

state successively the germ-cells of one sex are emphasized. Particularly in the eel we can follow the gradual stabilization of the prevailing sexuality and the regression of the subordinate one. Also in this case we can admit that in the gonad sexual differentiators are produced, but, in contrast to hermaphrodite Teleosteans, we must suppose that they have no territorial localization and are produced throughout the whole gonad. The differentiation of the single germ-cells seems to be casual, with a statistical distribution; that of the whole gonad can be attributed to the prevalence of elements of the one sex over those of the other.

Both from hermaphroditism as from the last mentioned state of intersexuality there can be a transition to gonochorism. The essential difference between them consists in the mutual compatibility between opposite sexualities, which can be referred to diffusibility of sexual differentiators. In hermaphrodite Teleosteans

this diffusibility seems to be reduced. But both in *Sparidae* and *Serranidae* in boundary zones between heterosexual areas we can sometimes observe mixed elements, which proves a partial diffusion of differentiators.

The absence of a topographical separation of heterosexual areas can be considered as phylogenetically primitive; besides lower Teleosteans it appears also in Petromyzonts. The gonad with topographic localizations seems phylogenetically more highly evolved. These localizations can be realized in different ways, as in hermaphrodite Teleosteans or as in superior Vertebrates, Amphibia and Amniota. The essential difference between the first and the last ones consists in the fact that in the latter the development of the male part of the gonad is associated with the interrenal blastema, while in hermaphrodite Teleosteans such an association is not confirmed.

Neutronen

Von WERNER BRAUNBEK¹, Tübingen

Eine der wichtigsten Änderungen in unserer Auffassung von den Atomkernen hat die Entdeckung und Erforschung der Neutronen gebracht. Von ihr ging der stärkste Impuls für die Weiterentwicklung der Kernphysik aus. In den folgenden Zeilen soll ein anschaulicher Überblick über die Eigenschaften der Neutronen gegeben werden und über die Rolle, die sie im Atomkern und bei seiner Umwandlung spielen, und zwar vor allem für solche Leser, die der Kernphysik ferner stehen und nicht selbst aus der Spezialliteratur die interessante Entwicklung verfolgen konnten.

Die Entdeckung des Neutrons

Vor dem Jahre 1932 sah das Bild, welches sich der Physiker von dem feinsten Aufbau der Materie, von ihren kleinsten Bausteinen machte, verhältnismäßig einfach aus. Er kannte nur zwei Arten von Elementarteilchen das Elektron mit seiner negativen elektrischen Ladung und einer Masse von $0,911 \cdot 10^{-27}$ g und das 1836 mal schwerere Proton mit positiver elektrischer Ladung. Die Atomkerne dachte er sich aus Protonen und Elektronen aufgebaut, eng gepackt auf kleinstem Raum (Durchmesser der Größenordnung 10^{-12} cm), und eine Elektronenhülle von sehr viel größeren Abmessungen (Durchmesser der Größenordnung 10^{-8} cm) um den Kern herum vervollständigte das Atom, die kleinste Einheit der verschiedenen chemischen Elemente.

Daß dieses einfache Bild noch nicht genügte, hatten die Theoretiker, die mit der Durchführung seiner Einzelheiten in Schwierigkeiten geraten waren, schon lange vermutet. Das Jahr 1932 brachte ihnen Genugtuung mit der Entdeckung von gleich zwei weiteren Elementarteilchen, einem «leichten» Teilchen (Elektro-

nenmasse) mit positiver Ladung, dem *Positron*, und einem «schweren» Teilchen von nahezu Protonenmasse, das jedoch überhaupt keine elektrische Ladung trägt, elektrisch neutral ist und den Namen *Neutron* erhielt.

Allerdings beginnt eigentlich die Entdeckungsgeschichte des Neutrons zwei Jahre vor seiner tatsächlichen Entdeckung, und sie bildet ein sehr hübsches Beispiel dafür, wie oft scheinbar geringfügige Beobachtungen, wenn sie systematisch weiterverfolgt werden, zu umwälzenden Erkenntnissen führen. Diese Entdeckungsgeschichte zieht sich von der Physikalisch-technischen Reichsanstalt in Berlin-Charlottenburg über das Radiuminstitut in Paris bis in das Cavendish-Laboratorium in Cambridge, wo sie mit der Entdeckung des Neutrons endigt.

BOTHE und BECKER¹ beobachteten 1930, daß gewisse leichte Elemente, vor allem Lithium, Beryllium und Bor, eine sehr durchdringende Strahlung aussandten, wenn sie mit den α -Strahlen des radioaktiven Poloniums bestrahlt wurden. Diese «Berylliumstrahlung», wie sie nach ihrer wichtigsten Quelle vielfach genannt wurde, besaß in Blei eine mittlere Reichweite von rund 5 cm, was fast 500 m in Luft entspricht, und konnte nach den damaligen Kenntnissen demnach nur eine sehr harte γ -Strahlung sein, welche einem Kernprozeß der von α -Teilchen getroffenen Berylliumkerne ihre Entstehung verdankt. Heute weiß man, daß eine γ -Strahlung auch beliebig hoher Energie ihrer Quanten ein so hohes Durchdringungsvermögen nicht besitzen

¹ W. BOTHE und H. BECKER, Naturwiss. 18, 705 (1930); Z. Physik 66, 289 (1930).

¹ Universität Tübingen, Lehrstuhl für theoretische Physik.

kann; damals aber, wo noch keine genauen Kenntnisse über die Absorption extrem energiereicher γ -Strahlen vorlagen, und wo andererseits nur Korpuskularstrahlen mit *viel* geringeren Reichweiten (Protonenstrahlen durchdringen bei 10 MeV¹ Energie erst einige Zehntel Millimeter Blei!) bekannt waren, war ein anderer Schluß kaum möglich.

J. CURIE und JOLIOT² beschäftigten sich nun auch mit der durchdringenden Berylliumstrahlung und fanden, daß ihre ionisierende Wirkung beträchtlich erhöht wird, wenn sie durch wasserstoffhaltige Substanzen wie z. B. Paraffin hindurchgeht. Dies war offensichtlich so zu deuten, daß die Berylliumstrahlung aus den Wasserstoffatomen Wasserstoffkerne, Protonen, herauschießt, die mit großer Geschwindigkeit wegfliegen und ihrerseits einen beträchtlichen Beitrag zu der beobachteten Ionisierung liefern. Auch die Reichweite dieser Protonen konnten CURIE und JOLIOT messen und daraus ihre Energie berechnen. An sich war dies, wenn auch neu, noch nichts so sehr Überraschendes. Denn ebenso wie Röntgen- und γ -Strahlen im Compton-Effekt Elektronen wegstoßen, so wäre durchaus zu begreifen gewesen, daß dies den sehr harten γ -Quanten der Berylliumstrahlung auch mit Protonen gelingt. Man konnte auch ausrechnen, daß die γ -Strahlung, um Protonen der beobachteten Energie zu liefern, eine Quantenenergie von 50 MeV hätte haben müssen. Dies war reichlich viel — die Energieumsätze der bekannten Kernprozesse lagen sonst höchstens in der Gegend

¹ 1 MeV = 1 Million Elektronen/Volt ist die in der Kernphysik übliche Energieeinheit; sie stellt die Energie dar, welche ein einfache geladenes Teilchen (Elektron oder Proton) gewinnt, wenn es eine elektrische Spannung von 1 Million Volt frei durchläuft.

² J. CURIE und F. JOLIOT, Comptes Rendus (Paris) 194, 273, 876 (1932).

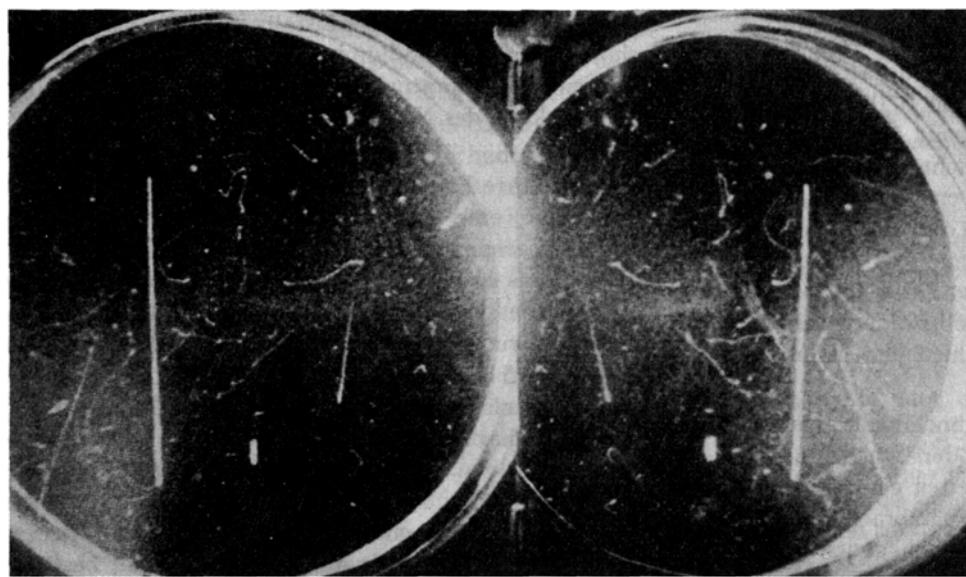


Abb. 1. Die Spuren eines Wasserstoff- und eines Heliumkerns in der Wilson-Kammer, welche durch Neutronen weggestoßen wurden (stereoskopisches Doppelbild).
Aus: H. STAUB und W.E. STEPHENS, Phys. Rev. 55, 136, Abb. 4 (1939).

10–20 MeV, und die Ziffer von 50 MeV wollte auch mit der extrapolierten Absorptionskurve der γ -Strahlen nicht stimmen — aber man wußte vorläufig keinen andern Rat.

Kurz danach führte CHADWICK¹ Versuche mit der Berylliumstrahlung aus. Er fand, daß nicht nur Wasserstoffkerne, sondern auch die Kerne anderer Atome, z. B. Heliumkerne, Stickstoffkerne u.a., von ihr weggestoßen werden, mit um so geringerer Energie und daher auch um so geringerer Reichweite, je schwerer sie waren. Dies wurde später mit der Wilson-Kammer sehr schön bestätigt, wo die Spuren der «weggestoßenen Kerne» direkt die Reichweite abzumessen gestatten, wie etwa in der Abb. 1, wo auf je einem Bild ein weggestoßenes Proton (dicke, lange Spur) und ein weggestoßener Heliumkern (dicke, kurze Spur), zu sehen sind. CHADWICK allerdings arbeitete nur teilweise mit der Wilson-Kammer und bestimmte hauptsächlich die Energie der einzelnen weggestoßenen Kerne aus ihrer Ionisierung in einer Ionisationskammer. Die weggestoßenen Stickstoffkerne z. B. erzeugten oft mehr als 30000 Ionenpaare, während nach der Berechnung ihrer Energie — immer unter der Annahme einer 50 MeV-Strahlung — höchstens 10000 Ionenpaare hätten erscheinen dürfen. Auch sollte nach der Berechnung die Reichweite der Stickstoffkerne nur 1,3 mm betragen, während sich in der Wilson-Kammer Spuren von über 3 mm fanden. Aus diesem quantitativen Auseinanderklaffen der Ergebnisse an den weggestoßenen Wasserstoff- und Stickstoffkernen zog nun CHADWICK den Schluß, daß die ursprüngliche Strahlung keinesfalls eine γ -Strahlung sein kann.

Was aber sollte sie dann sein? Eine ganz einfache Durchrechnung des Stoßvorganges zeigte, daß man

Strahlungsteilchen von viel größerer Masse als derjenigen von 50 MeV- γ -Quanten (etwa 100 Elektronenmassen) annehmen mußte, um sowohl die Energie der weggestoßenen Protonen als auch die der Stickstoffkerne richtig zu bekommen, und zwar Teilchen mit rund 2000 Elektronenmassen, also rund der Masse des Protons. Die Berylliumstrahlung mußte also aus Teilchen von Protonenmasse bestehen. Da aber geladene derartige Teilchen, z. B.

¹ J. CHADWICK, Nature 129, 312 (1932).

das Proton selbst, oder auch ein hypothetisches negatives Teilchen, nur Bruchteile von Millimetern in Blei hätten zurücklegen können, mußte es sich um ungeladene Teilchen von ungefähr Protonenmasse handeln: das *Neutron* war entdeckt. Diesen Neutronen brauchte man nur den für Kernprozesse vernünftigen Energiewert von maximal 5,6 MeV zuzuschreiben, um alle durch Stoß übertragenen Energien richtig zu erhalten. Zu allem hin ergab sich dann später, daß bei der Beschießung von Beryllium mit α -Teilchen außer der neu entdeckten Neutronenstrahlung auch noch wirkliche harte γ -Strahlung entsteht; so hatten auch BOTHE und BECKER in gewissem Sinne recht behalten. Die «weggestoßenen Kerne» allerdings waren ganz den Neutronen zuzuschreiben.

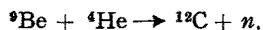
Wie erzeugt man freie Neutronen?

Protonen und Elektronen lassen sich in einer elektrischen Entladung schon mit ganz geringen Spannungen mühelos in riesiger Zahl erzeugen, da z. B. die Energie, die zur Auf trennung eines Wasserstoffatoms in ein Proton und ein Elektron notwendig ist, nur 13,6 eV beträgt.

Die Neutronen in den Experimenten dagegen, die zu ihrer Entdeckung geführt haben, entstehen durch einen *Kernprozeß*, wobei die Geschoße, welche den Kern treffen, meist mehrere Millionen eV Energie haben müssen. Die α -Teilchen des Poloniums z. B., die in den ersten Versuchen die Berylliumkerne umwandelten, besitzen eine Energie von 5,4 MeV.

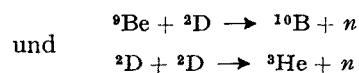
Auch heute ist es noch so, daß alle freien Neutronen, die wir gewinnen wollen, einem Kernprozeß entstammen müssen. Die Neutronen können nun einmal nur von daher geholt werden, wo sie sich in der Natur befinden: aus den Atomkernen. Wie sie herausgeholt werden aus dem Kerngefüge, dafür gibt es im einzelnen etwas verschiedene Wege, und wir können praktisch heute vier Methoden zur Neutronenerzeugung heranziehen.

Der erste Weg ist der historisch älteste: die Beschießung eines geeigneten Materials mit den α -Teilchen eines natürlich radioaktiven Stoffes, meist Beryllium mit Polonium- α -Strahlen oder Beryllium mit Radium- α -Strahlen. Der Kernprozeß sieht so aus:



d. h. der Berylliumkern gibt mit dem α -Teilchen (Heliumkern) einen Kohlenstoffkern und ein Neutron. Die entstehenden Neutronen haben sehr verschiedene Energien, bis zur oberen Grenze von etwa 13 MeV bei Radium-Beryllium, was einer Geschwindigkeit von ca. $\frac{1}{6}$ der Lichtgeschwindigkeit entspricht. Daneben gibt es noch die Möglichkeit, mit Hilfe von natürlichen γ -Strahlen Neutronen auszulösen, welche niedrigere Energie haben, bei Bestrahlung von Beryllium mit γ -Strahlen des Radium C' z. B. aus zwei Gruppen mit 0,2 und 0,6 MeV bestehen.

Die zweite Methode ersetzt die Geschosse, welche die natürlichen radioaktiven Stoffe in Gestalt der α -Teilchen liefern, durch künstlich in elektrischen Entladungsrohren oder im Zyklotron auf die notwendige Energie beschleunigte geladene Teilchen. Dies brauchen nicht notwendig α -Teilchen, also Heliumkerne zu sein; es haben sich vielmehr ganz besonders die *Deuteronen*, die Kerne des schweren Wasserstoffs, als wirksam erwiesen. Praktisch am meisten benutzt wird die Beschießung von schwerem Wasserstoff selbst (in Form von Verbindungen) und von Beryllium mit Deuteronen. Diese beiden Kernprozesse sind:



Bei beiden steigt die Maximalenergie der entstehenden Neutronen von etwa 4 MeV bzw. 3 MeV bei relativ langsamen Deuteronen mit der Energie der verwen-

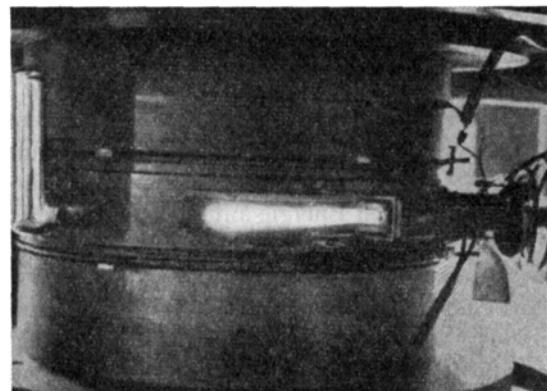


Abb. 2. Leuchtender Deuteronenstrahl, der aus dem Zyklotron in die freie Luft austritt.

Aus: E. O. LAWRENCE und D. COOKSEY, Phys. Rev. 50, 1137, Abb. 5 (1936).

deten Deuteronen an, so daß mit genügend energiereichen Deuteronen auch sehr energiereiche Neutronen gewonnen werden. Insbesondere hat aber diese Erzeugungsmethode gegenüber der ersten den Vorteil, daß mit ihr einmal durch die größere Wirksamkeit der Deuteronen, vor allem aber dadurch, daß sehr viel stärkere Deuteronenstrahlen erzeugt werden können als die von verfügbaren Radiummengen gelieferten α -Strahlen, Neutronenstrahlen sehr viel größerer Intensität, d. h. Teilchenzahl pro Sekunde, erzielt werden. Es ist heute leicht, auf diesem Wege Neutronenstrahlen zu erhalten, die an Intensität der Strahlung von vielen Kilogramm Radium + Beryllium entsprechen.

Abb. 2 zeigt einen Deuteronenstrahl von 5,8 MeV Energie und $5 \mu\text{A}$ Stromstärke, welcher aus einem Zyklotron in die freie Luft austritt (Reichweite ca. 25 cm). Trifft dieser Strahl auf eine Berylliumplatte, so entsteht eine Neutronenstrahlung von mehreren hundert Metern Reichweite, die aber völlig unsichtbar bleibt, da im Gegensatz zu dem Deuteronenstrahl,

dessen Leuchten von der starken Ionisation der Luft herröhrt, Neutronen so gut wie gar nicht ionisieren.

Eine ganz neuartige Neutronenquelle von ungeheuerlicher Intensität ist durch die technische Beherrschung der Kernkettenreaktion bei der *Uranspaltung* erschlossen worden. In den «piles», den Uranöfen, welche z. B. in den U.S.A. zur Gewinnung von Plutonium in Betrieb sind, entstehen sozusagen als Nebenprodukt unvorstellbar große Mengen von Neutronen, die der Wirksamkeit nicht von Kilogrammen, sondern von Tonnen von Radium entsprechen. Die Energie dieser Neutronen ist natürlich sehr uneinheitlich; überwiegend handelt es sich um langsame Neutronen. Die Möglichkeit jedoch, aus dem Uranofen Neutronenstrahlen so hoher Intensität abzuzapfen, konnte in neuerer Zeit zu Untersuchungen vor allem über die Beugung langsamer Neutronen an Kristallen¹ ausgenutzt werden, welche nur mit Strahlen dieser hohen Intensität aussichtsreich waren.

Endlich hat die Fertigstellung des Riesenzyklotrons in Berkeley, welches Deuteronenstrahlen bis 190 MeV liefert², eine weitere Methode zur Gewinnung von Neutronen eröffnet, welche die bis jetzt energiereichsten Neutronen gibt, die wir kennen, die sogenannten «abgestreiften Neutronen». Wenn nämlich ein Deuteron dieser extrem hohen Energie auf einen anderen Atomkern trifft, so geht hierbei meist nicht der getroffene Kern, sondern das Geschoß entzwei; das Deuteron, das aus einem Proton und einem Neutron zusammengesetzt ist, zerfällt in seine beiden Bestandteile, von denen nun der eine oder der andere mit etwa der halben Energie weiterfliegt³. So entstehen Neutronenstrahlen von einigermaßen einheitlicher Energie zwischen 70 und 110 MeV, welche schon für viele wichtige Untersuchungen, z. B. Wirkungsquerschnittbestimmungen, Kernspaltung u. a., herangezogen werden konnten. Ihre Geschwindigkeit kommt nahe an die halbe Lichtgeschwindigkeit heran.

Obwohl wir also grundsätzlich immer auf Kernprozesse angewiesen sind, wenn wir freie Neutronen erhalten wollen, sind die Möglichkeiten doch außerordentlich vielgestaltig: Nachträglich beschleunigen, wie dies bei geladenen Teilchen durch elektrische Spannungen möglich ist, können wir allerdings die ungeladenen Neutronen nicht. Dafür können wir aber ihre Geschwindigkeit fast beliebig herabsetzen, indem wir sie durch Stoffe hindurchgehen lassen, welche leichten Kerne, vor allem Wasserstoff, enthalten. Durch elastische Zusammenstöße mit diesen Kernen geben die Neutronen laufend Energie ab, und dieser Energieverlust setzt sich so lange fort, bis die Neutronen im thermischen Gleichgewicht mit den Molekülen der Materie stehen, d. h. nur noch Energien (bei normaler

Temperatur) von einigen Hundertstel eV, Geschwindigkeiten zwischen 2000 m/sec und 3000 m/sec, besitzen. Wir haben so *langsame Neutronen* gewonnen. Neuerdings ist es sogar gelungen¹, von diesen durch Kristallbeugung alle bis auf die allerlangsamsten wegzusieben, so daß der verbleibende Rest nur etwas mehr als $1/1000$ eV, eine Geschwindigkeit von rund 500 m/sec besitzt.

Wir beherrschen somit heute praktisch Neutronen in dem riesigen Energiebereich von $1/1000$ eV bis 100 Millionen eV.

Die Eigenschaften der Neutronen

Die hervorstechendste Eigenschaft der Neutronenstrahlen ist ihre außerordentliche Durchdringungsfähigkeit. Während z. B. ein Protonenstrahl von 10 MeV nur kleine Bruchteile eines Millimeter durch Blei dringt, legt ein Neutronenstrahl derselben Energie in Blei rund 6 cm zurück, ehe er auf die Hälfte abgeschwächt ist. Selbst γ -Strahlen haben in diesem Energiebereich ein geringeres Durchdringungsvermögen (knapp 2 cm Blei bei 10 MeV).

Die erstaunlich hohe Durchdringungsfähigkeit der Neutronen röhrt daher, daß sie als ungeladene Teilchen im Gegensatz zu den geladenen Protonen, α -Teilchen usw. in keinerlei Wechselwirkung mit der Elektronenhülle der Atome des Stoffes treten, durch den sie dringen, sondern die Elektronenhüllen ungehindert durchqueren. Aufgehalten werden sie in ihrem Flug ausschließlich durch die relativ seltenen Kerntreffer; in diesem Fall verlieren sie einen Teil ihrer Energie entweder durch elastischen Stoß oder durch Auslösung einer Kernumwandlung. Ein großer Teil der Forschungsarbeit der letzten Jahre ist gerade auf die Bestimmung der «Wirkungsquerschnitte» der verschiedenen Kerne für Neutronen, d. h. der Wahrscheinlichkeit eines Energieverlustes durch Kerntreffer, verwandt worden, und diese Aufgabe ist noch längst nicht abgeschlossen.

Infolge ihrer großen Durchdringungsfähigkeit haben die Neutronenstrahlen äußerlich in vieler Hinsicht mehr Ähnlichkeit mit den harten Röntgen- und γ -Strahlen als mit den Korpuskularstrahlen aus geladenen Partikelchen. Sehr hübsch kommt dies z. B. in Abb. 3 zum Ausdruck, die ein Durchleuchtungsbild derselben Gegenstände mit γ -Strahlen (oben) und mit Neutronenstrahlen (unten) zeigt. Der photographische Film muß allerdings für eine solche Aufnahme für Neutronenstrahlen erst durch einen besonderen Kunstgriff empfindlich gemacht werden. Trotz der großen Ähnlichkeit beider Aufnahmen, ist an vielen Einzelheiten zu sehen, daß die Absorption der Neutronenstrahlen anderen Gesetzen gehorcht als die der γ -Strahlen. Besonders interessant ist das Bild ganz rechts, welches zeigt, daß zwei Röhrchen mit gewöhnlichem

¹ Z. B.: E. O. WOLLAN und C. G. SHULL, Phys. Rev. 73, 830 (1948).

² W. M. BROBECK und 7 weitere Forscher, Phys. Rev. 71, 449 (1947).

³ W. W. CHUPP, E. GARDNER und T. B. TAYLOR, Phys. Rev. 73, 742 (1948).

¹ H. L. ANDERSON, E. FERMI und L. MARSHALL, Phys. Rev. 70, 815 (1946).

Wasser (H) und schwerem Wasser (D) γ -Strahlen genau gleich schwächen, während die Neutronen durch das gewöhnliche Wasser viel schlechter hindurchdringen, weil die in ihm enthaltenen Protonen wegen ihrer fast genau gleichen Masse den Neutronen bei Zusammenstößen besonders viel Energie entziehen.

Die Masse der Neutronen konnte bei ihrer Entdeckung aus den Stoßgesetzen nur zu ungefähr einer Protonenmasse bestimmt werden. Eine sehr viel genauere Festlegung erlaubte kurz darauf die Massenbilanz der Kernprozesse, z. B. des schon erwähnten Prozesses, bei welchem aus Beryllium und Helium Kohlenstoff und Neutronen entstehen. Dabei muß die Gesamtmasse vor und nach der Reaktion dieselbe sein, wenn man die Masse mitrechnet, welche nach der EINSTEINSchen Beziehung in der kinetischen Energie der rasch bewegten Teilchen steckt. Da man die Massen des Beryllium-, Helium- und Kohlenstoffkerns sehr genau kennt und die Energien der bewegten Teilchen mit ausreichender Genauigkeit bestimmen kann, läßt sich eine genaue Berechnung der Neutronenmasse durchführen.

Noch genauer erhält man die Neutronenmasse aus dem Kernprozeß $D(\gamma, n) H$, bei welchem ein Deuteron durch ein γ -Quant in seine Bestandteile, Neutron und Proton, zerlegt wird. So gelangt man zu dem Wert 1,00895 in der physikalischen Massenskala¹. Das Proton hat die Masse 1,00758; das Neutron ist demnach um 1,4 ‰ schwerer. Da ein Elektron nur 0,55 ‰ der Protonenmasse besitzt, bedeutet dies, daß das Neutron auch noch schwerer ist als das Proton und Elektron zusammen, daß es demnach genügend Massenenergie enthält, um sich in ein Proton und ein Elektron verwandeln zu können. Tatsächlich sind freie Neutronen radioaktiv und verwandeln sich spontan in Protonen, wobei je ein Elektron und ein (noch hypothetisches, d. h. noch nie direkt beobachtetes) Neutrino ausgeschleudert wird.

Außer der Masse interessiert das *magnetische Moment* des Neutrons, das sich, genau wie die geladenen Elementarteilchen Elektron und Proton, wie ein winziger Magnet verhält. Schon aus dem Betrag des magnetischen Moments des Deuterons, das ja aus einem Proton und einem Neutron zusammengesetzt ist, war zu schließen, daß das Neutron ein magnetisches Moment von etwa 2 Kernmagnetonen² haben müsse, und zwar in bezug auf seinen «Spin» gerade im umgekehr-

ten Sinn wie das Proton, welches rund 3 Kernmagnetonen besitzt. Nach einer sehr sinnreichen Resonanzmethode, welche RABI¹ bereits für die Bestimmung der magnetischen Momente geladener Teilchen entwickelt hat, gelang 1940 ALVAREZ und BLOCH² die erste genauere Bestimmung des magnetischen Moments des Neutrons zu 1,93 KM, ein Wert, welcher neuerdings³ auf 1,91356 KM mit einer Unsicherheit von weniger als 1/10 Promille verbessert werden konnte, ein Triumph moderner Experimentierkunst.

Ebenfalls erst recht jungen Datums ist die Kenntnis der *Beugung von Neutronenstrahlen an Kristallen*. Obwohl es theoretisch sicher schien, daß auch die Neutronen wie alle anderen materiellen Teilchen die Dualität Korpuskel/Welle zeigen und daher Beugungsscheinungen aufweisen müssen, gelang erst 1936 der qualitative Nachweis hörbarer Streuung langsamer Neutronen in Kristallen und von da bis zu der allerjüngsten Neutronenspektrometrie war es noch ein weiter Weg.

Heute ist die Beugung langsamer Neutronen an Einkristallen und an Kristallpulvern in Anlehnung an die entsprechenden Methoden bei Röntgenstrahlen so weit durchgebildet, daß die spektrale Zusammensetzung von Neutronenstrahlen untersucht, d. h. ihre Geschwindigkeits- oder Energieverteilung — die «Wellenlänge» der Strahlen steht ja mit der Neutronengeschwindigkeit in einer sehr einfachen Beziehung — ermittelt werden kann, daß «monochromatische» Strahlen, Neutronen einheitlicher Energie, ausgesiebt werden können und daß sogar bereits Kristallstrukturbur-

¹ I. I. RABI, Phys. Rev. 51, 652 (1937).

² L. W. ALVAREZ und F. BLOCH, Phys. Rev. 57, 111 (1940).

³ F. BLOCH, D. NICODEMUS und H. H. STAUB, Phys. Rev. 74, 1025 (1948).

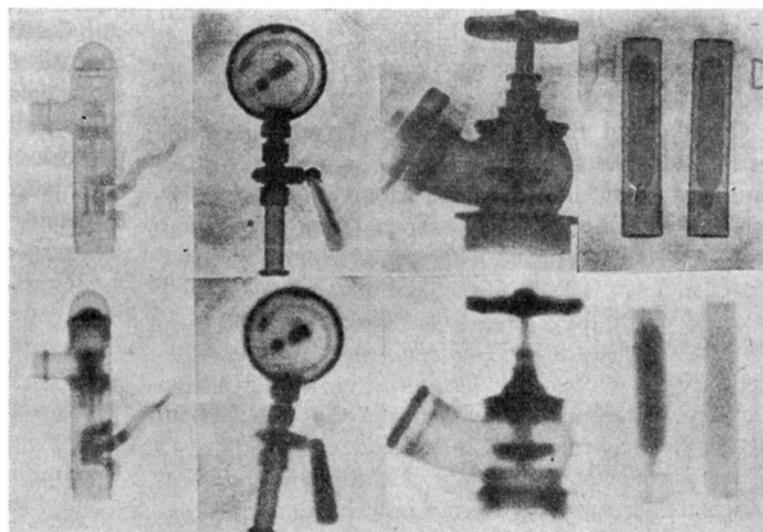


Abb. 3. Durchleuchtungsbild derselben Gegenstände mit γ -Strahlen (oben) und Neutronenstrahlen (unten)

Aus: O. PETER, Z. Naturforschung 1, 559, Abb. 4 (1946).

¹ Die «physikalische Massenskala» bezieht die Kernmassen auf die Masse des Sauerstoffatoms vom Isotop 16 = 16,0000, die «chemische Massenskala» auf die Masse eines «durchschnittlichen» Sauerstoffatoms der natürlichen Isotopenmischung. Unterschied 0,3 Promille.

² Das Kernmagneton ist eine theoretisch definierte Einheit für das magnetische Moment von Atomkernen.

stimmungen durchgeführt wurden¹, denen gegenüber die Röntgenstrahlen versagt hatten.

Die Rolle der Neutronen in Kernprozessen

An rund 80% der heute bekannten Kernprozesse sind Neutronen beteiligt, sei es, daß sie bei dem Prozeß entstehen, sei es, daß sie als Geschosse den Prozeß auslösen. Allein schon daraus geht die überragende Bedeutung der Neutronen für die Fortschritte der Kernphysik hervor.

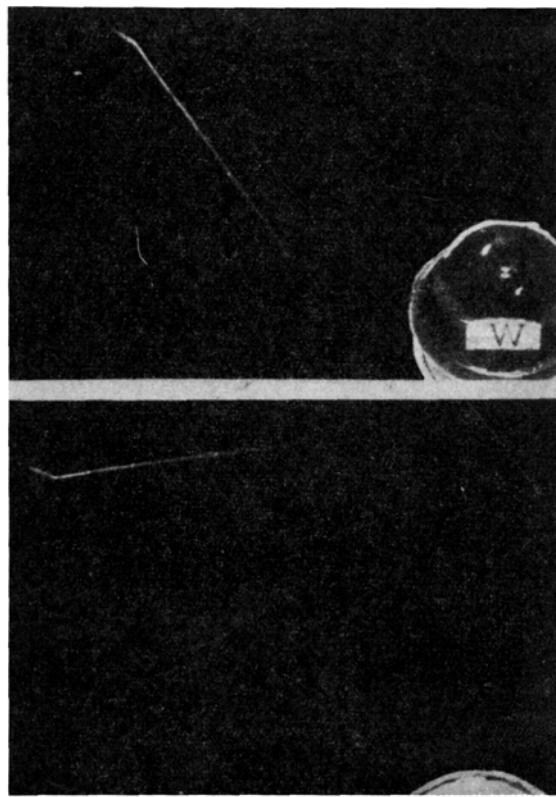


Abb. 4. Umwandlung eines Fluorkerns durch ein Neutron (stereoskopisches Doppelbild)

Aus: W. D. HARKINS, D. M. GANS und H. W. NEWSON, Phys. Rev. 44, 946, Abb. 1 (1933).

Grundlegend für die ganze Kernforschung ist die zuerst von HEISENBERG² näher begründete Auffassung geworden, daß sämtliche Atomkerne ausschließlich aus Protonen und Neutronen (ohne Beteiligung von Elektronen, die man früher im Kern angenommen hatte) aufgebaut sind. Es ist dann naheliegend, daß bei der Umwandlung eines Kerns durch den Stoß eines raschen Geschosses ein Neutron, welches bisher Bestandteil des Kerns war, herausfliegen kann; dies ist der Weg, auf dem alle Neutronen freigesetzt werden, die der Beobachtung zugänglich sind.

Woher röhrt aber die besondere Eignung der Neutronen als Geschosse für Kernumwandlungen? Sie folgt

¹ C. G. SHULL, E. O. WOLLAN, G. A. MORTON und W. L. DAVIDSON, Phys. Rev. 73, 830 (1948).

² W. HEISENBERG, Z. Physik 77, 1 (1932).

ebenfalls wieder aus ihrer Ladungslosigkeit. Alle sonst verwendbaren Geschosse, Protonen, Deuteronen, α -Teilchen, sind positiv geladen und werden daher von den ebenfalls positiv geladenen Atomkernen abgestoßen. Sie verlieren dadurch bei der Annäherung an den Kern viel Energie und vermögen an schwere, hochgeladene Kerne gar nicht genügend nahe heranzukommen, falls sie nicht ganz extrem hohe Energie haben. Für Neutronen fällt diese mächtige Schranke weg; spielend nähern sie sich dem gegen sie wehrlosen Kern, selbst wenn sie nur eine winzig kleine Energie besitzen. Daher kommt es, daß auch ganz langsame Neutronen, diese sogar oft bevorzugt, imstande sind, Kernumwandlungen zu bewirken. Die Umwandlung von Kernen durch Neutronen als Geschosse, wurde vor allem durch FERMI¹ und seine Mitarbeiter erforscht, der als erster zeigte, daß auch die schweren Kerne, denen gegenüber geladene Teilchen der damals erreichbaren Energien ganz unwirksam waren, durch Neutronen spielend umgewandelt werden.

Auch in der Wilson-Kammer lassen sich Kernumwandlungen durch Neutronen gut verfolgen. Das stoßende Neutron selbst liefert, da es nicht ionisiert, keine Spur. In dem Augenblick aber, wo es auf einen Kern stößt und diesen umwandelt, zeichnen die beiden wegfliegenden Kernbestandteile ihre Spur in verschiedener Richtung; die Knickstelle ist der Punkt, in dem das Neutron den Kern getroffen hat, und durch seine Verbindung mit der Neutronenquelle läßt sich auch die unsichtbare Neutronenbahn rekonstruieren. Ein typisches Bild einer Kernumwandlung durch ein Neutron zeigt Abb. 4, wo ein Fluorkern getroffen wird und nach rechts (lange Spur) das abgespaltene α -Teilchen, nach links (kurze Spur) der Restkern (^{16}N) wegfliegt.

Die Überlegenheit der Neutronen als Geschosse über geladene Teilchen kam besonders deutlich bei der Spaltung der schwersten Kerne, Uran und Thorium, zur Geltung, welche 1939 von HAHN^{2,3} entdeckt wurde und die Grundlage zur Entwicklung der Kernkettenreaktion und zur Konstruktion der Atombombe schuf. Hier sind es auch wieder Neutronen, und zwar im Falle des Uran-235-Kerns *langsame* Neutronen, welche die Spaltung bewerkstelligen. Das besonders wichtige Ergebnis ist dabei, daß aus jedem gespaltenen Kern mehrere *neue* Neutronen entstehen, so daß bei genügender Konzentration des spaltbaren Materials diese ihrerseits wieder neue Kerne spalten und so fort, bis die ganze zur Verfügung stehende Menge umgewandelt ist. Diese *Kernkettenreaktion* beruht also nur auf der Spaltbarkeit der betreffenden Kerne durch Neutronen und der gleichzeitigen Neubildung von Neutronen durch die Spaltung. Sie hat als technisches Ergebnis bereits die Atombombe geliefert. Sie verspricht,

¹ E. FERMI, E. AMALDI, O. D'AGOSTINO und E. SEGRÈ, Proc. Roy. Soc. London (A) 146, 483 (1934).

² O. HAHN und F. STRASSMANN, Naturwiss. 27, 11 (1939).

³ O. HAHN, Exper. 4, 369 (1948).

vielleicht in naher Zukunft, eine industrielle Ausnutzung der Kernenergien zu gestatten. Sie bietet der wissenschaftlichen Forschung aber heute schon die unschätzbare Möglichkeit, aus den Uranöfen Neutronenstrahlen enormer Intensität ihren Zwecken dienstbar zu machen.

Abb. 5 zeigt eine Oszillographenaufnahme der bei der Uranspaltung entstehenden raschen Neutronen. Jeder Zacken ist die Registrierung eines Neutrons; die Höhe des Zackens ist ein Maß für seine Energie. Im rechten Teil der Aufnahme ist eine Kadmiumschicht zwischengeschaltet. Kadmiumkerne haben einen besonders großen Wirkungsquerschnitt für Neutronen, fangen sie in rund 1000mal stärkerem Maße weg als Kerne «normaler» Substanzen. Der größte Teil der Neutronen ist tatsächlich auf der Aufnahme nach dem Durchgang durch Kadmium verschwunden.

Neuestens ist mittels extrem rascher Neutronen auch die Spaltung der nächsts schweren Kerne nach Uran und Thorium, der Kerne von Wismut, Blei, Thallium, Quecksilber, Gold und Platin¹ gelungen, wenn auch mit sehr viel geringerer Ausbeute.

Biologische Wirkungen der Neutronenstrahlung

Da die Neutronenstrahlen in ähnlicher Weise durchdringend sind wie sehr harte Röntgen- oder γ -Strahlen, entstehen bei ihrer Einwirkung auf Lebewesen auch Zellschädigungen ähnlicher Art wie bei diesen Strahlen, welche bei genügender Intensität und Bestrahlungsdauer ein gefährliches Maß annehmen können. Die Neutronenstrahlen ionisieren zwar im Gegensatz zu den γ -Strahlen nicht direkt; sie erzeugen jedoch in den sehr wasserstoffhaltigen Substanzen der Zellen «weggestoßene Protonen», welche nun ihrerseits ionisieren und dadurch eine mehr oder weniger zerstörende Wirkung ausüben.

Ein typisches Beispiel einer Neutronenstrahlwirkung zeigt Abb. 6. Mit einem Neutronenstrahl von quadratischem Querschnitt, der einer mit 8 MeV-Deuteronen aus dem Zyklotron beschossenen Berylliumplatte entstammt, wurde der Rücken eines Kaninchens bestrahlt. Zwei Wochen nach der Bestrahlung beginnt der genau auf den Strahlquerschnitt begrenzte Haarausfall, der 6 Wochen nach der Bestrahlung den in der Abbildung sichtbaren totalen Grad erreicht.

In ähnlicher Weise wie für die biologischen Wirkungen der Röntgenstrahlen lässt sich auch bei Neu-



Abb. 6. Haarausfall auf dem Rücken eines Kaninchens, verursacht durch Neutronenbestrahlung.

Aus: P. C. AEBERSOLD, Phys. Rev. 56, 726 Abb. 5 (1939).

tronenstrahlen eine Dosis in r -Einheiten¹ angeben, indem man sich auf die Ionisierung bezieht, welche von den im Gewebe ausgelösten Protonen im Kubikzentimeter Normalluft erzeugt wird. Die Gesamtdosis bei der oben geschilderten Kaninchenbestrahlung betrug einige 100 r , die Stärke der Strahlung lag in der Größenordnung 0,01 r/sec . Die Strahlungen, die als Nebenwirkung beim Betrieb der Uranöfen auftreten, sind natürlich außerordentlich viel stärker.

Es erhebt sich für alle Arbeiten, bei welchen Neutronen in nennenswertem Umfang entstehen, das Problem des *Strahlungsschutzes* für die beteiligten Personen. Dieser ist ganz wesentlich schwieriger als bei Röntgenstrahlen. Infolge der außerordentlichen Durchdringungsfähigkeit der raschen Neutronen würde man Bleiwände von einer Dicke brauchen, die technisch und wirtschaftlich nicht in Frage kommt. Man kann jedoch von der Tatsache Gebrauch machen, daß in Stoffen, welche leichte Elemente enthalten, vor allem Wasserstoff, Neutronen, verhältnismäßig rasch Energie durch elastische Zusammenstöße verlieren, und daß genügend langsame Neutronen weit weniger gefährlich sind. Wasser- oder Paraffinwände von etwa 1 m Dicke

¹ Bei Röntgenstrahlen ist die Dosis 1 r eine Strahlungsmenge, welche in 1 cm³ Normalluft Ionenpaare von der Gesamtladung einer elektrostatischen Ladungseinheit erzeugt.

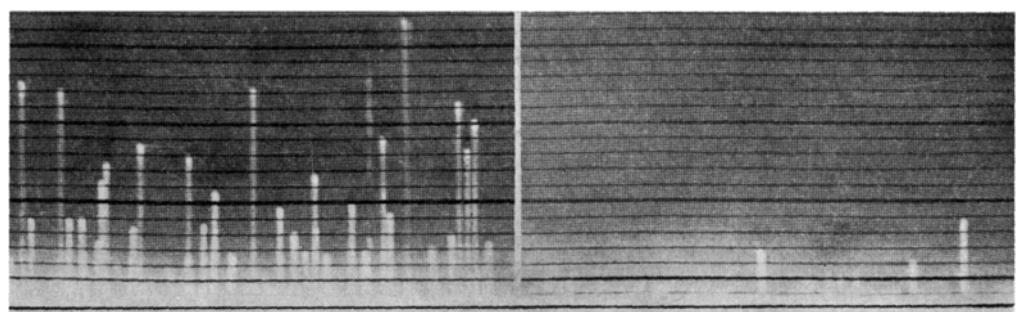


Abb. 5. Oszillogramm von raschen Neutronen aus der Uranspaltung.
Aus W.H.ZINN und LEO SZILARD, Phys. Rev. 56, 620, Abb. 2a und b (1939).

¹ E. L. KELLY und C. WIEGAND, Phys. Rev. 73, 1135 (1948).

oder auch meterdicke Betonwände bieten also einen gewissen Schutz. Allerdings müssen außerdem noch einige Zentimeter Blei angewandt werden, um die bei Kernprozessen in dem Verlangsamungsmaterial entstehenden harten γ -Strahlen abzufangen. Bei extrem starken Neutronenquellen, wie großen Uranöfen, ist jeder mögliche Neutronenschutz so unzureichend, daß nichts übrigbleibt, als in weitem Umkreis die Neutronenquelle zu meiden, alle Vorgänge vollautomatisch ablaufen zu lassen und durch Fernkontrollen zu überwachen.

Wieweit die momentane, äußerst starke Neutronenstrahlung bei der Explosion einer Atombombe für die vielseitigen, dabei aufgetretenen biologischen Schädigungen verantwortlich ist, läßt sich schwer angeben, da sich ihre Wirkung nicht von derjenigen anderer Strahlungen, vor allem der γ -Strahlung der in großer Menge entstehenden radioaktiven Zerfallsprodukte abtrennen läßt. Die Erforschung der biologischen Wirkungen der Neutronenstrahlen steht jedenfalls noch am Anfang und hat ein weites Feld vor sich, wobei sich sicher auch klinische Anwendungsmöglichkeiten ergeben werden, deren möglicher Umfang heute noch schwer abzuschätzen ist.

*

Noch nicht 20 Jahre ist es her, daß aus subtilsten Messungen, aus verhältnismäßig geringfügigen zahlenmäßigen Unstimmigkeiten, das Vorhandensein des Neutrons erschlossen wurde. Diese kurze Zeitspanne hat eine ungeheure Entwicklung der ganzen Kernphysik gebracht, in deren Mittelpunkt das Neutron seit seiner Entdeckung gestanden ist. Trotz seines so völlig von dem Verhalten anderer materieller Partikelchen abweichenden Verhaltens, vor allen Dingen beim Durchgang durch Materie, hat die moderne Experimentierkunst das eigenartige Teilchen weitgehend beherrschen gelernt, hat seine Eigenschaften mit z. T. erstaunlicher Präzision bestimmt und die Geheimnisse entschleiert, die um seine Existenz und Wirksamkeit lagen. Vieles aber bleibt noch zu tun übrig, und es ist kein Zweifel, daß das Neutron sowohl als Objekt der Forschung wie auch bereits als eine ihrer wirksamsten Waffen im Kampf um neue Erkenntnisse seine zentrale Bedeutung behalten wird.

Résumé

La découverte des neutrons — exemple très intéressant des conséquences importantes que peuvent avoir des observations à première vue négligeables — a bouleversé nos idées sur la constitution des noyaux d'atomes. Ce n'est donc pas par hasard qu'à partir de cette date, c'est-à-dire à partir de l'année 1932, l'évolution de la physique des noyaux a fait de rapides progrès.

Tandis qu'il est assez facile de produire des protons libres ou des électrons libres — (l'énergie de dissociation de l'atome d'hydrogène n'excède pas 13,6 eV), il faut des énergies d'un tout autre ordre, soit de plusieurs millions d'eV, pour libérer un neutron de l'association d'un noyau. Cependant, même aujourd'hui, c'est seulement par une réaction de noyaux que l'on peut libérer des neutrons, soit que l'on bombarde le beryllium par des rayons alpha ou par des deutérons, soit qu'on brise des deutérons d'une énergie énorme («stripped neutrons»), ou enfin, qu'on se serve des nombreux neutrons émanant d'un «pile». De $1/1000$ eV à 100 millions eV, on peut se servir des neutrons dans les expériences les plus diverses.

Une des qualités caractéristiques des neutrons c'est leur extraordinaire pénétrabilité qui se montre encore plus grande que celle des rayons γ . Un rayon de neutrons d'une énergie de 10 MeV pénètre environ 6 cm de plomb avant d'être à moitié absorbé.

Les réactions de noyaux permettent aussi de mesurer exactement la masse du neutron. Celle-ci est de 1,4 % plus grande que celle du proton. C'est pourquoi le neutron libre n'est pas stable, mais se transforme spontanément en proton. La technique expérimentelle moderne a réussi à déterminer même le moment magnétique du neutron avec une précision de cinq décimales.

Pour toutes les réactions de noyaux, les neutrons jouent un rôle unique comme projectiles atomiques capables de provoquer transformations d'éléments les plus variées. Tout au contraire des particules chargées, les neutrons peuvent transformer les noyaux, même s'ils ont une énergie très restreinte, car ils n'ont pas à surmonter l'obstacle de la répulsion électrostatique. C'est pourquoi ils sont indispensables pour déclencher la réaction de la bombe atomique.

Comme les rayons X ou les rayons γ , les rayons de neutrons sont d'un maniement très dangereux, car ils détruisent les cellules vivantes qu'ils pénètrent. Cet inconvénient n'a pas été un obstacle à l'avancement des recherches, puisqu'au cours de ces dernières 17 années, on a déjà réussi à explorer la plus grande partie du vaste domaine que les neutrons nous ont ouvert.