

Eine Nebelkammerstudie der Ultrastrahlungsschauer unter Blei in der Umgebung des zweiten Maximums der Auslösekurve

Von GEORG PFOTZER

Aus dem Max-Planck-Institut für Physik der Stratosphäre, Weißensee

(Z. Naturforsch. 8a, 353—360 [1953]; eingegangen am 27. März 1953)

Die Natur der Ultrastrahlungsschauer unter Blei wurde in der Umgebung des zweiten Maximums der Rossi-Kurve mit der Nebelkammermethode untersucht. Dabei konnten außer normalen Elektronenschauern oder μ -Mesonen in Begleitung ihrer Stoßelektronen keine Schauer besonderer Art in einer Häufigkeit nachgewiesen werden, die auf die Form der Auslösekurve von Einfluß sein kann. Daraus ergibt sich folgende Alternative:

Entweder sind auch die spezifischen Maximumsschauer elektronisch oder sie sind so geartet, daß die simultanen Ionisationseffekte erst durch Auslösung der Stoßionisation in Zählrohren nachweisbar sind. Da von anderer Seite¹² das zweite Maximum auch schon durch Auszählen sichtbarer Schauer in der Nebelkammer nachgewiesen wurde, kann geschlossen werden, daß die zweite Möglichkeit nicht zutrifft und die Maximumsschauer zumindest in ihrem koinzidenzfähigen Stadium tatsächlich elektronisch sind. Die Gesamthäufigkeit der Schauer ließe sich durch Stoßprozesse der μ -Mesonen erklären. Ein diesbezüglich von Clay vorgeschlagener Mechanismus reicht jedoch zur Erklärung des zweiten Maximums nicht aus. Mit der elektronischen Natur der Maximumsschauer ist weiter eine Hypothese⁴ verträglich, die über Anomalien des Absorptionskoeffizienten von γ -Strahlung einen genetischen Zusammenhang mit der weichen Komponente herstellt.

Übersicht und Zielsetzung

Die mehrfach gewellte Form^{1,2}, welche die Auslösekurve der Ultrastrahlungsschauer unter dichter Materie auszeichnet, kann z. Zt. nur teilweise auf bekannte Ursachen zurückgeführt werden. Das gilt auch für eine ähnliche Abhängigkeit der Häufigkeit von Kernzertrümmerungen in Photoplatten von der Dicke darübergeschichteten Materials, über die von Schopper und Mitarbb. berichtet worden ist³. Wieweit Zusammenhänge zwischen den an sich verschiedenenartigen Erscheinungen bestehen, ist ungeklärt. Die Schwierigkeiten jedoch, welche sich in beiden Fällen den Erklärungsversuchen entgegenstellen, lassen es nicht ausgeschlossen erscheinen, daß bisher noch unbekannte Wechselwirkungen^{2,3} von Elementarteilchen, evtl. in bisher noch nicht beobachteten Zustandsformen⁴, im Spiel sind. Dieser Hinweis kennzeichnet das Interesse an möglichst verschiedenenartigen Experimenten zu dem ganzen Fragenkomplex, von dem im folgenden ein Teilge-

biet behandelt wird. Ehe wir nun zur Darstellung unserer speziellen Versuche übergehen, müssen wir noch auf einige Fakten und Hypothesen zu sprechen kommen, welche zum Verständnis des folgenden notwendig sind.

Außer dem von Rossi⁵ entdeckten ersten Maximum der Ultrastrahlungsschauer unter 2,5 cm Blei wurde zunächst ein zweites Maximum erstmals von Ackemann⁶ und Hummel⁷ zwischen 15 und 16 cm, ein drittes von Priebsch⁸ unter 26 cm und schließlich von Thurn⁹ ein vierter nachgewiesen, dessen Lage so stark vom Barometerstand abhängt, daß es z. B. bei 715 Torr unter 36 cm Blei gefunden wird, wogegen es bei 750 Torr gerade mit dem dritten Maximum unter 26 cm Blei zusammenfällt.

Während nun über das Zustandekommen des ersten Maximums keine Zweifel mehr herrschen — es wird durch die Elektronen und Photonen verursacht, die sich noch im Ultrastrahlungsgemisch in der Höhe des Meßortes vorfinden — trifft dies für alle weiteren Maxima, wie bereits erwähnt, nicht

¹ W. Bothe u. H. Thurn, Physic. Rev. **79**, 544 [1950].

² H. Thurn u. W. Bothe, Z. Naturforschg. **6a**, 576 [1951]; hier findet sich auch ein lückenloses Verzeichnis der vorausgegangenen einschlägigen Arbeiten.

³ E. Schopper, K. H. Höcker u. E. Rössle, Z. Naturforschg. **6a**, 603 [1951].

⁴ P. K. Sen Chaudhary, Physic. Rev. **81**, 274 [1951].

⁵ B. Rossi, Z. Physik **82**, 167 [1933].

⁶ M. Ackemann, Naturwiss. **22**, 169 [1934].

⁷ J. N. Hummel, Naturwiss. **22**, 170 [1934].

⁸ J. A. Priebsch, S.-B. Akad. Wiss. Wien, math.-naturwiss. Kl., Abt. IIa, **145**, 101 [1936].

⁹ H. Thurn, Z. Naturforschg. **7a**, 497 [1952].



zu. Die Existenz der Maxima selbst, welche lange Zeit umstritten war, kann heute u. a. besonders durch die Arbeiten von Bothe und Mitarb. als gesichert gelten^{1, 2}. Auf Grund verschiedenartiger Testversuche wurde dort auch der Schluß gezogen, daß die Schauer des zweiten und dritten Maximums ihrer Natur nach von den Schauern des ersten Maximums verschieden seien.

Es war naheliegend, eine Bestätigung dieser Auffassung auch mit der Nebelkammermethode zu versuchen, bei der man einen unmittelbaren Einblick in die Struktur erwarten kann. Das ist auch hinsichtlich des zweiten Maximums, auf das wir uns in der vorliegenden Studie ebenfalls beschränken wollen, verschiedentlich geschehen¹⁰⁻¹³. Überraschenderweise wurden aber Schauer besonderer Art nie so häufig beobachtet, daß sie für eine Erklärung des Maximums in Frage kämen.

Nach Bothe und Thurn wäre mit folgenden Eigenschaften der Schauer zu rechnen:

1. Die Schauer weisen nur wenige Teilchen — wahrscheinlich nur eines — auf, die durchgehend ionisieren.
2. Die Winkeldivergenzen der Teilchenbahnen eines Schauers liegen im wesentlichen unter 12° .
3. Die Absorptionslänge der Schauer beträgt mindestens 100 g/cm^2 , ist also wesentlich größer als diejenige von Schauern des ersten Maximums mit 36 g/cm^2 .
4. Die Häufigkeit der Schauer relativ zur Zahl der μ -Mesonen, die den gleichen Raumwinkel- und Flächenbereich durchqueren, ist sehr hoch, nämlich 1:4.
5. Die große Häufigkeit der Schauer, bezogen auf die Zahl der μ -Mesonen, die Tatsache, daß das Maximum nicht verschwindet, wenn verlangt wird, daß mindestens ein ionisierendes Teilchen an der Auslösung beteiligt ist, eine Absorptionslänge der auslösenden Strahlung von 650 g/cm^2 ließen Bothe und Thurn die Vermutung aussprechen, daß die Schauer möglicherweise durch μ -Mesonen ausgelöst werden.

Von diesen aus indirekten Schlüssen gefolgerten Eigenschaften dürfte besonders die erste einen direkten Nachweis der Schauer in der Nebelkammer sehr erschweren. Trotz dieser sehr ernst zu nehmenden

Möglichkeit haben wir aber weitere Nebelkammerversuche in Angriff genommen, weil sie wenigstens einen Teil der Ereignisse sicherer einzuordnen und die Deutungsmöglichkeiten stärker einzuschränzen erlauben als reine Zählrohrversuche.

Wir berichten nun nachstehend über Anlage und Ergebnisse bisher ausgeführter Versuche; sie wurden mit folgenden Zielsetzungen begonnen:

- I. die Entwicklung der Schauer unmittelbar *unter* und teilweise *zwischen* einzelnen Bleischichten zu beobachten,
- II. Einblick zu gewinnen in den Ionisationsvorgang, welcher zur Auslösung einer Koinzidenz in den Zählrohren führt, falls die Schauer mindestens ein durchgehend ionisierendes Teilchen enthalten,
- III. die Struktur der Schauer unmittelbar *über* und *unter* den Zählrohren zu studieren.

I) Schauer unmittelbar unter 15 cm Blei

Die experimentelle Anordnung, die in Abb. I dargestellt ist, basierte auf der Arbeitshypothese, daß die Schauer durch μ -Mesonen ausgelöst werden, in welchem Falle auf vier Mesonen ein Schauer zu erwarten

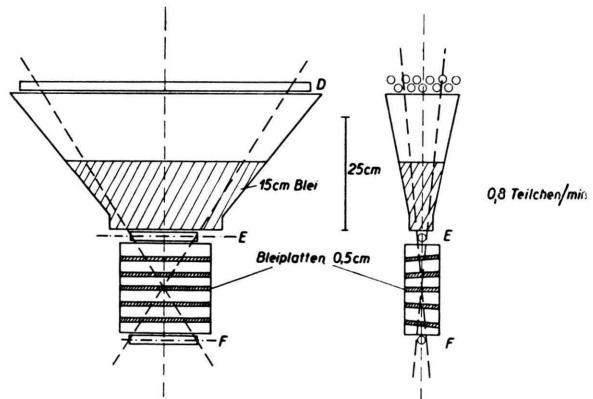


Abb. I. Schema der Versuchsanordnung I (Erläuterung im Text).

wäre. Oberhalb und unterhalb der Kammer mit quadratischem Querschnitt $20 \times 20 \text{ cm}$ in der Frontansicht und 8 cm Tiefe (Füllung 1,5 atm. Argon, 50% Wasser + 50% Äthylalkohol), befand sich je ein Zählrohr zur Selektion von Strahlen, die den beleuchteten Teil der Kammer durchsetzen. Darüber waren 15,5 cm Blei innerhalb eines Raumwinkelbereiches geschichtet, in dem sich die durch die Kammer gehenden Teilchen

¹⁰ H. Maier-Leibnitz, Z. Physik **112**, 569 [1939].
¹¹ S. Leisegang, Z. Physik **116**, 515 [1940].

¹² L. Broussard u. A. Graves, Physic. Rev. **60**, 413 [1941].

¹³ R. P. Shutt, Physic. Rev. **69**, 261 [1946].

bewegen müssen. Oberhalb des Bleies war eine Lage Zählrohre D angebracht, die für die Auslösung der Expansionen nur solche Teilchen durch E und F zuließen, welche als ionisierende in das Blei eingedrungen waren. In der Kammer selbst wurden 5 Bleiplatten von 0,5 cm Stärke übereinander angeordnet, die den Nachweis von Photonen und Elektronen durch Kaskadeneffekte ermöglichen (5 Strahlungslängen). Sie dienten ferner dem Zweck, die Entwicklung der fraglichen Maximumschauer „innerhalb“ des Bleies sichtbar zu machen. Wie nämlich von Bothe und Thurn diskutiert worden ist, weist die Schärfe des Maximums auf einen mehrstufigen Entwicklungsprozeß hin, in dem die Schauer erst nach wiederholten Umwandlungen am Ende einer gewissen Laufstrecke koinzidenzfähig werden. Die „Reifungsstrecke“ sollte danach etwa zwischen 14—17 cm Blei liegen. Unter diesen Voraussetzungen wäre mit der Entwicklung von engen Schauern besonders innerhalb der Kammer zu rechnen.

Mit dieser Anordnung wurden 500 Aufnahmen gemacht, die wir nach Tab. 1 klassifiziert haben.

Einfache Mesonen	53%	60%
Windschiefe Doppelstrahlen	7%	
Stoßelektronen < 0,5 cm Blei	17%	
Zweistrahlleffekte < 0,5 cm Blei	5%	
Zweistrahlleffekte > 0,5 cm Blei	1%	
Sekundäreffekte	7%	
Unzweifelhafte Schauer aus Blei	5%	
Seitenschauer	5%	
 Aufteilung der insgesamt 26 Schauer:		
Elektronenschauer aus Strahlerblei	20	
Stoßelektronenschauer in Kammer	4	
Weitgespreizte Mesonenschauer	1	
Enge Mesonenschauer	1	

Tab. 1. Klassifizierung der Aufnahmen nach Versuchsanordnung I.

Erläuterung der Tab. 1

Mit „einfachen Mesonen“ haben wir Teilchen bezeichnet, die ohne jede Begleitstrahlung das Kammerblei durchquert haben. Die hauptsächlich beobachtete Wechselwirkung war die Auslösung von energiearmen Stoßelektronen, die aus einer Bleiplatte herausgeschlagen und in der folgenden gestoppt wurden (Stoßelektron < 0,5 cm Blei). Als Zweistrahlleffekte (Abb. 1—3)* sind Ereignisse bezeichnet, bei denen bereits zwei Strahlen in die

* Abb. 1—28, s. Tafel S. 356 a u. b. Die linke Seite der Aufnahmen ist jeweils frontal, die rechte über einen rechts an die Kammer angrenzenden Spiegel photographiert, der mit der Frontplatte einen Winkel von 98° einschloß.

Kammer eintraten; der eine Strahl war jeweils das steuernde Meson, der zweite endete meist bereits in der ersten Bleiplatte ($R < 0,5$ cm Blei), so daß man das Teilchen mit kurzer Reichweite zweifellos ebenfalls als Stoßelektron ansprechen darf (Abb. 2, Beispiel für $R > 0,5$ cm Blei).

Diese beiden Effekte können zwar in Zählrohren, die unmittelbar unter dem Blei angebracht sind, Zweifachkoinzidenzen auslösen, nicht aber in Zählrohren in einer Entfernung von 1 m unterhalb des Strahlers. Sie scheiden daher als spezifische Maximumschauer aus. Windschiefe Doppelspuren, welche wir der Vollständigkeit halber in der Tabelle mit aufgeführt haben, wiesen sicher keine gegenseitige Kopplung auf und waren mit wenigen Ausnahmen auch zeitlich auf Grund der verschiedenen breiten Spuren zu trennen. (Die Spur des steuernden Strahles ist etwas breiter als diejenigen in zeitlichem Abstand folgender Teilchen; bei zeitlich früher durchgehenden Teilchen ist die Ionenspur bereits durch das Reinigungsfeld aufgespalten.)

Nun bleiben noch drei Gruppen von Ereignissen, welche die fraglichen Koinzidenzen auslösen können:

- die an sich trivialen Seitenschauer, deren Häufigkeit jedoch kaum mit der Bleidicke variieren dürfte.
- Begleitstrahlen, die wir als „Sekundäreffekte“ bezeichnet haben, bei denen ein Strahl in mehr oder weniger großem Abstand vom steuernden Meson aus einer Platte austritt und in der folgenden absorbiert wird. (Abb. 3, Teilchen zwischen 4. und 5. Platte oder Abb. 2, die an der 4. Platte oben und unten reflektierte Elektronen zeigt. Das Elektron zwischen der 2. und 3. Platte scheidet von vornherein aus, weil die Spur eine kleinere Diffusionsbreite hat als der steuernde Strahl; das Teilchen kam also zeitlich später.) Dabei sind nur die Fälle aufgeführt, in denen der Begleitstrahl etwa die gleiche Diffusionsbreite der Ionenspur aufwies wie das steuernde Meson. Da aber derartige Spuren auch scharf, d. h. zeitlich später als der steuernde Strahl auftreten und ferner auch bei Seitenschauern stark gestreute oder von Quanten angestoßene Compton-Elektronen eine ähnliche räumliche Gruppierung aufweisen, sind diese Begleiteffekte entweder der natürlichen Radioaktivität der Bleiplatten und bzw. oder einzelnen zufällig in die Kammer gestreu-

ten Elektronen zuzuordnen. Diese Auffassung wurde im folgenden Versuch II bestätigt, bei dem wir der Frage nachgegangen sind.

c) Die letzte Gruppe endlich, die sicher Koinzidenzen unter dem Strahlerblei verursachen würde, zeigt überwiegend Elektronenschauer, deren Struktur zwischen die Typenfälle Abb. 4 und 5 einzuordnen sind und die teilweise im Kammerblei selbst durch „knock-on“-Prozesse ausgelöst wurden.

Unter den 26 Schauern insgesamt fanden wir einen mit Elektronen vermischten, teilchenreichen Mesonenschauer (Abb. 6) mit großer Breitenausdehnung und einen sehr engen Mesonenschauer, der als einziger der Vorstellung von durchdringenden engen „Maximumschauern“ entsprach (Abb. 7). Es darf sich hier um einen Schauer gleicher Art handeln, wie er von Maier-Leibnitz¹⁰ und Leisegang¹¹ erwähnt und von Braddick und Mitarbb.^{14, 15} auf Grund einer größeren Reihe von Aufnahmen diskutiert wurde. Der Wirkungsquerschnitt für die Auslösung eines weiteren Mesons durch ein μ -Meson hat sich jedoch als außerordentlich klein ($< 2 \cdot 10^{-29} \text{ cm}^2/\text{Nukleon}$) erwiesen^{16, 17}, so daß diese engen Mesonenschauer nicht für eine Erklärung des zweiten Maximums in Frage kommen dürften. Daß bei den 500 Aufnahmen überhaupt ein solcher Schauer aufgetreten ist, muß als Zufall angesehen werden.

Fassen wir das Ergebnis zusammen:

Wenn man von den Seitenschauern absieht, so findet man unter der Maximumsdicke von 15,5 cm Blei auf etwa 20 Mesonen einen Schauer. Dieses Verhältnis bestätigt sich bei weiteren Versuchen. Die Schauer sind überwiegend elektronisch. Eine Auslösung von Schauern im Kammerblei, die nicht über die Zwischenstufe der Stoßelektronen ging, war nicht nachzuweisen.

II. Ionisierende Wirkungen zwischen 1 mm starken Messingplatten

Nachdem sich bei dem ersten Versuch keine Hinweise über die Auslösung enger Schauer ergaben, wurden die Vorgänge studiert, die sich beim Durch-

¹⁴ H. J. Braddick u. G. S. Hensby, Nature [London] **14**, 1012 [1939].

¹⁵ H. J. J. Braddick, W. F. Nash u. A. W. Wolfendale, Philos. Mag. **42**, 1277 [1951].

gang geladener Teilchen in den Zählrohren ereignen. Wenn nämlich für die Umwandlung der hypothetischen Schauerteilchen in koinzidenzfähige allein das Durchlaufen einer mittleren „Reifungsstrecke“ in der dichten Materie notwendig wäre (wiederholte Umwandlungen, die durch Wechselwirkungen in Materie hoher Ordnungszahl verursacht werden), so hätten sich zwei gleichzeitige Ionisationseffekte im vorigen Versuch unmittelbar unter dem Blei zeigen müssen. Da dies nicht der Fall war, ist noch mit der Möglichkeit zu rechnen, daß nach der Umwandlung der Teilchen in Blei ein Endzustand instabiler Teilchen erreicht wird, an den sich ein spontaner Zerfall anschließt. Damit wäre verständlich, daß die Maxima ausgeprägter werden, wenn man die Koinzidenzzählrohre vom Blei absetzt, was auch gleichbedeutend ist mit einer Selektion enger Schauer. Allgemein muß man jedoch unabhängig von jeder Arbeitshypothese verlangen, daß zumindest in den Zählrohren selbst gleichzeitig zwei Ionisationseffekte auftreten, wenn überhaupt eine Koinzidenz zustande kommen soll.

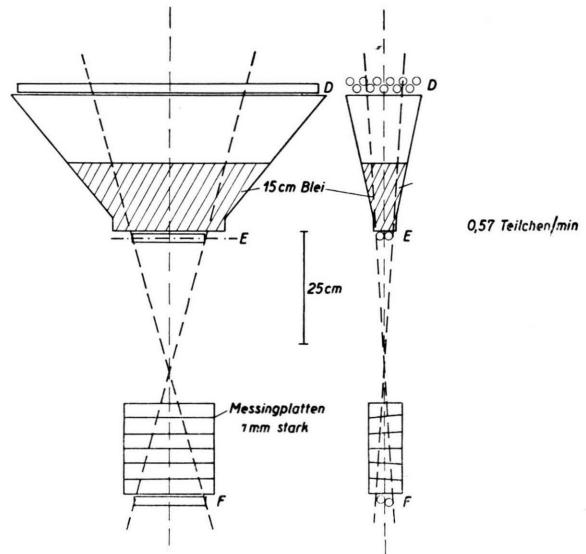


Abb. II. Schema der Versuchsanordnung II (Erläuterung im Text).

Die Anordnung nach Abb. II bildet nun grob eine Koinzidenzapparatur ab, mit der die Schauer üblicherweise gemessen werden. Die obere Kammerdecke sitzt

¹⁶ E. Amaldi, C. Castagnoli, A. Gigli u. S. Scinti, Nuovo Cimento **9**, 453 [1952].

¹⁷ W. D. Walker, Department of Physics, University of California, Berkeley, Manuscript vor der Veröffentlichung 1953.

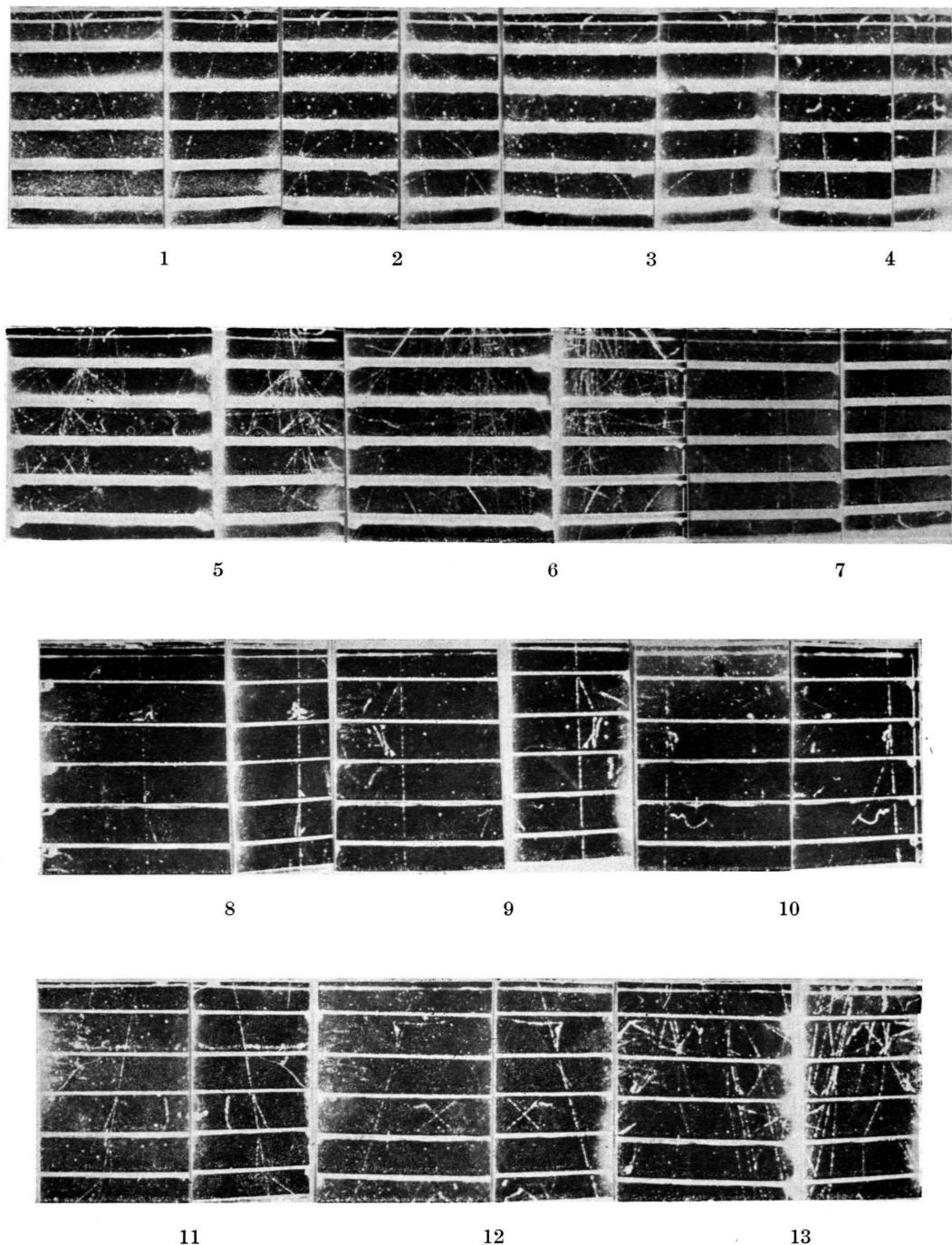


Abb. 1—13. Typenauswahl der Nebelkammeraufnahmen.

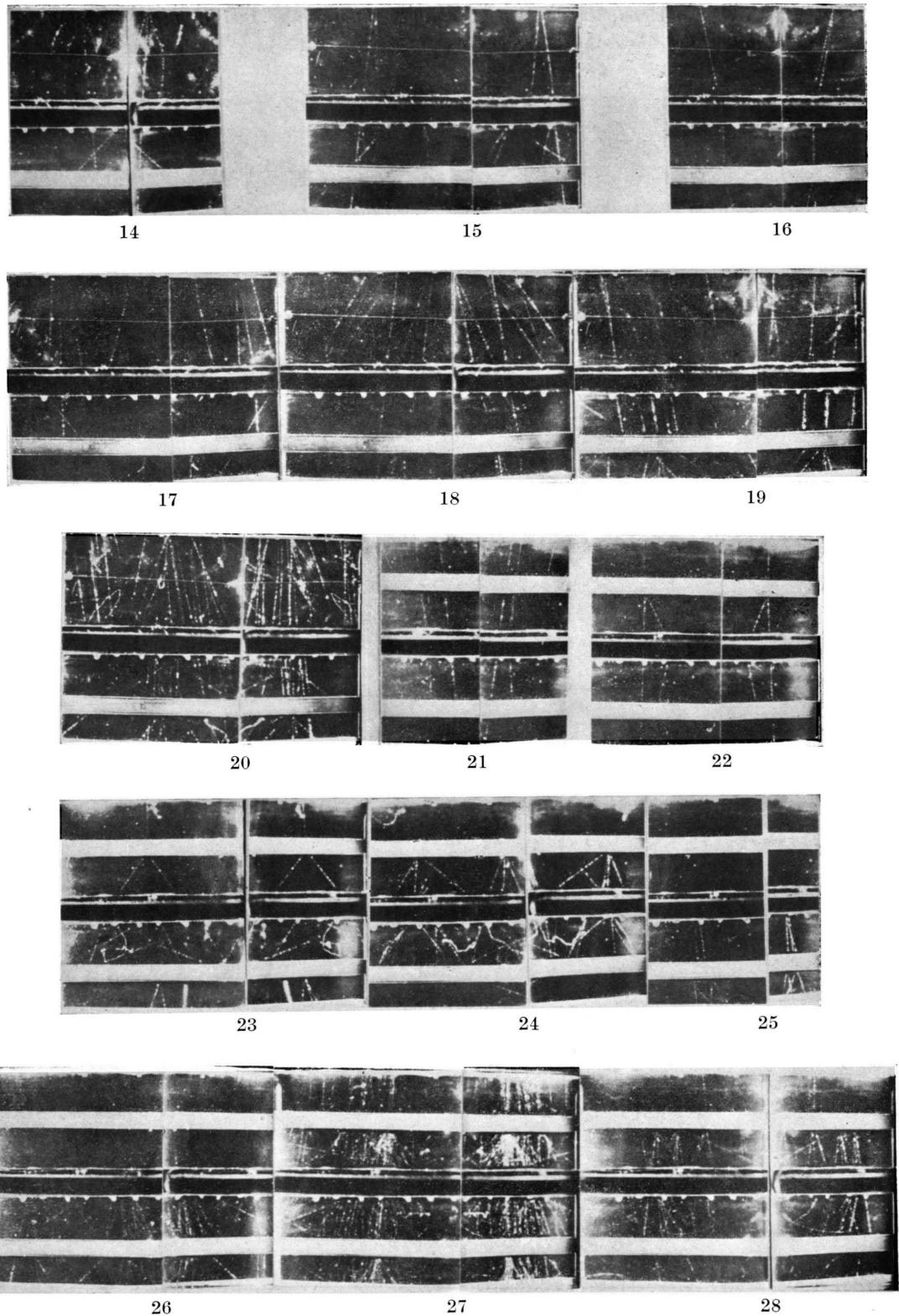


Abb. 14—28. Typenauswahl der Nebelkammeraufnahmen.

nunmehr 34 cm unterhalb des Strahlers. Als Attrappen für die Zählrohre wurden 5 Messingplatten von 1 mm Stärke an Stelle des Bleies in die Kammer eingesetzt. Gemäß obiger Arbeitshypothese und unter der Voraussetzung, daß die Entwicklung der Schauer von den μ -Mesonen ausgelöst wird, sollte man erwarten, daß sich zwischen den Messingplatten in größerer Zahl Ionisationseffekte nachweisen lassen, die mit dem Durchgang der μ -Mesonen gekoppelt sind. Mit dieser Anordnung wurden ebenfalls 500 durch Mesonen gesteuerte Aufnahmen gemacht. Die Statistik zeigt Tab. 2.

Einfache Mesonen (einschließlich windschiefer Doppelstrahlen und Sekundäreflektoren)	68%
Stoßelektronen, die keine weitere Messingplatte von 1 mm durchqueren	15%
Stoßelektronen ($1 < R < 2$ mm Messing)	4%
Stoßelektronen ($R > 2$ mm Messing)	1%
Schauer aus Blei	5%
Seitenschauer	7%

Tab. 2. Statistik der Ereignisse in der Messingplattentkammer.

Ereignisse der erwarteten Art, d. h. mit dem Mesonendurchgang gekoppelte Ionisationswirkungen, Compton-Effekte oder dgl., wurden aber keine gefunden. Solche Begleitspuren (vgl. z. B. Abb. 12, wo sich zufällig zwei der fraglichen Spuren zwischen der 3. und 4. Platte kreuzen) ließen sich entweder zeitlich vom Mesonendurchgang abtrennen und wie bei Vers. I auf radioaktive Strahlung der Platten zurückführen oder als zufällig eingestreute Elektronen deuten. Diese Diagnose wurde noch dadurch überprüft, daß wir bei einer Aufnahmeserie zusätzlich 200 willkürlich ausgelöste Expansionen eingeschoben haben. Von zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen wurde je eine durch Zählrohre, die folgende durch einen Uhrkontakt ausgelöst. In beiden Fällen war aber die Zahl der nicht unmittelbar durch Stoßprozesse ausgelösten Zusatzspuren dieselbe, im Mittel 0,5 pro Aufnahme.

Diese trivialen Effekte wurden daher in Tab. 2 nicht mehr gesondert aufgeführt. Die Zahl energieärmer Stoßelektronen, deren Spuren bis zur nächsten Platte reichen, ist praktisch die gleiche wie in Vers. I, weil sie nur aus einer begrenzten Tiefe der Erzeugungsplatte austreten können. Abb. 8 gibt ein typisches Beispiel. Einige Besonderheiten weisen die Abb. 9–12 auf. Auf 9 ist ein Stoßelektron zu sehen, das eine weitere Messingplatte durchquert hat, wobei es stark gestreut und schließlich zwischen den Nachbarplatten hin und her reflektiert wird.

Abb. 10 zeigt die Erzeugung eines sehr energiearmen und eines energiereicheren Stoßelektrons auf kurzer Wegdistanz und die weitere Auslösung eines Sekundärelektrons. Eine noch größere, nur einmal beobachtete Häufung von Stoßelektronen geht aus Abb. 11 hervor. Abb. 12 zeigt einen Stoßprozeß, bei dem das Elektron offenbar dicht unter der Oberfläche der zweiten Platte erzeugt und gleich darauf rückwärts und schließlich im Kammergehäuse nochmals seitlich gestreut wurde. Zusammenfassend läßt sich jedoch sagen, daß die an den Messingplatten (Zählrohrwänden) ausgelösten Stoßelektronen für eine Auslösung von Koinzidenzen zwischen seitlich benachbarten Zählrohren nicht in Frage kommen.

Im übrigen decken sich die Ergebnisse der Versuche I und II praktisch vollkommen. Der einzige Unterschied war lediglich, daß sich die aus dem Blei kommenden Elektronenschauer zwischen den Messingplatten im Gegensatz zu Vers. I mit Bleiplatten praktisch überhaupt nicht multipliziert haben (Abb. 13).

Folgerungen aus den Versuchen I und II

Aus den Versuchen I und II ergeben sich folgende Alternativen:

- Falls die spezifischen Maximumschauer durch einen beliebigen Mechanismus von den μ -Mesonen ausgelöst werden und die koinzidierenden Begleitstrahlen ionisierend sind, ergibt sich eine obere Grenze für die Häufigkeit der Schauer, bezogen auf die Zahl der auslösenden Mesonen, von 5%. Aus der üblichen Maximumserhöhung von 20% folgt weiter eine untere Grenze für spezifische Maximumschauer von 1% relativ zur Mesonenanzahl.
- Die vom Meson ausgelösten Begleitstrahlen sind neutral. Ihre Energieübertragung auf die zählstoßauslösenden Elektronen ist so gering (unter 10 KeV), daß es der Verstärkerwirkung durch Stoßionisation bedarf, um ihre Vorkommen nachzuweisen.
- Die Schauer werden überhaupt nicht durch μ -Mesonen, sondern durch eine andere Komponente der Ultrastrahlung ausgelöst.

Im Fall b) wäre dann der Nachweis der Schauer in der Nebelkammer grundsätzlich nicht möglich, und auch im Fall c) sind die obigen Versuchsanordnungen dem Problem nicht angepaßt, weil für die Auslösung der Aufnahmen mindestens ein durch-

gehend ionisierendes Teilchen, praktisch aber ein Meson, notwendig ist. Die interessierenden Ereignisse würden dann mit großer Wahrscheinlichkeit die Aufnahmen gerade nicht auslösen können.

III. Auslösung der Aufnahmen durch Koinzidenzzählrohre in der Kammer

Es wurde nun weiter versucht, etwas über die Struktur von Schauern zu erfahren, die nicht notwendig mit einem Teilchen gekoppelt sein müssen, das auf seinem ganzen Weg durch das Blei bis zu den Zählrohren ionisiert. Dazu wurde die Anordnung nach Abb. III benutzt.

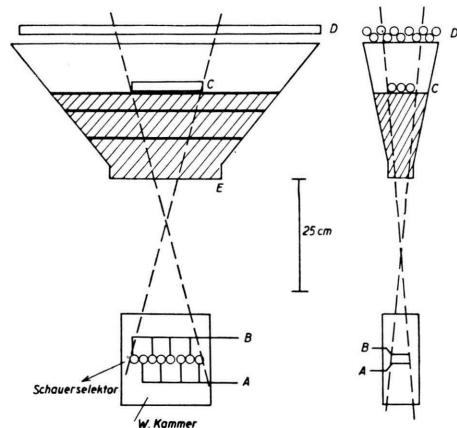


Abb. III. Schema der Versuchsanordnung III (Erläuterung im Text).

Der Strahler befand sich wieder 34 cm über der Kammer. In die Kammer selbst waren 8 Zählrohre mit den Achsen rechtwinklig zur Frontplatte eingebaut. Sie lagen dicht nebeneinander und waren in zwei Gruppen unterteilt, so daß jedes zweite Zählrohr einer Gruppe angehörte. Die Rohre jeder Gruppe waren parallel geschaltet. Ihre Abmessungen betragen 20 mm Durchmesser, Wandstärke 1 mm (Messing); der Zähldraht war 4,2 cm lang und erstreckte sich von einer Begrenzungsebene des beleuchteten Bereiches zur anderen. Oberhalb des Strahlers befand sich eine Lage Zählrohre C mit einer effektiven Fläche von $18 \times 4,5 \text{ cm}^2$. Darüber eine weitere Lage D, die für die Selektion selbst von untergeordneter Bedeutung war, aber zufällige Koinzidenzen praktisch ausschloß. Die Expansionen wurden durch Vierfach-Koinzidenzen A B C D ausgelöst, d. h. es wurde verlangt, daß mindestens ein ionisierendes Teilchen in den Strahler eintrat, das ihn aber nicht notwendig wieder als ionisierendes Teilchen zu verlassen brauchte und ferner, daß die Zählrohre in der Kammer eine Zweifach-Koinzidenz anzeigen. Unter diesen Bedingungen ist das zweite Maximum nach Bothe und Thurn nachweisbar. Der effektive Raumwinkel- und Flächenbereich für die Schauerentwicklung war gegeben durch 66 cm Abstand der Zähl-

fläche ($A + B$) = $4,2 \cdot 16 \text{ cm}^2$ und $C = 18 \cdot 4,5 \text{ cm}^2$ und betrug etwa 1,3 Sterad cm^2 .

Außer den Zählrohren befand sich bei einer Aufnahmeserie eine Bleiplatte von 1 cm Stärke unterhalb der Zählrohre im Abstand von 4,5 cm. Diese sollte der Identifizierung von Elektronen dienen. Bei einer zweiten Serie von Aufnahmen wurde zusätzlich eine weitere Bleiplatte im gleichen Abstand oberhalb der Zählrohre angebracht, um Anhaltspunkte für die Bewertung von Absorptionsmessungen zu gewinnen, die durch Überschichten des Schauerselektors mit Blei vorgenommen wurden.

Mit jeder dieser Anordnungen (mit bzw. ohne 1 cm Blei über den Koinzidenzrohren in der Kammer) wurden 300 Aufnahmen gemacht, und zwar je 100 unter 15,5 cm Strahlerblei (Maximumsdicke) bzw. 8,8 cm und 18,7 cm Strahlerblei, entsprechend den an das zweite Maximum angrenzenden Minimumsdicken.

Die Abb. 14—20 geben eine Typenauswahl der Schauer, die ohne Bleiplatte zwischen Zählrohren und Strahlerblei aufgenommen wurden. In jedem Falle enthielten die Schauer Elektronen, die teils erst in der Kammerdecke (Fenster 1 mm Al stark) teils in den Zählrohrwänden durch μ -Mesonen (Stoßelektronen, Abb. 14—15) bzw. Photonen (als Elektronenpaare, Abb. 16, 18, 20) ausgelöst wurden oder aber es traten bereits mehrere ionisierende Teilchen in sehr unterschiedlichen Abständen in die Kammer ein (Abb. 17—20).

Die zweite Serie, Typenauswahl Abb. 21—28, mit 1 cm Blei zwischen Strahler und Zählrohren bestätigte im wesentlichen, daß die Schauer, welche die Koinzidenzen hervorrufen, entweder Mesonen + Anstoßelektronen oder Elektron-Photonenschwärme sind, die schon in dünnen Materieschichten zusätzliche Elektronen auslösen, womit auch stets ihre seitliche Verbreitung zunimmt.

Schauer, die nicht in die beiden Kategorien einzuordnen waren, wurden bei den Versuchen keine beobachtet. Das besagt gleichzeitig, daß ein qualitativer Unterschied zwischen den Schauern unter der Maximumsdicke und den Schauern unter den angrenzenden Minimumsdicken sehr unwahrscheinlich ist. Eine etwas höhere mittlere Teilchendichte der Schauer unter der Maximumsdicke ist schwach angedeutet. Ihre Sicherstellung bedarf jedoch weiterer Versuche mit besserer Statistik.

IV. Intensitätsverhältnisse

Als Abschluß unserer vorläufigen Versuche haben wir nun die Häufigkeit der Koinzidenzen mit der

Häufigkeit der Mesonen durch direkte Zählungen verglichen. Dabei wurden zunächst unter den drei Vergleichsdicken des Strahlers die Koinzidenzen A B C D ausgezählt und ferner nach Parallelschaltung der Rohre A und B Koinzidenzen ($A + B$) C D unter 18,7 cm Blei. Mit der ersten Schaltung wurden also Zweifachkoinzidenzen AB registriert, die mit Teilchen gekoppelt waren, welche als ionisierende in das Blei eingedrungen sind, mit der zweiten Schaltung im wesentlichen Einzelmesonen, die etwa den gleichen Raumwinkel- und Flächenbereich, in dem sich die Schauer entwickelt haben, durchquerten. Die Ergebnisse zeigt Tab. 3.

Strahlerdicke Blei	1 cm Blei über den Zählrohren	ohne Blei über den Rohren
8,8 cm	$2,54 \pm 0,13$ Ko/h	$2,46 \pm 0,08$ Ko/h
15,5 „	$2,77 \pm 0,13$ „	$2,40 \pm 0,10$ „
18,7 „	$2,45 \pm 0,15$ „	$2,26 \pm 0,09$ „
Einzelstrahlen unter 18,7 cm Blei $38 \pm 1,5$ /h.		

Tab. 3. Häufigkeit der Zweifachkoinzidenzen und Einzelstrahlen, die mit der Anordnung nach Abb. III gezählt wurden.

Zunächst fällt auf, daß durch Einsetzen der Bleiplatte in 4,5 cm Abstand über den Zählrohren die Häufigkeit der Schauer sich nicht vermindert, sondern eher etwas vermehrt hat. Das deckt sich mit der Beobachtung, daß die Bleiplatte noch zu einer Konvertierung von Photonen in Elektronenpaare beiträgt und auch energiearme Stoßelektronen, die in der Bleiplatte erzeugt werden, zu Koinzidenzen Anlaß geben. Die Anordnung entspricht zwar nicht ganz dem Versuchsaufbau für Absorptionsmessungen bei Bothe und Thurn, bei welchem das Blei unmittelbar über die Zählrohre geschichtet wurde*. Das Ergebnis der Zählungen und auch die Aufnahmen selbst (Abb. 22—24, 28) zeigen aber, daß Absorption und Nacherzeugung der Schauer nicht einfach zu trennen sind. Da im Falle des ersten Maximums die erzeugende (Elektronen) Strahlung mitabsorbiert wird, was beim zweiten Maximum nicht im gleichen Ausmaß vorausgesetzt werden kann, so ist von vornherein kein Widerspruch darin zu sehen, daß für die Schauer des zweiten Maximums eine größere Absorptionslänge herauskommt, selbst wenn es sich auch hier um Elektronenschauer handelt. Weiterhin ist zu bemerken, daß unter 15,5 cm

Blei keine Überhöhung der Schauerhäufigkeit außerhalb der statistischen Schwankungsbreite von 5% aufgetreten ist. Es erhebt sich daher die Frage, ob es unter diesen Umständen sinnvoll ist, nach besonderen Maximumschauern zu suchen, wenn das Maximum selbst gar nicht erscheint. Wir glauben dies auf Grund der folgenden Überlegungen bejahen zu können. Unter den ungünstigen Ausblendungsverhältnissen, welche dadurch gegeben waren, daß die Schauer in der beleuchteten Zone der Kammer sichtbar sein mußten, dürfen die Zahlen nicht als Beweis gegen die Existenz des Maximums aufgefaßt werden.

Der hohe Untergrund der Seitenschauer, welcher nach Ausweis der Aufnahmen bei den einzelnen Serien zwischen 37 und 52% schwankt, bedingt Unsicherheiten der statistischen Auswertung, die eine Auslegung im obigen Sinne verbietet. Trotz dieses Mangels hat aber die Nebelkammermethode den Vorteil, daß die Einzelereignisse mit großer Sicherheit beurteilt werden können. Da nun aber das Vorkommen spezifischer Maximumschauer nicht von zusätzlichen Störeffekten abhängig sein kann, die sich bei den Aufnahmen selbst ausscheiden lassen, so müssen jeweils unter den 50 Schauern einer Serie, die unzweifelhaft aus dem Blei kamen, unter der Strahlerdicke von 15,5 cm etwa 10 Schauer enthalten sein, die speziell als Maximumschauer zu gelten haben, in beiden Serien mit und ohne Blei zusammen die doppelte Anzahl. Wenn aber tatsächlich nur elektronische Schauer beobachtet werden, wird man daraus schließen müssen, daß die Maximumschauer in ihrem koinzidenzfähigen Stadium ebenfalls elektronisch sind.

Aus Tab. 3 läßt sich weiter entnehmen, daß auf 38 Mesonen bestenfalls 2,8 Schauer einschließlich der Seitenschauer kommen. Zieht man rund 50% Seitenschauer ab, so bleibt ein Verhältnis Schauer zu μ -Mesonen von 1:26. Diese Intensitätsbeziehung ist mit dem entsprechenden Verhältnis 1:20, das wir in den beiden ersten Versuchen gefunden haben, ebenfalls verträglich. Die Differenz ist darauf zurückzuführen, daß bei der Koinzidenzanordnung des Vers. III ein gewisser Bruchteil teilchenarmer Schauer ausfällt, wenn die Spreizung der Teilchenbahnen parallel zu den Zählrohrachsen erfolgt.

Ein Verhältnis 1:20 scheint uns auch zu den Angaben von Bothe und Thurn zu passen, obwohl dort allein für die Maximumschauer ein Verhältnis 1:4 abgeschätzt wurde. Letzterer Wert ist jedoch zum Vergleich nicht unmittelbar geeignet, weil er bereits

* Der Zwischenraum war notwendig, um das Austreten der Strahlen aus dem Blei beobachten zu können.

auf bestimmten Voraussetzungen für Winkelverteilung und Treffwahrscheinlichkeit der Schauer basiert. Man kann aber abschätzen, daß dort einer Zählfläche von 2304 cm^2 in 115 cm Abstand von der oberen Strahlerfläche ($60 \times 60 \text{ cm}^2$) 19500 Mesonendurchgänge pro Stde. entsprechen. Diese Zahl ist mit der registrierten Gesamtintensität der Schauer im zweiten Maximum von optimal 1400/h zu vergleichen, woraus sich ein Häufigkeitsverhältnis von 1:14 für alle registrierten Schauer einschließlich der Seitenschauer herleitet. Die Differenz gegen das Verhältnis 1:20 wird ausgeglichen, wenn man bei der Botheschen Anordnung 30% Seitenschauer annimmt, eine Zahl, die durchaus in Betracht zu ziehen ist, wenn sich oberhalb des Strahlers keine Zählrohre befinden, welche die Zahl der Seitenschauer stärker einschränken.

V. Schlußfolgerungen

Die Ergebnisse der beschriebenen Versuche deuten nun vor allem darauf hin, daß die Schauer in der Umgebung des zweiten Maximums — soweit ihre Häufigkeit die Form der Auslösekurve beeinflussen kann — Mesonen mit den zugehörigen Stoßelektronen und Elektronen-Photonenschauer sind. Die Folgerungen von Bothe und Mitarb. auf Grund der Zählrohrmessungen, daß nämlich die Maximumschauer spezifisch anderer Natur sind, ließen sich nicht bestätigen.

Da nun allgemein bei den Nebelkammerstudien auch anderer Autoren^{7-10, 12, 14}, die zum Vergleich herangezogen werden können, durchdringende und enge Schauer nie mit der erforderlichen Häufigkeit nachzuweisen waren, muß man sich fragen, ob nicht doch eine besondere Natur der Schauer ihrem Nachweis in der Nebelkammer entgegensteht. Diese Alternative scheint durch die Arbeit von Broussard und Graves¹² widerlegt, welche das Maximum tatsächlich durch Auszählung sichtbarer Schauer in der Nebelkammer bestätigt haben. Eine besondere Art von Schauern im Bereich des Maximums wird auch in dieser Arbeit nicht erwähnt.

Wenn wir nun als vorläufiges Ergebnis unserer Nebelkammerversuche festhalten, daß auch die Maximumschauer mit großer Wahrscheinlichkeit elektronisch sind, und ferner daß die Gesamthäufigkeit der Schauer, die in Blei ausgelöst werden, relativ zur Häufigkeit der μ -Mesonen 1:20 beträgt, so wird man die Tatsache nicht unbeachtet lassen dür-

fen, daß diese Häufigkeit mit einer Auslösung der Schauer durch Stoßelektronen der μ -Mesonen verträglich ist¹⁸. Die Hypothese einer solchen Auslösung der Schauer ist schon früher von Clay und Mitarb.¹⁹ in Betracht gezogen worden. Eine eingehende Durchrechnung²⁰ dieser Annahme zeigt aber, daß der einfache, von Clay vorgeschlagene Mechanismus bestenfalls ein schwaches Nebenmaximum bei 4 cm Blei erklärt, dessen Existenz von Tsai-Chü²¹ unter anderen Annahmen diskutiert worden ist. Auf welche Weise sonst noch ein Zusammenhang des Maximums mit der Stoßelektronenerzeugung bestehen könnte, läßt sich vorläufig nicht absehen. Denkbar ist eine Auswirkung von Unregelmäßigkeiten des Energiespektrums der μ -Mesonen oder der Wirkungsquerschnitte für die Stoßelektronenerzeugung sowohl im Energiebereich der μ -Mesonen um 10^8 eV (μ -Mesonen mit $2,5 \cdot 10^8 \text{ eV}$ werden in etwa 16 cm Blei gerade absorbiert) als auch zwischen 10^{11} und 10^{12} eV . (μ -Mesonen dieses Energiebereiches können Stoßelektronen erzeugen, deren Abkömmlinge unter 16 cm Blei noch erscheinen.) Eine weitere Möglichkeit, welche das Zustandekommen von Maximumschauern elektronischer Natur erklären würde, ist von Chaudhary⁴ diskutiert worden, wonach gewisse Anomalien des Absorptionskoeffizienten von γ -Strahlung für die Erzeugung von Positron-Elektron-Dipolen sprechen, die sich bis zu ihrer Trennung wie neutrale Teilchen benehmen sollen. Nähere Einblicke in diese Zusammenhänge können indessen nur durch weitere Experimente erlangt werden.

Für die Förderung der Arbeiten durch Überlassung technischen Zubehörs sprechen wir folgenden Firmen unseres besonderen Dank aus:

Firma Robert Bosch GmbH, Stuttgart-W,

Firma Lindes Eismaschinen A.-G. Höllriegelskreuth bei München,

Firma Blei- und Silberhütte GmbH, Braubach/Rhld.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bad Godesberg, danken wir für die Überlassung von Meßinstrumenten.

¹⁸ W. W. Brown, A. S. Mc Kay, E. D. Palmer, Physic. Rev. **76**, 506 [1949].

¹⁹ J. Clay, Rev. Mod. Physics **21**, 82 [1949].

²⁰ G. Pfotzer, Z. Naturforsch. **8a**, 335 [1953].

²¹ Tsai-Chü, Physic. Rev. **83**, 867 [1951].