

Neutronenphysik

Autor(en): **Huber, Paul**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **33 (1960)**

Heft [5]: **Supplementum 5. Beiträge zur Entwicklung der Physik**

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-422253>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Neutronenphysik

Von PAUL HUBER, Physikalisches Institut der Universität Basel

Sämtliche Atomkerne sind aus zwei Nukleonensorten, den Protonen und Neutronen aufgebaut. Bestimmte Neutronen- und Protonenzahlen kennzeichnen die stabilen Kerne. Ausser dem leichten Wasserstoffkern sind Kerne nur dann stabil, wenn sie eine genügende Anzahl von Neutronen enthalten. Für die Stabilität der Kernmaterie spielen daher die Neutronen eine ausschlaggebende Rolle, und ihre physikalischen Eigenschaften zu kennen ist wichtig. Die besondere Eigenschaft der Neutronen ist ihre Ladungslosigkeit. Sie erfahren keine Coulombsche Abstossung und ermöglichen wegen der anziehenden Kernkräfte eine stabile Bindung der Kernmaterie, ungeachtet der Abstossungskräfte zwischen Protonen.

Auch bei der Umlagerung der Kernmaterie sind Neutronen bedeutsam. Bereits langsame Neutronen vermögen in Kernen Reaktionen zu erzeugen. Diese Tatsache hat bei der Verwirklichung der Atomenergie mit Uranspaltungen eine entscheidende Bedeutung erlangt. Die Neutronen sind damit Hilfsmittel für eine Entdeckung geworden, deren Folgen weit über das engere Fachgebiet der Physik hinausreichen und noch unübersehbare Auswirkungen nach sich ziehen werden.

Neutronen lassen sich nach zwei Gesichtspunkten verwenden: Einmal als Geschosse für kernphysikalische Untersuchungen. Hieraus erhält man Kenntnisse von den Wechselwirkungen zwischen Nukleonen, und damit vom Charakter der Kernkräfte, über mögliche Energiezustände der Kernmaterie und über Kernreaktionen. Vieles vom heutigen Wissen von den Kernen stammt aus Neutronenuntersuchungen. Dann haben sich Neutronen als praktische Hilfsmittel von grösstem Ausmass erwiesen. Hier ist in erster Linie die Atomenergie zu erwähnen. Mit Hilfe von Neutronen lässt sich ein kleiner Teil der in der Materie steckenden Energie nutzbar machen. Neutronen finden überdies Verwendung bei der Erzeugung radioaktiver Stoffe, als Hilfsmittel für Aktivierungs- und Strukturanalysen und schliesslich für medizinische Zwecke. Weil die freien Neutronen radioaktiv sind und eine Halbwertszeit von nur 12,3 min besitzen, müssen sie für alle Verwendungsarten immer wieder durch Kernreaktionen erzeugt werden. Ein Uranreaktor von 10^4 kW Leistung vermag bereits etwa 50 Gramm Neutronen pro Sekunde zu erzeugen.

1932 entdeckte J. CHADWICK die Neutronen mit Hilfe von Rückstoss-experimenten. Für die Neutronenerzeugung benützte er Po- α -Strahlen. Mit der Entwicklung der Beschleunigungstechnik durch COCKROFT und WALTON fanden (d, n)-Reaktionen als Neutronenquellen Verwendung. Im Vergleich zur Be- α -Quelle lassen sich mit Hochspannungsmaschinen wesentlich intensivere Quellen herstellen, wobei die Neutronenenergie sich mit der Beschleunigungsspannung in weitem Masse verändern lässt. Häufig findet die von OLIPHANT, HARTECK und RUTHERFORD entdeckte $D(d, n)He^3$ -Reaktion für die Neutronenerzeugung Anwendung. Ihr besonderer Wert liegt in einer grossen Neutronenausbeute bei kleinen Deuteronenenergien.

Als erster Forscher an der ETH hat sich KESSAR D. ALEXOPOULOS mit Kernreaktionen beschäftigt und damit die Aera der Kernphysik am Scherrerschen Institut eingeleitet. Seine 1935 erschienene Arbeit [1]*) «Zertrümmerungsversuche an Lithium, Bor und Deuterium» befasste sich zu einem wesentlichen Teil mit der (d, d)-Reaktion. Da weder Ausbeute noch Spannungsabhängigkeit dieser Reaktion bekannt waren, bildeten sie das Forschungsziel. Von 20–140 kV wurde die Neutronenintensität der Reaktion



gemessen.

Wenn wir die heutigen für die Kernphysik benützten Apparate mit denen der 30iger Jahre vergleichen, so fallen in erster Linie die verbesserten technischen Möglichkeiten auf. Hochspannungsanlagen für Gleichspannungen, Beschleunigungsröhren für geladene Teilchen und Hochvakuumeinrichtungen waren experimentelle, erst im Entwicklungsstadium sich befindende Hilfsmittel, die vielfach behelfsmässig gebaut werden mussten, da sie oft nicht erhältlich waren oder zu ihrer Anschaffung das Geld fehlte. Alte Röntgentransformatoren wurden, so gut es ging, passend umgebaut und für die Glühkathoden-Gleichrichter Heiztransformatoren mit isolierter Sekundärwicklung für 200 kV selber gewickelt. Dennoch war für diesen Zweig der Forschung die Zeit des Arbeitens mit primitivsten Hilfsmitteln wie Picein, Bindfaden und anderen einfachen Dingen, die noch ein erfolgreiches Experimentieren zulies, nicht mehr angepasst. Hochvakuum und Hochspannungen verlangten bereits einigermaßen technische Konstruktionen, wollte der Forscher zu seinen Experimenten kommen und nicht seine Zeit mit Vakuum-Löchern und Durchschlägen mit nachfolgenden unliebsamen Wanderwellen zubringen. Als grosse Neuerung kam der Apiezon-Q-Kitt in Gebrauch, der sich zum schnellen Zu- und Aufkitten hervorragend bewährte. Zählrohre fabrizierte jedermann noch eifrig mit mehr oder weniger Erfolg und nach ver-

*) Die Ziffern in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis, Seite 82.

schiedenen Rezepten, da die selbstlöschenden Zählrohre noch nicht erfunden waren. Verstärker wurden eigenhändig verdrahtet und wegen Mikrophonie sorgfältig in Watte verpackt. In Serie geschaltete Trockenbatterien stellten kostbare und gehütete Spannungsquellen für Zählrohre und Ionisationskammern dar.

E. BALDINGER, P. HUBER und H. STAUB setzten das Werk von ALEXOPOULOS fort durch eine detailliertere Untersuchung der (d, d) -Reaktion [2]. Neben einer Bestimmung der Neutronenausbeute war die Arbeit vor allem dem Spektrum der (d, d) -Neutronen gewidmet. Als Methode wurde die Messung der Energieverteilung von Rückstosskernen in einer Ionisationskammer gewählt. Die Autoren zeigten, wie das Neutronenspektrum der einfallenden Neutronen aus der Energieverteilung der Gasrückstosskerne in einer Ionisationskammer bestimmt werden konnte unter der Annahme einer isotropen Streuung im Schwerpunktsystem. Gibt $H(E)$ die Energieverteilung der Rückstosskerne (gemessen wurden Heliumrückstöße) und $S(E)$ das Neutronenspektrum an, so gilt

$$S(E) = - \frac{E}{n d \sigma} \cdot \frac{dH}{dE} .$$

σ bedeutet den totalen Neutronenstreuquerschnitt des Füllgases, n die Anzahl der Streuatome pro Volumeinheit und d die Distanz der parallelen Platten der Ionisationskammer. Diese Beziehung ermöglichte es, aus der gemessenen Energieverteilung der He-Rückstöße das Neutronenspektrum der benutzten (d, d) -Quelle anzugeben. Eine Hauptlinie ergab sich bei einer Energie, die der Energietönung der (d, d) -Reaktion entsprach. Eine zweite scheinbare Linie trat bei rund 1 MeV Energie auf, die aber als Folge gestreuter Neutronen erklärt wurde. In einer späteren Arbeit zeigten STAUB und STEPHENS [3], dass in diesem Energiegebiet eine Resonanzstreuung der Neutronen an Helium stattfindet.

Die folgenden Arbeiten über Neutronenphysik, die im Institut von Scherrer intensiv gepflegt wurden und an denen er regen Anteil nahm und viele Ideen und Anregungen beitrug, lassen sich in drei Gruppen einteilen:

1. Kernumwandlungen mit Neutronen
2. Streuung schneller Neutronen
3. Neutronen-Polarisations-Phänomene.

1. *Kernumwandlung mit Neutronen.* Hier handelt es sich in erster Linie um die Bestimmung von Energietönungen und Wirkungsquerschnitten von Kernreaktionen. Neutronen waren hierzu sehr geeignet, weil sie unabhängig von der Coulomb-Abstossung auch bei schwereren Kernen Reaktionen auszulösen vermögen. Obwohl anfänglich die genauesten Energietönungen aus Massenbestimmungen erfolgten, zeigte sich bald, dass auch Reaktionsuntersuchungen hierzu geeignet sind. Die Neutronen-

masse zum Beispiel, eine für den Kernbau entscheidende Grösse, lässt sich nur unter Zuzug von Reaktionsuntersuchungen bestimmen.

Die Messung von Neutronenreaktionen erfolgte zunächst mit der Ionisationskammermethode, die wesentlich ausgebaut wurde. Konstanz der Verstärkung und gute Eichmöglichkeit der Messanordnung waren Voraussetzungen, damit diese Methode die Genauigkeit der bisher üblichen Wilsonkammer erreichte und sogar übertraf. Die umständliche Eichung mit α -Teilchen ersetzte man durch präzise influenzierte Ladungsstösse. Anfänglich untersuchte man Reaktionen mit bestimmten Neutronenenergien, da nur Beschleunigungsanlagen für 130 kV zur Verfügung standen, die keine nennenswerte Variation der Neutronenenergie zuließen. Reaktionen an Stickstoff, Fluor, Schwefel und Chlor erfuhren eine Bearbeitung [4]. Später, nachdem mit dem Tensator Spannungen bis 660 kV zur Verfügung standen, waren auch Experimente mit veränderlichen Neutronenenergien möglich. Wichtige Resonanzprozesse liessen sich messen, die sich für die Aufklärung von Kernniveaus als bedeutsam erwiesen. Ausführliche Studien [5] erfolgten an Stickstoff, Phosphor und Schwefel.

Neben der direkten Energiebestimmung der Reaktionsprodukte in der Ionisationskammer, die aber nur bei gasförmigem Targetmaterial durchführbar ist, lassen sich Neutronenreaktionen mit Hilfe der radioaktiven Endprodukte studieren. Der Anwendungsbereich dieser Methode [6] ist sehr umfangreich, so dass sie in manchen Arbeiten Verwendung findet.

Eine ausgedehnte Arbeit [7] widmete sich (n, p) - und $(n, 2n)$ -Prozessen mit schnellen Neutronen. Es wurden die absoluten Querschnitte dieser Reaktionen für verschiedene Kerne mit $(\text{Li} + \text{D})$ - und $(\text{B} + \text{D})$ -Neutronen bestimmt bei einer Beschleunigungsspannung von 600 kV. Da die Quellen Neutronen verschiedener Energien emittieren, war eine Prüfung der Ergebnisse mit der statistischen Theorie der Kernreaktionen ziemlich schwierig. Dennoch zeigte der Vergleich eindeutig, dass die (n, p) -Prozesse wesentlich wahrscheinlicher sind als es die Theorie zulässt. Für die $(n, 2n)$ -Reaktionen ergab sich eine recht gute Übereinstimmung.

2. *Streuquerschnitte von schnellen Neutronen.* Die Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Kern kann zu verschiedenen Prozessabläufen führen. Elastische Streuung ist vorhanden, wenn Targetkern und Neutron wieder als Endprodukte auftreten und beim Prozess die gesamte kinetische Energie erhalten bleibt. Die elastische Streuung kann als Potential- und Resonanzstreuung stattfinden. Im Unterschied zur Potentialstreuung findet bei der Resonanzstreuung die Formung eines Zwischenkernes statt. Bei der unelastischen Streuung entsteht ein angeregter Endkern. Von einer Kernumwandlung im engeren Sinne spricht man, wenn bei der Reaktion geladene Teilchen wie Protonen, Deuteronen, α -Teilchen usw. entstehen. Bei höheren Neutronenenergien können auch mehrere Teilchen

aus dem Zwischenkern emittiert werden. Ein wichtiger Prozess dieser Art ist der $(n, 2n)$ -Prozess. Die Kernspaltung ist gekennzeichnet durch einen Zerfall des Zwischenkernes in zwei Bruchstücke. Neutroneneinfangsprozesse bestehen schliesslich in der Absorption des einfallenden Neutrons, wobei der angeregte Zwischenkern unter Emission einer γ -Strahlung in den Grundzustand übergeht. Die Mannigfaltigkeit von Kernreaktionen ist sehr gross und steigt mit der Neutronenenergie. Die Untersuchung dieser unterschiedlichen Prozesse hat zu wesentlichen Erkenntnissen über die Kernmaterie und ihrer Struktur geführt. Neutronenstreuexperimente sind hiezu besonders aufschlussreich. Auch bei kleinen Energien können selbst schwerere Kerne untersucht werden. Experimentell lassen sich totale und differentielle Wirkungsquerschnitte, die von elastischen oder inelastischen Streuungen herrühren, und Polarisierungseffekte studieren. Solche Messungen liefern ausgezeichnete Informationen, die uns spezielle Kenntnisse der Kernmaterie vermitteln, oder die sich als Prüftest für Kerntheorien eignen. Neutronenexperimente haben besonders zur Schöpfung des «optischen Kernmodells» beigetragen. Der Kern wirkt in diesem Modell stark streuend und schwach absorbierend auf die einfallende Neutronenwelle. Mathematisch lassen sich diese Forderungen durch ein komplexes Kernpotential ausdrücken.

Eine grosse Zahl von Streuversuchen mit Neutronen an Kernen sind an der ETH durchgeführt worden, wobei totale und differentielle Querschnitte bestimmt wurden. Der totale Neutronenwirkungsquerschnitt schliesst alle Kernwechselwirkungen ein, die aus einem parallelen Neutronenbündel Neutronen ausscheiden. Er wird mit der Transmissionsmethode gemessen. Sie fusst auf der Messung der Schwächung der Intensität eines Neutronenbündels, die beim Durchgang durch die zu untersuchende Materialprobe entsteht. Ist die Intensität des Bündels ohne Absorber I_0 , mit Absorber I und besitzt der Absorber n Kerne pro Volumeinheit und eine Länge x , so gilt:

$$I = I_0 e^{-n \sigma x}$$

wobei σ den totalen Querschnitt angibt. Bei dieser Messung müssen aber wichtige Korrekturen für den Untergrund angebracht werden, die die Arbeit ganz wesentlich erschweren. An Be, C, N, O, Al, Si und Na wurden für Neutronen von 1,9–3,8 MeV totale Querschnitte bestimmt [8].

Neben dem totalen Streuquerschnitt ist auch die Kenntnis des differentiellen Querschnittes für die Klärung von Kerneigenschaften und Kernmodellen von grösstem Interesse. Hier geht es um die Messung der Winkelverteilung der gestreuten Neutronen bezüglich des einfallenden Neutronenstrahls.

Es existieren zwei Methoden für die Bestimmung differentieller Querschnitte. Die eine basiert auf der Messung des Energiespektrums von

Rückstosskernen. BALDINGER, HUBER und STAUB zeigten, wie das Energiespektrum von Neutronen sich aus der Energieverteilung von Rückstosskernen in einer Ionisationskammer berechnen lässt, sofern eine elastische und isotrope Streuung im Schwerpunktsystem vorliegt. BARSCHALL und KANNER bemerkten die wichtige Tatsache, dass die Winkelverteilung der gestreuten Neutronen im Schwerpunktsystem sich direkt aus der Energieverteilung der Rückstosskerne bestimmen lässt [9, 10]. Jedes um einen gegebenen Winkel gestreute Neutron überträgt dem Rückstosskern eine eindeutig bestimmte Energie, so dass aus der Energieverteilung die Winkelverteilung abgelesen werden kann. Massgebend für diese Methode ist die Kenntnis des Energiespektrums der Rückstosskerne. Seine Messung erfordert gasförmige Streukörper, was die Methode nur für eine beschränkte Zahl von Stoffen anwendbar macht. Die zweite Methode zur Bestimmung differentieller Streuquerschnitte beruht auf einer direkten Zählung der gestreuten Neutronen. Um die Streuintensität zu erhöhen, werden oft ringförmige Streukörper benützt. In Zusammenarbeit mit dem Basler Institut wurde die Winkelverteilung gestreuter Neutronen an Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff gemessen [11].

Eine besondere Eigenschaft der Streuung von Neutronen einiger MeV Energie an ^{12}C und ^{16}O ist die Abwesenheit von weiteren Konkurrenzreaktionen und inelastischer Streuung. An ^{12}C wurde beobachtet [12], dass die S-Streuung für Neutronen von 2,4–3,6 MeV übereinstimmt mit der Hartkugelstreuung. Die Phase der p -Welle dagegen zeigt zwei Resonanzen vom Typ $3/2^+$, deren Breiten sich aber um einen Faktor 20 unterscheiden. Weitere ausgedehnte Messungen erfolgten an Deuterium [13], Beryllium [14], Kupfer, Tantal, Blei und Wismut [15]. Die Winkelverteilung von gestreuten Neutronen einer Primärenergie von 3,3 MeV an den vier letztgenannten Elementen wurde sorgfältig gemessen und mit Hilfe des optischen Kernmodelles diskutiert. Die experimentell erhaltenen Winkelverteilungen stimmten gut mit der theoretisch aus dem «optischen Modell» berechneten überein. Das optische Kernmodell charakterisiert die verschiedenen Kerne nur nach dem Kernradius und nicht nach speziellen Eigenschaften. Benachbarte Kerne sollten dementsprechend ähnliche Verteilungen aufweisen, was für die Elemente Blei und Wismut auch bestätigt wird.

3. *Polarisationsphänomene.* Die (d, d) -Reaktion erfolgt nach zwei verschiedenen Reaktionskanälen, wobei entweder Neutronen oder Protonen emittiert werden. Eine theoretische Analyse dieser Reaktion [16] zeigt, dass eine starke Spinbahnkopplung und ein p -Wellen-Anteil notwendig sind, damit die beobachtete Winkelverteilung der emittierten Neutronen bzw. Protonen verstanden wird. Diese Eigenschaften sind gerade geeignete Bedingungen für die Produktion von polarisierten Partikeln, und es ist daher zu erwarten, dass sowohl die aus der (d, d) -Reaktion

erzeugten Neutronen als auch Protonen partiell polarisiert sind. Untersuchungen zum Nachweis von polarisierten Neutronen wurden gleichzeitig in Basel und am ETH-Institut ausgeführt [17]. Der Nachweis der Polarisation von Neutronen aus der (d, d) -Reaktion erfolgte aus der Bestimmung der azimutalen Verteilung der an Kohlenstoff gestreuten Neutronen. Sind die Streuphasen für Kohlenstoff bekannt, lässt sich aus der azimutalen Asymmetrie die Polarisation der Neutronen berechnen. Eine ausführliche Untersuchung [12] der Polarisation der (d, d) -Neutronen für eine Deuteronenenergie von 600 keV ergab in Abhängigkeit vom Emissionswinkel ϑ der Neutronen im Schwerpunktsystem eine Polarisation

$$P(\vartheta) = \frac{-(0,165 \pm 0,017) \sin(2\vartheta)}{1 + 1,15 \cos^2 \vartheta + 0,75 \cos^4 \vartheta}.$$

Ein Maximum der Polarisation tritt auf für $\vartheta = 58^\circ$ und 122° . Eingehende Untersuchungen [15] über die Polarisation gestreuter (d, d) -Neutronen von 3,3 MeV erfolgten an Kupfer, Tantal, Blei und Wismut. Es wurden die Polarisationsgrade für die an Cu, Ta, Pb und Bi gestreuten Neutronen für Streuwinkel von 30° – 150° im Schwerpunktsystem gemessen. Die Ergebnisse wurden theoretisch ausgewertet mit Hilfe des «optischen Kernmodells», wobei als weitere Verfeinerung des komplexen Potentials ein zusätzlicher Spin-Bahnkopplungsterm eingeführt werden musste.

Ein Problem, das noch an der ETH in Bearbeitung steht, ist der Polarisation der an Deuterium [18] gestreuten Neutronen gewidmet. Im Hinblick auf die Frage der Abweichungen der Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung von einer Zentralkraft ist diese Untersuchung von Bedeutung.

Polarisationseffekte sind geeignet für Bestimmungen von Streuphasen, und aus ihnen lassen sich wichtige Schlüsse ziehen auf die Grösse der Spin-Bahnkopplung. Experimentell jedoch ist es sehr schwierig, Polarisationseffekte genau zu messen, so dass ihre Bedeutung für theoretische Diskussionen und die Klärung gewisser Kerneigenschaften noch nicht voll zur Auswirkung kommt. Dem Experimentalphysiker öffnet sich hier ein ausserordentlich wichtiges und interessantes Untersuchungsgebiet.

In den vorangehenden Ausführungen ist eine kurze Zusammenfassung der Arbeiten über Neutronenphysik gegeben, die am Scherrer'schen Institut im Lauf der letzten 25 Jahre ausgeführt wurden. Die Literaturzitate belegen, welch grossen direkten Anteil Scherrer an diesen Forschungen besitzt. Darüber hinaus weiss aber jeder, der einmal mit diesem, der Forschung in seltenem Masse verbundenen Menschen in näheren Kontakt kam, wie anspornend seine Vorschläge und wie richtig, wenn auch nicht immer bequem, seine Kritik war. Er hat es in unerhörtem Ausmass verstanden, seinen Schülern die tragende Kraft und das schöpferische Interesse für die wissenschaftliche Forschung zu übermitteln. Dafür bin ich meinem Lehrer zutiefst dankbar.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] KESSAR D. ALEXOPOULOS, *Helv. phys. Acta* 8 (1935).
- [2] E. BALDINGER, P. HUBER und H. STAUB, *Helv. phys. Acta* 11, 245 (1938).
- [3] H. STAUB und W. E. STEPHENS, *Phys. Rev.* 55, 131 (1939).
- [4] E. BALDINGER und P. HUBER, *Helv. phys. Acta* 12, 281 (1939);
O. HUBER, P. HUBER und P. SCHERRER, *Helv. phys. Acta* 13, 209 (1940);
O. HUBER, P. HUBER und P. SCHERRER, *Helv. phys. Acta* 13, 212 (1940);
D. C. GUGELOT, P. HUBER und P. SCHERRER, *Helv. phys. Acta* 14, 138 (1941);
P. HUBER, *Helv. phys. Acta* 14, 163 (1941);
P. HUBER, J. ROSSEL und P. SCHERRER, *Helv. phys. Acta* 14, B 14 (1941);
P. SCHERRER, P. HUBER und J. ROSSEL, *Helv. phys. Acta* 14, 625 (1941);
A. GIBERT, F. ROGGEN und J. ROSSEL, *Helv. phys. Acta* 16, 435 (1943); 17,
97 (1944).
E. BLEULER und J. ROSSEL, *Helv. phys. Acta*, 20, 445, 467 (1947).
- [5] E. BLEULER, *Helv. phys. Acta* 20, 519 (1947);
E. LÜSCHER, R. RICAMO, P. SCHERRER und W. ZÜNTI, *Helv. phys. Acta* 23,
561 (1950);
W. BOLLMANN und W. ZÜNTI, *Helv. phys. Acta* 24, 517 (1951).
- [6] W. ZÜNTI und E. BLEULER, *Helv. phys. Acta* 18, 263 (1945);
E. BLEULER und W. ZÜNTI, *Helv. phys. Acta* 19, 137 (1946);
O. HUBER, O. LIENHARD und H. WÄFFLER, *Helv. phys. Acta* 15, 314 (1942).
- [7] H. Wäffler, *Helv. phys. Acta* 23, 239 (1950).
- [8] R. RICAMO, W. ZÜNTI, E. BALDINGER und P. HUBER, *Helv. phys. Acta* 23,
508 (1950);
R. RICAMO und W. ZÜNTI, *Helv. phys. Acta* 24, 302, 419 (1951);
R. MEIER und R. RICAMO, *Helv. phys. Acta* 26, 430 (1953);
P. MEIER, P. RICAMO, W. ZÜNTI und P. SCHERRER, *Helv. phys. Acta* 26,
451 (1953).
- [9] H. H. BARSCHALL und M. H. KANNER, *Phys. Rev.* 58, 590 (1940).
- [10] H. B. WILLARD, L. C. BIEDENHARN, P. HUBER und E. BAUMGARTNER, *Fast
Neutron Physics*, Interscience Publishers, Inc. New York (im Druck).
- [11] E. BALDINGER, P. HUBER, R. RICAMO und W. ZÜNTI, *Helv. phys. Acta* 23,
503 (1950);
A. REMUND und R. RICAMO, *Helv. phys. Acta* 25, 447 (1952).
- [12] R. MEIER, P. SCHERRER und P. TRÜMPY, *Helv. phys. Acta* 27, 577 (1954).
- [13] J. HALTER, I. HAMOUDA und P. SCHERRER, *Helv. phys. Acta* 23, 510 (1950);
I. HAMOUDA, J. HALTER und P. SCHERRER, *Helv. phys. Acta* 24, 217 (1951);
I. HAMOUDA und G. DE MONTMOLLIN, *Helv. phys. Acta* 25, 107 (1952).
- [14] R. MEIER und R. RICAMO, *Helv. phys. Acta* 26, 430 (1953).
- [15] H. BRUGGER, H. GERBER, B. LÜTHY und A. REMUND, *Helv. phys. Acta* 28,
331, (1955);
A. REMUND, *Helv. phys. Acta* 29, 545 (1956).
- [16] F. M. BEIDUCK, J. R. PRUETT und E. J. KONOPINSKI, *Phys. Rev.* 77, 622 (1950).
- [17] P. HUBER und E. BAUMGARTNER, *Helv. phys. Acta* 26, 420 (1953);
R. RICAMO *Helv. phys. Acta* 26 423 (1953);
E. BAUMGARTNER und P. HUBER, *Helv. phys. Acta* 26, 545 (1953).
- [18] M. BRÜLLMANN, H. GERBER und D. MEIER, *Helv. phys. Acta* 31, 318 (1958);
H. GERBER, M. BRÜLLMANN und D. MEIER, *Helv. phys. Acta* 31, 580 (1958).