

MIKROSKOPIE UND KERNPHYSIK

Mit 9 Abbildungen

Von DOZENT DR. HERTHA WAMBACHER

Es gibt wohl kaum ein Gebiet der Experimentalphysik, für welches das Mikroskop nicht wenigstens ein gelegentlich benutztes Hilfsmittel ist.

Diese allgemeinen Verwendungsmöglichkeiten bestehen natürlich auch in der Kernphysik; außerdem gibt es aber hier zwei Arbeitsmethoden, die unmittelbar auf der mikroskopischen Beobachtung der HAUPTERSCHEINUNGEN beruhen, die Szintillationsmethode und die photographische Methode¹⁾. Bevor wir auf diese Methoden näher eingehen, wollen wir in einer möglichst kurzen Zusammenstellung die hauptsächlichsten Grundtatsachen des Atomkernbaues in Erinnerung bringen.

Grundtatsachen des Atomkernbaues

Die Tabelle I²⁾ gibt einen Überblick über die Elementarteilchen, die beim Atombau eine Rolle spielen, sowie über die leichtesten der zusammengesetzten Kerne.

Wir machen uns nach unserem heutigen Beobachtungsmaterial ungefähr folgende Vorstellung vom Atombau: Das Atom besteht aus Hülle und Kern. Die Atomkerne sind positiv geladen, ihre Ladung wird durch die negative Hülle gerade kompensiert, so daß das vollständige Atom nach außen hin neutral ist. Der Kern besteht aus „schweren“ Teilchen, Protonen und Neutronen, und ergibt das Atomgewicht; die Hülle besteht aus negativen Elektronen, deren Masse nur einige Zehntelmillion des Atomgewichtes ausmacht. Wenn man die Elemente nach der ansteigenden Ladung ihrer Atomkerne oder, was dasselbe ist, nach steigender Zahl ihrer Hüllenelektronen anordnet, erhält man bekanntlich das sogenannte periodische System der Elemente. Es zeigt, daß die chemischen Eigenschaften und die Spektren der Elemente von der Zahl und periodischen Anordnung der Hüllenelektronen abhängen. Der Sitz der chemischen Vorgänge und der Entstehung der Spektren im sichtbaren Gebiet sind die äußeren Elektronen, während die Röntgenspektren durch die weiter innen liegenden hervorgerufen werden.

Der Kern erhält seine positive Ladung durch seine Protonen; da ein Gebilde, das nur aus positiv geladenen und neutralen Teilchen besteht, eigentlich infolge der Coulombschen Abstoßungskräfte nicht stabil sein könnte, muß man annehmen, daß außer diesen noch anziehende Kräfte, die sogenannten „Kernkräfte“, vorhanden sind. Diese Kernkräfte überwiegen bei sehr großer Nähe der Kernbestandteile die Coulombsche Abstoßung, nehmen aber mit einer höheren Potenz der Entfernung mehr ab als die Coulombschen Kräfte. (Ähnlich wie z. B. die Van der Waalschen Kräfte.)

Zur Erhaltung des Kräftegleichgewichtes, der Kernstabilität, ist ein bestimmtes Verhältnis $N/P = \frac{\text{Neutronenzahl}}{\text{Protonenzahl}}$ im Kern notwendig. Die N-Zahl steigt mit

¹⁾ Es sei noch kurz darauf hingewiesen, daß das Mikroskop auch bei der Auswertung von Nebelkammeraufnahmen zur Tröpfchenzählung eine wichtige Rolle spielt.

²⁾ In dieser Tabelle ist der „Massendefekt“ nicht berücksichtigt und nicht die Tatsache, daß sich die Neutronenmasse etwas von der Protonenmasse unterscheidet.

Teilchenart gebräuchliche Abkürzung		Masse in Vielfachen der Protonenmasse $1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$	Ladung in Elementar- quanten	Vorzeichen der Ladung	Wichtige Eigenschaften	
Proton, Wasserstoffkern, P oder H		1	1	+	Kernbaustein	
Neutron, n		1	0		Kernbaustein	
Deuterium, Schwerer Wasserstoff, 1 H + 1 n D		2	1	+		
Triton, Wasserstoff, 1 H + 2 n T		3	1	+		
α -Teilchen, He-Kern, 2 H + 2 n		4	2	+	ausgesandt bei natür- lich radioaktivem Zerfall	
Elektron-, Negatron-	Elek- tronen e^{\pm}	$\frac{1}{1840}$	1	-	bildet Atom- hülle	entstehen im Kern, verlassen ihn aber sofort. Natürliche und künst- liche Radio- aktivität
Positron		$\frac{1}{1840}$	1	+		
Mesotron, m		ca. $\frac{200}{1840}$	1 0?	+-	Höhenstrahlung, zer- fällt in 1 Elektron und 1 Neutrino	
Neutrino		$\frac{1}{1840}$	0		hypothetisch, experi- mentell noch nicht nachgewiesen, β -Zer- fall	

wachsendem Atomgewicht schneller als P. Bei den schwersten, „radioaktiven“ Elementen ist keine vollständige Stabilität mehr möglich.

Elektronen und Positronen können keine dauernden Kernbausteine sein, wie aus energetischen Betrachtungen (auf die hier nicht näher eingegangen werden kann) hervorgeht. Sie können zwar im Kern „entstehen“, und zwar durch Umwandlung eines Kernprotons in ein Neutron unter Aussendung eines Positrons und umgekehrt (Negatron), verlassen ihn aber sofort als Elektronen- bzw. Positronenstrahlen mit hoher Energie (siehe unten natürliche und künstliche Radioaktivität).

Auf die Rolle der Mesotronen beim Kernaufbau soll hier nicht eingegangen werden. Es sei noch darauf hingewiesen, daß ein Teil der Massen der schwereren Teilchen im Atomkernverband in eine andere Energieform, in Bindungsenergie, die dabei frei wird und z. B. abgestrahlt werden kann, verwandelt ist. Die Bindungsenergien sind sehr hoch, z. B. bei He: 28 MeV ($1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Erg.}$).

Es folge nun ein Überblick über die uns bis jetzt bekannten natürlichen oder künstlich hervorgerufenen Kernreaktionen, die sich aus dem Vorhandensein eines instabilen Kernes ergeben, also eines Kernes, bei welchem das für das innere

Kräftegleichgewicht nötige Verhältnis $\frac{\text{Neutronenzahl}}{\text{Protonenzahl}}$ nicht stimmt, oder für

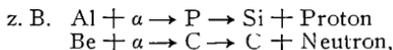
welchen, bei sehr hoher Protonenzahl, eine solche Stabilität überhaupt bei keinem N/P-Verhältnis mehr existiert (natürlich radioaktive Elemente), oder der durch „Anregung“ infolge Energiezufuhr instabil wurde. Eine Änderung des N/P-Verhältnisses kann künstlich dadurch hervorgerufen werden, daß man ein oder mehrere Protonen oder Neutronen in den Kern hineinbringt.

Eine wichtige Ergänzung zum Studium dieser Kernprozesse liefert die Höhenstrahlungsforschung. Die primären Höhenstrahlen, deren Natur noch nicht mit Sicherheit festgestellt, deren Energie jedenfalls außerordentlich hoch ist, kommen aus dem Weltraum in unserer Atmosphäre und lösen dort in Wechselwirkung mit der Materie sehr energiereiche Sekundärstrahlen aus; diese bestehen hauptsächlich aus Elektronen, Positronen, Mesotronen, in geringer Zahl treten auch Protonen und Neutronen auf.

Hauptsächliche Typen von Kernprozessen

Ein instabiler Kern kann auf folgende Arten reagieren, um in einen stabilen überzugehen:

1. er sendet ein einzelnes Kernteilchen H oder N aus (die Energie ist in der Größenordnung von MeV),



2. er zerfällt in zwei sehr ungleiche Teile, z. B. $\text{Ra} \rightarrow \text{Em} + \text{He}$ (z. B. natürliche Radioaktivität),

3. er zerfällt in zwei annähernd gleiche instabile Teile, die ihrerseits solange durch Aussendung von Elektronen weiter zerfallen, bis stabile Kerne entstanden sind (Spaltung).

4. Ein Kern kann bei Einwirkung von Höhenstrahlen oder sonstiger Strahlung sehr großer Energien unter Aussendung mehrerer Protonen, Neutronen und zusammengesetzter Kerne zerfallen: Mehrfachzertrümmerung.

5. Ein Kernproton verwandelt sich in ein Neutron unter Aussendung eines Positrones, ein Kernneutron verwandelt sich in ein Proton unter Aussendung eines negativen Elektrons. (Natürliche und künstliche Radioaktivität.)

Alle Bruchstücke und Bestandteile, die bei diesen Prozessen entstehen, verlassen die Kerne, welche sehr verschiedene Lebensdauer haben können, mit sehr hoher kinetischer Energie. Außerdem entsteht dabei eine elektromagnetische Wellenstrahlung sehr hoher Energie (kleiner Wellenlänge), die sog. γ -Strahlung.

Nachweismethoden

Aufgabe der Kernphysik ist es nun, mit Hilfe aller experimentell erreichbaren Kernreaktionen Näheres über die Anordnung der Kernbausteine und der Vorgänge im Kerninneren zu erforschen. Dazu müssen die aus dem

Kern austretenden Teilchen nach Zahl, Teilchenart, Energie und Richtung registriert werden können. Die Teilchengrößen selbst liegen zwar unter aller denkbaren direkten Beobachtbarkeit (Durchmesser, soweit man von einem solchen überhaupt sprechen könnte, unter einem Billionstel Zentimeter), doch erzeugen die bewegten geladenen Teilchen beim Durchgang durch Materie eine große Anzahl von Ionen, d. h. sie entreißen dem neutralen Atom Hüllenelektronen, so daß ein positiv geladener Atomrestkörper zurückbleibt, der durch seine Ladung für die Beobachtung experimentell erfassbar ist⁹⁾. In gewissen Materialien kann die Ionisationsfähigkeit schließlich zu angeregten Atomen führen, wobei Elektronen nicht ganz aus dem Atomverband entfernt, sondern auf ein höheres Energieniveau gehoben werden. Bei der Rückkehr auf das Grundniveau, die im Kristall infolge quantenmäßiger Verhältnisse nur über „Störstellen“ erfolgen kann, wird ein Lichtquant ausgesendet.

Gasionen können in einem elektrischen Feld in einer sogenannten Ionisationskammer (siehe Abb. 3) an eine negative Elektrode gezogen werden; der auf diese Weise entstehende Stromstoß wird nach hinreichender Verstärkung gemessen (z. B. Ortner-Stettersches Röhrenelektrometer, Geiger-Müllersches Zählrohr).

Sie wirken ferner in einer mit H_2O -Dampf übersättigten Atmosphäre bei geeigneter Anordnung als Kondensationskerne für den H_2O -Dampf. Längs der Teilchenbahn bilden sich Wassertröpfchen, so daß sich als Bahns Spuren deutlich abgegrenzte Nebelstreifen ergeben (Wilson-Kammer).

Schließlich kommen wir zu den zwei Arten von physikalischen Vorgängen bei der Einwirkung von Teilchenstrahlen auf Kristalle, welche ohne Mikroskop nicht zu Arbeitsmethoden hätten entwickelt werden können.

Szintillationsmethode

Mit der Szintillationsmethode wurden die kernphysikalischen Untersuchungen im ersten Entwicklungsstadium der Kernphysik begonnen.

Durchsetzt ein α - oder H-Teilchen ein mit Cu-Spuren aktiviertes ZnS-Kristallgitter („Phosphor“), so regt es das ZnS zum Leuchten an; beim Auftreffen jedes Teilchens entsteht ein Lichtblitz, eine Szintillation, die unter dem Mikroskop bei mindestens 20facher Vergrößerung beobachtet werden kann. Außer ZnS gibt noch eine Reihe anderer Kristalle diesen Effekt, z. B. Diamant, Ca-Wolframat u. a. Abb. 1 zeigt die zur Beobachtung geeignete Anordnung. Eine dünne Schicht ZnS wird auf einem Glasscheibchen von etwa 1 cm Durchmesser und 2—3 mm Dicke möglichst gleichmäßig aufgetragen (ein sehr wenig beliebtes Geduldspiel) und z. B. mit Alkohol aufgeschlämmt. Auf diese Schicht treffen die Teilchen, hier Protonen, welche mit Hilfe von α -Strahlen aus Aluminiumatomkernen herausgeschlagen

⁹⁾ Die ladungsfreien, nicht ionisierenden Neutronen kann man nur indirekt dadurch nachweisen, daß sie durch elastischen Stoß andere Atomkerne in Bewegung setzen, die an ihrer Stelle beobachtet werden.

wurden. Die erzeugten Szintillationen werden von der Glasseite her durch das Mikroskop beobachtet. (Dies ist möglich, weil die Lichtverluste durch Reflexion und Absorption in der ZnS-Schicht selbst sehr gering sind.)

Die Dicke der ZnS-Schicht, also bei einkörniger Schichte der mittlere Durchmesser der ZnS-Körner, muß mindestens so groß sein, daß sich die zu untersuchenden Teilchen darin totlaufen, daß also ihre ganze Ionisierungsfähigkeit für die Lichterzeugung ausgenützt wird. 1μ ZnS entspricht einem Luftweg von 1,88 mm. 30μ ZnS genügen also schon reichlich, um z. B. Po- α -Strahlen mit einer Luftreichweite von 4,77 cm abzubremsen.

Die spektrale Untersuchung des Szintillationsleuchtens ergibt zwei Bande mit der mittleren Wellenlänge um 520μ , also im sichtbaren Grün (beim Diamant im Blau). Die Leuchtdauer beträgt etwa 10^{-4} Sekunden.

Die Helligkeit der Szintillationen ist bei den Kupfer-ZnS-Phosphoren unter den bisher untersuchten Substanzen am größten. Sie ist natürlich auch von der Ionisationsfähigkeit des auftreffenden Teilchens abhängig. Die Helligkeit von H-Teilchen beträgt nur ein Fünftel derjenigen von α -Teilchen gleicher Reichweite und liegt bei H-Teilchen von einigen Zentimeter Luftreichweite gerade noch über der Reizschwelle des menschlichen Auges.

Abb. 2 zeigt die Anordnung, mit deren Hilfe dieses Helligkeitsverhältnis experimentell bestimmt wurde. 2 ZnS-Schirme, von welchen der linke auf der Zeichnung von H-Teilchen, der rechte von α -Teilchen getroffen wurde, konnten in einem gemeinsamen Okular verglichen werden. Bei G konnten Graugläser bekannter Absorption eingeschoben und dadurch die Helligkeit der α -Szintillationen bis zu der der H-Szintillationen abgeschwächt werden. Die Optik bestand aus zwei gleichen Holo-Objektiven von WATSON, numerische Apertur = 0,45, und einem Vergleichsokular von C. REICHERT. Wegen der geringen Helligkeit ist es notwendig, daß der Beobachter zunächst eine halbe Stunde im Dunkeln akkommodiert. Erschwerend für die Beobachtung wirkt noch das „Hintergrundleuchten“, das durch γ - oder β -Strahlen der verwendeten Präparate hervorgerufen wird.

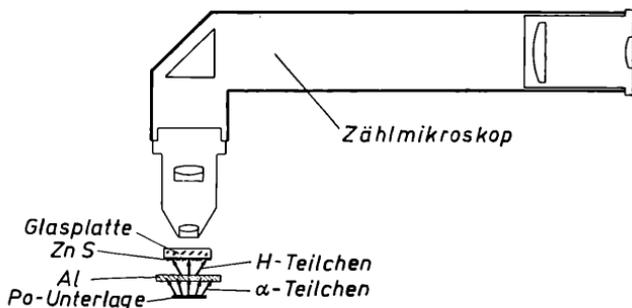


Abb. 1. Anordnung zur Szintillationszählung.

Die Methode stellt an die verwendbare Optik hauptsächlich zwei Anforderungen, welche nur bis zu einem gewissen Grad gleichzeitig verwirklicht werden können:

1. wird wegen der geringen Lichtmenge von H-Szintillationen eine möglichst hohe Apertur verlangt, 2. ist wegen der niederen Ausbeute an Szintilla-

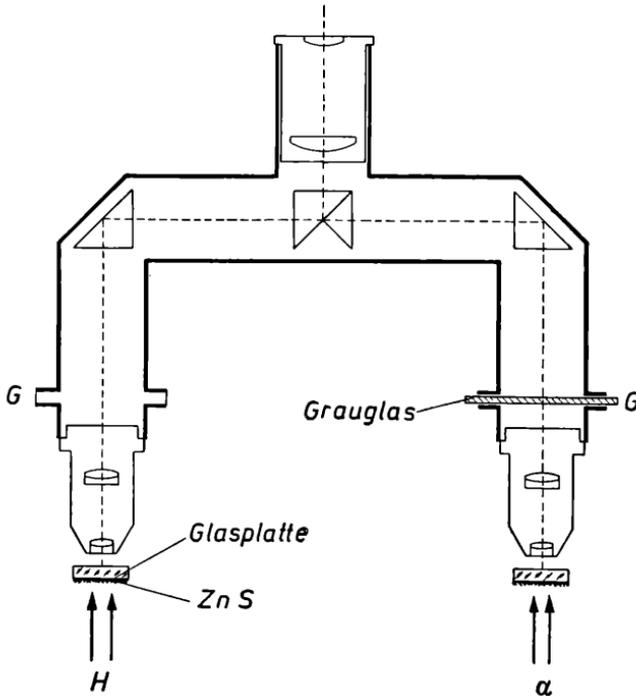


Abb. 2.

Photometrische Anordnung zum Vergleich der Helligkeit der Szintillationen verschiedener Teilchenarten. (Nach B. Karlik und E. Kara-Michailowa.)

tionen bei den Kernprozessen ein großes Gesichtsfeld erwünscht. Fallweise wurden Mikroskope mit Dingfeldern bis zu 80 qmm benützt. Die größte verwendete Apertur war 0,8. Ein zu großes Gesichtsfeld, das eine Bewegung des Auges notwendig macht, setzt natürlich die Beobachtungsfähigkeit wieder herab. Günstig erwies sich die Kombination eines Holo-Objektivs mit der numerischen Apertur = 0,45 von WATSON mit einem Vergleichsokular von C. REICHERT; ferner ein Holographic-Objektiv numerische Apertur = 0,45 von WATSON mit einem 5fach vergrößernden Holo-Okular und schließlich das Objektiv WATSON II, numerische Apertur = 0,7, Brennweite 12 mm,

mit dem $5\times$ WATSON-Holoscopio-Okular, mit einer 47fachen Gesamtvergrößerung.

Der mangelhafteste Bestandteil dieser Zählapparatur ist entschieden der menschliche Beobachter. Die verschiedenen Fehler, welche durch ihn in den Gang des Experimentes kommen, wurden durch sehr eingehende Untersuchungen klargelegt, bei welchen die Ergebnisse bei Szintillationsbeobachtung mit den Resultaten einer objektiven, später entwickelten, elektrischen Methode direkt bei jedem einzelnen Teilchen verglichen wurden. Abb. 3a zeigt die Versuchsanordnung: jedes H-Teilchen passiert zuerst eine Ionisationskammer, wo die von ihm im Füllgas erzeugten Ionen an eine negative Elektrode gehen; am Ende der Kammer trifft es auf einen ZnS-Schirm, dessen Szintillationen mikroskopisch beobachtet werden. Die elektrischen Stromstöße werden schließlich durch Marken auf einem Lauffilm registriert; der Beobachter am Mikroskop betätigt, sooft er eine Szintillation sieht, einen Taster, der auf demselben Lauffilm eine andere Marke schreibt. Auf diese Weise kann man die verschieden registrierten Teilchenzahlen direkt vergleichen. Die Verluste an Teilchenzahl und an Ionisationsenergie der α - und H-Teilchen in der Kammer vor dem Auftreffen auf den ZnS-Schirm werden ermittelt und berücksichtigt. Auch muß man den sogenannten „Schirmkoeffizienten“ in Rechnung setzen: es ist nämlich schwer möglich, die dünne ZnS-Schicht vollständig lochfrei aufzutragen; daher gehen auftreffende Teilchen aus rein geometrischen Gründen der Beobachtung verloren.

Die Resultate erwiesen sich nicht nur zur Beurteilung der bisherigen kernphysikalischen Untersuchungen als wichtig, sondern liefern auch einen interessanten Beitrag zum Gebiet der physiologischen Optik, der vielleicht auch für andere Arbeitsgebiete, z. B. bei Beobachtungen schwacher Effekte mit dem Fluoreszenzmikroskop, wertvoll sein kann.

Bei den α -Zählungen zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen der objektiven elektrischen und der Szintillationsmethode. Heikel wird die Sache erst bei den H-Teilchen, deren Szintillationen wenig über der Reizschwelle des Auges liegen.

Es zeigte sich, daß es 3 Typen von Beobachtern gibt: 1. Solche, bei denen die Zählung der H-Teilchen gut mit der elektrischen Zählung übereinstimmt, wobei allerdings eine Reaktionszeit des Beobachters zwischen dem Auftreffen der Szintillation und dem Druck auf den Taster auftritt. Sie liegt zwischen 0,2 und 0,6 Sekunden, am häufigsten bei 0,37 Sekunden (s. Abb. 3 b). (Die Zeit zwischen dem Auftreffen des Teilchens auf der Elektrode der Ionisationskammer und auf dem ZnS-Schirm ist praktisch = 0.)

Die zweite Gruppe von Zählern sieht weniger Szintillationen als tatsächlich H-Teilchen vorhanden waren, ihre Augen sind also offenbar für dieses Gebiet geringer Helligkeit nicht mehr geeignet.

Die dritte Gruppe sieht mehr Szintillationen als tatsächlich vorhanden. Aus der Lage der Tastausschläge kann man hier zwei Typen von imaginären Szintillationen erkennen: es gibt Beobachter, welche nach einer realen Szintillation noch eine oder sogar mehrere hintereinander sehen; es handelt

sich hier offenbar um positive „Nachbilder“ infolge Nachwirkung des Lichtreizes auf die Netzhaut. Der zweite Beobachtertyp sieht bei längerer Dunkelperiode zwischen 2 reellen Szintillationen eine, bei noch längerer Dunkelheit auch mehr imaginäre Szintillationen. Dafür ist wohl das sogenannte Eigenlicht der Netzhaut verantwortlich (HELMHOLTZ). Es rührt von einer Reizung der Netzhaut nicht durch äußeres Licht, sondern durch innere Erregung her, wie sie beim Beobachter, der im Dunkeln mit gespannter Aufmerksamkeit den Blick auf das Gesichtsfeld richtet, wohl auftreten kann. Auf diese Weise hervorgerufene Lichtempfindungen sind nicht gleichmäßig, sondern zeigen hauptsächlich einen fleckigen Lichtschimmer, aber auch bisweilen feinkörnige, helle Flecken, die in diesem Falle zur Vortäuschung

Abb. 3a.
Schema der Versuchsanordnung.

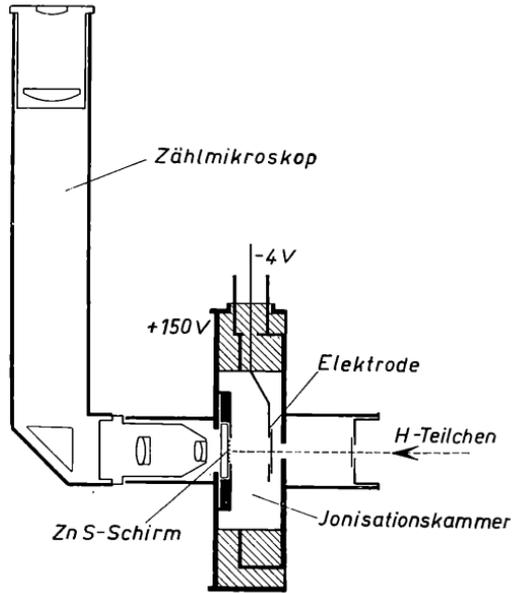


Abb. 3b.
Registrierstreifen.
Normalzählung.

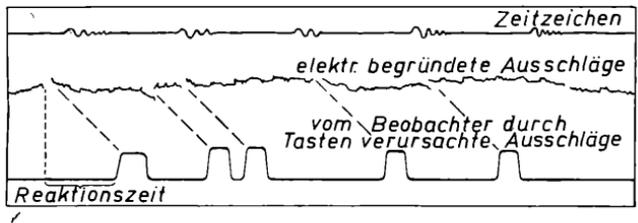


Abb. 3a und b. Vergleich der elektrischen und der Szintillationsmethode.
(Nach A. Wagner)

einer Szintillation führen könnten. Die Helligkeit der α -Szintillationen ist bereits zu groß, um solche Verwechslungen wahrscheinlich zu machen.

Während diese Fehlerquellen die Methode mit subjektiver Zählung für Absolutbestimmungen ungeeignet machen, lieferte sie dennoch brauchbare Relativwerte, wenn die Protokolle für jeden Zähler besonders ausgewertet wurden. Denn jeder Beobachter hält offenbar an seiner Eigenart bei der Beobachtung fest und wechselt seinen Fehlertyp nicht.

Daß auch gewisse quantitative Bestimmungen mit dieser Zählmethode möglich waren, beweist folgendes Beispiel: Nachdem man gefunden hatte, daß man durch α -Teilchen aus verschiedenen leichten Atomkernen schnell bewegte Kernbestandteile herausschlagen kann, war es von größter Wichtig-

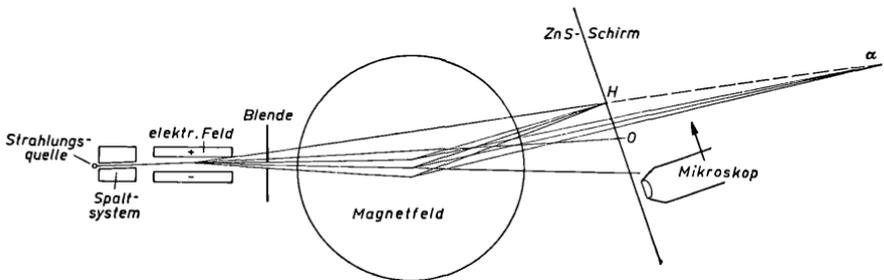


Abb. 4.

Massenbestimmung von H-Teilchen. Beobachtung nach der Szintillationsmethode. (Nach G. Stetter.)

keit, die Masse dieser Teilchen sowie deren Ladung zu bestimmen und die Vermutung, daß es Wasserstoffkerne wären, sicherzustellen.

Abb. 4 zeigt die dazu verwendete Anordnung. Die Teilchen, die aus dem Al-Kern stammen, passieren nach einem Parallelsystem zuerst ein elektrisches, dann ein magnetisches Feld (vgl. Kombination zweier Prismen verschiedener Dispersion zu einem achromatischen Prisma) und treffen schließlich auf einen ZnS-Schirm auf. Das ZnS war in diesem Falle auf einen länglichen Glasstreifen aufgebracht, längs dem das Mikroskop auf einem Schlitten verschiebbar war, so daß also eine Art Kathetometer entstand. Die Verschiebungen konnten auf 0,05 mm genau abgelesen werden. Der Beobachter hatte also nur Relativzählungen an verschiedenen Stellen des Schirmes zu machen. Aus der Ablenkung der Teilchen im elektrischen und magnetischen Feld, also aus der Größe der Verschiebung des Mikroskops, konnten die Massen bestimmt und die Wasserstoffkerne agnosziert werden.

Die Szintillationsmethode wurde dann zugunsten der inzwischen entwickelten objektiven, elektrischen Methoden aufgegeben, doch ist es vielleicht bereits von einem gewissen historischen Interesse, sich heute, in der

Periode der Röhrenelektrometer, der Zählrohrkoinzidenzmesser, der Radio-sonden usw., in Erinnerung zu rufen, mit welchen Mitteln die ersten Erfolge erzielt wurden. Zudem ist die Methode eigentlich nicht völlig ausgeschöpft worden. Wenn es gelänge, den menschlichen Beobachter durch ein besseres Registrierinstrument zu ersetzen, z. B. durch den photographischen Film, so wäre diese Methode für gewisse Zwecke, z. B. Nachweis sehr seltener α -oder H-Teilchen oder Kernspaltungen, sowohl im Labor als bei Höhenstrahl-untersuchungen auch heute noch denkbar; denn die Kenntnis und Herstel-lungstechnik der Phosphore ist inzwischen fortgeschritten, auch die Emp-findlichkeit des Films wurde verbessert. Mit einer modernen lichtstarken Optik würde sich ein Versuch damit immerhin lohnen.

Photographische Methode

Wenn ein geladenes schweres Teilchen eine feinkörnige photographische Emulsion schräg durchsetzt (Abb. 5), so macht es die AgBr-Körner auf seinem Weg durch sein Ionisierungsvermögen entweder alle oder eine Anzahl davon entwickelbar. Es entsteht auf diese Weise eine geradlinige Reihe von Schwärzungskörnern. Bei Elektronen ist dies nicht der Fall, denn Elektronen geringer Energie haben keine geradlinige Bahn in der Emulsion, sondern erleiden so starke Ablenkungen, daß sie eine Zickzackbahn beschreiben; bei den energiereicheren Elektronen reicht die spezifische Ionisation für die meisten Schwärzungskörner nicht aus, um sie durch 1 Elektron bereits entwickelbar zu machen⁴⁾. Dagegen ist es denkbar, daß Mesotronen erkennbare Bahns Spuren geben; einige Beobachtungen auf photographischen Platten von Höhen-strahlforschern lassen sich auf diese Weise deuten. Die Körner einer Emul-

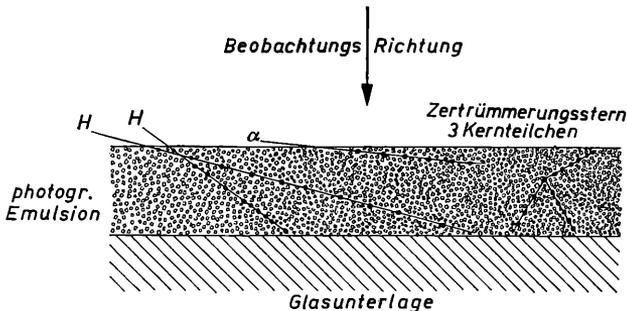


Abb. 5. Schematische Darstellung von α - und H-Bahns Spuren in der photographischen Schicht (Größe der AgBr-Körner stark übertrieben).

sion sind nach Größe und Qualität sehr verschieden. Bei manchen müssen daher mehr Ionen gebildet werden, während für andere eine geringere Ionen-zahl genügt, um geeignete „Keime“ zu bilden, an denen die Entwicklung ansetzen kann.

⁴⁾ Neuestens wurden Emulsionen entwickelt, welche die einzelnen zickzack-förmigen Elektronenbahns Spuren wiedergeben sollen.

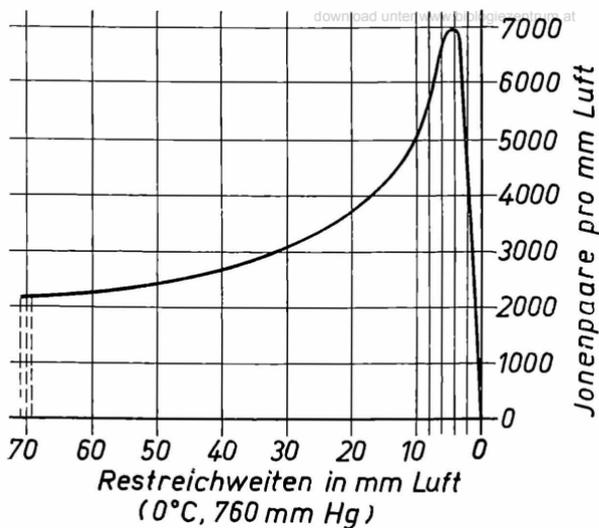


Abb. 6.
 Ionisationskurve des
 Einzelteilchens. α von
 ThC'. (Nach G. Stetter
 und W. Jentschke.)

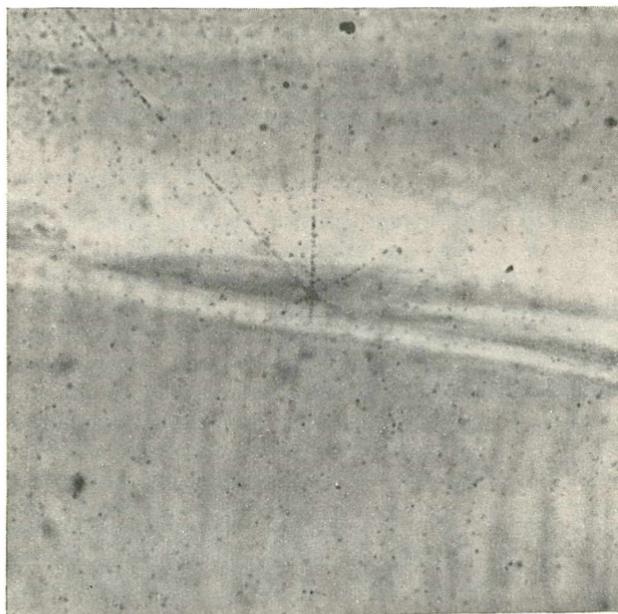


Abb. 7a.
 Mehrfach-
 zertrümmerung
 eines Atomkernes
 in der
 photographischen
 Schicht durch
 einen Höhenstrahl.

Abb. 7a, b und c.
 Mikrophotographien von Bahnspuren der photographischen Schicht.

Abb. 7b. Zerfall
eines Ra-Atomes.



7a und 7b:
auf Ilford New
Halftone Platten.

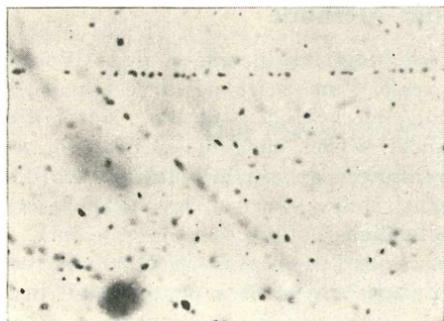


Abb. 7c. Protonenbahnsuren auf
Agfa-K-Platten. (Nach G. Knopp.)

α -Teilchen einer Energie von einigen MeV, wie sie die natürlich radioaktiven Elemente aussenden, besitzen eine hinreichende Ionisationsfähigkeit, um alle AgBr-Körner auf ihrem Weg entwickelbar zu machen. (Es kommen einige 1000 Ionen auf jedes Korn.) H-Teilchen dagegen können dies nur an besonders günstigen Körnern erreichen. Da die spezifische Ionisation mit wachsender Energie abnimmt, so haben die Bahnsuren energiereicherer Teilchen größere Kornabstände, und innerhalb ein und derselben Bahnspur sind die Kornabstände am Anfang, wo das Teilchen noch eine hohe Energie hatte, größer als am Ende der Reichweite. Dies entspricht der sogenannten Braggschen Ionisationskurve (Abb. 6). Der steile Abfall am Reichweitenende kommt in der Korndichte der photographischen Bahnsuren nicht mehr zur Geltung, da er sich nur auf die etwa zwei letzten Körner erstrecken würde.

Abb. 7 a zeigt einige Bahnsuren aus einem Atomkern in der photographischen Emulsion (Ag oder Br), der durch einen Höhenstrahl zertrümmert wurde, Abb. 7 b die von einem Ra-Atom und seinen Folgeprodukten ausgesandten α -Teilchen in einer Ilford-New Halftone-Emulsion. Abb. 7 c zeigt

einige Bahnspuren von H-Teilchen in einer Agfa-K-Emulsion. Aus der Tab. II sind die tatsächlichen Größenverhältnisse in der photographischen Schicht ersichtlich.

Tabelle 2

Emulsionsart	Schichtdicke in μ	Korndurch- messer in μ	Mittlerer Kornabstand in μ	Luftäquivalent 1 cm = ... μ
Röntgen-Zahn	35	1,5	4,8	6,9
Imperial-Prozeß	18	0,7	3	6,7
New Halftone	70	0,5	1,5	7,6

Anwendung der Methode

Die Methode eignet sich wegen der Möglichkeit langer Expositionen besonders zum Nachweis seltener Prozesse. Zum Beispiel wurde ein neuer Kernprozeß, die Mehrfachzertrümmerung durch Höhenstrahlung, mit Hilfe der photographischen Methode untersucht, wobei auch die Winkelbestimmung der Bahnspuren für Impulsbetrachtungen gebraucht wurde; auch die Protonen und Neutronen in der Höhenstrahlung wurden auf diese Weise registriert. (Letztere durch sekundäre Protonen.)

Über Kernspaltung, zum Beispiel von U, wurden ebenfalls erfolgreiche Beobachtungen mit speziell für diesen Zweck hergestellten photographischen Emulsionen durchgeführt.

Die Genauigkeit der photographischen Reichweitemessungen erwies sich als ausreichend, um sogenannte Reichweitengruppen von Kernteilchen aufzulösen (Abb. 8). Wenn man z. B. Al mit α -Strahlen einer Reichweite von 3,3 bis 3,5 cm beschießt, so werden von den getroffenen Al-Kernen Protonen ausgesandt, welche gruppenweise auf bestimmte Energien (Reichweiten) verteilt sind. Aus dieser Verteilung sind wichtige Rückschlüsse auf die Struktur innerhalb des Kernes möglich.

Eine wichtige Rolle spielen für die moderne Kernforschung die sogenannten Streuprozesse: schwere Teilchen, z. B. ein Proton und ein Deuteron, stoßen zusammen und prallen wieder auseinander, ähnlich Billardkugeln; doch kommen bei den Atomkernen und Kernteilchen auch unelastische Stöße vor, deren Studium für die Kenntnis der Kernkräfte von Bedeutung ist und auch für die Vorgänge bei der technischen Verwendung der U-Spaltung wichtig ist. Bei solchen Untersuchungen kommt es außer der Reichweitemessung auch auf die Winkelmessung an Bahnspuren in den photographischen Schichten an, die mit Hilfe von geeigneten Einrichtungen am Mikroskop durchgeführt werden.

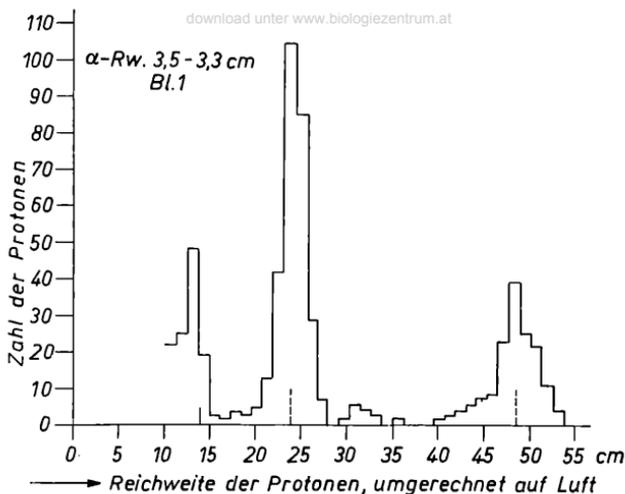


Abb. 8. Reichweitenverteilung der Protonen aus Al ausgelöst durch Po α -Teilchen der Reichweite 3,3–3,5 cm in Luft. (Nach O. Merhaut.)

Die Messungen an den Bahnspuren

Wie spielt sich nun der eigentliche Arbeitsvorgang bei diesen Messungen ab?

Um über die Energie und Teilchengattung aus den Bahnspuren Auskunft zu erhalten, muß man zwei Fälle unterscheiden.

1. Die Bahnspur endet innerhalb der Schicht: In diesem Falle läßt sich nach vorhergehender Eichung mit den in Frage kommenden Teilchenarten bekannter Energie aus der Reichweite, der Kornzahl pro Wegeinheit und ihrer Änderung längs der Bahnspur die Teilchengattung und -energie mit ausreichender Genauigkeit bestimmen.

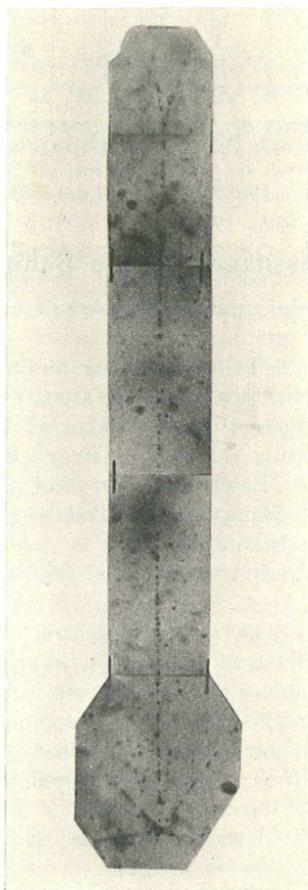
2. Die Bahn endet nicht in der Schicht, sondern geht in die Unterlage (Glas) weiter.

In diesem Fall, wo es sich größtenteils um Teilchen mit sehr hohen Energien, daher langen Bahnspuren handelt, kann man nur aus den Kornabständen und ihrem Gang mit der Reichweite im Vergleich mit den Eichkurven auf die Teilchenart schließen. Wenn die Annahme nur einer Teilchenart zulässig oder die Teilchengattung ermittelt ist, kann die Energie abgeschätzt werden. Der Fall 2 kommt hauptsächlich bei Höhenstrahluntersuchungen in Frage.

Außer Teilchenart und -energie ist ihre Richtung bzw. der Winkel zwischen zwei Bahnspuren von Wichtigkeit.

Ausgang für alle diese Bestimmungen ist jedenfalls die Messung der Länge, die Zählung der Körner und die Bestimmung des Tiefganges der Bahnspur.

Zunächst müssen die Bahnsuren überhaupt erst aufgesucht werden, denn die photographische Methode wird, wie erwähnt, besonders zum Nachweis der sehr seltenen Prozesse herangezogen; z.B. findet man auf einer etwa 3 Monate lang in 3000 m Seehöhe gegen Höhenstrahlung exponierten photographischen Platte mit einer $70\ \mu$ dicken Emulsion 3—4 „Zertrümmerungssterne“ pro 1 qcm. Da das Gesichtsfeld etwa 0,1 qmm groß ist und jedes Gesichtsfeld auch die ganze Schichtdicke hindurch durchsucht werden muß, handelt es sich dabei um eine für den Physiker zwar spannende, aber sehr ermüdende und langwierige Arbeit. Zum Suchen verwendet man eine schwächere Vergrößerung (z. B. $450\times$) mit großem Gesichtsfeld. Die Schärfentiefe soll nicht zu groß sein, da sich sonst der „Schleier“, das sind die



*Abb. 9a. Höhenstrahl-Zertrümmerungsstern und Streuprozeß α -Proton.
Mikroaufnahme.*

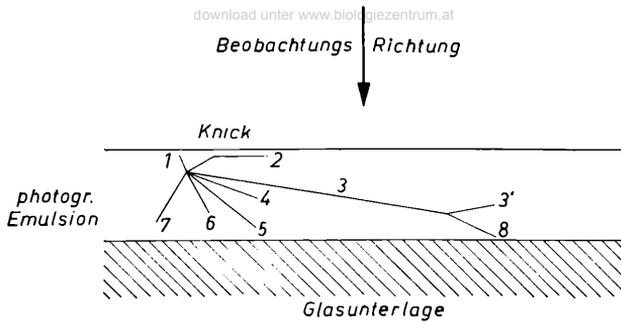


Abb. 9b. Höhenstrahl-Zertrümmerungsstern und Streuprozeß α -Proton. Querschnitt durch die Schicht, schematische Zeichnung.

AgBr-Körner, welche ohne Exposition bereits entwickelbar sind, aus allen Schichttiefen summieren und das Erkennen von kornärmeren Bahnspuren erschweren wird. Es wurden schon verschiedene Versuche gemacht, das Auffinden der Bahnspuren zu erleichtern. Zum Beispiel Projektion auf einen Schirm, der mit freiem Auge beobachtet wurde, doch ist dieses Problem, das sehr große Lichtstärken und Vergrößerungen erfordert, noch nicht gelöst; manche Beobachter finden es weniger ermüdend, die Körner hell auf dunklem Grund zu sehen, also Dunkelfeldbeleuchtung zu verwenden u. a. m.

Die meisten Beobachter zogen es vor, ein Binokularmikroskop (Reichert „CSM“) zu benutzen, statt abwechselnd ein Auge zu gebrauchen, eines auszuruhen. Besonders bewährte sich die von F. BRÄUTIGAM vorgeschlagene Optik: Reichert-Objektiv 45 τ , numerische Apertur = 0,65 in Sonderausführung, ohne Deckglas korrigiert, mit den Okularpaaren 8 \times , 10 \times und 16 \times . Zum Durchsuchen wurde gewöhnlich eine 450fache Vergrößerung gewählt mit 250 μ Dingfelddurchmesser, zum Messen und Kornzählen eine 800fache. Wesentlich ist, daß das Objektiv keine Deckglaskorrektur besitzt. Denn eine Deckglasbenützung ist hier nicht nur überflüssig, sondern teilweise sogar nicht möglich. Verwendet man aber Objektive mit Deckglaskorrektur, ohne Deckgläser zu benutzen, so erscheinen so starke Zerstreuungskreise, daß man rasch ermüdet.

Die Länge der Horizontalprojektion einer Bahnspur wird mit Hilfe eines Okularmaßstabes gemessen, die wahre Länge nach Bestimmung des Tiefenganges berechnet. Ein grundsätzlicher Fehler bei dieser Messung ist durch den mittleren Kornabstand der Bahnspuren gegeben, weil das Teilchen innerhalb eines AgBr-Kornes oder auf dem Wege zum nächsten Korn seine Bahn beenden kann. Auch kann ein „Schleierkorn“ so in der Bahnrichtung liegen, daß es fälschlich zur Bahnspur dazugerechnet wird, die dann zu lang erscheint.

Die Bahnspuren können natürlich nur von einer bestimmten Mindestlänge

an erkannt und gemessen werden; diese Mindestlänge hängt ab von der Korndichte der Bahnspur und für kornarme Bahnspuren vom Schleier; bei „Sternen“, Bahnspuren, die vom selben Atom ausgehen, kann man kürzere kornarme Bahnspuren noch erkennen, da der Anfangspunkt bekannt ist.

Die Richtung und die Winkel zwischen 2 Bahnspuren werden durch Drehung des Okularmaßstabes oder des Objektisches bestimmt.

Die Tiefenmessung erfolgt im allgemeinen durch die Feineinstellungsschraube des Mikroskops; da aber die Körner, namentlich in verschiedener Schichtdicke, sehr verschieden in Größe und sonstigem Aussehen sind, ist die Scharfeinstellung nicht immer mit Sicherheit als gleichmäßig anzunehmen. Durch einen sehr aussichtsreichen Vorschlag von HEIMSTÄDT kann die Tiefenmessung in gewissen Fällen auf folgende Weise wesentlich verbessert werden: An Stelle der Objektivverschiebung wird das Okular mit Hilfe eines Triebes verschoben. Die Scharfeinstellung wird durch Parallaxe verbessert. Dazu wird eine rechtwinkelige Blende am Kondensor angebracht, durch deren Verschiebung abwechselnd je eine Kondensorhälfte abgebildet wird. Die Halbierungslinie muß parallel der Bahnspur, deren Tiefgang bestimmt werden soll, eingestellt werden. Wechselt man nun die Bedeckung der Kondensorhälften, so scheinen diejenigen Schwärzungskörner der Bahnspur, welche nicht in der Objektebene liegen, auf die also nicht scharf eingestellt ist, eine Schwenkung auszuführen. Wenn man z. B. auf das oberste Schwärzungskorn scharf eingestellt hat, „wedelt“ die übrige Bahnspur bei Verschiebung der Blende. Das Einstellen auf höchste Schärfe bedeutet also hier Einstellen auf vollkommene Bewegungslosigkeit bei Betätigung der Blende. Darauf kann man natürlich viel leichter und sicherer einstellen (siehe die elektrischen Null-Punkt-Instrumente).

Die Frage der Scharfeinstellung ist damit also auf elegante Weise gelöst. Die Tiefenmessung durch Okularverschiebung ist allerdings nur für geringen Tiefgang möglich, weil die Verschiebung sonst zu groß wird (z. B. für 17 μ Tiefgang 100 mm), doch ist sie gerade aus diesem Grund für kleine Strecken äußerst scharf ablesbar.

Bei Messung des Tiefenganges von Bahnspuren muß der Brechungsexponent der Emulsion berücksichtigt werden, der zu 1,6 festgestellt wurde.

Schließlich muß bei der Winkelbestimmung die Tatsache in Rechnung gesetzt werden, daß die Schicht nach Entwicklung und Fixieren durch Herauslösen des AgBr 20% ihrer Dicke verliert, die Winkel der Bahnen also ursprünglich größer waren, als sie durch die Messung bestimmt werden.

Das Beispiel Abb. 9 b zeigt, daß eine so genaue Tiefenmessung in manchen Fällen auch tatsächlich notwendig ist. Unten auf dem Bild ein Zertrümmerungsstern; ein Höhenstrahl hatte einen Ag- oder Br-Atomkern in der photographischen Schicht zertrümmert, der Kernbestandteile nach allen Richtungen aussandte. Die lange Bahnspur oben scheint sich am Schluß zu verzweigen; würde man das obere Gebilde rechts allein auffinden, so würde man es wohl für einen Zertrümmerungsstern mit 3 Bahnspuren halten können. Hier ist aber die Annahme eines „Streuprozesses“ wahr-

scheinlicher, daß nämlich das Kernteilchen mit einem Wasserstoffkern der Emulsion zusammengestoßen sei, ihn in Bewegung versetzt und selbst eine Richtungsänderung erfahren habe. In diesem Fall müssen die 3 Bahns Spuren genau in einer Ebene liegen. Durch die genaue Ausmessung der Winkel der 3 Bahns Spuren konnte diese Annahme bestätigt werden.

Eine besonders hohe Verstärkung und Schärfe erforderte das Studium der Bahns Spuren von U-Spaltstücken und stark ionisierenden Teilchen in der Höhenstrahlung. Wie schon erwähnt, machen α -Teilchen von einigen MeV bereits alle AgBr-Körner entwickelbar. Trotzdem scheinen die Bahns Spuren derartiger hochionisierender Teilchen noch dichter zu sein. Stark vergrößerte Mikroaufnahmen führen aber zu der Erklärung, daß die sehr energiereichen Sekundärelektronen, die solche Teilchen auf ihrem Weg in großer Dichte erzeugen, die benachbarten AgBr-Körner entwickelbar machen. Dadurch wird die beobachtete Verdickung der Bahns pur hervorgerufen.

In letzter Zeit wurden die Spezialemlulsionen für die kernphysikalischen Untersuchungen wesentlich verbessert; bei den speziellen Anforderungen, welche diese Methode an die Optik stellt, und bei dem zunehmenden Interesse für die Kernphysik werden den Spezialemlulsionen vielleicht auch Spezialmikroskope folgen, welche den Arbeitsaufwand der Beobachter wohl erleichtern können.

Verfärbungshöfe

Schließlich erwähnen wir noch eine für die Kernphysik (u. a. bei der Erdaltersbestimmung) interessante Gruppe von mikroskopisch beobachtbaren Erscheinungen.

Befinden sich in gewissen Gesteinen, besonders in Glimmer und Biotit, geringe Einschlüsse von U oder Th mit ihren Zerfallsprodukten, so wird das Gestein durch die ausgesandten ionisierenden α -Teilchen im Lauf von Millionen Jahren verfärbt; die verschiedenen α -Reichweiten der Zerfallselemente zeichnen sich im Gestein bei genügend kleinen Einschlüssen (Radius $< 1 \mu$) als verschieden stark verfärbte Kugelschalen ab. Sie werden in Dünnschliffen als konzentrische Kreise mit Durchmessern von Hundertstellmillimetern beobachtet. In manchen Gesteinen findet man verfärbte Kreisflächen, in anderen, z. B. Flußspat aus Wölsendorf, erscheinen nur die Reichweitenden als feine Kreislinien. Man kann in günstigen Fällen alle α -strahlenden Elemente der betreffenden radioaktiven Zerfallsreihe an ihrer charakteristischen α -Reichweite auffinden; da aber einige dieser Reichweiten sehr nahe aneinander liegen, ist eine sehr starke Vergrößerung notwendig, um die Ringe voneinander zu trennen.

Diese Ausführungen betreffen die reine Kernforschung; in der angewandten Kernphysik, bei der Verwendung künstlich radioaktiver Indikatoren, z. B. in der Biologie oder Metallurgie, ist man vielfach auf die mikroskopische Auswertung von „Autoradiographien“ angewiesen. Sie werden durch die Elektronenstrahlung der radioaktiven Indikatoren in einer photographischen Schicht hervorgerufen, die man auf einen Dünnschnitt aus dem Unter-

suchungsmaterial legt, und zeigen die Verteilung der aufgenommenen Substanz, z. B. das Jod in der Schilddrüse.

Aus diesem Überblick und den angeführten Beispielen geht jedenfalls hervor, was für eine wichtige Rolle die Mikroskopie von Anfang an bis jetzt in der Kernphysik spielte, und daß sich ihr auf diesem Gebiet auch weiterhin interessante Aufgaben bieten.

Literatur

Kernphysik

Weiszäcker, Kernphysik. Akademische Verlagsgesellschaft 1938.

Szintillationsmethode

Kara-Michailowa E., Wr. Ber. **136** (1927): 557. Mitt. Ra-Inst. Nr. 204: 191.

Hasche R. L., Wr. Ber. **135** (1926): 601.

Stetter G., Z. Phys. **34** (1925): 158.

Karlik B. und *Kara-Michailowa E.*, Z. Phys. **48** (1928): 765.

Wagner A., Wr. Ber. **145** (1936): 175. Mitt. Ra-Inst. Nr. 376.

Photographische Methode

Michl M., Wr. Ber. **121** (1912): 1431.

Blau M., Wr. Ber. **139** (1930): 327. Mitt. Ra-Inst. Nr. 259.

Blau M. und *Wambacher H.*, Nature, **140** (1937): 585. Wr. Ber. **146** (1937): 259. Mitt. Ra-Inst. Nr. 397.

Schopper E., Phys. Z. **40** (1939): 22.

Eggert J. und *Schopper E.*, Z. Wiss. Phot. **37** (1938): 221.

Stetter G. und *Wambacher H.*, Phys. Z. **40** (1939): 707.

Merhaut O., Z. Phys. **115** (1940) 77.

Wambacher H., *Widhalm A.* und *Heimstädt O.*, Wr. Ber. **152** (1944): 173.

Verfärbungshöfe

Kirsch G., Radioaktivität und Geologie.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mikroskopie - Zentralblatt für Mikroskopische Forschung und Methodik](#)

Jahr/Year: 1949

Band/Volume: [4](#)

Autor(en)/Author(s): Wambacher Hertha

Artikel/Article: [Mikroskopie und Kernphysik. 92-110](#)