



Wisselwerking Straling en Materie

Cursus Stralingsveiligheid CD 2023–2024

M.A. Hofstee

mariet.hofstee@maastrichtuniversity.nl

Hoofdstuk 6.1 – 6.5

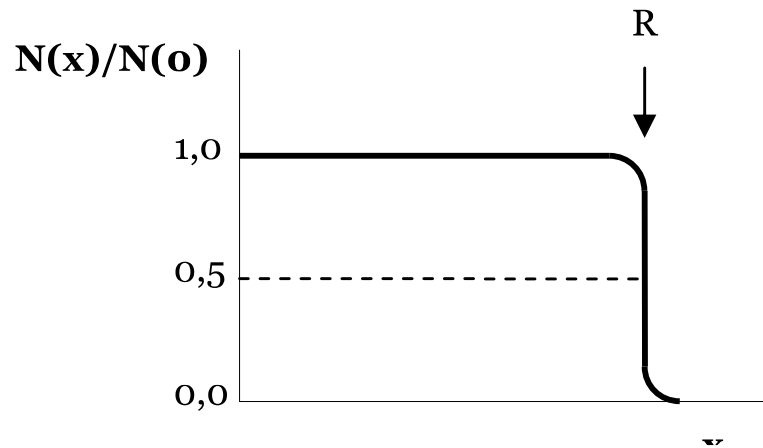
Fluëntie en flux

- ▶ Onder fluëntie (Φ) verstaat men het aantal deeltjes of fotonen dat per eenheid van oppervlak passeert.

$$\Phi(R) = \frac{N}{4\pi R^2} \quad (\text{m}^{-2})$$

- ▶ Met flux bedoelt men het totale aantal deeltjes dat door een bron per eenheid van tijd wordt uitgezonden.
- ▶ fluëntietempo = fluxdichtheid

massieke energieverlies en dracht



$$S(E) = -\frac{dE}{dx}$$

$$\frac{1}{S(E)} = \frac{dR}{dE} \approx \frac{R(E + \Delta E) - R(E)}{\Delta E} \quad (m J^{-1})$$

$$\rho_1 R_1 = \rho_2 R_2 \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}$$

$$\rho_1 R_1 = 3.2 \cdot 10^{-4} \sqrt{A_1} R_{\text{lucht}}$$

R in cm

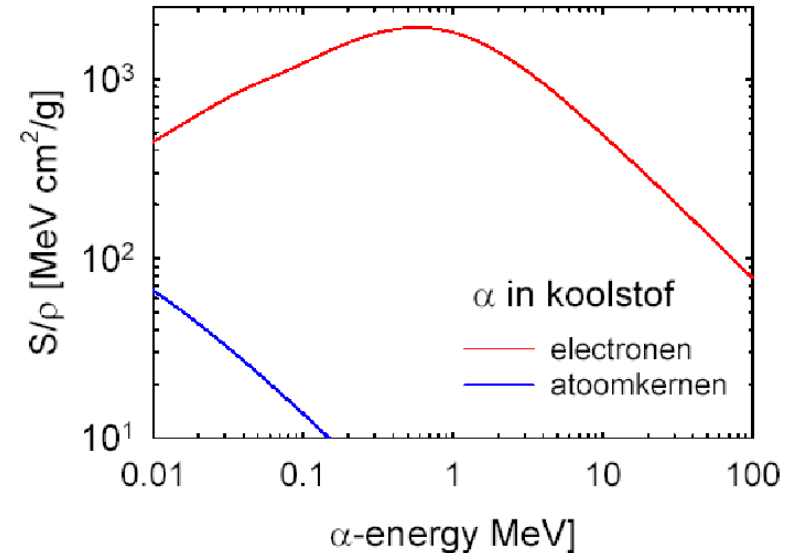
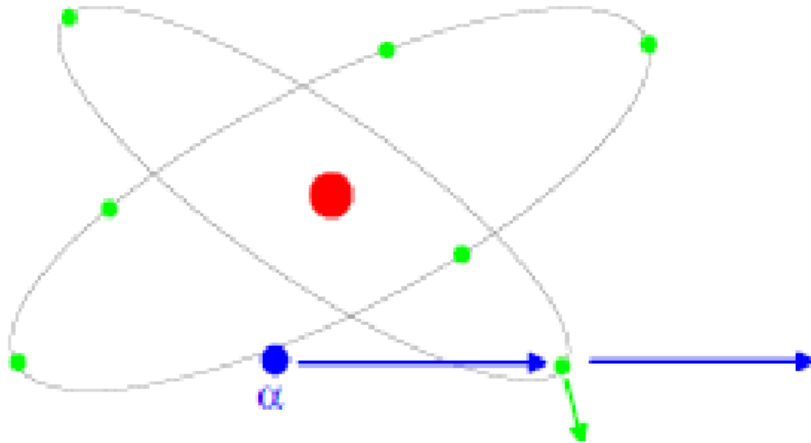
ρ in g/cm³

Mengsels:

$$\frac{1}{\sqrt{A_{\text{eff}}}} = \sum_i \frac{f_i}{\sqrt{A_i}}$$

Met f_i de massa-fractie

Alphas en protonen



$$R_{\alpha,L}(E) = (0,005 E + 0,285) E^{3/2} \quad (2 \text{ MeV} < E < 100 \text{ MeV})$$

$$(2 \text{ MeV} < E < 100 \text{ MeV})$$

$$R_{\alpha,L}(E) = 0,3 E^{3/2} \quad (2 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV})$$

$$(2 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV})$$

Dracht 5 MeV alpha in lucht: 3.4 cm

$$R_{p,L}(E) = 100 \left(\frac{E}{9,3} \right)^{1,8}$$

$$(1 \text{ MeV} < E < 200 \text{ MeV})$$

Protonen

De dracht van 200 MeV protonen in lucht:

$$R_{p,L}(E) = 100 \left(\frac{E}{9,3} \right)^{1,8} \quad (1 \text{ MeV} < E < 200 \text{ MeV})$$

$$\rho_L = 1,25 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3} \text{ (15 } ^\circ\text{C, 1 atm)}$$

Met $E = 200 \text{ MeV} \Rightarrow R_{p,L} = 250 \text{ m}$
 Hoe groot is de dracht in water?

$$\rho_1 R_1 = 3,2 \cdot 10^{-4} \sqrt{A_1} R_{\text{lucht}}$$

$$A_{\text{water}} = 9 \Rightarrow R_{\text{water}} = 25 \text{ cm}$$

Conclusie:

Water vs. Lucht ongeveer factor 1000

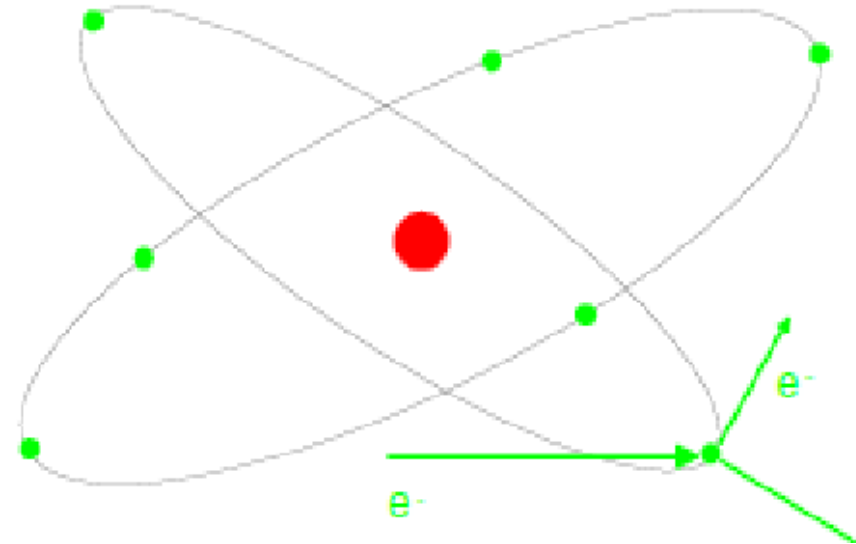
betas

Botsingen en Remstraling

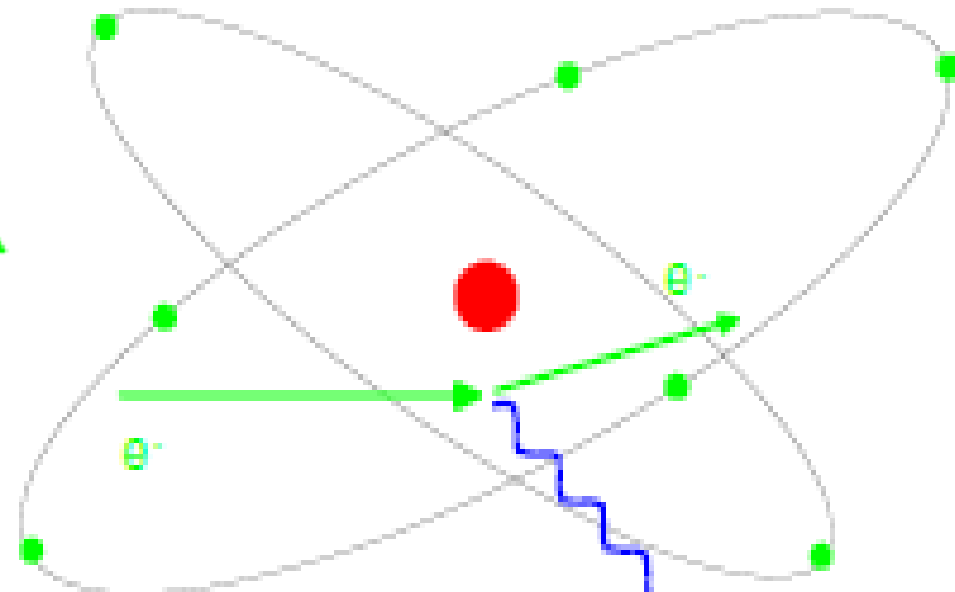
g = remstralings-fractie

$$g = 6 \times 10^{-4} ZE$$

$$g = 2 \times 10^{-4} ZE_{\beta, \max}$$



$$\left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{remstraling}} \approx \frac{EZ}{800} \times \left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{botsingen}}$$



foton E_f

Oefening

Bereken de omzettingsfactor g voor remstraling in het geval dat de β -straling van het radionuclide ^{32}P ($E_{\beta,\text{max}} = 1,71 \text{ MeV}$) gestopt wordt in

- a aluminium ($Z = 13$)
- b koper ($Z = 29$)
- c lood ($Z = 82$)

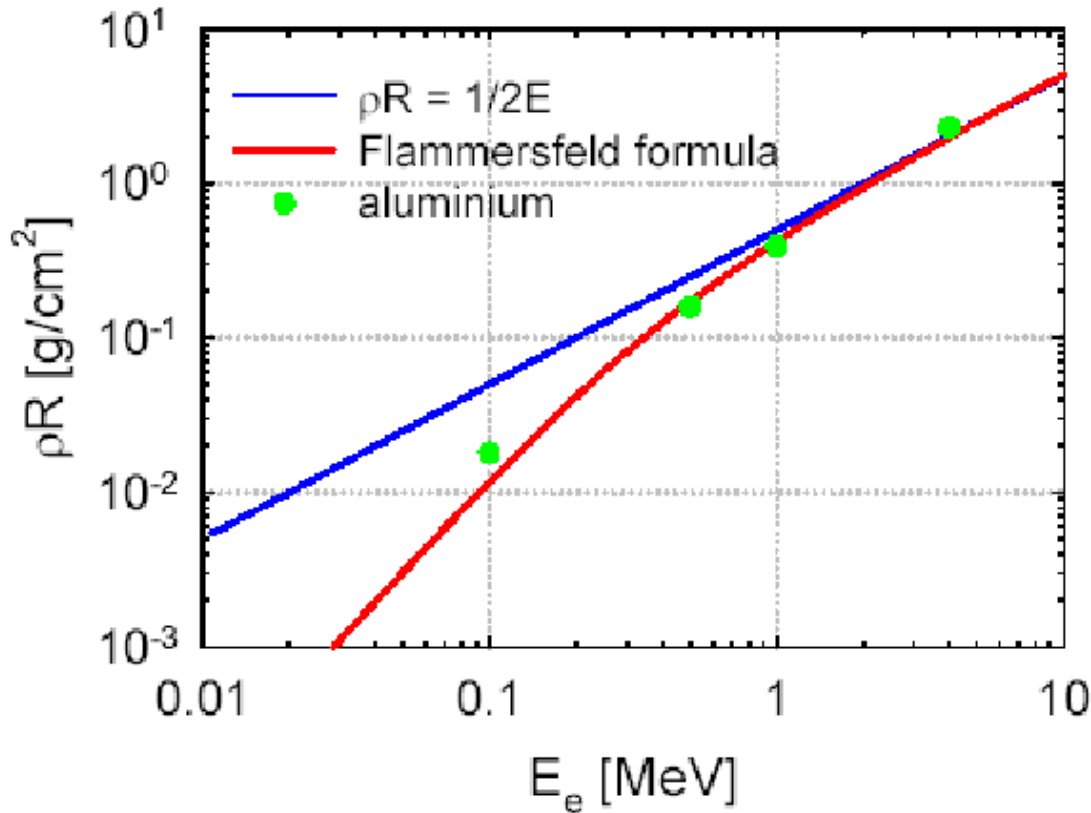
$$g = 2 \times 10^{-4} Z E_{\text{max}}$$

- a $2 \times 10^{-4} \times 13 \times 1,71 = 0,004$
- b $2 \times 10^{-4} \times 29 \times 1,71 = 0,010$
- c $2 \times 10^{-4} \times 82 \times 1,71 = 0,028$

Conclusie:

Lichte materialen geven minder remstraling

dracht van electronen

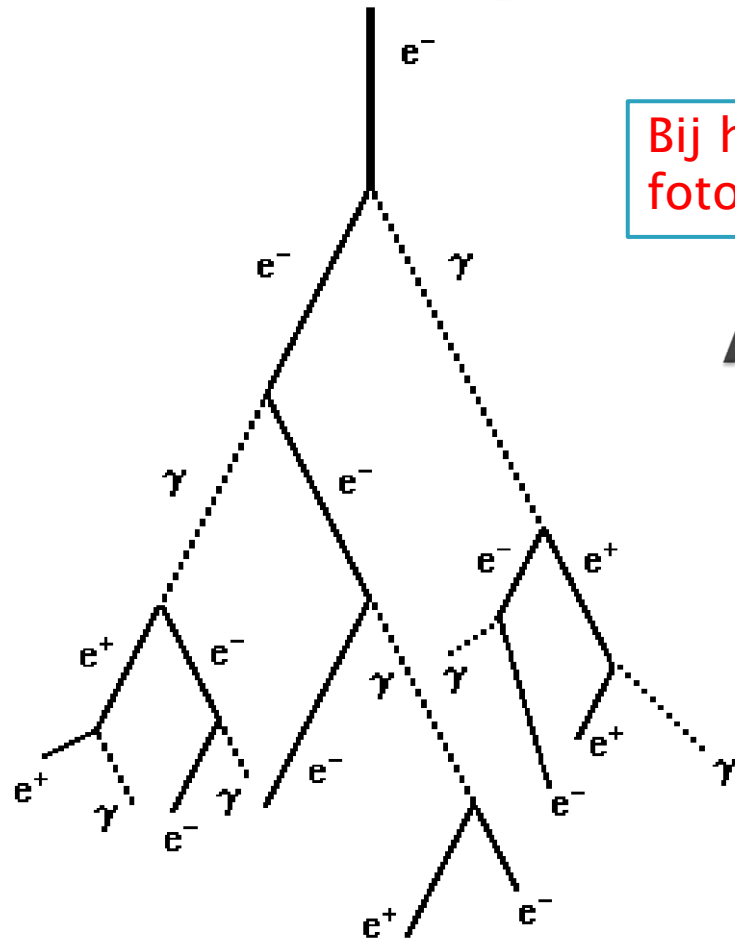


$$R_e(E) \rho = 0,11 \left(\sqrt{1 + 22,4 E^2} - 1 \right) \quad (0,05 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV})$$

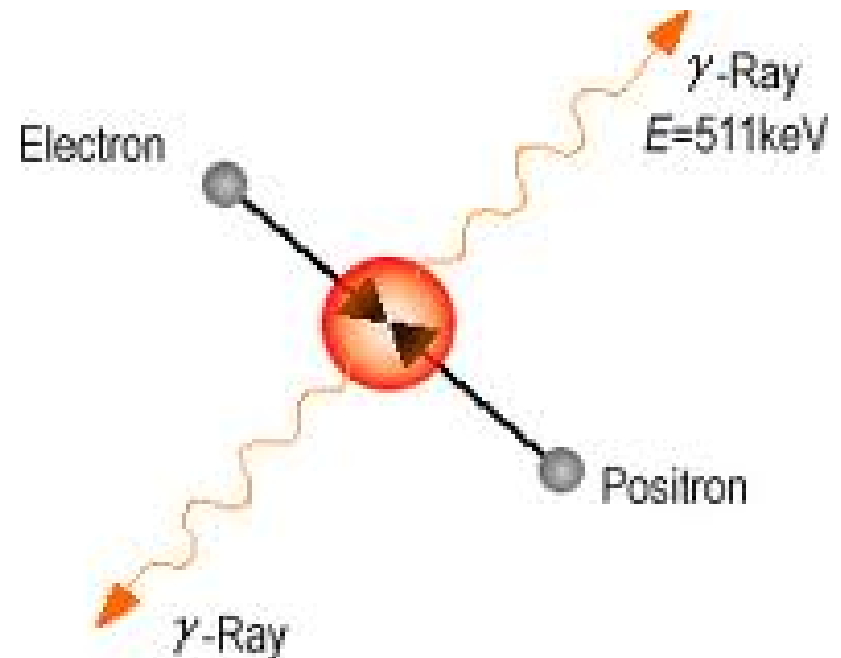
$$R_e(E) \rho = 0,5 E \quad (0,5 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV})$$

Electromagnetische cascade

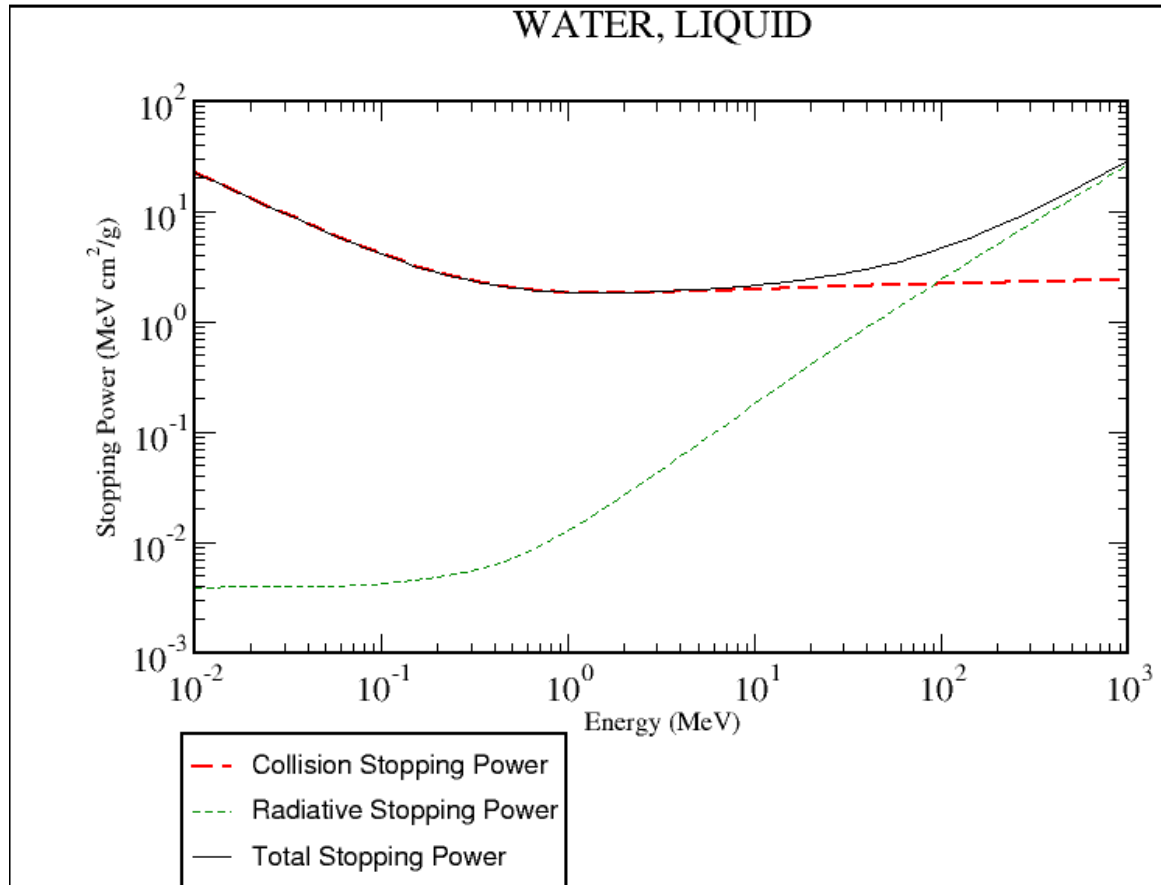
Bij hoge energie zijn zowel elektronen als fotonen belangrijk



Annihilatie straling

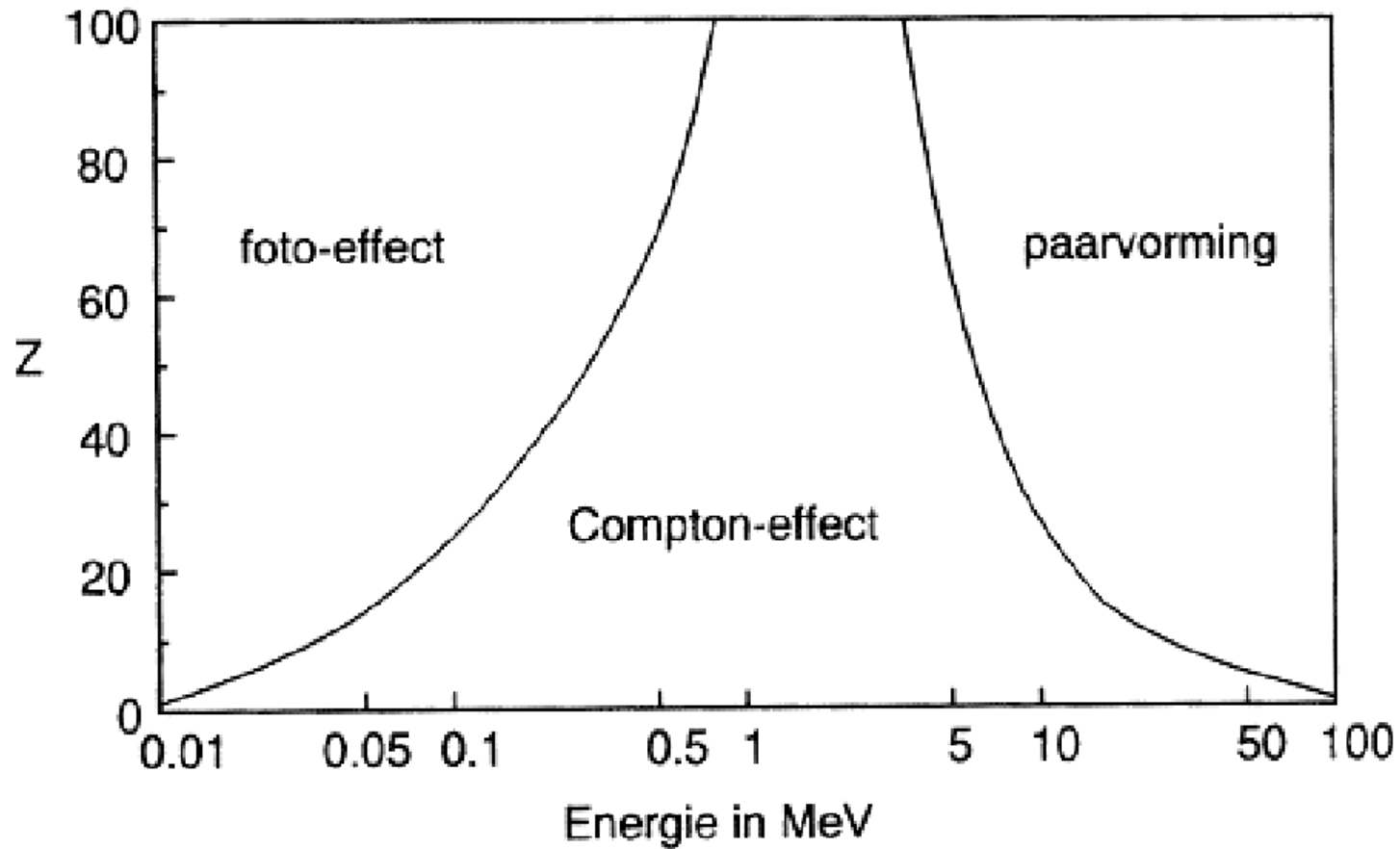


Lineieke Energieverlies



$$S(E) = - \frac{dE}{dx} \quad (J m^{-1})$$

Fotonen



mechanisme

massieke verzwakingscoëfficiënt

Rayleigh-verstrooiing

$$E_f^{-2}$$

Z

foto-elektrisch effect

$$E_f^{-3}$$

Z⁴

Compton-effect

zwakke afhankelijkheid

paarvorming

drempel = 1,022 MeV

Z

Conclusie:

Hoogst mogelijke Z gebruiken (Lood)

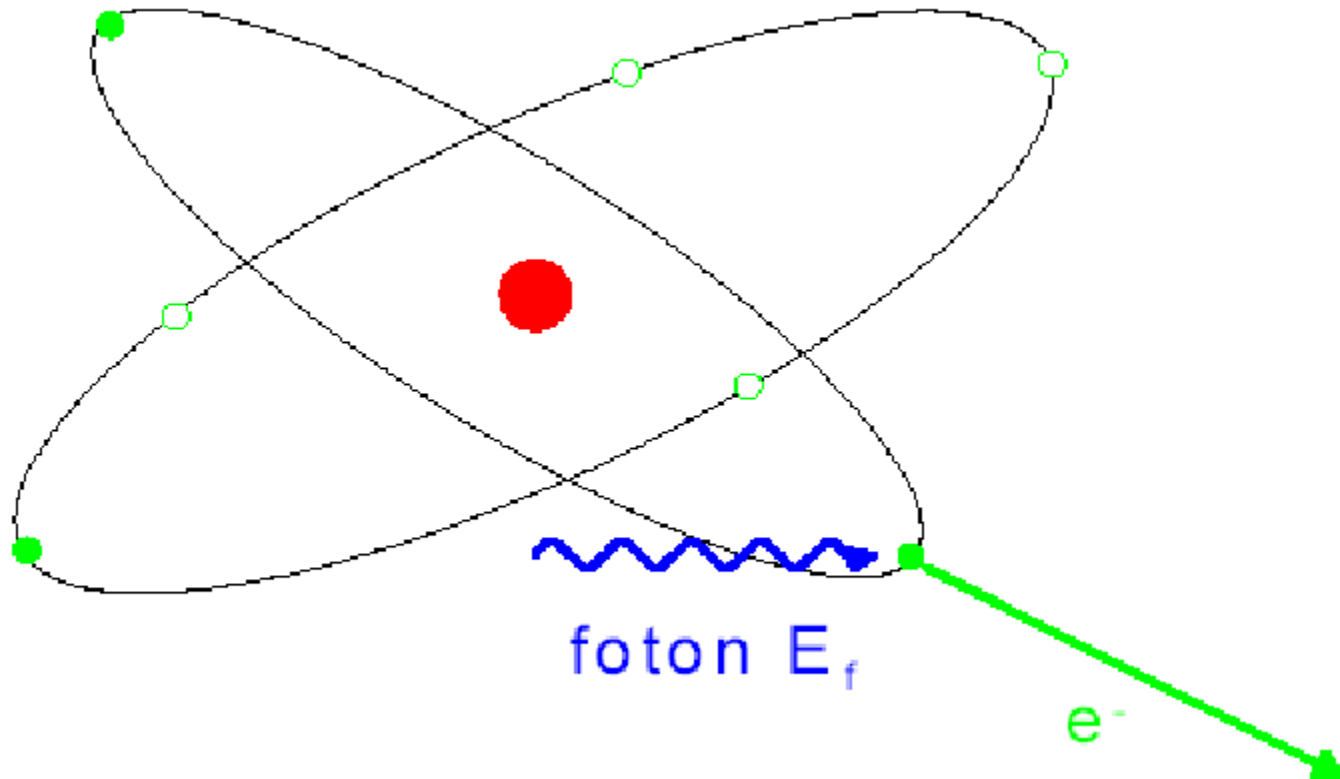
Massieke verzwakkingscoefficient

Mengsels

$$\mu / \rho = \sum_i f_i (\mu / \rho)_i$$

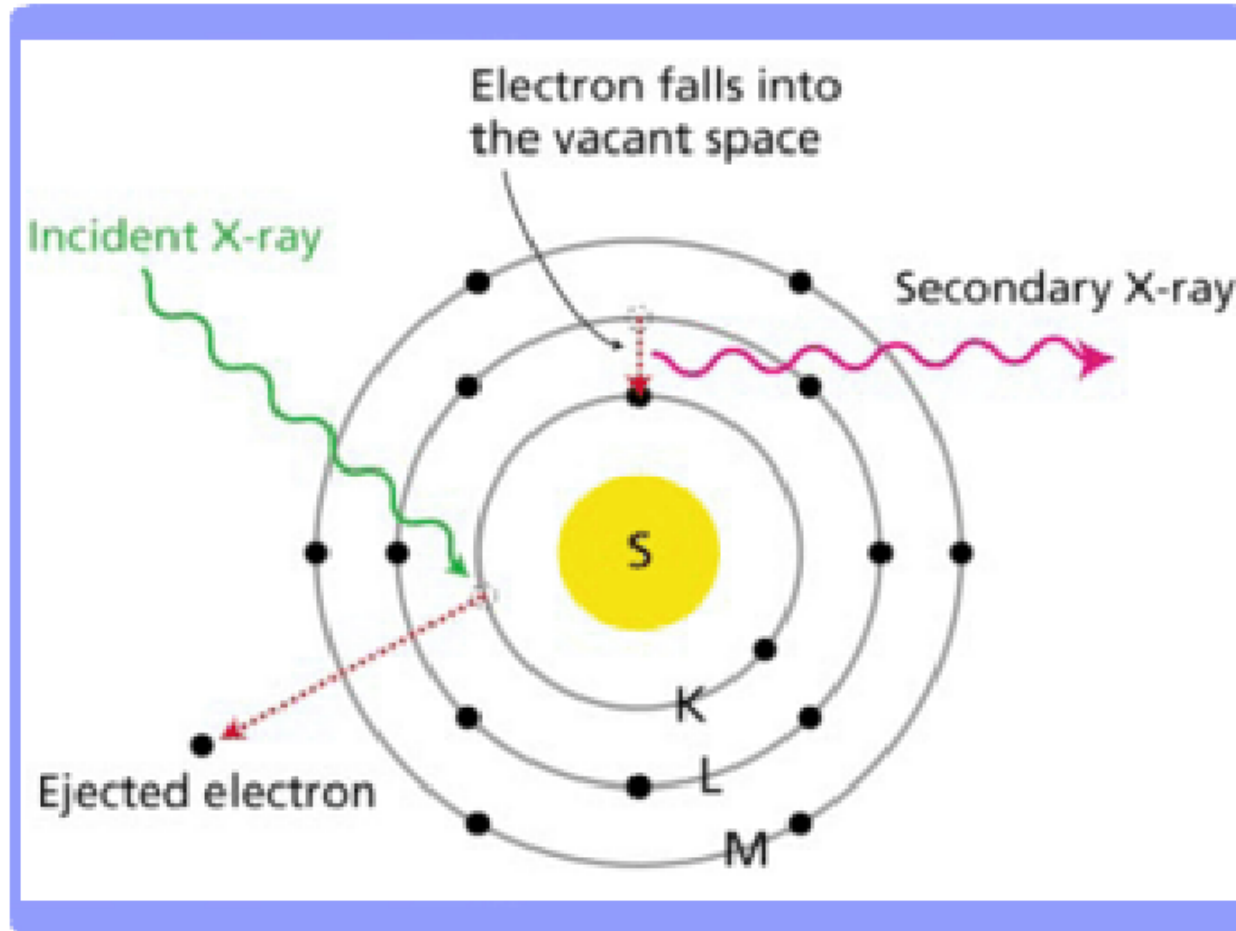
Voor foto-effect:
$$Z_{\text{eff}}^n = \sum_i f_i Z_i^n$$

Fotoelectrisch Effect

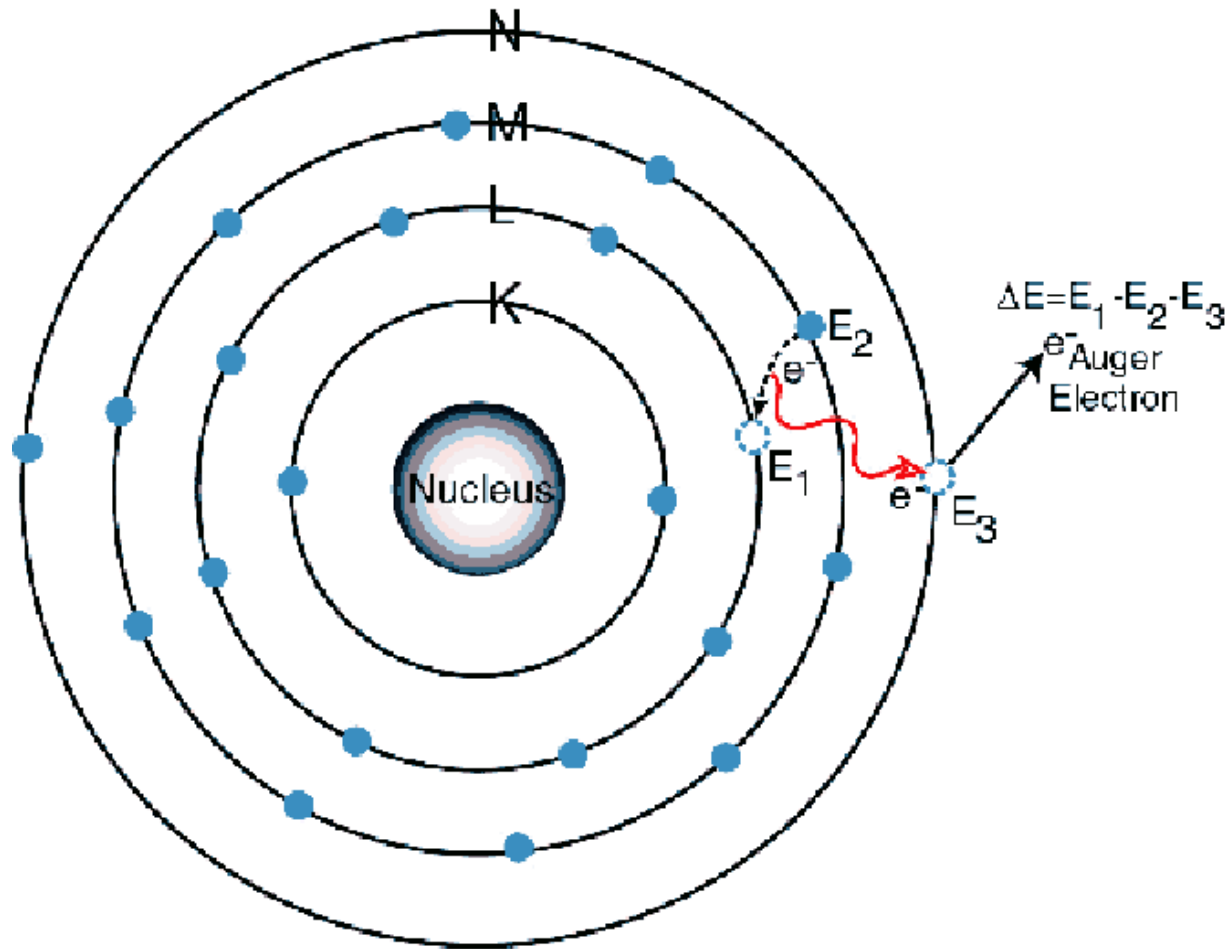


$$E_e = E_f - |B_e|$$

X-ray Fluorescentie

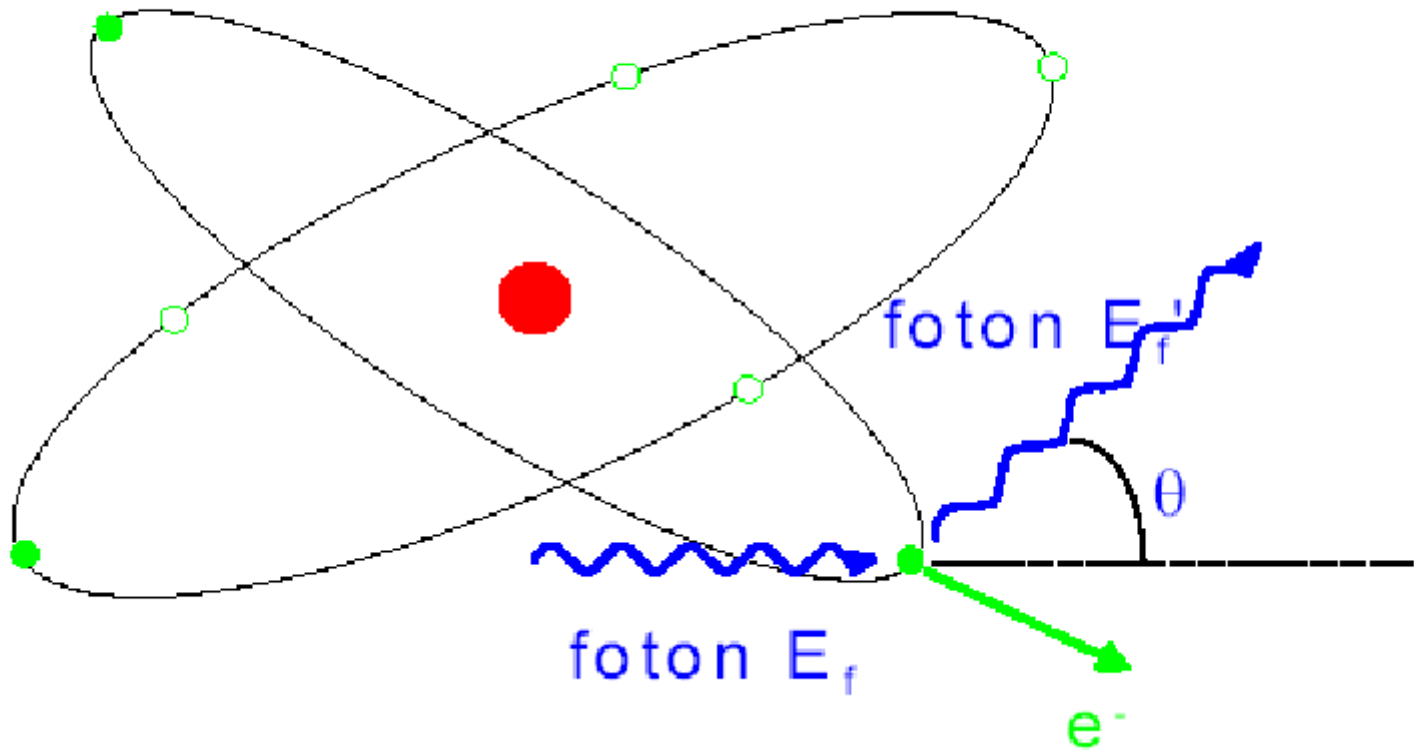


Auger Electron



Compton Verstrooing

$$E'_f = \frac{E_f}{1 + \frac{E_f}{0,511} [1 - \cos(\theta)]}$$



$$E_e = E_f - E'_f$$

Oefening



Een foton met een energie van 10 MeV wordt over een hoek θ verstrooid.

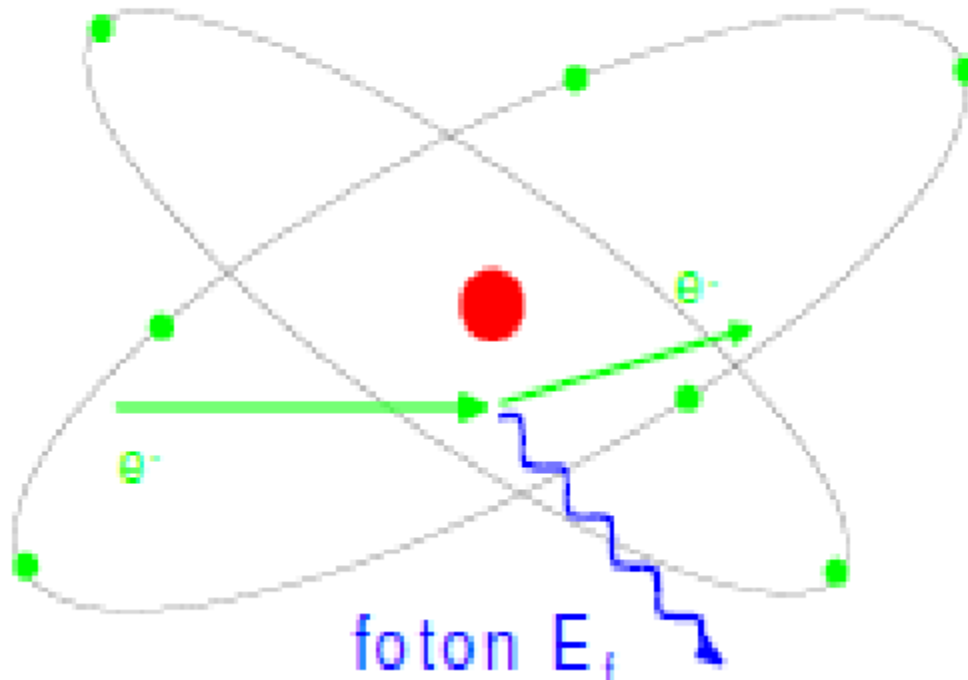
- a bereken de de energie van het verstrooide foton als $\theta = 10^\circ$
- b bereken de de energie van het verstrooide foton als $\theta = 90^\circ$
- c bereken de de energie van het verstrooide foton als $\theta = 180^\circ$

de Compton-formule luidt

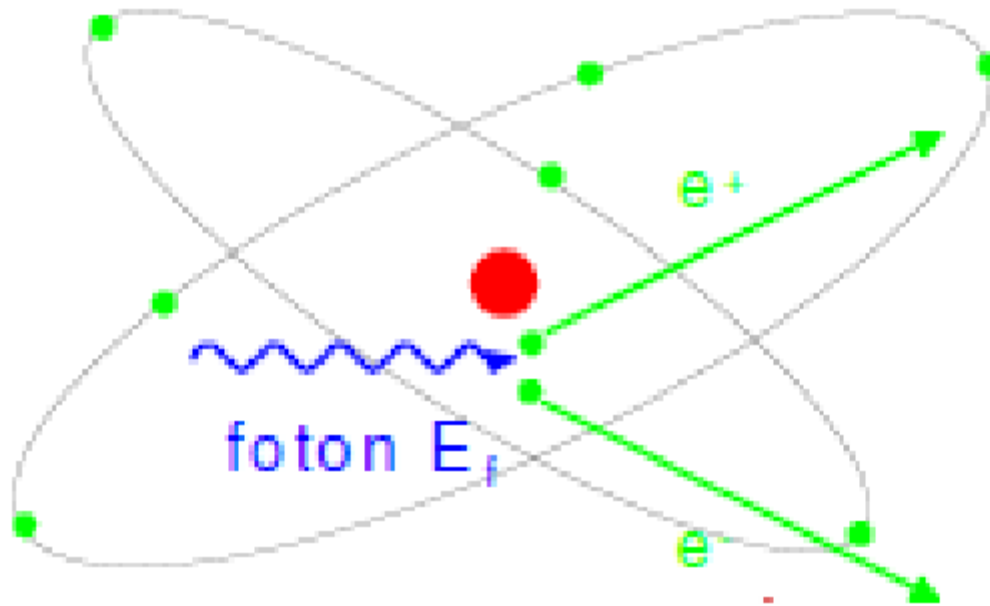
$$E'_f = \frac{E_f}{1 + \frac{E_f}{0,511} [1 - \cos(\theta)]}$$

- a $\theta = 10^\circ$ $\cos(10^\circ) = 0,985$
 $E' = 10 \text{ MeV} / [1 + (10 / 0,511)(1 - 0,985)] = 7,73 \text{ MeV}$
- b $\theta = 90^\circ$ $\cos(90^\circ) = 0$
 $E' = 10 \text{ MeV} / [1 + (10 / 0,511)(1 - 0)] = 0,49 \text{ MeV}$
- c $\theta = 180^\circ$ $\cos(180^\circ) = -1$
 $E' = 10 \text{ MeV} / [1 + (10 / 0,511)(1 + 1)] = 0,25 \text{ MeV}$

Ter vergelijking Remstraling



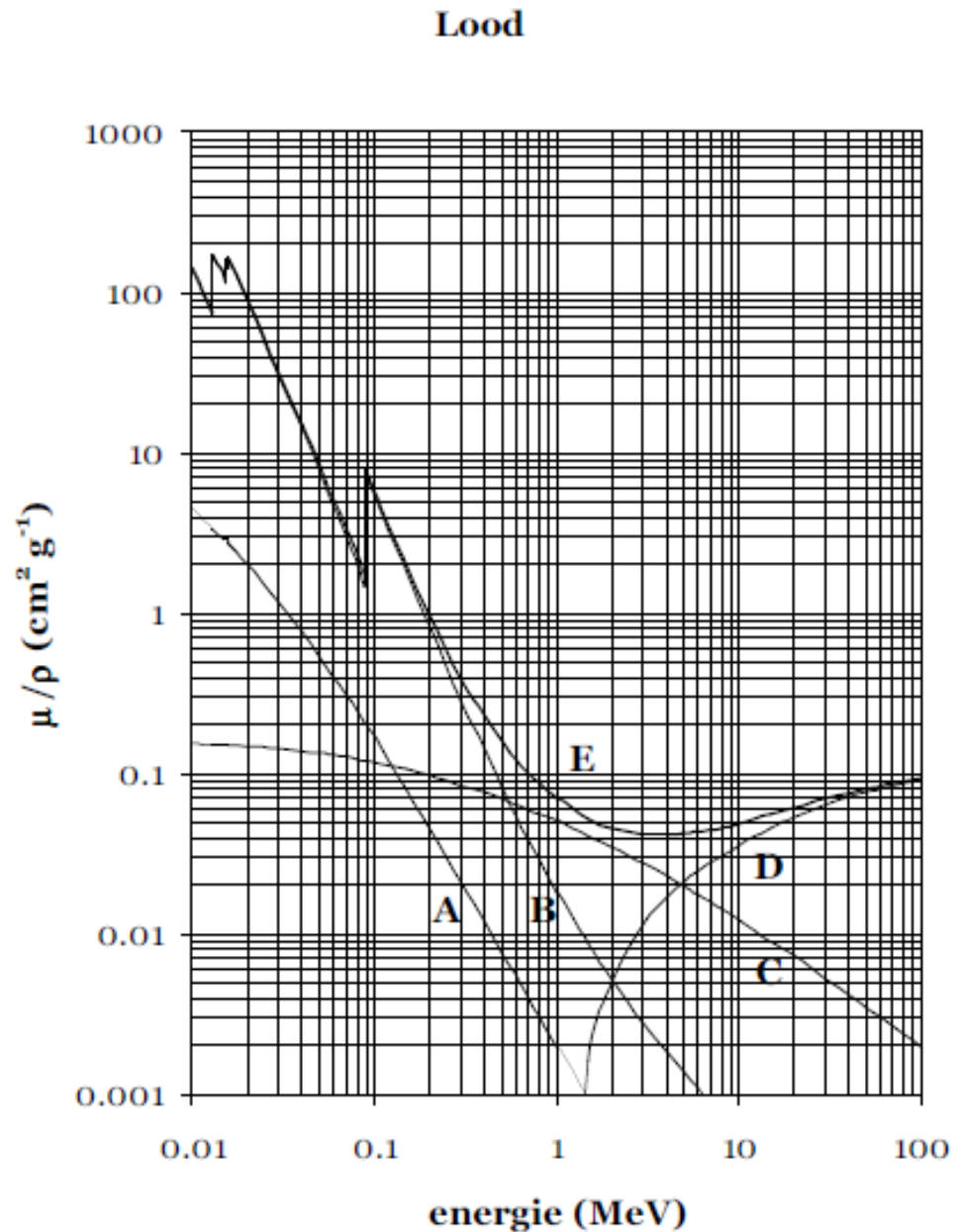
Paarvorming



$$E_{e^+e^-} = E_{foton} - 1,022$$

Massieke verzwakkings coefficient

- ▶ A Rayleigh
- ▶ B Fotoelectrisch
- ▶ C Compton
- ▶ D Paarvorming
- ▶ E = Totaal



Oefening



Een van de natuurlijk voorkomende radionucliden is ^{208}Tl dat een γ -foton met een energie van 2,6 MeV uitzendt.

- a bereken de relatieve bijdragen van foto-effect, Compton-effect en paarvorming tot de verzwakking van deze γ -straling in lood

aanwijzing: maak gebruik van de gegevens in appendix A5

- a volgens formule (6.10) van de syllabus is de verzwakking (= aantal wisselwerkingen) evenredig met μ

aflezen appendix A5 geeft:

foto-effect	$\mu_f / \rho = 0,0035 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$	$\mu_f / \sum \mu = 0,084 = 8,4\%$
Compton-wisselwerking	$\mu_c / \rho = 0,030 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$	$\mu_c / \sum \mu = 0,723 = 72,3\%$
paarvorming	$\mu_p / \rho = 0,008 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$	$\mu_p / \sum \mu = 0,193 = 19,3\%$
totaal	$\sum \mu / \rho = 0,0415 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$	

Samenvatting

- ▶ Dracht 5 MeV alpha in lucht: 3.4 cm
- ▶ Dracht 200 MeV proton in Water 25 cm
- ▶ Zware deeltjes: Water vs. Lucht ongeveer factor 1000 (1220 op zeeniveau).
- ▶ Betas/electronen: Lichte materialen geven minder remstraling
- ▶ Fotonen: Hoogst mogelijke Z gebruiken
- ▶ Bij hoge energie zijn zowel fotonen als elektronen belangrijk!