

Absorption der neutronenerzeugenden Komponente der kosmischen Strahlung in Blei und Aluminium

Von H. REICH*

Aus dem II. Physikalischen Institut der Universität Heidelberg
(Z. Naturforsch. **10 a**, 914–919 [1955]; eingegangen am 17. Oktober 1955)

Es wurde die Absorption der neutronenerzeugenden Komponente in Blei und Aluminium in Seehöhe nach der „differentiellen“ Methode untersucht, um weiteres Material zur Deutung der Übergangseffekte bei Kernereignissen zu liefern. Die bis zu 28 cm Tiefe gemessene Bleikurve zeigt einen nahezu glatten Verlauf entsprechend der Abschwächungslänge von 28 cm (± 320 g/cm²); die schwache Andeutung eines Maximums in 21 cm Tiefe liegt nur knapp außerhalb der Fehlergrenzen.

Bei Aluminium wurde ein Maximum in 8 cm Tiefe gefunden. Es wird die Möglichkeit diskutiert, das Maximum durch rückwärts gestreute, sternergezeugende Strahlung zu erklären.

Die Intensität der Höhenstrahlungskomponente, die in Kernemulsionen „Sterne“ hervorruft, fällt nach dem Übergang von Luft in feste Absorber nicht nach einem einfachen Exponentialgesetz ab, sondern durchläuft verschiedene Maxima, deren Deutung noch Schwierigkeiten bereitet^{1–5}. Eng verknüpft mit der Sternhäufigkeit ist die Intensität langsamer Neutronen, da diese durchweg Kernereignissen entstammen, die sich bis einige hundert g/cm² von ihrem Nachweisort entfernt abspielten. Schon mehrere Autoren unternahmen es daher, die Übergangseffekte durch Messung der Neutronenintensität weiter zu untersuchen^{6–8}. Die bisherigen Ergebnisse führten zu der Vermutung, daß die Maxima nicht mit Hilfe der bis heute bekannten stabilen oder instabilen Teilchen der kosmischen Strahlung erklärbar sind^{5, 8}. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, weiteres Material zur Klärung dieser Frage zu liefern.

1. Meßmethode

Es wurde die schon von Treiman⁶ und Weiß⁸ benutzte „differentielle“ Meßmethode angewandt, die zwar etwas umständlicher ist, aber wesentlich genauere Resultate als die „integrale“ Methode (vgl. Hogrebe⁷) liefert: Die Zahl der in einer dünnen Bleischicht, der Detektorschicht, entstehenden Neutronen wird in Abhängigkeit von der Dicke des darüber aufgeschichteten Absorbers gemessen (Abb. 1).

Es ergibt sich aus der Differenz der mit und ohne die Bleischicht gemessenen Impulshäufigkeiten. Der Untergrund hebt sich dabei weitgehend heraus, lediglich die Beeinflussung des Untergrundes durch die Bleischicht selbst führt zu gewissen Korrekturen (s. u.). Blei eignet sich als Detektor für die neutronenerzeugende Komponente der kosmischen Strahlung wegen der hohen Multiplizität der Neutronen je Sternereignis besonders gut, bringt allerdings auch, wie unten gezeigt wird, Komplikationen ins Spiel.

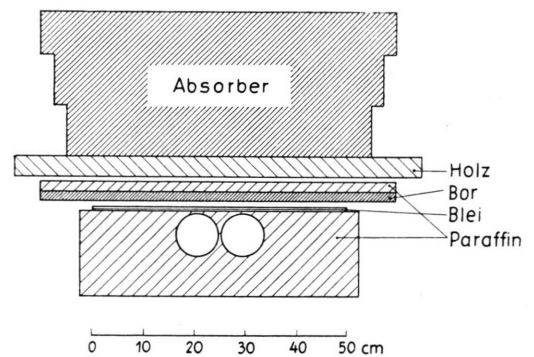


Abb. 1. Aufbau der Apparatur.

2. Apparatur

Der Absorber lagerte auf Holzbrettern von 4 cm Dicke. Darunter befand sich eine Paraffinschicht von 2 cm und eine aus Boroxydplatten bestehende Schicht

* Jetzt Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig.

¹ L. Malaspina, M. Merlin, O. Pierucci u. A. Rostagni, Nuovo Cim. **7**, 145 [1950].

² N. Dallaporta, M. Merlin u. G. Puppi, Nuovo Cim. **7**, 99 [1950].

³ G. Belliboni, L. Fabrichesi, L. de Marco u. M. Merlin, Nuovo Cim. **8**, 374 [1951].

⁴ E. Schopper, K. H. Höcker u. E. Rößle, Z. Naturforsch. **6a**, 603 [1951].

⁵ E. Rößle u. E. Schopper, Z. Naturforsch. **9a**, 836 [1954]; G. Kuhn u. E. Schopper, Z. Naturforsch. **9a**, 851 [1954].

⁶ S. B. Treiman u. W. Fonger, Phys. Rev. **85**, 364 [1952].

⁷ K. Hogrebe, Z. Naturforsch. **7a**, 772 [1952].

⁸ H. M. Weiß, Z. Naturforsch. **10a**, 21 [1955].



von 1,7 cm Dicke ($3,1 \text{ g/cm}^2$). Die Flächendichte dieser Zwischenschichten betrug einschließlich zweier Unterstützungsbleche $9,5 \text{ g/cm}^2$.

Darunter folgte die 1,5 cm dicke Bleidetektorschicht, an die sich zwei in Paraffin gebettete Neutronenzählrohre mit folgenden Daten anschlossen: Durchmesser 8 cm, effektive Länge 70 cm, Füllung mit BF_3 natürlicher Isotopenzusammensetzung (20% B^{10}) auf 70 cm Hg-Druck. Bei dem gewählten Drahtdurchmesser von 0,4 mm war eine Hochspannung von 7,2 kV notwendig, um nach 40 000-facher elektronischer Verstärkung diskriminierbare Impulse zwischen 10 und 100 V Größe zu erhalten (Abb. 2). Die hohe Zählspannung erwies sich als zweckmäßig, um auch in den Wandzonen der Zählrohre den Verlust von Elektronen infolge Bildung negativer Ionen klein zu halten.

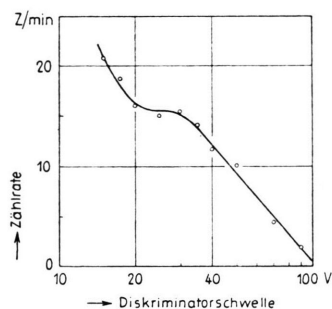


Abb. 2. Integrale Impulsgrößenverteilung.

Alle Impulse von mehr als 25 V Größe am Verstärkerausgang wurden einem Unter-setzer mit $25 \mu\text{sec}$ Auflösungszeit zugeführt und nach 4- oder 8-facher Unter-setzung auf ein mechanisches Zählwerk geleitet. Die Auflösungszeit reicht aus, um mit Wahrscheinlichkeit mehrere in einer Kaskade gleichzeitig entstehende Neutronen zu registrieren, da deren mittlere Lebensdauer in Paraffin $160 \mu\text{sec}$ beträgt (Cocconi u. a.⁹).

Die Zählrohre bestanden aus Messing. Da BF_3 organische Substanzen angreift, wurden zur Halterung der Zähl-drähte Glasisolatoren, die an ein kurzes Metallrohr angeschmolzen waren, verwendet (Abb. 3). Die BF_3 -Füllung wurde nicht, wie in Amerika üblich¹⁰, aus einem Calciumfluorid-Komplex, sondern aus dem in Stahlflaschen erhältlichen technischen BF_3 hergestellt*. Die Reinigung erfolgte durch fraktionierte Destillation: Zwischen zwei durch eine Kapillare (Durch-

messer 0,5 mm, Länge 25 mm) verbundenen Kühlfallen für flüssige Luft wurde das BF_3 fünfmal hin- und herdestilliert und jeweils der erste und letzte Teil in eine „Abfall“-Kühlfalle geleitet. Die Kapillare wirkte als Drossel und sorgte dafür, daß über dem verdampfenden BF_3 ein Dampfdruck bestehen blieb, der Sublimation verhinderte. Der Dampfdruck wurde mit verkürzten Quecksilbermanometern kontrolliert. Ein kleines Puffervolumen über jeder Kühlfalle wirkte ausgleichend beim Eintritt von Siedeverzügen, die sich trotz Benutzung von Glasperlen nicht vermeiden ließen. Das gereinigte BF_3 wurde in die evakuierten Zählrohre geleitet, die vorher mehrere Tage bei etwa 80°C unter einer Vorfüllung von ungereinigtem BF_3 gestanden hatten. Diese Maßnahme erwies sich als zweckmäßig, um zeitlich konstante Zähleigenschaften der Rohre zu erhalten.

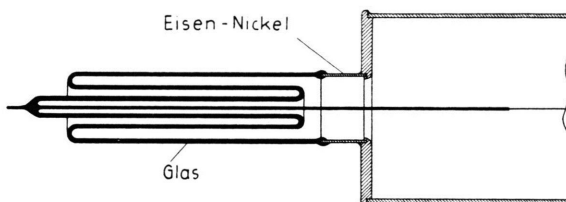


Abb. 3. Isolator am BF_3 -Zählrohr an der Seite, wo der Zähl-draht herausgeführt wird.

3. Gang der Messung

Die Messungen wurden auf dem Dachboden des Physikalischen Instituts in Heidelberg (150 m über NN) im Aug./Sept. 1953 und Dez. 1953/Jan. 1954 durchgeführt. Die Bleischicht wurde stündlich herausgezogen bzw. eingeschoben und der Zählerstand abgelesen; die Absorberdicke wurde nach etwa 6 Stunden gewechselt. Ein Blei- und ein Aluminiumabsorber gelangten je zweimal im Sommer und im Winter zur Messung.

Die Konstanz des Verstärkers und Diskriminators wurde laufend mittels eines Ra-Be-Neutronenpräparates überwacht. Trotz der großen Temperaturschwankungen waren Korrekturen nicht erforderlich.

Um etwaige Schwankungen der Höhenstrahlintensität (abgesehen vom Barometereffekt, s. u.) zu berücksichtigen, lief eine zweite Apparatur mit konstantem Absorber als Monitor. Die Schwankungen waren jedoch kleiner als der Meßfehler bei den Absorptionsmessungen und blieben deshalb unberücksichtigt.

⁹ G. Cocconi, V. Cocconi-Tongiorgi u. M. Widgoff, Phys. Rev. **79**, 768 [1950].

* Die Flasche wurde uns von der Badischen Anilin- und Soda-Fabrik, Ludwigshafen, leihweise überlassen, wofür die Firma an dieser Stelle vielmals gedankt sei.

¹⁰ I. L. Fowler u. P. R. Tunncliffe, Rev. Sci. Instrum. **21**, 734 [1950]; V. Cocconi-Tongiorgi u. a., ebda. **22**, 899 [1951].

4. Korrekturen

a) Barometereffekt

Sämtliche Meßwerte wurden auf den mittleren Luftdruck von 74,7 cm Hg umgerechnet. Als Druckkoeffizient wurde der Wert $-9,4\%$ je cm Hg benutzt (Simpson u. a.¹¹). Lediglich bei den Bleiabsorberdicken von mehr als 20 cm zeigten orientierende Messungen, daß hier ein kleinerer Wert angebracht war. Hier wurde mit -5% je cm Hg gerechnet. Auf eine genaue Bestimmung dieses Wertes wurde verzichtet, da die sich ergebende Korrektur unbedeutend war.

b) Reflektorwirkung des Absorbers

Ein Teil der aus der Bleidetektorschicht nach oben fliegenden Neutronen wird am Absorber reflektiert und gelangt zur Anzeige. Die Reflektorwirkung nimmt mit der Absorberdicke zu, bis ein Sättigungswert erreicht ist. In erster Linie zur Abschirmung der Zählrohre gegen Neutronen von oberhalb der Bleidetektorschicht, dann aber auch zur Unterdrückung dieser Reflektorwirkung wurden zwischen Bleidetektorschicht und Absorber die im Abschn. 2 erwähnten Boroxydplatten gebracht.

Ihr Einfluß ergibt sich aus Abb. 4. Hier ist die Neutronenzählrate gegen die Bleidicke aufgetragen, wobei das Blei das eine Mal unter der Borschicht (Kurve a), das andere Mal darüber (Kurve b) aufgeschichtet wurde. Der Untergrund ist gestrichelt eingezeichnet. Er setzt sich aus dem konstanten

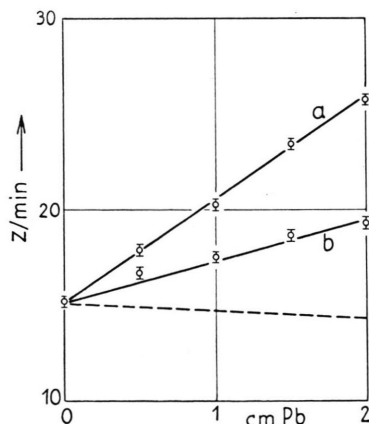


Abb. 4. Beeinflussung der Neutronenintensität durch die Boroxydschicht. Kurve a wurde durch Aufschichten des Bleis unter der Borschicht, Kurve b durch Aufschichten über der Borschicht gewonnen. Gestrichelt der Neutronen- und sonstige Untergrund.

¹¹ J. A. Simpson, W. Fonger u. S. B. Treiman, Phys. Rev. **90**, 934 [1953].

¹² U. Schmidt-Rohr, Z. Naturforsch. **8a**, 470 [1953].

Untergrund durch Radioaktivität und dem exponentiell abnehmenden Untergrund durch Neutronen aus dem Paraffin und der Luft zusammen (s. u.). Es ergibt sich, daß die Borschicht von den Neutronen aus der oberhalb befindlichen Bleischicht gerade die Hälfte verschluckt.

Die hier betrachteten Reflexionsneutronen müssen die Borschicht zweimal durchsetzen. Sie werden aber noch stärker als auf den vierten Teil geschwächt, weil reflektierte Neutronen energieärmer als der Durchschnitt aller Neutronen sind und sich die Borabsorption daher stärker auswirkt. Zieht man Ergebnisse von Messungen der Neutronenreflexion an Kohlenstoff von Weiß⁸ zum Vergleich heran, so kann man abschätzen, daß der Reflexionseffekt bei unserer Anordnung mit Aluminium und Blei als Absorber nicht den Meßfehler überschreitet. Er wurde deshalb nicht weiter berücksichtigt.

c) Abschirmende Wirkung der Bleischicht

Die aus dem Absorber und der Luft darüber stammenden Untergrundneutronen werden ein wenig geschwächt, wenn die 1,5 cm dicke Bleidetektorschicht eingeschoben ist. Daraus ergibt sich eine Korrektur, die beim Aluminiumabsorber unbedeutend ist, bei großen Dicken des Bleiabsorbers jedoch beträchtliche Werte annimmt. Sie wurde folgendermaßen ermittelt:

1,5 m über den Zählrohren wurde eine 3 mC-Ra-Be-Neutronenquelle aufgehängt und bei verschiedenen Absorberdicken die Zählrate mit und ohne die Bleischicht gemessen. (Eine nicht vernachlässigbare Korrektur bei dieser Messung stellten die in der Schicht erzeugten Höhenstrahlneutronen dar.) Es ergab sich, daß die Intensität der Neutronen von oben durch das Einbringen der Bleischicht um $k = 3,8 \pm 0,3\%$ geschwächt wurde. Dieser Wert war innerhalb des Meßfehlers von der Absorberdicke und dem Absorbermaterial unabhängig. Etwa der gleiche Prozentsatz ($4,2 \pm 0,3\%$ je 1,5 cm Absorberdicke) ergab sich aus der mit dem Präparat aufgenommenen, gegen Höhenstrahlneutronen korrigierten Bleiabsorptionskurve. Sie fällt praktisch mit derjenigen für Aluminium zusammen und ist in Abb. 5 wiedergegeben. Die geringen Abweichungen vom gestrichelt gezeichneten Exponentialgesetz mögen durch das mit der Bleidicke weicher werdende Neutronenspektrum (Schmidt-Rohr¹²) und die ungünstiger werdende Geometrie zu erklären sein.

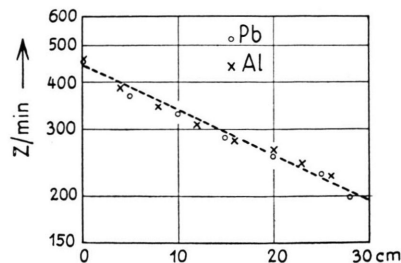


Abb. 5. Absorption von Präparatneutronen durch den Blei- und den Aluminiumabsorber. Ein 3 mC-Ra-Be-Präparat war 1,5 m über den Zählrohren aufgehängt. Korrigiert gegen Höhenstrahlneutronen.

Es bestehen keine Bedenken, den mit Präparatneutronen gewonnenen Wert trotz des anderen Energiespektrums auf die Höhenstrahlneutronen anzuwenden, denn die resultierende Korrektur fällt nur bei großen Bleiabsorberdicken ins Gewicht, bei denen sich der Unterschied im Energiespektrum vollkommen verwischt hat (vgl. entsprechende Messungen von Cocconi u. Mitarb.¹³).

d) Sonstige Korrekturen

Weitere durch das Einschieben der Bleischicht bedingte Korrekturen, z. B. die Reflektorwirkung für von unten aus dem Paraffin kommende Neutronen und die Abschirmung der sternerzeugenden Strahlung, die im Paraffin Ereignisse hervorruft, können, wie Weiß⁸ in seiner Arbeit gezeigt hat, unberücksichtigt bleiben. Im Abschn. 7 werden allerdings noch Anhaltspunkte für eine mögliche weitere Korrektur beschrieben, deren Nichtbeachtung evtl. einen Übergangseffekt vortäuschen kann.

5. Auswertung

Mit der im vorigen Abschnitt unter c) angegebenen Korrektur folgt für die gesuchte, allein aus der Bleischicht stammende Neutronenzählrate N in Abhängigkeit von der Absorberdicke x

$$N(x) = N_{\text{mit}}(x) + k N_A(x) - N_{\text{ohne}}(x); \quad (1)$$

N_{mit} = gemessene Zählrate mit Bleischicht,

k = 0,038 = Bruchteil der von oben kommenden Neutronen, den die Bleischicht abfängt,

N_A = Zählrate der Untergrundneutronen von oberhalb der Bleidetektorschicht,

N_{ohne} = gemessene Zählrate ohne Bleischicht.

Für $N_A(x)$ gilt die Beziehung:

$$N_A(x) = N_{\text{ohne}}(x) - N_P(x) - U,$$

wo $N_P(x)$ die im Paraffin unterhalb der Bleischicht erzeugte Neutronenzählrate und U den Untergrund durch Radioaktivität bedeutet. U wurde durch Abschirmen der freiliegenden Zählrohre mit Boroxydplatten ($3,1 \text{ g/cm}^2 \text{ B}_2\text{O}_3$) zu 2,8 Zählungen/min (Z/min) bestimmt, $N_P(x)$ entsprechend der Gleichung

$$N_P(x) = N_P(0) \exp(-x/\lambda_A)$$

in Rechnung gestellt, in der λ_A die Abschwächungslänge der neutronenerzeugenden Komponente im Absorber bedeutet. Es wurden die Werte $\lambda_A(\text{Pb}) = 28,2 \text{ cm} \pm 320 \text{ g/cm}^2$ (vgl. Lindenberger und

Meyer¹⁴), $\lambda_A(\text{Al}) = 74 \text{ cm} \pm 200 \text{ g/cm}^2$ (Bernardini u. a.¹⁵) benutzt.

$N_P(0)$ läßt sich ungefähr einer zu diesem Zweck durchgeführten Messung der Neutronenintensität mit und ohne Borschicht (bei Absorberdicke Null und ohne Bleidetektorschicht) entnehmen, wenn man das in Abschn. 4 b ermittelte Ergebnis zugrunde legt, nach dem die Borschicht die Hälfte der von oben kommenden Neutronen abfängt. Ohne Bor wurden 22,1, mit Bor 15,2 Z/min gemessen. In der letzteren Zahl ist aber auch der Zuwachs enthalten, den die neutronenerzeugende Komponente in der Borschicht selbst auslöst und den wir mit Hilfe der von Montgomery und Tobey¹⁶ angegebenen Daten zu 0,4 Z/min abschätzen. Die Borschicht vermindert demnach die Zählrate von 22,1 um 7,3 auf 14,8 Z/min. In den 14,8 Z/min sind also noch einmal 7,3 Z/min für Neutronen enthalten, die aus der Luft kommen, aber nicht abgefangen werden. Es verbleiben 7,5 Z/min und nach Abzug des Untergrundes U 4,7 Z/min, die bei Absorberdicke Null von Neutronen aus dem Paraffin stammen ($= N_P(0)$).

6. Ergebnisse

In Abb. 6 ist unsere Beobachtung wiedergegeben, daß die Neutronenintensität unter Blei im Winter einen steileren Anstieg mit der Bleidicke zeigte als im Sommer. Der Unterschied liegt erheblich außerhalb der Meßfehlergrenzen. Allerdings kann nicht mit völliger Sicherheit die Möglichkeit ausgeschlossen werden, daß der Effekt apparativ, etwa durch eine Änderung des Ra-Be-Eichstandards, hervorgerufen wurde. Bei allen folgenden Resultaten wurden daher die Sommer- und Winterwerte gemittelt.

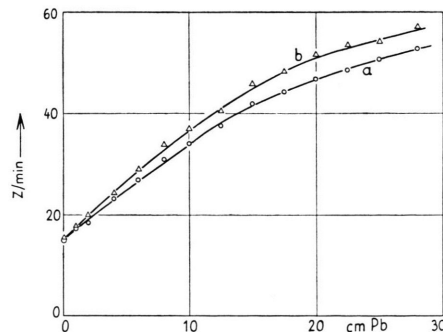


Abb. 6. Integrale Neutronenintensität unter Blei ohne Bleidetektorschicht, a) im Sommer, b) im Winter.

¹⁵ G. Bernardini, G. Cortini u. A. Manfredini, Phys. Rev. **76**, 1792 [1949].

¹⁶ C. G. Montgomery u. A. R. Tobey, Phys. Rev. **76**, 1480 [1949].

¹³ G. Cocconi u. a., l.c.⁹.

¹⁴ K. H. Lindenberger u. P. Meyer, Z. Phys. **139**, 372 [1954].

Abb. 7 zeigt die integralen Neutronenintensitäten. Für den Bleiabsorber ist gestrichelt die Kurve mit-eingezeichnet, die sich bei eingeschobener Bleischicht vor Anwendung der im Abschn. 4 c beschriebenen Korrektur ergibt. Die Korrekturgröße $k N_A$ (s. Gl. (1)) ist bei großen Bleiabsorberdicken größer als die Differenz $N_{\text{mit}} - N_{\text{ohne}}$. Der Wert von k beeinflusst empfindlich das Ergebnis für die Abschwächungslänge der neutronenerzeugenden Strahlung. Eine entsprechende gestrichelte Kurve für Aluminium würde sich in diesem Maßstab nicht von der ausgezogenen abheben.

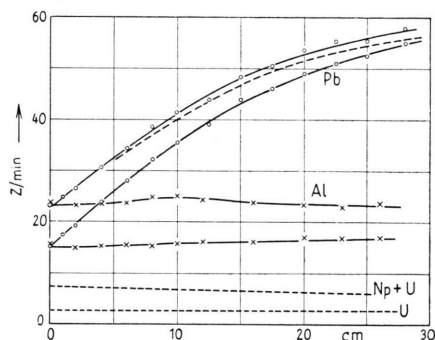


Abb. 7. Integrale Neutronenintensitäten unter Blei und Aluminium. Die jeweils obere Kurve entstand mit eingeschobener Bleischicht, die untere ohne Bleischicht. Oberste gestrichelte Kurve: Kurvenverlauf vor Anwendung der Korrektur nach Abschnitt 5 c. Die gestrichelten Kurven unten geben den Untergrund U durch Radioaktivität und die Summe von U und der Zählrate $N_p(x)$ durch Neutronen aus dem Paraffin im Falle des Aluminiumabsorbers an.

In Abb. 8 ist das Ziel dieser Arbeit, die Zählrate $N(x)$ der Neutronen aus der Bleischicht in Abhängigkeit von der Dicke des Blei- bzw. Aluminiumabsorbers dargestellt. Die Strichlänge an den Meßpunkten repräsentiert den mittleren Fehler. Die Bleikurve zeigt bis zu 28 cm einen ungefähr glatten Verlauf. Er entspricht der durch die gestrichelte Linie angedeuteten Intensitätsabnahme mit der Abschwächungslänge von 28 cm (≈ 320 g pro cm^2)*, die auch von anderen Autoren (vgl. ¹⁴) beobachtet wurde. Der mittlere Fehler beträgt etwa $\pm 10\%$. Die Meßpunkte um 21 cm Bleitiefe deuten ein schwaches Maximum an, dessen Existenz wegen der Fehlerschwankungen allerdings nicht sicher ist.

Die Aluminiumkurve zeigte im Sommer wie im Winter einen Übergangseffekt mit einem Maximum

* Bei dem Bericht über diese Messungen auf der Tagung in Stuttgart am 1. 5. 54 (Phys. Verh. 5, 68 [1954]) war statt dessen der Wert 260 g/ cm^2 angegeben worden, der auf dem damals erst ungenau ermittelten Wert $k=0,015$ beruhte.

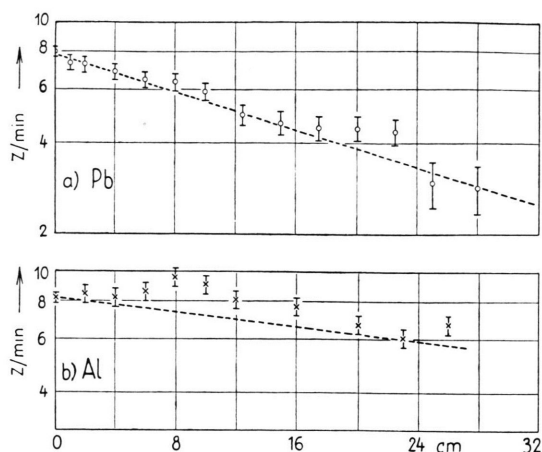


Abb. 8. Intensität der Neutronen aus der Bleidetektorschicht, a) im Falle des Blei-, b) im Falle des Aluminiumabsorbers.

in der Gegend von 8 cm Tiefe. Gestrichelt eingezeichnet ist die Kurve, die einer exponentiellen Abnahme mit der Abschwächungslänge 74 cm (≈ 200 g pro cm^2 , Bernardini u. a. ¹⁵) entspricht.

7. Diskussion

a) Bleikurve (Abb. 8a)

Im Gegensatz zu den mit Kernphotoplatten gewonnenen Ergebnissen¹⁻⁵ wird hier kein Übergangseffekt zwischen 0 und 2 cm Blei gefunden. Ein Überschuß an Sternereignissen in diesem Bereich müßte bei unserem Meßprinzip den ersten Meßpunkt erhöht erscheinen lassen.

Der Unterschied läßt sich erklären, wenn man annimmt, daß aus Blei ein höherer Prozentsatz der energiearmen, sternerzeugenden Strahlung zurückkommt als aus leichten Stoffen. Die zurückkommende Strahlung würde zur Folge haben, daß bei eingeschobener Bleidetektorschicht mehr Sekundärsterne im darüberliegenden Absorberblei ausgelöst werden als ohne die Schicht. Die zusätzlichen Sterne erhöhen den Neutronenuntergrund und führen zu einer Erhöhung sämtlicher Meßpunkte in Abb. 8a außer dem bei Absorberdicke Null, wodurch der erwartete Übergangseffekt verdeckt wird.

Daß die energiearme, sternerzeugende Strahlung (50 bis 350 MeV) zu einem großen Teil (ca. 25%) nach oben gerichtet ist, geht aus den Untersuchungen der Bristol-Gruppe an „grauen Spuren“ in Photoplatten hervor¹⁷. Die Frage, ob aus Blei mehr Strahlung zurückkommt als aus leichten

¹⁷ R. H. Brown, U. Camerini, P. H. Fowler, H. Heitler, D. T. King u. C. F. Powell, Phil. Mag. 40, 862 [1949].

Stoffen, wurde experimentell von Malaspina¹ positiv, von Schopper⁴ negativ beantwortet. Beide Autoren exponierten eine Platte auf einer Bleiunterlage und eine zweite entfernt davon unter dem Dach der Beobachtungsstation oder im Freien. Eine Stütze für das Malaspinasche Resultat stellen die unter völlig gleichartigen Umwelteinflüssen (insbesondere hinsichtlich der Temperatur) durchgeführten Messungen von Belliboni u. a.³ dar. Diese Verff. exponierten Platten mit verschiedenen dicken Bleischichten darüber auf dem Fußboden in einer Bergstation nebeneinander. Die Platte mit 0,5 cm Blei darüber zeigte etwa 40% mehr Sterne mit 3 und 4 Spuren als die Platte ohne Blei. Da ein derartiger Häufigkeitsanstieg auf eine Entfernung von nur 0,5 cm Blei bei einer Strahlung mit erheblicher Aufwärtskomponente kaum denkbar ist, kann man daraus schließen, daß auch eine über der 0,5 cm-Bleischicht exponierte Platte noch einen merklichen Häufigkeitsanstieg gezeigt hätte.

Mit einer sehr ähnlichen Versuchsanordnung konnten Treiman und Fonger⁶ ein Höherliegen der ersten Meßpunkte dennoch beobachten. Ihr Ergebnis widerspricht der vorstehenden Erklärung aber nicht, wenn man bedenkt, daß sich bei ihrer Anordnung zwischen der Bleidetektorschicht und dem Bleiabsorber eine sehr große Paraffinmenge befand; in dieser wurde der Hauptteil der aufwärts gerichteten Sekundärstrahlung absorbiert.

Neben dem ersten Maximum findet Schopper in 20 cm Bleitiefe ein zweites, gut ausgeprägtes Häufigkeitsmaximum energiearmer Sterne. Die hier beobachtete schwache und statistisch kaum gesicherte Andeutung eines Maximums in 21 cm Tiefe entspricht nicht der Erwartung für Neutronen. Der Grund mag vielleicht in einer unterschiedlichen Strahlenszusammensetzung in Berg- und in Seehöhe liegen.

b) Aluminiumkurve (Abb. 8b)

Das breite, in etwa 8 cm Tiefe gefundene Maximum findet keine Parallele in Photoplattemessungen. Malaspina u. a.¹ finden ein Maximum in 2 cm Tiefe und danach bis zu 11 cm keines mehr. Das 2 cm-Maximum wird als schwacher Effekt durch die etwas gründlicheren, aber nur bis zu 3 cm Tiefe gehenden Messungen von Belliboni u. a.³ bestätigt. Ihm wird der gleiche, wahrscheinlich durch Sekundärnukleonen hervorgerufene Entstehungsmechanismus wie dem in 0,5 cm Tiefe gefundenen Bleimaximum zugeschrieben.

Das hier beobachtete Maximum ist eher dem von Weiß⁸ in Kohlenstoff gefundenen vergleichbar. Es tritt in einer Tiefe von 0,26 L gegenüber 0,22 L in Kohlenstoff auf, wenn L die geometrische Stoßlänge für Nukleonen in dem jeweiligen Material bedeutet.

Weiß hat ausführlich die Deutungsmöglichkeiten für sein Maximum diskutiert. Sowohl die Nukleonen- als auch die Photonenkomponente scheiden bei ihm als Ursache aus, weil Luft und Kohlenstoff in ihrer Ordnungszahl zu ähnlich sind. Ferner zeigte Weiß, daß auch π -Mesonen oder andere bekannte, instabile Teilchen für die Deutung nicht in Frage kommen. So gelangte er, gestützt auf ähnliche Photoplattemessungen von Röbke und Schopper⁵, zu dem Schluß, daß der Effekt durch bisher unbekannte Teilchen verursacht sein muß.

Leider hat Weiß nicht den Einfluß der aus der Detektorbleischicht zurückkommenden sternausschlagenden Strahlung in Betracht gezogen. Wie bei der Bleikurve beschrieben, kann diese Strahlung eine Erhöhung des Neutronenuntergrundes bei allen Absorberdicken mit Ausnahme der sehr geringen Dicken herbeiführen und ist zumindest qualitativ geeignet, das Maximum zu erklären. Für unsere Messungen mit Aluminium wurde die im folgenden skizzierte Abschätzung durchgeführt.

Als Häufigkeitsanstieg von Sternen mit 3 Spuren gibt Malaspina für Photoplaten auf Bleiunterlage die ungefähre Zahl 30% an. Diese Zahl wurde auf alle energiearmen Aluminiumsterne übertragen. Die Sterngrößenverteilung, auf Aluminium interpoliert, wurde der Arbeit von Hodgson¹⁸ entnommen und auf Sterne mit 1 oder 2 Spuren extrapoliert. Bei geeigneten Annahmen über die Zahl der Neutronen je Stern, die Absorption der energiearmen sternerzeugenden Strahlung und die Absorption der Luftneutronen in Aluminium gelangt man mit Hilfe der im Abschn. 5 und in Abb. 7 angegebenen Zahlenwerte zu der Aussage, daß der Effekt durchaus das beobachtete Maximum in 8 cm Aluminiumtiefe erklären kann.

Die Grundlagen dieser Abschätzung sind allerdings zu unsicher, um die Richtigkeit der Deutung des Maximums mittels zurückkommender sternerzeugender Strahlung fest zu behaupten. Immerhin zeigt die Abschätzung, daß bei Verwendung von Blei als Detektor für die neutronenerzeugende Komponente besonders bei geringen Absorberdicken Vorsicht angebracht ist, und daß aus dem Resultat der Messung nicht ohne weiteres auf die Existenz neuer instabiler Teilchen geschlossen werden kann.

Herrn Prof. Dr. O. Haxel danke ich für zahlreiche Diskussionen. Die Untersuchungen wurden mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt.

¹⁸ P. E. Hodgson, Phil. Mag. **42**, 82 [1951].