

Absorption von γ -Strahlung

1 Lernziele

Im Versuch K 2 setzen Sie sich mit der nicht nur für die Kernphysik sehr wichtigen Thematik der Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie auseinander. Dieser Versuch bietet Ihnen dabei die Möglichkeit, Kenntnisse über die Entstehung von γ -Strahlung, die einzelnen Wechselwirkungsprozesse mit Materie, über den Nachweis sowie die Abschirmung experimentell zu vertiefen. In diesem Zusammenhang lernen Sie auch die grafische Auswertung wissenschaftlicher Messungen sowie den Umgang mit Logarithmenpapier. Bedenken Sie, dass – anders als bei den meisten „Effekten“ in den anderen Abteilungen des Grundpraktikums – der Mensch kein Sinnesorgan hat, mit dem er radioaktive Strahlung direkt wahrnehmen kann. Sie sind also gezwungen, allein auf der Basis Ihrer Kenntnisse der physikalischen Prozesse und der Messtechnik die Ergebnisse Ihrer Versuchsdurchführung zu beurteilen.

2 Voraussetzungen

Für alle Versuche des kernphysikalischen Grundpraktikums sind Kenntnisse des Strahlenschutzes, insbesondere der Messgrößen, Einheiten und Grenzwerte essenziell. Das Merkblatt K0 bietet dabei eine gute Grundlage. Auch die Literaturliste kann Ihnen eine wertvolle Unterstützung bei der Einarbeitung in das Thema des Versuchs sein. Die Funktionsweise von Geiger-Müller-Zählrohren sollten Sie ebenso verstanden haben und erklären können wie die Entstehung und den Nachweis von γ -Strahlung, deren Wechselwirkung mit Materie sowie die Parameter, mit denen die Prozesse charakterisiert werden. Gleiches gilt für das Gesetz des radioaktiven Zerfalls und das Zerfallsschema des ^{60}Co -Präparats. Gute Kenntnisse der Fehlerrechnung werden für alle natur- und ingenieurwissenschaftlichen Messungen ebenso vorausgesetzt. Studierende der Physik sollten darüber hinaus sowohl Kenntnisse über Statistik als auch über die Abschirmung von Strahlungsfeldern mit einbringen.

3 Literatur

zusammengefasst als Literaturliste in der physikalischen Lehrbuchsammlung hinterlegt

- Blatt K0
- Bundesamt für Strahlenschutz *Strahlung und Strahlenschutz*
- G. Musiol, J. Ranft, R. Reif, D. Seeliger *Kern- und Elementarteilchenphysik*
- G. F. Knoll *Radiation Detection and Measurement*
- Statistik: W. Riezler, K. Kopitzki *Kernphysikalisches Praktikum*, Kap 1.41
- Abschirmung von Strahlungsfeldern: H.-G. Vogt, H. Schultz *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes*

mitzubringende Hilfsmittel: einfach- und doppelt-logarithmisches Papier (1 bzw. 3 Dekaden)

4 Grundlagen

Die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung (hier: γ -Strahlung) mit Materie ist von großer Bedeutung für Verfahren, die z. B. in der Medizin (Röntgendiagnostik, Tumorthherapie) oder der Materialwissenschaft (Dickenmessung) Anwendung finden. Auch für die Auslegung medizinischer und kerntechnischer Anlagen ist es notwendig, die Auswirkungen dieser Wechselwirkung in Art und Stärke detailliert beurteilen zu können. In der Forschung können mit Hilfe von γ -Strahlung z. B. Informationen über die Kernstruktur gewonnen werden.

γ -Strahlung ist elektromagnetische Strahlung kleiner Wellenlänge, also hoher Energie, die sich wie alle elektromagnetische Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Energie und Frequenz eines γ -Quants sind durch die Beziehung $E = h\nu$ miteinander verknüpft. γ -Strahlung entsteht durch Quantensprünge bei der Umordnung der Protonen und Neutronen im Atomkern, z.B. nach einem radioaktiven α - bzw. β -Zerfall. Da die beteiligten Energieterme scharf definiert sind, bilden diese Arten von γ -Strahlen scharfe Spektrallinien. Ferner entsteht γ -Strahlung als Vernichtungsstrahlung eines Elektron-Positron-Paares.

Da γ -Strahlung im Gegensatz zum Licht eine große Durchdringungsfähigkeit für alle Stoffe aufweist, ist die Kennzeichnung der Absorptionseigenschaft eines Stoffes gegenüber dieser Strahlung besonders wichtig. Sie wächst mit steigender Ordnungszahl Z und Dichte eines Stoffes an. Besitzt ein paralleles Bündel von γ -Strahlen eine einheitliche Wellenlänge und damit eine einheitliche Energie, so erfolgt die Schwächung durch eine dazu senkrecht angeordnete sehr dünne Materieschicht der Dicke dx nach der Beziehung

$$-dn = n \cdot \mu \cdot dx \quad (1)$$

wobei n die Anzahl der γ -Quanten ist, die auf die Schicht auffallen, und μ der Schwächungskoeffizient. Durch Integration dieser Gleichung erhält man das Schwächungsgesetz für endliche Schichtdicken x . μ ist vom Stoff und von der Energie der γ -Strahlung abhängig und wird in cm^{-1} angegeben. Der auf die Dichte bezogene Schwächungskoeffizient μ/ρ wird Massenschwächungskoeffizient genannt. Er beschreibt die Absorptionseigenschaften unabhängig von der Dichte. An der Schwächung der γ -Strahlung beim Durchqueren eines Stoffes sind verschiedene Effekte beteiligt.

Photoeffekt: Das γ -Quant der Energie $h\nu$ schlägt ein Elektron aus der Atomhülle heraus. Der Photoeffekt findet vorzugsweise an kernnahen Elektronen statt und ist aus Gründen der Impuls- und Energieerhaltung nur in Gegenwart eines dritten Partners (z.B. dem Kern) möglich. Das γ -Quant wird beim Photoeffekt vernichtet.

Comptoneffekt: Das γ -Quant wird an einem (quasifreien) Elektron gestreut und gibt dabei einen Teil seiner Energie ab. Die Energie E'_γ des gestreuten γ -Quants ergibt sich aus Energie- und Impulssatz zu

$$E'_\gamma = E_\gamma \cdot \left[1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos\theta) \right]^{-1}, \quad (2)$$

wobei E_γ die Energie des einfallenden γ -Quants, $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ die Ruheenergie des Elektrons und θ der Streuwinkel des γ -Quants ist. Die maximale Energieabgabe an das Elektron erfolgt daher bei $\theta = 180^\circ$.

Paarbildung: γ -Quanten mit einer Energie $E \geq 1022 \text{ keV}$ können sich in der Nähe eines Atomkerns in ein Elektron-Positron-Paar umwandeln. Es handelt sich dabei um eine Umwandlung von Strahlungsenergie in Masse. Das Positron trifft nach kurzem Weg auf irgendein Elektron – gemeinsam zerstrahlt dieses Paar in zwei γ -Quanten mit je 511 keV Energie (Vernichtungsstrahlung). Ein Zerfall in drei (statt zwei) Quanten ist auch möglich. Für γ -Energien bis zu einigen MeV ist Paarbildung sehr unwahrscheinlich, der entsprechende Wirkungsquerschnitt also sehr klein.

Überlegen Sie sich Energie und Impulserhaltung bei den Prozessen.

5 Versuchsbeschreibung

In diesem Versuch wird die in einem ^{60}Co -Präparat entstehende γ -Strahlung nach Durchgang durch verschiedene Materialien mittels eines Geiger-Müller-Zählrohrs nachgewiesen. Dazu sind vorhanden:

1. ^{60}Co -Präparat
2. Bleiplatten verschiedener Dicke
3. Platten aus Pb, Al, Fe und Messing mit einer Dicke von je $d = 1\text{ cm}$
4. Zählrohr und Ausleseelektronik

Das ^{60}Co im Präparat zerfällt gemäß $^{60}\text{Co} \xrightarrow{\beta\text{-Zerfall}} ^{60}\text{Ni} \xrightarrow{\gamma\text{-Strahlung}} ^{60}\text{Ni}$ unter Emission von γ -Quanten der Energien $E_\gamma = 1.17\text{ MeV}$ bzw. $E_\gamma = 1.33\text{ MeV}$. *Dieses Präparat darf nur vom Assistenten gehandhabt werden!*

Das Zählrohr besteht aus einem dünnwandigen Glasrohr und ist deshalb mit besonderer Vorsicht zu behandeln. Die in K2 eingesetzten Zählrohre weisen typischerweise eine Einsatzspannung von 610 V und einen Arbeitspunkt von 750 V auf.

6 Aufgaben

1. Man bestimme die durch die Umgebungsstrahlung verursachte Untergrund-Zählrate mit einer Genauigkeit von besser als 5%. Wie hängt der relative Fehler mit der Anzahl der gemessenen Impulse zusammen? (statistischer Fehler!)
2. Nach welchem Gesetz nimmt die Zählrate mit wachsendem Abstand Quelle – Detektor ab (sechs Messpunkte, Messzeit 60 s)? Dazu trage man die aufgenommenen Messwerte in doppeltlogarithmischem Maßstab auf und bestimme die Steigung.
3. Durch Bleiplatten im Strahlengang wird γ -Strahlung absorbiert. Wie hängt die Zählrate von der Plattendicke ab? Mit den verfügbaren Bleiplatten ermittle man acht Messpunkte, Messzeit jeweils 60 s, Abstand Präparat – Zählrohr: 20 cm. Die Ergebnisse aus dieser Messung trage man in logarithmischem Maßstab auf und bestimme den Schwächungskoeffizienten μ .

Nur für Physiker:

4. Für eine Aluminium-, Eisen-, Messing- und Bleiplatte von je 1 cm Dicke bestimme man bei einer Messzeit von je 120 s den Schwächungskoeffizienten. Zur Auswertung der Messungen ist die angegebene Differentialgleichung (1) zu integrieren.
5. Berechnen Sie den Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ und den effektiven Querschnitt pro Atom.

	Al	Fe	Messing	Pb	
ρ	2,7	7,7	8,1	11,35	g/cm^3
A	27	56	64	207	

6. Messen Sie in einem Zeitintervall von 300 s die Schwächung der γ -Strahlung beim Durchgang durch eine 1.0 cm dicke Pb-Platte und eine 1.0 cm dicke Al-Platte. Vergleichen Sie mit der Schwächung beim Durchgang der Strahlung in umgekehrter Reihenfolge.