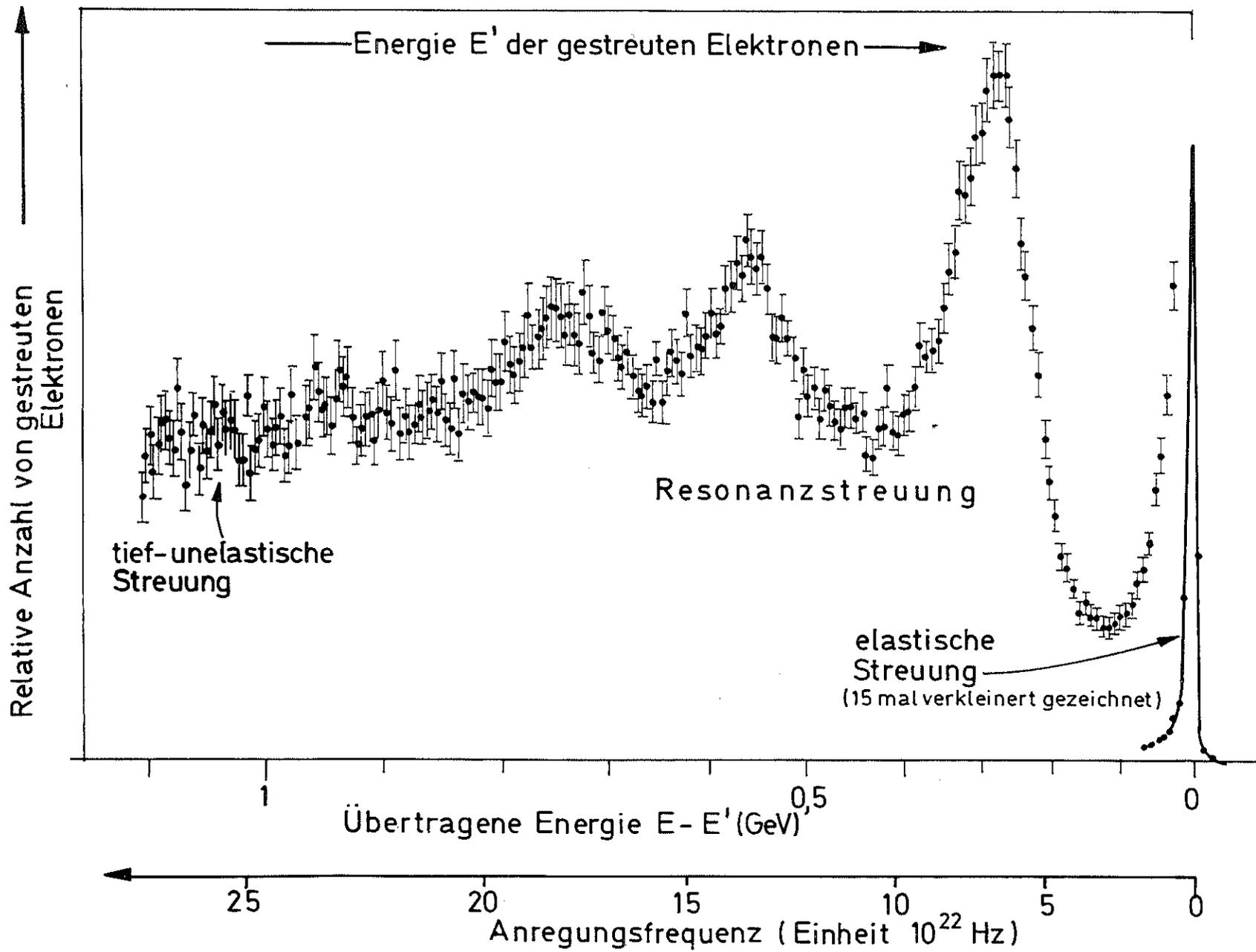
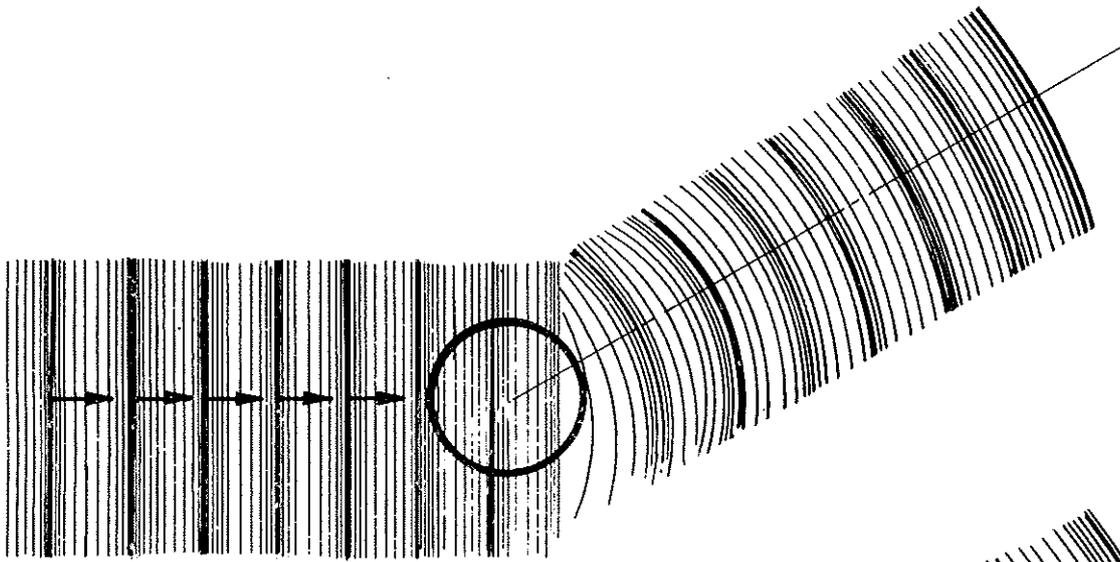


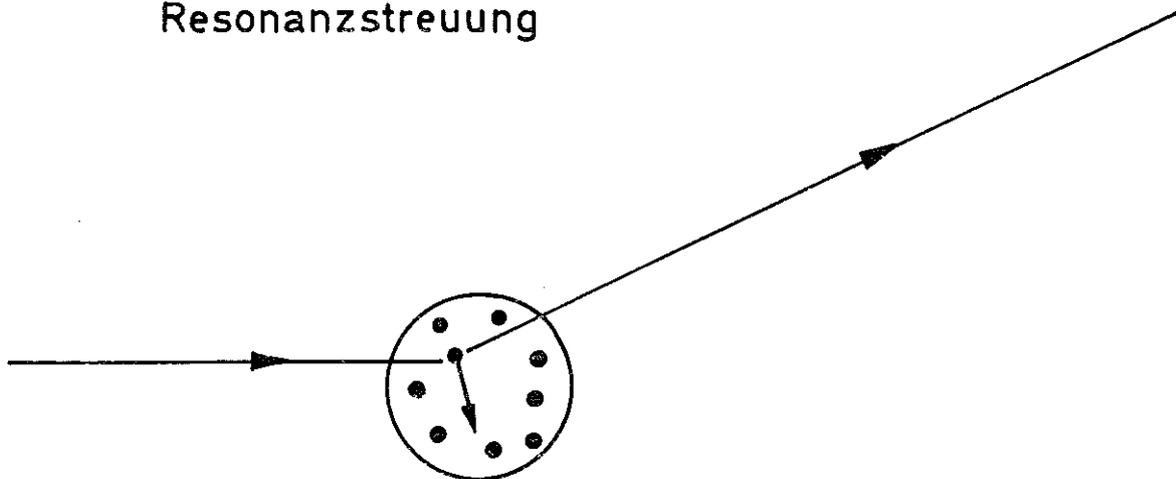
Abb. 7



elastische Streuung



Resonanzstreuung



Inkohärente Streuung

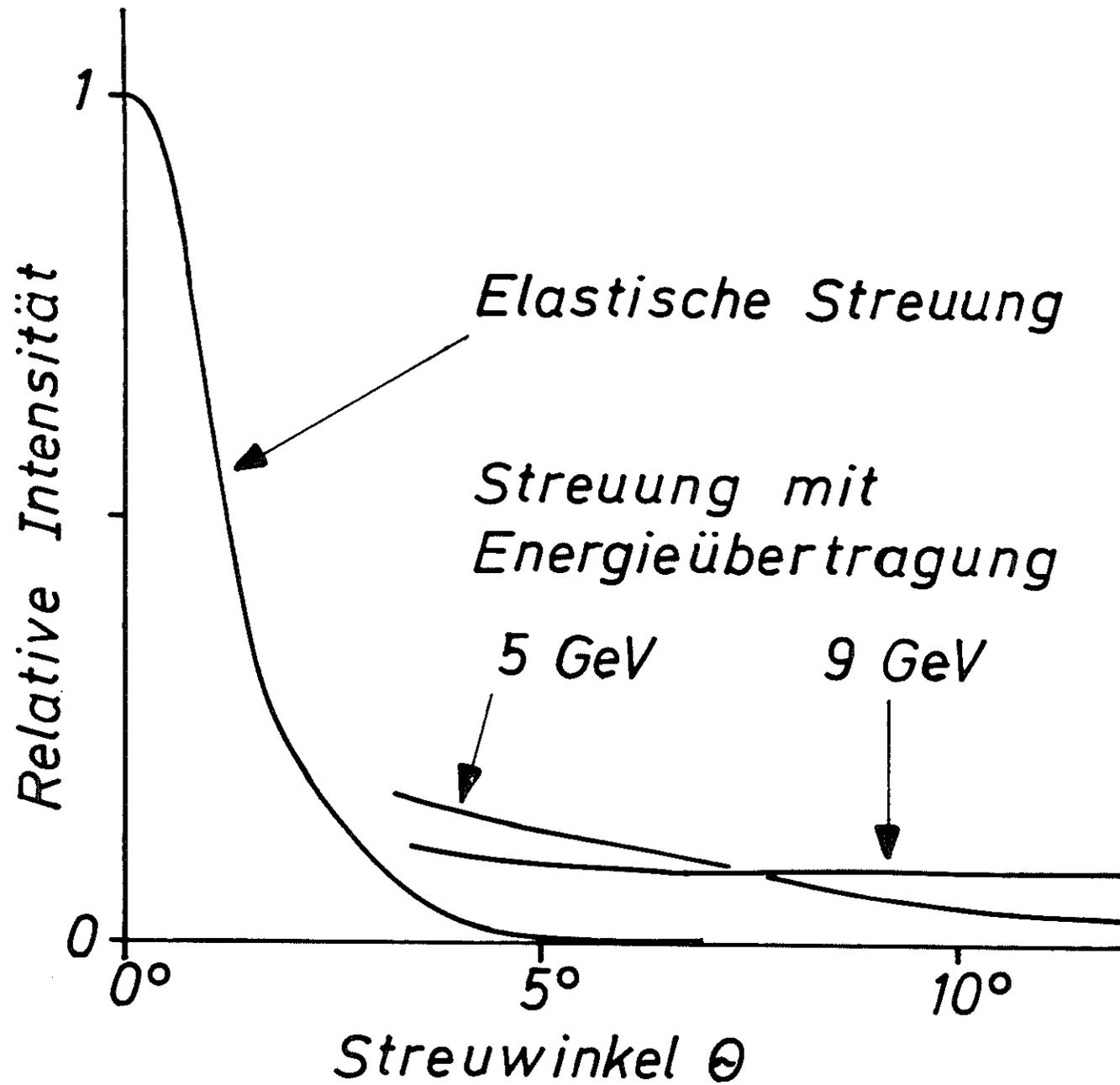


Abb. 9

