

Bei diesem Versuch geht es um das Phänomen  $\alpha$ -Zerfall, um Zerfallsreihen, um die Wirkung der  $\alpha$ -Strahlung in Materie, um geeignete Detektoren für den Nachweis von  $\alpha$ -Teilchen und um die Energiebestimmung von  $\alpha$ -Teilchen. Typische Geräte kernphysikalischer Messapparaturen und die Kopplung von Experiment und Rechner sowie Auswerteverfahren werden vorgestellt.

**Hinweise:**

- 1) In den Kernphysik-Räumen gelten nach der Strahlenschutzverordnung besondere Regeln, die unbedingt zu beachten sind. Der Zugang zum Bunker für radioaktive Präparate ist nur den Betreuern gestattet.
- 2) Bitte USB-Stick mitbringen, um die Daten zur Auswertung mit nach Hause nehmen zu können.

**Aufgaben:**

**1. Messen Sie den Ionisationsstrom  $I_{IK}$  in Abhängigkeit von der Betriebsspannung  $U_{IK}$  der Ionisationskammer.**

Begründen Sie die gefundene Abhängigkeit qualitativ. Ermitteln Sie in einem einfachen Vorversuch die Abstandseinstellung zwischen  $\alpha$ -Quelle  $Q_u$  und Ionisationskammer  $IK$ , bei der sich der größte Ionisationsstrom ergibt. Dabei soll  $U_{IK}$  genügend groß sein, etwa  $U_{IK}=24$  V. Führen Sie die Messung bei dieser Abstandseinstellung durch.

**2. Messen Sie  $I_{IK}$  in Abhängigkeit vom Abstand  $Q_u$ - $IK$ .**

Bestimmen Sie aus dieser Messreihe die maximale Reichweite der 6,0 MeV und der 7,7 MeV  $\alpha$ -Strahlung in Luft. Die Spannung  $U_{IK}$  soll dem Ergebnis von Aufgabe 1 entsprechend sinnvoll eingestellt sein. Die Auftragung der gemessenen Ströme  $I_{IK}$  erfolgt über einer korrigierten Abstandsskala. Diese berücksichtigt z.B. den Anfangsabstand  $Q_u$ - $IK$ , das Luftäquivalent der Präparatabdeckung und die Lage des effektiven Wirkungszentrums in der Kammer.

**3. Bestimmen Sie mit Hilfe des Halbleiterdetektors  $HD$  und des Zählgeräts sowie geeigneter Korrekturen den  $\alpha$ -Teilchenstrom, der bei Aufgabe 2 in der Ionisationskammer wirksam war, als die Entfernungseinstellung maximalen Ionisationsstrom ergab.**

Berechnen Sie dann aus diesem Teilchenstrom, der  $IK$ -Geometrie, der bekannten  $dE/dx$ -Abhängigkeit und der bekannten benötigten Energie für die Erzeugung eines Ionenpaares in Luft den zu erwartenden Ionisationsstrom. Vergleichen Sie ihn mit dem Messwert von Aufgabe 2.

Bei der Teilchenstrombestimmung ist der Abstand  $Q_u$ - $HD$  geeignet einzustellen und als Korrektur das obere  $IK$ -Drahtnetz und die Sperrschichtabdeckung des  $HD$  zu berücksichtigen. Dass die Häufigkeit der Zerfälle mit 5,3 MeV im Vergleich zu den übrigen geringer ist, darf bei dieser Aufgabe vernachlässigt werden. Andernfalls müßte das Ergebnis von Aufgabe 5 verwendet werden. Damit der Impulzzähler trotz seiner Ansprechschwelle möglichst auf alle von  $\alpha$ -Teilchen herrührenden Impulse reagiert, also auch auf die kleinen zu niedriger Energie gehörenden, muss am Verstärker ein geeigneter, genügend großer Verstärkungsfaktor eingestellt werden. Rauschen und sonstiger 'Untergrund' sollten aber möglichst keine Zählung auslösen.

**4. Nehmen Sie mit Hilfe von Halbleiterdetektor, Impulsverstärker, Vielkanal-Interface des CASSY – LAB Systems die Spektren der  $\alpha$ -Strahlung in Abhängigkeit vom Abstand  $Q_u$ - $HD$  auf.**

Starten Sie das CASSY Programm und machen Sie sich damit vertraut. Das Bedienungshandbuch des CASSY Systems ist vor Ort vorhanden und liegt auf der Praktikumsseite im Internet in elektronischer Form vor. Zur Durchführung des Versuchs ist die Kenntnis der ersten dreißig Seiten von Nutzen. Diese sollten schon zur Versuchsvorbereitung gelesen werden.

Sehen Sie sich die Verstärkerausgangssignale des Halbleiterdetektors am Oszilloskop an und stellen Sie die Programmparameter im Parameterfenster entsprechend ein. Es empfiehlt sich, dieses Fenster für schnelleres Arbeiten weiterhin offen zu halten. Das Entstehen eines Impulshöhenspektrums mit der Zeit kann am Bildschirm verfolgt werden.

Hinweis: Bitte vergessen Sie nicht, auch Zwischenergebnisse abzuspeichern, um etwaigem Datenverlust vorzubeugen.

**Bestimmen Sie die maximalen Reichweiten für die 5  $\alpha$ -Energien.**

Diesen Teil der Auswertung führen Sie am Besten vor Ort mit den vom CASSY Programm bereitgestellten Werkzeugen durch. Eichen Sie die Spektren in MeV anhand des Spektrums mit dem kürzesten Abstand Qu-HD. Beachten Sie dabei den Energieverlust für die bekannten  $\alpha$ -Anfangsenergien nach der Energieverlustformel. Tragen Sie die gemessenen Energien gegen die korrigierten zurückgelegten Luftwege auf.

Die Messungen sollen vom kürzestmöglichen Abstand Qu-HD aus anfangs in 2,5 mm-, dann in 5 mm-Schritten bis 40 mm durchgeführt werden. Der einfacheren Auswertung wegen sollen alle Spektren bei unveränderter Einstellung der Elektronik aufgenommen werden. Im Gegensatz zu Aufgabe 3 muss hier der Verstärkungsfaktor soweit reduziert werden, dass der Peak zur höchsten vorkommenden  $\alpha$ -Energie noch in den Messbereich des Analysators fällt. Das Kabel zum Elektrometer muss abgezogen werden, um Störsignale zu vermeiden. Vergleichen Sie die aus der Messung folgenden maximalen Reichweiten in Luft mit denen aus der angegebenen Reichweite-Formel berechneten.

**5. Bestimmen Sie aus dem Impulsratenverhältnis der Flächen unterhalb des 7,69 MeV-Peaks und des (5,49 MeV und 5,30 MeV)-Peaks die Zeitspanne, die seit der Abtrennung des Ra-226 für diese Quelle in etwa verstrichen ist.**

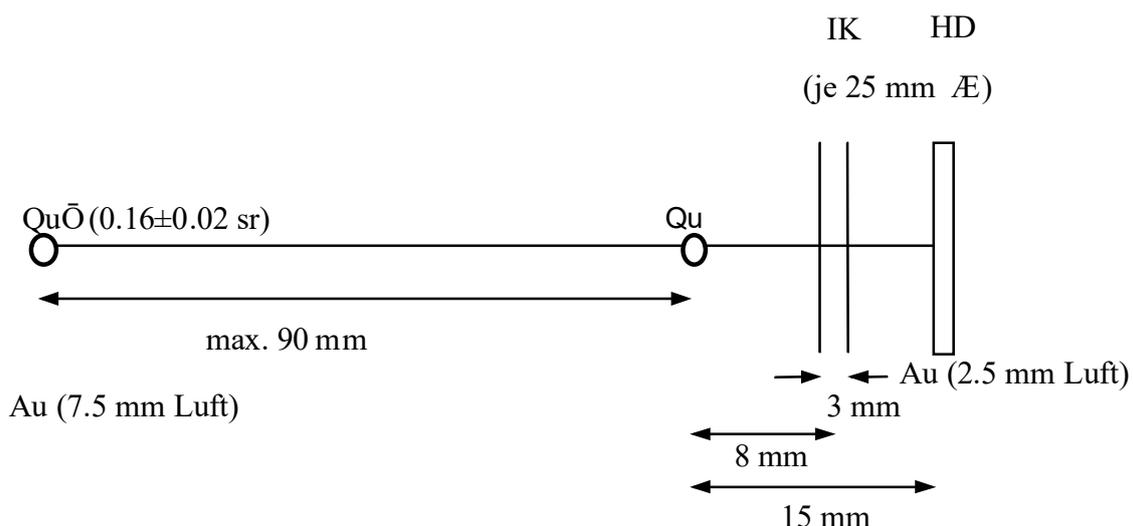
Stellen Sie dazu den minimalen Abstand Qu-HD ein. Zur Bestimmung der Impulsraten variieren Sie die Integrationsgrenzen, um unterschiedliche Datensamples zu erhalten. Die Energieauflösung des Halbleiterdetektors reicht nicht, um die Peaks sauber zu trennen, so dass bei diesem Ergebnis mit erheblichen Unsicherheiten zu rechnen ist.

**Erläuterungen:**

Anordnung von Quelle und Detektoren (vergl. Skizze!)

Die  $\alpha$ -Quelle (Ra-226) und die beiden hintereinander angeordneten Detektoren befinden sich in einem undichten Gefäß. Es besteht kein Druckunterschied gegenüber der Außenluft, aber die Innenluft kann durch Trocknungsmittel sehr trocken gehalten werden, wie es für das Funktionieren der Ionisationskammer (Isolation) und des Halbleiterdetektors (Isolation und Lebensdauer) nötig ist. Außerdem wird der Halbleiterdetektor vor Licht geschützt, damit seine hier nicht erwünschte Eigenschaft 'Photodiode' nicht stört.

**Skizze: Experimentiereinrichtung**



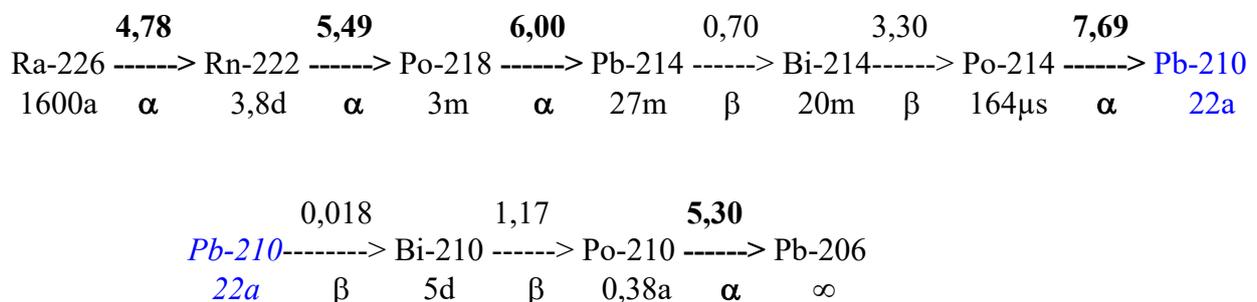
Der Abstand zwischen  $\alpha$ -Quelle und den Detektoren kann, ausgehend von einem Minimalabstand, mithilfe eines Spindeltriebes um bis zu 90 mm vergrößert werden. Halbe Millimeter (entsprechend einer halben Umdrehung des Einstellknopfes) können eingestellt werden. Bei Minimaleinstellung betragen die Abstände von der Oberfläche der dünnen  $\alpha$ -Präparatschicht bis zum 'Wirkungszentrum' der Ionisationskammer 8 mm, bis zur Oberfläche des Halbleiterdetektors 15 mm.

**Die Ionisationskammer** besteht aus zwei parallelen kreisförmigen Drahtnetzen von 25 mm Durchmesser in 3 mm Abstand. Als Wirkungszentrum (geschätzt!) wird eine Ebene bezeichnet, die von der Quelle aus gesehen 1 mm innerhalb der Kammer liegt. Die Transmission durch ein Drahtnetz ist optisch und praktisch genauso für  $\alpha$ -Teilchen 0,67. Beide Netze sind gegeneinander verdreht montiert, und die Netzstruktur ist nicht sehr regelmäßig. Damit ergibt sich für beide Netze gemeinsam eine Transmission von etwa  $0,67^2$ . Um die in der Kammer gebildeten Ionen vor ihrer Rekombination möglichst alle zu den Platten zu transportieren, muß an der Kammer eine genügend hohe Spannung anliegen. Das dem Halbleiterdetektor zugewandte Netz ist über den Eingangswiderstand des angeschlossenen Elektrometers geerdet. Die Gegenelektrode (rote Bananenbuchse) wird an den Pluspol einer Spannungsquelle (Netzgerät mit variabler Ausgangsspannung bis etwa 40 V oder an 24 V Festspannung) angeschlossen, deren Minuspol geerdet ist. Für die Auswertung wird die Angabe benötigt, dass zur Erzeugung eines Ionenpaares in Luft im Mittel die Energie 35,5 eV nötig ist.

**Der Halbleiterdetektor** ist ein ionenimplantierter Siliziumdetektor, eine großflächige (eff. Durchmesser 19.5 mm) Silizium-Diode, bei der sich die Sperrschicht unmittelbar unter der Oberfläche befindet. Die Diode wird in Sperrrichtung betrieben. Die Dicke der Sperrschicht ist spannungsabhängig und beträgt  $\sim 100 \mu\text{m}$ . Der Sperrstrom ist äußerst gering, ( $< 1 \mu\text{A}$ ). Treten ionisierende Teilchen in die Sperrschicht ein, so entstehen dort Ladungsträgerpaare, deren Anzahl proportional zum Energieverlust der ionisierenden Teilchen in der Sperrschicht ist. Im benutzten Detektor wird  $\alpha$ -Strahlung bis zu etwa 12 MeV vollständig in der Sperrschicht absorbiert,  $\beta$ -Strahlung nur bis etwa 100 keV. Das resultierende Stromsignal wird elektronisch über die Signaldauer integriert und verstärkt und ergibt schließlich einen Spannungsimpuls, dessen Amplitude proportional zur Energie des absorbierten  $\alpha$ -Teilchens ist. Die Spannungsimpulse werden über das Vielkanal-Interface des CASSY – LAB Systems erfasst und in ein Spektrum von 256 Kanälen sortiert. Die Oberfläche des Detektors ist mit einer dünnen Goldschicht belegt, die als Kontaktierung und als Schutz dient. Die gesamte Abdeckung der nachweisempfindlichen Sperrschicht entspricht bezüglich des  $\alpha$ -Energieverlustes einer Luftschicht von etwa 2,5 mm Dicke. Der Vorteil eines Halbleiterdetektors ('Festkörper-Ionisationskammer') gegenüber der Ionisationskammer mit Luft liegt in der viel kleineren Energie, die nötig ist, um ein Ladungsträgerpaar zu erzeugen, nämlich nur 3,7 eV (Si) verglichen mit 35,5 eV (Luft). Die Anzahl der Ladungsträgerpaare ist entsprechend größer und der statistische Fehler kleiner. Dabei kann der Halbleiterdetektor noch sehr dünn sein, denn die Anzahldichte der Elektronen ist bei ihm ja sehr viel größer als in Luft. Nachteilig ist, dass man nicht beliebig dicke und beliebig großflächige Sperrschichten herstellen kann.

**Die  $\alpha$ -Quelle ist ein Ra-226-Präparat**, das auch die Folgeprodukte seiner radioaktiven Zerfallsreihe enthält. Die eigentliche Präparatschicht ist zum Schutz gegen Verlust radioaktiver Substanz mit einer Goldschicht bedeckt, die bezüglich des  $\alpha$ -Energieverlustes einer Luftschicht von etwa 7,5 mm Dicke entspricht. Die Quelle ist mit einer Blende versehen, die den Raumwinkel der austretenden  $\alpha$ -Strahlung auf  $0,16 \pm 0,02$  begrenzt. Die Präparatstärke, die jedoch wegen des begrenzten Austrittskegels größtenteils unwirksam bleibt, beträgt etwa 300000 Bq.

In einer Skizze ist die U-238-Zerfallsreihe ab Ra-226, jedoch ohne hier unwesentliche Verzweigungen, dargestellt. Angegeben sind jeweils die Art des Zerfalls, die Zerfallsenergie und die Halbwertszeit.



Man sieht, dass die Zerfälle mit 4,78; 5,49; 6,00 und 7,69 MeV praktisch gleich häufig sind, weil die beteiligten Halbwertszeiten relativ kurz sind. Anders ist das bei dem  $\alpha$ -Zerfall mit 5,30 MeV, der erst nach einem Zerfall mit der langen Halbwertszeit 22 a (entsprechend einer Zerfallskonstante  $\lambda = \ln 2 / T_H = 0,031 \text{ a}^{-1}$ ) folgt. Er ist um den Faktor  $1 - \exp(-\lambda t)$  seltener gegen jeden der übrigen Zerfälle (Näherung!). Die 5,30 MeV und die 5,49 MeV Strahlung werden von der Apparatur nicht aufgelöst. Sie ergeben im Spektrum eine verbreiterte Linie. Durch Vergleich der Fläche unter dieser und unter einer anderen, z.B. der 7,69 MeV-Linie

(die statistisch verbreiterten Linien nennt man auch 'Peaks') kann man auf die Zeit  $t$  schließen, die seit der Herstellung des Ra-Präparats (ohne Po-210 und Pb-206) vergangen ist.

**Ein elektronisches Elektrometer** wird für die Messung des Ionisationsstromes (Größenordnung  $\mu\text{A}$ ) benutzt. Es enthält einen Verstärker mit sehr großem Eingangswiderstand, daher der Name Elektrometer. Die Zuleitung erfolgt über ein Koaxialkabel, um Störungen durch elektrische Felder abzuschirmen. Eine Bewegung des Kabels führt zu kleinen Kapazitätsänderungen, die Umladungen und dadurch heftige Ausschläge am Anzeigeelement zur Folge haben. Die Einstellzeit des Elektrometers beträgt einige Sekunden. Das entspricht der Zeitkonstante aus Eingangswiderstand (Größenordnung  $T\Omega$ ) und Eingangskapazität (Größenordnung  $10\text{ pF}$ ).

**Der Vielkanal-Impulshöhenanalysator (CASSY)** zählt in jedem seiner 256/512/1024 Kanäle diejenigen Impulse, deren Impulshöhe (Impulsspannung im Maximum) dem betreffenden Kanal zugeordnet ist. Die Kanalnummer ist zur Impulshöhe proportional. Einer befriedigenden Auflösung wegen sollten die vorkommenden Impulshöhen den Analysatorbereich ausnutzen. Entsprechend ist beim minimalen Abstand Quelle-Detektor die Verstärkung beim vorgeschalteten Impulshöhenverstärker einzustellen. Die richtige Einstellung wird bei oszilloskopischer Beobachtung der Verstärker-Ausgangsimpulse grob voreingestellt und anschließend anhand von Probe-Impulshöhenspektren fein justiert.

Sehr kleine Impulse kommen besonders häufig vor. Sie stammen von Elektronen, welche die Quelle auch liefert, und die im Detektor wesentlich weniger Ladungsträgerpaare erzeugen. Außerdem tragen Störungen (z.B. Rauschen) zu kleinen Signalen bei. Wählen Sie daher die  $y$ -Skala für die Spektrumsdarstellung so, dass Sie die interessierenden  $\alpha$ -Linien beobachten können.

**Der Energieverlust geladener Teilchen** beim Durchgang durch Materie erfolgt über Coulomb-Wechselwirkung mit den Elektronen. Solange die Teilchengeschwindigkeit klein ist gegen die Lichtgeschwindigkeit, aber nicht sehr klein ( $E > 3b$ ), gilt  $-(dE/dx) \cong (a/E) \cdot \ln(E/b)$ . Darin ist  $-dE$  der Energieverlust längs der Strecke  $dx$ .  $E$  ist die Teilchenenergie. Die Konstante  $a$  ist proportional zur Anzahl der Elektronen in der Materie und proportional zum Quadrat der Ladungszahl der Teilchen ( $Z^2=4$  für  $\alpha$ -Teilchen). Die Konstante  $b$  ist proportional zur mittleren Ionisierungsenergie der Materie.

Für Luft unter Normaldruck,  $\alpha$ -Teilchen und den interessierenden Energiebereich (1 bis 8 MeV) gilt recht gut  $-(dE/dx) = (1,75/E) \cdot \ln(E/0,33)$ . Dabei sind Längen in cm, Energien in MeV einzusetzen. Es ist leider nicht möglich, durch Integration zu einem einfachen Ausdruck für den Orts-Energie-Zusammenhang  $x(E)$  oder  $E(x)$  zu kommen. Genauso wenig erhält man eine Formel für die Reichweite  $x(0)$ . Numerische Integration mit grober Schrittweite liefert aber sehr schnell ausreichend genaue Ergebnisse. Die Verwendung eines Rechners ist empfehlenswert. Eine empirische Reichweiteformel, die mit der angegebenen  $dE/dx$ -Formel verträglich ist, lautet:

$$R = x(0) = 0,318 \cdot E^{1,5}. \text{ Auch hier sind MeV und cm als Einheiten vorgesehen.}$$

### Literatur:

Rietzler, Kopitzki: *Kernphysikalisches Praktikum*

Walcher: *Praktikum der Physik*

Knoll: *Radiation Detection and Measurement*, Abschnitte 'Counting Statistics', 'Geiger-Mueller Counters'

Gerthsen, Kneser, Vogel: *Physik*, Kap. 'Kerne und Elementarteilchen'

Schpolski: *Atomphysik*, Kap. 'Die Radioaktivität'

Meyer-Kuckuk: *Kernphysik*, Kap. zu den Zerfallsgesetzen