

Versuch A8 - Spektroskopie der γ -Strahlung		
Name:		Mitarbeiter:
Gruppennummer:	lfd. Nummer:	Datum:

1. Aufgabenstellung

1.1. Versuchsziel

Kalibrieren der Messanordnung und Analyse von verschiedener Strahlungsquellen ohne und mit absorbierenden Materialien.

Verschaffen Sie sich Kenntnisse zu folgenden Schwerpunkten des Versuches:

- Strahlungsarten, Kernreaktionen
- Nachweismöglichkeiten für Kernstrahlung, insbesondere Szintillationszähler
- Absorption der Kernstrahlung
- COMPTON-Effekt
- Paarzerstrahlung

1.2. Messungen

1.2.1. Kalibrieren der Energieskala mit Cs 137

1.2.2. Aufnahme des Energiespektrums von Na 22

1.2.3. Aufnahme des Energiespektrums von Co 60 ohne und mit Bleiabschirmung verschiedener Schichtdicke ($d = 0$ bis 5 mm; in Schrittweiten von etwa 1 mm)

1.3. Auswertungen

1.3.1. Beschreiben Sie das Energiediagramm des Cs-Strahlers.

1.3.2. Beschreiben Sie das Energiespektrums des Na-Strahlers. Erklären Sie den markanten Peak in diesem Spektrum. Ordnen Sie diesen Energien Wellenlängen zu.

1.3.3. Stellen Sie zu den Messungen unter 1.2.3. in einem Diagramm die Abhängigkeit markanter Energiewerte von der Schichtdicke dar. Bestimmen Sie den Massenschwächungskoeffizienten (in cm^2/g) für die verschiedenen Energien. Im niederenergetischen Bereich erscheint eine neue Spitze, sobald sich der Bleiabsorber zwischen Quelle und Detektor befindet. Welche Strahlungsart tritt zusätzlich auf?

2. Grundlagen

2.1. Der stabile und instabile Atomkern

In diesem Versuch lernen Sie einen PC-gestützten Messplatz zur weitgehend automatisierten Aufnahme von Energiespektren verschiedener Radionuklide kennen. Die radioaktive Strahlung wird energieproportional in elektrische Impulse gewandelt. Dafür wird ein Szintillationszähler verwendet. Die Impulse werden mittels eines Computermessprogramms einer bestimmten Anzahl von energieabhängigen Kanälen zugeordnet und im Diagramm (Ereignisse / Zeit = Zählrate über der Energie) dargestellt.

Die Entdeckung des Atomkerns

Die Existenz der Atomkerne wurde 1911 von ERNEST RUTHERFORD postuliert und 1911-13 von seinen Mitarbeitern HANS GEIGER (nach dem der Geiger-Zähler benannt ist) und ERNEST MARSDEN (einem 20-jährigen Studenten) mittels Streuexperimenten von α -Teilchen an dünnen Goldfolien nachgewiesen (RUTHERFORDSCHE STREUFORMEL). Der extrem kleine Kern (Durchmesser in der Größenordnung von 10^{-14} m) enthält nahezu die gesamte Masse des Atoms (Durchmesser in der Größenordnung von 10^{-10} m).

Kernmodelle

Die adäquate Beschreibung der Eigenschaften der Atomkerne (Nuklide) ist wesentlich komplizierter als die Modellierung der Atomhülle. Kernmodelle erfassen jeweils nur bestimmte Eigenschaften (z.B. die Energieverhältnisse: Tröpfchenmodell, Fermigasmodell und Schalenmodell; Berechnung seiner magnetischen und elektrischen Momente; Natur der starken Wechselwirkung: Quarkmodell der Kernbausteine, u.s.w.). Die Nützlichkeit eines Kernmodells wird von seiner Fähigkeit zu Vorhersagen, die experimentell überprüft werden können, bestimmt.

Bindungsenergien von Atomkernen

Die präzise Bestimmung der Atommassen (durch die Massenspektrometrie) und ihre Kopplung mit der Energie-Masse-Äquivalenz $E=mc^2$ (ALBERT EINSTEIN) führte zu einer wichtigen Schlussfolgerung: Die Masse m_K eines Atomkerns mit der Massenzahl $A = Z + N$ (Z : Zahl der Protonen, N : Zahl der Neutronen) ist stets *kleiner* als die Summe $\sum m_i$ der Massen seiner einzelnen Protonen und Neutronen. Dieser Massendefekt Δm wird bei ihrer Vereinigung zum Kern als Bindungsenergie $B = \Delta m c^2$ frei. Sie berechnet sich zu

$$B(Z, N) = [Z m_p + N m_n - m_k(Z, N)] c^2$$

(m_p : Masse des Protons, m_n : Masse des Neutrons).

Der Zusammenhalt der Kerne wird durch die sogenannte „starke Wechselwirkung“ realisiert, welche zu einer Kernkraft zwischen den Kernbausteinen von extrem kurzer Reichweite führt.

Kernenergieniveaus

Die Energie der Atomkerne ist ebenso wie die Energie von Atomen gequantelt. Hier besteht eine weitgehende Analogie zur Hüllenphysik, da die Kernbausteine (Proton und Neutron) wie auch das Elektron zu den Fermionen zählen. Angeregte Atomkerne können daher nur in diskreten Quantenzuständen existieren (Schalenmodell), von denen jeder eine bestimmte Energie besitzt. Für Atome liegt die Größenordnung der Bindungsenergien im Bereich von Elektronenvolt, im Kern von MeV. Beim Übergang eines Atomkerns von einem angeregten Niveau zu einem niedrigeren Energieniveau wird ein Quant = γ – Strahlung des elektromagnetischen Spektrums emittiert.

Radioaktiver Zerfall

Die meisten Nuklide sind instabil, d.h. radioaktiv. Sie werden Radionuklide genannt. Beim radioaktiven Zerfall werden spontan Teilchen emittiert: α -Teilchen (${}^2\text{He}^4$ -Kerne), β^- -Teilchen (Elektronen), β^+ -Teilchen (Positronen). Der instabile Kern wandelt sich bei jedem Zerfall in ein anderes Nuklid um. Am Ende einer Kette von Zerfällen (oft Zerfallsreihe) entsteht ein stabiler Kern (meist Pb-Isotope). Die bei jedem Zerfall gebildeten Nuklide (Tochternuklide) sind zumeist hoch angeregt. Die angeregten Zustände kehren durch Aussenden von γ -Strahlen in weniger angeregte oder in den Grundzustand zurück. Sehr schwere Kerne können bei ihrer Umwandlung auch Neutronen aussenden.

Der radioaktive Zerfall war das erste Beispiel für die statistische Natur der Gesetze der Atomkerne. Es gibt keine Möglichkeit vorherzusagen, ob ein ausgesuchter Atomkern eines radioaktiven Stoffes zu den Kernen gehört, die innerhalb des nächsten Zeitintervalls zerfallen. Alle Kerne einer Probe haben dieselbe Zerfallswahrscheinlichkeit.

Ein Ensemble von N Radionukliden hat die Aktivität $A = -\frac{dN}{dt}$

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (1)$$

Zerfallsrate mit der Einheit [1/s = 1 Becquerel = 1Bq].

Die Anzahl der pro Zeiteinheit zerfallenen Kerne ist proportional zu N , d.h.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N .$$

Die Größe λ bezeichnet man als Zerfallskonstante. Sie hat für jedes Radionuklid einen bestimmten Wert und ihre Einheit ist s^{-1} . Aus dieser Gleichung soll N als Funktion der Zeit t berechnet werden. Dazu ordnen wir Gl. zunächst um:

$$-\frac{dN}{N} = -\lambda dt ,$$

dann werden beide Seiten integriert:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t_0}^t dt ,$$

man erhält

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - t_0) ,$$

wobei N_0 die Anzahl der radioaktiven Kerne der Probe zur Anfangszeit t_0 ist. Man setzt $t_0 = 0$ und erhält

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t .$$

Nun können wir von beiden Seiten die Exponentialfunktion bilden und erhalten schließlich:

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

(Gesetz des radioaktiven Zerfalls).

Absorption der radioaktiven Strahlung durch Materie

Trifft Strahlung auf Stoffe, so tritt sie mit den Atomen in Wechselwirkung, d.h. Strahlung und der Stoff werden beeinflusst. Die Strahlung erleidet Energieverlust und wird gestreut. Auf den Stoff wird Energie übertragen, die weitere Veränderungen im Stoff hervorrufen kann.

- a) Geladene Teilchen können mit der Atomhülle oder dem Atomkern in Wechselwirkung treten. Es können
- unelastische Stöße mit den Hüllenelektronen auftreten. Das führt zur Anregung oder Ionisation des getroffenen Atoms. Das Teilchen wird abgebremst (Ionisationsbremsung genannt) und es ändert seine Richtung. Trifft ein Positron auf die Atomhülle, so wird es abgebremst und vereinigt sich mit einem Elektron. Dabei entstehen zwei γ -Quanten, die jeweils die Energie $E_\gamma = m_e c^2$ erhalten.
 - unelastische Stöße mit dem Atomkern stattfinden. Der Stoß findet im COULOMB-Feld des Kernes statt. Die Teilchengeschwindigkeit ändert sich in Betrag und Richtung. Ein Teil der Teilchenenergie wird in Bremsstrahlung umgewandelt.
 - elastische Stöße mit der Atomhülle vorkommen. Diese finden nur bei kleinen Energien der Teilchen statt.
 - elastische Stöße mit dem Atomkern erfolgen. Die Teilchen werden aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt und wegen des Impulssatzes verlieren die Teilchen einen gewissen Teil ihrer Energie.

Durchdringt radioaktive Strahlung Materie, so finden alle genannten Wechselwirkungen statt, wobei nur die ersten beiden von Interesse sind. Hat z.B. ein Teilchen eine Energie von 1 MeV, so finden etwa 10^4 Prozesse statt, um es vollständig abzubremsen.

- b) Die Wechselwirkung von Neutronen mit Materie. Sie wird hier nicht betrachtet.
- c) Zwischen der γ -Strahlung und den Atomen treten mehrere Wechselwirkung auf. Die Prozesse sind:
- der **Kern-Photoeffekt**: Dabei wird die gesamte Energie des γ -Quants auf das Hüllenelektron übertragen, das die Atomhülle verlässt. Die Lücke des emittierten Elektrons wird aufgefüllt, dabei entsteht Strahlung, die auch charakteristische Röntgenstrahlung sein kann.
 - **COMPTON-Effekt**: Dabei wird ein energiereiches γ -Teilchen an freien Elektronen (Metalle) gestreut, wobei beim Stoß nur ein Teil seiner Energie übertragen wird. Es gelten die Gesetze des elastischen Stoßes. Der Streuwinkel ϑ (zwischen ankommenden und gestreutem Photon) kann zwischen 0° und 180° liegen, wobei bei $\vartheta=180^\circ$ maximale Energie beim Stoß übertragen wird. Daher besitzen die gestreuten γ -Quanten ein breites Spektrum an Energie. Das bedeutet andererseits, dass die getroffenen Elektronen eine Maximalenergie besitzen, die sich im Energiespektrum als COMPTON-Kante bemerkbar macht.
 - **Paarbildung**: Überschreitet die Energie des γ -Teilchens die doppelte Ruheenergie des Elektrons ($E_\gamma \geq 2m_e c^2$), so kann im COULOMB-Feld eines Atomkerns aus diesem γ -Photon ein Elektronen-Positronen-Paar entstehen. Die restliche Energie überträgt sich auf die Bewegungsenergie der beiden Ladungsträger und im geringen Maß auf den Atomkern.

Durchdringt Strahlung Materialschichten, so verliert sie durch die vielen unelastischen Streuungen ihre Energie. Bei genügend dicken Schichten kann die Energie (statistisch gesehen) Null betragen. Die dadurch definierte Reichweite ist von der Art und Energie der Strahlung und vom zu durchdringenden Stoff abhängig. Schon die Reichweite der α - und β -Strahlung in Luft ist beschränkt.

Da unsere Messungen bzgl. der Absorption in Luft stattfinden, wird daher ein γ -Strahler verwendet, um die Absorption in Luft zu vernachlässigen.

2.2. Hinweise für den Umgang mit den radioaktiven Strahlungsquellen

Beim Umgang mit radioaktiven Strahlungsquellen sind die Vorschriften der Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20.07.2001 i.d.F.v. 01.09.2005 zu beachten.

Die die radioaktiven Strahlungsquellen betreffenden Auflagen sind in dem mitgelieferten Zulassungsschein (Bauartzulassung) aufgeführt. Danach müssen die Strahler bei Nichtgebrauch in dem mitgelieferten Schutzbehälter (aus Aluminium) aufbewahrt werden. Zusätzlich ist noch ein Aufbewahrungsbehälter vorhanden. Die vorgeschriebene Lagerung zum Schutz gegen Abhandenkommen und gegen den Zugriff Unbefugter kann in einem nur zu diesem Zweck benutzten, verschließbaren Schrank erfolgen.

Bei sachgemäßer Handhabung der Strahler ist ein Austritt radioaktiver Stoffe nicht möglich. Die Austrittsöffnung ist nicht zu berühren, da oft das radioaktive Material nur mit einer sehr dünnen Abdeckung versehen ist.

Auf Grund ihrer Bauart sind die Strahler des vorhandenen Sets von solch geringer Aktivität, so dass praktisch bei vorschriftsmäßigem Gebrauch keine Gefährdung auftreten kann. Hinreichender Abstand von der Quelle ist die beste Sicherheit. Absorbierende Materialien verringern diesen Sicherheitsabstand wesentlich. Bei Nichtgebrauch ist die Quelle daher immer in den Aufbewahrungsbehälter zu setzen.

Mit diesen radioaktiven Strahlern dürfen gemäß StrlSchV Auszubildende nur unter der Aufsicht eines Verantwortlichen umgehen. Diese Strahler sind für Ausbildungszwecke zugelassen. Das Einsetzen und Entfernen der Strahlungsquellen in die Halterung nimmt ein Betreuer vor.

Nach Beenden der Messungen ist der Satz radioaktiver Quellen abzugeben. Es wird empfohlen die Hände zu waschen.

2.3. Beschreibung der Strahler

Im vorhandenen Set sind folgende Strahler enthalten:

Nuklid	Strahlungsart	Aktivität (bei Neuanschaffung)
Cobalt 60 (^{60}Co)	γ	74 kBq (Kilo-Becquerel)
Cäsium 137 (^{137}Cs)	γ	74 kBq
Americium 241 (^{241}Am)	α, γ	74 kBq
Strontium 90 (^{90}Sr)	e^-, γ	74 kBq
Natrium 22 (^{22}Na)	e^+, γ	74 kBq

Die radioaktiven Stoffe sind in die Vertiefung eines Strahlerhalters aus Aluminium eingebettet, der 85 mm lang ist und einen Durchmesser von 12 mm hat.

Durch die Dicke der Wandung, die das Nuklid abdeckt und durchstrahlt werden muss, können die Energiewerte der austretenden α - und β - Strahlung gegenüber Tabellenwerten verringert werden.

Die Strahler werden bezüglich ihrer Halbwertszeit und Strahlung im Internet und im Anhang <http://nucldata.nuclear.lu.se/nucldata/toi/> genauer beschrieben.

2.4. Ergänzende Grundlagen

Zur Energieanalyse insbesondere der γ -Strahlen eignet sich der Szintillationszähler. Die Höhe der am Ausgang anliegenden Spannungsimpulse ist proportional zur Energie der Quanten. Zum Aufbau und zur Funktionsweise dieses Nachweisgerätes lesen Sie in entsprechenden Physiklehrbüchern nach.

Tritt radioaktive Strahlung durch Materie, so wird sie durch verschiedene Prozesse geschwächt. Da γ -Strahlung detektiert werden soll, ist deren Schwächung durch Luft un-

bedeutend. Ein wichtiges Maß für die Schwächung ist u.a. der Absorptionskoeffizient (linearer Schwächungskoeffizient) μ :

$$N = N_0 e^{-\mu d} ,$$

mit d als Schichtdicke und N die Zählrate mit Absorber und N_0 die Zählrate ohne Absorber. Der Massenschwächungskoeffizient μ_M bezieht sich auf die Dichte des Absorbers:

$$\mu_M = \frac{\mu}{\rho} ,$$

wobei ρ die Dichte des Stoffes ist, der sich zwischen Quelle und Detektor befindet.

3. Experiment

3.1. Geräte und Materialien



Abb. 1 Bezeichnung der Aufbauteile

- 1 - Szintillationszähler mit Elektronik und
- 2 - Stromversorgung
- 3 - Sensor CASSY mit Vielkanalanalysator-Box
- 4 - Szintillatorabschirmung mit
- 5 - Halterung für die Strahler und
- 6 - Einschub für die Absorber-Platten
- 7 - Satz radioaktiver Präparate im Aufbewahrungs- und
- 8 - Transportbehälter
- 9 - Blei-Absorber-Platten

3.2. Versuchsanordnung

Der Szintillationszähler [1] ist fest in die Szintillatorabschirmung [4] eingesetzt. Damit ist immer ein konstanter Abstand gewährleistet. Zum Einsetzen des radioaktiven Präparates wird die untere Tür [5] von [4] geöffnet. Für das Einsetzen der Absorber [9] wird deren Einschub [6] herausgezogen. Die nicht benutzten Präparate bleiben im Aufbewahrungsbehälter.

3.3. Hinweise zum Experimentieren und Auswerten

Die Messungen werden mit dem Programm „CASSY Lab“ durchgeführt. Zur Handhabung dieses Programms liegt am Arbeitsplatz eine Anleitung aus.

Im ersten Arbeitsschritt muss den Nummern der Kanäle eine Energie zugeordnet werden. Dazu ist eine Kalibrierung notwendig. Hierfür verwendet man das Cs-Präparat. Es ist ein relativ monoenergetischer γ -Strahler. Da die Obergrenze der darzustellenden Energie auch von der Beschleunigungsspannung am SEV (**S**ekundär-**E**lektronen-**V**ervielfacher) abhängt, ist diese vor Versuchsbeginn mit einem Digitalmultimeter auf $U = 850 \text{ V}$ einzustellen. Die Messzeit beträgt bei den Versuchen 1.2.1. und 1.2.2. 100 s, was im Programm voreingestellt ist. Die Zeit sollte nicht kürzer gewählt werden, damit das Ergebnis einigermaßen statistisch abgesichert ist. Für die Teilversuche zu 1.2.3. beträgt die Messzeit 200 s. Diese Zeit muss in das Messprogramm (Taste F5) eingegeben werden. Die Diagramme zu den ersten beiden Versuchen können ausgedruckt, bzw. in andere Programme kopiert werden. Damit stehen sie zur Auswertung zur Verfügung. Zum dritten Versuch notiert man sich die entsprechenden Zählraten der Teilversuche aus der Tabelle.

Nach dem Start der entsprechenden Messung sieht man das Entstehen des Diagramms auf dem Bildschirm. Die Zählraten der entsprechenden Kanäle (der Energieintervalle) werden während der Messzeit aufaddiert.

Nach dem Kalibrieren wird das Natrium-Präparat ausgemessen. Na 22 ist ein Positronen-Strahler. Die Positronen gehen charakteristische Reaktionen mit der Materie ein, deren Energie man im Diagramm erkennen kann und in der Auswertung berechnen soll. Das Co- und das Na-Diagramm können zusammen ausgedruckt bzw. gespeichert werden.

Dann werden die Messungen nach Anleitung für den Versuch 1.2.3. durchgeführt. Die entsprechenden Werte entnimmt man der Tabelle. In der Auswertung wird für die erkannten Maxima das Zählraten-Schichtdicken-Diagramm mit den Energien als Parameter gezeichnet. Es sind für diese Energien die entsprechenden Masseabsorptionskoeffizienten zu bestimmen.

4. Literatur:

WALCHER: Praktikum der Physik; Teubner Studienbücher, Teubner Verlag, Stuttgart

STÖCKER: Taschenbuch Physik; Verlag H. Deutsch, Frankfurt am Main 1999

Handbuch zu CASSY: <http://www.leybold-didactic.de/software/index.html?cassy-s.html>
dort die Seiten: 15 und 298ff

STOLZ: Radioaktivität; C. Hanser Verlag, München 1990

DEMTRÖDER: Experimentalphysik 4; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1998

Anhang

Charakteristische Daten des Satzes radioaktiver Strahler

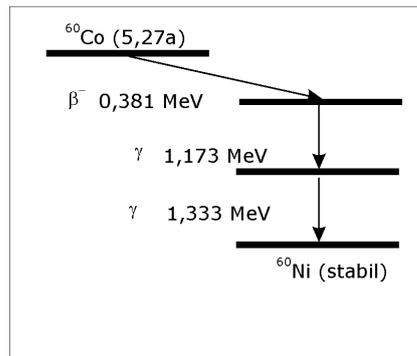
Nuklid	Halbwertszeit	β -Energie in MeV	Übergangswahrscheinlichkeit in %	γ -Energie in MeV	emittierter Anteil in %	konvertierter Anteil in %
⁶⁰ Co	5,27 a	0,318 1,491	99,1 0,1	1,173 1,333	99,86 99,98	0,02 0,01
²² Na	2,60 a	0,546 1,820 EC) ²	90,49 9,46	0,511) ¹ 1,275	99,95	
¹³⁷ Cs	30,1 a	0,512 1,174	94,6 5,4			
¹³⁷ Ba	2,6 min			0,662	65,1	9,5
⁹⁰ Sr	28,5 a	0,546	100			
⁹⁰ Y	64,1 h	2,274 0,513	99,98 0,02	1,716		0,02
		α -Energie in MeV				
²⁴¹ Am	433 a	5,387 5,442 5,484 5,511 5,543	1,6 12,5 85,2 0,2 0,34	0,026 0,033 0,043 0,0595 0,099 0,103 0,125	2,5 0,1 0,1 35,3 0,02 0,02 0,004	10 20 10 40

)¹ Elektron-Positron-Vernichtungsstrahlung

)² Elektroneneinfang

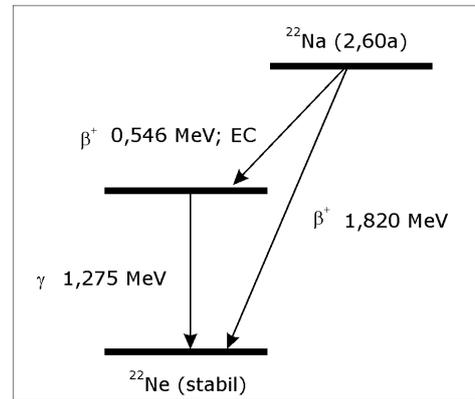
Niveauschemata der Strahlungsquellen

Cobalt 60



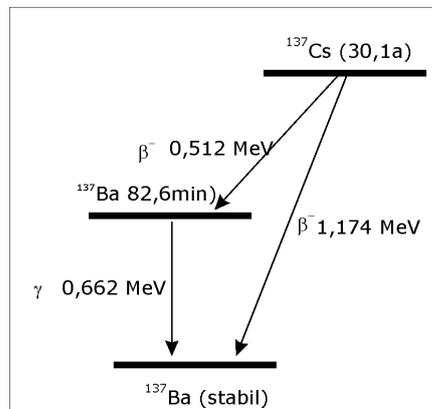
Die Abdeckung der Quelle absorbiert die β -Teilchen

Natrium 22



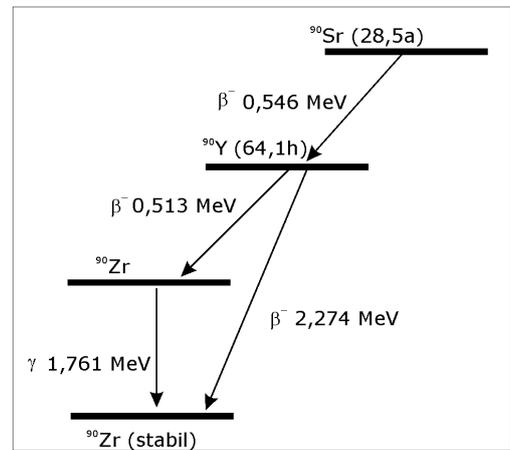
zusätzlich tritt die Elektronen-Positronen-Vernichtungsstrahlung auf (511 keV)

Cäsium 137



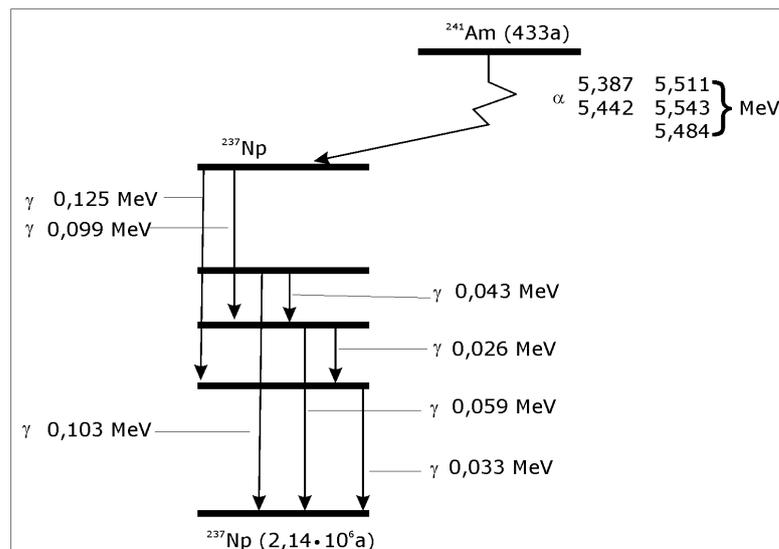
Die Abdeckung der Quelle absorbiert die β -Teilchen

Strontium 90



Die Abdeckung der Quelle absorbiert die energieärmeren β -Teilchen

Americium 241



Die Abdeckung der Quelle verringert die maximale Energie der α -Teilchen auf etwa 4,5 MeV