



Neutronen

Cursus CD RuG 2025-2026

Douwe Siegersma
(CD, SBE UMCG)

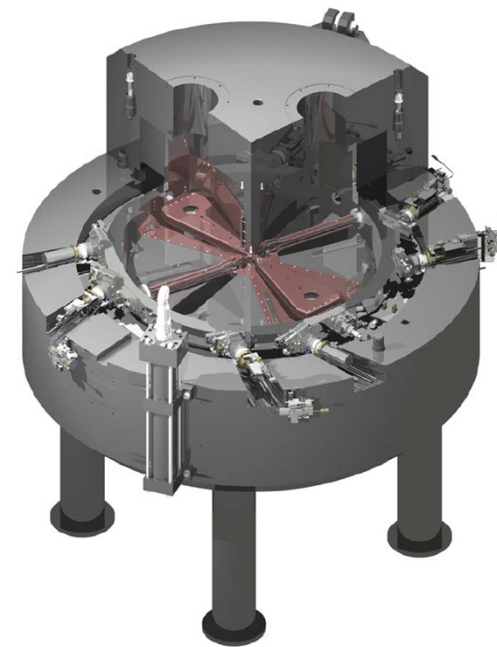
Gebaseerd op het materiaal van Emiel van der Graaf
(PARTREC/UMCG), waarvoor dank.

umcg

UMCG en neutronen

Bijproduct rondom versnellers

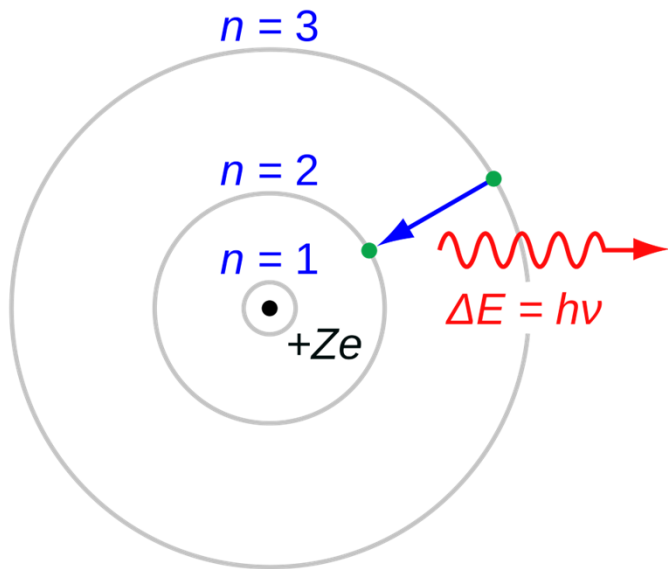
- Cyclotrons
 - (p,n)
- Linacs:
 - (röntgen,n)
 - (e,e'n)



Indeling

- Ontdekking van het neutron
- Eigenschappen & begrippen
- Neutronenbronnen [\(H6.6.1\)](#)
- Classificatie van neutronen [\(H6.6.3\)](#)
- Energieoverdracht [\(H6.6.2\)](#)
- Neutronenactivering [\(H6.6.4\)](#)
- Dosimetrie [\(H7.5\)](#)
- Afscherming [\(H12.6\)](#)
- Detectie [\(H11.6.2\)](#)
- Skyshine [\(H12.7\)](#)
- Examenopgaven

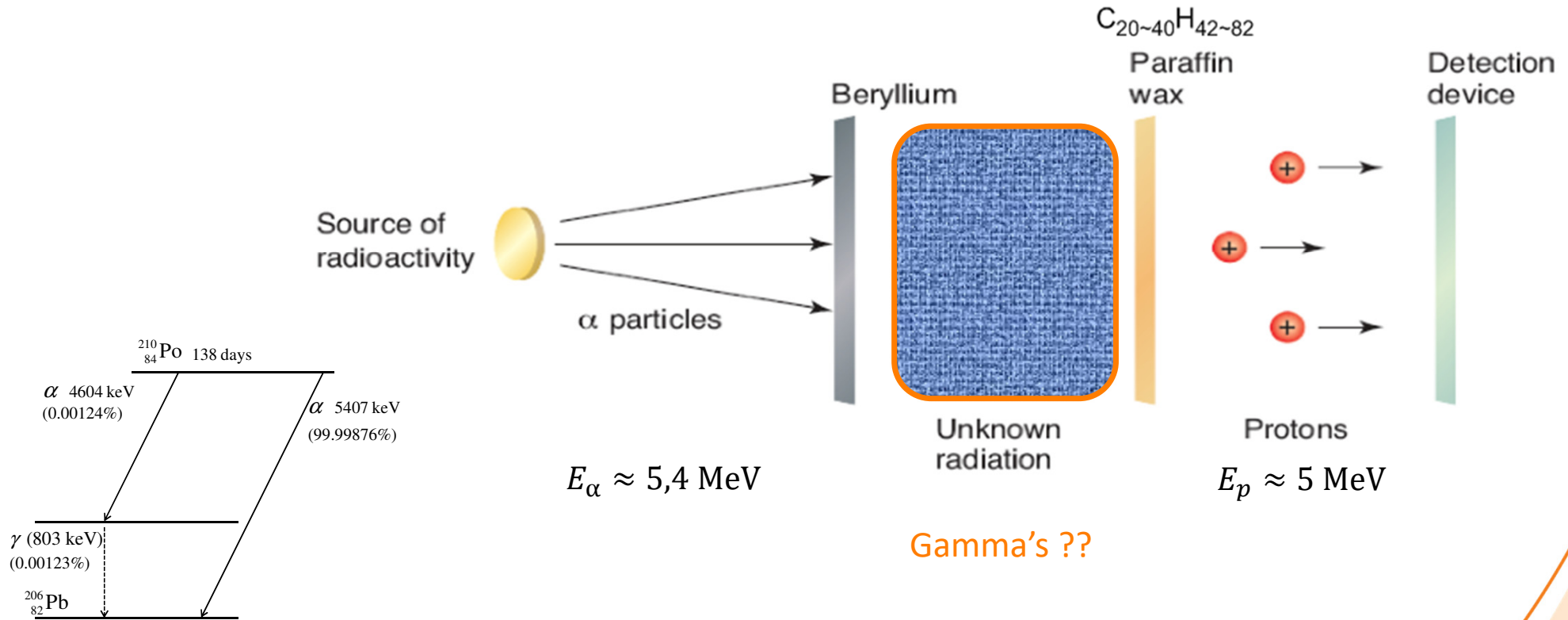
Ontdekking van neutronen



Atoommodel Bohr (1910-1920)

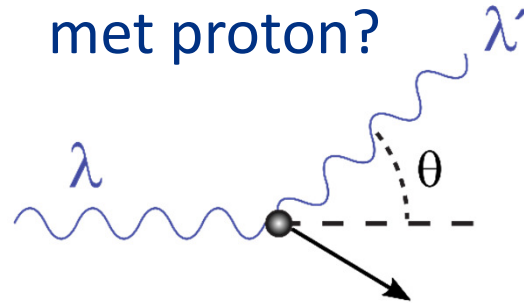
- Positief geladen kern
- Negatief geladen elektronen in banen om kern
- Leverde weer nieuwe problemen op

Ontdekking van neutronen



Kunnen het fotonen zijn?

“Compton-effect”
met proton?

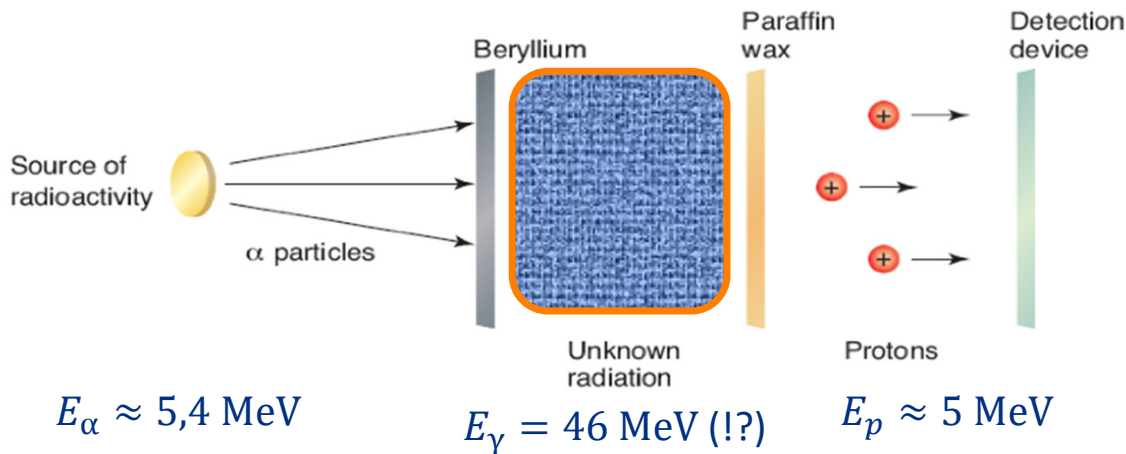


Maximale energie-overdracht:

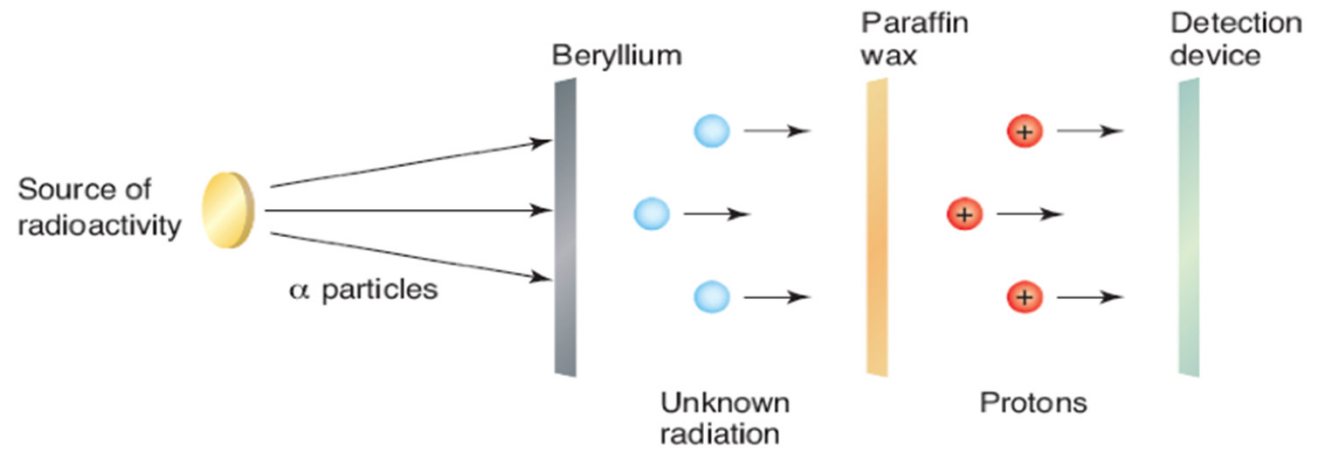
$$(\Delta E)_{max} = \frac{E_\gamma}{\left(1 + \frac{m_p c^2}{2E_\gamma}\right)}$$

$$5 = \frac{E_\gamma}{\left(1 + \frac{938}{2E_\gamma}\right)}$$

$$\Rightarrow E_\gamma = 46 \text{ MeV}$$



Ontdekking van neutronen



*The experimental results were very difficult to explain on the hypothesis that the beryllium radiation was a quantum radiation, but followed immediately if it were supposed that the radiation consisted of particles of mass nearly equal to that of a proton and with no net charge, or **neutrons**.*

(Chadwick, James (1932). "Existence of a Neutron". Proceedings of the Royal Society A. 136 (830): 692–708.)

Eigenschappen en begrippen



Vrij neutron

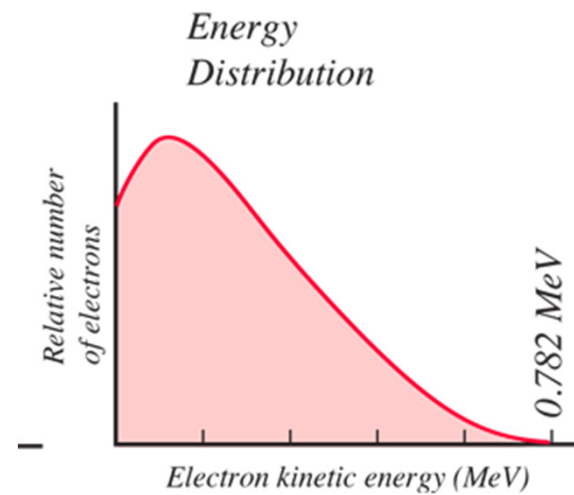
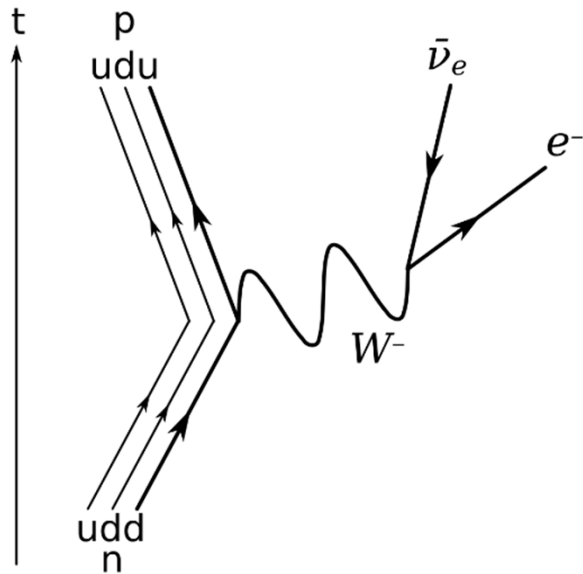
- $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- $T_{1/2} = 10$ minuten
- 0,8 MeV komt vrij

$$M_n = 939,6 \text{ MeV}$$

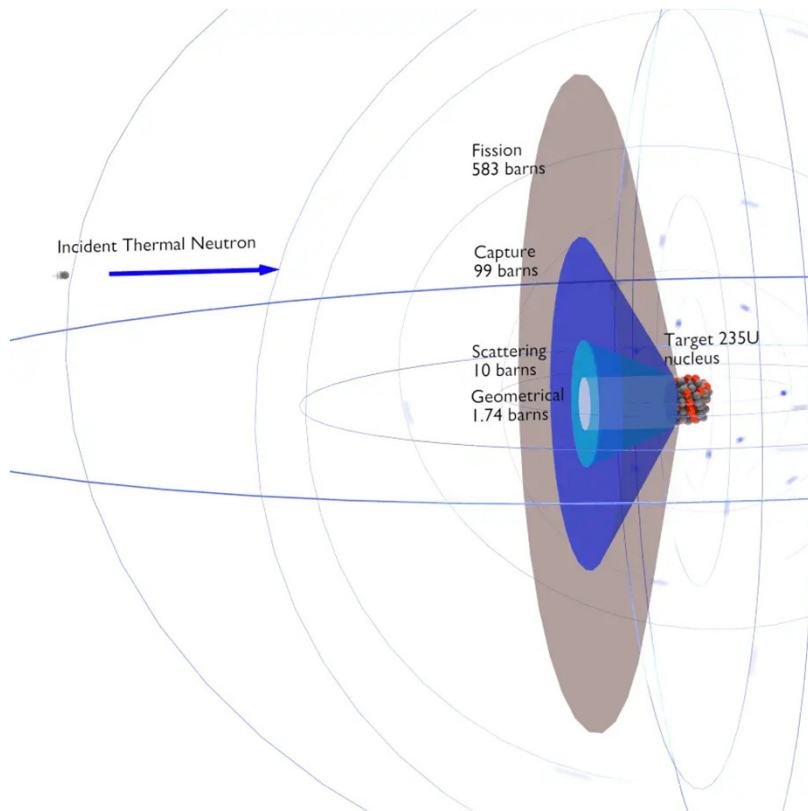


$$\begin{aligned} M_p + M_e + M_{\nu} \\ &= 938,3 + 0,511 + 0 \text{ MeV} \\ &= 938,8 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Energieoverschot is
 $= (939,6 - 938,8) \text{ MeV}$
 $= 0,8 \text{ MeV}$

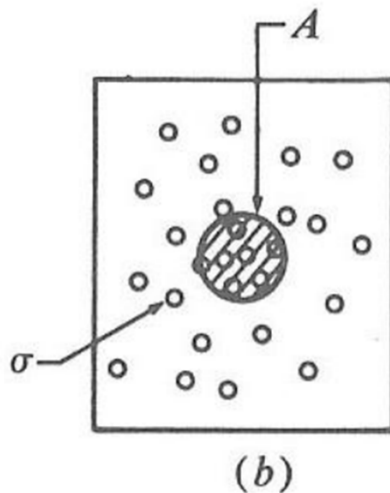
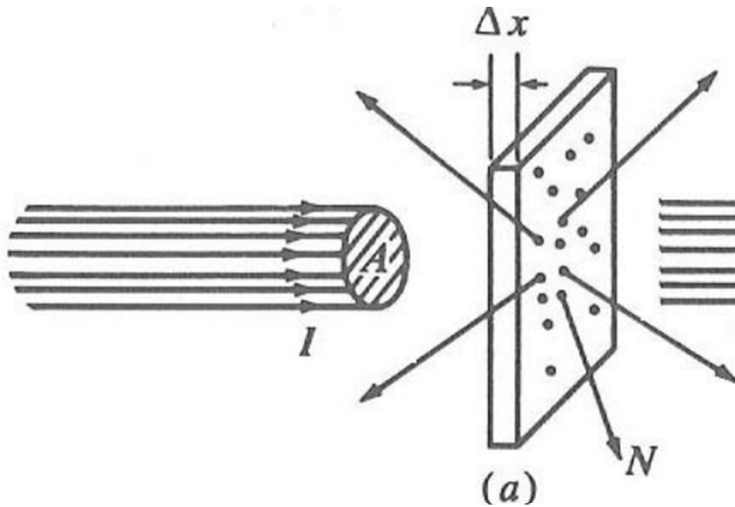


Werkzame doorsnede



- Neutron kan met atoomkern reageren
- Werkzame doorsnede (σ) is een maat voor de kans daarop
- “*Cross section*”
- Wordt vaak uitgedrukt in cm^2 of barn
- 1 barn =
 - = 1 b
 - = $1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$
 - = $1 \times 10^{-28} \text{ m}^2$

Werkzame doorsnede



Bombardeer plaatje met een bundel.

- Dichtheid plaatje = c atomen per m^3
- # atomen in pad v/d bundel = $n = c \cdot A \cdot \Delta x$
- Totale werkzame doorsnede = $n\sigma$
- $$\frac{\text{\# reacties}}{\text{\# invallende neutronen}} = \frac{n\sigma}{A}$$

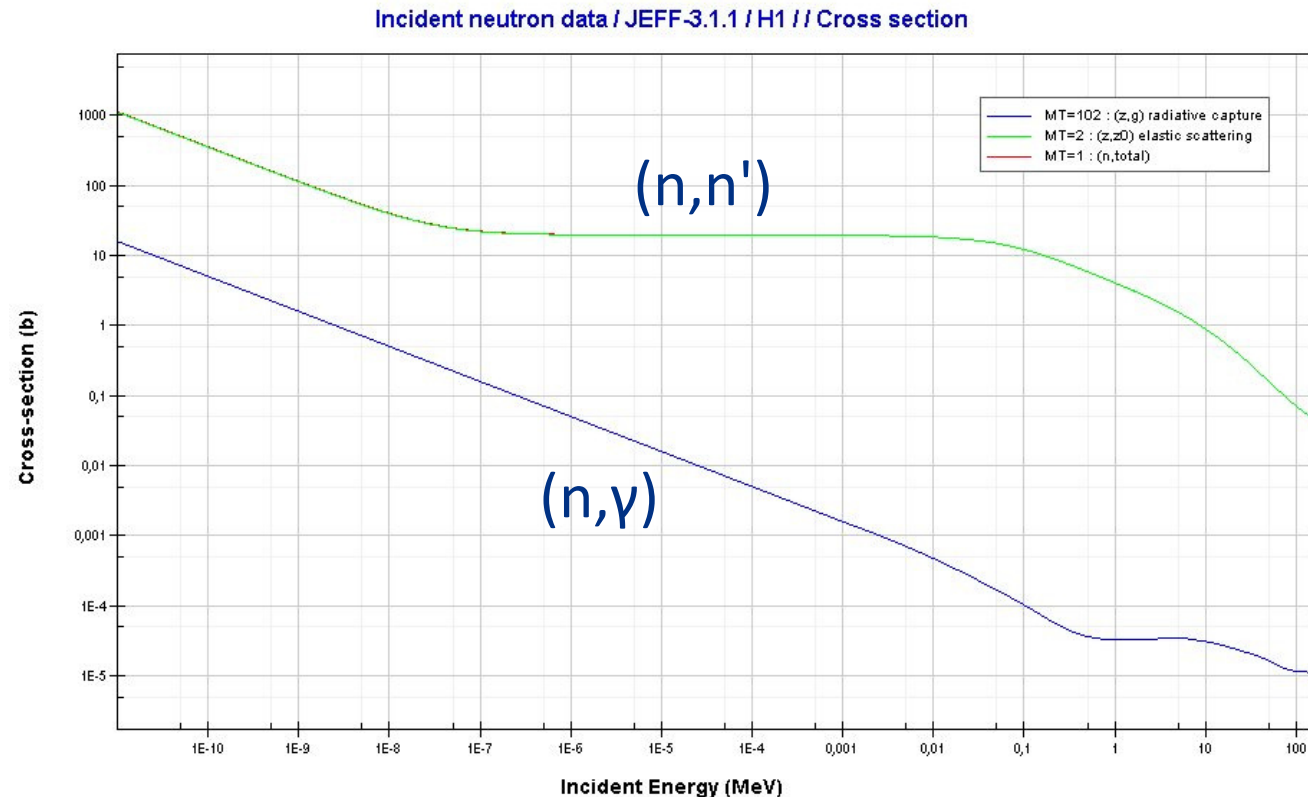
Vele reacties mogelijk, zoals

- (n, n')
- (n, p)
- (n, γ)

Werkzame doorsnede

σ hangt af van

- Type reactie, bijv. (n,n') of (n,γ)
- Energie van neutron
- Doelwit-atoom



Nucl.kaart geeft σ voor 0,025 eV

56,6 h ϵ β^+ ... γ 113; 208... g	9,25 m ϵ ; β^+ 0,8... γ 93; 1351; 1341... g	2,2 h ϵ no γ g	~600 d ϵ no γ g	8,1 h ϵ β^- 0,7... γ 93; 104 g	0,012 σ 0,0103 g	1a 181 99,988 σ 0,0103 g	Ta 182 16 m 115, 147; 185... β^- 0,4 1,7... γ 68; 1421; σ 820								
Hf 176 5,2 σ_{abs} 38	Hf 177 51 m 1,1 s 18,5 1y 277; 295; 327 1y 208; 229; 379 σ 10^{-7} + 1,1 + 365	Hf 178 31 a 4,3 s 27,2 1y 574; 495; 217 1y 426; 326; 213; 89... σ ?+53 +33	Hf 179 25 d 18,7 s 13,8 1y 454; 363; 123; 146... σ 0,34 +45	Hf 180 5,5 h 35,1 1y 332; 443; 215; 57... σ 12,6	Hf 181 42,4 d β^- 0,4... γ 482; 133; 346... σ ~40	Lu 175 97,4 σ 16,4 + 7	Lu 176 2,6 3,68 h 3,3 · 10 ¹⁰ a β^- 1,2; 1,3... γ 88... e ⁻ σ 7 + 2100	Lu 177 161 d 6,71 d 22,7 m 28,4 m 4,6 h 5,7 m β^- 0,2 1y 414; 319; 122... m ₁	Lu 178 6,71 d 22,7 m 28,4 m 4,6 h 5,7 m β^- 0,5... γ 208; 113... g	Lu 179 4,6 h 5,7 m β^- 1,2... γ 332 m ₁	Lu 180 5,7 m β^- 2,0... γ 93; 1341; 1310; 1269...; g	Lu 181 5,7 m β^- 1,4... γ 214... g	Lu 182 5,7 m β^- 1,5... γ 408; 1199; 1107; 215... g		
Yb 174 31,8 σ 65	Yb 175 4,2 d β^- 0,5... γ 396; 283; 114... σ 2,4	Yb 176 12 s 12,7 6,5 s 1,9 h 74 m β^- 0,6... γ 391; 348... g	Yb 177 6,5 s 1,9 h 74 m β^- 1,4... γ 104; 228 e ⁻ β^- 1,4... γ 150; 1080; 122; 1241...; g	Yb 178 74 m β^- 0,6... γ 391; 348... g		Tm 173 8,2 h β^- 1,2... g	Tm 174 5,4 m β^- 1,2... g	Tm 175 15,2 m β^- 0,9; 1,9... g	Tm 176 1,9 m β^- 2,0; 2,8... γ 93; 190... g						

Verschillende reacties:

- σ : (n, γ)-reactie
- $\sigma_{n,p}$: (n,p)-reactie
- $\sigma_{n,\alpha}$: (n, α)-reactie

• ...

+

• σ_{abs}



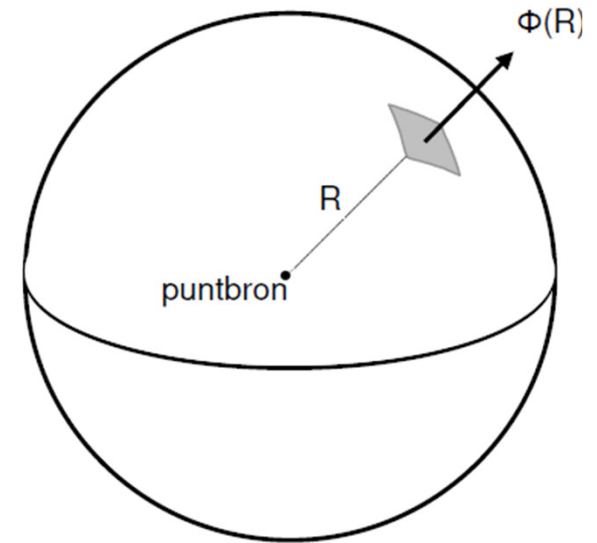
Fluentie

Neutronenfluentie Φ

- Eenheid [m^{-2}], vaak ook [cm^{-2}]
- Aantal neutronen dat door 1 m^2 (of 1 cm^2) gaat

Voor een bron die N neutronen in alle richtingen gelijk uitzendt:

- $$\Phi = \frac{N}{4\pi r^2}$$



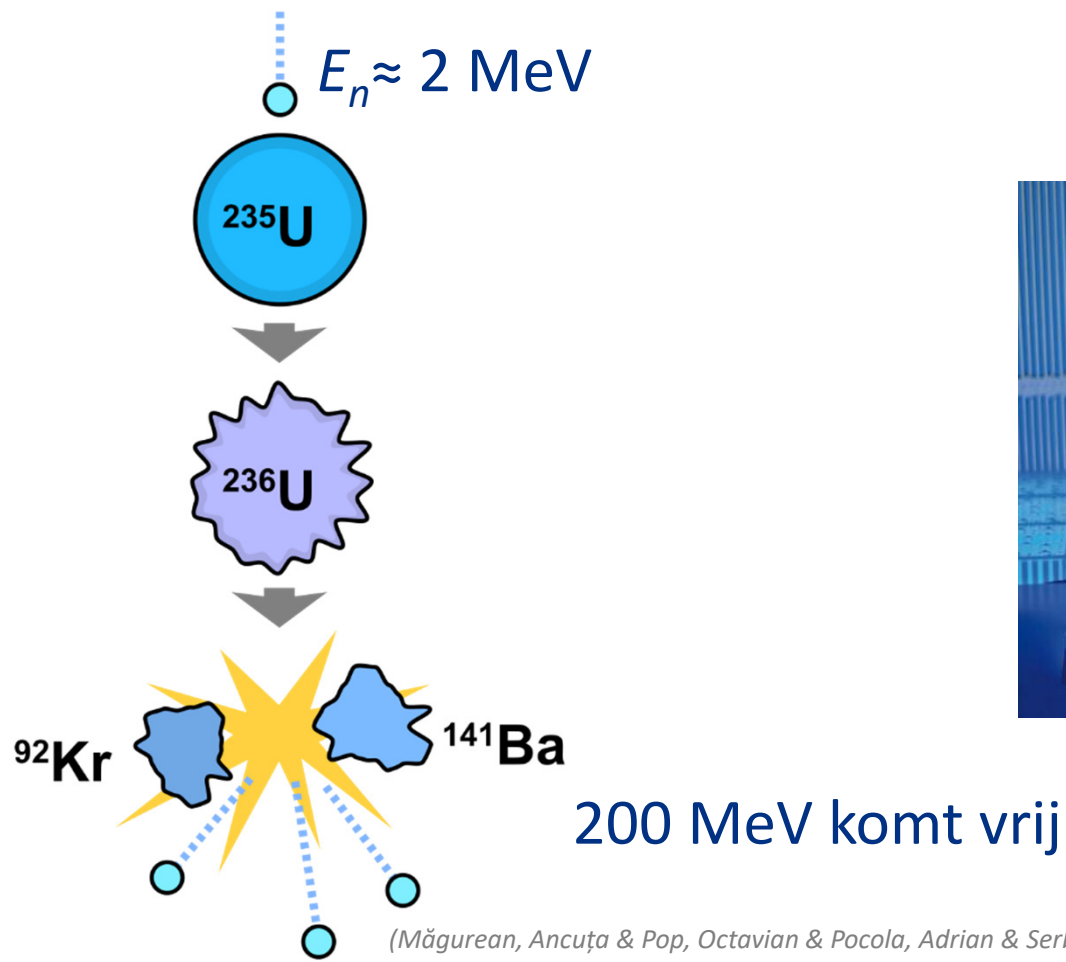
Neutronenbronnen (H6.6.1)



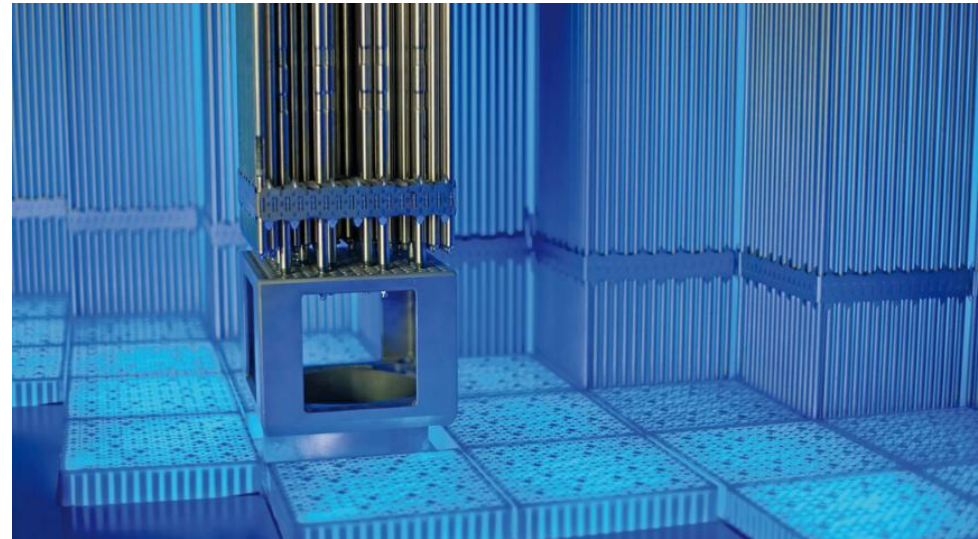
Neutronenbronnen

- Kernreactoren
 - Fissie
- Ingekapselde bronnen
 - (α, n) -bron
 - (γ, n) -bron of (foton, n)-bron
 - Spontane splijting
- Versnellers

Kernreactoren



(Măgurean, Ancuța & Pop, Octavian & Pocola, Adrian & Serban, Alexandru & Bălan, Mugur. (2019). Einstein's Equation in Nuclear and Solar Energy. 10.5772/intechopen.90574.)



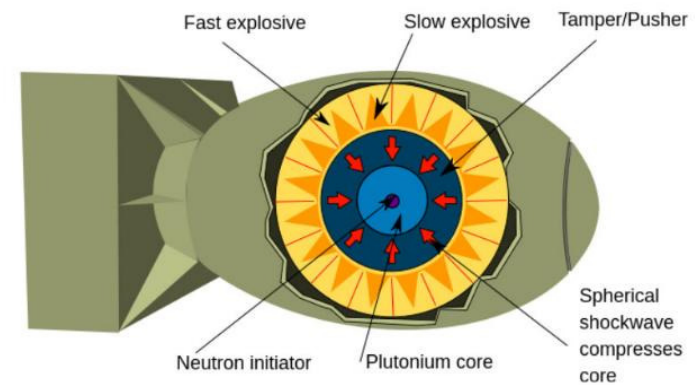
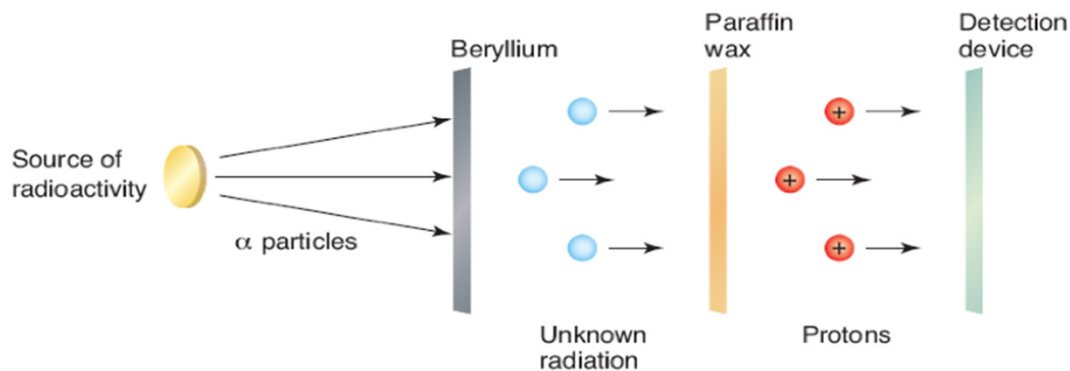
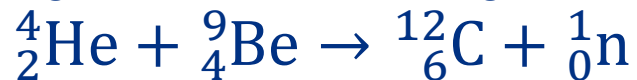
(www.epz.nl)

Ingekapselde bronnen

(α ,n)-bron heeft twee onderdelen

- 1) alfa-straler
- 2) een licht element

Bijvoorbeeld:

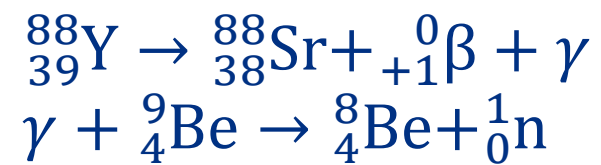


Fat Man

Ingekapselde bronnen

(γ ,n)-bron of (foton,n)-bron heeft twee onderdelen

- 1) Gammastraler
- 2) Een licht element

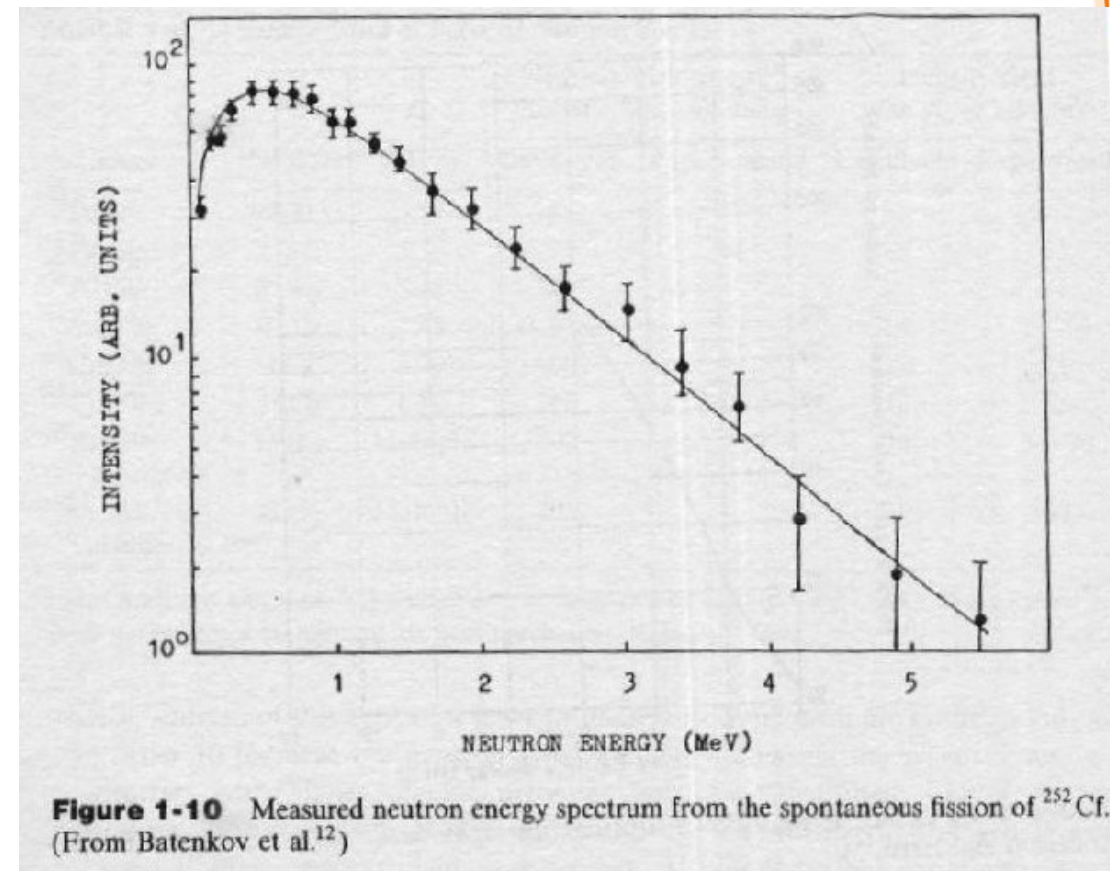


Ingekapselde bronnen

Spontane splijting

Spectrum ^{252}Cf (zie ook [fig. 6.18](#))

Nuclide	Half-life (yrs)	Fission branching ratio (% of decays)	Neutrons per		Spontaneous half-life (yrs)
			Fission	Gram-sec	
^{235}U	$7.04 \cdot 10^8$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	1.86	0.0003	$3.5 \cdot 10^{17}$
^{238}U	$4.47 \cdot 10^9$	$5.4 \cdot 10^{-5}$	2.07	0.0136	$8.4 \cdot 10^{15}$
^{239}Pu	24100	$4.4 \cdot 10^{-10}$	2.16	0.022	$5.5 \cdot 10^{15}$
^{240}Pu	6569	$5.0 \cdot 10^{-6}$	2.21	920	$1.16 \cdot 10^{11}$
^{250}Cm	8300 ^[14]	~74	3.31	$1.6 \cdot 10^{10}$	$1.12 \cdot 10^4$
^{252}Cf	2.6468 ^[15]	3.09	3.73	$2.3 \cdot 10^{12}$	85.7



Versnellers

Afhankelijk van type versneller en energie

- (e, e'n)
- (röntgen, n)
- (p,n)

→(n,x)-reacties

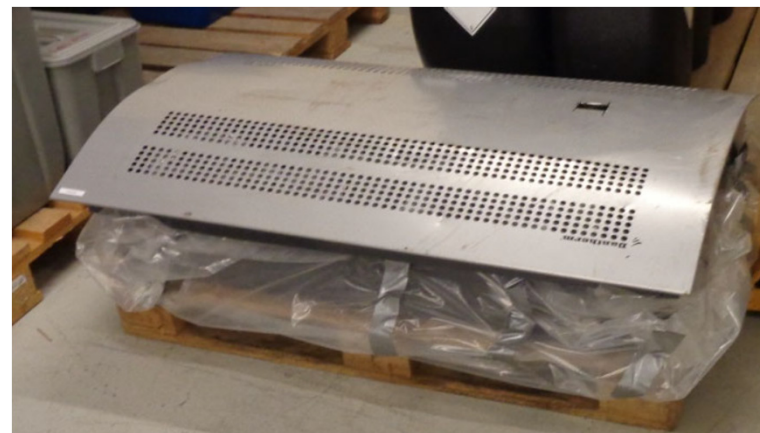
→ Activering

- Onderdelen versneller
- Bouwmateriaal
- Objecten rondom versneller

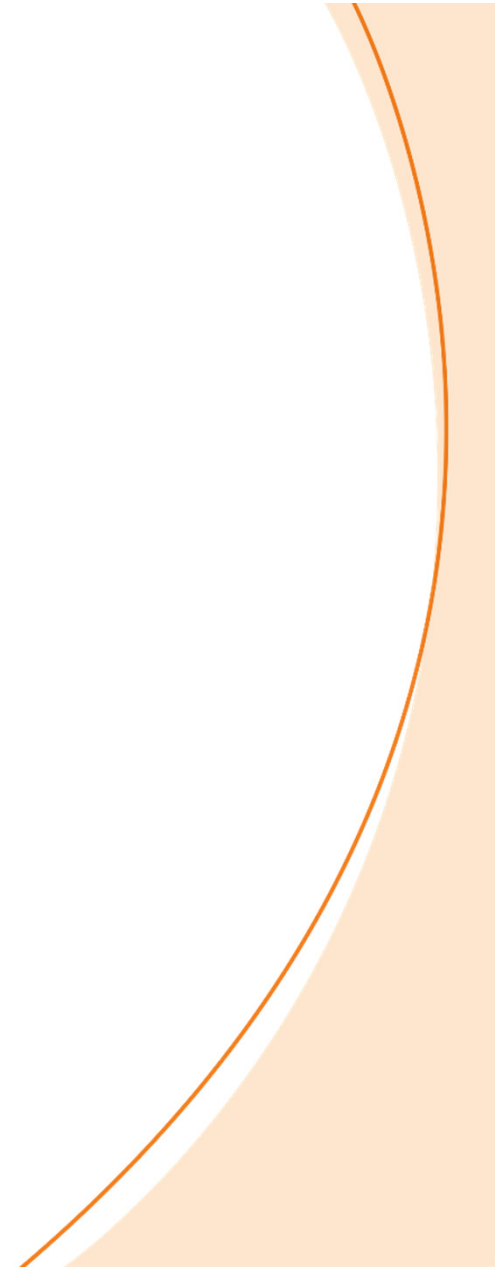
Tabel 3.5 Neutron-geïnduceerde activatieproducten in metaal en/of beton, met een halveringstijd langer dan 30 dagen [14, 30, 32-34]. Er zijn voor een groot deel van de activatieproducten meer activatiereacties mogelijk dan hier genoemd.

Geactiveerd materiaal	Activatie product	Geïnduceerde activatiereactie	Halveringstijd van activatieproduct
Metaal	^{54}Mn	$^{54}\text{Fe} (n,p) ^{54}\text{Mn}$	312 dagen
	^{60}Co	$^{59}\text{Co} (n,\gamma) ^{60}\text{Co}$	5,3 jaar
	^{60}Co	$^{63}\text{Cu} (n,\alpha) ^{60}\text{Co}$	5,3 jaar
	^{55}Fe	$^{54}\text{Fe} (n, \gamma) ^{55}\text{Fe}$	2,7 jaar
	^{59}Fe	$^{59}\text{Co} (n,p) ^{59}\text{Fe}$	44 dagen
	^{63}Ni	$^{62}\text{Ni} (n, \gamma) ^{63}\text{Ni}$	100 jaar
Beton	^3H	$^2\text{H} (n,\gamma) ^3\text{H}$	12,3 jaar
	^{14}C	$^{17}\text{O} (n,\alpha) ^{14}\text{C}$	5700 jaar
	^{35}S	$^{34}\text{S} (n,\gamma) ^{35}\text{S}$	87 dagen

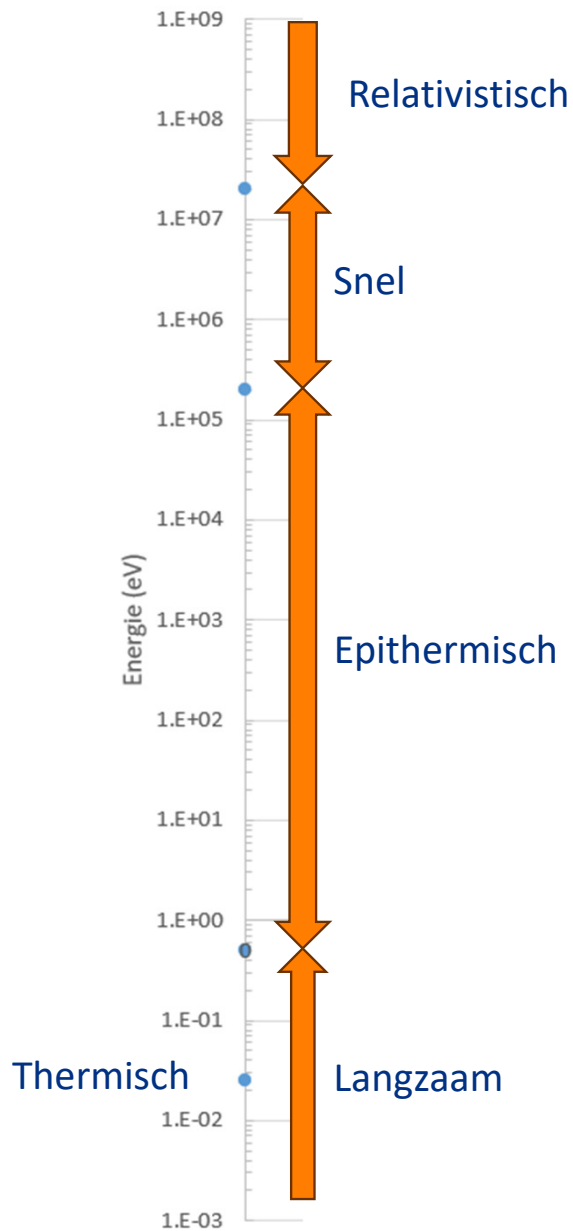
(Bekhuis, PDBM; Hengeveld, AC. Radioactieve rest- en afvalstoffen bij ontmanteling van cyclotrons in Nederland. RIVM rapport 2023-0233)



Classificatie van neutronen (H6.6.3)



Indeling op energie



- “Thermisch”
 - Bij kamertemperatuur (~ 300 Kelvin) hebben de meeste neutronen een energie van:
$$kT = 8,6 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} \times 300 \text{ K} = 0,025 \text{ eV}$$
 - Thermisch equilibrium: bij de volgende botsing is de kans op een toename van energie even groot als op afname.

Energieoverdracht (H6.6.2)

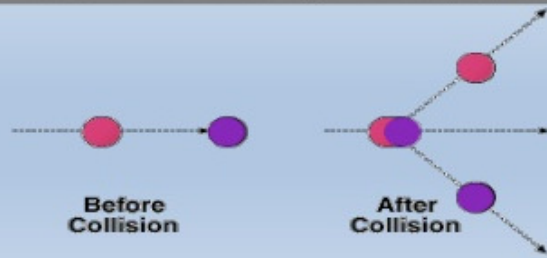


Wisselwerking van neutronen

Elastische botsing

$$E_{kin}(\text{voor}) = E_{kin}(\text{na})$$

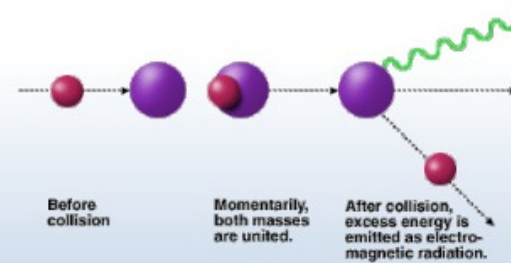
Elastic Scattering of Neutrons



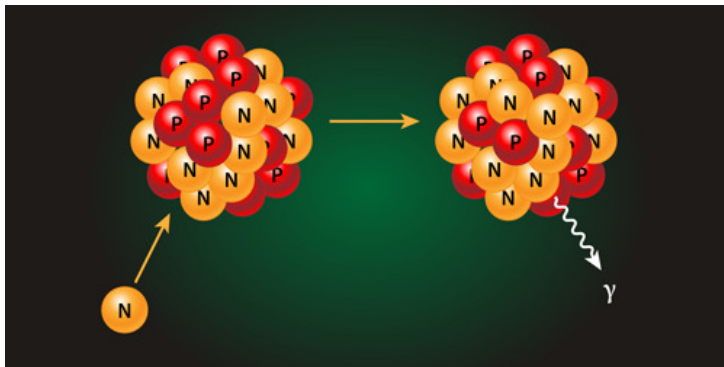
Inelastische botsing

$$E_{kin}(\text{voor}) \neq E_{kin}(\text{na})$$

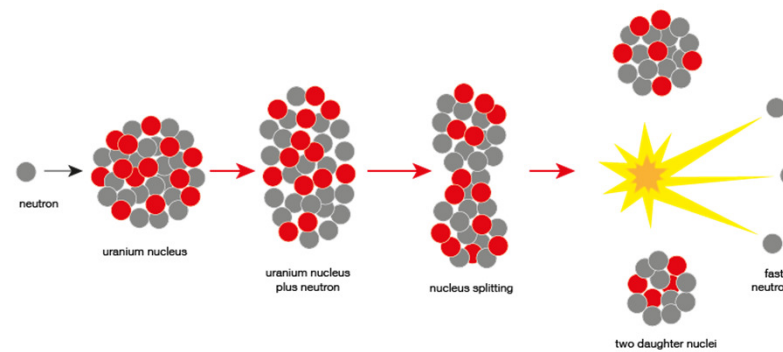
Inelastic Scattering of Neutrons



Vangst



Spallatie

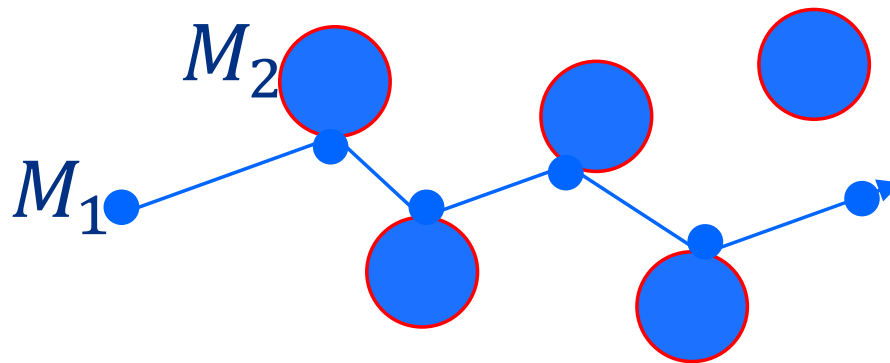


Wisselwerking van neutronen

	Vangst	El. botsing	Inel. botsing	Spallatie	σ
Langzaam	✓	✓			$\sim 1/\sqrt{E}$
Epithermisch	✓	✓			Resonanties
Snel	✓	✓	✓		Resonanties
Relativistisch			✓	✓	

Modereren

Modereren = afremmen van neutronen door elastische botsingen



T : kinetische energie van het inkomende deeltje

Maximale energieoverdracht is bij een frontale botsing (vergl. 6.32):

$$\Delta E_{max} = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2} T = \frac{4m_nM_N T}{(m_n+M_N)^2} T = \frac{4A}{(1+A)^2} T$$

Gemiddelde energieoverdracht bij botsingen:

$$\Delta E_{gem} = \frac{\Delta E_{max}}{2}$$

Vraagstuk

Stel dat een neutron met een kinetische energie van 1,0 MeV een elastische botsing maakt met een ^{12}C -atoom.

- Wat is de maximale energieoverdracht?
- Wat is de gemiddelde energieoverdracht?

- $$\Delta E_{max} = \frac{4A}{(1+A)^2} T = \frac{4 \cdot 12}{(1+12)^2} = 0,28 \text{ MeV}$$
- $$\Delta E_{gem} = \frac{\Delta E_{max}}{2} = \frac{0,28 \text{ MeV}}{2} = 0,14 \text{ MeV}$$

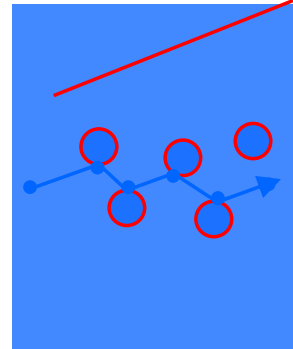
Nucleus	$\frac{\Delta E_{max}}{T}$
^1_1H	1.000
^2_1H	0.889
^4_2He	0.640
^9_4Be	0.360
$^{12}_6\text{C}$	0.284
$^{16}_8\text{O}$	0.221
$^{56}_{26}\text{Fe}$	0.069
$^{118}_{50}\text{Sn}$	0.033
$^{238}_{92}\text{U}$	0.017

Als je snel klaar bent →



Modereren

$$E_0 = 1 \text{ MeV}$$



Hoeveel botsingen (k)
heb je nodig?

$$E_k = 0.025 \text{ eV}$$



Grafiet (C)

Neutron heeft na 1^{ste} botsing energie E_1 :

$$\Delta E_{max} = \frac{4A}{(1+A)^2} E_0 = 0,28E_0$$

$$\Delta E_{gem} \approx \frac{\Delta E_{max}}{2} = 0,14E_0$$

$$E_1 = E_0 - \Delta E_{gem} = E_0 - 0,14E_0 = 0,86E_0$$

Modereren

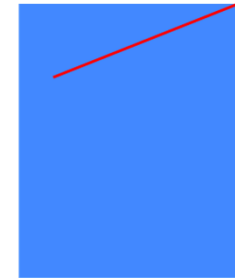
Bij iedere botsing: $E_{uit} = \underbrace{0,86}_a E_{in}$

Na 1 botsing: $E_1 = aE_0$ 

Na 2 botsingen: $E_2 = aE_1 = a \cdot aE_0 = a^2 E_0$

Na k botsingen: $E_k = a^k E_0$

$$E_0 = 1 \text{ MeV}$$



Grafiet (C)

Hoeveel botsingen (k)
heb je nodig?

$$E_k = 0.025 \text{ eV}$$



Moderator	E_k	E_0	a	k
C	0,025 eV	1 MeV	0,86	114
H	0,025 eV	1 MeV	0,5	25

Neutronenactivering (H6.6.4)



Reactietempo

Gebruik gedurende een tijd dt een bundel met N neutronen. Bestraal hiermee een dun plaatje met dikte dx . Hoeveel reacties zijn in het plaatje (dN)?

- # atomen in dit plaatje = $n_T = c \cdot \text{volume} = c \cdot A \cdot dx$

- **Totale** werkzame doorsnede = $n_T \cdot \sigma$

- $$\frac{\# \text{ reacties}}{\# \text{ invallende deeltjes}} = \frac{\text{totale werkzame doorsnede}}{\text{bestraald oppervlak plaatje}}$$

- $$\Rightarrow \frac{dN}{N} = \frac{n_T \cdot \sigma}{A}$$

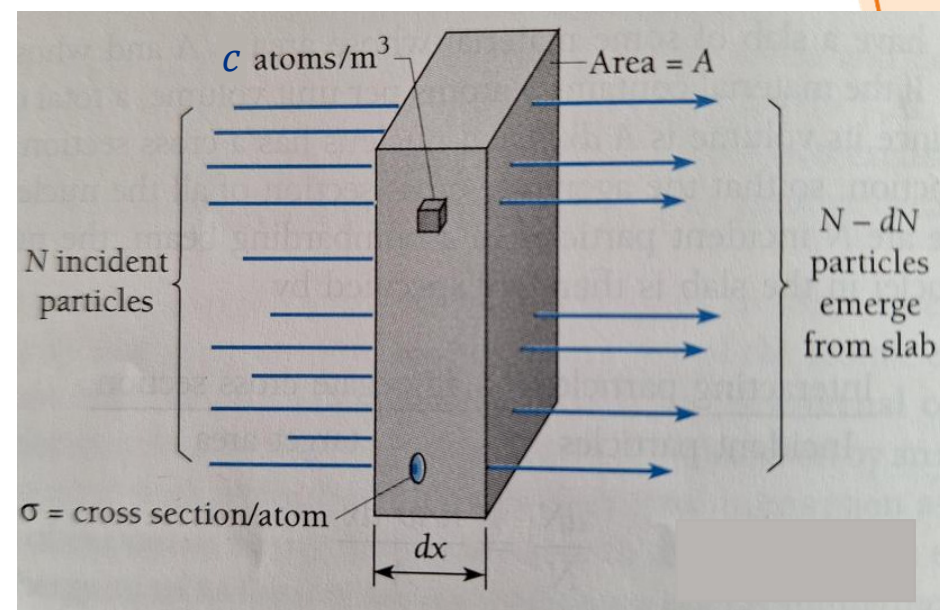
- $$\Rightarrow dN = \frac{n_T \cdot \sigma \cdot N}{A} = \frac{\sigma N c A dx}{A}$$

- Reactietempo $\dot{p} = \frac{\# \text{ reacties}}{\text{tijd}} = \frac{dN}{dt} = \frac{\sigma N c A dx}{A dt} = \varphi n_T \sigma$

φ : invallende flux neutronen ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

n_T : # doelwitatomen (*targets*) in de plaat

σ : werkzame doorsnede van targets (cm^{-2})



Voorbeeldberekening # targets

Colemaniet, $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$.

$M = 411 \text{ g/mol}$,

Natuurlijke abundantie boor-10 is 20%.

Brok colemaniet met massa $m = 1,0 \text{ kg}$

Wat is het aantal *target*-atomen ^{10}B ?

B 9	B 10 20	B 11 80
p	σ 0,5 $\sigma_{n, \alpha}$ 3836	σ 0,005

1. Bepaal # moleculen

$$1,0 \text{ kg} = 1000 \text{ g} = \frac{1000 \text{ g}}{411 \text{ g/mol}} = 2,4 \text{ mol}$$

$$2,4 \text{ mol} = 2,4 \text{ mol} \cdot 6,0 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 1,4 \cdot 10^{24}$$

2. Bepaal # atomen B

Ieder molecuul colemaniet bevat 6 boor-atomen.

$$\# \text{ atomen boor} = 1,4 \cdot 10^{24} \cdot 6 = 8,8 \cdot 10^{24}$$

3. Bepaal # atomen B-10

De abundantie van boor-10 is 20%.

$$\# \text{ atomen boor-10} = 8,8 \cdot 10^{24} \cdot 20\% = 1,7 \cdot 10^{24}$$

$$\text{Oftewel: } n_T = \frac{m_{\text{object}} N_A}{M} \times \frac{\# \text{ atomen element}}{\text{molecuul}} \times \text{abundantie isotoop}$$



Vraagstuk

Een plaatje natuurlijk lithium wordt bestraald met thermische neutronen. De werkzame doorsnede wordt gedomineerd door de reactie ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$.

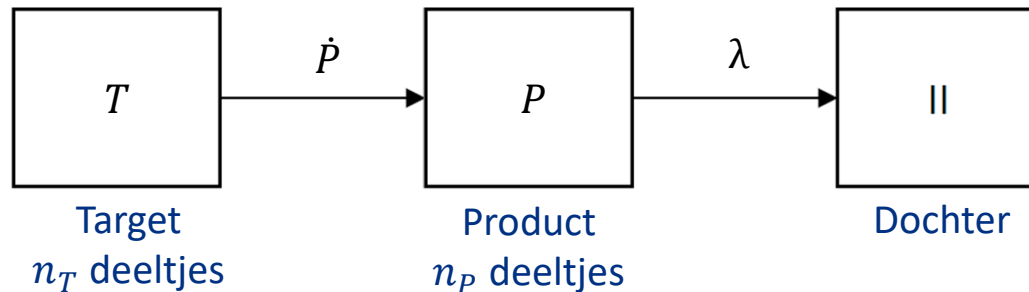
- Massa plaatje $m = 54 \text{ g}$
- Lithium weegt $M = 6,94 \text{ g/mol}$
- Invallende flux is $\varphi = 100 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Abundantie Li-6 is 7,6%
- Werkzame doorsnede reactie is $\sigma_{n,\alpha} = 940 \text{ barn}$

Bepaal het productietempo ${}^3\text{H}$.

Uitwerking

- # targets is $n_T = \frac{mN_A}{M} \times \frac{\# \text{ atomen}}{\text{molecuul}} \times \text{abundantie}$
 $= \frac{54 \text{ g} \cdot 6,0 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{6,94 \text{ g mol}^{-1}} \times 1 \times 7,6\% = 3,5 \cdot 10^{23}$
- Productietempo is $\dot{P} = \varphi n_T \sigma$
 $= 100 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot 3,5 \cdot 10^{23} \cdot 940 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$
 $= 3,3 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$

Neutronenactivering: de bestraalde targets worden zelf radioactief



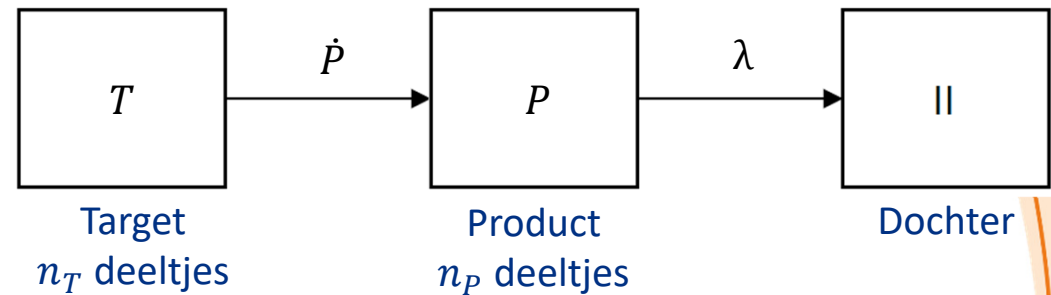
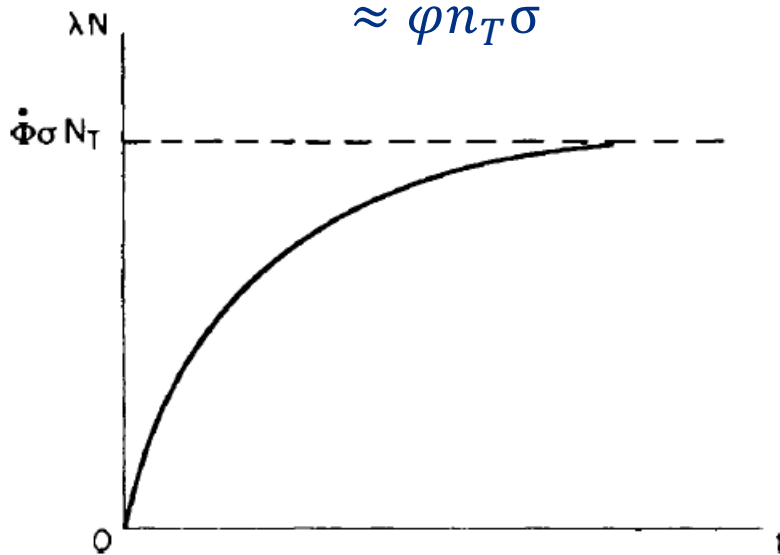
Compartiment P (H2.2.1.3)

- Toevoer van deeltjes: \dot{P}
- Afvoer van deeltjes: $-\lambda n_P$
- Oplossing:
 - $n_P = \frac{\dot{P}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$
 - $A_P(t) = \lambda n_P$
 $= \dot{P} (1 - e^{-\lambda t})$
 $= \varphi n_T \sigma (1 - e^{-\lambda t})$

Neutronenactivering

Bijzonder geval: heel lang bestralen

- Verzadigingsactiviteit
- $t \rightarrow \infty$
- $A_P(t) = \dot{P}(1 - e^{-\lambda \cdot t})$
 $\approx \dot{P}(1 - 0)$
 $\approx \dot{P}$
 $\approx \varphi n_T \sigma$



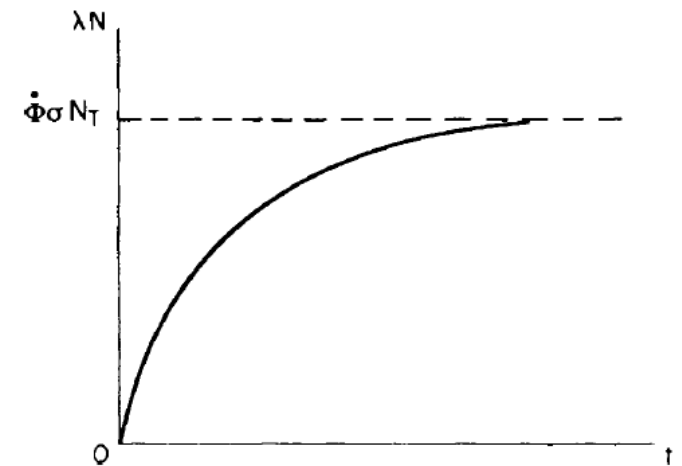
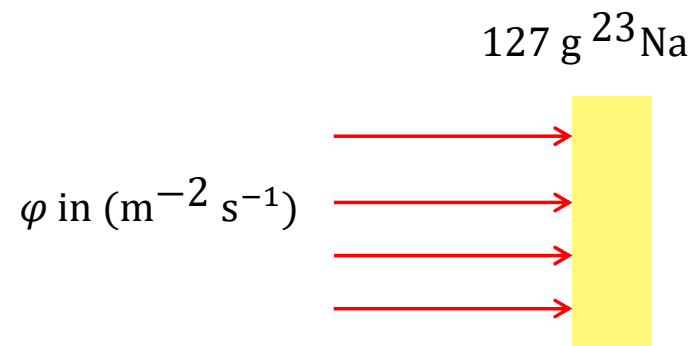
Bijzonder geval: heel kort bestralen

- $\lambda t \ll 1$
- $e^x \approx x + 1$ als $x \ll 1$
- $\Rightarrow e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t$
- $A_P(t) = \dot{P}(1 - e^{-\lambda t})$
 $\approx \dot{P}(1 - 1 + \lambda t)$
 $\approx \dot{P} \lambda t$

Vraagstuk

Een plaatje met 127 g zuiver ^{23}Na wordt in een bundel thermische neutronen geplaatst. De thermische neutronflux is $1,19 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. De werkzame doorsnede voor de vangst van thermische neutronen ($^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$) is 0,53 barn. De $T_{1/2}$ van ^{24}Na is 15 uur.

- Bereken de ^{24}Na -activiteit na 1 seconde bestraling
- Bereken de verzadigingsactiviteit
- Bereken de ^{24}Na activiteit na 24 uur bestraling
- Hoeveel ^{23}Na atomen zijn “opgebruikt” in die 24 uur



Vraagstuk

Een plaatje met 127 g zuiver ^{23}Na wordt in een bundel thermische neutronen geplaatst. De thermische neutronflux is $1,19 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. De werkzame doorsnede voor de vangst van thermische neutronen ($^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$) is 0,53 barn. De $T_{1/2}$ van ^{24}Na is 15 uur.

a) Bereken de ^{24}Na -activiteit na 1 seconde bestraling

- $n_T = \frac{mN_A}{M} = \frac{127 \text{ g} \times 6,0 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{23 \text{ g mol}^{-1}} = 3,3 \cdot 10^{24}$
- $\dot{P} = \varphi n_T \sigma$
 $= 1,19 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 3,3 \cdot 10^{24} \times 0,53 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$
 $= 20,9 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$
- Na-24 heeft $\lambda = \frac{\ln(2)}{15 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h}} = 0,000013 \text{ s}^{-1}$
- Korte bestraling ($\lambda t \ll 1$)
- $\Rightarrow A_p(t) \approx \dot{P} \lambda t = 20,9 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \times 0,000013 \text{ s}^{-1} \times 1 \text{ s} = 0,27 \text{ Bq}$

Vraagstuk

Een plaatje met 127 g zuiver ^{23}Na wordt in een bundel thermische neutronen geplaatst. De thermische neutronflux is $1,19 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. De werkzame doorsnede voor de vangst van thermische neutronen ($^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$) is 0,53 barn. De $T_{1/2}$ van ^{24}Na is 15 uur.

b) Bereken de verzadigingsactiviteit

- Verzadigingsactiviteit: $t \rightarrow \infty$,
- $\Rightarrow A_p = \dot{P}(1 - e^{-\lambda \cdot \infty}) \approx \dot{P} = 20,9 \text{ kBq}$

Vraagstuk

Een plaatje met 127 g zuiver ^{23}Na wordt in een bundel thermische neutronen geplaatst. De thermische neutronflux is $1,19 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. De werkzame doorsnede voor de vangst van thermische neutronen ($^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$) is 0,53 barn. De $T_{1/2}$ van ^{24}Na is 15 uur.

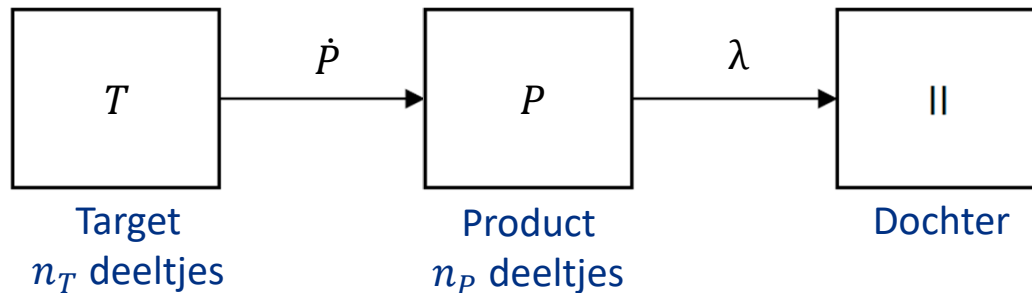
c) Bereken de ^{24}Na activiteit na 24 uur bestraling

- $t = 24 \text{ h} = 24 \text{ h} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 86400 \text{ s}$
- $A_P(t = 24 \text{ h}) = \dot{P}(1 - e^{-\lambda \cdot t})$
 $= 20,9 \times 10^3 \text{ s}^{-1}(1 - e^{-0,000013 \text{ s}^{-1} \cdot 86400 \text{ s}})$
 $= 14 \text{ kBq}$

Vraagstuk

Een plaatje met 127 g zuiver ^{23}Na wordt in een bundel thermische neutronen geplaatst. De thermische neutronflux is $1,19 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. De werkzame doorsnede voor de vangst van thermische neutronen ($^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$) is 0,53 barn. De $T_{1/2}$ van ^{24}Na is 15 uur.

d) Hoeveel ^{23}Na atomen zijn “opgebruikt” in die 24 uur



- Per tijdseenheid verdwijnen \dot{P} deeltjes uit het target-compartiment.
- # deeltjes dat in totaal is opgebruikt:

$$\dot{P}t = 20,9 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \cdot 24 \text{ h} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 1,8 \times 10^9$$

Dosimetrie (H7.5)



Kerma van neutronen

- Neutronen ioniseren indirect (net als fotonen)
- Vrijkomende deeltjes kunnen wél ioniseren
- Kerma K : *Kinetic Energy Released per unit MAss* [gray]
- Definitie ICRU-57

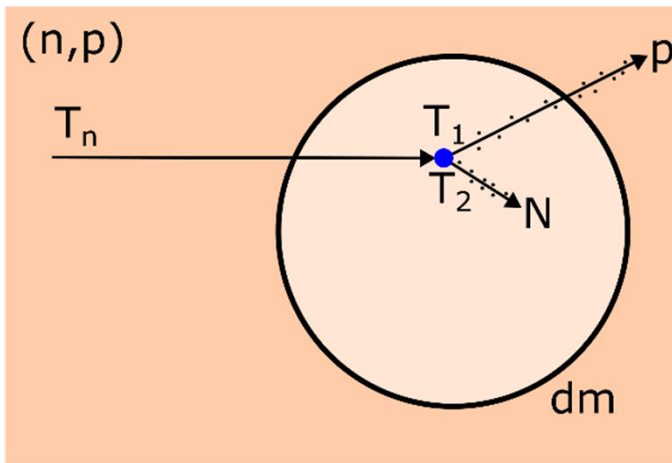
Kerma, K

the quotient of dE_{tr} by dm , where dE_{tr} is the sum of the initial kinetic energies of all the charged ionising particles liberated by uncharged ionising particles in a volume element of mass dm , thus:

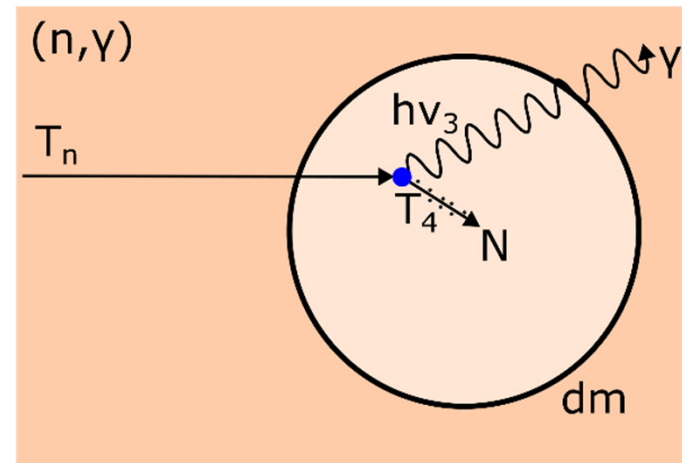
$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \leftarrow \text{In cursusboek } \Delta E$$

The unit of kerma is joule per kilogram ($J\ kg^{-1}$) and its special name is gray (Gy).

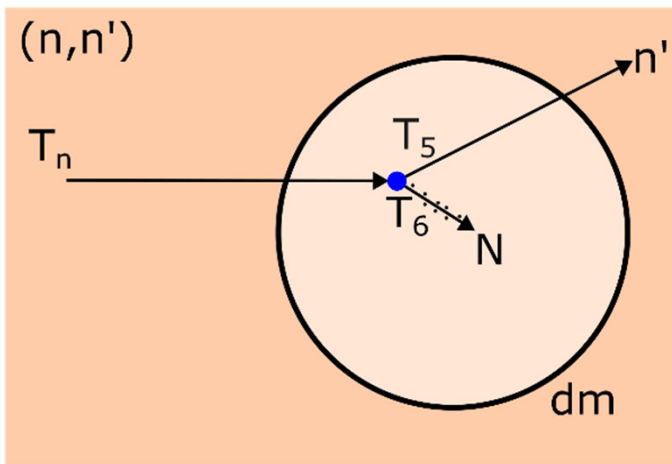
Kerma van neutronen



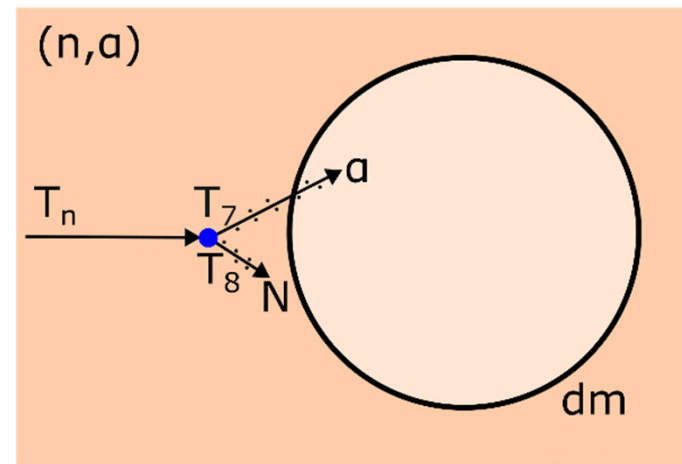
$$K = \frac{T_1 + T_2}{dm}$$



$$K = \frac{T_4}{dm}$$



$$K = \frac{T_6}{dm}$$

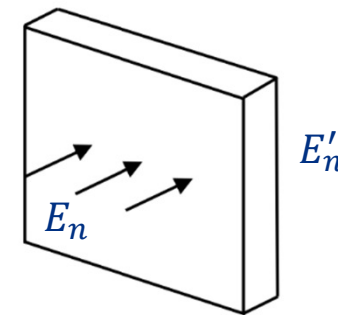


$$K = 0$$

Dosimetrie van neutronen

Analoog aan fotonen:

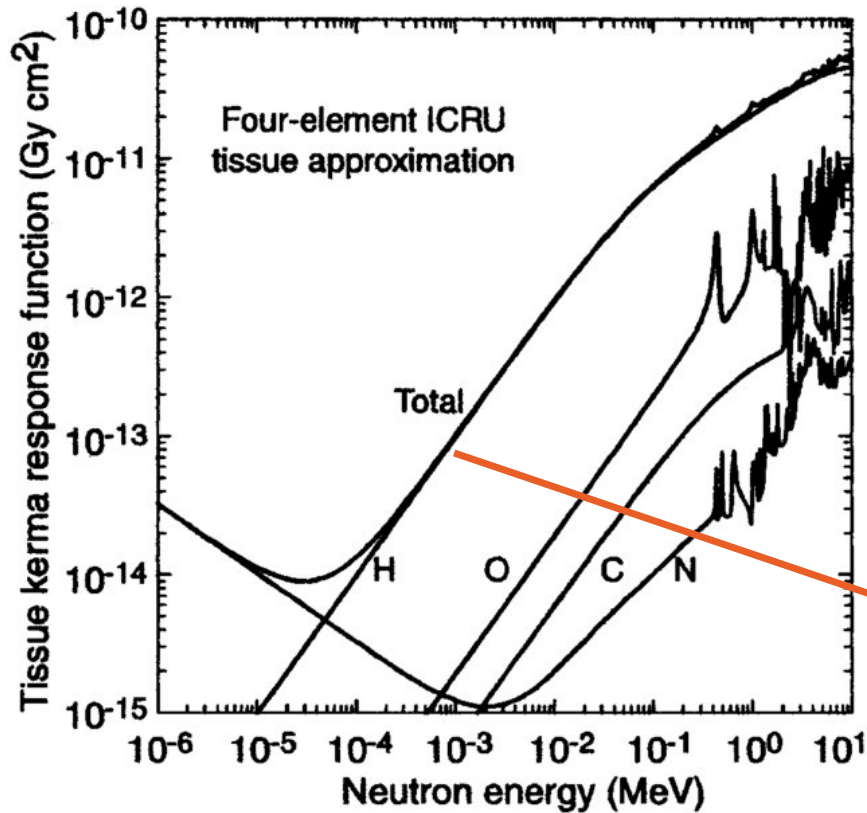
- $\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho A} N_A$ (zie vgl. 6.14)
- Energieoverdracht per interactie is $\Delta E = E_n - E'_n$
- Totale energieoverdracht is $E = \Delta N \Delta E$
- Verschillende uitdrukkingen voor kerma
 - $K = E_n \Phi \frac{\mu}{\rho} \frac{\Delta E}{E_n}$
 - $K = E_n \Phi \frac{\mu_{tr}}{\rho}$
 - $K = E_n \Phi \frac{\sigma}{A} N_A \frac{\Delta E}{E_n}$
- 'Kerma factor' $k_f = K/\Phi$



Plaatje met massa m ,
dichtheid ρ , atoommassa A

Dosimetrie van neutronen

k_f



Elastische verstrooiing aan H

- $k_f = E_n \frac{\sigma}{A} N_A \frac{\Delta E}{E_n}$
- $\sigma \approx \text{constant}$

• Gemiddelde energie-overdracht:

$$\Delta E_{gem} = \frac{\Delta E_{max}}{2} = \frac{1}{2} \frac{4 \cdot A}{(1 + A)^2} E_n = \frac{1}{2} E_n$$

Dus $\frac{\Delta E}{E_n} = \text{constant}$

$\rightarrow k_f \propto E_n$

Dosimetrie van neutronen

Nuclide	Weight % in tissue	Neutron capture cross-section*
H	10.0	0.332
C	18.0	0.0034
N	3.0	1.82
O	65.0	1.8×10^{-4}
Na	0.11	0.43
Mg	0.04	0.053
P	1.16	0.18
S	0.20	0.53
Cl	0.16	32.68
K	0.20	2.1
Ca	2.01	0.4
Fe	0.01	2.57

${}^1_1\text{H}(n, \gamma){}^2_1\text{H}$
 $Q = 2,2 \text{ MeV}$
 Dosis t.g.v. gamma's en terugstootenergie H

${}^{14}_7\text{N}(n, p){}^{14}_6\text{C}$
 $Q = 0,63 \text{ MeV}$
 Dosis t.g.v. ${}^{14}\text{C}$ en p

${}^1_0\text{n} + {}^{23}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{24}_{11}\text{Na} + \gamma$
 $Q = 7,0 \text{ MeV}$
 Kan gebruikt worden om de opgelopen dosis te schatten aan de hand van metingen aan bloedmonsters na de blootstelling.

$T_{1/2} = 15 \text{ h}$
 β emission: 100%
 $E_{\text{max}} = 4.12 \text{ MeV}$
 4.1227
 1.3687
Mg-24

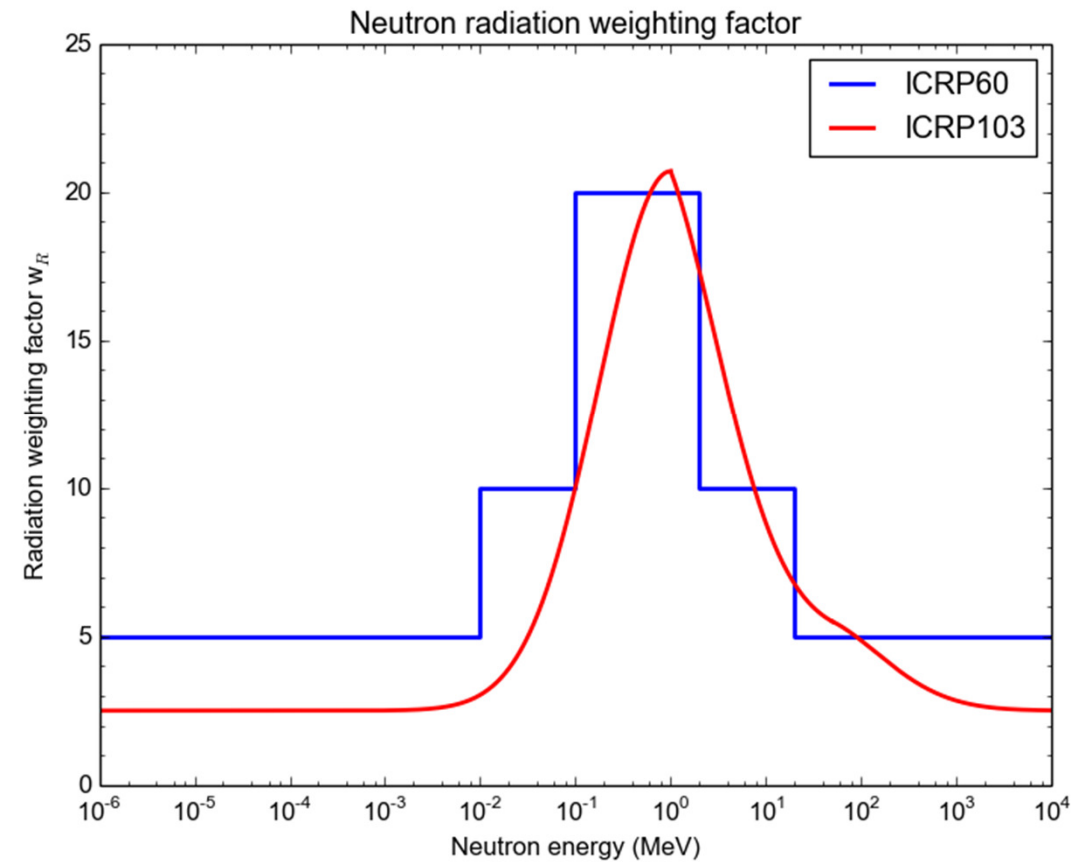
* Neutron cross section (σ) in barns ($\text{b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

Dosimetrie van neutronen

Effectieve dosis E

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

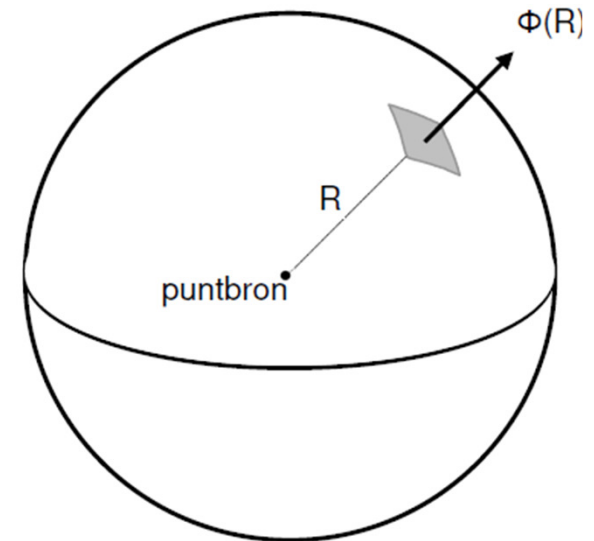
- Stralingsweefactor hangt af van de neutronenergie



Dosimetrie van neutronen

Voor een bron die N neutronen in alle richtingen gelijk uitzendt:

- Neutronenfluentie $\Phi = \frac{N}{4\pi r^2}$
- k_f is op te zoeken in fig. 7.8
- $K = k_f \Phi$



Vraagstuk

Een isotrope bron produceert $1 \cdot 10^{11}$ neutronen per seconde, met energie 0,1 MeV. Iemand bevindt zich gedurende 2 uur op 30 meter afstand. Verwaarloos afscherming. Bereken voor die locatie:

a) De neutronenfluentie [cm^{-2}]?

b) De kerma in weefsel. Maak gebruik van fig. 7.8.

a) Aantal uitgezonden neutronen: $N = 1 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1} \cdot 7200 \text{ s} = 7 \cdot 10^{14}$

$$\Phi = \frac{N}{4\pi r^2} = \frac{7 \cdot 10^{14}}{4\pi(3000 \text{ cm})^2} = 6 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$$

b) Aflezen figuur: Bij 0,1 MeV is $k_f \approx 8 \text{ pGy cm}^2$

$$K = k_f \Phi = 6 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot 8 \text{ pGy cm}^2 = 5 \cdot 10^7 \text{ pGy}$$

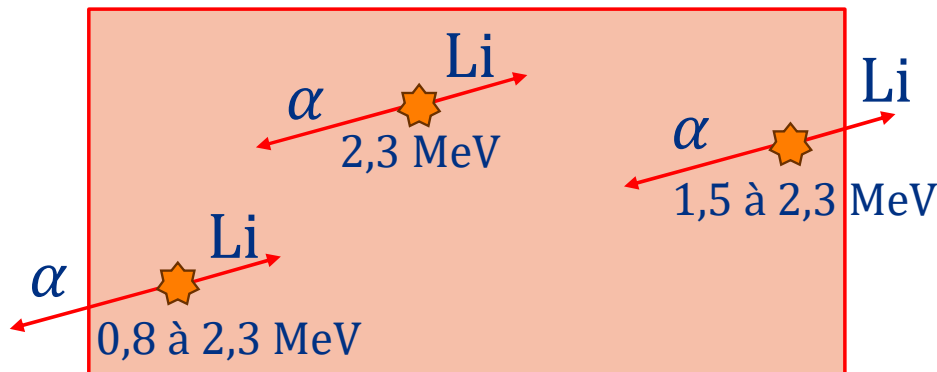
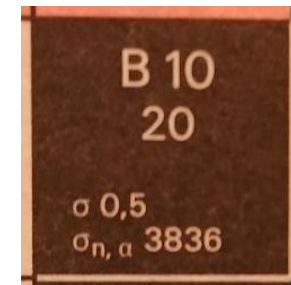
Detectie (H11.6.2)



Detectie van neutronen

Bijvoorbeeld detector met reactie $^{10}\text{B}(n,\alpha)\text{Li}$

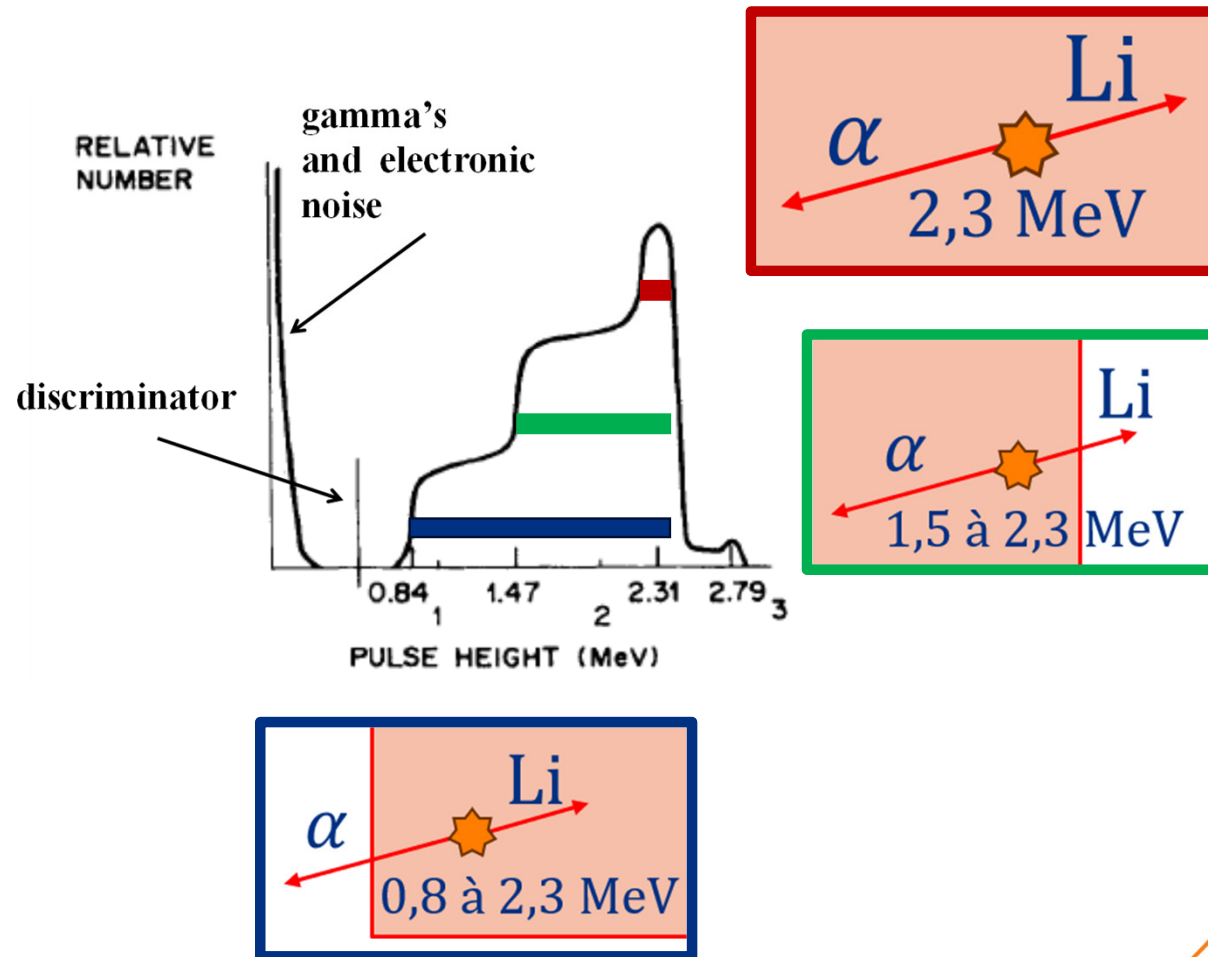
- Hoge werkzame doorsnede
- $Q = 2,3 \text{ MeV}$ (in 96% van de reacties)
 - $E_\alpha = \frac{m_{\text{Li}}}{m_\alpha + m_{\text{Li}}} Q = \frac{7}{4+7} \times 2,3 = 1,5 \text{ MeV}$
 - $E_{\text{Li}} = 0,8 \text{ MeV}$
- Hoeveel energie wordt in de detector geabsorbeerd?



Detectie van neutronen

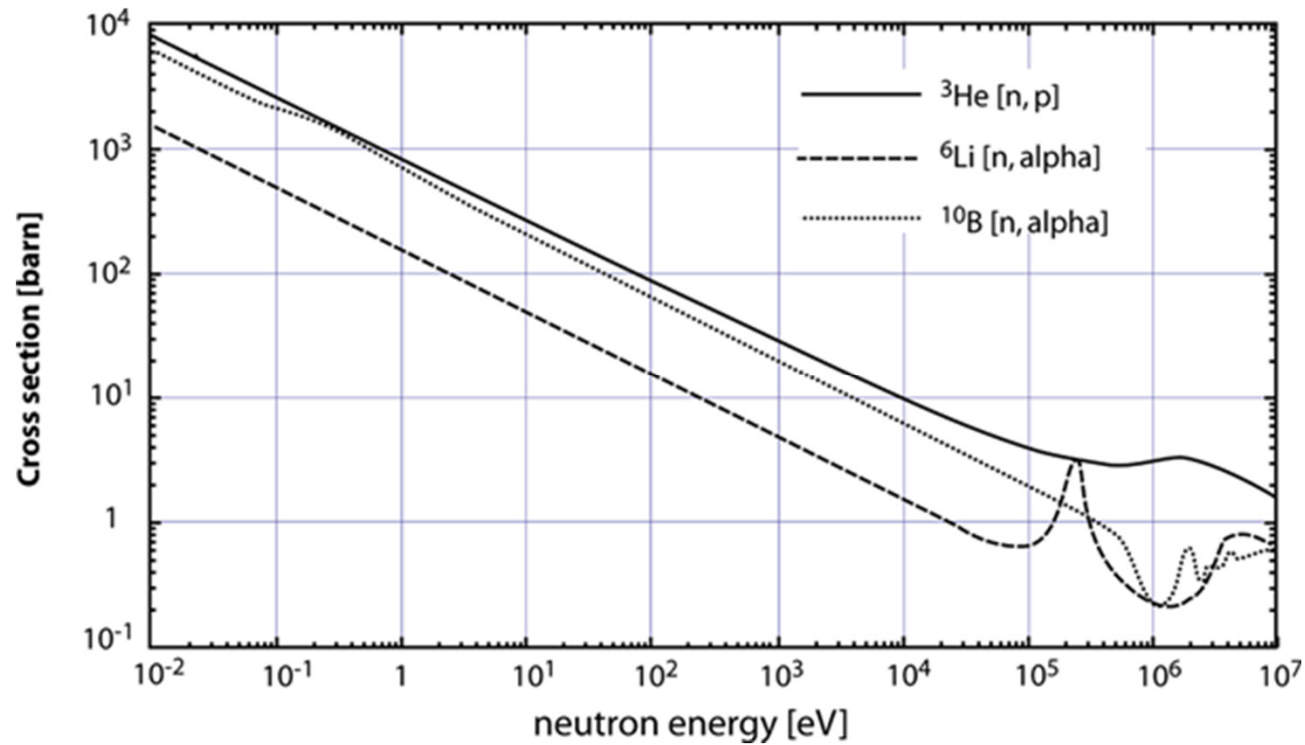
$$E_{\alpha} = 1,5 \text{ MeV}$$

$$E_{Li} = 0,8 \text{ MeV}$$



Detectie van neutronen

- σ wordt snel kleiner bij hogere energie
- Hoe snelle neutronen meten?



Dosimeter (H11.6.3)



Dosismeter neutronen

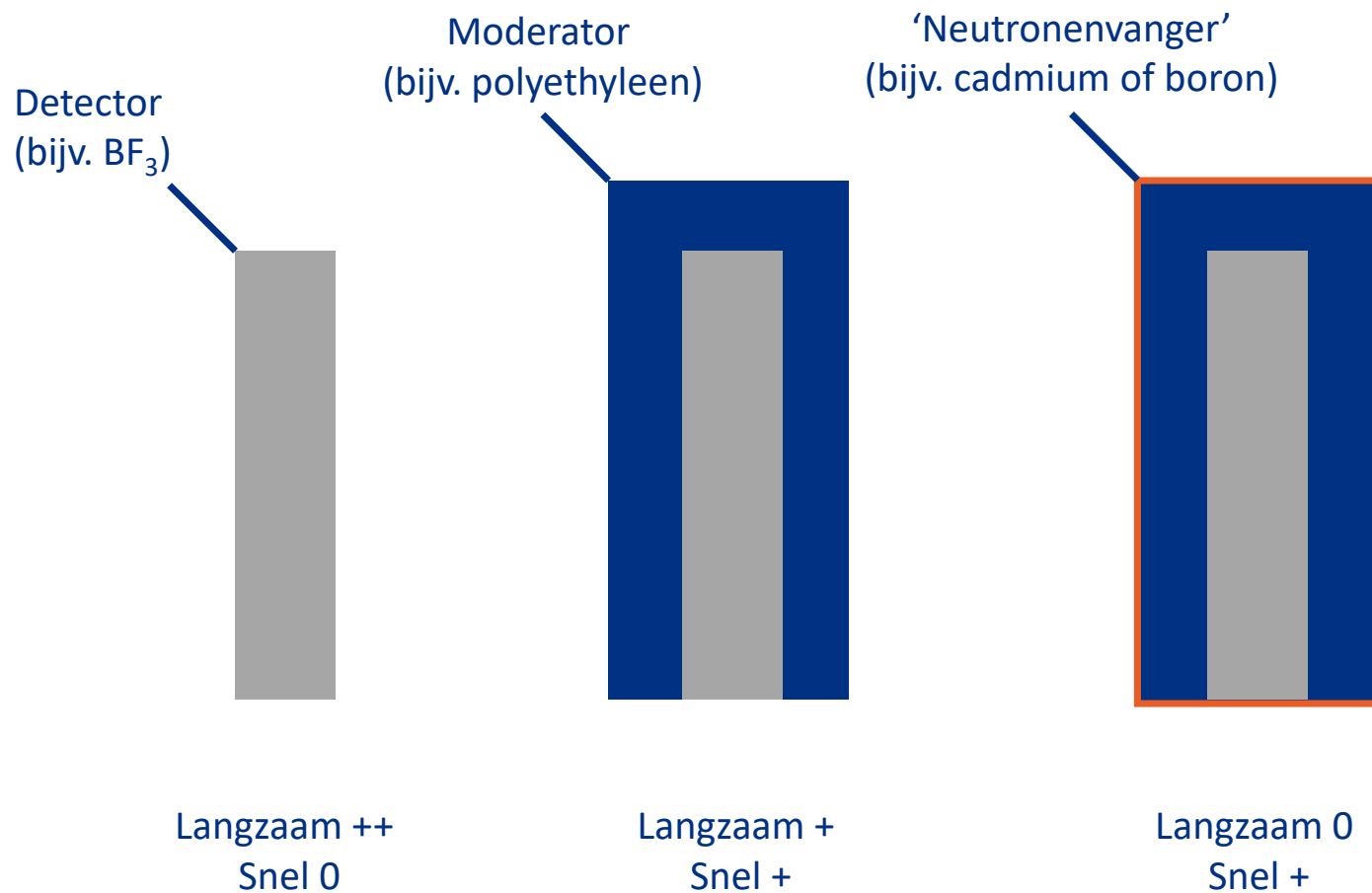
Uitdagingen

- Energie van neutronen hebben vaak een groot bereik (bijv. 10 ordes van grootte)
 - Beïnvloedt efficiëntie v/d detector
 - Beïnvloedt stralingsweegfactor (w_R)

Oplossingen

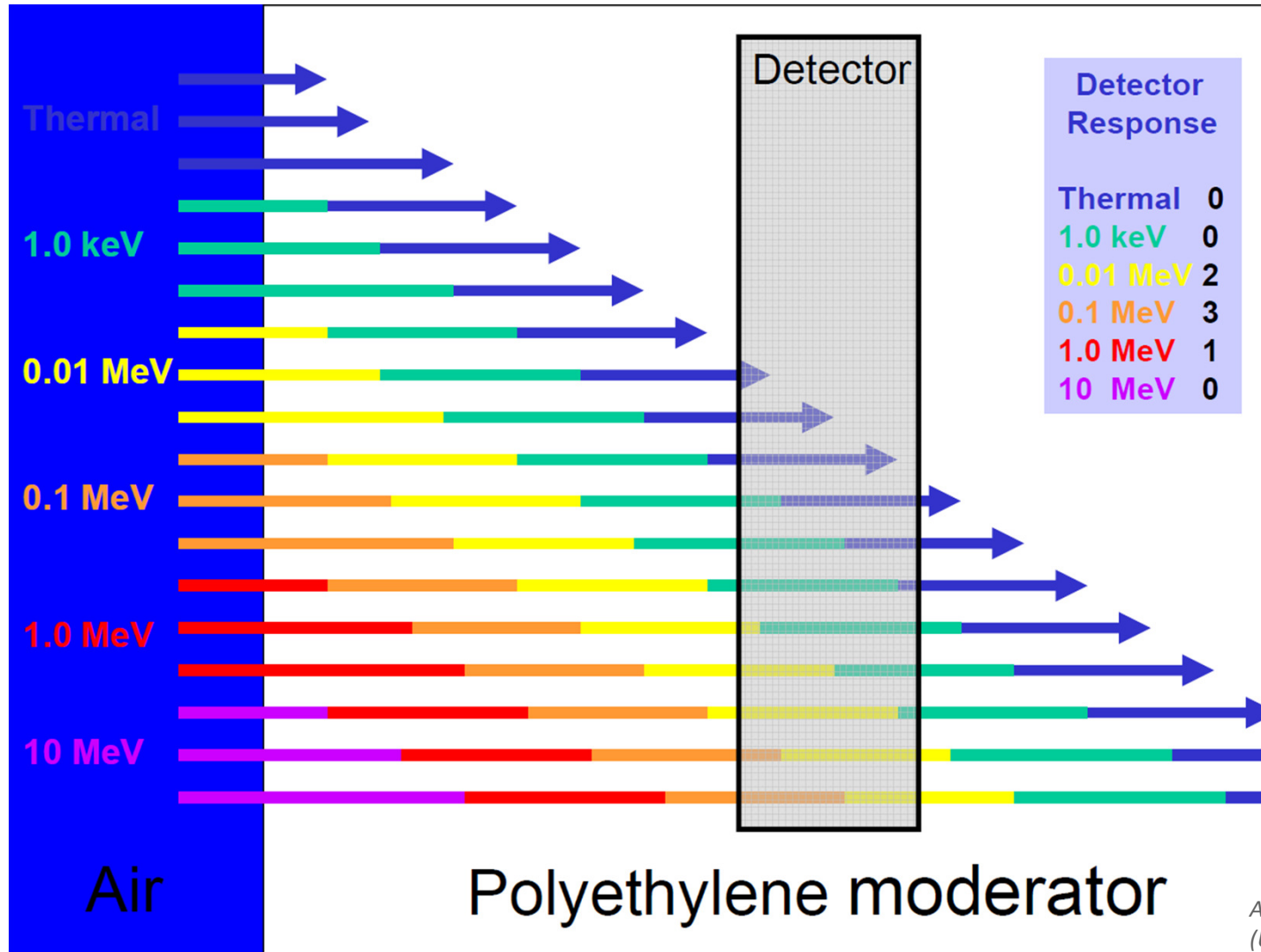
- Spelen met materiaaleigenschappen
- Ieder voordeel heb z'n nadeel

Dosismeter neutronen



Aangepast naar:
(U.S. Nuclear Regulatory Commission, Neutron Detectors, 2010)

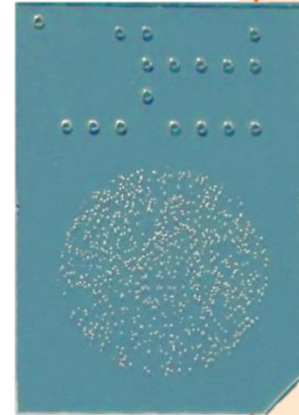
Dosismeter neutronen



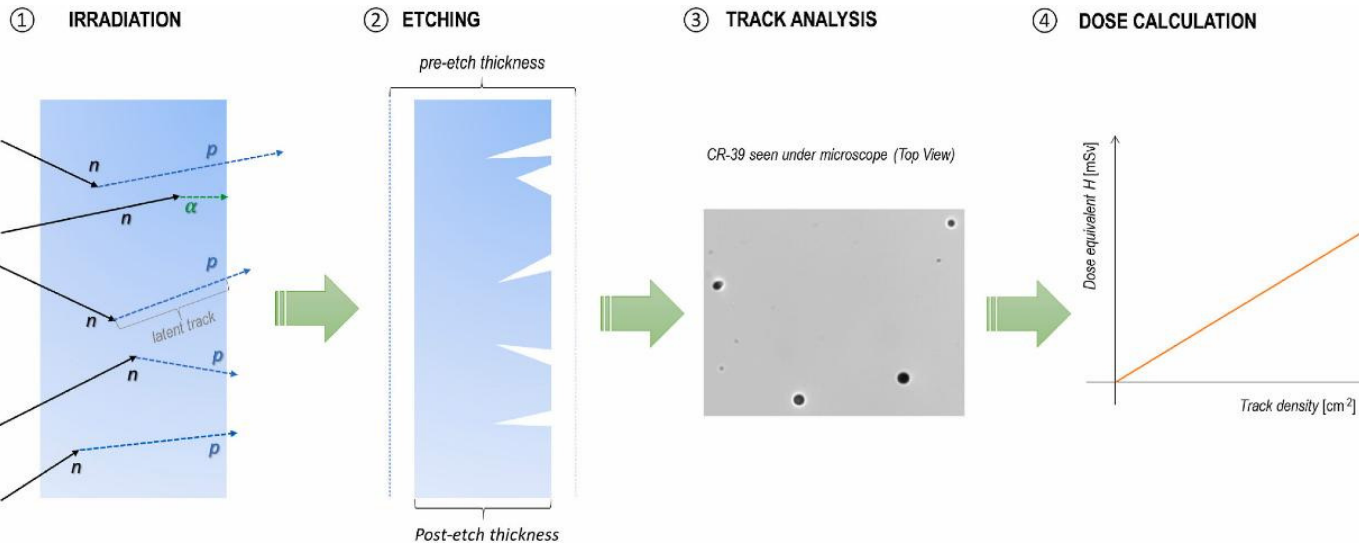
Aangepast naar:
(U.S. Nuclear Regulatory Commission, Neutron Detectors, 2010)

Dosismeter neutronen

Dosimeters van type *Etched Track*



(Mirion Dosimetry Services, Toelichting Neutronendosimetrie)

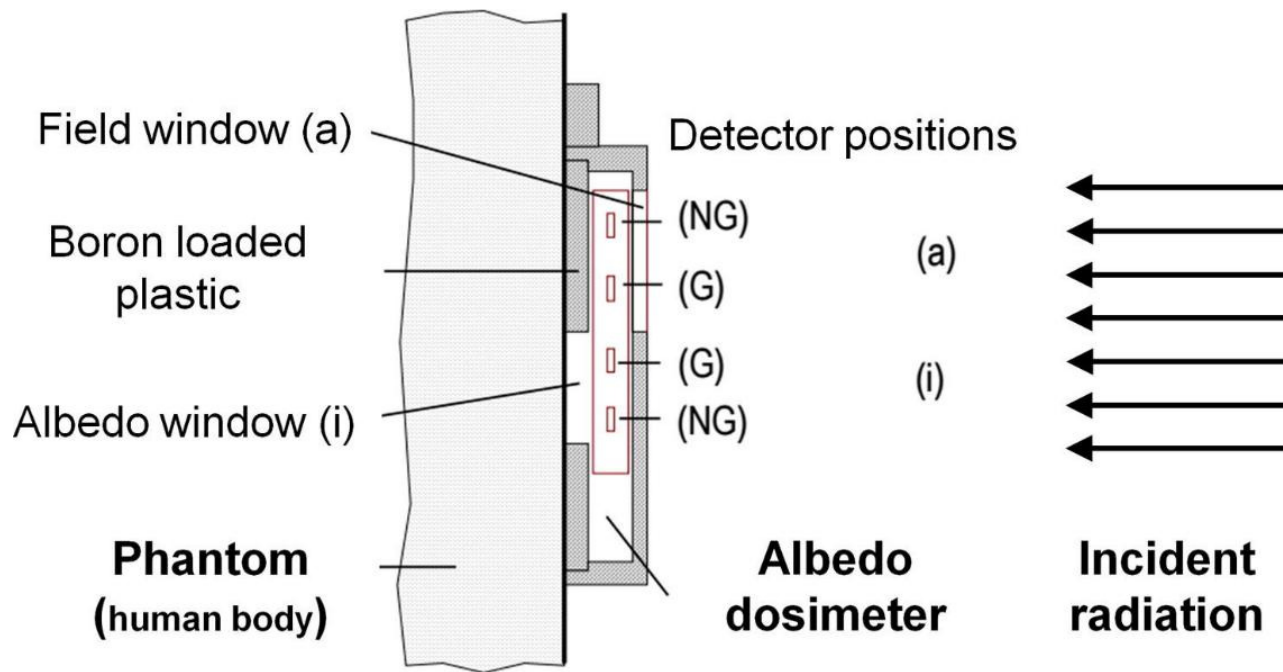


(M. Bolzonella et al., Neutron personal dosimetry using polyallyl diglycol carbonate (PADC): Current status, best practices and proposed research, *Physics Open*, Volume 12, 2022)

Dosismeter neutronen

Dosimeters maken soms gebruik van een 'albedo' venster

- Meet indirecte neutronen die uit het lichaam komen
- Voornamelijk thermische neutronen
- (Albedo en *etched track* sluiten elkaar niet uit)



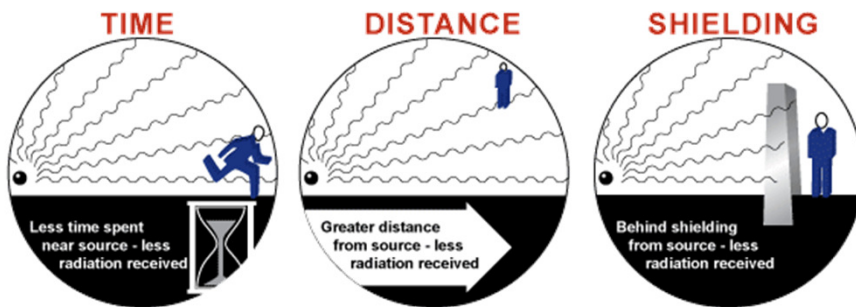
(Bo Pang et al., Monte Carlo based investigation of a universal two-component albedo neutron dosimeter in a deep geological disposal system for high-level nuclear waste, Annals of Nuclear Energy, Volume 98, 2016)

Afscherming (H12.6)



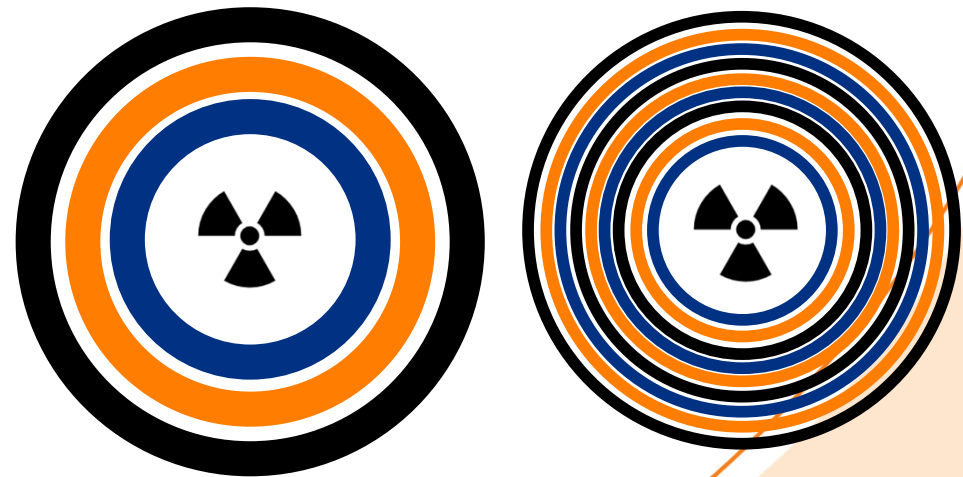
Afscherming

Beschermingsstrategie als gebruikelijk



Afschermingsstrategie 3 componenten

- Modereren = lage A (H)
 - **Afvangen = hoge σ (B-10)**
 - Afschermen γ = hoge ρ & Z (Pb)
- Lagen / laagjes / door elkaar?



Afscherming

Modereren vaak met waterstof.

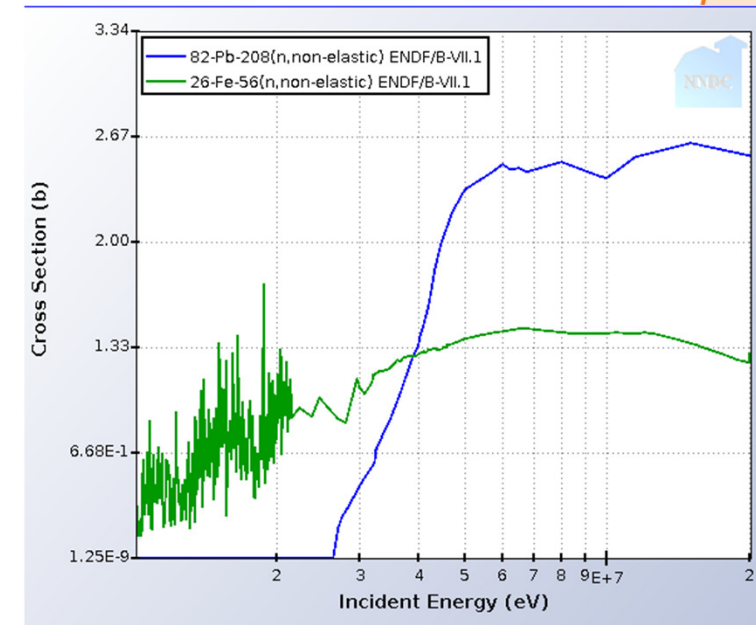
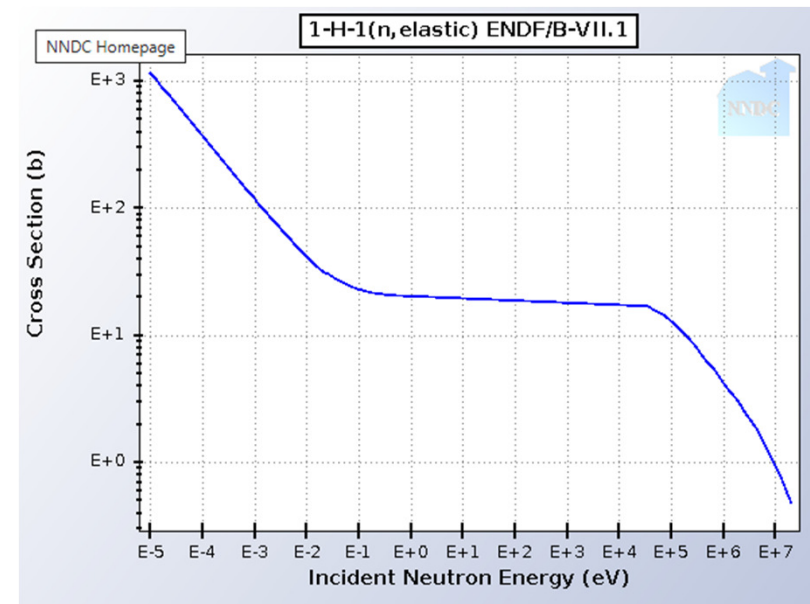
- Water
- Beton (optie: "geboreerd")
- Parafine

β^+ 1,9 ... γ 718; 1022	β^+ 1,0 no γ	σ 0,0034	σ 0,0009	β^- 0,2 no γ
B 9 p	B 10 20 σ 0,5 $\sigma_{n, \alpha}$ 3836	B 11 80 σ 0,005	B 12 20,3 ms β^- 13,4 ... γ 4439 ... (α 0,2 ...)	B 13 17,33 ms β^- 13,4 ... γ 3684 (n 3,6; 2,4)
Be 8	Be 9 100	Be 10 $1,6 \cdot 10^6$ a	Be 11 13,8 s β^- 11,5	Be 12 11,4 ms

Afscherming

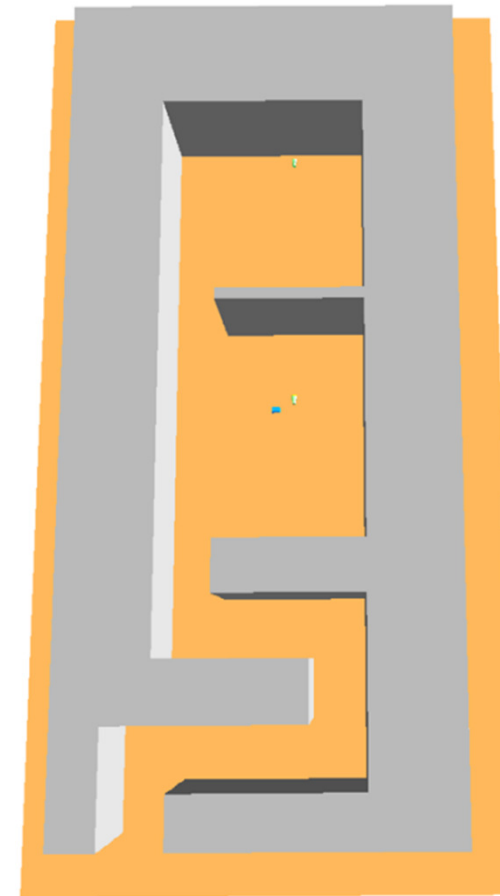
Modereren hogere energie:

- σ_{el} H steeds minder efficiënt
- Alternatief: inelastische botsingen (Fe, Pb)



Afscherming

- Typische ontwerpen afscherming cyclotron
- Berekeningen met Monte Carlo

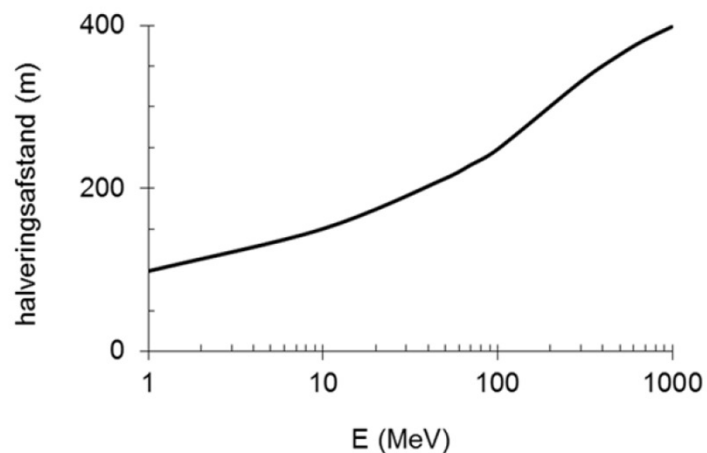
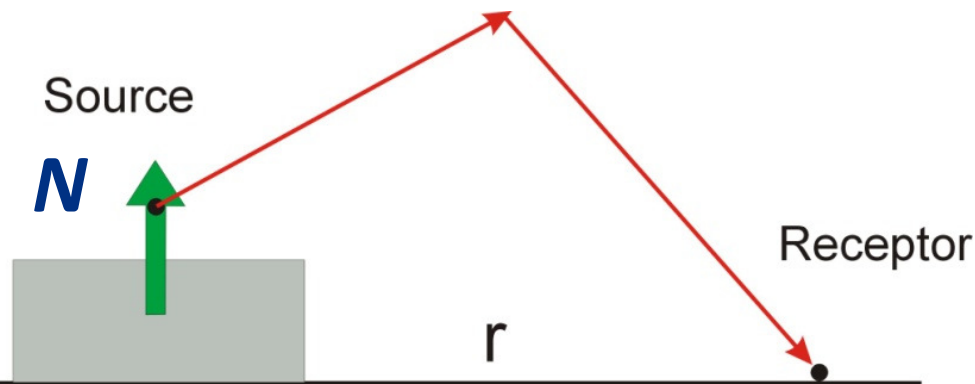


(Van Riper et al., Shielding design of the Mayo Clinic Scottsdale cyclotron vault, 2017)

Skyshine (H12.7)



Skyshine



Figuur 12.10 Halveringsafstand voor skyshine van neutronen als functie van de maximale neutronenergie.

- N neutronen ontsnappen
- Verstrooien aan de lucht (*skyshine*)
- Fluentie = $\Phi(r) = \frac{N}{4\pi r^2} 0,5^{r/d_{1/2}}$
 $d_{1/2}$ in fig. 12.10
- Dosistempo skyshine:
 $\dot{H}_{sky}(r) = h\Phi(r)$
Met h (Sv m²) in fig. 9.6

Vraagstuk

De afscherming van een bron laat per seconde 10^9 neutronen door, met een energie van 1 MeV.

- Bereken de neutronenfluentie Φ t.g.v. *skyshine* op een afstand van 200 m.
- Bereken het dosistempo daar ten gevolge van *skyshine*.

a) Aflezen fig. 12.10: $d_{1/2} = 100$ m

$$\Phi(r) = \frac{N}{4\pi r^2} 0,5^{r/d_{1/2}} = \frac{10^9 \text{ s}^{-1}}{4\pi(200 \text{ m})^2} 0,5^{200/100} = 497 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

b) Aflezen fig. 9.6: $h = 400 \text{ pSv cm}^2 = 0,04 \text{ pSv m}^2$

$$\dot{H}_{sky}(r) = h\Phi(r) = 0,04 \text{ pSv m}^2 \cdot 497 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} = 20 \text{ pSv s}^{-1}$$

Examenopgaven

Dec 2008 vraag 4.1-4.2

Dec 2020 vraag 4.2-4.4