

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.

Ziel

- Sie sollen in diesem Praktikum radioaktive Substanzen und "radioaktive" Strahlung kennenlernen sowie etwas über die Gesetze des radioaktiven Zerfalls und seine Statistik erfahren.

Grundlagen

Zwischen den Nukleonen (Protonen und Neutronen) 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.

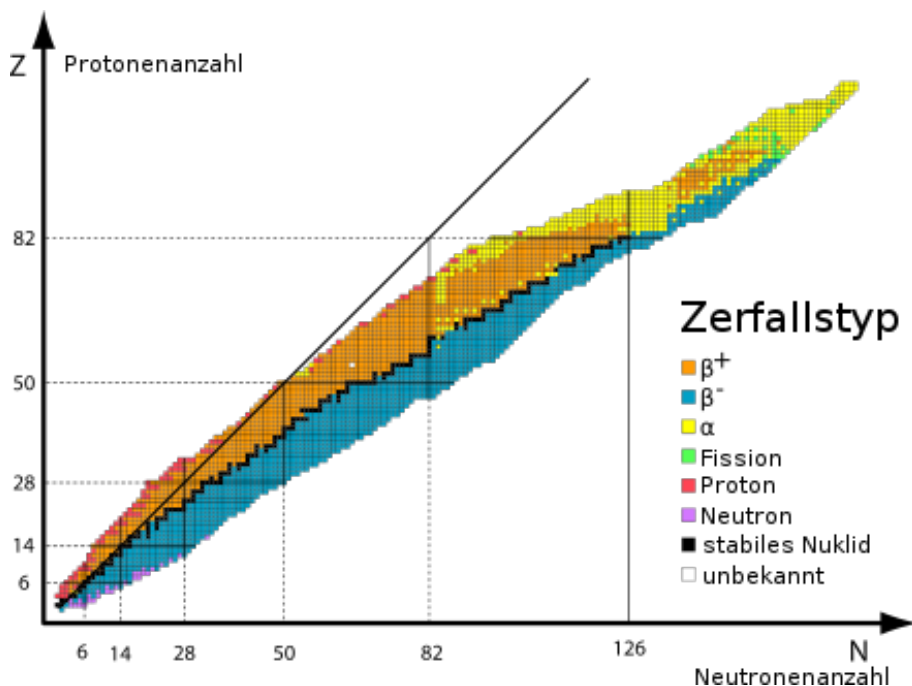


Figure 1: Eine Nuklidkarte ist eine grafische Darstellung aller bekannten Nuklide (Atomsorten). Farblich gezeichnete Nuklide sind instabil, schwarz gezeichnete stabil. Die diagonale Gerade zeigt die Positionen von Nukliden mit gleich vielen Protonen und Neutronen. Man erkennt, dass Elemente mit mehr als 20 Protonen mehr Neutronen als Protonen benötigen, um stabil zu sein.

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:

$$\Delta N = -\lambda \cdot N \cdot \Delta t \tag{1}$$

Die Zerfallskonstante λ ist eine für den Zerfall charakteristische Grösse. Für kleine Zeitintervalle ist 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 (1) für die Zahl aktiver Kerne zur Zeit t :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \tag{2}$$

Die Halbwertszeit $T_{1/2}$ ist diejenige Zeitspanne, in welcher die Zahl der vorhandenen Kerne um die Hälfte abnimmt: $N(t = T_{1/2}) = N_0/2$.

Die Halbwertszeit des Zerfalls ist durch die Zerfallskonstante bestimmt:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3)$$

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 in der Probe stattfinden. Es gilt:

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\frac{dN}{dt} \quad (4)$$

Die Einheit beträgt: $[A] = 1 \text{ Zerfall/s} = 1 \text{ Bq}$ (Becquerel). Die Aktivität wird manchmal in der Einheit Curie (Ci) ($1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$) gegeben.

Die Aktivität einer Probe ist proportional zur Zahl der Kerne:

$$A = \lambda \cdot N \quad (5)$$

Die Zählrate Z ist gleich der Anzahl Impulse pro Zeit, die ein Messgerät registriert. Die Einheit beträgt: $[Z] = \text{imp/s}$. Die Zählrate ist proportional zur Aktivität. Die Zählrate ist normalerweise kleiner als die Aktivität, weil nicht alle Strahlung registriert wird und das Zählrohr einen begrenzten Wirkungsgrad hat.

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:

$$P_N(x) = \binom{N}{x} \cdot p^x \cdot q^{N-x} \quad (6)$$

Dabei ist $p = \lambda \cdot \Delta t$ die Wahrscheinlichkeit, dass ein Kern im Zeitintervall Δt zerfällt, und $q = 1 - p$ die Gegenwahrscheinlichkeit. Für schwache Quellen kann die binomische Verteilung sehr gut durch die Poissonverteilung, unter gewissen Bedingungen auch durch die Normalverteilung angenähert werden (vgl. FoTa).

$$P(x) = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

mit μ der Mittelwert (Erwartungswert), und σ die Standardabweichung (beschreibt die Breite der Normalverteilung). Im Intervall der Abweichung vom Mittelwert sind 68.27% aller Messwerte zu finden.

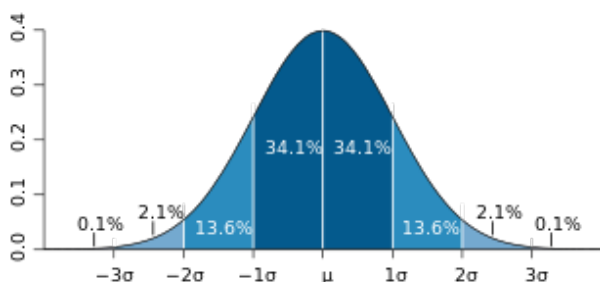


Figure 2: Normalverteilung: Intervalle um μ bei der Normalverteilung

Literatur zum Thema Radioaktivität

- Duden Physik Abitur, Abschnitt 7.2.1 "Atomkerne, Radioaktivität und radioaktive Strahlung"
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Radioaktivität>
- <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/kernphysik-grundlagen>
- <http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/service/018basiswissen.pdf>

Zum mitnehmen

Taschenrechner, FoTa, eventuell Laptop.

Durchführung

Sie bearbeiten während zweier Praktika mindestens die folgende Versuche:

- zwei Versuche zum Zerfallsgesetz (Versuch 1 und 2)
- zwei statistische Auswertungen (Versuche 3 und 4)
- eine Aktivitätsmessung (Versuch 5)

Dazu sind noch zwei zusätzliche Versuche, falls Zeit noch vorhanden ist.

Versuch 1: Zerfallskurve von Radon (Messung mit Lehrer)

Material Ionisationskammer mit Radongas, Elektrometer und Computer mit Interface.

Vorgehen Mit dem Gummiball wird etwas Luft durch die Emanationsprobe (Thoriumsalm) geblasen werden, so dass daraus etwas Radon (gasförmig, alphastrahler) in die Ionisationskammer¹ gelangt. Mit einem Elektrometer wird das Signal verstärkt und vom Computer gelesen. Wir messen den Zerfall von Radon in der Ionisationskammer. Sie erhalten ein Diagramm, welches die Aktivität des Radons als Funktion der Zeit darstellt.

Aufgaben

1. Importieren Sie die Daten für die Zerfallskurve (http://kr.perihel.ch/Material/Praktikum/Anleitungen/Radon_data.txt) in Excel.
2. Stellen Sie die Messwerte in einer graphischen Darstellung (mit gut angeschriebenen Achsen) dar.
3. Bestimmen Sie die Halbwertszeit von Radon. Vergleichen Sie den Mittelwert mit den Werten in der FoTa. Um welches Radonisotop handelt es sich?
4. Stellen Sie auch die logarithmierten Messwerte in einer zweiten graphischen Darstellung gegenüber der Zeit graphisch dar. Welche Kurve ergibt sich? Warum? Bestimmen Sie die Halbwertszeit von Radon mit Hilfe einer lineare Regression.
5. Bestimmen Sie die Zerfallskonstante von Radon 220.
6. Um welchen Faktor sinkt die radioaktive Substanzmenge in zehn Halbwertszeiten?
7. Was bedeutet eine Halbwertszeit von 5 Millionen Jahren? Wie viele Prozent zerfallen dann in einer Million Jahre?

¹Die Ionisationskammer besteht aus einem Platten- oder Zylinderkondensator, zwischen dessen Elektroden sich ein Gas befindet. Dieses Gas hat noch nichts mit dem radioaktiven Radon zu tun! In unserem Fall handelt es sich einfach um Luft unter Atmosphärendruck. An die Elektroden wird eine Gleichspannung gelegt und ein hochempfindlicher Strommesser in den Kreis geschaltet. Wird nun radioaktives Radongas in diese Kammer geblasen so werden die Radonatome anfangen, darin zu zerfallen. Jedes Alphateilchen, das ausgesendet wird, ionisiert etliche Luftmoleküle in der Kammer. Infolge der angelegten Spannung wandern die entstandenen Ladungen (aus den Luftmolekülen herausgeschlagene Elektronen und die zurückbleibenden positiven Ionen) je nach Polarität zur entsprechenden Elektrode. Der von den beweglichen Ladungen erzeugte Strom kann mit Hilfe eines Verstärkers gemessen werden. Jedes Alpha -Teilchen erzeugt auf Grund seiner hohen kinetischen Energie etwa 10^5 Ion/Elektron-Paare durch Ionisation. Siehe <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/radioaktivitaet-einfuehrung/lb/ionisierung-durch-radioaktive-strahlung>

Versuch 2: Simulation des Zerfallsgesetzes

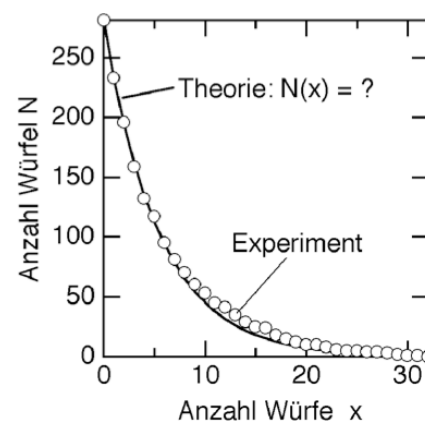
Material viele Würfel

Vorgehen Jeder Würfel steht für einen aktiven Kern, der im nächsten Zeitschritt (Würfeln) mit einer Wahrscheinlichkeit λ zerfällt. Ein Kern gilt als zerfallen, wenn seine Augenzahl eine Sechs ist. Ein Wurf entspricht einem Zeitschritt t .

Zählen Sie die Würfel (N_0). Würfeln Sie zu Beginn mit allen Würfeln zusammen. Lesen Sie alle Würfel mit Augenzahl Sechs heraus (stellen die zerfallene Atomkerne dar). Notieren Sie in einer saubere Tabelle (drei Kolonne) die Wurfnummer x (beginnen bei Null), die Anzahl zerfallende Würfel Z und die Anzahl vom dem Wurf x vorhandenen Würfel $N(x) = N_0 - Z$ (beginnend bei N_0 bei $x = 0$). Wiederholen Sie den Vorgang mit den verbleibenden Würfeln so lange, bis noch höchstens zwei Würfel „aktiv“ sind. Damit die Würfel nicht überall hinfallen wird ein Ring benutzt in den sie hineingeworfen werden. Eine Schachtel wird benutzt um die Würfel zu werfen, eine andere wird zum Zählen der Würfel benutzt und weist deshalb eine Skala auf.

Aufgaben Zeichnen Sie die Zahl der noch aktiven Kerne N (y-Achse) als Funktion des Zeitschrittes x (d.h. Anzahl Würfe) in je einem Diagramm ein.

1. Geben Sie eine Formel an für die Zahl der übrig gebliebenen Würfel als Funktion der Wurfnummer, wenn es zu Beginn N_0 Würfel vorhanden sind.
2. Führen Sie für die Zahl der aktiven Kerne (mit Excel) eine exponentielle Regression (erwartete theoretischer Verlauf) durch und zeichnen Sie die berechnete Kurve in die Messwerte ein. Was bedeuten die Regressionsparameter?
3. Berechnen Sie daraus die Halbwertszeit für den „Würfelzerfall“.
4. Beschreiben, wann besonders viele radioaktive Teilchen zerfallen.
5. Wie oft muss man würfeln, bis die Hälfte der Würfel zerfallen ist?



Versuch 3: 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. Erstellen Sie ein Histogramm Häufigkeit der Anzahl Sechser, d.h. ein Diagramm, welches für jede Anzahl von Sechsen angibt, wie oft diese erzielt wurde.
2. Bestimmen Sie den Mittelwert, und den Wert maximaler Häufigkeit aus ihren Messwerten. Vergleichen Sie die Werte mit dem (theoretischen) Erwartungswert.

Versuch 4: Streuung der Zerfallszahlen

Material Impulszähler mit Geiger-Müller-Zählrohr, radioaktive Quelle (z.B. Americum 241), Halter auf Schiene

Vorgehen Ein einfaches Geiger-Müller Zählrohr² wird benutzt um die Zählrate zu messen. Stellen Sie am Impulszähler Betriebsart "Zeitvorwahl" mit 5 s oder 10 s. Starten Sie die Messung mit dem Knopf "Rückstellung". Das Gerät zeigt alle während einer bestimmte Zeit registrierten Impulse an. Wählen Sie den Abstand Quelle-Zählrohr, dass pro Messung durchschnittlich 30 Impulse gezählt werden. Verändern Sie dann den Abstand nicht mehr. Wiederholen Sie die Messung 100 Mal und notieren Sie sich jeweils die Zahl der Impulse Z .

Aufgaben

1. Zeichnen Sie ein Histogramm³ (siehe Abbildung unten), d.h. ein Diagramm, welches für jede Anzahl von Zerfällen angibt, wie oft diese erzielt wurde.
2. Bestimmen Sie (mit Excel) den Mittelwert μ und die Standardabweichung σ ⁴. Ein Maß für die Streuung der Zählraten ist die Standardabweichung σ der Messwerte. Die Breite des Bereichs um den Erwartungswert mit $2/3$ aller Messwerte entspricht zwei Standardabweichungen.
3. Zeichnen Sie (eventuell von Hand) in dasselbe Diagramm eine Gauss'sche Normalverteilung (Glockenkurve) mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ .

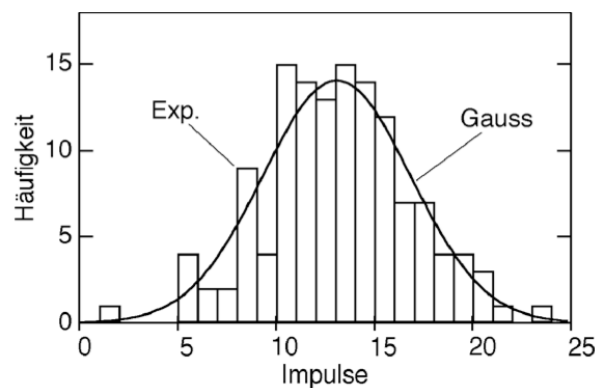


Figure 3: Histogramm von 132 Messungen. Die Glockenkurve hat die Parameter $\mu = 12.6$ (Mittelwert) und $\sigma = 3.75$ (Standardabweichung) und hat eine Fläche von 132.

²<http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/radioaktivitaet-einfuehrung/versuche>

³<https://support.office.com/en-us/article/Present-your-data-in-a-histogram-42ab6d10-1824-4740-995c-b01bbe0adf7a>

⁴<https://support.office.com/de-de/article/STABWN-Funktion-1f7c1c88-1bec-4422-8242-e9f7dc8bb195>

Versuch 5: Messung der radioaktiven Substanzmenge

Material Impulszähler mit Geiger-Müller-Zählrohr, Strontium 90 (Beta-Strahler), Halter auf Schiene

Vorgehen Ein einfaches Geiger-Müller Zählrohr wird benutzt um die Zählrate zu messen. Stellen Sie am Impulszähler Betriebsart "Zeitvorwahl". Starten Sie die Messung mit dem Knopf "Rückstellung". Das Gerät zeigt alle während einer bestimmte Zeit registrierten Impulse an (Zählrate = Impulse pro Sekunde). Platzieren Sie dann die Quelle ca. 20 cm vor dem Zählrohrfenster. Wählen Sie eine Vorwahlzeit von 60 s oder 50 s. Schreiben Sie im Protokoll alle Informationen, die auf der Quelle und die Aktivität und Herstellerdatum der Quelle (Herstellerwert) stehen.

Für die Messung nehmen Sie den Deckel weg. Messen Sie die Zählrate Z (Anzahl Zerfälle pro Sekunde auf dem Geigermüller Zählrohr). Wiederholen Sie die Messung 5 mal. Berechnen Sie den Durchschnitt. Messen Sie den Abstand d zwischen Zählrohrfenster und Quelle (Achtung Detektor!), sowie den Radius r_D vom Detektorfenster (Achtung Glimmerfenster hinter Gitter nicht berühren).

Aufgaben

1. Rechnen Sie von der Zählrate die Aktivität der Quelle zurück. Die ionisierende Strahlung der Probe geht in alle Richtungen. Das Zählrohr erfasst nur einen Teil der von der Quelle abgegebenen Strahlung. Die Aktivität der Quelle A können Sie berechnen, indem Sie von der Fläche des Zählrohrfensters (Radius r_D) auf die gesamte von der Strahlung durchsetzte Fläche in diesem Abstand (Kugeloberfläche, Radius d) hochrechnen. Bestimmen Sie so die mittlere Aktivität A unserer Probe in Bq und in Ci (siehe Grundlagen)
2. Vergleichen Sie mit der Angabe zum Zeitpunkt der Herstellung
3. Berechnen Sie aus der Halbwertszeit von Sr 90 (vgl. FoTa) die Zerfallskonstante λ .
4. Zusammen mit der Aktivität der Quelle können Sie daraus die Zahl der noch vorhandenen Sr-90 Kerne bestimmen. Berechnen Sie daraus die Masse der radioaktiven Probe mit Hilfe der Molmasse M (vgl. Fota).
5. Welche Annahmen müssen erfüllt sein, damit die abgeschätzte Masse richtig ist? Ist die tatsächliche Aktivität der Quelle eher grösser oder kleiner?

Zusätzlicher Versuch: Abschirmung von radioaktiver Strahlung

Material Impulszähler mit Geiger-Müller-Zählrohr, Cäsium 137, Halter auf Schiene

Vorgehen Messen Sie zunächst während 100 s die Untergrundstrahlung. Platzieren Sie die Quelle etwa 15 cm vor dem Zählrohr. Messen Sie die Impulse für verschiedene Materialien (Holz, Plexiglas, Blei, ...). Wiederholen Sie die Messung für fünf verschiedenen dicke Platten.

Aufgaben

1. Tragen Sie die Zählraten als Funktion der Schichtdicke auf semilogarithmischem Papier auf.
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 Gammastrahlung aus der graphischen Darstellung.
4. Wie dick muss eine Bleiabschirmung sein, damit nur noch 1% der Gammastrahlung von Cäsium 137 durch kommt?

Zusätzlicher Versuch: Nachweis von radioaktiver Strahlung mit dem Nebelkammer

Material Wilson-Nebelkammer (Firma Conatex), radioaktive Quelle.

Versuch In einer übersättigten Atmosphäre aus Isopropanol (unterer Rezipientenbereich wird stark abgekühlt) entsteht längs der Bahn des radioaktiven Teilchens eine Nebelspur, analog einem Kondensstreifen von Flugzeugen. Beobachten Sie Spuren von radioaktiven Alpha- und Beta-Teilchen aus der Umwelt und aus einer Quelle.



Figure 4: Links: Nebelkammer mit sichtbaren Teilchenspuren. Rechts: Aufgehübschte Blasenkammeraufnahme aus der Big European Bubble Chamber (Bild: CERN Courier). Durch ein in der Kammer herrschendes Magnetfeld werden die Spuren von geladenen Teilchen gekrümmt, so dass man auf die Ladung des Teilchens schließen kann.

Bedingungen

Dieses Praktikum erstreckt sich über zwei Doppellektionen. Sie müssen insgesamt mindestens fünf Versuche bearbeitet werden. Falls Sie einen Bericht schreiben, geben Sie diesen mit der vollständigen Auswertung ab. Für eine Auswertung ohne Bericht bearbeiten Sie mindestens die Aufgaben von drei Versuche.

Abgabetermin ist: