

# IIA6

Modul Atom-/Kernphysik

## Alpha-Energie

Ziel dieses Experiments ist es, verschiedenen Eigenschaften der  $\alpha$ -Strahlung wie Energiespektrum und Reichweite zu untersuchen. Des weiteren soll der Zusammenhang zwischen Energie, Kernladungszahl und Zerfallskonstante (Geiger-Nuttall-Gesetz) überprüft werden.



## **Versuch IIA6 - Alpha-Energie**

Ziel dieses Experiments ist es, verschiedenen Eigenschaften der  $\alpha$ -Strahlung wie Energiespektrum und Reichweite zu untersuchen. Des weiteren soll der Zusammenhang zwischen Energie, Kernladungszahl und Zerfallskonstante (Geiger-Nuttall-Gesetz) überprüft werden.

## 1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Erkläre den  $\alpha$ -Zerfall in eigenen Worten.
- Erkläre die Begriffe Zerfalls Rate und Halbwätszeit.
- Was beschreibt die Bethe-Bloch-Formel und von welchen Parametern hängt sie ab?
- Wie können  $\alpha$ -Teilchen abgeschirmt werden?
- Beim Alpha-Detektor handelt es sich um einen Halbleiterdetektor. Erkläre wie er funktioniert.

## 1.2 Theorie

### 1.2.1 $\alpha$ -Strahlung

Radioaktive Strahlung kann grundsätzlich drei verschiedene Formen annehmen. In diesem Versuch geht es um  $\alpha$ -Strahlung. Sie beschreibt keine Strahlung im elektromagnetischen Sinne, sondern die Emission von Teilchen. Genauer gesagt handelt es sich bei  $\alpha$ -Teilchen um ionisierte Heliumatome; also um Heliumkerne. Ein solcher Kern ist ein sehr stark gebundenes System aus zwei Protonen und zwei Neutronen.  $\alpha$ -Zerfälle können in der folgenden Form geschrieben werden:

$$(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A - 4) + \alpha \quad (1.1)$$

Dabei bezeichnet  $Z$  die Kernladungszahl (Anzahl Protonen) und  $A$  die Massenzahl (Summe der Neutronen und Protonen) des Mutterkerns.

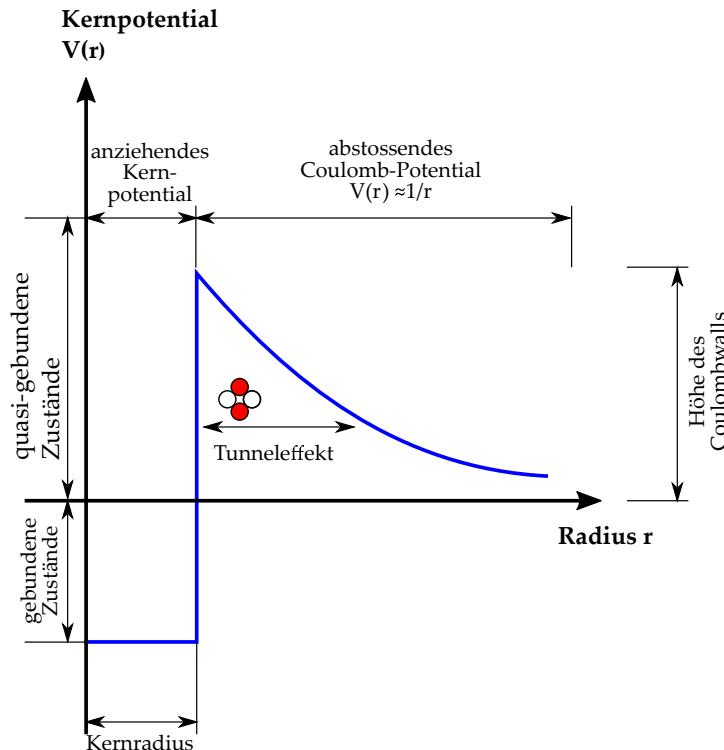


Abbildung 1.1: Verlauf des Kernpotentials mit Coulombbarriere

Die einzelnen Nukleonen (Protonen und Neutronen) werden in einem Kern durch die kurzreichweitige Starke Kraft (auch Kernkraft genannt) zusammengehalten. Die Elektromagnetische Kraft hingegen erzeugt eine gegenseitige Abstossung der Protonen. Ein Kern ist stabil, wenn die Elektromagnetische Kraft von der Kernkraft kompensiert werden kann. In den meisten stabilen Kernen befinden sich etwa gleich viele Neutronen wie Protonen. Die Elektromagnetische Kraft wirkt zwischen allen Protonen im Kern aber die Kernkraft hat eine so kurze Reichweite, dass sie nur zwischen den unmittelbaren Nachbar-Nukleonen wirkt. Dies führt jedoch dazu, dass schwere Kerne (große Kernladungszahl  $Z$ ) mehr Neutronen als Protonen besitzen. Dieses Ungleichgewicht bewirkt, dass sich im Inneren des Mutterkerns das energetisch günstigere System des Heliumkerns bilden kann. Uran ist mit der Kernladungszahl  $Z = 92$  das schwerste natürlich vorkommende Element.

Formiert sich also ein Heliumkern im Innern des Mutterkerns, so muss er eine bestimmte kinetische Energie besitzen, um das anziehende Kerpotential zu verlassen und ins abstossende Coulombpotential zu gelangen. Klassisch gesehen haben die  $\alpha$ -Teilchen nicht genug kinetische Energie um diese Potentialbarriere zu überwinden. Dass es trotzdem möglich ist, kann mit dem quantenmechanischen Tunneleffekt erklärt werden. Dieser besagt vereinfacht ausgedrückt, dass das  $\alpha$ -Teilchen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit diese Potentialbarriere durchbrechen kann. Das heißt, die klassische Energieerhaltung darf kurzfristig verletzt werden. Dies wird durch die bekannte Heisenberg'sche Unschärferelation beschrieben. Wie gross die Wahrscheinlichkeit für das Tunneln ist, hängt von der kinetischen Energie des  $\alpha$ -Teilchens ab. Je höher die Energie, desto grösser die Wahrscheinlichkeit. Aus diesem Grund haben  $\alpha$ -Teilchen ein diskretes Energiespektrum. Je nach Quelle zwischen 4 - 6 MeV. Erreicht ein  $\alpha$ -Teilchen im Mutterkern genügend kinetische Energie, so kann es diesen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit verlassen. Diese Tunnelwahrscheinlichkeit ist proportional zur Zerfallsrate  $\lambda$  und somit auch zur Halbwertszeit.

Dass ein Zusammenhang zwischen der Energie und der Zerfallsrate von  $\alpha$ -Strahlern besteht, wurde erstmals 1911 von Hans Geiger und John Mitchell Nuttall beschrieben. Sie formulierten den Zusammenhang mit folgender empirischen Formel:

$$\ln(\lambda) = -a \cdot \frac{Z}{\sqrt{E}} + b \quad (1.2)$$

Wobei  $a$  und  $b$  zu bestimmende Parameter sind. Quantenmechanisch wurde der  $\alpha$ -Zerfall erstmals von George Gamow und Walter Gordon in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts erklärt.

### 1.2.2 Wechselwirkung von $\alpha$ -Teilchen mit Materie

Alphateilchen haben auf Grund ihrer relativ grossen Masse und Ladung eine sehr kurze Reichweite beim Eindringen in Materie. In Luft beträgt sie nur wenige Zentimeter. Der grösste Energieverlust erfährt das  $\alpha$ -Teilchen auf Grund inelastischer Stösse mit den Elektronen der umgebenden Materie. Der Zusammenhang zwischen Energieverlust und Eindringtiefe wird durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben. Der Energieverlust ist jedoch nicht konstant, sondern hängt von der momentanen kinetischen Energie des Teilchens ab. Mit abnehmender kinetischer Energie deponieren die  $\alpha$ -Teilchen immer mehr Energie, bis sie schliesslich ein Maximum an Energie verlieren und zum Stillstand kommen (siehe Abb 1.2). Danach fangen sie wenn möglich freie Elektronen ein und werden somit zu Helium Atomen. Das Maximum des Energieverlusts wird Bragg-Peak genannt (nach William Henry Bragg).  $\alpha$ -Teilchen (und auch schwerere Ionen) haben einen sehr schmalen Bragg-Peak. Das heißt sie können fast ihre ganze kinetische Energie an einem Ort deponieren. Diese Eigenschaft wird bei der Tumorbekämpfung verwendet. Dabei wird die Energie der Strahlteilchen so eingestellt, dass sie die

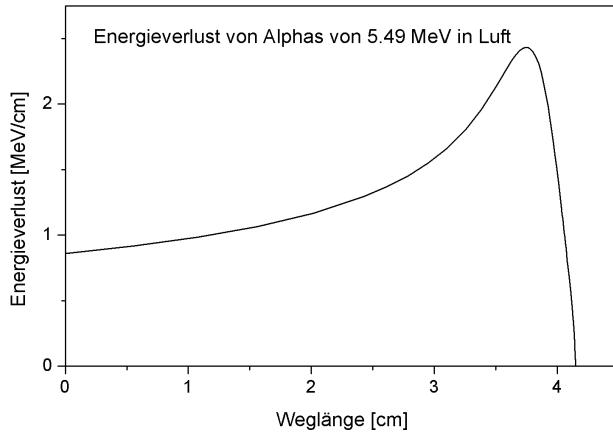


Abbildung 1.2: Bragg-Kurve von  $\alpha$ -Teilchen in Luft

meiste Energie im Tumorgewebe verlieren ohne das darüber liegende Gewebe unnötig zu belasten.

## 1.3 Experiment

### 1.3.1 Versuchszubehör

Komponente	Anzahl
Vielkanalanalysator	1
Vorverstärker für Alpha-Detektor	1
Alpha-Detektor	1
Aufbauplatte mit Markierungen	1
Detektorhalter auf Haftmagnet	1
Präparatehalter auf Haftmagnet	1
Abgeschirmtes BNC-Kabel	2
Americium Quelle ( $^{241}_{95}\text{Am}$ )	1
Radium Quelle ( $^{226}_{88}\text{Ra}$ )	1

### 1.3.2 Versuchsaufbau und Justage

1. Verbinde den Vorverstärker mit dem Vielkanalanalysator und dem Alpha-Detektor wie auf Abbildung 1.3 dargestellt. Achte darauf, dass der "Input Select" Schalter auf "Input" und nicht auf "Input ext." gestellt ist.
2. Beim Vorverstärker müssen folgende Einstellungen gemacht werden:
  - Schalter " $\alpha/\beta$ " auf Position " $\alpha$ " stellen. Damit wird der richtige Energiebereich für  $\alpha$ -Teilchen eingestellt.
  - Schalter "Inv." auf Position "Inv." stellen. Damit wird das negative Signal vom Detektor invertiert.
  - Schalter "Bias" auf Position "Int." stellen. Damit wird die Bias-Spannung am Detektor auf 12 V gestellt.

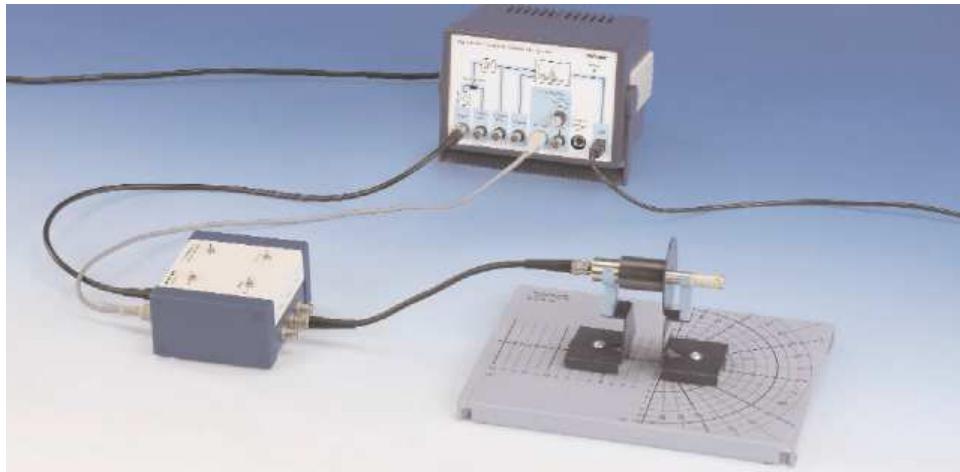


Abbildung 1.3: Schematischer Versuchsaufbau

- Schalter "Bias Int." auf Position "--" stellen. Damit wird die Polarisation der Bias-Spannung eingestellt. Wichtig: Falsche Polarisation kann den Detektor zerstören!!
- 3. Schalte den Vielkanalanalysator ein.

### 1.3.3 Arbeiten mit radioaktiven Quellen

Zur Durchführung des Versuchs brauchst du radioaktiven Quellen. Sie sind aus Sicherheitsgründen in einem Spezialschrank aufbewahrt. Dein/e Assistent/in wird sie dir geben. Nach dem Versuch müssen die Quellen wieder zurück in den Spezialschrank! Wie immer wenn du mit radioaktiven Quellen (auch schwachen) arbeitest, gilt es drei grundlegende Regel zu befolgen:

1. Die Quellen sind mit einer dünnen Gold-Palladium-Schicht. Damit die  $\alpha$ -Teilchen trotzdem austreten können ist sie nur wenige  $\mu\text{m}$  dick. Berühre diese nicht! Auch nicht mit einem Bleistift o.ä.
2. Nie in der Nähe von radioaktiven Quellen essen und trinken (oder rauchen). Gelangten radioaktive Substanzen ins Innere des Körpers können sie ernsthafte Schäden anrichten!
3. Wenn du deine Arbeit mit den Quellen abgeschlossen hast oder eine Pause machst; immer die Hände gut mit Seife waschen.

Wenn du dich an diese Grundregel hältst, droht dir keine Gefahr durch diese Quellen.

### 1.3.4 Durchführung

1. Kalibrierung durchführen:
  - (a) Führe die Radium Quelle bis zum Anschlag in das Detektorröhrchen ein.
  - (b) Starte den Computer und öffne das Programm "measure".
  - (c) Unter "Messgerät" wähle "Vielkanalanalysator" und dann "Einstellungen und Kalibrierung".
  - (d) Wähle "Kalibrierung".
  - (e) Wähle "2-Punkt Kalibrierung".

- (f) Wähle für das Offset 0% und den Verstärkungsfaktor 2.
- (g) Verschiebe die 1. (blaue) Linie an den Anfang des Spektrums; an den Anfang des exponentiell abfallenden Rauschens.
- (h) Wähle für die Energie den Wert 0 keV.
- (i) Verschiebe nun die 2. (grüne) Linie ins Zentrum des letzten markanten Peaks.
- (j) Wähle für die Energie den Wert 7868 keV.
- (k) Klicke auf “Übernehmen” und dann auf “Speichern”.
- (l) Gib einen sinnvollen Namen und eine Beschreibung für deine Kalibrierung an und speichere sie.
2. Nimm ein Spektrum von Americium und von Radium auf:
- (a) Führe die Quelle bis zum Anschlag in das Detektorrörchen ein.
- (b) Klicke auf den Aufnahme-Knopf  und dann “Spektrenaufnahme”.
- (c) Wähle den Verstärkungsfaktor 2 und ein Offset von 2%.
- (d) Bei “X-Datensatz” wähle Energie und für die “Intervallbreite” 50.
- (e) Drücke auf “Reset” und lass deine Messung etwa 10 Minuten laufen.
- (f) Klicke auf “Daten übernehmen”.
- (g) Speichere dein Spektrum ab und wiederhole den Vorgang mit der anderen Probe.
- (h) Tipp: Mit Ctrl-C kannst du dein Spektrum entweder als Zahlenwerte oder als Bild exportieren.
3. Bestimme die Reichweite der  $\alpha$ -Teilchen:
- (a) Befestige die Quelle im Präparatehalter und führe sie bis zum Anschlag ins Detektorrörchen ein.
- (b) Verschiebe sowohl Präparatehalter als auch den Detektorhalter so auf der Aufbauplatte, dass sie sich genau auf einer der Markierungen befinden. Die Quelle soll jetzt immer noch bis zum Anschlag im Detektorrörchen stecken. Die radioaktiven Substanzen befinden sich 7 mm hinter der Vorderkante der Quelle. Diese Kante kann bis auf 1 mm an die Detektoroberfläche heran gebracht werden. Dass heisst, der minimale Abstand vom der Substanz bis zum Detektor beträgt 8 mm.
- (c) Nimm ein Spektrum mit 1000 Counts auf.
- (d) Glätte dein Spektrum  und führe eine Peakanalyse  durch.
- (e) Notiere dir die Positionen der Energiemaxima und den Abstand von Quelle zu Detektor.
- (f) Verschiebe den Detektor um 5 mm bis zur nächsten Markierung und wiederhole die Messung.
- (g) Vergrössere den Abstand so lange bis du keine Impulse mehr im Spektrum sehen kannst. Wenn sich die Quelle nicht mehr im Detektorrörchen befindet, musst du Quelle und Detektor mit einem Tuch abdecken, dass kein Licht deine Messung stört.
- (h) Wiederhole die Messung mit der anderen Quelle.

### 1.3.5 Aufgaben zur Auswertung

#### Zerfallsreihen

Erstelle ein Zerfallsschema von  $^{241}_{95}\text{Am}$  und  $^{226}_{88}\text{Ra}$ . Gib bei  $\alpha$ -Zerfällen die Energie und die Halbwertszeit an. Bei welchem stabilen Isotop enden die Zerfallsreihen? Informationen zu den möglichen Zerfällen findest du z.B unter:

- <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp>
- <http://atom.kaeri.re.kr/nuchart/>

#### Interpretation der Spektren

Interpretiere die aufgenommen Spektren von  $^{241}_{95}\text{Am}$  und  $^{226}_{88}\text{Ra}$ . Welche Peaks sind erkennbar und von welchen Isotopen stammen sie?

Warum ist im Spektrum von  $^{241}_{95}\text{Am}$  nur ein Peak erkennbar?

#### Geiger-Nuttall-Regel

Plotte  $\ln(\lambda)$  gegen  $\frac{Z}{\sqrt{E}}$  der Peaks aus dem  $^{226}_{88}\text{Ra}$  Spektrum.

Lege eine linearen Fit durch deine Messwerte und bestimme  $a$  und  $b$  der Gleichung (1.2).

Plotte jetzt die Peaks aus dem  $^{241}_{95}\text{Am}$  Spektrum dazu. Liegen sie auf dem Fit?

Berechne die Halbwertszeit von  $^{249}_{98}\text{Cf}$  mit  $E_\alpha = 5813.3 \text{ keV}$  und von  $^{238}_{94}\text{Pu}$  mit  $E_\alpha = 5499.03 \text{ keV}$  und vergleiche sie mit Literaturwerten.

#### Reichweite von $\alpha$ -Teilchen

Erstelle für beide Quellen einen Bragg-Plot. Gehe dabei folgendermassen vor:

- Berechne  $\frac{dE}{dx}$  nach folgender Formel:

$$\frac{dE}{dx} \approx \frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{E_i - E_{i+1}}{d_{i+1} - d_i} \quad (1.3)$$

Dabei ist  $E_i$  die Peak-Energie der  $i$ -ten Messung und  $d_i$  der Abstand von Detektor zur Quelle bei der  $i$ -ten Messung. Trage nun die berechneten  $\frac{dE}{dx}$  gegen den Mittelwert des Abstands von  $i$ -ter und  $(i+1)$ -ter Messung auf.

- Trage nun die theoretischen Werte von  $\frac{dE}{dx}$  deiner Messwerte nach der Bethe-Bloch-Formel auf. Die nicht-relativistische Bethe-Bloch-Formel für  $\alpha$ -Teilchen in Luft kann Folgendermassen angenähert werden:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{a}{E[\text{keV}]} \cdot (\ln(b \cdot E[\text{keV}]) - c) \quad (1.4)$$

Dabei gilt:  $a = 1.491 \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \cdot \text{keV} \right]$ ,  $b = 6.35 \cdot 10^{-3} [\text{keV}^{-1}]$  und  $c = 0.1241$ .

Vergleiche die berechneten mit den theoretischen Werten für  $\frac{dE}{dx}$ .

## 1.4 Literatur

- Povh, Rith, Scholz & Zetsche, *Teilchen und Kerne*, Springer
- Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik 3: Kern-, Teilchen- und Astrophysik*, Springer
- William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer