

**Universiteit Twente**  
**Faculteit Technische Natuurwetenschappen**

**Syllabus**  
**Stralingsbescherming**  
**(Radiation Expertise)**

**F.F.M. de Mul**  
**2008**

# **Stralingsbescherming**

## **Inhoud college**

1. Radioactiviteit en Straling
2. Wisselwerking straling – materie
3. Dosimetrie I (fysisch)
4. Stralingsbronnen
5. Biologische gevolgen
6. Dosimetrie II (stralingsbescherming)
7. Achtergrondstraling
8. Normen
9. Inwendige besmetting
10. Meetmethoden
11. Uitwendige bestraling
12. Inwendige bestraling
13. Practische stralingshygiëne
14. Wetten en regels

# **Stralingsbescherming**

## **Practicum**

- I. Absorptiemetingen aan  $\beta$ -emitters
- II.  $\gamma$ -Spectrumanalyse met de multichannel-analyzer
- III. Vloeistof-scintillatietellingen
- IV. Instelling en calibratie van een GM-detector
- V. Manipuleren met open bronnen
- VI. Kwalitatieve identificatie van nucliden
- VII. Bescherming tegen uitwendige bestraling
- VIII. Absolute activiteitsmetingen aan  $^{125}\text{I}$ -telmonsters

## Bouw van het atoom

<u>Deeltjes</u>	<u>Aantal</u>	<u>Lading/deeltje</u>	<u>Massa/deeltje</u>
<b>atoomkern:</b>	A		
- protonen	Z	1	1
- neutronen	N	0	1
<b>eromheen:</b>			
- electronen	$\leq Z$ (*)	-1	0
<b>extra:</b>			
- positronen		+1	0
- neutrino's		0	0

(\*): indien  $\langle Z$ : geïoniseerd

## Voorbeelden:

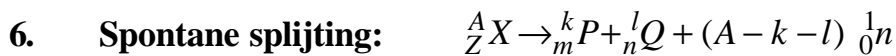
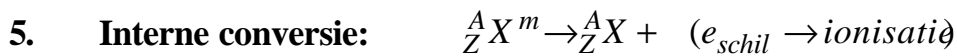
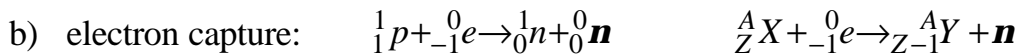
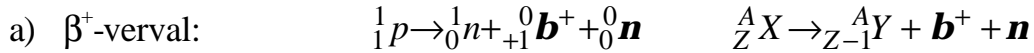
waterstof	${}^1_1H$	proton	${}^1_1p$
deuterium	${}^2_1D$	neutron	${}^1_0n$
tritium	${}^3_1T$	electron	${}^0_{-1}e = e^- = \mathbf{b}^-$
helium	${}^4_2He = \mathbf{a}$	positron	${}^0_{+1}e = e^+ = \mathbf{b}^+$
uranium	${}^{235}_{92}U, {}^{238}_{92}U, \dots$		

# Verval

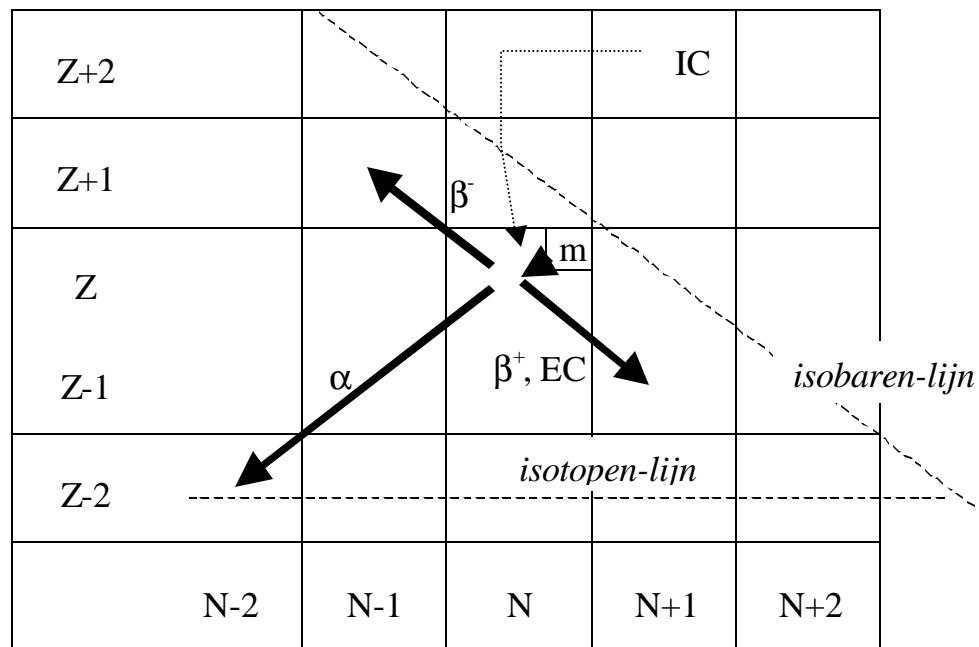
## 1. Neutronenoverschot (N>Z): b<sup>-</sup>-verval



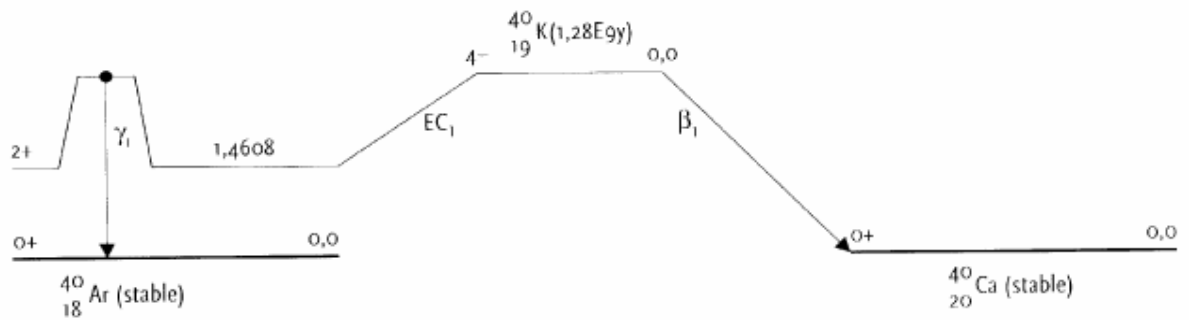
## 2. Protonenoverschot (N<Z):



waarbij  $k$  en  $l$  beide  $\approx \frac{1}{2}A$  ; en  $m$  en  $n$  beide  $\approx \frac{1}{2}Z$



## Vervalschema en emissiegegevens van $^{40}\text{K}$ (fig. 1-26).



### 19 POTASSIUM 40

HALFLIFE = 0.128E 10 YEARS  
DECAY MODE(S):  $\beta^-$ , EC

05 MAY 77

RADIATION	y(i) (Bq s) <sup>-1</sup>	E(i) (MeV)	y(i) x E(i)
$\beta^-$ 1	8.93E 01	5.850E 01*	5.22E 01
$\gamma$ 1	1.07E 01	1.461E 00	1.56E 01
ce $L_{11}$ , $\gamma$ 1	2.82E 06	1.458E 00	4.10E 06
ce $L_{12}$ , $\gamma$ 1	2.31E 07	1.460E 00	3.38E 07
ce $L_{21}$ , $\gamma$ 1	5.46E 10	1.461E 00	7.97E 10
ce $L_{22}$ , $\gamma$ 1	8.26E 10	1.461E 00	1.21E 09
$K\alpha_1$ X-ray	5.79E 03	2.958E 03	1.71E 05
$K\alpha_2$ X-ray	2.91E 03	2.956E 03	8.60E 06
$K\alpha_3$ X-ray	2.87E 10	2.883E 03	8.29E 13
$K\beta_1$ X-ray	5.91E 04	3.190E 03	1.89E 06
$K\beta_2$ X-ray	3.00E 04	3.190E 03	9.58E 07
$L\alpha$ X-ray	2.63E 05	2.452E 04*	6.45E 09
$L\beta_1$ X-ray	3.22E 06	3.076E 04*	9.89E 10
Auger KLL	6.49E 02	2.640E 03*	1.71E 04
Auger KLX	8.42E 03	2.919E 03*	2.46E 05
Auger KXY	4.85E 04	3.174E 03*	1.54E 06
Auger MXY	1.03E 02	1.587E 05*	1.64E 07
LISTED X, $\gamma$ AND $\gamma^+$ RADIATIONS			1.56E 01
LISTED $\beta^-$ , ce AND Auger RADIATIONS			5.23E 01
LISTED RADIATIONS			6.79E 01

\* AVERAGE ENERGY (MeV)

CALCIUM-40 DAUGHTER, YIELD 8.93E 01,  
IS STABLE.

ARGON 40 DAUGHTER, YIELD 1.07E 01,  
IS STABLE.

### Plaatsing dochternuclide (of isomeer productnuclide):

- linksonder indien emissie = EC (electron capture) of  $\beta^+$  (positron),
- verticaal onder indien emissie =  $\gamma$  of R $\ddot{o}$ ,
- rechtsonder indien emissie =  $\beta^-$  (electron).

### Betekenis symbolen:

- y : yield (= waarschijnlijkheid)
- $\beta^-$  : electron-emissie (in tabel wordt  $E_{gem} \approx \frac{1}{3} E_{max}$  genoteerd),
- $\beta^+$  : positron-emissie (in tabel idem),
- $\gamma^\pm$  : annihilatiestraling als  $\beta^+$  recombineert met electron, levert 2 x 511 keV fotonen,
- $\gamma$  : elektromagnetische straling uitgezonden door de kern, met identificatienummers ( $\gamma_n$ ),
- ce –  $L_1$ ,  $\gamma_n$  : conversie-electron = schil-electron dat uit atoom worden weggeschoten, in dit geval uit de  $L_1$ -subschil (de L-schil heeft 3 subschillen); het ce-electron concurreert met  $\gamma_n$ ; de verhouding ce /  $\gamma_n$ -quanten = conversiefactor  $\alpha$ .

- EC ( $\epsilon$ ): electron capture uit binnenschil (K of L), gevolgd door karakteristiek Röntgenstraling of Auger-electron (zie onder).
- $K_\alpha$  : Karakteristieke röntgenstraling als een schil-electron naar naar lagere schil springt (als daar een gat is);  $K_\alpha = (L \rightarrow K)$  ;  $K_\beta = (M, N.. \rightarrow K)$  etc.
- KLL: Auger-electron ontstaat in de plaats van karakteristieke röntgenstraling. (notatie KLM : schil-electron van L-schil naar gat in K-schil; M = schil waaruit Auger-electron wordt weggeschoten (indien M arbitrair, dan notatie M wordt X);  
Kans op R $\ddot{o}$  bij opvullen gat in schil X = fluorescence yield  $\omega_X$  (zie fig. 1.19)
- $\alpha$ : alfa-emissie, met recoil-energie (terugstoot) die kern krijgt.

## Moeder-dochterrelaties

$N_1 \textcircled{R} N_2 \textcircled{R} N_3$  , met  $N_3 = \text{stabiel}$

vergelijkingen:  $dN_1/dt = -\mathbf{I}_1 N_1$

$$dN_2/dt = +\mathbf{I}_1 N_1 - \mathbf{I}_2 N_2$$

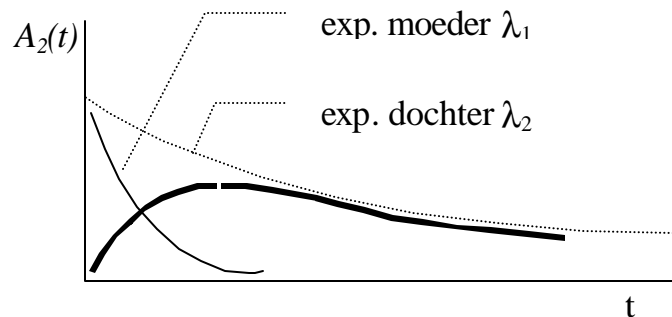
$$dN_3/dt = +\mathbf{I}_2 N_2$$

oplossing:  $A_2(t) = \frac{\mathbf{I}_2}{\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_1} A_1(0) [e^{-\mathbf{I}_1 t} - e^{-\mathbf{I}_2 t}] + A_2(0) e^{-\mathbf{I}_2 t}$

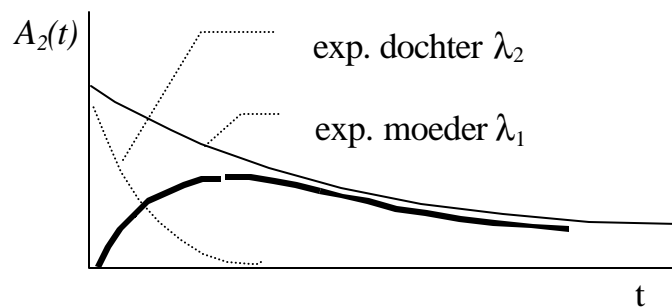
vaak:  $A_2(0) = 0$ .

### gevallen:

(1)  $\lambda_1 > \lambda_2$  : moeder sneller dan dochter



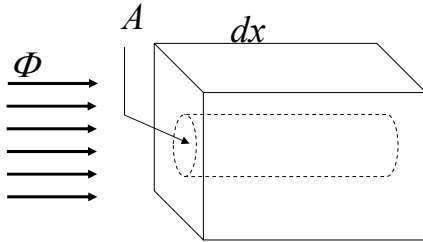
(2)  $\lambda_1 < \lambda_2$  : dochter sneller dan moeder



indien  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  : evenwicht.  $A_1(t) = A_2(t) = A_1(0) \cdot \exp(-\mathbf{I}_1 t)$



## Werkzame doorsnede $\sigma$ [m<sup>2</sup>]



$\Phi$  : deeltjesfluentie [m<sup>-2</sup>]  
 $A$  : oppervlak cilinder [m<sup>2</sup>]  
 $dx$  : dikte cilinder [m]  
 $n$  : atoombichtheid [m<sup>-3</sup>]  
 $\rho$  : massadichtheid [kg.m<sup>-3</sup>]

$\sigma$  : werkzaam oppervlak van elk atoom [m<sup>2</sup>]

In cilinder :  $nA \cdot dx$  atomen.

Aanname: atomen dekken elkaar niet af ( $dx$  voldoende klein)

Trefkans  $k$  per invallend deeltje:  $k = \frac{\text{trefoppervlak}}{\text{totaal oppervlak}} = \frac{nA \cdot dx \cdot \sigma}{A} = n \cdot dx \cdot \sigma$

Trefkans  $\equiv$  verzwakkingsfactor bundel =  $-\frac{d\Phi}{\Phi}$

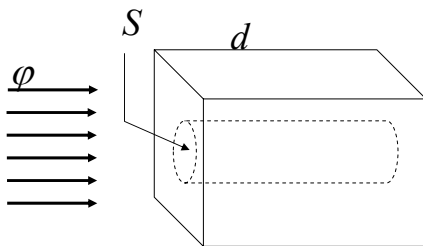
Dus:  $d\Phi = -n \cdot dx \cdot \sigma \Phi$

Oplossing:

$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot \exp(-n\sigma \cdot x)$

Verzwakkingscoëfficiënt  $\mu = n\sigma$  [m<sup>-1</sup>]

## Neutronen-activering (1)



$\phi$  : neutronenfluentietempo [m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>]  
 $S$  : oppervlak cilinder [m<sup>2</sup>]  
 $d$  : dikte cilinder [m]  
 $\rho$  : massadichtheid [kg.m<sup>-3</sup>]  
 $\sigma$  : werkzame doorsnede [m<sup>2</sup>]

Aantal "moeder"-kernen in cilinder:  $N = \frac{mN_A}{M}$        $m = \rho S d$

Trefkans  $k$  per invallend neutron:  $k = \frac{\text{trefoppervlak}}{\text{totaal oppervlak}} = \frac{N \cdot \sigma}{S}$

Aantal neutronen dat per sec de cilinder binnentreedt:  $= \phi S$  [s<sup>-1</sup>]

Aantal gevormde "dochter"-kernen per sec = productietempo :

$\dot{P} = \dot{N}^* = \frac{N\sigma}{S} \phi S = N\sigma\phi$  [s<sup>-1</sup>]

## Neutronen-activering (2)

Moederkernen:  $N$   
 Dochterkernen:  $N^*$

Werkzame doorsnede  
 voor vangst:  $\sigma$  [ $\text{m}^2$ ]

Voorbeeld:  
 $^{27}\text{Al} + \text{n} \rightarrow ^{28}\text{Al} + \gamma$   
 $^{28}\text{Al} \rightarrow ^{28}\text{Si} + \beta^-$

Productie en verval:

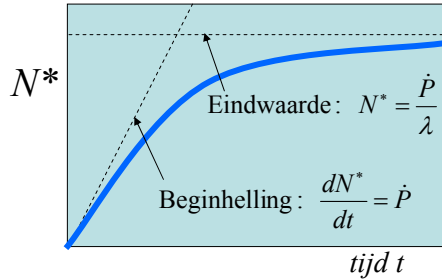
$$\frac{dN^*}{dt} = \dot{P} - \lambda N^*$$

$P$ : Productie [tot.aantal]  
 $\dot{P}$ : Productietempo  
 [aantal/sec]

$$\dot{P} = N\sigma\phi$$

$$t = 0: N^* \approx 0$$

$$t \rightarrow \infty: dN^*/dt \rightarrow 0$$



$$N^*(t) = \frac{\dot{P}}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}]$$

## Neutronen-activering (3)

Moederkernen:  $N$   
 Dochterkernen:  $N^*$

Productie en verval:

$$\frac{dN^*}{dt} = \dot{P} - \lambda N^*$$

$P$ : Productie [tot.aantal]

$\dot{P}$ : Productietempo van  
aantal dochterkernen  
 [aantal/sec]

$$\dot{P} = N\sigma\phi$$

$$N^*(t) = \frac{\dot{P}}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}]$$

NB1. Vermenigvuldiging met  $\lambda$  geeft  
 de Activiteit als  $f(t)$  [Bq]

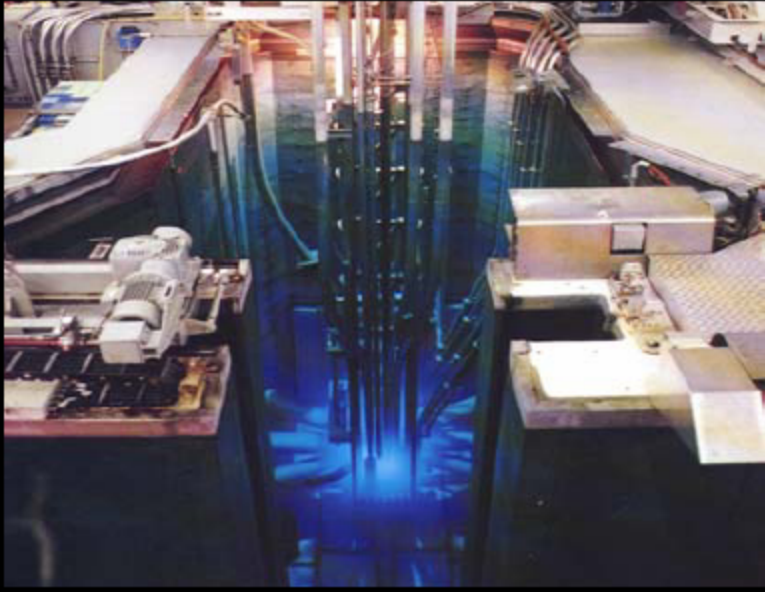
$$A^*(t) = \dot{P} [1 - e^{-\lambda t}]$$

NB2. Indien productie van Activiteit  
 in plaats van dochterkernen:

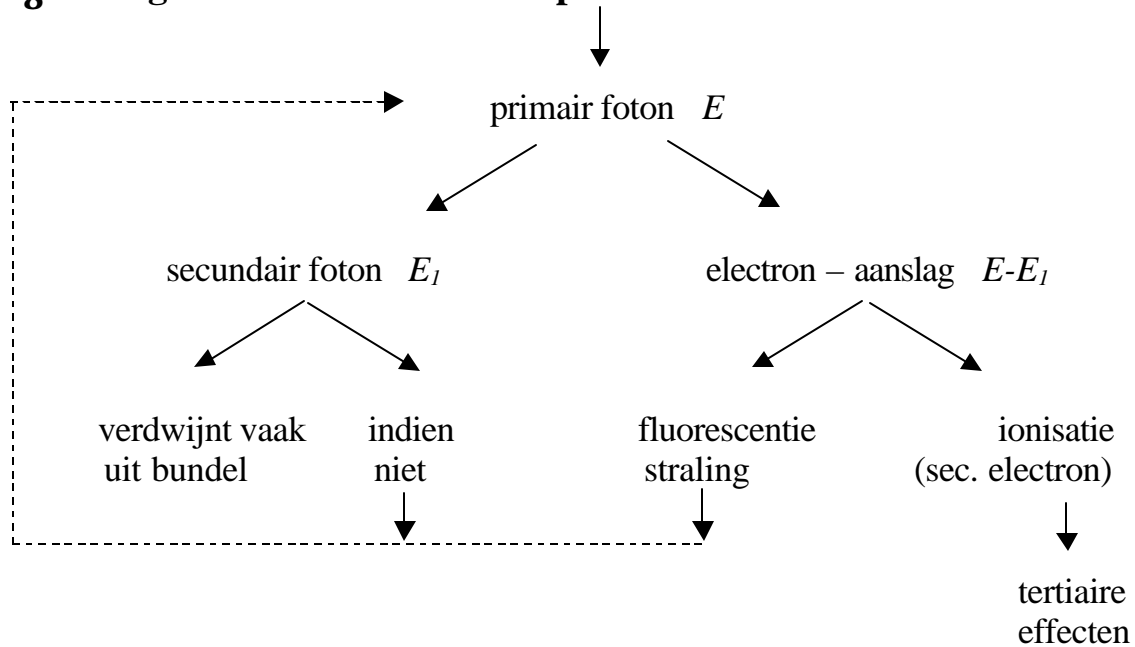
$$A(t) = \frac{\dot{P}}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}]$$

$\dot{P}$  = Productietempo van activiteit [Bq/s]

Cerenkov-effect in kernreactor



## g - energie-overdracht en absorptie.



### Interactiemechanismen:

type	E (MeV)	mechanisme
• Rayleigh scattering	$\ll 1$	interactie met gehele elektronenwolk; geen E-overdracht
• Foto-effect	$\approx 1$	absorptie primair foton; ionisatie of aanslag electron
• Compton-verstrooiing	$\approx 1-10$	interactie met 1 electron; sec. foton en electron worden verstrooid
• Paarvorming	$> 1.02$	productie $e^+$ en $e^-$ ; $e^+$ annihileert snel; $e^-$ wordt verstrooid.
• Kernfoto-effect.	$\approx 10$	absorptie door kern; emissie neutron ( $\gamma, n$ )-reactie

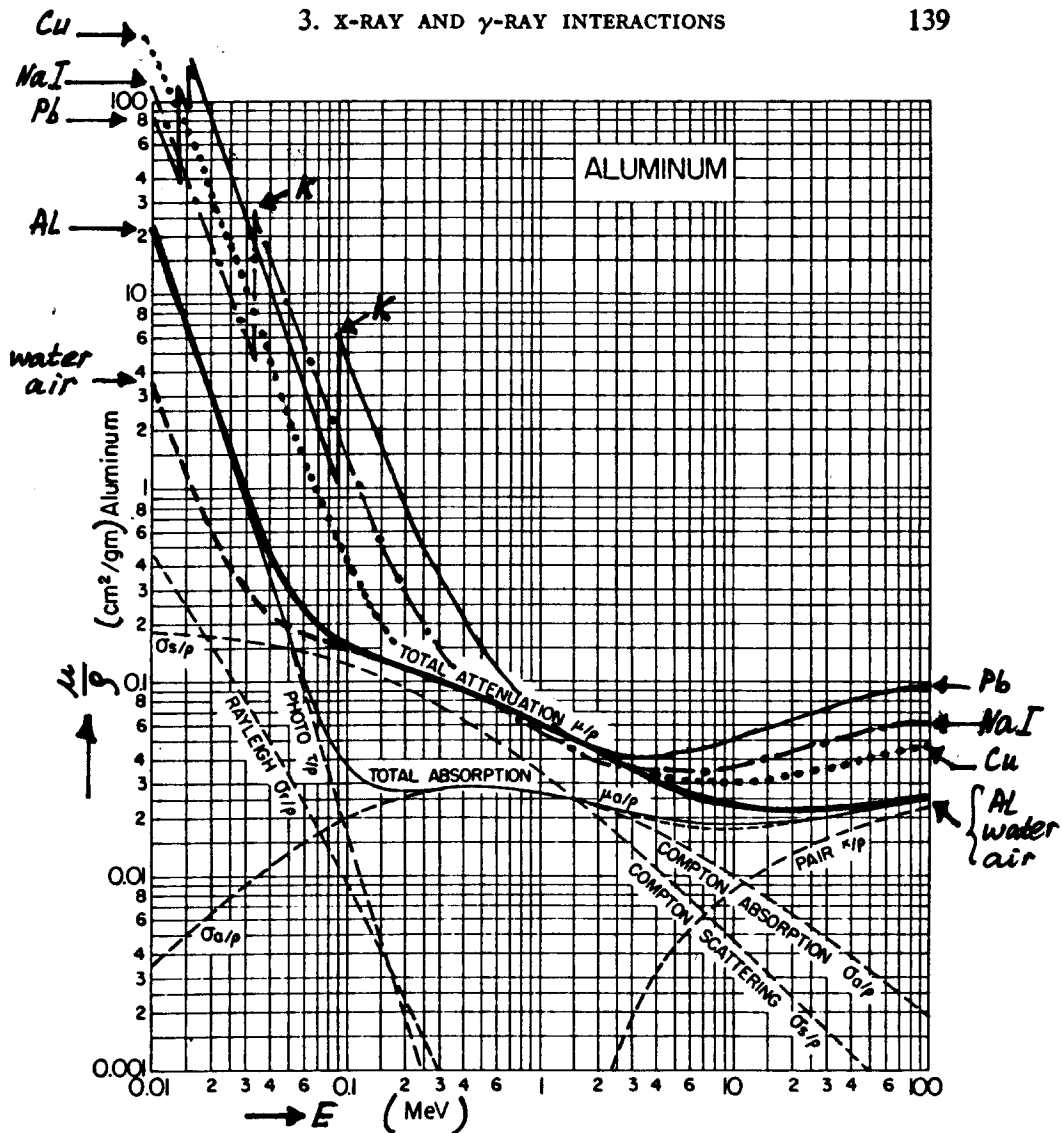
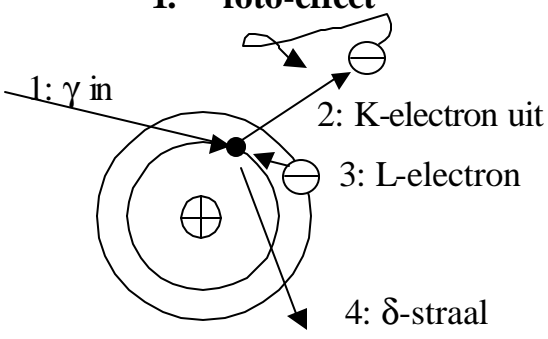
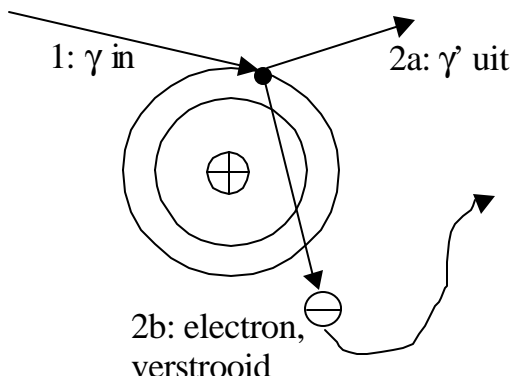
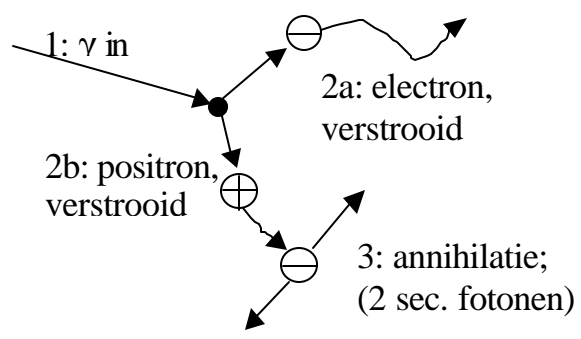


FIG. 8. Mass attenuation coefficients for photons in aluminum ( $Z = 13$ ). The dashed branch on the  $\mu_a/p$  curve shows the effect of excluding annihilation photons, Eq. (47). The corresponding linear coefficients for aluminum may be obtained by multiplying all curves by  $\rho = 2.70 \text{ gm/cm}^3 \text{ Al}$ . From Evans (1963).

**g-interactiemechanismen**

$$E_g = h\nu \quad ; \quad E_{g'} = h\nu'$$

mechanisme	coëfficiënt	fractie energie naar secundaire deeltjes
<p><b>1. foto-effect</b></p> 	$t_a = f_{g,e} t$	$1 - \frac{d}{h\nu} = f_{g,e}$
<p><b>2. Compton-effect</b></p> 	$s_{Ca} = f_{g,g'e} s_C$	$1 - \frac{h\nu'}{h\nu} = f_{g,g'e}$
<p><b>3. Paarvorming</b></p> 	$k_a = f_{g,ee^+} k$	$1 - \frac{2m_0c^2}{h\nu} = f_{g,ee^+}$

Totaal:  $\mu = \tau + \sigma_C + \kappa$

Energieoverdracht  $\mu_{tr} = \tau_a + \sigma_{Ca} + \kappa_a \quad \rightarrow \text{Kerma}$

Energieabsorptie  $\mu_{en} = \mu_a (1-g) \quad \rightarrow \text{Dosis}$

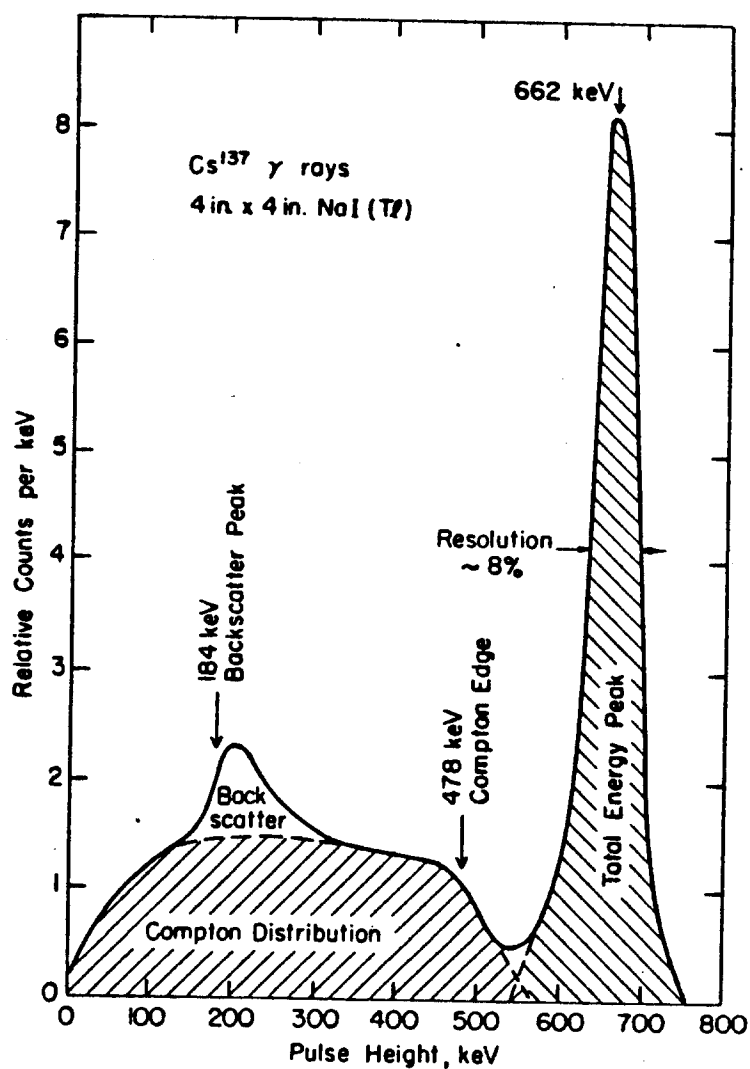
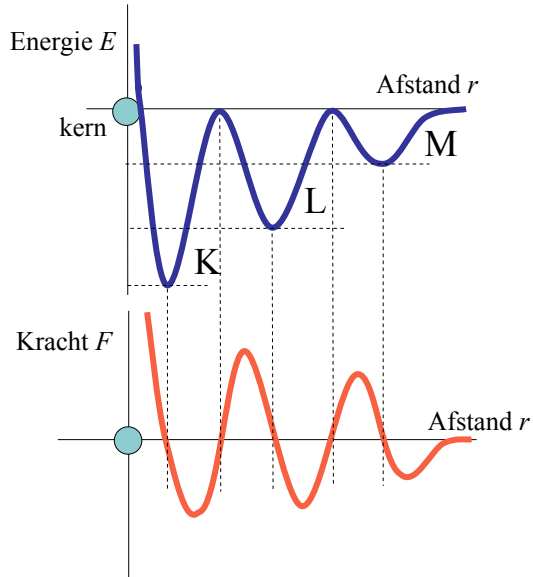


FIG. 13. Typical pulse-height distribution in a  $4 \times 4$  inch NaI(Tl) scintillator irradiated by 0.662-MeV  $\gamma$  rays from the decay of  $\text{Cs}^{137}$ . The resolution is about 8% of the energy of the total-energy peak. For  $h\nu_0 = 662$  keV,  $(h\nu')_{\text{min}} = 184$  keV, and  $T_{\text{max}} = 478$  keV as marked. From Evans (1963).

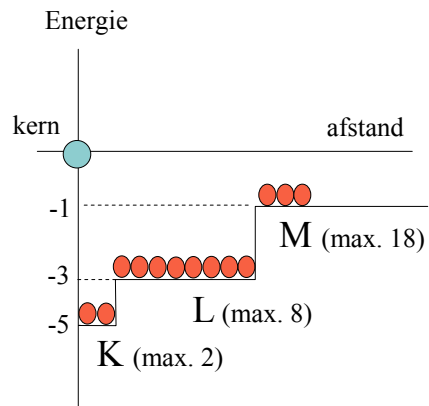
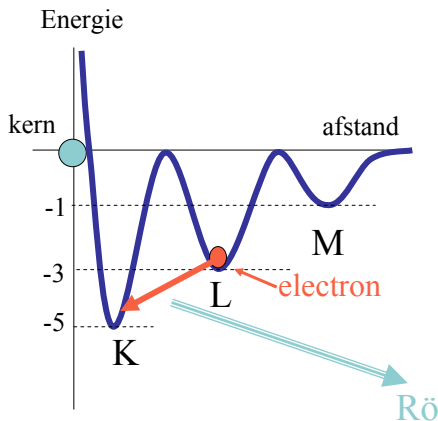
## Wisselwerking: Electronenbanen



$$F = -\frac{dE}{dr}$$

$F > 0$  : afstotend  
 $F < 0$  : aantrekkend

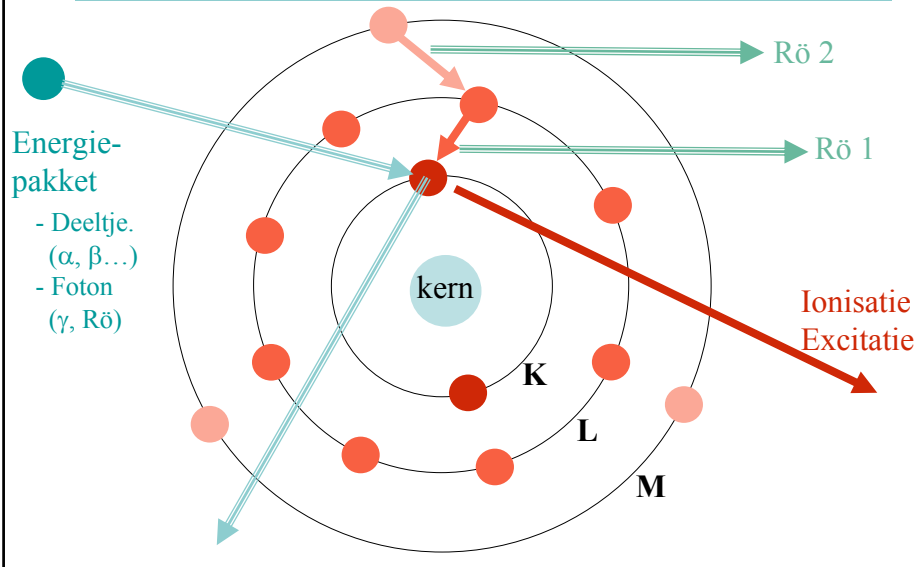
## Wisselwerking: Electronenbanen



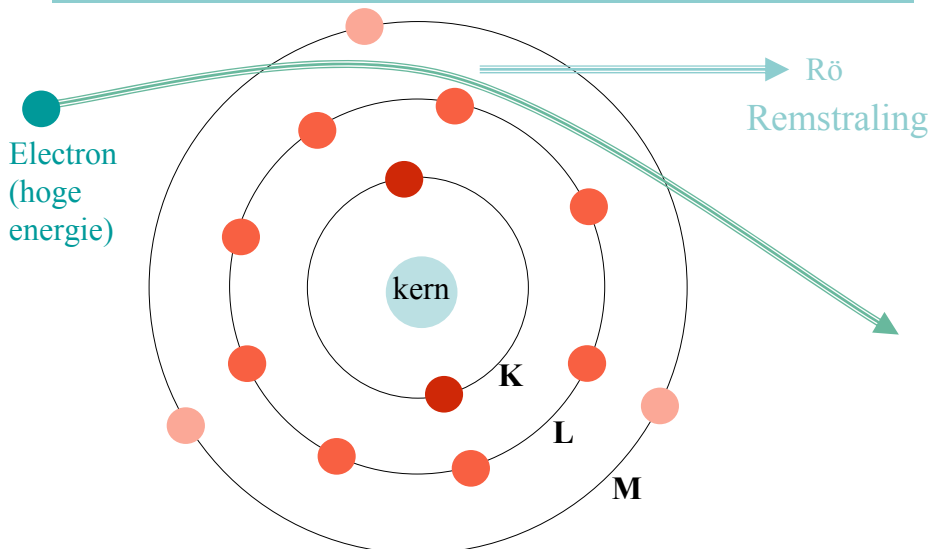
Electron van L naar K:  
 - Energie electron: -3 → -5 eV  
 Overschot wordt uitgezonden  
 als Rö van 2 eV



## Interactie met deeltjes → Röntgenstraling (1) Inelastische botsingen



## Interactie met electronen → Röntgenstraling (2) Electronen ondergaan afbuiging (versnelling)

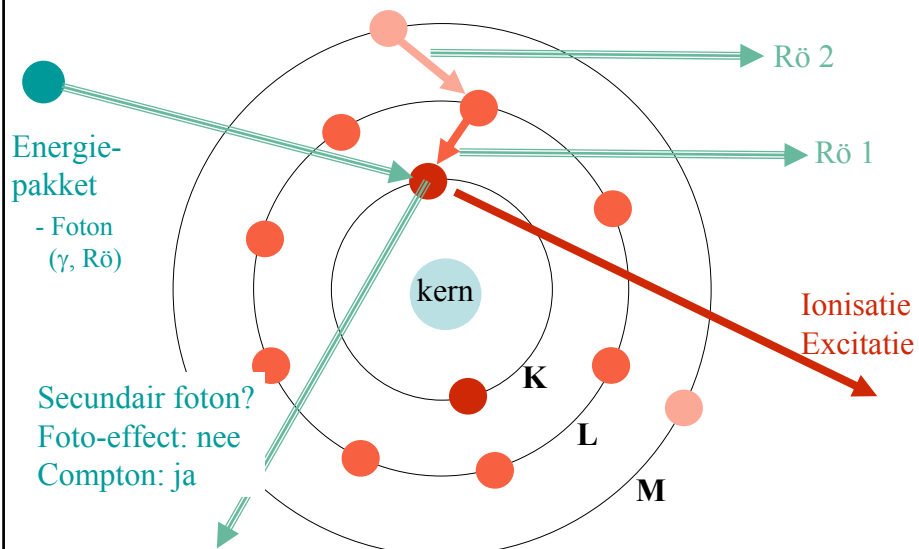


# Röntgenstraling

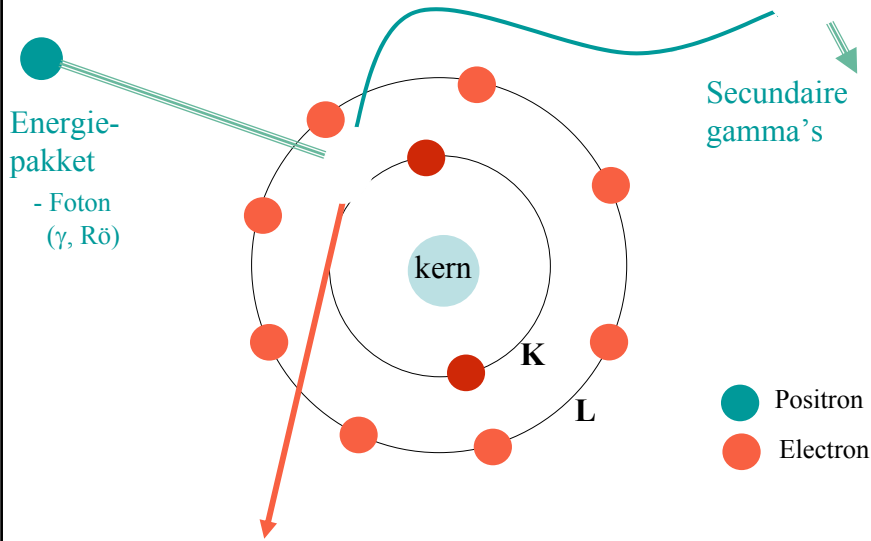
Ontstaan:

1. Energie ten gevolge van “omlaagvallende” elektronen (van hogere naar lagere schil)
2. Remstraling: afremming hoogenergetische elektronen

## Interactie met fotonen: foto- en Compton-effect

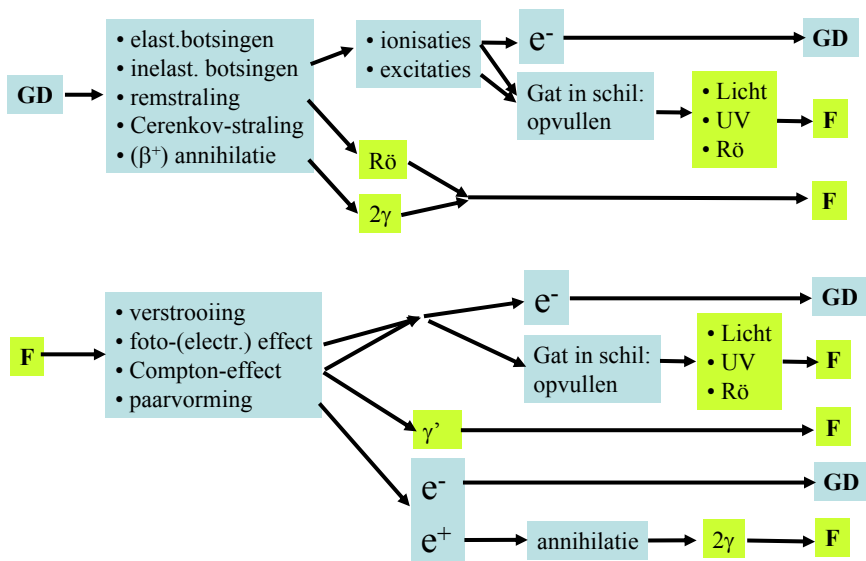


## Interactie met fotonen: paarvorming



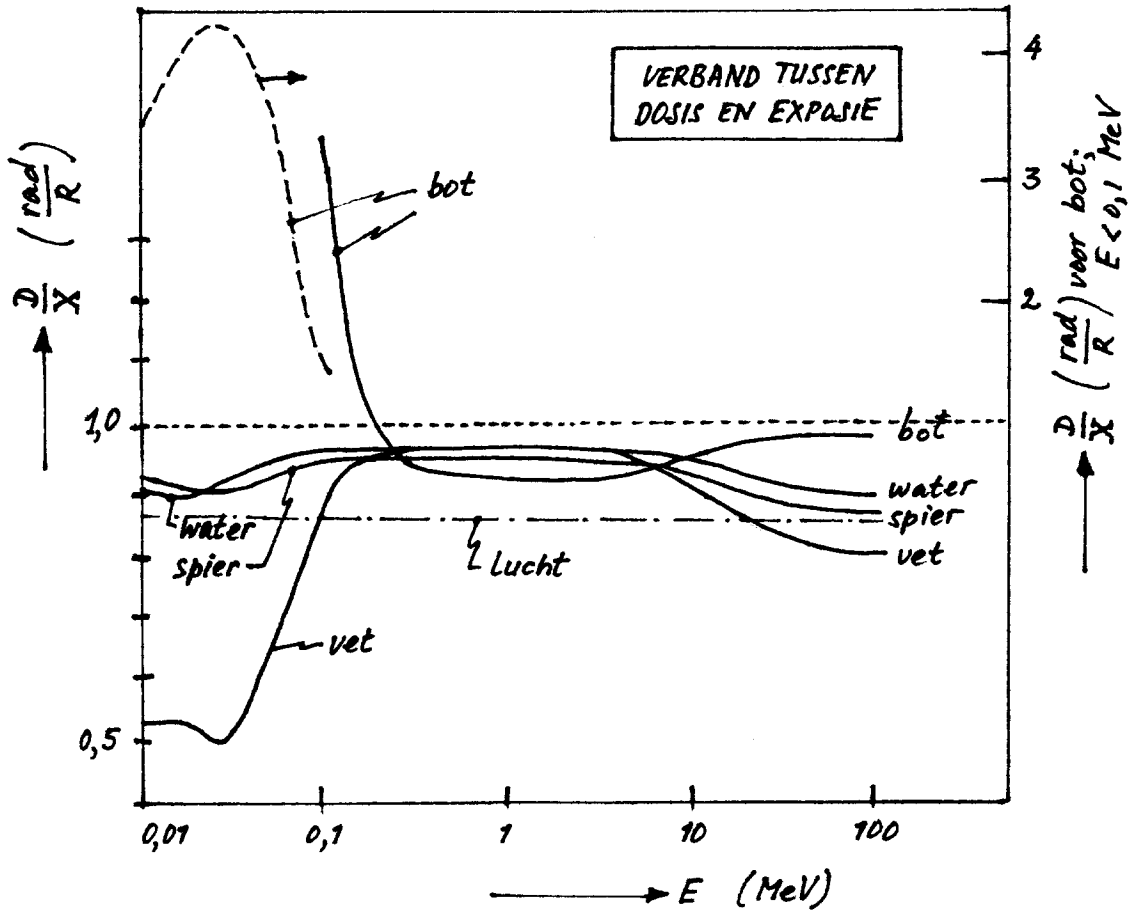
## Wisselwerking straling – materie: overzicht

GD = geladen deeltje ( $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\alpha$ ,  $p$ ); F = foton ( $\gamma$ ...Röntgen...UV...licht)



## Wisselwerking neutronen – materie:

Classificatie	Energie	Karakteristieke processen	Effecten
Koud (sub-thermisch)	< 25 meV	vangst (+ event. splijting) id.	event. ionis. deeltjes ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) + event. splijtings-producten
Langzaam (thermisch)	< 0.5 eV ( $\approx 25$ meV)		
Middelsnel (epi-thermisch)	0.5 eV – 200 keV	(resonanties)	---
Snel	200 keV- 20 MeV	(in)eleastische botsingen	recoil $\gamma$
Relativistisch	> 20 MeV	inelastische botsingen; spallatie	idem; spallatie-producten



## **Biologische effecten**

- Moleculaire effecten: oxydatie DNA etc. door radicalen
- Cellulaire effecten: herstel / celdood / mutaties  
(modificerende factoren)  
(RBE)

### **Classificatie:**

- waar: somatisch / genetisch
- wanneer: vroeg (acuut) / laat
- aard: deterministisch / stochastisch

### **Deterministisch:**

- drempel; S-curve
- acute effecten
- teratogene effecten
- partieel: huid / oog / gonaden / bot / klieren

### **Stochastisch:**

- lineaire dosis-effect-relatie
- latente periode
- risicovergelijking
- detriment
- genetische effecten

## Dosimetrie II: Stralingsbeschermingsgrootheden

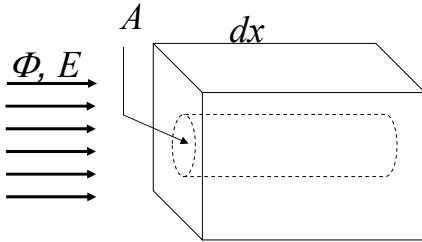
### Limiterende grootheden:

- RBE, Q en  $w_R$ ;  $w_T$
- Dosisequivalent  $H = Q D$
- Orgaandosis  $D_T$
- Equivalente dosis  $H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$
- Weefselweegfactor:  $w_T$
- Effectief dosisequivalent:  $H_E = \sum_T w_T H_T$   
(ICRP-26/30)
- Effectieve dosis:  $E = \sum_R w_R \sum_T w_T D_{T,R}$   
(ICRP-60 ev.)  $E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$

### Operationele grootheden:

- ICRU-bol en -slab
- Bestralingsgeometrieën
- Omgevingsdosisequivalent  $H^*(d)$
- Richtingsdosisequivalent  $H'(d, \mathbf{W})$
- Persoonsdosisequivalent  $H_p(d)$
- Dosisconversiecoëfficiënten
- 50-jaars orgaanvolgdosis  $H_{50,T}$
- Effectieve volgdosis  $E_{50}$
- Collectieve dosis  $S_E$

## Dosis fotonenbundel



$\Phi$ : deeltjesfluentie [ $\text{m}^{-2}$ ]  
 $E$ : energie per deeltje [J]  
 $\Psi$ : energiefluentie [ $\text{Jm}^{-2}$ ]  
 $A$ : oppervlak cilinder [ $\text{m}^2$ ]  
 $dx$ : dikte cilinder [m]  
 $n$ : atoomdichtheid [ $\text{m}^{-3}$ ]  
 $\rho$ : massadichtheid [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]  
 $\sigma$ : werkzame doorsnede [ $\text{m}^2$ ]

Verzwakking fluentie  $\Phi$ :  $d\Phi = -\mu dx \cdot \Phi$  [ $\text{m}^{-2}$ ]

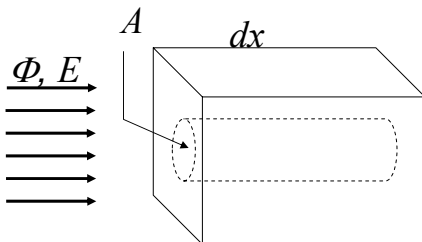
Energiedepositie per  $\text{m}^2$ :  $d\Psi = -\mu_{en} dx \cdot \Psi = -\mu_{en} dx \cdot E\Phi$  [ $\text{Jm}^{-2}$ ]

Energiedepositie in cilinder:  $A \cdot d\Psi = -\mu_{en} A dx \cdot \Psi = -\mu_{en} A dx \cdot E\Phi$  [J]

Idem per kg = **Dosis**

$$D = \frac{\mu_{en} \cdot A dx \cdot \Phi}{\rho \cdot A dx} = \frac{\mu_{en}}{\rho} E \Phi \quad [\text{J.kg}^{-1}] = [\text{Gy}]$$

## Dosis geladen-deeltjesbundel



$\Phi$ : deeltjesfluentie [ $\text{m}^{-2}$ ]  
 $E$ : energie per deeltje [J]  
 $\Psi$ : energiefluentie [ $\text{Jm}^{-2}$ ]  
 $A$ : oppervlak cilinder [ $\text{m}^2$ ]  
 $dx$ : dikte cilinder [m]  
 $n$ : atoomdichtheid [ $\text{m}^{-3}$ ]  
 $\rho$ : massadichtheid [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

Energiedepositie per deeltje:  $dE = -S dx \cdot \Phi$  [J]  $\left( S = \frac{dE}{dx} \right)$

Energiedepositie per  $\text{m}^2$ :  $d\Psi = -S dx \cdot \Phi$  [ $\text{Jm}^{-2}$ ]

Energiedepositie in cilinder:  $A \cdot d\Psi = A \cdot S dx \cdot \Phi$  [J]

Idem per kg = **Dosis**

$$D = \frac{A \cdot S dx \cdot \Phi}{\rho \cdot A dx} = \frac{S}{\rho} \Phi \quad [\text{J.kg}^{-1}] = [\text{Gy}]$$



# Dosis en Expositie



- Telbuis:
- Metalen wand: kathode
  - Metalen draad: anode
  - Gasvulling

Dosis  $D$  [Gy = J / kg]

Expositie  $X$  [C / kg]

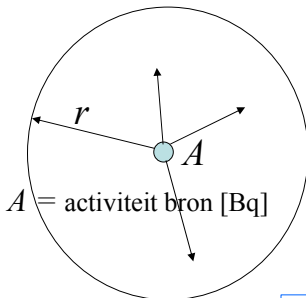
Gasvulling: ionisatie-energie:  $W$  [J / ionpaar]

Lading per ionpaar:  $e$  [C] ;  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C

$$D = \frac{W}{e} X$$

$$\left[ \frac{\text{J/ionpaar}}{\text{C/ionpaar}} \frac{\text{C}}{\text{kg}} = \frac{\text{J}}{\text{kg}} = \text{Gy} \right]$$

# Gamma-puntbronnen (1)



Kerma-in-lucht  $K$  [Gy = J / kg]

- Kerma-in-lucht
- $\sim A$
  - $\sim 1/r^2$
  - afh. Bron
  - $\sim \text{tijd}$

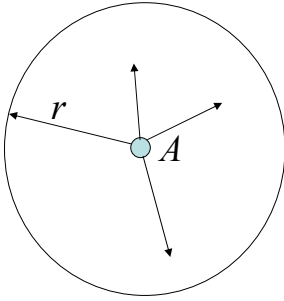
Kermatempo:  $\dot{K} = \Gamma_{\delta} \frac{A}{r^2}$

$\Gamma_{\delta}$  : Kermatempoconstante,  
voor  $E > \delta$  keV.  
norm.:  $\delta = 10$  keV

Dimensie  $\Gamma_{\delta}$  :  $\left[ \frac{\text{Gy} / \text{s}}{\text{Bq} / \text{m}^2} = \frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{Bq} \cdot \text{s}} = \text{Gy} \cdot \text{m}^2 \right]$

$$\left[ \frac{\mu \text{Gy} / \text{h}}{\text{MBq} / \text{m}^2} = \mu \text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \right]$$

## Gamma-puntbronnen (2)



**Kerma-in-lucht:**  $K$  [Gy = J / kg]

Kermatempo:

$$\dot{K} = \Gamma_{\delta} \frac{A}{r^2}$$

**Dosis:**  $D = \frac{\mu_{en}}{\rho} E \Phi$

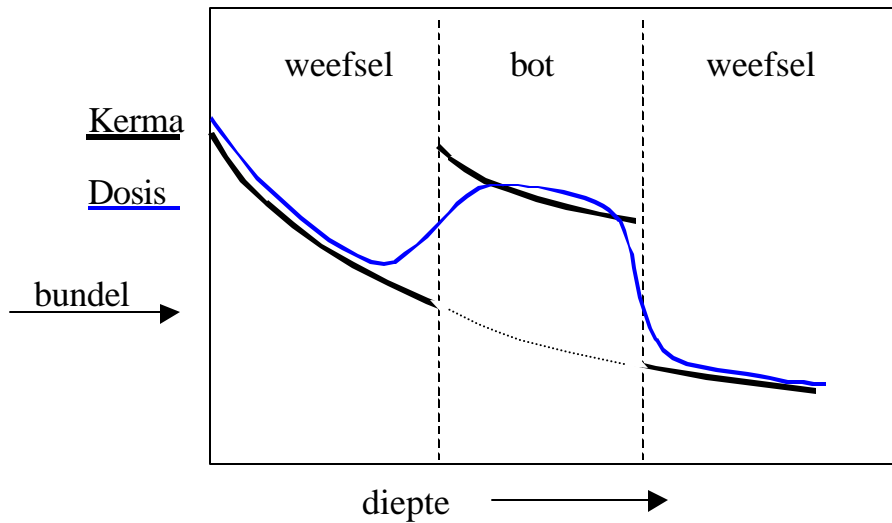
**Kerma:**  $K = \frac{\mu_{tr}}{\rho} E \Phi$

Kermatempo:  $\dot{K} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} E \varphi = \frac{\mu_{tr}}{\rho} E \frac{A}{4\pi r^2}$

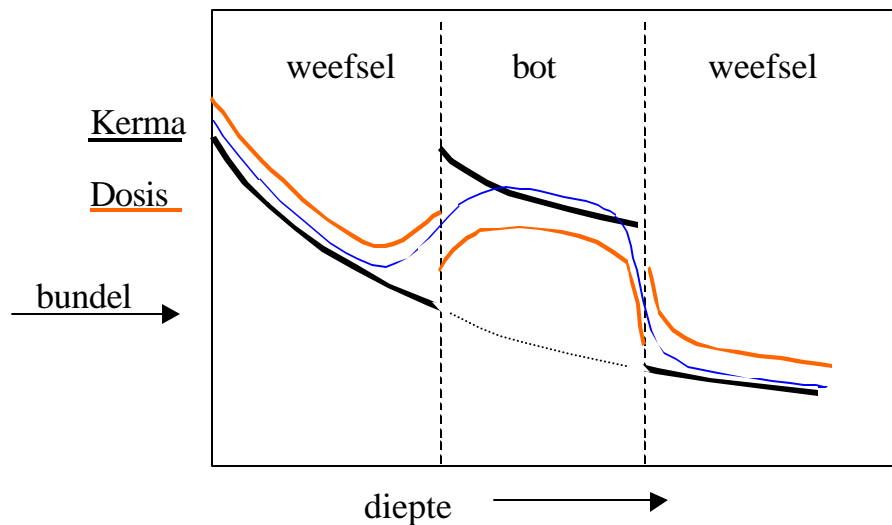
$$\Gamma_{\delta} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} \frac{E}{4\pi}$$

## Grensvlakdosimetrie

	Bot vgl. weefsel	oorzaak
$\mu/\rho$	>	Bot pseudokristallijn (hydroxyapatiet; Ca-houdend)
$S/\rho$	<	Bot sponsachtig ( $\rho < 1 \text{ g/cm}^3$ )



NB. Dosis : gelijke  $S/\rho$  verondersteld.  
Uitsmering door diffusie van secundaire electronen.



Nu dosis gecorrigeerd voor verschillende  $S/\rho$  - waarden.

## Achtergrondstraling

- kosmisch
- terrestrisch

### kosmisch:

oorsprong	aard	energie	tijdsschaal
• galactisch	p ( $\alpha$ )	$10^6 < e < 10^{14}$ MeV, max 300 MeV	const.
• solair	p	niet door atmosfeer	1 / jaar
• stralings gordels	e, p	idem	const.

$\langle \text{dosis} \rangle \approx 0,27 \text{ mSv/a}$  op zeeniveau

kosmogene radionucliden:  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$  : bijdrage  $\approx 12 \mu\text{Sv/a}$

### terrestrisch:

- 4 radioactieve reeksen
- gesteenten en grond, bouwmaterialen

### natuurlijke straling: uitwendig (in NL):

- op 1 m hoogte:  $H^*(10) = 71 \text{ nSv/h} = 0.62 \text{ mSv/a}$
- buitenshuis:  $\dot{K} = 32 \text{ nGy/h} = 0.28 \text{ mGy/a}$   
 $\langle \text{mondiaal} \rangle$ : 60 0.52
- binnenshuis: 80 0.70

### idem: inwendig:

- vnl.  $^{40}\text{K}$  ( $\beta^-$ ) ingestie: 0.17 mSv/a
- rest: 0.06
- Rn inhalatie: 1.2

### totaal:

- totale natuurlijke dosis:  $\langle \text{mondiaal} \rangle$ :  $\approx 2,5 \pm 2 \text{ mSv/a}$   
Europa:  $\approx 3,5 \pm 1$   
Nederland:  $\approx 2,0$
- kunstmatige bronnen (Nederland):  $\approx 0,5$

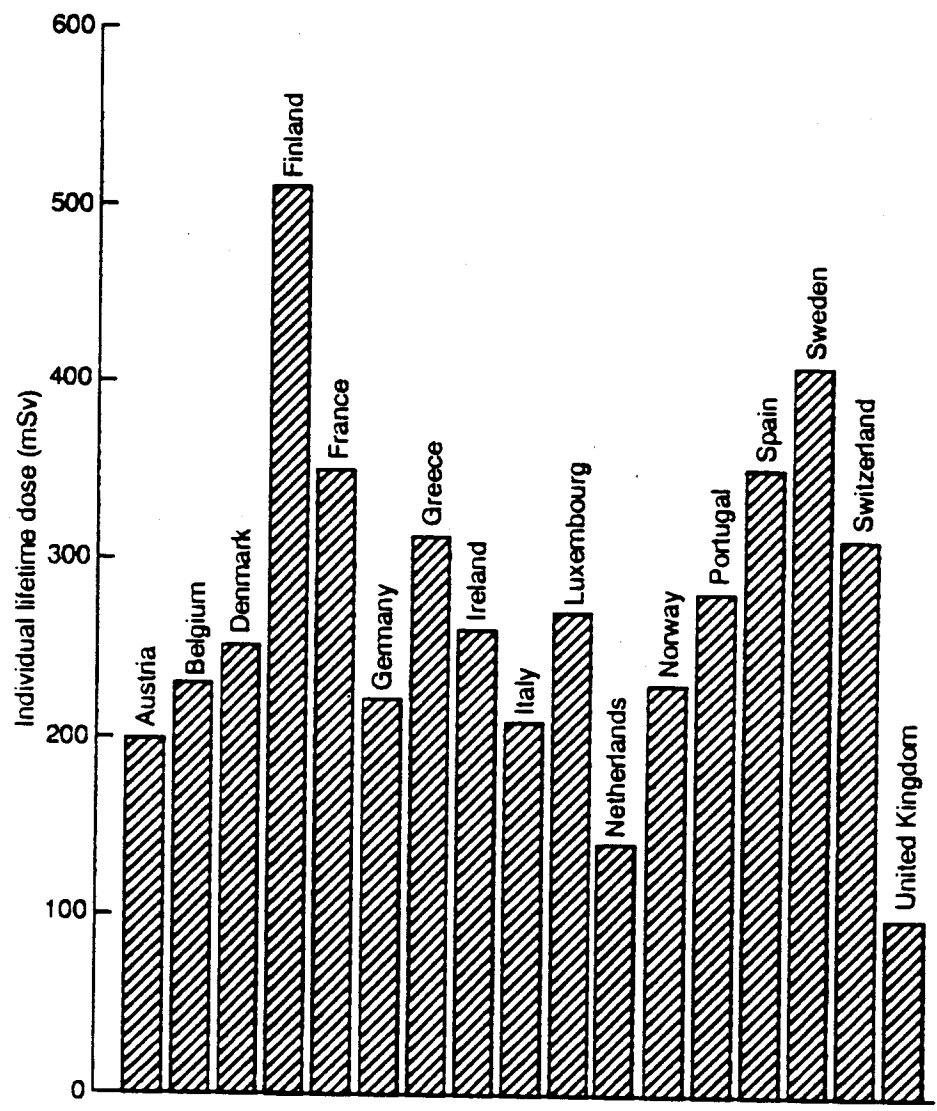


FIG. 2. Lifetime dose from natural background radiation.

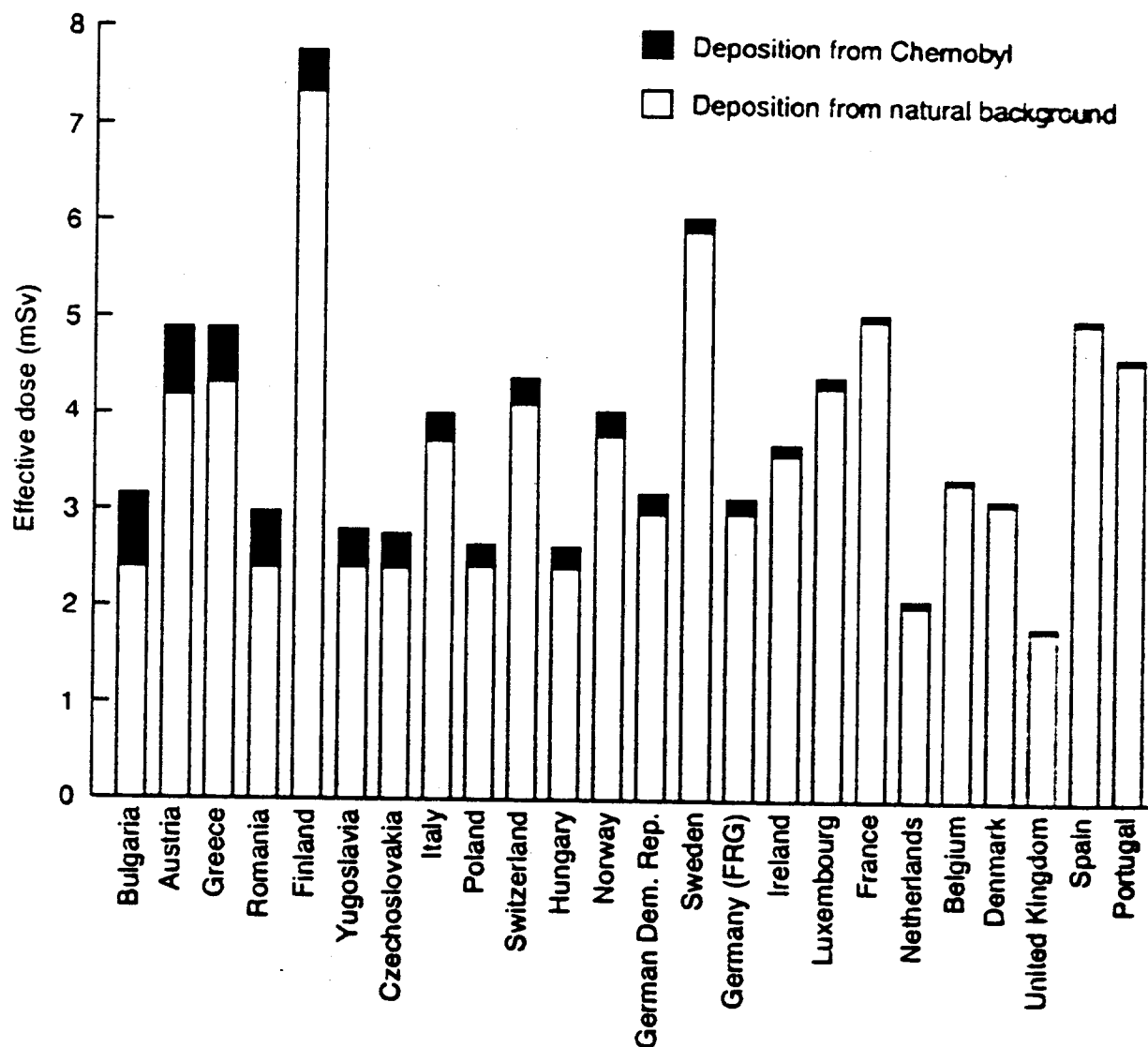


FIG. 3. First-year effective dose in European countries from the Chernobyl accident including natural background exposure.

**Limieten ICRP-26/30 (1977)** in mSv/a (rem/a) ; 100 rem = 1 Sv

	<b>Beroep</b>	<b>bevolking</b>
1. effectief (gewogen over gehele lichaam)	50 (5)	5 (0,5) (*)
2. target-orgaan	$50 / w_T$ ( $5 / w_T$ ) max. 500 (50)	50 (5)
3. ooglens	150 (15)	-

(\*) aanbeveling: max 1 (0,1) indien levenslange blootstelling

**Limieten ICRP-60 e.v. (1990)** in mSv/a

	<b>beroep</b>	<b>bevolking</b>
1. effectief (gewogen over gehele lichaam)	20, gemidd. over 5 jr (max. 50 in 1 jaar)	1
2. organen:		
ooglens	150	15
huid	500	50
hand/voet	500	50

vgl. natuurlijke belasting: 2.0 mSv/a  
 kunstmatige belasting: 0.5 mSv/a

## Vergelijking stralingsniveaus:

2 mSv = 200 mrem bij:

- 1 jaar natuurlijke straling in Nederland
- 6 maanden op 2000 meter hoogte
- 100 vliegtuizen (transatlantisch)
- 10 x Röntgen borstkasfoto
- 2 x Röntgen-onderzoek bekken/heup
- 100 x Röntgen tandfoto
- 300 kg voedsel met 600 Bq/kg <sup>137</sup>Cs
- 200 kBq <sup>131</sup>I

## Effectieve dosis

mSv	.001	.01	0.1	1	10	100
Primordiale nucliden (bv. <sup>40</sup> K)			██████████			
Bodem + kosmisch			██████████			
Radon + Thoron : lucht			██████████	██████████		
Id.: bouw		██████████	██████████			
Fallout kernproeven 60er jaren	██████████	██████████				
Tsjernobyl (in 1990)	██████████	██████████				
Rijn/Maas/Schelde	██████████	██████████				
Kolencentrales (omwonenden)	██████████	██████████	██████████			
Lozingen / laboratoria	██████████	██████████				
Kerncentrales (normaal bedrijf)	██████████	██████████				
Consumentenproducten		██████████	██████████			
Vliegen : publiek		██████████	██████████			
Id.: bemanning			██████████	██████████		
Tandheeskundige behandelingen	██████████	██████████				
Radiologisch werk		██████████	██████████	██████████	██████████	
Röntgendiagnostiek		██████████	██████████	██████████	██████████	
Nucleaire geneeskunde			██████████	██████████	██████████	
Radiotherapie (non-target)				██████████	██████████	██████████



## Effectieve dosis bij radiologische verrichtingen

(ref.: H.A. van den Brink et al., NVS-nieuws 23, 3, juli 98)

Twee Acad. Ziekenhuizen: (1) en (2), gemiddelden + literatuurwaarde

Effectieve dosis in mSv	(1)	(2)	Lit.
<u>Röntgenopnamen</u>			
Thorax, PA	0.03	0.01	0.02-2
Buik, AP	0.32	0.11	0.2-1.5
Wervelkolom, cervicaal	0.02	0.01	0.2
Id. Thoracaal	0.30	0.07	0.7-1.0
Id. Lumbaal	0.73	0.12	0.2-2
Schedel	0.02	0.01	0.03-0.2
Bekken	0.32	0.10	0.6-1
Extremititeiten	<0.001	<0.001	--
<u>Contrastonderzoek, angiografie, interventies</u>			
Maag	5	6	2-9
Colon	14	5	5-20
Bekken / Been-angio	34	17	
Buik / angio	44	11	
Schedel / angio	3	2.3	
Thorax / angio	8	6	
<u>Computertomografie</u>			
Schedel	1.6	1.4	1-3.4
Bekken	7.5	18	2.2-10
Thorax (10 mm spiraalscan)	8	11	8.4-20
Buik (10 mm spiraalscan)	12	20	9-30
<u>Hartcatheterisaties</u>	1-14	0.1-29	

## Normen toelaatbare blootstelling

### Uitgangspunten:

- rechtvaardiging
- ALARA
- limieten

### Historie:

1934	0.2 R/dag
1950	0.3 R/week ; 10 rem tot 30 jr.
1956	5 rem/generatie voor kunstmatige activiteit
1966	<i>ICRP-1</i> : $H_{cum} = 5 (N-18)$ rem ; N = leeftijd  <i>ICRP-9</i> : onderscheid beroeps vs. bevolking
1977	<i>ICRP 26/30</i> : risico kanker: 0.01 /Sv werkers: $H_E = \sum w_T H_T$ $H_E < 5$ rem/a = 50 mSv/a $H_T < 50$ rem/a = 500 mSv/a bevolking: factor 10 kleiner
1990	<i>ICRP-60 ev.</i> : normen $\approx 2.5$ x strenger; iets andere gewichtsfactoren  <i>VROM</i> : onderscheid radiologische werkers (< 20 mSv/a) werkers (< 2 mSv/a) bevolking (< 0.4 mSv/a, later 1 mSv/a) <ul style="list-style-type: none"><li>• MTR: max.toelaatbaar risiconiveau: per bron: overlijdensrisico: <math>10^{-6}</math> / jaar alle bronnen samen: <math>10^{-5}</math> / jaar</li><li>• VN (SN): verwaarloosbaarheidsniveau: = MTR / 100.</li></ul>

## Meetmethoden

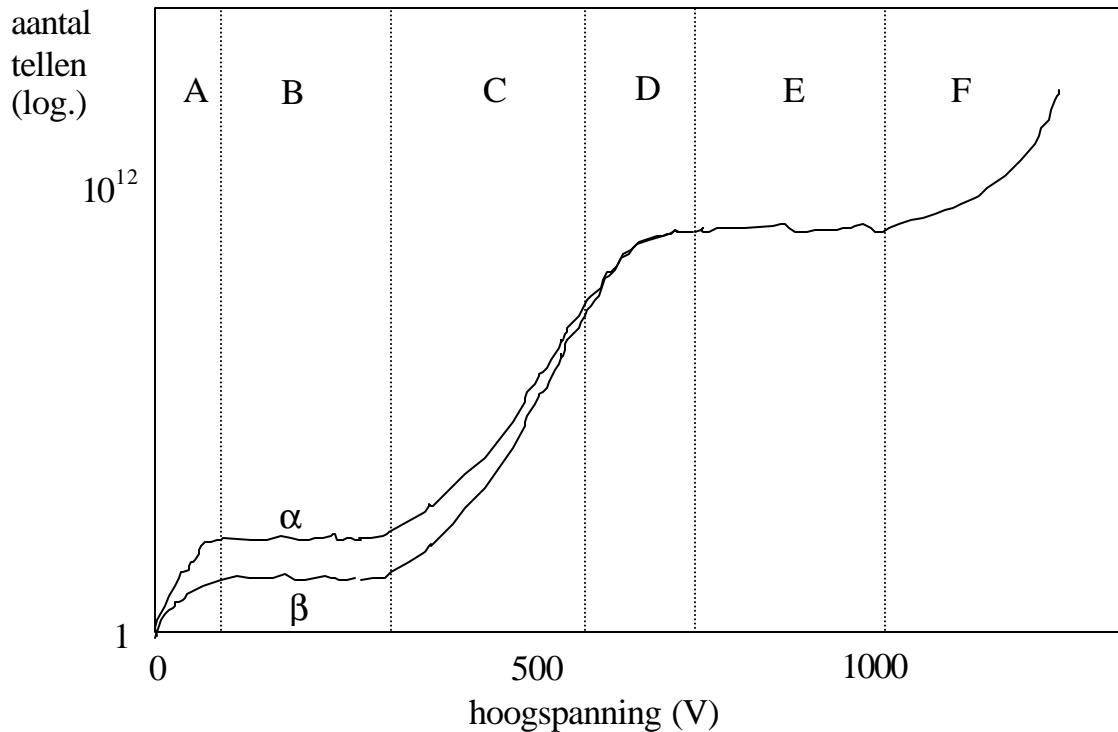
### Algemeen:

- Statistiek:  $N$  en  $R$ ,  $s_N = \sqrt{N}$  en  $s_R = \sqrt{R/t}$
- Rendement: totaal (absoluut) en intrinsiek
- Signaalvorming: “current mode” en “pulse mode”
- Tijdscheidend vermogen: dode tijd: (wel/niet) paralyseerbaar
- Energieresolutie:  $R(E) = \Delta E/E$  ( $\Delta E = fwhm$ )

### Detectoren / sensoren:

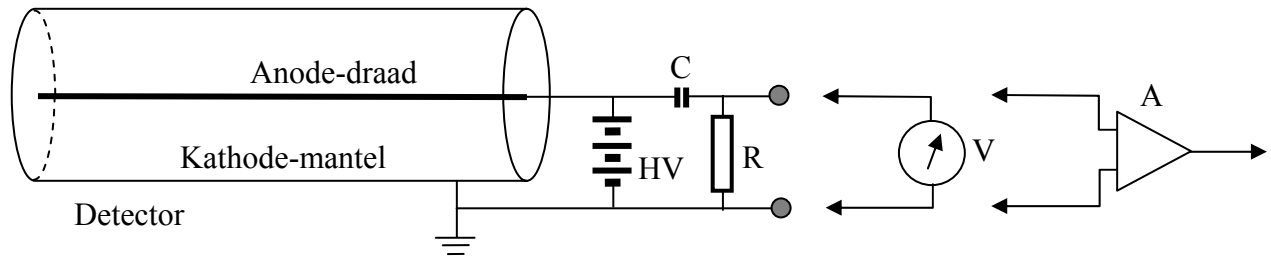
Instrument	Effect	Materiaal	Gebruik
1. Gasgevulde detector: = ionisatiekamer = prop. telbuis = Geiger-Müller-buis	electrisch: ionisaties in gas (of wand)	gas/wand	extern niveau $\alpha$ , $\beta$ , ( $\gamma$ )
2. Halfgeleiderdetector	electron-gat paren	vaste stof	$\alpha$ , $\beta$
3. Filmdosimeter	chemisch	Ag-emulsie	personen
4. (Chemische) dosimeter	chemisch	div.	div.
5. Scintillatieteller	luminescentie	vaste stof : NaI ZnS vloeistof	$\gamma$ $\alpha$ zwakke $\beta$
6. Thermoluminescentie- dosimeter	luminescentie	id.	personen
7. Pendosimeter	electrische lading	electrometer	personen
8. Neutronendetector	als 1 of 5	vulling: $^3\text{He}$ , $^6\text{Li}$ , $^{10}\text{B}$ id. + H of C-wand	n : thermisch snel
9. $\gamma$ -spectrometer	als 1,2 of 5	--	identificatie

## Gasgevulde telbuizen



- A. voornamelijk recombinaties  
weinig ionisatieproducten bereiken de elektroden
- B. alle ionisatieproducten bereiken de elektroden → **1e plateau**  
verzadigde ionisatiestroom: **ionisatiekamer**
- C. gasversterking  $M$ ; (als  $M < 10^4$ , dan  $M$  onafh. aantal tellen: lineair gedrag)  
**proportionele telbuis**
- D.  $M > 10^4$  : begrensde proportionaliteit: niet-buikbaar gebied
- E. extra ionisaties en excitaties; resulterende fluorescentiestraling induceert ion/exc.-proces in “eerder stadium” → lawinevorming : **2e plateau**  
elke ionisatie heeft zelfde resultaat ( $M \sim 1/\text{aantal deeltjes}$ )  
actieve doving (quenching) noodzakelijk  
**Geiger-Müller telbuis**
- F. continue ontlading: niet-buikbaar gebied

# Gasgevulde detectoren -- Signaalverwerking



- HV hoogspanning
- C scheidingscondensator (blokkeert HV naar elca)
- R belastingsweerstand
- V voltmeter
- A amplifier met uitgang naar electronische signaalverwerking

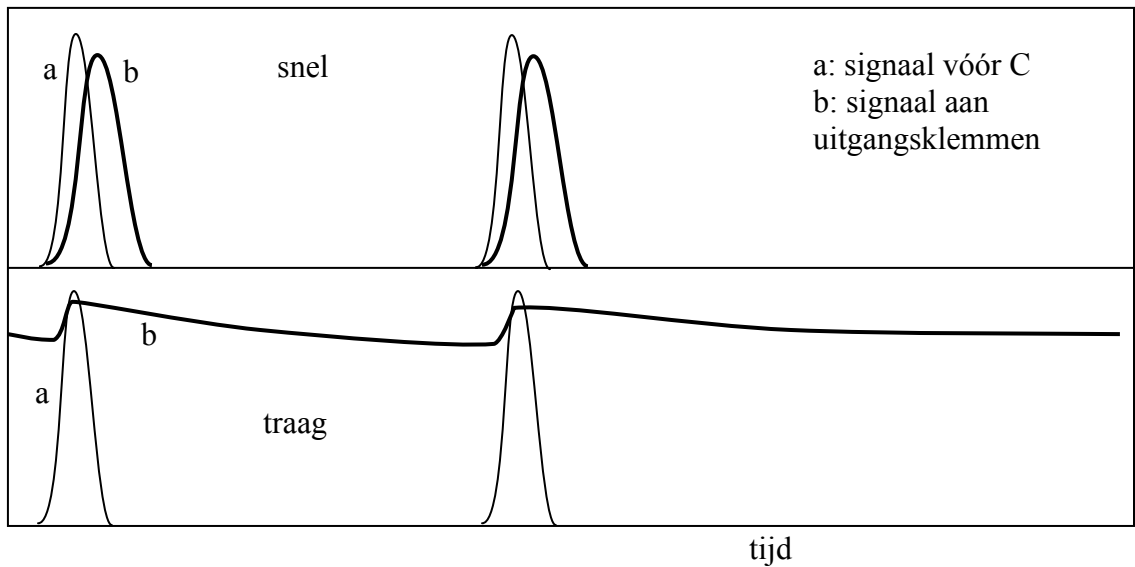
V en A hebben normaliter een hoge ingangswaerstand ( $\gg R$ ).

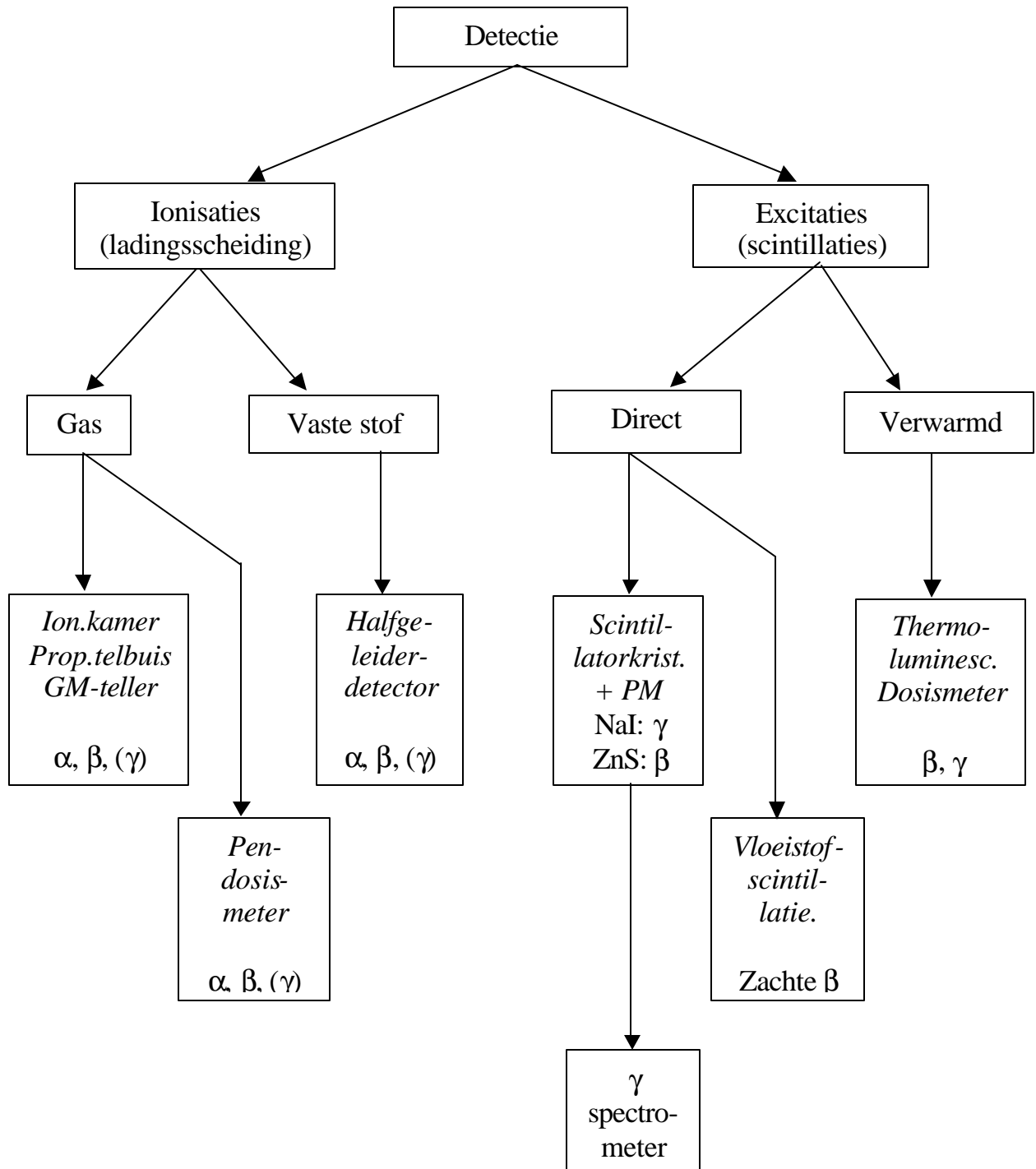
Pulsenstroom I loopt via C en R naar aarde.

V en A meten spanning over R via  $V=IR$ .

## Mogelijkheden:

1. **RC laag:** snel systeem: pulsenteller
2. **RC hoog:** traag systeem: pulsen worden uitgesmeerd, stroommeting.





## Appendix Stralingscursus niveau 3: Statistiek.

Telstatistiek gaat volgens de Poisson-

$$\text{verdeling: } P(x) = \frac{\lambda^x e^{-x}}{x!}$$

Hierin is  $x$  het aantal tellen (dus een geheel getal!) en  $\lambda$  de verwachtingswaarde (het "gemiddelde"). Voor grote  $x$  kan deze verdeling worden benaderd door de Gauss-verdeling:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\lambda)^2}{2\sigma^2}\right],$$

met als standaarddeviatie:  $\sigma = \sqrt{\lambda}$

In naaststaande figuur zijn voor drie waarden van  $\lambda$  de twee verdelingen geschetst (Poisson ligt altijd links van Gauss).

We kunnen dus verder gaan met Gauss in plaats van Poisson.

De kans dat een waarneming *tussen*  $\lambda - k\sigma$  en  $\lambda + k\sigma$  ligt, staat in onderstaande tabel. Hierin is ook de *eenzijdige overschrijdingskans* vermeld (zie ook fig.2).

$k$	Kans tussen $\lambda \pm k\sigma$ (%)	Eenzijdige overschrijdingskans (%)
0.0	8.0	46
0.5	38.1	31
1.0	68.3	16
1.5	86.6	6.7
2.0	95.4	2.3
2.5	98.8	0.6
3.0	99.7	0.15

De kans dat een bepaalde afwijking  $\Delta N$  van het gemiddelde  $N$  optreedt hangt af van de gekozen waarschijnlijkheid.

Deze waarschijnlijkheid levert de geldende  $k$ -waarde. Daaruit volgt  $\Delta N$  via:

$$\Delta N = k \cdot \sigma = k \cdot \sqrt{N}$$

Met de definitie van de procentuele fout  $p$ :

$$p = \frac{\Delta N}{N} = k \frac{\sqrt{N}}{N} = k \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Hieruit is dan het benodigde aantal tellen te berekenen.

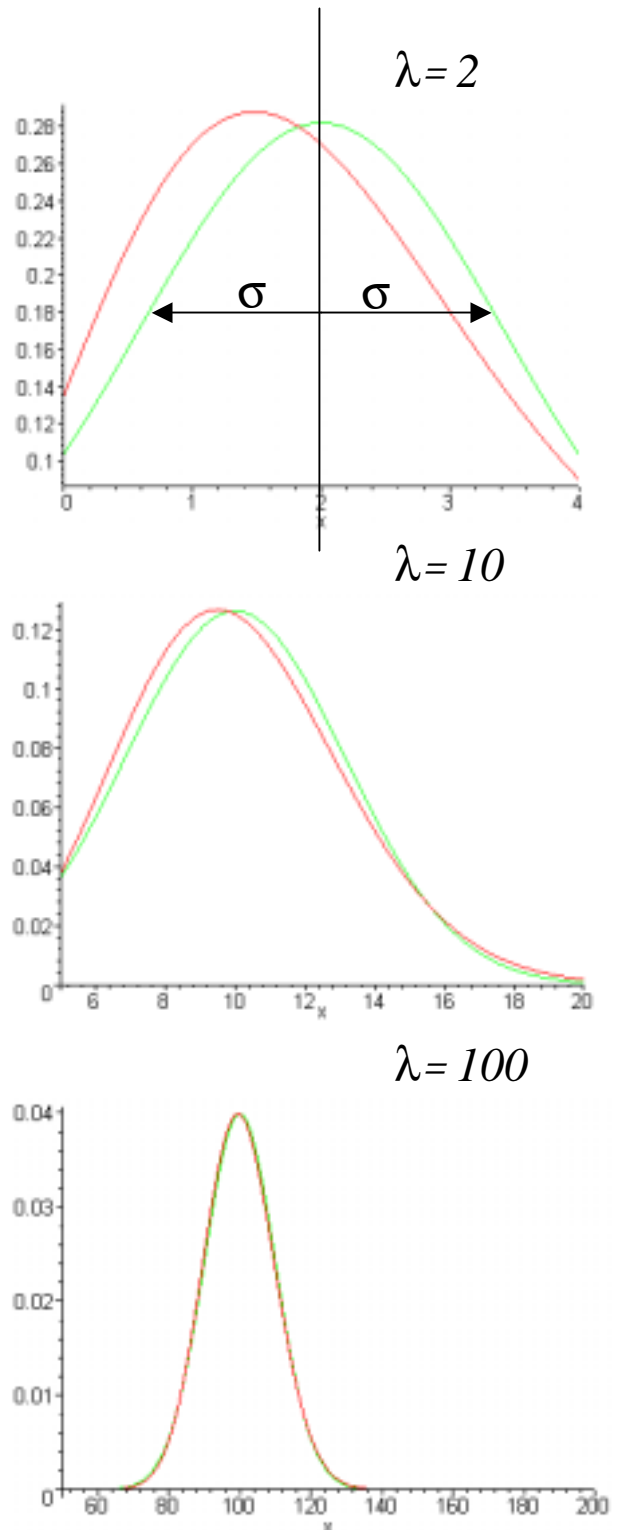


Fig. 1. Poisson- en Gauss-statistiek (Gauss rechts van Poisson) voor drie waarden van de verwachtingswaarde  $\lambda$ .

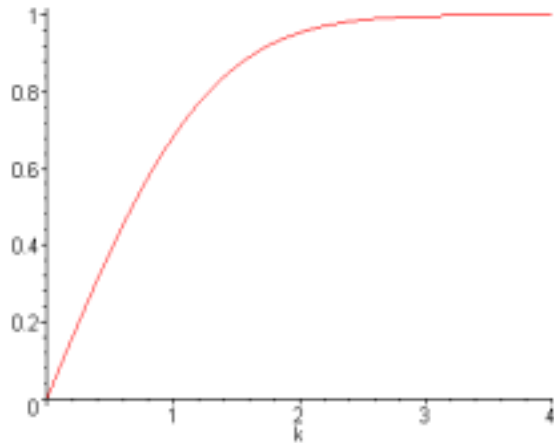


Fig.2. De kans op een  $x$ -waarde tussen  $\lambda \pm k\sigma$

**Voorbeeld 1: Minimale meettijd.**

We willen een procentuele fout van 2 % met een waarschijnlijkheid van 87 %. Hoeveel tellen moeten we registreren?

Antwoord: hier is  $k = 1.5$ , dus is  $\sqrt{N} = k/p = 1.5/0.02 = 75$ , en dus is  $N = 5625$ . We moeten dus zolang doortellen totdat dit aantal is bereikt. Hoe lang dat is hangt dan af van de telsnelheid.

**Voorbeeld 2: Verschilmeting**

Wanneer is het verschil tussen twee metingen, met telsnelheden  $R_1$  en  $R_2$  en fouten  $\Delta R_1$  en  $\Delta R_2$ , significant?

( $R = N/t$  en  $\Delta R = k \sqrt{N}/t$ , waarin  $k$  het aantal standaarddeviaties, nodig om een bepaalde waarschijnlijkheid te bereiken, voorstelt).

Antwoord: De fout  $\Delta R_v$  in het verschil

$$R_v = R_1 - R_2 \text{ is : } \Delta R_v = \sqrt{\frac{R_1}{t_1} + \frac{R_2}{t_2}}$$

(zie boek). Dus

$$R_v \pm \Delta R_v = \frac{N_1}{t_1} - \frac{N_2}{t_2} \pm k \sqrt{\frac{N_1}{t_1^2} + \frac{N_2}{t_2^2}},$$

ofwel  $R_v \pm \Delta R_v = R_v \pm k.y$

waarin  $y$  de fout bij  $1.\sigma$  voorstelt. Dus bij een fout van  $k.y$ , met de  $k$ -waarde bepaald door de gekozen waarschijnlijkheid, is de verschilmeting relevant.

Dit voorbeeld kan ook worden gebruikt om het verschil tussen een bruto-meting en een achtergrond-meting te bekijken.

**Voorbeeld 3: Minimum detecteerbare activiteit.**

Hoe groot is de kans dat een niet-actief preparaat toch een meetresultaat: “actief” levert?

Of: hoe groot is de kans dat een actief preparaat een resultaat “niet-actief” aangeeft?

Antwoord: het gaat nu om de eenzijdige overschrijdingskans.

We bepalen de minimaal detecteerbare activiteit  $m$ :

Er geldt:  $m = R_N / \epsilon$ ; met  $R_N$  = de netto telsnelheid en  $\epsilon$  de meet-efficiency.

Wat is het minimaal detecteerbare bruto teltempo  $R_D$  waarbij een niet-actief preparaat toch als “actief” wordt gekenschetst? Die  $R_D$  is gelijk aan de maximaal te verwachten achtergrond.

Stel: achtergrond  $R_A = 100$  cpm (goed bekend, dus met  $\sigma_B \approx 0$ ) en de efficiency van de opstelling  $\epsilon = 30\%$ .

Neem nu de kans op een “actief” antwoord bij een niet-actief preparaat = 5 %.

Daarbij hoort:  $k = 1.64$  (interpoleren in de tabel).

De maximaal te verwachten achtergrond is:

$$100 + 1.64 \sqrt{100} = 116 \text{ cpm}$$

Het minimale detecteerbare bruto teltempo  $R_D$  is dus:  $R_D = 116$  cpm.

Bij een overschrijdingskans van 5 % geldt nu voor het gemiddelde bruto teltempo  $R_B$ :

$$R_B - 1.64 \sqrt{R_B} = R_D (= 116 \text{ cpm}).$$

Hieruit volgt:  $R_B = 135$  cpm, en dus

$$\sigma_B = \sqrt{135} = 11.6,$$

zodat ter controle:

$$k = (135 - 116) / 11.6 = 1.64.$$

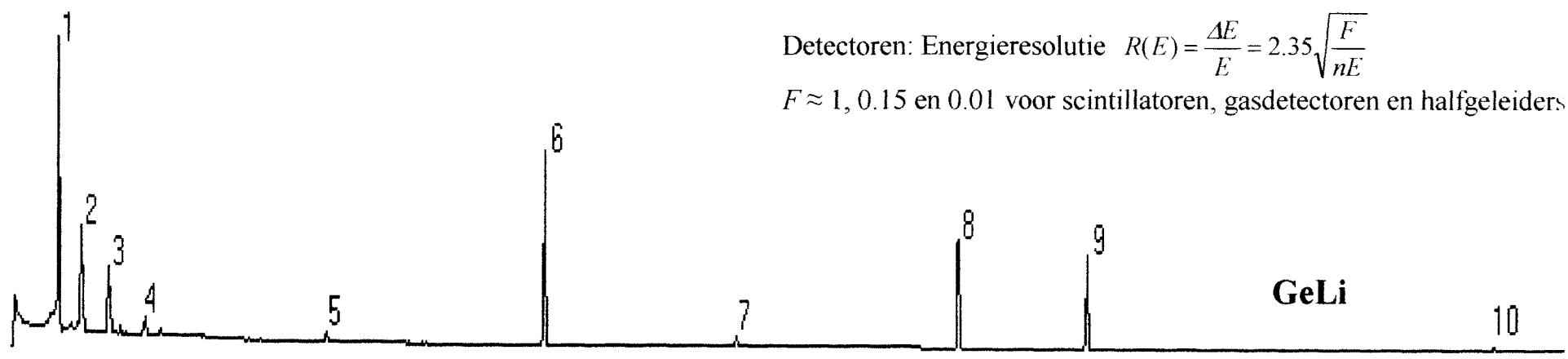
Het gemiddelde bruto teltempo

$$R_B = 100 + 0.30.m.$$

Dus  $m = (135 - 100) / 0.30 = 117$  desintegraties per sec = 1.9 Bq.



Detectoren: Energieresolutie  $R(E) = \frac{\Delta E}{E} = 2.35 \sqrt{\frac{F}{nE}}$   
 $F \approx 1, 0.15$  en  $0.01$  voor scintillatoren, gasdetectoren en halfgeleiders



1: Americium-241	0.060 MeV	6: Caesium-137	0.662 MeV
2: Cadmium-109	0.088 MeV	7: Yttrium-88	0.898 MeV
3: Cobalt-57	0.122 MeV	8: Cobalt-60	1.173 MeV
4: Cerium-139	0.166 MeV	9: Cobalt-60	1.333 MeV
5: Tin-113	0.392 MeV	10: Yttrium-88	1.836 MeV

## ICRP 26/30 (1977)

<p>Dosisequivalenttempo: - per targetorgaan</p> <p>- effectief:</p>	$\dot{H}_T$ $\dot{H}_E = \sum_T w_T \dot{H}_T$	$< 50 / w_T \text{ \& } < 500 \text{ mSv/a}$  $< 50 \text{ mSv/a}$
<p>Volgdosisequivalent: per target-orgaan T:</p>	$H_{50,T} = \int_0^{50jr} \dot{H}_T(t) dt \approx \frac{\dot{H}_T(0)}{I_{eff}}$ $H_{50,T} = \sum_S \sum_j \left[ U_{Sj} \sum_i SEE(T \leftarrow S)_{ij} \right]$	<p>[Sv]</p> <p>S: sources j: nuclides i: stralingssoorten van j</p>
	<p><math>U_{Sj}</math> aantal transformaties van <math>j</math> in <math>S</math>, geïntegreerd over volgende 50 jaar</p>	<p>[transf.] = [Bq.s]</p>
<p>Specific Effective Energy (SEE)</p>	$SEE(T \leftarrow S)_{ij} = \frac{Y_{ij} \cdot E_{ij} \cdot AF(T \leftarrow S)_{ij} \cdot Q_{ij}}{m_T}$ <p><math>Y</math> yield van overgang <math>ij</math>  <math>E</math> energie van overgang <math>ij</math>  <math>AF</math> geabsorbeerde fractie van <math>E_{ij}</math> vanuit <math>S</math> in <math>T</math>          voor <math>\alpha, \beta</math>: <math>AF=1</math> als <math>T=S</math>, anders <math>=0</math>  <math>Q</math> kwaliteitsfactor van straling <math>ij</math>  <math>m_T</math> massa target</p>	<p>[J/kg ; MeV/g]</p> <p>[ - ] [J / transf.] [ - ]</p> <p>[ - ] [kg]</p>
<p>ALI: annual limit on intake</p> <p>DAC: derived air concentration</p>	<p>jaaropname waarvoor limiet wordt bereikt:</p> $H_{50} = \frac{A}{ALI} \dot{H}_{50} \quad [Sv] = \frac{[Bq]}{[Bq/a]} [Sv/a]$ $DAC = \frac{ALI [Bq/a]}{50[wk/a] \cdot 40[h/wk] \cdot 1,2[m^3/h]}$	<p>[Bq/a]</p> <p>[Bq/m<sup>3</sup>]</p>

vaak worden jaar-dosislimieten en bijbehorende activiteiten in de notatie [Sv] en [Bq], in plaats van [Sv/a] en [Bq/a], aangegeven !!

## ICRP 26/30

$H_{50}$ : Volgdosisquivalent (effectief of per target-orgaan) $H_{50} = \frac{A}{ALI} \dot{H}_{50}$	$[Sv]$ $[Sv] = \frac{[Bq]}{[Bq/a]} [Sv/a]$
--	---

## ICRP 60 e.v.

$e(50)$ : effectieve dosiscoëfficiënt (dosisconversiecoëfficiënt: DCC)	$[Sv/Bq]$
$E_{50}$ : effectieve dosis $E_{50} = A \cdot e(50)$	$[Sv]$ $[Sv] = [Bq] \cdot [Sv/Bq]$
$E_{\max} = "ALI" \cdot e(50)$	$[Sv/a] = [Bq/a] \cdot [Sv/Bq]$
$"ALI" = \frac{E_{\text{lim}} (= 0,02 Sv)}{e(50)}$	$[Bq/a] = \frac{[Sv/a]}{[Sv/Bq]}$

## Radiotoxiciteitsequivalent (RTE): $Re$ (Nederland)

1 $Re$ = activiteit die 1 Sv belasting levert max. werkhoeveelheid voor nuclide $i$	$1 [Re] = \frac{1 [Sv]}{DCC [Sv/Bq]} \Rightarrow [Bq]$ $A_{\max,i} = "ALI_i" \cdot 10^{p+q+r} [Bq]$
max. aantal RTE's voor bewerking $j$ , (bij jaarlimiet = 0,02 Sv = 20 mSv)	$X_{\max,j} = 0,02 \cdot 10^{p+q+r} [Sv]$ $A_{\max,ji} = \frac{X_{\max,j}}{e(50)_i} [Bq]$

## Melk en spinazie na Tsjernobyl

Gevraagd: de limiet voor consumptie na besmetting van de grond met  $^{131}\text{I}$

### 1. Volgdosisequivalent op thyroïd (schildklier), in $10^6$ Sv/Bq

	volwassene	kind (10 jr)	baby (1 jr)
- inademen ( $1\mu\text{m}$ )	0,27	0,74	2,3
- inslikken	0,44	1,2	3,7 ← !!

### 2. Consumptie in 2 weken ( » 2. $T_{1/2}$ ; $T_{1/2}$ » 8 d)

	volwassene	kind (10 jr)	baby (1 jr)
- water	23 liter	13 liter	10 liter
- melk	12 liter	12 liter	10 liter
- groente	10 kg	7 kg	4 kg ← !!

### 3. Normen (in 1986) (orgaan resp. effectief: 500 resp. 50 mSv) ICRP: “maatregelen als dosisequivalent > 0,1 x norm !!”

### 4. Activiteitsconcentratie (voor 10 liter resp. 4 kg):

$$\frac{50 \cdot 10^{-3} [\text{Sv}]}{3,7 \cdot 10^{-6} [\text{Sv/Bq}] \cdot 10 [\text{l}]} = 1350 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{l}} \right]; \dots\dots = 3380 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$$

### 5. Correctie voor verval gedurende tweeweekse periode:

Ingestie = 14 eenmalige gebeurtenissen.

Gemiddelde activiteit < activiteit aan begin ; levert correctiefactor  $f_c$

$$\langle A(t) \rangle = \frac{A(0)}{14} \int_0^{14} e^{-It} dt = \frac{A(0)}{14I} (1 - e^{-I \cdot 14}) = 0,58 A(0) \Rightarrow f_c = \frac{1}{0,58} = 1,75$$

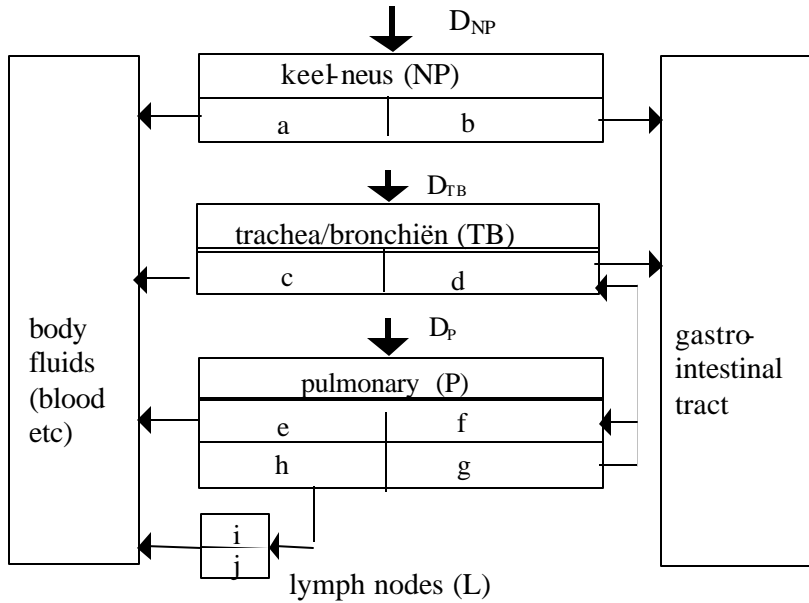
### 6. Max. waarden aan begin periode volgens normen:

- melk/water:  $1350 \times 1,75 = 2300$  Bq/liter
- groente:  $3380 \times 1,75 = 6100$  Bq/kg

### 7. Toenmalige normen:

	$^{131}\text{I}$ ( $T_{1/2} \approx 8$ d)		$^{137}\text{Cs}$ ( $T_{1/2} \approx 30$ jr)
	mei 86	oct 86	
- melk [Bq/l]	500	125	360
- groente [Bq/kg]	1300	250	600

## ICRP-26/30: Longmodel



### Retention times T and distribution factors F for all compartments.

(n.a.= not applicability; inf. = infinity)

Region	Comp	Class					
		D (day)		W (week)		Y (year)	
		T /day	F (%)	T /day	F (%)	T /day	F (%)
NP	a	0.01	50	0.01	10	0.01	1
	b	0.01	50	0.40	90	0.40	99
TB	c	0.01	95	0.01	50	0.01	1
	d	0.2	5	0.2	50	0.2	99
P	e	0.5	80	50	15	500	5
	f	n.a.	n.a.	1.0	40	1.0	40
	g	n.a.	n.a.	50	40	500	40
	h	0.5	20	50	5	500	15
L	i	0.5	100	50	100	1000	90
	j	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	inf.	10

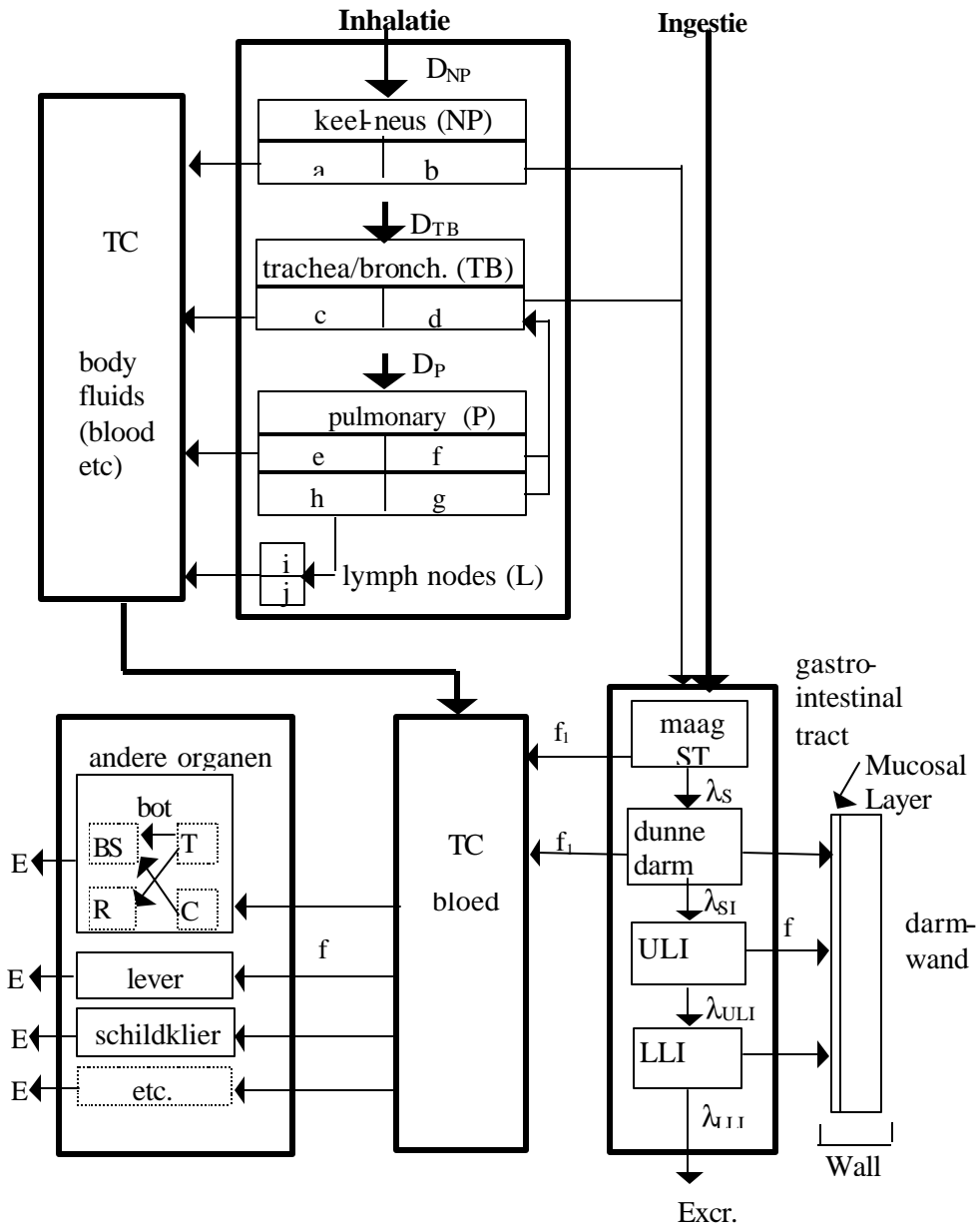
### Deposition factors D (in %) as a function of the particle diameter

AMAD ( $\mu\text{m}$ )	$D_{NP}$	$D_{TB}$	$D_P$	$D_{tot}$
10	85	8	5	98
5	72	8	8	88
2	50	8	15	73
1	30	8	25	63
0.5	15	8	35	58
0.2	5	8	50	63

**Particle size correction :** 
$$\frac{H_{50}(d)}{H_{50}(1)} = \sum_i f_i \frac{D_i(d)}{D_i(1)}, \quad \text{with } i = NP, TB, P$$

(d = AMAD in  $\mu\text{m}$ ; f-values: in parentheses in Committed Dose Equivalent tables);

# ICRP 26/30 : Total body model



## ICRP 26/30 : Total body model (tabellen)

### Notatie tabellen:

#### A. "Metabolic data": gebruik van de ALI's: (voorbeeld)

ALI = 7.0E5 (48,14,38)	→ geeft effectieve waarde → de $f_i$ -waarden voor berekening voor andere AMAD-grootten
ALI = 7.0E5 (8.0E5) bone surf.	→ geeft ALI voor meest bedreigde orgaan → geeft effectieve waarde → geeft meest bedreigde orgaan

**B. "Limits for Intake": geeft achtereenvolgens tabellen voor:**

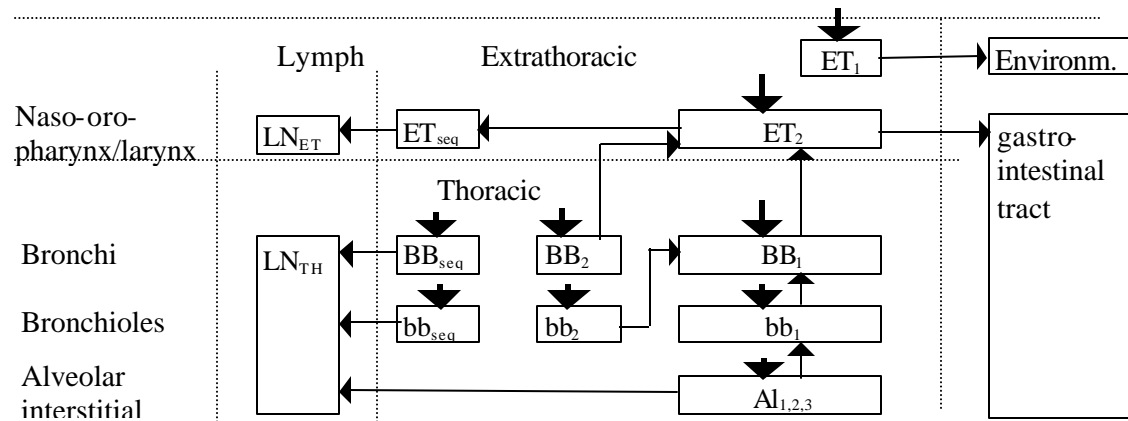
SEE ( $T \leftarrow S$ ) <sub>ij</sub>	Specific Effective Energy (in MeV/g"transf") voor de verschillende Sources en Targets
U <sub>sj</sub>	Aantal transformaties, gesommeerd over volgende 50 jaar (in "transf" = Bq.s)
H <sub>50, T</sub>	Committed Dose Equivalent (in MeV/g → Sv)
W <sub>T</sub> · H <sub>50, T</sub>	Weighted Committed Dose Equivalent (idem)
ALI, DAC	Annual Limit on Intake (Bq/a), Derived Air Concentration (Bq/m <sup>3</sup> )

De tabellen zijn gesplitst naar "oral" en "inhalation". Waar nodig is nog een splitsing gemaakt naar de transportfactoren, bij "inhalation" naar de verschillende tijdsduur-klassen (D, W, Y), bij "oral" naar de verschillende soorten verbindingen waarin het element kan voorkomen.

**C. Overzicht metabole gegevens:** Retention formula:  $R(t) = \sum A_i \exp(-\ln 2 \cdot t / T_{1/2,i})$

	Uptake to blood from GI-tract		Distribution and Retention (TC: transfer compartment; t in days)
<sup>3</sup> H <sub>2</sub> O	Skin Inhalation	0,01.C [Bq/min] 0,02C [,,] , with C in [Bq/m <sup>3</sup> ]	Uniform distribution over all <u>soft</u> tissues (m=63 kg) $R(t)=\exp(-\ln 2 \cdot t / T_{1/2})$ ; $T_{1/2} = 10$ days.
<b>Co</b>	(hydr)oxides, halides, nitrate: Other:	Class Y; $f_1 = 0,05$ Class W; $f_1 = 0,05$	i=1: to direct excretion: $A_1 = 0,5$ ; $T_{1/2,i} = 0,5$ day i=2,3,4: to liver and other organs : $A$ 's = 0,3;0,1;0,1 ; $T_{1/2}$ 's=6;60;800 days Total $A$ 's = 0,5 → liver 0,05; rest 0,45
<b>Sr</b>	Soluble compounds: titanate:	Class D; $f_1 = 0,3$ Class Y; $f_1 = 0,01$	Alkaline earth metal: If $T_{1/2} > 15$ day: uniform distr. over bone volume If $T_{1/2} < 15$ day: distr. In thin layer over bone surface
<b>Tc</b>	(hydr)oxides, halides, nitrate: other:	Class D; $f_1 = 0,8$ Class W; $f_1 = 0,8$	Retention $R(t)$ after intravenous injection: $A$ 's = 0,76;0,19;0,043; $T_{1/2}$ 's = 1,6;3,7;22 day From TC ( $T_{1/2} = 0,02$ day): 4% to thyroid ( $T_{1/2} = 0,5$ day); and with $R(t)$ as above: 10% to stomach wall; 3% to liver and 83% uniformly distributed over other organs.
<b>I</b>	All	Class D; $f_1 = 1$	From TC ( $T_{1/2} = 120$ day): • 30% to thyroid ( $T_{1/2} = 80$ day); goes into organic iodine, unif.distr. over rest of body ( $T_{1/2} = 12$ day); then 27% back to TC; 3 % to direct excretion • 70% to direct excretion
<b>Am</b>	all	Class W; $f_1 = 5 \times 10^{-4}$	From TC: 45% to bone surface ( $T_{1/2} = 100$ day) 45% to liver ( $T_{1/2} = 40$ day) 0,03% to testes or ovaries ( $T_{1/2} = \text{infinity}$ ) 10% to direct excretion

## ICRP 60-68 : Longmodel



### Deposition factors D and clearance rates R for insoluble particles:

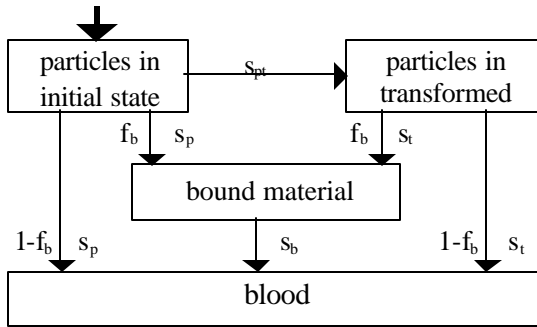
D in % van ingeademde activiteit ; R in 1/day; \*): 0.05% of D(ET<sub>2</sub>)

Region	Deposition factor D		Clearance rate R	
AMAD	1 μm	5 μm		
ET <sub>1</sub>	16.52	33.85	1	to Envir.
ET <sub>2</sub>	21.12	39.91	100	to GI tract
ET <sub>seq</sub>	*)	*)	1E-3	to LN <sub>ET</sub>
BB <sub>1/2/seq</sub>	1.24	1.78		
...1	52	33	10	to ET <sub>2</sub>
...2	47	66	0.03	to ET <sub>2</sub>
...seq	0.7	0.7	0.01	to LN <sub>TH</sub>
bb <sub>1/2/seq</sub>	1.65	1.10		
...1	50	40	2	to BB <sub>1</sub>
...2	49	59	0.03	to BB <sub>1</sub>
...seq	0.7	0.7	0.01	to LN <sub>TH</sub>
Al <sub>1,2,3</sub>	10.66	5.32		
...1	30	30	0.02	to bb <sub>1</sub>
...2	60	60	1E-3	to bb <sub>1</sub>
...seq	10	10	1E-4	to bb <sub>1</sub>
			2E-5	to LN <sub>TH</sub>
Total	51.19	81.96		



Vervolg ICRP 60-68 longmodel

Absorption to blood of soluble material . (for each compartment (incl. LN, excl. ET<sub>1</sub>))



Default absorption rates s (1/day)			
Type	F	M	S
s = 10 min	fast	moderate	slow
s = 140 d	100 %	10 %	0.1 %
s = 7000 d	0 %	90 %	0 %
	0 %	0 %	99.9 %
<u>rates: (1/day)</u>			
s <sub>p</sub>	100	10	0.1
s <sub>pt</sub>	0	90	100
s <sub>t</sub>	-	0.005	1E-4
s <sub>b</sub>	-	-	-
<u>fractions</u>			
f <sub>b</sub> (%)	0 %	0 %	0 %

## Uranium in het lichaam (volgens ICRP 26/30)

### 1. Inhalatie: (voor AMAD = 1 µm)

Verbindingen/ oplosbaarheid	Klasse	Verblijftijd in long	Naar Transfer Compartment	Naar Maag-Darm- stelsel	f <sub>1</sub> via long
a) goed	D	<≈ 1 dag	48 %	15 %	0,05
b) matig	W	<≈ 1 dag	12 %	51 %	0,05
c) slecht	Y	<≈ 1 dag	5 %	58 %	0,002

Voorbeelden:

a) UF<sub>6</sub>, UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>; b) UO<sub>3</sub>, UF<sub>4</sub>, UCl<sub>4</sub>; c) UO<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>

NB. De f<sub>1</sub>-waarden zijn voor inhalatie gevolgd door inslikken; voor directe ingestie horen UF<sub>4</sub> en UCl<sub>4</sub> bij c)

### 2. Verdeling over het lichaam, vanuit TC : (met biol.halveringstijd)

- 20 % resp. 2.3 % naar botoppervlak (20 dag, resp. 5000 dag)
- 12 % resp. 0,05 % naar lever (6 resp 1500 dag)
- 12 % resp. 0,05 % naar rest lichaam (uniform) (6 resp 1500 dag)
- 54 % directe excretie (0 dag)

### 3. ALI's en DAC's: (meest bedreigde orgaan: botoppervlak)

	klasse	oraal		inhalatie		
		f <sub>1</sub> = 0,05	f <sub>1</sub> =0,002	D	W	Y
ALI meest bedreigde orgaan:	U-235	5x10 <sup>5</sup>	Nvt	5x10 <sup>4</sup>	Nvt	Nvt
	U-238	5x10 <sup>5</sup>	Nvt	5x10 <sup>4</sup>	Nvt	Nvt
ALI effectief:	U-235	7x10 <sup>5</sup>	7x10 <sup>6</sup>	7x10 <sup>4</sup>	3x10 <sup>4</sup>	2x10 <sup>3</sup>
	U-238	8x10 <sup>5</sup>	8x10 <sup>6</sup>	8x10 <sup>4</sup>	3x10 <sup>4</sup>	2x10 <sup>3</sup>
DAC effectief [Bq/m <sup>3</sup> ]	U-235	nvt	Nvt	20	10	0,6
	U-238	nvt	nvt	20	20	0,7

### 4. Concentratie in lucht, voor 1 Bq/m<sup>3</sup> :

Met behulp van :  $A = \lambda N$  ( $T_{1/2} = 7,04 \times 10^8$  resp.  $4,47 \times 10^9$  jaar voor <sup>235</sup>U resp. <sup>238</sup>U).

1 Bq/m<sup>3</sup> =  $3,2 \times 10^{16}$  at/m<sup>3</sup> <sup>235</sup>U of  $2,0 \times 10^{17}$  at/m<sup>3</sup> <sup>238</sup>U.

UF<sub>6</sub> :  $235(8) + 6 \times 19 = 349(352)$  g/mol. =  $6,022 \times 10^{23}$  moleculen/mol.

Dus voor 1 Bq/m<sup>3</sup>:  $3,2 \times 10^{16} / 6,022 \times 10^{23} = 5,3 \times 10^{-8}$  mol/m<sup>3</sup> =  $1,9 \times 10^{-8}$  kg/m<sup>3</sup> <sup>235</sup>UF<sub>6</sub>  
 $2,0 \times 10^{17} / 6,022 \times 10^{23} = 3,4 \times 10^{-7}$  mol/m<sup>3</sup> =  $1,2 \times 10^{-7}$  kg/m<sup>3</sup> <sup>238</sup>UF<sub>6</sub>.

Vgl: lucht: 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

## 5. Checklist belangrijke onderwerpen

### Hoofdstuk 1

- Curie - Becquerel
- Conversie-electronen en andere vervalprocessen
- Activiteit: massiek - specifiek - zuiver of dragervrij -  $= f(M, m, T_{1/2}, \rho)$
- Totaal aantal transformaties tussen  $t = 0$  en  $\infty$
- Moeder-dochterrelaties, en bij grote verschillen tussen halveringstijden
- Idem, effecten op activiteiten moeder vs. dochter

### Hoofdstuk 2

- Deltastraling, LET en S
- Regel van Feather en benadering (met getalwaarden); dracht in lucht
- Mechanisme energieafgifte geladen deeltjes  $= f(Z, E)$
- $S/\rho$  berekeningen, laagdikte voor afremming, en dosistempo bij afremming e.d.
- Fractie remstraling als  $f(Z, E)$  en terugrekenen remstraling  $\rightarrow$  oorspronkelijke energie
- Dikte materiaal voor stoppen geladen deeltjes als  $f(E)$ ; doordringdiepte
- Werking en efficiency van de foton-stopping mechanismen als  $f(Z, E)$
- De verschillende  $\mu$ 's, hun onderlinge grootte en waarvoor gebruikt
- Dosis, Kerma, Dosisequivalent
- Afschatten van  $\mu/\rho$ - waarden voor één materiaal uit die van een ander
- Van  $\mu$  naar  $d_{1/2}$  omrekenen
- $\mu$ 's  $= f(Z, \rho, E)$  met orden van grootten
- vangstdoorsnede voor neutronen, verschillende materialen, grootten
- afremmingsefficiency voor neutronenmoderatie, door middel van (in)elastische botsingen

### Hoofdstuk 3

- Overgedragen vs. Afgegeven energie, voor welke soort straling
- Omrekenen kerma in dosis in gedeponeerde energie, bv in volume lucht
- Idem voor geladen deeltjes
- Bij gegeven bron afschatten van gammakermatempo in lucht op 1 m
- Idem voor dosistempo voor beta' s, bv in weefsel
- Geladen-deeltjes evenwicht, definitie, geldigheid, grensvlakken, Bragg-Gray
- Gemiddeld aantal ionparen als  $f(E)$  in lucht, in ander materiaal
- Omrekeningsfactor neutronen: Sv/s (of mrem/h) per  $n/cm^2$ s als  $f(E)$
- Qualiteit als  $f(E)$

### Hoofdstuk 4 (Nieuw hoofdstuk)

### Hoofdstuk 5

- Dosis-effect relaties bij deterministische en stochastische effecten
- Kans op optreden en ernst van optreden
- Herstelmechanismen vs. fatale effecten
- Aard en voorkomen van verschillende biologische effecten (wat wanneer)
- Acute blootstelling en gevolgen, ook bij lage dosis (lage LET)
- Risicofactoren, ook voor nageslacht

### Hoofdstuk 6

- Vuistregels uit  $K(D, H) = \Gamma A/r^2$
- Luchtkermatempoconstante  $= f(E)$
- Omgevings-, richtings-, persoonsdosis-equivalenten: definities
- RBE, waarvan afhankelijk?
- Maximaal dosistempo in weefsel, hoe diep?

### Hoofdstuk 7

- Aandeel natuurlijke/kunstmatige straling in totale belasting
- Aandeel uitwendige/inwendige bestraling

### Hoofdstuk 8

- Waarp normen gebaseerd?
- ICRP 26/30 en 60/61: nieuwe limieten
- ICRP 67/68: nieuw metabole gegevens, vnl. longmodel
- weefselweefactoren, definities, grootteorde (van de belangrijkste)
- Nederlandse beleid en verschillen met Internationaal
- Gestelde overlijdensrisico's, MTR en SN, ook voor bedrijfsongevallen totaal

#### Hoofdstuk 9

- Combinatie van biologische en fysische halveringstijden
- Berekening totaal aantal transformaties in bepaalde periode door integratie.
- Afhankelijkheid hiervan van: inname,  $T_{1/2, \text{fys}}$ , chemische verbinding, yield
- SEE voor alfa's en beta's voor gelijke/ongelijke T en S
- In tabellen: deterministische (orgaan, niet: long) en stochastische dosislimiet
- Verband DAC-ALI
- Berekeningen met  $H_E = (A/ALI) H_{\text{limiet}}$  (met  $H_{\text{limiet}}$  in Sv/jr), ook voor aparte organen
- $H_E$ ,  $E(50)$ ,  $e(50)$ , DCC, X [Re],  $X_{\text{max}}$

#### Hoofdstuk 10

- Rendementen; energieresolutie
- Berekeningen: totaal pulsen of meettijd uit standaarddeviatie, e.o.
- Standaarddeviatie en teltempo, ook met achtergrond
- Berekening twee dode-tijd correcties
- "Lucht- resp. weefselequivalent"
- Efficiency van gasgevulde detectoren =  $f(Z, W)$
- Welke detector voor welk doel, welke stralingssoort, welke energie, waarom
- Meest geschikte detectoren voor meerdere stralingssoorten tegelijk.
- Wanddikte =  $f(E_{\text{gamma}})$  voor geladen-deeltjesevenwicht
- Geiger-Müller buis met metalen huls: waarom? Xenon erin?
- Materiaal voor afremmen snelle neutronen (bv.  $\text{BF}_3$ -buis)

#### Hoofdstuk 11

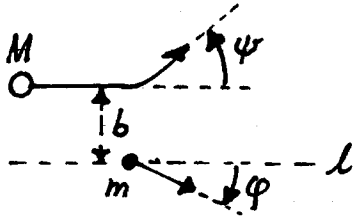
- Verzwakking door smalle of brede bundel
- Build-up factor, afhankelijkheid van E,  $\mu$ , d, materiaal.
- Röntgenapparatuur, fotonenergie, -spectrum en -intensiteit =  $f(I, V, \text{filter})$
- Strooistraling Röntgentoestellen
- Vergelijking lood en beton als afscherming =  $f(E)$ , met afschattingen

#### Hoofdstuk 12, 13, 14 en Richtlijn Radionuclidenlaboratoria

- Toxiciteit, waarop gebaseerd, uitzonderingen
- $p+q+r$  en  $n+k-6$  regels
- "Ontwerpwaarde" voor te ontvangen dosis
- 4 verschillen C- en D-lab.
- Max. aantal Re's voor gegeven werkzaamheden in gegeven situaties
- Waar wettelijke regels te vinden?
- Limietwaarden jaardosisequivalent voor (radiologische) werkers
- Categorieën werkers (A, B etc; W,  $S_{0,1,2}$  en P) en de bijbehorende limieten, maatregelen
- Vervoersvoorschriften
- Voorschriften laboratoria; Decontaminatie
- Indeling radiotoxiciteitsgroepen, waarop gebaseerd; waarvoor, waarvoor niet van toepassing
- Idem: verschil in ALI tussen de groepen
- Idem bij toepassing of lozing zonder vergunning, oppervlaktebesmetting, transport
- Maximaal toe te passen activiteit.

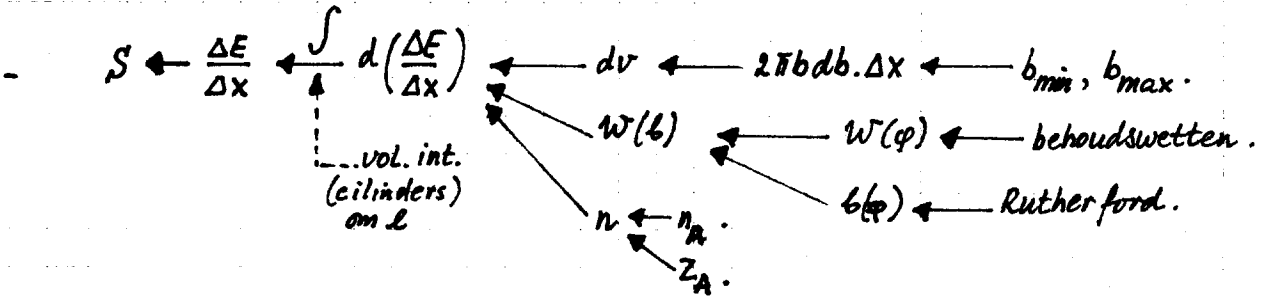
# ENERGIEVERLIES VAN $p$ EN $\alpha$ .

- Interactie is coulomb-interactie (Rutherford)
- Energieverlies vindt plaats door elastische botsingen met electronen



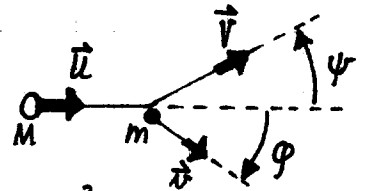
Symmetrie: cilindrisch om  $l$ .

Exp:  $\varphi \approx \frac{\pi}{2}$ ;  $\psi \lesssim 1^\circ$ .



## Uitwerking:

Rutherford:  $b = \frac{Z_M Z_m e^2}{4\pi\epsilon_0 u^2} \frac{M+m}{Mm} \tan \varphi$



Behoudswetten:  $W(\varphi) = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{-4Mm}{(M+m)^2} \cos^2 \varphi \cdot W_0$ ;  $W_0 = \frac{1}{2} M u^2$   
 $\approx \frac{-4Mm}{(M+m)^2} \tan^{-2} \varphi \cdot W_0$  voor  $\varphi \approx \frac{\pi}{2}$

$$d\left(\frac{\Delta E}{\Delta x}\right) = \frac{-4Mm}{(M+m)^2} \cdot \frac{Z_M^2 \cdot e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 b^2 u^4} \cdot \frac{(M+m)^2}{M^2 m^2} \cdot 2\pi b db \cdot \Delta x \cdot n \cdot \frac{1}{\Delta x} \cdot W_0 =$$

$$= \frac{-2\pi Z_M^2 e^4 M}{(4\pi\epsilon_0)^2 m} \cdot \frac{n_A Z_A}{W_0} \cdot \frac{db}{b}$$

$$S = \frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{-2\pi Z_M^2 e^4 M}{(4\pi\epsilon_0)^2 m} \cdot \frac{n_A Z_A}{W_0} \cdot \ln \frac{b_{max}}{b_{min}}$$

$$R = \int_0^{W_0} \frac{dW_0}{S} = \frac{(4\pi\epsilon_0)^2 m}{2\pi Z_M^2 e^4 M \cdot n_A Z_A} \frac{\frac{1}{2} W_0^2}{\ln \frac{b_{max}}{b_{min}}}$$

, mits  $\ln$ -term onafh.  $W_0$ .

$$\frac{b_{max}}{b_{min}} \approx \frac{4m}{M} \frac{W_0}{\bar{W}}$$

;  $\bar{W}$  = gem. ionisatie-energie.

daardoor  $R \sim W_0^{1,5 \text{ à } 1,8}$  i.p.v.  $R \sim W_0^2$

(vervolg: ENERGIEVERLIES VAN  $p$  EN  $\alpha$ )

$$\frac{b_{\max}}{b_{\min}} ?$$

$$b_{\max} \approx u \cdot \tau_{\max} \approx u \cdot \frac{T}{Z_{\text{baan}}}$$

 $\tau = \text{"botsingstijd"}$ 

$$\text{Bohr: } \left. \begin{aligned} mvr &= n\hbar \\ \frac{mv^2}{r} &= \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \end{aligned} \right\}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi \cdot \frac{n\hbar}{2W} ; \bar{W} = \frac{mZ^2 e^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 n^2 \hbar^2}$$

$$b_{\min} \approx \frac{\hbar}{(p_y)_{\max}} = \frac{\hbar}{Mu} = \frac{2\hbar u}{W_0} \frac{M}{m}$$

uit:  $\Delta x \Delta p \gtrsim \hbar$ 

$$\frac{b_{\max}}{b_{\min}} = \frac{u \cdot \frac{2\pi n \hbar}{2W}}{\frac{2\hbar u}{W_0} \cdot \frac{M}{m}} = \frac{\pi n}{2} \frac{m}{M} \frac{W_0}{W} \approx \frac{4m}{M} \frac{W_0}{W}$$

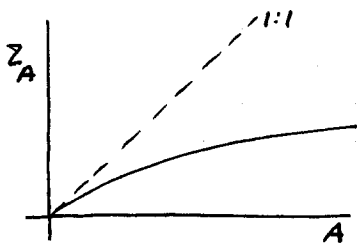
Benaderingen:

$$1. \quad \ln\left(\frac{b_{\max}}{b_{\min}}\right) \approx \left(\frac{b_{\max}}{b_{\min}}\right)^{1/2}$$

$$R \approx \frac{(4\pi\epsilon_0)^2 m}{2\pi^2 Z^2 e^4 M n_A Z_A} \cdot \frac{\frac{1}{2} W_0}{\sqrt{\frac{4m}{M} \frac{W_0}{W}}}$$

$$\left\{ \begin{aligned} &\sim W_0^{3/2} \\ &\sim m^{1/2} \\ &\sim M^{-1/2} \\ &\sim n^{-1} = \left(\frac{N_{AP}}{A}\right)^{-1} \end{aligned} \right.$$

$$2. \quad Z_A \sim A^{1/2}$$

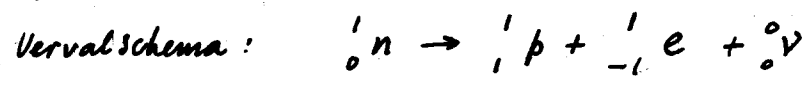


$$\frac{R p Z_A}{A} \sim W_0^{3/2}$$

$$\boxed{R p A^{-1/2} \sim W_0^{3/2}}$$

zie vgl. (2.20)

$\beta$ -verval



Fermi's Golden Rule:  $w = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle \Psi_f | \mathcal{H} | \Psi_i \rangle|^2 \rho_E$  overgangswaarschijnlijkheid

$\Psi_i$  en  $\Psi_f$ : golfies van begin- en eindtoestand;  $\rho_E$  is dichtheid van eindtoestanden.

begin: nucleus N in toestand i:  $\Psi_i = \Psi_{N_i}$

eind: nucleus N in toestand f + electron + neutrino:  $\Psi_f = \Psi_{N_f} \Psi_e \Psi_\nu$

Het neutrino heeft slechts zwakke interactie met materie: dus benadering als vlakke golf:

( $\vec{p}$  = moment)  $\Psi_\nu = \frac{1}{\sqrt{V}} \exp(\frac{i}{\hbar} \vec{p}_\nu \cdot \vec{r})$

( $V$  = interactie volume) evenzo voor het electron:  $\Psi_e = \frac{1}{\sqrt{V}} \exp(\frac{i}{\hbar} \vec{p}_e \cdot \vec{r})$

(dit laatste is alleen geldig als de invloed van het Coulomb-veld van de kern te verwaarlozen is (vooral voor lichte kernen en electronen met energie > 0,2 MeV))

Er moet impulsbehoud zijn, dus:  $p_\nu = p_e$ .  
Dan  $p_\nu = p_e \approx m_e c$  en  $\frac{p r}{\hbar} \approx \frac{m_e c R}{\hbar} \approx \frac{1}{100}$

met  $R \approx 5 \times 10^{-15} m$ , karakteristieke kernstraal,

zodat  $\Psi_\nu = \Psi_e \approx \frac{1}{\sqrt{V}}$  (het geheel speelt zich dus "midden" in de kern af)

$$|\langle \Psi_f | \mathcal{H} | \Psi_i \rangle|^2 \approx \frac{1}{V} |\langle \Psi_{N_f} | \mathcal{H} | \Psi_{N_i} \rangle|^2$$

Benadering: allereenvoudigste uitdrukking voor de interactiehamiltoniaan: een constante  $g$ :

$$\mathcal{H} = g$$

$$w = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \frac{g}{V} M \right|^2 \rho_E, \text{ met } M = \langle \Psi_{N_f} | \Psi_{N_i} \rangle$$

De constante  $g$  vertegenwoordigt de "interactiestrekte", zoals de elektrische lading de "interactiestrekte" van de Coulomb-interactie is.

$M = 1$  als  $\Psi_{N_i} = \Psi_{N_f}$

$|M| < 1$  als  $\Psi_{N_i} \neq \Psi_{N_f}$

Eindtoestanden (zie ook: afleiding foto-effect:  $V=L^3$ )

voor momenten  $\vec{p}$  en  $\vec{p} + d\vec{p}$ :  $dn_e = \frac{p_e^2 dp_e d\Omega_{p_e} V}{(2\pi\hbar)^3} = \frac{4\pi p_e^2 dp_e V}{(2\pi\hbar)^3}$

evenzo voor het neutrino

Dan  $\rho_E = \frac{dn}{dE_e} = \frac{p_e^2 dp_e \cdot p_\nu^2 dp_\nu V^2}{4\pi^2 \hbar^6 \cdot dE_e}$  want  $\int \frac{d\Omega_{p_e}}{\Omega_{p_e}} = 4\pi$

waarin  $dE_e$  de electron-energie is.

$$\text{dus: } \omega = \frac{2\pi}{h} \left(\frac{g}{V}\right)^2 |M|^2 \frac{p_e^2 dp_e p_\nu^2 dp_\nu}{4\pi^4 h^6 dE_e} V^2$$

Behoudswetten:

$$E_e^2 = m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2 \quad \text{en} \quad E_\nu^2 = m_\nu^2 c^4 + p_\nu^2 c^2$$

$$E_e + E_\nu = E_0 \quad (\text{max. energie } \beta\text{-verval spectrum})$$

$$E_e dE_e = c^2 p_e dp_e \quad \text{en} \quad E_\nu dE_\nu = c^2 p_\nu dp_\nu$$

$$dE_e = -dE_\nu = dE$$

De vorm van het  $\beta$ -spectrum kan nu worden afgeleid uit  $p_E$ , omdat  $p_E$  een functie van  $E$  is.

Neem aan:  $m_\nu = 0$  (voor  $m_\nu \neq 0$  wordt de berekening nogal ingewikkeld)

$$\text{Dan volgt: } p_E = \frac{p_e^2 dp_e p_\nu^2 dp_\nu}{4\pi^4 h^6 (dE_e)^2} dE_e$$

en met  $E_{e, \max} = E_0$ ; voor de intensiteitsverdeling.

$$N(E) \sim \epsilon \cdot \sqrt{\epsilon^2 - 1} \cdot (\epsilon_0 - \epsilon)^2$$

$$\text{waarin } \epsilon = \frac{m_e c^2 + E_{\text{kin}}}{m_e c^2} \quad \text{en} \quad \epsilon_0 = \frac{m_e c^2 + E_{\text{kin, max}}}{m_e c^2}$$

met  $E_{\text{kin}}$  de kinetische energie van het uitgezonden electron  
en  $m_e$  de rustmassa van het electron:  $m_e c^2 = 0,512 \text{ MeV}$

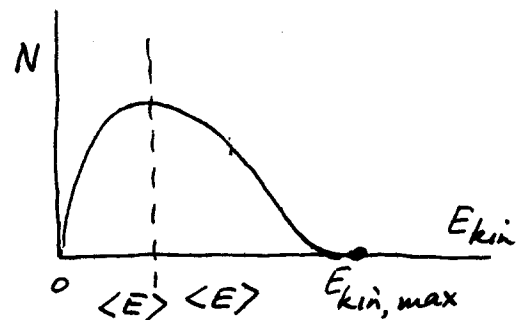
De functie heeft 2 nulpunten;  $\epsilon = 1$  en  $\epsilon = \epsilon_0$  (dus  $E_{\text{kin}} = 0$  en  $E_{\text{kin}} = E_{\text{kin, max}}$ )  
en 2 punten met afgeleide = 0,  
namelijk  $\epsilon = \epsilon_0$  en ergens een maximum.  
voor  $\epsilon = 1$  is de helling  $\rightarrow \infty$

De kromme ziet eruit als hiernaast  $\Rightarrow$

Het gemiddelde ligt op  
ongeveer  $\frac{1}{3} E_{\text{kin, max}}$ .

Daarbij is de gemiddelde energie  
gedefinieerd als:

$$\langle E \rangle = \frac{\int_0^{E_{\text{kin, max}}} E \cdot N(E) dE}{\int_0^{E_{\text{kin, max}}} N(E) dE}$$



"Exacte" waarden:

$\epsilon$	-	1,1	1,2	1,5	2	5	10	100
$E_{\text{kin, max}}$ [MeV]		0,05	0,1	0,2	0,5	2,5	4,6	50
$\frac{\langle E \rangle}{E_{\text{kin, max}}}$ [%]		33	34	35	37	42	46	49



# AFLEIDING WERKZAME DOORSNEDE VOOR FOTO-EFFECT

- Foton wordt door electron geabsorbeerd.

Begintoestand electron:  $n^e$  Bohr-baan

Eindtoestand electron: vrij

def  $\alpha$ :

Energiebalans:  $h\nu = T + I$ , waarin  $T = \frac{p^2}{2\mu}$ ;  $I = \frac{me^4 Z^2}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2 n^2} = \frac{\alpha^2}{2\mu n^2}$

Vrije electronen kunnen geen licht absorberen (i.v.m. impulsbehoud). Daarom zal  $\sigma$  groter zijn als  $n$  kleiner is. Neem  $n=1$  (K-schil). De kern corrigeert behouds van impulsmoment.

Aannamen:  $T \gg I$ ;  $h\nu \ll mc^2$ ; gebeuren ver weg van absorptiekant.

- Fermi's Golden Rule:  $w = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle \psi_f | \mathcal{H} | \psi_i \rangle|^2 \rho_E$  overgangswaarschijnlijkheid

$\mathcal{H} = eV + \sqrt{m_0^2 c^4 + (\vec{p} - e\vec{A})^2 c^2} \approx eV + m_0 c^2 + \frac{1}{2} \frac{(\vec{p} - e\vec{A})^2}{m}$   
 $\mathcal{H} \approx \underbrace{eV + m_0 c^2 + \frac{p^2}{2m}}_{\mathcal{H}_0} + \underbrace{\frac{e \vec{p} \cdot \vec{A}}{m} + \frac{e^2 A^2}{2m}}_{\mathcal{H}_{int}}$

$|\psi\rangle - |\psi_i\rangle = |\psi_{i,el}\rangle |\psi_{i,fot}\rangle = \frac{e^{-r/a}}{\sqrt{\pi a^3}} |1\rangle$  ; bolgolf ;  $a = \frac{a_0}{Z}$  ;  $\left\{ \begin{array}{l} a_0 \text{ Bohr-straal} \\ a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} \end{array} \right.$

$|\psi_f\rangle = |\psi_{f,el}\rangle |\psi_{f,fot}\rangle = \exp(i\vec{p} \cdot \vec{r}/\hbar) |0\rangle$  ; vlakke golf ;  $\vec{k}_e = \frac{\vec{p}}{\hbar}$

nu is  $\vec{A}(\vec{r}, t) = \sum_{\lambda} q_{\lambda}(t) \vec{A}_{\lambda}(\vec{r}) + cc$  ; 1 foton  $\Rightarrow$  1  $\lambda$  aanwezig

$q_{\lambda}(t) = |q_{\lambda}| \cdot \exp(-i\omega_{\lambda} t)$  ;  $\omega_{\lambda} = 2\pi\nu$

$\langle 0 | q_{\lambda}^* | 1 \rangle = \sqrt{\hbar / \omega_{\lambda}}$

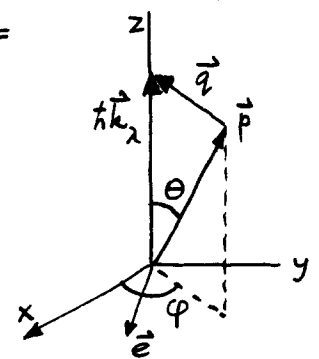
$\vec{A}_{\lambda}(\vec{r}) = \vec{e} \sqrt{4\pi c^2} \exp(-i\vec{k}_{\lambda} \cdot \vec{r})$  .  $\vec{e}$ : pol. vector  
 normalisatie in doors  $L^3$

De tweede term in  $\mathcal{H}_{int}$ : 2 fotonen in het geding  $\Rightarrow$  Compton effect  
 $\Rightarrow$  Raman effect.

$|\langle 11 \rangle| - \left| \langle e^{i\vec{p} \cdot \vec{r}/\hbar} ; 0 | q_{\lambda}^* \cdot \vec{p} \cdot \vec{e} \sqrt{4\pi c^2} \exp(i\vec{k}_{\lambda} \cdot \vec{r}) | 1 ; \frac{e^{-r/a}}{\sqrt{\pi a^3}} \rangle \right|^2 =$

$= \frac{e^2}{m^2} \frac{\hbar}{2\omega_{\lambda}} p_e^2 \frac{4\pi c^2}{\pi a^3} \left\{ \int_{\text{volume}} \exp\left[-\frac{i\vec{p} \cdot \vec{r}}{\hbar} + i\vec{k}_{\lambda} \cdot \vec{r} - \frac{r}{a}\right] d\vec{r} \right\}^2 =$

$= \frac{e^2}{m^2} \frac{\hbar}{2\omega_{\lambda}} p_e^2 \frac{4\pi c^2}{\pi a^3} \left\{ \frac{8\pi\alpha \hbar^3}{(\alpha^2 + q^2)^2} \right\}^2$



$\rho_E$  - Electron in continuu spectrum:  $\rho_E dE =$  kans op mogelijke eindtoestand tussen  $E$  en  $(E+dE)$  gegeven door 2e kwantisatie:

$(\vec{e} \perp \vec{k}_{\lambda})$

aantal oscillatoren in  $d\nu = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3}$

ook moet  $e^{i\vec{p} \cdot \vec{r}/\hbar}$  periodiek in  $L^3$  zijn:  $k_x = \frac{2\pi}{L} N_x$ ; etc (mbv  $\lambda = \frac{L}{N}$ )

(vervolg fotoeffect:)  $\frac{1}{h^3} d\vec{p} = d\vec{k} = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 dN_x dN_y dN_z = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 d\vec{N} = (2\pi)^3 d\vec{n}$  (L=1)

$\rho_E dE = d\vec{n} = \frac{d\vec{p}}{(2\pi\hbar)^3} = \frac{p^2 dp d\Omega_p}{(2\pi\hbar)^3} = \frac{pE dE d\Omega_p}{(2\pi\hbar)^3 c^2} \approx \frac{pmc^2 dE d\Omega_p}{(2\pi\hbar)^3 c^2}$

NB:  $\frac{dp}{dE} = \frac{E}{pc^2}$  volgt uit  $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

$w - dw = \frac{2\pi}{h} \frac{e^2}{m^2} \frac{\hbar}{2\omega_\lambda} \underbrace{p^2 \sin^2\theta \cos^2\varphi}_{p_e = \vec{p} \cdot \vec{e}} \frac{4\pi c^2}{\pi a^3} \frac{64\pi^2 \omega^2 \hbar^6}{(\alpha^2 + q^2)^4} \frac{pm d\Omega_p}{(2\pi\hbar)^3}$

nu is  $\alpha^2 + q^2 = \underbrace{\alpha^2}_{\approx 0} + \hbar^2 k^2 + p^2 - 2\hbar k \cdot \vec{p} \cos\theta \approx \hbar k \left( \hbar k + \frac{p}{\hbar k} - 2p \cos\theta \right)$   
 $\approx \hbar k (2mc - 2m v \cos\theta)$   
 $= 2\hbar k mc \underbrace{\left(1 - \frac{v}{c} \cos\theta\right)}_{f(\theta)} ; f(\theta) \approx 1$

Dus:

$dw = \frac{2\pi e^2}{m^2 4\pi v} (2\pi \hbar v)^{3/2} \sin^2\theta \cos^2\varphi \frac{4\pi c^2 Z^3}{\left(\frac{4\pi \epsilon_0 \hbar^2}{\pi e^2}\right)^3} \frac{64\pi^2 m^2 Z^2 e^4 \hbar^6}{(4\pi \epsilon_0 \hbar)^2 [2\hbar k mc f(\theta)]^4} \cdot \frac{m d\Omega_p}{(2\pi\hbar)^3}$

Dus:

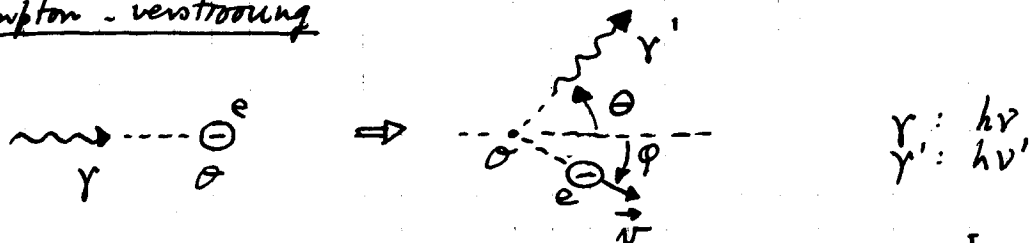
$w \sim Z^5 v^{-7/2} \sin^2\theta \cos^2\varphi$  eigenlyk:  $\frac{dw}{d\Omega}$

Gevolgen:  $w = w_{max}$  voor  $\theta \approx 90^\circ$  en  $\varphi \approx 0$ ; dus als  $\vec{p} \parallel \vec{e}$

$w = 0$  ..  $\theta \approx 0$  of  $\varphi \approx \frac{\pi}{2}$ ; dus als  $\vec{p} \perp \vec{e}$

werkzame doornede

$\frac{d\sigma(\theta, \varphi)}{d\Omega} = w \cdot L^3 v_{\text{tot}} = w \cdot c$

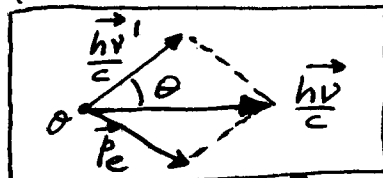
Compton - verstrooiing

Energie behoud:  $h\nu = h\nu' + E_{kin,e} = h\nu' + m_e c^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right]$

$m_e =$  rustmassa electron  
 $\beta = v/c$ ,  $c =$  lichtsnelheid

$$\frac{m_e^2 c^4}{1-\beta^2} = m_e^2 c^4 + (h\nu)^2 + (h\nu')^2 + 2m_e c^2 h(\nu - \nu') - 2h^2 \nu \nu' \dots (1)$$

Impuls behoud:  $\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} + p_e$



waarin  $p_e = M_e v = \frac{m_e}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot \beta c$  ( $M_e = m_e + \frac{E_{kin}}{c^2}$ )

$$\frac{m_e^2 \beta^2 c^4}{1-\beta^2} = (h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2h^2 \nu \nu' \cos \theta \dots (2)$$

(1)+(2)  $\Rightarrow \frac{c}{\nu'} - \frac{c}{\nu} = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$

$$h\nu' = h\nu \left[ 1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta) \right]^{-1}$$

Bijzondere gevallen:

$$m_e c^2 = 0,5124 \text{ MeV.}$$

$\frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta) \ll 1$  voor voldoende kleine  $\theta$  als  $h\nu > m_e c^2$   
 voor alle  $\theta$  als  $h\nu \ll m_e c^2$   
 dan is  $\nu' \approx \nu$

$\frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta) \gg 1$  voor  $h\nu \gg m_e c^2$  en  $\theta \approx 90^\circ$ .  
 dan is  $h\nu' \approx \frac{m_e c^2}{1 - \cos \theta}$

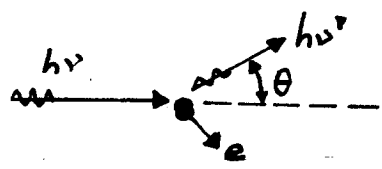
zodat  $h\nu' = m_e c^2$  voor  $\theta = \pi/2$ .  
 $h\nu' \approx \frac{1}{2} m_e c^2$  voor  $\theta = \pi$ .

Uit de relaties volgt verder:

$$\varphi_e \leq \frac{\pi}{2} \text{ en } E_{kin,e} \leq E_{kin,e, \max}$$

waarin

$$E_{kin,e, \max} = h\nu \frac{2\alpha}{1+2\alpha}; \quad \alpha = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$



COMPTON

the conservation laws give, for the energy of the Compton scattered photon

$$\frac{h\nu'}{h\nu} = \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \vartheta)} \quad \alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2} \quad (5) \quad m_0 = m_e$$

$$(h\nu')_{\min} = m_0c^2 \frac{\alpha}{1 + 2\alpha} = h\nu \frac{1}{1 + 2\alpha} \quad \text{for } \vartheta = 180^\circ \quad (6)$$

Figure 3 gives  $h\nu'$  versus  $h\nu_0$  for 10 values of  $\vartheta$ . The curve for  $\vartheta = 180^\circ$  gives  $(h\nu')_{\min}$ , and thus evaluates the backscatter peak and the energy separation between the Compton edge and the total energy peak in  $\gamma$ -ray scintillation spectroscopy (see Section VII). The energy of the backscattered photon  $(h\nu')_{\min}$  approaches its maximum value of  $m_0c^2/2 = 0.25 \text{ MeV}$  for high-energy incident photons,  $\alpha \gg 1$ .

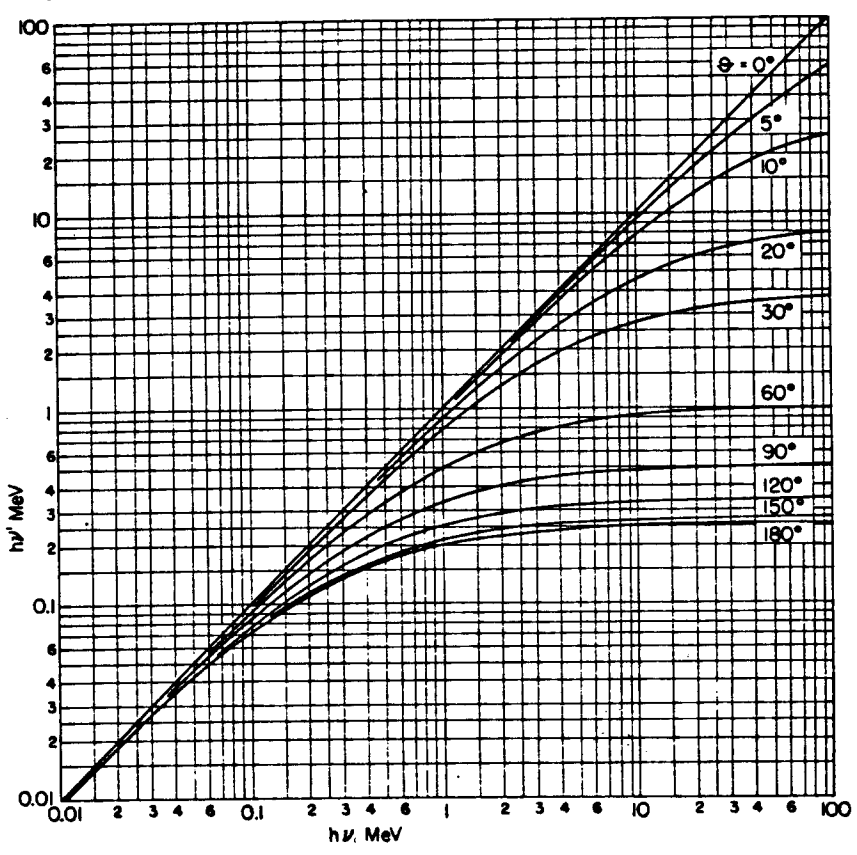


FIG. 3. Dependence of the energy  $h\nu'$  of the Compton-scattered photon on  $h\nu_0$  and the photon scattering angle  $\vartheta$ , from Eq. (5). From Evans (1958).

Work same doorwede: (Klein, Nishina, Tamm)

$$\sigma = 2\pi r_e^2 \left[ \frac{1+\epsilon}{\epsilon^2} \left\{ \frac{2(1+\epsilon)}{1+2\epsilon} - \frac{1}{\epsilon} \ln(1+2\epsilon) \right\} + \frac{1}{2\epsilon} \ln(1+2\epsilon) - \frac{1+3\epsilon}{(1+2\epsilon)^2} \right]$$

met  $\epsilon = \frac{h\nu}{m_0c^2}$  en  $r_e = \frac{e^2}{m_0c^2}$

$\epsilon \ll 1$ : Thomson scattering:

$\epsilon \gg 1$ :  $\sigma \sim \frac{1}{E_\gamma} (= \frac{1}{h\nu})$ , met  $Z$  electr./kern:  $\sigma \sim \frac{Z}{E_\gamma}$

## AFLEIDING WERKZAME DOORSNEDE VOOR THOMSON-SCATTERING (klassiek)

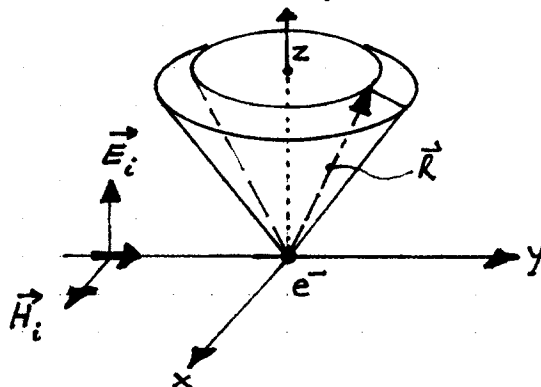
Stel: lichtgolf  $(\vec{E}_i, \vec{H}_i)$  valt in op trillend electron  $(\omega_0)$ .

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{i0} \exp i\omega t$$

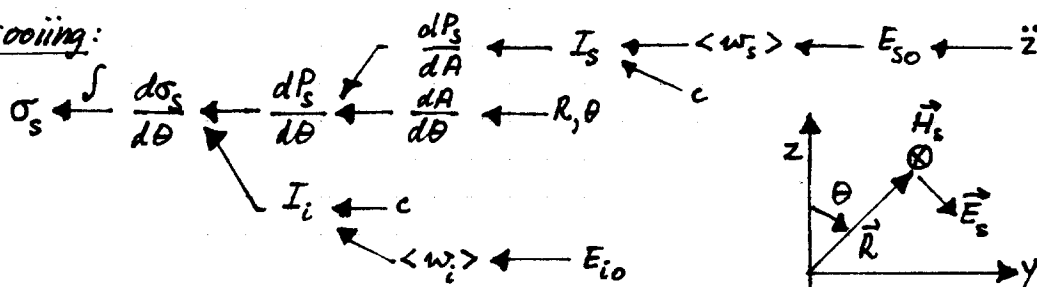
bew. vgl.  $m\ddot{z} + m\omega_0^2 z = -eE_i$

opl.  $z = \frac{-eE_{i0}}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \exp i\omega t$

symmetrie: kegelvormig!



Verstrooiing:



$$* I_i = c \langle w_i \rangle = c \langle \epsilon_0 E_{i0}^2 \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_{i0}^2 \quad (\text{W/m}^2)$$

$$* I_s = c \langle w_s \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_{s0}^2 = \frac{1}{2} c \epsilon_0 \left[ \frac{-e \sin \theta}{4\pi \epsilon_0 R} \langle \frac{\ddot{z}}{c^2} \rangle \right]^2 =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{e^4 \sin^2 \theta \cdot \omega^4 \cdot E_{i0}^2}{(4\pi \epsilon_0)^2 R^2 c^4 m^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2} = \frac{e^4 \sin^2 \theta \cdot \omega^4}{(4\pi \epsilon_0)^2 R^2 c^4 m^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2} I_i \quad \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$$

$$* dA = 2 R \sin \theta \cdot R d\theta$$

$$* \frac{d\sigma_s}{d\theta} = \frac{dP_s}{d\theta} \frac{1}{I_i} = \frac{dP_s}{dA} \frac{dA}{d\theta} \frac{1}{I_i} = \frac{I_s}{I_i} \frac{dA}{d\theta}$$

$$\boxed{\frac{d\sigma_s}{d\theta} = \frac{2\pi}{(4\pi \epsilon_0)^2} \cdot r_0^2 \cdot \sin^3 \theta \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \quad ; \quad r_0 = \frac{e^2}{mc^2} \quad (\text{klas. straal v. electron})$$

$$\bullet \omega \ll \omega_0 : \frac{d\sigma_s}{d\theta} \sim \frac{\omega^4}{\omega_0^4} \quad : \text{RAYLEIGH-SCATTERING (voor licht)}$$

$$\bullet \omega \gg \omega_0 : \frac{d\sigma_s}{d\theta} \sim c \quad : \text{THOMSON-SCATTERING (voor Röntgen etc)}$$