



Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

BM2 - Vorlesung Nr. 2



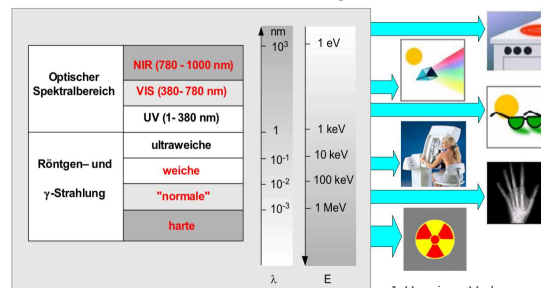
1. Grundprozesse der Wechselwirkung

- a) Charakteristische Größen – integrale und differentielle Wirkungsquerschnitte
- b) **Wechselwirkung von Photonen**
- c) Wechselwirkung von Neutronen
- d) Wechselwirkung schneller geladener Teilchen (z.B. Elektronen, Positronen, leichte und schwere Ionen)

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Was sind Photonen?

- Photonen sind Quanten des elektromagnetischen Feldes
- Es gilt: $E \cdot \lambda = h \cdot c = 1,24 \text{ keV nm}$
- Mit dem Planck'schen Wirkungsquantum h und der Wellenlänge λ
- Für $E = 1 \text{ keV}$ ist $\lambda = 1,24 \text{ nm} \approx 10 \text{ \AA}$
- Spektralbereich der Photonenstrahlung



J. Henniger: Vorlesung – Wechselwirkung Strahlung-Stoff

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Verschiedene Arten von Photonenstrahlung

- Bei Photonenstrahlung wird zwischen Röntgen-, Gamma- und Vernichtungsstrahlung unterschieden
- physikalisch gibt es keinen Unterschied da sich die Energiebereiche von Röntgen- bzw. Gammastrahlung überlappen
- Entscheidend ist die Herkunft der Strahlung
 - **Gammastrahlung** kommt aus dem **Kern**
 - **Röntgenstrahlung** aus der **Hülle**
 - **Vernichtungsstrahlung** entsteht durch **Annihilation von Teilchen**
- bei einer Positron-Elektron-Annihilation wird bspw. Vernichtungsstrahlung erzeugt d.h. 2 Photonen mit einer Energie von jeweils 511 keV



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Schwächung

- Beim Auftreffen von Photonenstrahlung auf ein Absorber, wird der ursprüngliche Photonenstrahl geschwächt
 - Führt zu einem Intensitäts- bzw. Photonenanzahlverlust
- Die Schwächung ist definiert:

$$S(x) = \frac{I(0) - I(x)}{I(0)}$$

- Dabei ist $I(0)$ der interessierende Effekt ohne Anwesenheit eines Absorbers und $I(x)$ der nach dem Einfügen
- Der Absorber hat die Flächenmasse bzw. die Massenbedeckung

$$x = \rho \cdot d \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

- Der Effekt kann bspw. eine Fluenz Φ , Dosis D oder ein Messeffekt M sein



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Transmission

- Ferner gilt für die Schwächung:

$$S(x) = \frac{I(0) - I(x)}{I(0)} = 1 - \frac{I(x)}{I(0)} = 1 - T(x)$$

- Für die Transmission gilt also:

$$T(x) = \frac{I(x)}{I(0)}$$

- Je größer die Schwächung, desto kleiner ist die Transmission

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Schwächung

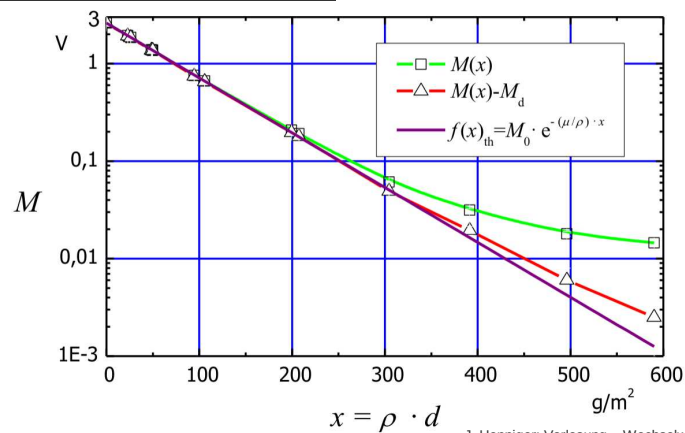
- Die Schwächung wird im Allgemeinen durch folgenden Differenzenquotienten bestimmt

$$S(x) = \frac{M(0) - M(x)}{M(0) - M_d}$$

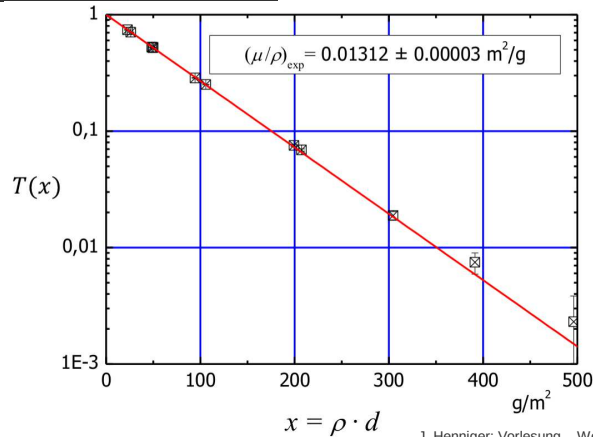
- dem Messeffekt einer Halbleitersonde ohne Absorber ($x = 0$) $M(0)$
- Der Effekt nach dem Einfügen eines Absorbers $M(x)$
- Der Messeffekt ohne Strahlungsquelle (z.B. Dunkelstrom) M_d
- Der Absorber hat eine Flächenmasse von $x = \rho \cdot d \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Schwächung von Mn- K_α - und K_β -Strahlung (5,9 bzw. 6,4 keV) durch Aluminium



1. b) Wechselwirkung von Photonen Transmission von Mn-K_α- und K_β-Strahlung (⁵⁵F-Quelle) durch Aluminium



J. Henniger: Vorlesung – Wechselwirkung Strahlung-Stoff

1. b) Wechselwirkung von Photonen Theoretische Beschreibung der Schwächung

- Das exponentielle Schwächungsgesetz ist definiert durch:

$$S(x) = 1 - e^{-\mu \cdot d}$$

- μ ist der (lineare) Schwächungskoeffizient
- Wird die obenstehende Gleichung durch die Dichte ρ erweitert erhält man

$$S(x) = 1 - e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho \cdot d} = 1 - e^{-\frac{\mu}{\rho} x}$$

- Dabei ist x wieder die Flächenmasse mit $x = \rho \cdot d$
- Der Koeffizient $\frac{\mu}{\rho}$ ist der sogenannte Massenschwächungskoeffizient.

Beispiel

Die Schwächung bzw. die Transmission eines monoenergetischen Photonen-Strahlenbündels mit Energien von 50 keV, 100 keV und 1 MeV durch eine 1 mm dicke Bleischürze in schmaler Geometrie ist zu berechnen.

Hinweis:

Bitte verwenden Sie die Massenschwächungskoeffizienten aus *Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik, Tabelle 20.4, S. 688*.

$$\rho_{Pb} = 11,35 \text{ g/cm}^3$$

Zusammenfassung Schwächung

- Die Schwächung schmaler, monoenergetischer Strahlenbündel ungeladener Teilchen wird durch das exponentielle Schwächungsgesetz für den Teilchenfluss, die Primärteilchenzahl oder die Intensität mit Hilfe des material- und energieabhängigen linearen Schwächungskoeffizienten μ beschrieben. Dieser ist umgekehrt proportional zur Halbwertsschichtdicke $d_{1/2}$ im Material.
- Für praktische Zwecke verwendet man oft die auf die Absorberdichten bezogenen Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ .
- Schwächungskoeffizienten für verschiedene Strahlungsarten, Teilchenenergien und Absorbermaterialien sind tabelliert (s. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik) oder können grafischen Darstellungen entnommen werden.



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Die wichtigsten WW-Prozesse von Photonen

- Kohärente Streuung in der Atomhülle
Thomson-/Rayleigh-Streuung
- Inkohärente Streuung in der Atomhülle
Comptonstreuung
- Vollständige Absorption in der Hülle
Photoeffekt
- Vollständige Absorption im elektrischen Feld des Kernes
Paarbildung
- Vollständige Absorption im Atomkern
Kernphotoreaktionen



1. b) Wechselwirkung von Photonen

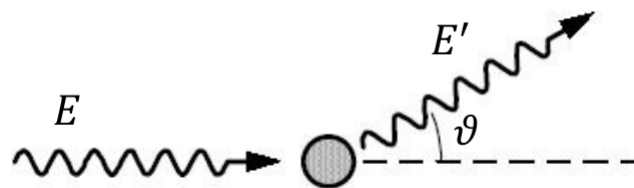
Die wichtigsten WW-Prozesse von Photonen

- Kohärente Streuung in der Atomhülle
Thomson-/Rayleigh-Streuung
- Inkohärente Streuung in der Atomhülle
Comptonstreuung
- Vollständige Absorption in der Hülle
Photoeffekt
- Vollständige Absorption im elektrischen Feld des Kernes
Paarbildung
- Vollständige Absorption im Atomkern
Kernphotoreaktionen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung

- WW von Photonen geringer Energie mit Elektronen der Atomhülle
- e^- werden zu erzwungenen Schwingungen mit gleicher Frequenz wie die der einfallenden Photonen angeregt
- Kohärente Streuung an gebundenen Elektronen der Atomhülle
- frequenz- und phasengleiche Abstrahlung unter polarem Streuwinkel ϑ und Azimutalwinkel ϕ



J. Henniger: Vorlesung – Wechselwirkung Strahlung-Stoff

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung

- Was ist frequenz- und phasengleiche Abstrahlung?
 - kein messbarer Energieverlust
 - aber: Richtungsänderung
 - Interferenzen sind möglich (BRAGG-Bedingung, Feinstrukturanalyse)
 - Querschnitte sind groß bei niedrigen Energien
 $E \ll m_e c^2$
 - Schwächung nur durch „Herausstreuen“ aus dem Strahlenbündel
- Bei der kohärenten Streuung wird zwischen Rayleigh- und Thomson-Streuung unterschieden

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung: Thomson-Streuung

- Elastische Streuung von Licht an geladenen freien oder schwach gebundenen Teilchen (quasifreie Elektronen)
- Die Thomson-Streuung stellt den Grenzfall der Comptonstreuung für kleine Photonenenergien dar
- Aus dem Oszillatormodell ergibt sich als Grenzfall hoher Frequenzen ($\omega \gg \omega_0$, mit der Kreisfrequenz der el.magn. Welle ω und der Eigenfrequenz des Teilchens ω_0) der klassische Thomson-Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_e^2 = \frac{1}{6\pi\epsilon_0^2} \cdot \frac{e^4}{m_e^2 c^4} = 6,652458558(27) \cdot 10^{-29} \text{m}^2$$

- r_e ist der klassische Elektronenradius
- Das Oszillatormodell beschreibt die Streuung von Licht an Atomen.

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung: Rayleigh-Streuung

- Bezeichnet hauptsächlich elastische Streuung
- Der Durchmesser der Teilchen an denen gestreut wird muss klein im Vergleich zur Wellenlänge λ sein
- Bsp.: Streuung von sichtbaren Licht an kleinen Molekülen
- Es gilt $\omega \ll \omega_0$
- Der Streuquerschnitt σ_R der Rayleigh-Streuung ist proportional zu ω^4

$$\sigma_R(\omega) \approx \sigma_T \frac{\omega^4}{\omega_0^4}$$



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung

- Die Gesamtwahrscheinlichkeit bzw. der differentielle raumwinkelbezogene Wirkungsquerschnitt ist gegeben durch

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} (1 + \cos^2 \vartheta)$$

- Für $\vartheta = 0^\circ$ bzw. 180° ergibt $1 + \cos^2 \vartheta = 2$ und für $\vartheta = 90^\circ$ ergibt die Klammer 1
- D.h. die Streuwahrscheinlichkeit in Vorwärts- bzw. Rückwärtsrichtung ist doppelt so hoch wie senkrecht zum einfallenden Photon



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung

- Die Hüllenelektronen werden für $Z > 1$ zu kohärenten Schwingungen angeregt
- Daraus resultieren Interferenzen, welche durch den Atomfaktor berücksichtigt werden
- Der Atomfaktor F ist abhängig von der Kernladungszahl Z und der Wahrscheinlichkeit dass der Impuls q von den Elektronen aufgenommen wird
- Daraus folgt auch eine Abhängigkeit von der Photonenenergie

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{3} (1 + \cos^2 \vartheta) \cdot F(q, Z)$$



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung

- Darstellung in Abhängigkeit von der Energie und Ordnungszahl

$$\sigma_{koh} \propto \frac{\rho \cdot Z^{2,5}}{A \cdot E_{phot}^2} \propto \rho_{e,v} \frac{Z^{1,5}}{E_{phot}^2}$$

- Kohärente oder klassische Streuung nimmt also mit der Ordnungszahl stark zu, aber auch mit der Energie wiederum stark ab
- Nur wichtig für niedrige Photonenenergien (keV-Bereich) und bei hohem Z
- Aber: kein Energieverlust → kein Beitrag zur Dosis



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung

- In der Praxis ergibt sich ein energieabhängiger Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\Omega}^k(E)$ durch eine Faltung mit dem sogenannten Atomfaktor $F(x, Z)$
- Der Formfaktor kommt aus der Theorie der Fraunhofer-Beugung

$$\sigma_{\Omega}^k(E) = \sigma_T \cdot [F(x, Z)]^2$$

$$\text{mit } x = E \cdot \sin \frac{\vartheta}{2}$$

- Für Vorwärtsstreuung $\vartheta = 0$ bzw. $x = 0$ gilt $F(0, Z) = Z$



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung

- auch alle anderen kohärenten Effekte, wie Streuung am Kern etc. sind in den tabellierten Querschnitten enthalten
- Die Querschnitte können zum einen berechnet werden
 - Hartree-Fock-Rechnung zur Berechnung der Elektronenstruktur der Hülle
 - sehr kompliziert
- Oder sie können aus Datenbibliotheken entnommen werden



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung

- Berechnung der integralen Querschnitte mit Hilfe der Formfaktornäherung

$$\begin{aligned}\sigma_k(E) &= \iint_{4\pi} \sigma_{\Omega}^k(E) d\Omega \\ &= \iint_{4\pi} \sigma_T \cdot [F(x, Z)]^2 d\Omega \\ &= \iint_{4\pi} \sigma_T \cdot \left[F \left(E \cdot \sqrt{\frac{1-\mu}{2}}, Z \right) \right]^2 d\Omega\end{aligned}$$



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kohärente Streuung

- Näherungsweise gilt für ein Atom mit der Kernladungszahl Z und einer hinreichend kleinen Energie (oberhalb der K-Kanten-Energie):

$$\sigma_k^{\text{Atom}}(E \rightarrow 0) = \frac{8}{3} \pi \cdot r_e^2 \cdot Z^2$$

- Näher an und unterhalb der K-Kante gilt immer anormale kohärente Streuung
- Bei höheren Energien nimmt der Querschnitt drastisch ab und es gilt:

$$\sigma_k^{\text{Atom}}(E) \propto E^{-2}$$



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Die wichtigsten WW-Prozesse von Photonen

- Kohärente Streuung in der Atomhülle
Thomson-/Rayleigh-Streuung
- Inkohärente Streuung in der Atomhülle
Comptonstreuung
- Vollständige Absorption in der Hülle
Photoeffekt
- Vollständige Absorption im elektrischen Feld des Kernes
Paarbildung
- Vollständige Absorption im Atomkern
Kernphotoreaktionen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

Facts zur Historie:

- 1923 Veröffentlichung des Artikels zur inkohärenten Streuung am quasifreien Elektron von A. H. Compton
- Er untersuchte darin den Zusammenhang zwischen Streuwinkel und Streuenergie des gestreuten Photons
- 1929 wurde diese theoretische Beschreibung durch O. Klein und Y. Nishina mit Hilfe der Dirac-Theorie erweitert
- Sie leiteten die Klein-Nishina-Formel her, die zur Beschreibung der Energieverteilung der gestreuten Strahlung dient

1. b) Wechselwirkung von Photonen

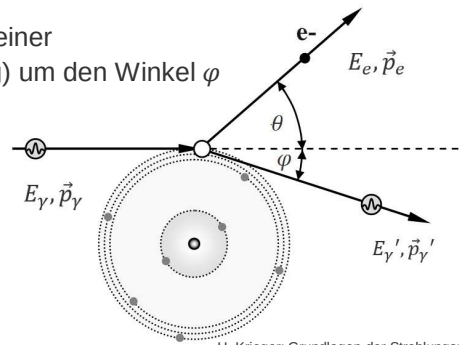
Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

- Dominant im Energiebereich von 60 keV bis einige MeV
- Der mikroskopische Wirkungsquerschnitt variiert nur um etwa eine Größenordnung
- Zwischen 100 keV bis einige MeV für alle Stoffe praktisch die einzige für den Energieverlust wesentliche Wechselwirkung
- Für Materialien hoher Ordnungszahl spielen der Photoeffekt und bei hohen Energien schließlich die Paarbildung eine Rolle
- Der Energieverlust ist kontinuierlich verteilt

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

- Inelastische WW eines Photons mit einem äußeren, schwach gebundenen (quasi freien) Hüllenelektron
- Das Photon überträgt einen Teil seiner Energie und seines Impulses auf das Elektron
- Ablenkung des Photons aus seiner Bewegungsrichtung (Streuung) um den Winkel φ
- Gestoßenes Elektron verlässt die Hülle im Winkel θ



H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

- Relativistische Streutheorie berücksichtigt Impuls der Photonen

$$p_\gamma = \frac{E_\gamma}{c}$$

- Gesamtenergie vor dem Stoß:

$$E_{\text{vor}} = E_\gamma + m_0 c^2$$

- Energie nach dem Stoß:

$$E_{\text{nach}} = E_e + E_\gamma' = m_e c^2 + E_\gamma'$$

mit der relativistischen Masse des Elektrons m_e

- Der Impuls nach dem Stoß verteilt sich auf das gestreute Photon γ' und das gestoßene Elektron

$$p_{\text{nach}} = p_\gamma' + p_e = \frac{E_\gamma'}{c} + m_e v_e$$



1. b) Wechselwirkung von Photonen Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

- Es gilt Energie- und Impulserhaltung:
Gesamtenergie und Gesamtimpuls müssen vor und nach dem Stoß gleich bleiben
- Unter Vernachlässigung der Elektronenbindungsenergie ergibt sich folgende Energie- und Impulsbilanz:

$$E_\gamma + m_0 c^2 = E'_\gamma + m_e c^2$$

$$\frac{E_\gamma}{c} = \frac{E'_\gamma}{c} + m_e v_e$$



1. b) Wechselwirkung von Photonen Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

- Mit der relativistischen Massenformel

$$m_e = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{c}\right)^2}}$$

ergibt sich

für die Energie:

$$E_\gamma + m_0 c^2 = E'_\gamma + \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{c}\right)^2}}$$

und für den Impuls:

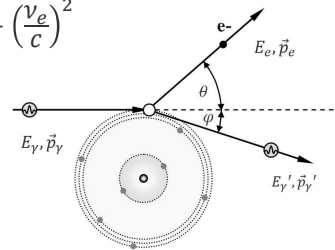
$$\frac{E_\gamma}{c} = \frac{E'_\gamma}{c} + \frac{m_0 \cdot v_e}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{c}\right)^2}}$$

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

- Nicht nur der Betrag des Impulses muss erhalten bleiben, sondern auch dessen Richtung
- Zerlegt man die Gleichung für den Impuls ergibt sich für den Anteil in der ursprünglichen Photonenrichtung

$$\frac{E_\gamma}{c} = \frac{E'_\gamma}{c} \cdot \cos \varphi + \frac{m_0 \cdot v_e \cos \theta}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{c}\right)^2}}$$



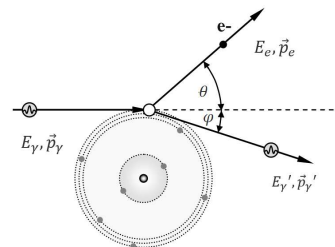
H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

- Und in die Impulskomponente senkrecht dazu

$$0 = \frac{E_\gamma}{c} = \frac{E'_\gamma}{c} \cdot \sin \varphi + \frac{m_0 \cdot v_e \sin \theta}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{c}\right)^2}}$$



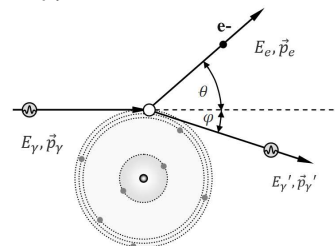
H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

- schließlich erhält man die Restenergie des Streuphotons E'_γ als Funktion der Einschussenergie E_γ und des Photonenstreuwinkels φ

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} \cdot (1 - \cos \varphi)}$$



H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

Das Comptonelektron:

- Der Impuls für das Elektron ist gegeben durch:

$$p_e = \frac{1}{c} \sqrt{(E'_\gamma - E_\gamma)^2 - 2E_0(E'_\gamma - E_\gamma)}$$

- Die Energie:

$$E_e = E_0 + E'_\gamma - E_\gamma$$

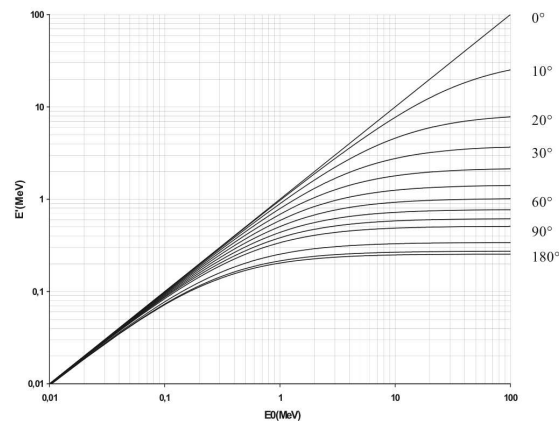
- Der Kosinus des polaren Streuwinkels θ ist gegeben durch

$$\cos \theta = \frac{E'_\gamma - E_\gamma \cdot \cos \varphi}{\sqrt{E_\gamma'^2 + E_\gamma^2 - 2 \cdot E'_\gamma \cdot E_\gamma \cdot \cos \varphi}}$$

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

Abhängigkeit der Energie des Streuphotons von der ursprünglichen Energie E_0



H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

Kinematik der Comptonstreuung

- Je mehr Energie das Comptonelektron erhält, desto kleiner ist sein Streuwinkel und desto größer ist die Ablenkung des gestreuten Photons
- Die um $\vartheta = \pi$ zurückgestreuten Photonen können keine höhere Energie als die halbe Elektronenruheenergie ($\frac{E_0}{2} = 255 \text{ keV}$) haben
- Aus diesem Grund ist der Energieübertrag von Photonen auf das Elektron bei Comptonstreuung ab einigen hundert keV besonders hoch

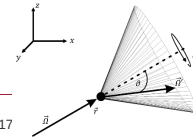
1. b) Wechselwirkung von Photonen Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

Winkelverteilung der Compton-Photonen:

- Die Energie des gestreuten Photons E'_γ wird durch Energie- und Impulserhaltung festgelegt
- Aus diesen Erhaltungssätzen folgt aber nicht, wie häufig welcher Streuwinkel auftritt
- Diese Häufigkeit wird durch den differentiellen Wirkungsquerschnitt $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ angegeben*

- Dieser Wirkungsquerschnitt, der die Winkelverteilung der Photonen angibt wurde 1929 von O. Klein und Y. Nishina ausgearbeitet und heißt deshalb der **Klein-Nishina-Wirkungsquerschnitt**

*Zur Erinnerung: Raumwinkelement $d\Omega = \sin \theta \, d\theta \, d\phi$



1. b) Wechselwirkung von Photonen Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

- Der Klein-Nishina-Wirkungsquerschnitt ist gegeben durch:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Klein-Nishina}}} = \frac{1}{2} r_e^2 \kappa (1 - \kappa \cdot \sin^2 \varphi + \kappa^2)$$

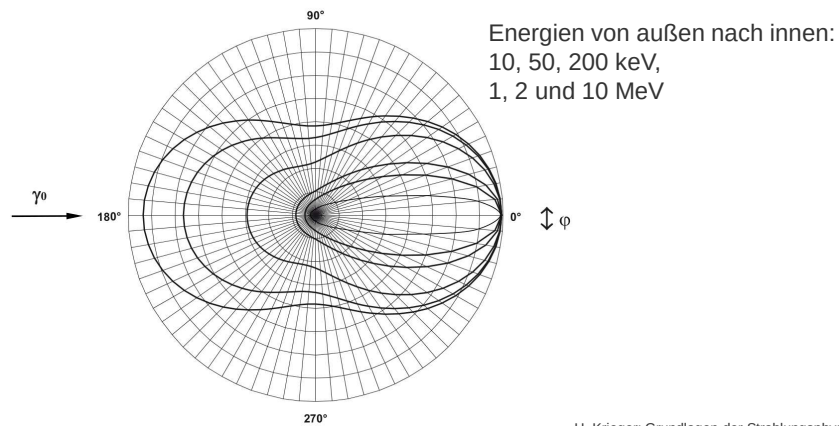
- mit $\kappa = \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} = \frac{1}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2} (1 - \cos \varphi)}$, der Elektronenmasse m und dem klassischen Elektronenradius r_e

- Für Energien, die klein gegenüber der Ruheenergie des Elektrons sind, gilt $\kappa \rightarrow 1$ und daraus folgt

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Klein-Nishina}}} \rightarrow \frac{1}{2} r_e^2 (1 + \cos^2 \varphi) = \frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Thomson}}}$$

1. b) Wechselwirkung von Photonen Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

Winkelverteilung der Compton-Streuquanten



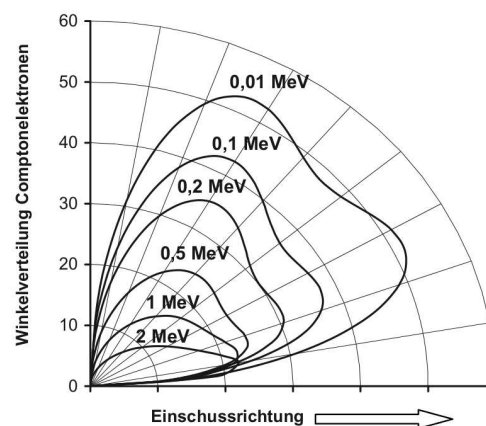
H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

41 | Forschungssektion für Biomedizinische Physik

© 02.05.2017 Universität Tübingen

1. b) Wechselwirkung von Photonen Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

Winkelverteilung der Comptonelektronen



H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

42 | Forschungssektion für Biomedizinische Physik

© 02.05.2017 Universität Tübingen



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Inkohärente Streuung: Comptonstreuung

Zusammenfassung:

- Wichtigster WW-Prozess über weite Energiebereiche
- Dominant in der Röntgendiagnostik und Strahlentherapie
- Es gilt

$$\sigma_{\text{inkoh}} \propto \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\sqrt{E_\gamma}}$$

- Proportional zur volumenbezogenen Elektronendichte
- Weitgehend unabhängig von der Ordnungszahl
- Die Bindung des Elektrons hat keinen großen Effekt auf die Energie-Streuwinkel-Beziehung, aber auf die Winkelverteilungen



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Die wichtigsten WW-Prozesse von Photonen

- Kohärente Streuung in der Atomhülle
Thomson-/Rayleigh-Streuung
- Inkohärente Streuung in der Atomhülle
Comptonstreuung
- **Vollständige Absorption in der Hülle**
Photoeffekt
- Vollständige Absorption im elektrischen Feld des Kernes
Paarbildung
- Vollständige Absorption im Atomkern
Kernphotoreaktionen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt

- Das einfliegende Photon stößt ein Elektron (Photoelektron) aus der inneren Schale der Atomhülle
- Der Photoeffekt findet vor allem bei niedrigen Photonenenergien statt ($< 100 \text{ keV}$) und Targets mit hoher Ordnungszahl
- Die gesamte Energie des Photons wird dabei auf das Elektron (K-, L- oder M-Schale) übertragen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt

- Die Energie des frei werdenden Elektrons ist die Differenz von Photonenenergie E_γ und Elektronenbindungsenergie E_b
- Dabei muss die Energie des Photons größer sein als die Bindungsenergie des Elektrons

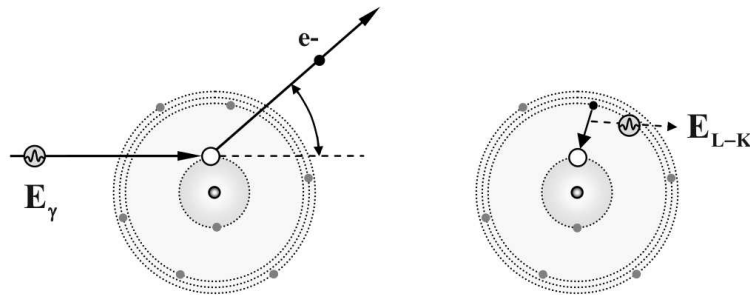
$$E_{\text{kin}} = E_\gamma - E_b(K, L, M, \dots) > 0$$

- Das entstandene Elektronenloch wird durch ein Elektron der äußeren Schale aufgefüllt
- Die Energiedifferenz wird dabei als Photon oder Auger-Elektron emittiert

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt

Schematische Darstellung des Photoeffekts



H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

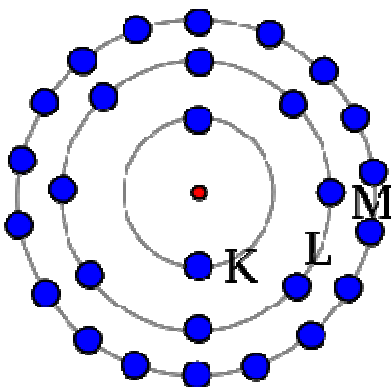
47 | Forschungssektion für Biomedizinische Physik

© 02.05.2017 Universität Tübingen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt

Wiederholung Schalenmodell (Bohr'sches Atommodell)



Nr. der Schale	Alternative Bezeichnung	Schalenbesetzung
1	K	2 Elektronen
2	L	8 Elektronen
3	M	18 Elektronen
4	N	32 Elektronen
5	O	50 Elektronen
6	P	72 Elektronen
7	Q	98 Elektronen

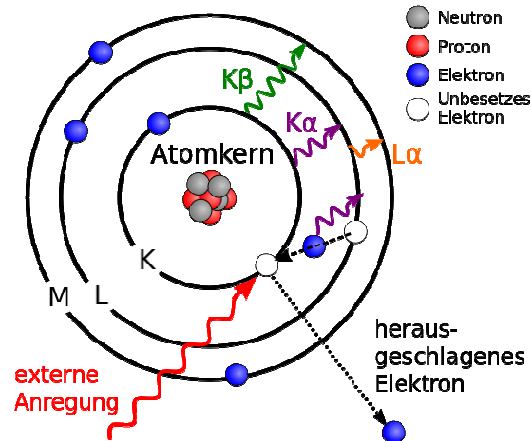
de.wikipedia.org

48 | Forschungssektion für Biomedizinische Physik

© 02.05.2017 Universität Tübingen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt



de.wikipedia.org

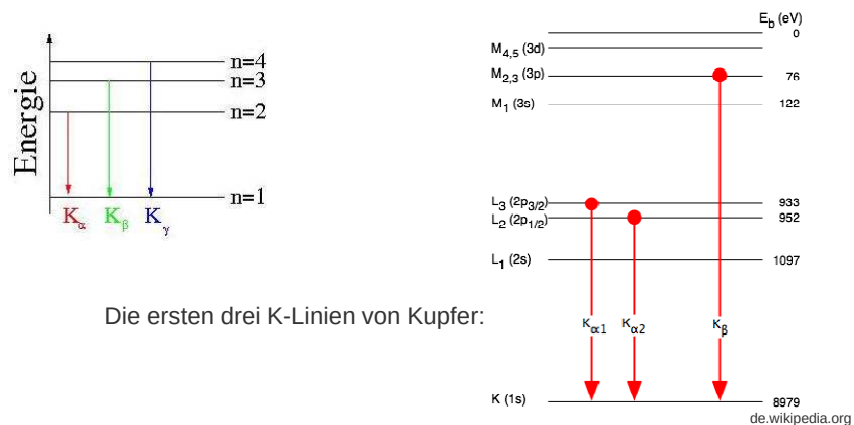
49 | Forschungssektion für Biomedizinische Physik

© 02.05.2017 Universität Tübingen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt

Entstehung der K_α , K_β und K_γ -Strahlung



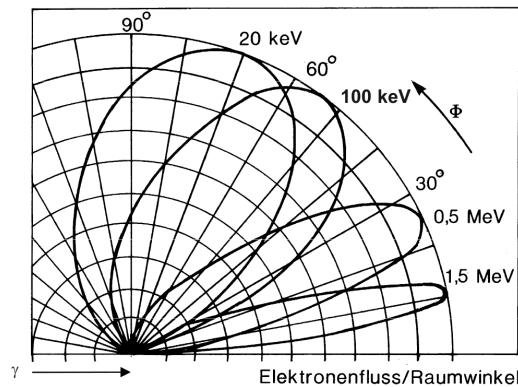
50 | Forschungssektion für Biomedizinische Physik

© 02.05.2017 Universität Tübingen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt

Winkelverteilung der Photoelektronen in Abhängigkeit der Photonenenergie



H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt

- Etwa 80% der Photowechselwirkungen finden an den K-Elektronen statt
- Die restlichen 20% verteilen sich auf die äußeren Schalen
- Die Ordnungszahlabhängigkeit des Photoeffekts ist gegeben durch

$$\sigma_{\text{Photo}} \propto \rho \cdot \frac{Z^{4-4,5}}{A}$$

mit der Massenzahl A



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt

- Die Energieabhängigkeit des Photoeffekts ist gegeben durch

$$\sigma_{\text{Photo}} \propto \rho \cdot \frac{Z^{n-1}}{E_\gamma^3} \quad \text{für } E_\gamma \ll 511 \text{ keV}$$

$$\sigma_{\text{Photo}} \propto \rho \cdot \frac{Z^{n-1}}{E_\gamma} \quad \text{für } E_\gamma \gg 511 \text{ keV}$$

- Die Wahrscheinlichkeit für eine Photoabsorption ist am höchsten wenn die Photonenenergie und die Bindungsenergie der Elektronenschale gleich sind
- Der Exponent n ist von der Ordnungszahl abhängig, für leichte Elemente gilt $n \approx 4,5$ und für schwere $n \approx 4$



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt

Konsequenzen für den Strahlenschutz in der Röntgendiagnostik:

- Für die kleinen Röhrenspannungen in der Röntgendiagnostik ist die Schutzwirkung von Blei oder Wolfram besonders hoch (hohe Ordnungszahl und Dichte)
- Strahlenschutzschürzen sind vor allem „Photoeffektschürzen“
- In Bauten kommt vorwiegend z.T. Barytbeton zum Einsatz, da Wolfram extrem schwer zu bearbeiten ist und Blei nicht standfest genug



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Photoeffekt - Zusammenfassung

- Beim Photoeffekt wird das einfallende Photon absorbiert und ein Photoelektron aus einer der inneren Schalen des Absorberatoms freigesetzt (bevorzugt K- oder L-Schale)
- Das Elektron übernimmt die ganze Photonenenergie
- Photoelektronen zeigen eine photonenergieabhängige Winkelverteilung
- Der Photoeffekt findet v.a. bei niedrigen Photonenenergien und hohen Ordnungszahlen statt
- Wichtiges Beispiel: Bleischürze für den Strahlenschutz in der Röntgendiagnostik.



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Die wichtigsten WW-Prozesse von Photonen

- Kohärente Streuung in der Atomhülle
Thomson-/Rayleigh-Streuung
- Inkohärente Streuung in der Atomhülle
Comptonstreuung
- Vollständige Absorption in der Hülle
Photoeffekt
- Vollständige Absorption im elektrischen Feld des Kernes
Paarbildung
- Vollständige Absorption im Atomkern
Kernphotoreaktionen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

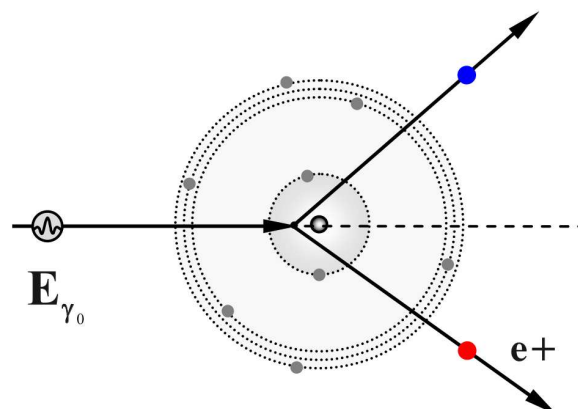
Paarbildung

- Photonen können mit elektrischem Feld geladener Teilchen (Atomkerne oder Elektronen) wechselwirken
- Im starken Coulombfeld des Kerns kann sich aus der Photonenenergie ein Elektron-Positron-Paar (e^- bzw. e^+) bilden
- Voraussetzung: die Photonenenergie muss das Energie-Masse-Äquivalent für zwei Elektronen übersteigen ($E_\gamma \geq 2 \cdot 511 \text{ keV}$)
- Die Photonenenergie verteilt sich auf die Ruhemasse des Teilchen-Antiteilchenpaares und die kinetische Energie der beiden Teilchen
- Das Photon wird vollständig absorbiert
- Der Atomkern bleibt unverändert, dient nur zur Impulserhaltung

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Paarbildung

Paarbildung im Coulombfeld des Atomkerns



H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

1. b) Wechselwirkung von Photonen

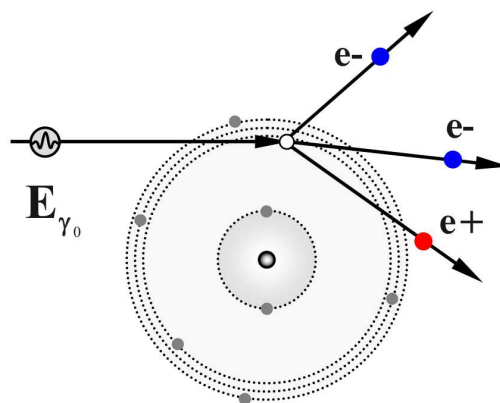
Paarbildung

- Das Photon kann auch im Coulombfeld eines Hüllenelektrons ein Elektron-Positron-Paar erzeugen
- Dieser Effekt tritt aber erst ab Photonenenergie von $E_\gamma \geq 4 \cdot m_0 \cdot c^2$ (2044 keV) auf
- Bei dieser Wechselwirkung wird zusätzlich das Hüllenelektron gelöst
- Es entsteht also ein Elektron-Positron-Paar und ein Elektron
- Aus diesem Grund wird dieser Effekt auch Triplettbildung genannt

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Paarbildung

Triplettbildung im Coulombfeld eines Hüllenelektrons



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Paarbildung

- Das Antiteilchen-Teilchen-Paar wird vorwiegend in der ursprünglichen Strahlrichtung emittiert
- Für die kinetische Energie des Antiteilchen-Teilchen-Paars gilt
$$E_{\text{kin}} = E_{\gamma} - 2 \cdot m_0 \cdot c^2 = E_{\gamma} - 1022 \text{ keV}$$
- Jedes Teilchen kann mit fast gleicher Wahrscheinlichkeit jede Energie bekommen, aber: die Restenergie wird nicht gleich verteilt
- Das Positron erhält wegen der Abstoßung vom Coulombfeld eine geringfügig höhere Energie als das Elektron
- Der Wirkungsquerschnitt der Paarbildung ist gegeben durch

$$\sigma_{\text{Paar}} = \rho \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot \ln E_{\gamma} \quad \text{mit } E_{\gamma} > 1022 \text{ keV}$$

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Paarbildung

Was geschieht mit dem entstandenen Elektron bzw. Positron?

- Beide Teilchen bewegen sich nach ihrer Entstehung durch den Absorber
- Durch Vielfachstöße geben sie ihre Bewegungsenergie an das umgebende Material ab
- Kommt das Positron dann zur Ruhe (oder beinahe) rekombiniert es mit einem Hüllenelektron (Annihilation)
- Bei Rekombination wird die Ruhemasse beider Teilchen in zwei Photonen umgewandelt, in der Regel zwei 511-keV-Photonen, sogenannte Vernichtungsstrahlung

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Paarbildung

Vernichtungsstrahlung:

- Diese beiden Photonen werden unter einem Winkel von 180° zueinander abgestrahlt
- Bei einer Vernichtung vor der vollständigen Abbremsung spricht man auch von „Vernichtung im Fluge“
- D.h. die restliche Bewegungsenergie des Positrons wird in Photonenenergie umgewandelt
- Die Vernichtungsstrahlung verlässt endliche Absorber, trägt also nicht zur lokalen Entstehung von Energiedosis bei

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Paarbildung

Zusatz:

- Vor der Annihilation kann ein Positroniumatom entstehen
- Ein Positroniumatom besteht aus einem Elektron und einem Positron
- Lebensdauer: wenige ns
- danach annihilieren Positron und Elektron
- Man unterscheidet Ortho- und Parapositronium
- Orthopositronium: Spin des Elektrons und Positrons jeweils $\frac{1}{2}$, also Gesamtspin 1
- Parapositronium: Spin des Elektrons und Positrons sind entgegen gerichtet, sodass sich ein Gesamtspin von 0 ergibt



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Paarbildung - Zusammenfassung

- Bei der Paarbildung wird im elektrischen Feld des Kerns spontan ein Elektron-Positron-Paar gebildet
- Dabei besteht eine Energieschwelle von 1022 keV
- Der Atomkern bleibt unverändert, er dient nur zur Impulserhaltung
- Bei der Elektron-Positron-Paarbildung *im Feld des Hüllenelektrons* liegt die Energieschwelle bei 2044 keV
- Das Positron zerstrahlt nach seiner Abbremsung bei der Rekombination mit einem Elektron zu zwei Vernichtungsgammaquanten mit einer Energie von je 511 keV
- Findet die Paarvernichtung in Ruhe statt, werden die beiden Quanten unter 180° zueinander abgestrahlt



1. b) Wechselwirkung von Photonen

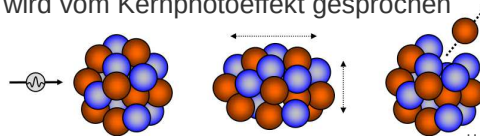
Die wichtigsten WW-Prozesse von Photonen

- Kohärente Streuung in der Atomhülle
Thomson-/Rayleigh-Streuung
- Inkohärente Streuung in der Atomhülle
Comptonstreuung
- Vollständige Absorption in der Hülle
Photoeffekt
- Vollständige Absorption im elektrischen Feld des Kernes
Paarbildung
- Vollständige Absorption im Atomkern
Kernphotoreaktionen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kernphotoreaktionen

- Photonen können mit den Nukleonen in Atomkernen aufgrund ihrer elektromagnetischen Eigenschaften wechselwirken
- Dabei wird die Energie des einfallenden Photons absorbiert
→ Anregung des Kerns
- Ist diese Energie groß genug, können Kernteilchen (Neutronen n, Protonen p) freigesetzt werden
- Die Schwellenenergie liegt für die meisten Elemente zwischen 6 und ~20 MeV
- Aufgrund der Absorption des Photons und der Emission eines Teilchens wird vom Kernphotoeffekt gesprochen



H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kernphotoreaktionen

Reaktions- und Zerfallsdaten für Kernphotoreaktionen

Reaktion	Schwelle (MeV)	Tochter nuklid	Zerfallsart	T _{1/2}	E _γ (keV)
¹² C(γ,n)	18,7	¹¹ C*	β+,EC	20,4 min	511
¹⁴ N(γ,n)	10,5	¹³ N*	β+	9,96 min	511
¹⁶ O(γ,n)	15,68	¹⁵ O*	β+,EC	122 s	511
¹⁶ O(γ,2n)	28,9	¹⁴ O*	β+,γ	70,6 s	511,2313
²⁷ Al(γ,n)	12,7	²⁶ Al*	β+,EC,γ	6,4 s	511,1810
⁶³ Cu(γ,n)	10,8	⁶² Cu*	β+,EC	9,73 min	511
²⁰⁸ Pb(γ,n)	7,9	²⁰⁷ Pb	stabil	-	-
¹² C(γ,p)	16,0	¹¹ B	stabil	-	-
¹⁶ O(γ,p)	12,1	¹⁵ N	stabil	-	-
²⁷ Al(γ,p)	8,3	²⁶ Mg	stabil	-	-
⁶³ Cu(γ,p)	6,1	⁶² Ni	stabil	-	-
²⁰⁸ Pb(γ,p)	8,0	²⁰⁷ Tl*	β-	4,8 min	-

*: radioaktives
Tochter nuklid
EC: Elektronen-
Einfang

H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kernphotoreaktionen

- Die wichtigsten Kernphotoreaktionen sind die (γ, n) -, $(\gamma, 2n)$ und (γ, p) -Reaktionen
- Bei schweren Kernen wie Uran kann es auch zur Spaltung kommen → Photospaltung
- Bei den Photonenenergien bei denen keine Teilchenemission stattfindet, geht der angeregte Atomkern durch Emission von Gammaquanten wieder in den Grundzustand über (γ , γ')
- Die Atomkerne werden durch die Störung des Neutronen-Protonen-Gleichgewichts durch die Teilchenemission häufig radioaktiv



1. b) Wechselwirkung von Photonen

Kernphotoreaktionen

- Wegen der individuellen Nukleonenkonfiguration der einzelnen Isotope gibt es keine einfachen Zusammenhänge, die für den Wirkungsquerschnitt σ_{Kernp} anzugeben sind
- σ_{Kernp} ist in erster Näherung unabhängig von der Ordnungszahl
- Kernphotoreaktionen können zur Aktivierung von Strukturmaterial (Neutronenaktivierung) oder der Luft (kurzlebige Positronenstrahler) in Bestrahlungsräumen führen

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Wirkungsquerschnitte

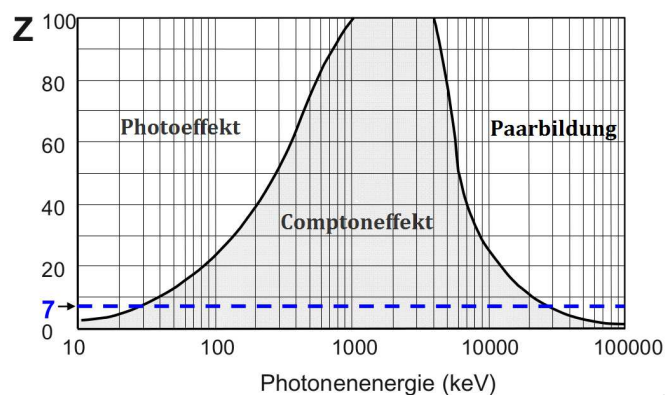
Übersicht:

- Kohärente Streuung: $\sigma_{\text{koh}} \propto \rho_{e,V} \cdot \frac{Z^{1,5}}{E_\gamma^2}$
- Comptoneffekt: $\sigma_{\text{inkoh}} \propto \rho_{e,V} \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{E_\gamma}}$
- Photoeffekt: $\sigma_{\text{Photo}} \propto \rho_{e,V} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{Z^{4-4,5}}{E_\gamma^{3-1}}$
- Paarbildung: $\sigma_{\text{Paar}} \propto \rho_{e,V} \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot \ln E_\gamma$

1. b) Wechselwirkung von Photonen

Proportionalitäten

Grafische Darstellung der Wechselwirkungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Energie und Ordnungszahl



Die blaue Linie mit $Z=7$ entspricht Gewebe, Wasser und Phantommaterial



Literatur:

- H. Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik
- W. Stolz: Radioaktivität – Grundlagen
- B. Dörschel: Praktische Strahlenschutzphysik