

RADIOAKTIVITÄT

Die Tatsache, dass Atomkerne *radioaktive Strahlung* aussenden können, ist schon seit 1896 (Becquerel) bekannt. Diese „Strahlung“ besteht z.B. aus α -Teilchen (Heliumkerne), β^+ - oder β^- -Teilchen (Positronen oder Elektronen) oder γ -Quanten (hochenergetische elektromagnetische Strahlung). Sie wurde an natürlichen radioaktiven Substanzen wie Uran und Radium entdeckt, die zu den schwersten bekannten Elementen gehören. Heute erzeugt man künstlich eine grosse Zahl von leichteren radioaktiven Kernen bei Kernumwandlungen.

THEORIE

Zwischen den Nukleonen wirken starke anziehende Kräfte sehr kurzer Reichweite (*starke Wechselwirkung*), welche den Kern trotz der abstossenden Coulomb-Kräfte der Protonen zusammenhalten. Trotzdem bilden nur bestimmte Kombinationen von Protonen- und Neutronenzahl einen stabilen Kern. Die beiden Zahlen sind etwa gleich gross, bei schweren Kernen überwiegt die Zahl der Neutronen leicht.

Ein *instabiles Isotop* eines Elementes zerfällt unter Emission von Strahlung entweder direkt oder über einige Zwischenkerne in einen stabilen Kern (normalerweise nicht mehr des gleichen Elements).

Die Zahl der Zerfälle pro Sekunde ist proportional zur Anzahl der aktiven Kerne:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

Die *Zerfallskonstante* λ ist eine für den Zerfall charakteristische Grösse. Für kleine Zeitintervalle ist $\lambda \Delta t$ die Wahrscheinlichkeit, dass ein Kern in diesem Zeitintervall zerfällt.

In gleichen Zeitintervallen ist also die relative Änderung der Zahl aktiver Kerne immer gleich gross. Dieses Verhalten ist charakteristisch für einen exponentiell abnehmenden Vorgang. In der Tat folgt aus für die Zahl aktiver Kerne zur Zeit t :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/T_{1/2}}$$

Die *Halbwertszeit* $T_{1/2}$ des Zerfalls ist durch die Zerfallskonstante bestimmt:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Die Halbwertszeiten verschiedener radioaktiver Elemente umspannen einen Bereich von mehr als 10^9 Jahren bei natürlichen radioaktiven Isotopen bis zu Bruchteilen von Sekunden bei kurzlebigen Zerfallsprodukten.

Die *Aktivität* A einer Quelle gibt an, wie viele Zerfälle pro Sekunde stattfinden: 1 Zerfall/s = 1 Bq (Becquerel). Es gilt die Beziehung

$$A = \lambda N.$$

Häufig gibt man die Aktivität auch in der Einheit Curie (Ci) an: 1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq.

Da man nie weiss, zu welcher Zeit ein bestimmter Kern zerfallen wird, sondern nur eine Wahrscheinlichkeit dafür angeben kann, dass er es in der nächsten Sekunde tun wird, erhält man bei einer Messung der Aktivität einer radioaktiven Probe immer statistische Schwankungen (Diese haben nichts mit Messfehlern zu tun!).

Die *Wahrscheinlichkeit*, dass von N aktiven Kernen im Zeitintervall Δt genau x Kerne zerfallen, ist durch die *binomische Verteilung* gegeben:

$$P_N(x) = \binom{N}{x} p^x q^{N-x}$$

Dabei ist $p = \lambda \Delta t$ die Wahrscheinlichkeit, dass ein Kern im Zeitintervall Δt zerfällt, und $q = 1 - p$ die Gegenwahrscheinlichkeit.

Die Absorption von radioaktiver Strahlung in Materie hängt stark vom verwendeten Material ab. Für α - und β -Strahlung genügt in der Regel eine dünne Schicht, um die Strahlung vollständig abzuschirmen. Bei γ -Strahlung nimmt die Intensität der Strahlung mit der Absorberdicke exponentiell ab. Die *Halbwertsdicke* $d_{1/2}$ hängt vom Material und von der Energie der Strahlung ab.

VERSUCHE

ABLAUF: Es stehen insgesamt neun verschiedene Versuche zur Auswahl. Sie bearbeiten während zweier Praktika mindestens fünf davon, wobei mindestens folgende Vorgaben einzuhalten sind:

- ▶ Nachweis von radioaktiver Strahlung (Demo 1)
- ▶ Zerfallskurve von Radon (Demo 2)
- ▶ Simulation des Zerfallsgesetzes (Versuch 1)
- ▶ eine Aktivitätsmessung (Versuch 2 oder 3)
- ▶ eine statistische Auswertung (Versuche 4 oder 5)
- ▶ ein Versuch zur Abschirmung von radioaktiver Strahlung (Versuch 6 oder 7)

DEMO 1 Nachweis von radioaktiver Strahlung

MATERIAL:

- ▶ Wilson-Kammer, Blaskammer-Aufnahme (CERN)
- ▶ Schautafel: „Messung radioaktiver Strahlung“

VORGEHEN:

- A Beobachten Sie einige Teilchenspuren in der Wilson-Kammer
- B Studieren Sie die Schautafel.

AUFGABE: Erklären Sie, wie ein Geiger-Müller-Zählrohr funktioniert. Beschreiben Sie eine zweite Methode zum Nachweis radioaktiver Strahlung.

DEMO 2 Zerfallskurve von Radon

MATERIAL:

- ▶ Ionisationskammer mit Radongas
- ▶ Elektrometer und $x(t)$ -Schreiber

VORGEHEN: Lassen Sie sich vom Lehrer den Messvorgang erklären. Sie erhalten ein Diagramm, welches die Aktivität des Radons als Funktion der Zeit darstellt.

AUFGABEN:

1. Zeichnen Sie von Hand eine glatte Kurve durch die Messwerte im Diagramm. Bestimmen Sie die Halbwertszeit von Radon 220.
2. Um welchen Faktor sinkt die radioaktive Substanzmenge in zehn Halbwertszeiten?

VERSUCH 1 Simulation des Zerfallsgesetzes

MATERIAL:

- ▶ Würfel

VORGEHEN:

- A Würfeln Sie zu Beginn mit allen Würfeln. Lesen Sie alle Würfel mit Augenzahl Sechs („zerfallene Kerne“) heraus. Notieren Sie die Anzahl der herausgelesenen Würfel.
- B Wiederholen Sie den Vorgang mit den verbleibenden Würfeln so lange, bis noch höchstens drei Würfel „aktiv“ sind.

AUFGABEN:

1. Stellen Sie die Anzahl zerfallener und noch aktiver Kerne als Funktion Zeitschritts (d.h. Wurfs) graphisch dar. Bestimmen Sie aus diesem Diagramm die Halbwertszeit für den „Würfelzerfall“.
2. Zeichnen Sie den Logarithmus der Zahl der noch aktiven Kerne als Funktion des Zeitschritts in einem Diagramm ein.
3. Passen Sie in das Diagramm eine Gerade ein und bestimmen Sie deren Steigung und Achsenabschnitt. Welche physikalische Bedeutung haben diese beiden Parameter. Berechnen Sie daraus die Halbwertszeit für den „Würfelzerfall“.

VERSUCH 2 Natürliche Radioaktivität

- MATERIAL:**
- ▶ Geiger-Müller-Zählrohr
 - ▶ natürliche radioaktive Quellen (Gneis, Kaliumchlorid, alte Armbanduhr, ...), Natrium 22
- VORGEHEN:**
- A Messen Sie mit dem Geiger-Müller-Zählrohr mindestens zweimal während 100 s die Untergrundstrahlung, d.h. die Strahlung, die ohne Anwesenheit einer bestimmten Quelle vorhanden ist.
 - B Platzieren Sie eine natürliche Quelle ca. 30 cm vor dem Zählrohrfenster. Messen Sie während 100 s die vom Zählrohr registrierten Zerfälle. Wiederholen Sie die Messung mit zwei weiteren natürlichen Quellen
 - C Führen Sie die Messung mit der Natriumquelle durch. Entfernen Sie vor der Messung die Schutzkappe und setzen Sie diese unmittelbar nach der Messung wieder auf.
- AUFGABEN:**
1. Überlegen Sie, woher die Untergrundstrahlung stammen kann.
 2. Berechnen Sie die Beiträge der verschiedenen Strahlungsquellen an die Zählrate, d.h. die Differenz zwischen der gesamten Zählrate und der Untergrundstrahlung.
 3. Das Zählrohr erfasst nur einen Teil der von der Quelle abgegebenen Strahlung. Die Aktivität der Quelle können Sie berechnen, indem Sie von der Fläche des Zählrohrfensters auf die gesamte von der Strahlung durchsetzte Fläche in diesem Abstand (Kugeloberfläche) hochrechnen. Bestimmen Sie so die Aktivitäten der verschiedenen Quellen. Geben Sie das Resultat in den Einheiten Bq und Ci an.
 4. Berechnen Sie für die Natriumquelle die Zahl der aktiven Kerne aus der gemessenen Aktivität und der Halbwertszeit von Na-22.
 5. Vergleichen Sie die Aktivitäten der verschiedenen Quellen.

VERSUCH 3 Messung der radioaktiven Substanzmenge

- MATERIAL:**
- ▶ Geiger-Müller-Zählrohr
 - ▶ Strontium 90
- VORGEHEN:**
- A Messen Sie mit dem Geiger-Müller-Zählrohr mindestens zweimal während 100 s die Untergrundstrahlung, d.h. die Strahlung, die ohne Anwesenheit einer bestimmten Quelle vorhanden ist.
 - B Platzieren Sie die Quelle ca. 30 cm vor dem Zählrohrfenster. Entfernen Sie die Schutzkappe. Messen Sie die vom Zählrohr erfasste Aktivität (mindestens 500 Ereignisse). Setzen Sie die Schutzkappe unmittelbar nach der Messung wieder auf.
- AUFGABEN:**
1. Berechnen Sie die Aktivität der Quelle wie bei Versuch 5, Aufgaben 2 und 3.
 2. Berechnen Sie aus der Halbwertszeit von Sr 90 die Zerfallskonstante. Zusammen mit der Aktivität der Quelle können Sie daraus die Zahl der noch vorhandenen Kerne bestimmen. Berechnen Sie daraus die Masse der aktiven Probe.
 3. Welche Annahmen müssen erfüllt sein, damit die abgeschätzte Masse richtig ist? Ist die tatsächliche Aktivität der Quelle eher grösser oder kleiner?

VERSUCH 4 Binomialverteilung

- MATERIAL:**
- ▶ Würfel
- VORGEHEN:**
- Würfeln Sie 20 Mal mit 24 Würfeln („aktive Kerne“). Notieren Sie jedes Mal die Zahl der Würfel mit Augenzahl Sechs („Zerfälle“).
- AUFGABEN:**
1. Bestimmen Sie den Mittelwert und den Wert maximaler Häufigkeit aus ihren Messwerten. Vergleichen Sie die Werte mit dem Erwartungswert.
 2. Erstellen Sie ein Histogramm für die Häufigkeit der Anzahl Sechser.
 3. Berechnen Sie für jede Anzahl Sechser die theoretische Häufigkeit mit der binomischen Verteilung. Zeichnen Sie die entsprechenden Balken im Histogramm ein.

VERSUCH 5 Streuung der Zerfallszahlen

MATERIAL: ▶ Geiger-Müller-Zählrohr
▶ Americium 241

VORGEHEN: Platzieren Sie die Quelle unmittelbar vor dem Zählrohr. Messen Sie 50 Mal während jeweils 5 s die Zahl der Zerfälle. Messen Sie anschliessend 25 Mal während jeweils 10 s.

AUFGABEN: 1. Vergleichen Sie für die beiden Messungen Erwartungswert, Mittelwert und Wert maximaler Häufigkeit miteinander.
2. Zeichnen Sie für die beiden Messreihen je ein Histogramm, d.h. ein Diagramm, welches für jede Anzahl von Zerfällen angibt, wie oft diese erzielt wurde.
3. Ein Mass für die Streuung der Zählraten ist die Standardabweichung der Messwerte. Die Breite des Bereichs um den Erwartungswert mit $2/3$ aller Messwerte entspricht zwei Standardabweichungen. Bestimmen Sie die Streuung für die beiden Messreihen. In welchem Fall ist die absolute, in welchem die relative Streuung kleiner?

VERSUCH 8 Abschirmung von Strontium 90

MATERIAL: ▶ Geiger-Müller-Zählrohr
▶ Strontium 90

VORGEHEN: A Messen Sie zunächst während 100 s die Untergrundstrahlung.
B Platzieren Sie die Quelle etwa 15 cm vor dem Zählrohr.
C Bestimmen Sie für verschiedene Materialien (Holz, Plexiglas, Blei, ...) die Schichtdicke, bei welcher die Strahlung der Quelle vollständig absorbiert wird, d.h. bei welcher die Zahl der vom Zählrohr erfassten Ereignisse pro Sekunde kleiner ist als bei der Messung für die Untergrundstrahlung allein.

AUFGABE: 1. Suchen Sie in geeigneten Quellen Informationen zur Absorption von α - und β -Strahlung in Materie. Fassen Sie die wichtigsten Erkenntnisse kurz zusammen.
2. Ordnen Sie die untersuchten Materialien nach zunehmender Schutzwirkung. Stimmt die Reihenfolge mit Ihren Erwartungen überein? Begründen Sie dies kurz.

VERSUCH 9 Abschirmung von Cäsium 137

MATERIAL: ▶ Geiger-Müller-Zählrohr
▶ Cäsium 137

VORGEHEN: A Messen Sie zunächst während 100 s die Untergrundstrahlung.
B Platzieren Sie die Quelle etwa 15 cm vor dem Zählrohr.
C Messen Sie die Zählrate zunächst ohne Abschirmung. Wiederholen Sie die Messung für mindestens fünf verschieden dicke Bleiplatten.

AUFGABEN: 1. Stellen Sie in einem Diagramm die Zählrate als Funktion der Schichtdicke dar.
2. Wie interpretieren Sie das deutliche Absinken der gemessenen Ereignisse bei kleiner Schichtdicke? Welche Strahlungsart kommt durch die Abschirmung noch durch?
3. Bestimmen Sie die Halbwertsdicke für die γ -Strahlung aus der graphischen Darstellung.
4. Wie dick muss eine Bleiabschirmung sein, damit nur noch 1 % der γ -Strahlung von Cäsium 137 durch kommt?

BEDINGUNGEN: Falls Sie einen Bericht schreiben, geben Sie diesen mit der Auswertung zu den beiden Demonstrationen und zu mindestens zwei weiteren Versuchen ab. Für eine Auswertung ohne Bericht bearbeiten Sie die Aufgaben zu mindestens zwei Versuchen.

Abgabetermin ist Montag, 24. Januar 2011.