

ProportionalzähIrohr zur Messung schwacher Aktivitäten weicher -Strahlung

Autor(en): **Houtermans, F.G. / Oeschger, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **31 (1958)**

Heft II

PDF erstellt am: **25.08.2019**

Persistenter Link: <http://doi.org/10.5169/seals-112904>

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*

ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

<http://www.e-periodica.ch>

Proportionalzählrohr zur Messung schwacher Aktivitäten weicher β -Strahlung

von **F. G. Houtermans** und **H. Oeschger**

Physikalisches Institut der Universität Bern

(19. XI. 1957)

Das Problem bei der Messung schwacher, energieärmer Aktivitäten wie von rezentem Kohlenstoff, von Tritium, sowie von langlebigen β -Strahlern besteht darin, einen Apparat zu finden, der einerseits einen möglichst grossen Zähleffekt und anderseits einen möglichst kleinen Nulleffekt liefert.

Aus Gründen der Zählstatistik ist aber auch vor allem darauf zu achten, dass der Zähleffekt pro Zeiteinheit (und damit in dem gegebenen Verhältnis natürlich auch der Nulleffekt pro Zeiteinheit) so gross wie möglich ist.

Bei den üblichen Anordnungen wird der Nulleffekt reduziert, indem man das Zählrohr mit $150\text{--}250\text{ g/cm}^2$ schweren Materials abschirmt. Dadurch wird die weiche Komponente der kosmischen Strahlung und der radioaktive Untergrund der Umgebung absorbiert. Mit 10–20 cm Bor-Paraffin werden die durch die kosmische Strahlung im Abschirmmaterial erzeugten Neutronen gebremst und absorbiert, so dass auch die durch Neutronen induzierten Ereignisse ausgeschlossen werden (DE VRIES, 1956).

Die harte Komponente der kosmischen Strahlung wird eliminiert, indem man das Zählrohr mit einem Kranz von Zählrohren umgibt, die in Antikoinzidenz geschaltet sind.

Der restliche Nulleffekt besteht dann im wesentlichen aus drei Komponenten:

1. Aus α - und β -Verunreinigungen des Zählrohrmaterials, im wesentlichen der Wand.
2. Aus Compton-Photo- und Paarelektronen, die durch γ -Quanten, die trotz aller Abschirmung ins Zählrohr gelangen können, hauptsächlich aus dem Wandmaterial des Rohres ausgelöst werden.
3. Aus μ -Mesonen, die das Zählrohr passieren können ohne die Antikoinzidenz auszulösen.

Die Bestrebungen, diesen restlichen Nulleffekt weiter herabzusetzen, gingen bisher in der Richtung, nach Material für Zählrohr und Abschirmung zu suchen, das möglichst rein von radioaktiven Verseuchungen ist.

Die von uns gewählte Anordnung versucht nun noch in anderer Weise den Nulleffekt herabzusetzen (HOUTERMANS und OESCHGER, 1955).

Dabei liegen folgende Gedanken zugrunde:

1. Durch Anwendung von möglichst wenig Wandmaterial zwischen Hauptzählrohr und Antikoinzidenzanordnung soll die «Quellstärke» der ersten und zweiten Komponente herabgesetzt werden.

2. Durch Anwendung von möglichst wenig Absorbermaterial zwischen dem eigentlichen Zählrohr und der Antikoinzidenzanordnung soll es möglich sein, dass härtere Elektronen des Nulleffektes aus dem Hauptzählrohr die Antikoinzidenzanordnung auslösen können.

3. Die dritte Komponente des Nulleffektes soll dadurch herabgesetzt werden, dass die Antikoinzidenzanordnung keinen toten Raum, wie er bei jeder Zählrohrkranzanordnung vorkommt, besitzen soll.

4. Ausserdem soll die Antikoinzidenzanordnung ein grosses Auflösungsvermögen besitzen, damit keine Verluste an Sperrimpulsen entstehen.

5. Da zu erwarten ist, dass die α -Komponente des Nulleffektes in einer solchen Anordnung nicht mehr klein ist gegenüber dem restlichen Null effekt, soll durch Diskriminieren gegen grosse Impulse auch dieser Anteil des Nulleffekts unterdrückt werden.

Eine solche Anordnung wird dadurch verwirklicht, dass die Antikoinzidenzanordnung direkt ins Zählrohr eingebaut und vom eigentlichen Zählvolumen nur durch eine dünne Folie getrennt wird (Fig. 2 und 3).

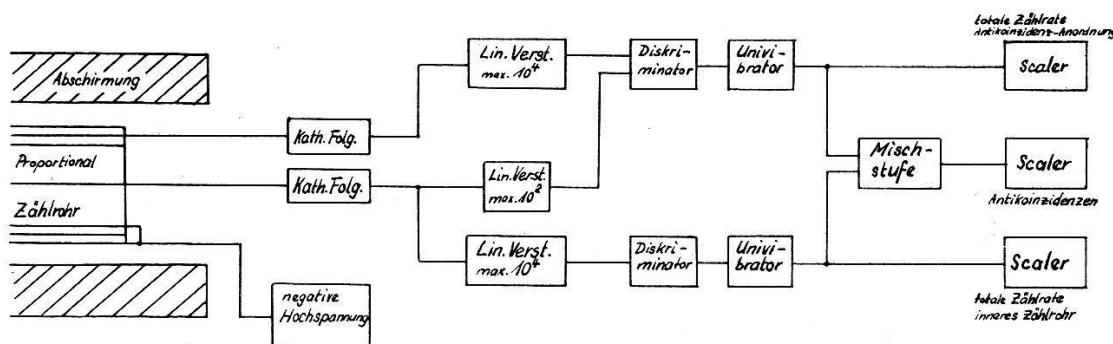


Fig. 1

Das erste Zählrohr dieser Art wurde für die Messung von C^{14} konstruiert. Zu diesem Zweck wurde die Folie gerade noch so dick gewählt, dass darin der grösste Teil der vom inneren Zählrohr kommenden C^{14} -Elektronen ($E_{\max} = 155$ KeV, $E_w = 42$ KeV) gebremst wird, da diese, wenn sie das Antikoinzidenzvolumen erreichen, einen Sperrimpuls auslösen und so nicht als Antikoinzidenz gezählt werden. Wegen der relativ kur-

zen Reichweite der β -Strahlen von C^{14} können aber trotzdem die Forderungen 1 und 2 weitgehend befriedigt werden.

In den Raum zwischen Folie und Aussenrohr wird ein Kranz von Drähten eingebaut, die miteinander verbunden sind und als Anode der Antikoinzidenzanordnung dienen. Die dünne Folie ist mit dem Mantel elektrisch verbunden (siehe auch Fig. 1). Das innere Zählrohr und die Anti-

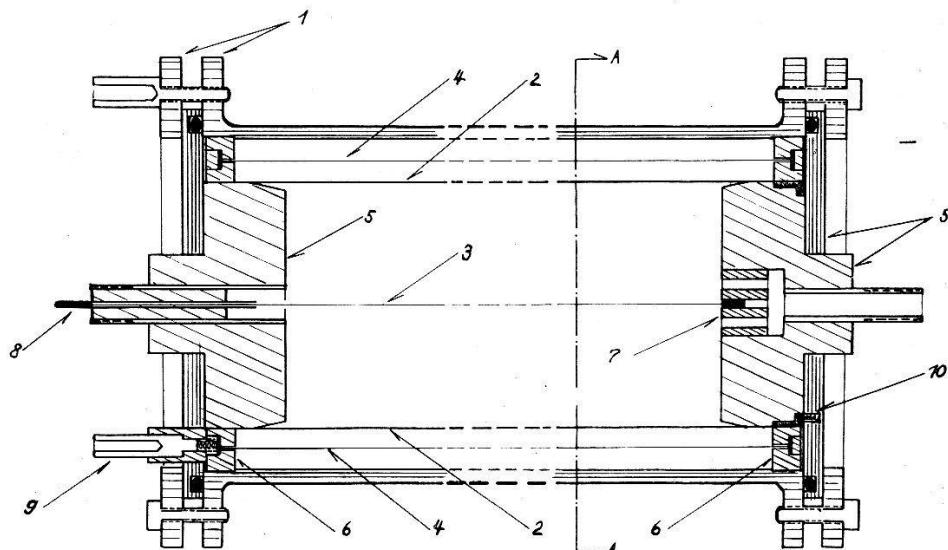


Fig. 2

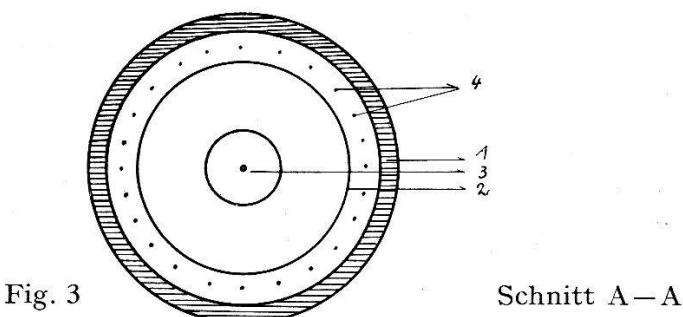


Fig. 3

Schnitt A-A

Legende zu Fig. 2 und 3

1. Zählrohrmantel (rostfreier Stahl, innerer \varnothing 95 mm) mit Flansch und Gegenflansch.
2. Polystyrolfolie ($6,7 \text{ mg/cm}^2$) mit Aluminium bedampft, zu einem Rohr von 75 mm \varnothing zusammengeklebt.
3. Anodendraht des inneren Zählrohres (rostfreier Stahl $50 \mu \varnothing$), empfindliche Länge 34 cm.
4. Antikoinzidenz anodendrähte (rostfreier Stahl $70 \mu \varnothing$), empfindliche Länge 38 cm.
5. Teflonenden mit Platte aus rostfreiem Stahl.
6. Teflonring zur Befestigung der Antikoinzidenz anodendrähte.
7. Teflonisolator mit Anodendraht des inneren Zählrohres und Bohrungen für Gaseinlass.
8. Anschluss der Anode des inneren Zählrohres.
9. Anschluss der Anode der Antikoinzidenzanordnung.
10. Folienkontakt.

Totales Volumen 2,7 L, empfindliches Volumen 1,5 L.

koinkidenzanordnung werden mit demselben Gas gefüllt und beide Anordnungen arbeiten im Proportionalbereich.

Wohl besitzt auch eine solche Antikoinzidenzanordnung Zonen geringer Empfindlichkeit, wo die elektrische Feldstärke relativ klein ist und dadurch Verluste an Ionenpaaren durch Rekombination auftreten können, doch fehlt der völlig tote Raum wie er bei der Berührungsstelle zweier Zählrohre vorkommt.

Forderung 4 wird dadurch erfüllt, dass diese Antikoinzidenzanordnung auch im Proportionalbereich arbeitet. Dadurch können Totzeitverluste praktisch vermieden werden. Bei den üblichen Anordnungen mit Geiger-Müller-Zählrohren muss durch eine geeignet gewählte elektronische Schaltung dafür gesorgt werden, dass die Totzeitverluste an Sperrimpulsen nicht zu einer Erhöhung des Nulleffektes führen.

Ausserdem ist es einfacher, die Proportionalimpulse des Hauptzählrohres mit Impulsen vom gleichen Typus zu sperren, anstatt wie üblich mit den langsamer ansteigenden Impulsen der Auslösezählrohre.

Übersicht über die Apparatur

Der Aufbau der Zählapparatur ist aus dem Blockschema (Fig. 1) ersichtlich.

Die Abschirmung besteht aus Eisen, Paraffin und Quecksilber.

Die Proportionalimpulse vom inneren Zählrohr sowie diejenigen von der Antikoinzidenzanordnung gelangen nach dem Verstärker auf Diskriminatior und Univibrator. Die normierten Impulse werden dann auf die Antikoinzidenzstufe gegeben.

Es besteht auch die Möglichkeit, die Impulse des inneren Zählrohres abzuzweigen und auf den Diskriminatior für die Sperrimpulse zu geben, wodurch auch gegen grosse Impulse (Imp. von α -Teilchen) diskriminiert werden kann (Forderung 5).

Die Anzahl der Antikoinzidenzen, sowie die gesamte Zählrate des inneren Zählrohres und der Antikoinzidenzanordnung werden laufend zur Kontrolle registriert.

Die Apparatur wurde bisher für Altersbestimmungen nach der C^{14} -Methode und gelegentlich auch zur Messung von Tritium benutzt. Bei C^{14} -Messungen wird das Zählrohr mit Acethylen bei 710 mm Hg gefüllt. Die Herstellung des Acetylhens aus den zu untersuchenden Proben erfolgt nach dem von SUESS (SUESS, 1954) angegebenen Verfahren.

Konstruktion des Zählrohres

Figur 2 zeigt einen Längsschnitt, Figur 3 einen Querschnitt des Zählrohres.

Für den äusseren Mantel des Zählrohres wurde, wie von SUESS (SUESS, 1954) für sein Acethylen-Zählrohr, rostfreier Stahl verwendet.

Die Folie besteht aus Polystyrol, das auf beiden Seiten mit Aluminium bedampft ist. Sie wird mit kalthärtendem Araldit zu einem Rohr von gewünschtem Durchmesser zusammengeklebt. Dieses Rohr ist trotz der geringen Dicke ($6,7 \text{ mg/cm}^2$) noch relativ steif, so dass es nur an den beiden Enden befestigt werden muss. Zu diesem Zweck wird es über die zylinderförmigen Fortsätze der Teflonenden gestülpt, die den gleichen Durchmesser wie das aus der Folie geformte Rohr besitzen.

Die Anode der Antikoinzidenzanordnung besteht aus parallelen Drähten, die zwischen den beiden Teflonringen an den beiden Enden des Zählrohres hin und her gespannt werden. Diese Teflonringe sitzen auf Schultern im Stahlrohr. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Drähten ist ungefähr gleich dem Abstand zwischen Zählrohrmantel und Folie.

Die empfindliche Länge der Antikoinzidenzanode ist 4 cm länger als diejenige des inneren Zählrohres, um besser gegen Partikel zu schützen, die von der Seite her einfallen.

Der Anodendraht des inneren Zählrohres wird durch einen Teflonisolator mit Schutzzring hinausgeführt. Auf der andern Seite ist er in einem Teflonisolator befestigt.

Abschätzung der optimalen Foliendicke.

Die Anordnung ist um so wirksamer im Herabsetzen des Nulleffektes je dünner die Folie ist. Anderseits soll diese aber doch dick genug sein, um zu verhindern, dass ein grösserer Prozentsatz der im inneren Volumen emittierten zuzählenden β -Strahlen ins Antikoinzidenzvolumen gelangen und dort auch einen Sperrimpuls auslösen.

Damit ein im inneren Volumen emittiertes Elektron das Antikoinzidenzvolumen erreichen kann, muss es erstens trotz Selbstabsorption zur Folie gelangen und zweitens noch genügend Energie besitzen, um diese durchqueren zu können.

Der Bruchteil der Elektronen, die aus dem inneren Volumen austreten, ist gegeben durch den Ausdruck mit dem fünffachen Integral

$$A = \frac{1}{4\pi V} \cdot \int \int \int e^{-\mu S} d\Omega dx dy dz,$$

wobei S die innerhalb des Rohres zurückgelegte Entfernung eines an der Stelle x, y, z aus dem Volumenelement $dx dy dz$ in den Raumwinkel $d\Omega$ emittierten Teilchens ist.

Dabei wird angenommen, dass sich die Absorption der Elektronen eines β -Spektrums in guter Näherung durch ein Exponentialgesetz darstellen lässt (GLEASON, 1951).

HADWIGER hat dieses Integral in einer noch nicht publizierten Arbeit abgeschätzt (HADWIGER, 1957).

Nach HADWIGER erhält man unter Berücksichtigung der Dimensionen unseres Zählrohres bei einer Füllung mit 710 mm Hg C_2H_2 ($\mu/\rho = 0,26 \text{ cm}^2/\text{mg}$ für C^{14} [GLEASON, 1951]) für A die Schranken:

$$46\% \geq A \geq 35\%.$$

Im Fall von ganz schwachen Energien (zum Beispiel Tritium) würde nur ein sehr kleiner Bruchteil der im inneren Volumen emittierten Elektronen dieses verlassen. Es wäre daher gar kein absorbierendes Material zwischen dem äusseren und inneren Volumen erforderlich. Man könnte also die Folie zum Beispiel durch parallele Drähte ersetzen, die für die gewünschten elektrischen Feldverhältnisse sorgen würden.

Der Bruchteil der die Folie durchdringenden Strahlung berechnet sich für isotrope Einstrahlung nach der Beziehung:

$$I/I_0 = e^{-\mu d} + \mu d E i(-\mu d)$$

Dabei ist I_0 = Anzahl der Elektronen, die auf die Folie auftreffen.
 I = Anzahl der Elektronen, die die Folie durchdringen.

Für $d = 6,7 \text{ mg/cm}^2$ (Polystyrolfolie) ist

$$I/I_0 \simeq 4,5\%$$

Hieraus folgt, dass im Mittel minimal nur 1,7% und maximal 2,3% der vom C^{14} emittierten Elektronen in das äussere Antikoinzidenzvolumen austreten und durch Auslösen eines Koinzidenzimpulses für die Zählung verloren gehen.

Bei Relativmessungen, wie zum Beispiel bei den C^{14} -Datierungen ist eine genauere Kenntnis dieses Verlustes nicht nötig. Eine weitere Herabsetzung der Foliendicke wäre auch für C^{14} -Messungen ohne grosse Verluste noch möglich, doch reicht dann die Festigkeit der Folie für eine so einfache Halterung im Zählrohr nicht mehr aus.

Zählrohreigenschaften

Das eigentliche Zählrohr unterscheidet sich in Aufbau und Eigenschaften nicht vom üblichen Proportionalzählrohrtyp. Üblicherweise werden Geiger-Müller-Zählrohre in einem Kranz um das Hauptzählrohr herum angeordnet. Dabei ist es aber möglich, dass ein Teilchen diese Anordnung an der Berührungsstelle zweier Zählrohre durchsetzt und keinen Sperrimpuls auslöst. Bei der hier gewählten Anordnung hingegen legt ein von aussen eintretendes Teilchen im Antikoinzidenzvolumen minimal einen Weg von 1 cm zurück, was bei 710 mm Hg C_2H_2 der Bildung von ~ 30 Ionenpaaren entspricht.

Wie Figur 4 zeigt, besitzt die Antikoinzidenzanordnung ein flaches Plateau. Das Einsetzen des Plateaus kann so gedeutet werden, dass bei

der Einsatzspannung die Gasmultiplikation ausreicht, um auch die die minimale Anzahl von Ionenpaaren erzeugenden Partikel zu registrieren.

Die Brauchbarkeit dieser Antikoinzidenzanordnung für die Messung schwacher Aktivitäten hängt davon ab, ob sie wirklich in der Lage ist, für jedes durchgehende geladene Teilchen einen Sperrimpuls zu liefern.

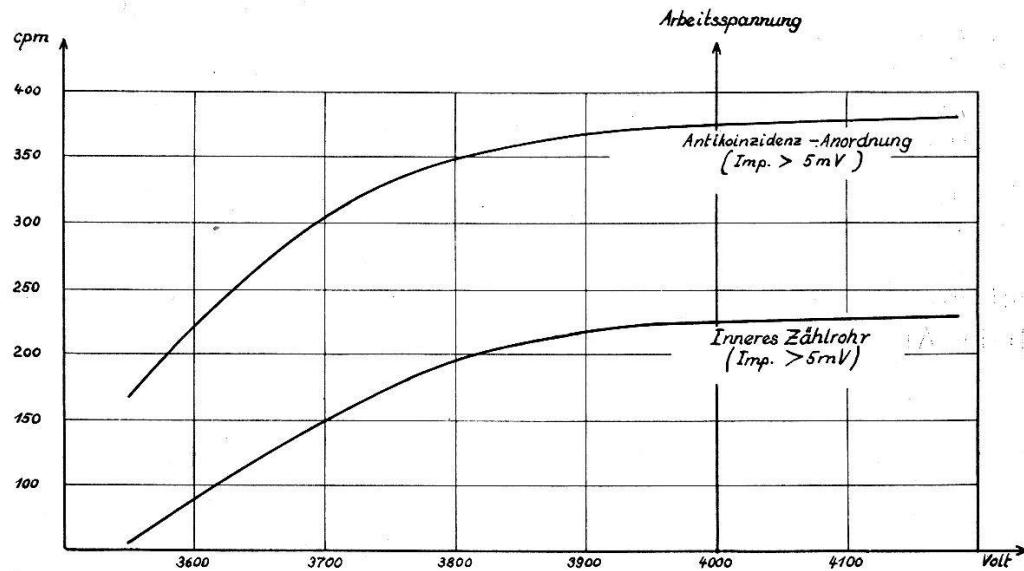


Fig. 4

Ausserdem soll diese Forderung über einen ziemlich grossen Spannungsbereich erfüllt sein, um eine genügende Stabilität zu gewährleisten. Eine Verminderung der Zählspannung der Antikoinzidenzanordnung um mehr als hundert Volt hat aber ebensowenig eine spürbare Auswirkung auf den Nulleffekt, wie eine Herabsetzung der elektronischen Verstärkung auf 50% ihres üblichen Wertes. Die Antikoinzidenzanordnung kann also ihre Funktion auch bei relativ grossen Schwankungen der Gasmultiplikation sowie der elektronischen Verstärkung erfüllen. Sie steht, was die Stabilität anbelangt, in keiner Weise hinter der üblichen Anordnung zurück. Ausserdem ist ein Lebensdauereffekt praktisch nicht möglich, da die Gasfüllung immer wieder erneuert wird und da man im Proportionalbereich arbeitet.

Der Nulleffekt

In Tabelle 1 sind die mit diesem Zählrohr, bei einer Füllung von 710 mm C_2H_2 aus fossilem Kohlenstoff, gemessenen Nulleffekte dargestellt. Die dabei gewählte Abschirmung geht aus Figur 5 hervor.

Bei diesen Messungen wurden alle Impulse, die am Eingang grösser als 400 mV waren, abgeschnitten. Dieses Abschneiden der grossen Impulse gab eine Reduktion des Nulleffektes um $0,3_0$ Imp./Min.

Die Paraffinabschirmung setzte den Nulleffekt um $0,4_0$ Imp./Min. herab.

Die Herabsetzung der Zählrate von γ -Strahlen durch die Antikoinzidenzanordnung wurde mit Hilfe einer C_0^{60} -Quelle ausprobiert. Der Zähl-

Tabelle 1

Anordnung		Nulleffekte (Imp./Min.)	Foliendicke
ohne Abschirmung . . .	ohne Antikoinzidenz	450	
mit Abschirmung . . .		217	
mit Abschirmung . . .	mit Antikoinzidenz	1,2 ₀	6,7 mg/cm ²
ohne Paraffin		0,9 ₅	4,5 mg/cm ²
mit Abschirmung . . .		0,8 ₀	6,7 mg/cm ²
mit Paraffin			
Abschirmung nur 5 cm Pb	mit Antikoinzidenz	2,2 ₀	6,7 mg/cm ²

effekt einer C_0 -Quelle, die in der Verlängerung der Zählrohrachse ausserhalb der Abschirmung aufgestellt war, wurde bei arbeitender Antikoinzi-

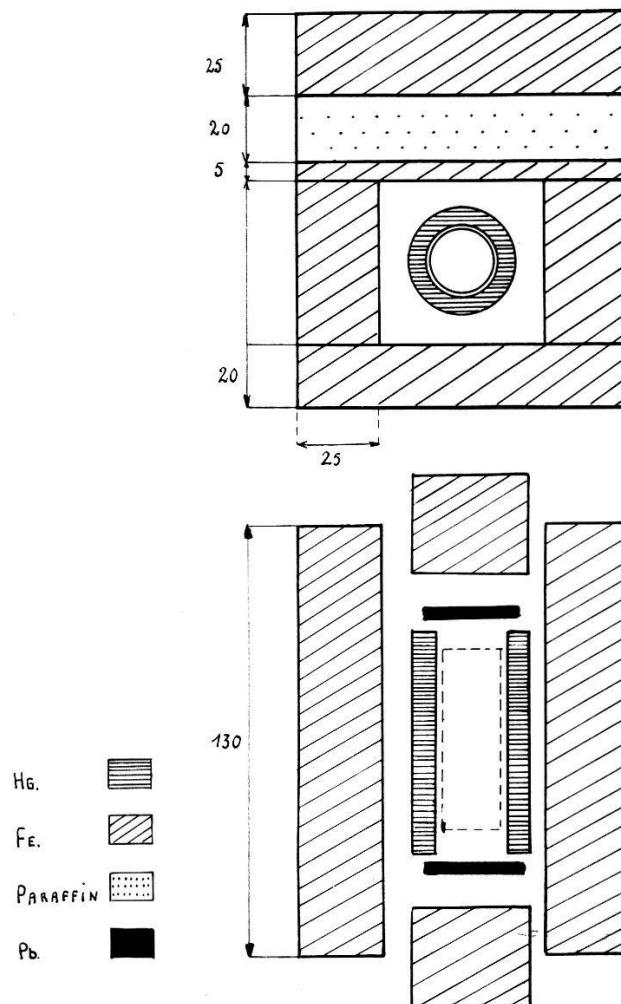


Fig. 5

denz auf $1/3$ reduziert. Wird die C_0 -Quelle auch ausserhalb der Abschirmung aber in senkrechter Richtung zur Zählrohrachse ausgestellt, beträgt der Reduktionsfaktor sogar 8.

Bei einer starken Verseuchung des Zählrohres mit Radon konnte die Herabsetzung der β -Komponente der Tochtersubstanzen von Radon untersucht werden. Bei Gleichgewicht bis zum Ra C' wurden ohne Antikoinzidenz 1,50 β -Impulse pro 1 α -Impuls registriert. Bei arbeitender Antikoinzidenz hingegen nur 0,53 β -Impulse pro 1 α -Impuls.

Auch bei der Verwendung von Füllgas, das lange genug gelagert war, um die Anwesenheit auch der kleinsten Spuren von Radon-Verseuchung auszuschliessen, zeigt sich eine merkliche α -Komponente im Nulleffekt, zu der auch eine entsprechende Anzahl von β -Impulsen gehört. Nach Öffnen des Zählrohres und insbesondere dann, wenn die Folie längere Zeit an Laborluft gelegen hatte, zeigte sich ein Anstieg sowohl der α -Komponente wie auch des β -Anteils des Nulleffektes. Dieser Anstieg ist auf das aus dem Radongehalt der Luft entstehende Ra D, Ra E und Ra F zurückzuführen. Bei der Benützung des Zählrohres ist es also nach Möglichkeit zu vermeiden, dieses zu öffnen.

Aus der Unabhängigkeit des Nulleffektes über einen grossen Verstärkungsbereich der Antikoinzidenz lässt sich schliessen, dass alle die Antikoinzidenz passierenden ionisierenden Partikel wirklich einen Sperrimpuls auslösen. Hingegen kann ein Beitrag zum Nulleffekt von Partikeln herrühren, die das innere Zählrohr angenähert parallel zur Achse durchqueren und daher das Antikoinzidenzvolumen nicht passieren. Der Nulleffekt ist mit diesem Zählrohr schon so weit herabgesetzt worden, dass von einer Antikoinzidenzanordnung an den beiden Zählrohrenden eine ins Gewicht fallende Herabsetzung des restlichen Nulleffektes zu erwarten wäre. Diese würde ja auch Impulse eliminieren, die von Elektronen herrühren, die erzeugt durch γ -Quanten im Zählgas oder in der Folie, das innere Zählrohr in Richtung der Enden verlassen.

Bei konstanten Verhältnissen von Zählrohr und Abschirmung blieben die Schwankungen des Nulleffektes im Rahmen der statistisch zu erwartenden (1σ nach 15 h $\sim 0,03$ Imp./min).

Vergleich mit anderen Apparaturen

Um die Nulleffekte verschieden grosser Zählrohre einigermassen miteinander vergleichen zu können, ist es nötig, diese auf gleiche Kathodenflächen zu beziehen. In der Tabelle 2, die eine Zusammenstellung von C^{14} -Apparaturen mit den kleinsten Nulleffekten zeigt, sind daher auch die spez. Nulleffekte (Nulleffekte pro cm^2 der Kathodenoberfläche) aufgeführt. Der Faktor G erlaubt es, Apparaturen mit verschiedener Messtechnik bei verschiedenen Zählrohrdimensionen miteinander zu vergleichen.

Er ist folgendermassen definiert:

$$G = \frac{\text{Nettoeffekt für modernen Kohlenstoff}/\text{min cm}^3}{\text{Nulleffekt}/\text{min cm}^2}.$$

Tabelle 2

	Gas	Vol (l)	Druck (Atm.)	Mod. C (Imp/min)	Null- effekt (Imp/min)	Spez. Null- effekt (Imp/min cm ²)	G (cm ⁻¹)
FERGUSSON (FERGUSSON 1955)	CO ₂	7	3 1	103 37,5	14 9,8	0,0045	2,3
DE VRIES (DE VRIES 1957)	CO ₂	0,73	3	14,6	0,61*	0,00105	19
SUESS (SUESS 1955)	C ₂ H ₂	1		15,8	2,3	0,0040	3,9
Unsere Anordnung	C ₂ H ₂	1,5	1	15,2	0,80*	0,0010	10

* Bei diesen Nulleffekten wurden die Impulse, deren Grösse einem Energieverlust entsprechen, der grösser als die Maximalenergie des C¹⁴-Spektrums ist, nicht gezählt.

Die Kathodenflächen wurden nach den in den zitierten Arbeiten enthaltenen Angaben abgeschätzt.

Das Verhältnis des Zähleffektes von modernem Kohlenstoff zum Nulleffekt beträgt bei unserer Anordnung 19. Es könnte noch verbessert werden, indem man bei höherem Druck des Zählgases oder mit grösserem Zählrohr arbeiten würde. Aus Tabelle 2 geht hervor, dass ein so kleiner Nulleffekt bei den gewöhnlichen Antikoinzidenzanordnungen nur mit Hilfe von ausgesuchtesten Materialien für Zählrohr und Abschirmung erreicht werden kann (DE VRIES, 1957).

Literaturverzeichnis

- (DE VRIES 1956): HL. DE VRIES, Nucl. Physics 7, 477 (1956).
- (DE VRIES 1957): HL. DE VRIES, Nucl. Physics 3, 65 (1957).
- (FERGUSSON 1955): G. J. FERGUSSON, Nucl. 13, 18 (1955).
- (GLEASON u. a. 1951): G. I. GLEASON, I. D. TAYLOR und D. L. TABERN, Nucl. 8, 12 (1951).
- (HADWIGER 1957): H. HADWIGER, private Mitteilung.
- (HOUTERMANS und OESCHGER 1955): Helv. Phys. Acta 28, 464 (1955).
- (SUESS 1954): H. SUESS, Science 120, 6 (1954).
- (SUESS 1955): H. SUESS, Science 122, 415 (1955).