

cursus
Stralingsdeskundige
niveau 5B

Frits de Mul
Klinische Fysica

5B-cursus : Ioniserende Straling

Inhoud

1. Atoombouw en verval:

protonen, neutronen, electronen, positronen; α , β , γ en Rö-straling

2. Radioactieve bronnen:

Röntgen, neutronen

3. Wisselwerking en afscherming

4. Detectie

5. Grootheden en eenheden:

dosis, equivalente en effectieve dosis; gray en sievert

6. Effecten: stochastische en deterministische effecten

7. Regelgeving: rechtvaardiging, ALARA, limieten

8. Veiligheid ingekapselde bronnen en Röntgen

9. Dosisberekeningen:

bestraling en besmetting; kwadratenwet, vuistregels.

10. Veiligheid open bronnen

11. Radioactief afval.

5B-cursus : Ioniserende Straling

Inhoud

1. Atoombouw en verval:

protonen, neutronen, electronen, positronen; α , β , γ en R -straling

2. Radioactieve bronnen:

Röntgen, neutronen

3. Wisselwerking en afscherming

4. D

5. C

6. E

7. R

8. V

9. D

10. Y

11. I

Deze presentatie volgt voornamelijk:

“Praktische Stralingshygiëne”

G. Brouwer en J. van den Eijnde

6^e druk, 2008, Syntax Media

met extra achtergrond-informatie toegevoegd

1

Atoombouw en verval

protonen, neutronen, electronen, positronen; α , β , γ en Röntgenstraling

Hfst. 1: Atoombouw en verval

1.1. Opbouw van een atoom	<ul style="list-style-type: none">•Z, N en A•notatie
1.2. Stabiliteit atoomkernen	<ul style="list-style-type: none">•N/Z-verhouding
1.3. Radionucliden	<ul style="list-style-type: none">•activiteit A•natuurlijke / kunstmatige activiteit
1.4. Verval en vervalwet	<ul style="list-style-type: none">•$A(t) = \lambda N(t)$•λ : vervalconstante [s^{-1}]•$T_{1/2}$: halveringstijd [s] = $\ln 2 / \lambda$•$N(t) = N(0) \cdot \exp(-\lambda t)$•$A(t) = A(0) \cdot \exp(-\lambda t)$
1.5. Grootheden en eenheden	<ul style="list-style-type: none">•becquerel [$Bq = s^{-1}$]; curie [Ci]•specifieke activiteit [Bq/g]•energie-eenheden: [J, eV]1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ J
1.6. Wijzen van verval	<ul style="list-style-type: none">•soorten verval= n-overschot: β^-= n-tekort: β^+ of EC= α= γ ; IC= splijting•schema's•moeder-dochter relaties; evenwicht

Ioniserende straling

Straling die ionisaties kan veroorzaken in het bestraalde medium

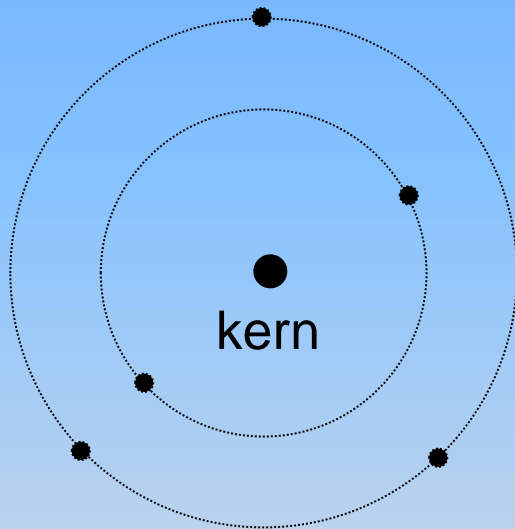
Deeltjesstraling

- Geladen deeltjes (elektronen e^- , β^- , positronen e^+ , β^+ , protonen p , alpha-deeltjes α , etc)
- Ongeladen deeltjes (neutronen etc)

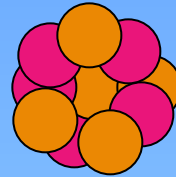
Elektromagnetische (EM) straling

- fotonen uit kern: γ -straling
- fotonen uit elektronenschil: röntgenstraling

Het atoom






Electronen-
schillen

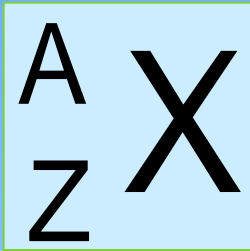


Kern :

protonen en neutronen

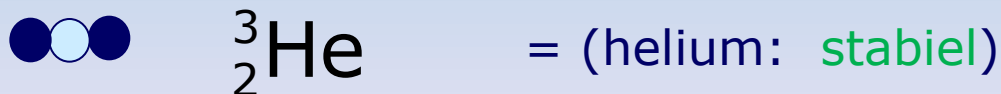
	deeltje	massa	lading
	proton	1 u	+1 e
	neutron	1 u	0
	electron	0.0005 u	-1 e
	positron	0.0005 u	+1 e

Het atoom



- Z: aantal protonen (lading) = Atoomnummer
- N: aantal neutronen
- A: Z+N = Massagetal

Voorbeelden:



Protonen stoten elkaar af;
Neutronen zorgen voor "lijm".

Het atoom

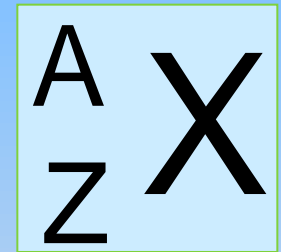
Karakteriseren kern:

Z: aantal protonen = Atoomnummer

N: aantal neutronen

A: Z+N = Massagetal

Nuclide van element X met atoomnummer Z en massagetal A:



bijvoorbeeld: ${}^4_2\text{He}$ ${}^{16}_8\text{O}$ ${}^{12}_6\text{C}$ ${}^{14}_6\text{C}$

Z: bepaalt soort atoom en chemische activiteit

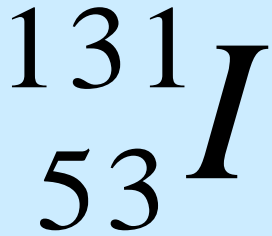
Verschillende nucliden met zelfde Z en andere A heten **isotopen**

Een neutraal atoom bevat ook Z electronen (in de schillen)

Een atoom kan door ionisatie electronen uit de schillen kwijtraken.

Het vermelden van Z is eigenlijk overbodig.

Jodium



- 53 protonen in kern
- 131 = massa kern
- 78 neutronen in kern (=131-53)

Jodium = element nr 53 in periodiek systeem

Jodium heeft 30 isotopen:

Belangrijkste: ($T_{1/2}$ = halveringstijd)

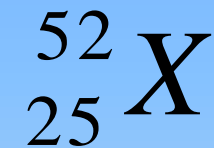
- ${}^{123}\text{I}$: $T_{1/2}$ = 13.2 uur; gamma-emitter (→ diagnose)
- ${}^{125}\text{I}$: $T_{1/2}$ = 59.4 dagen; positron-emitter
- ${}^{127}\text{I}$: stabiel.
- ${}^{129}\text{I}$: $T_{1/2}$ = 16 miljoen jaar; electron+gamma -emitter
- ${}^{131}\text{I}$: $T_{1/2}$ = 8.0 dagen; electron+gamma -emitter

De isotopen verschillen in aantal neutronen in kern

Atoombouw

Vraag 1.

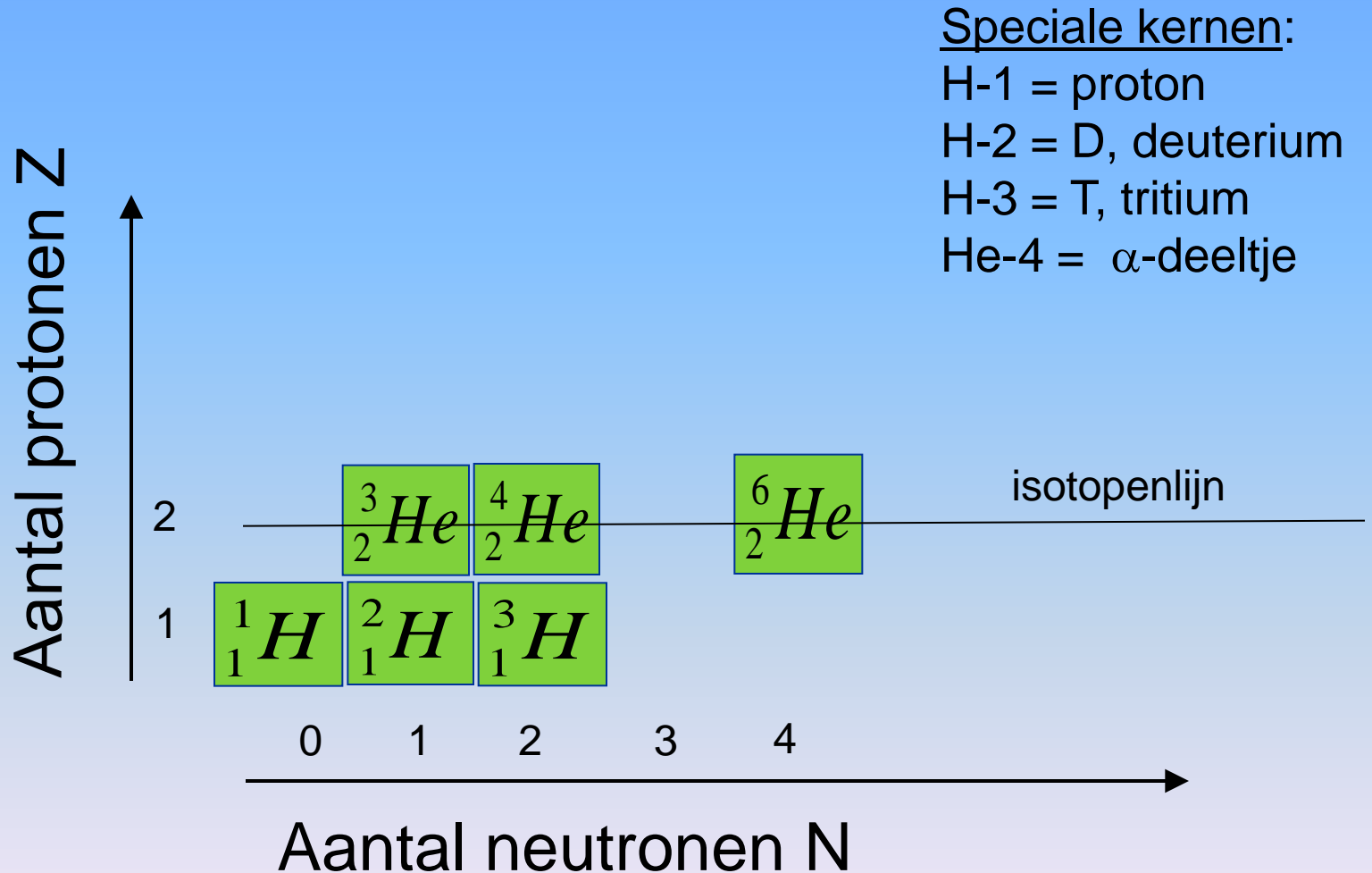
Het aantal electronen rond een atoomkern van isotoop bedraagt:



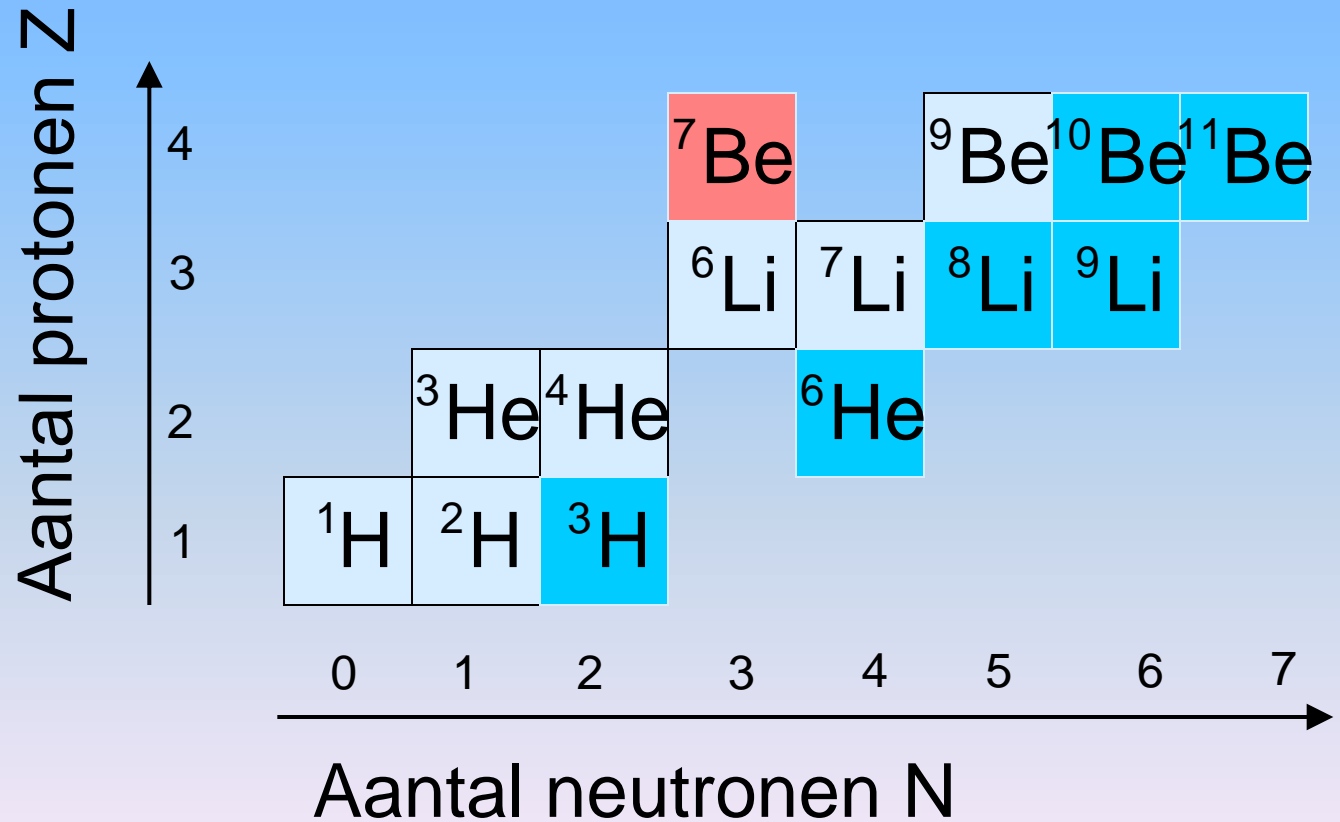
- a) 27 (=52-25)
- b) hoogstens 27
- c) 25
- d) hoogstens 25

NB. Antwoorden MC-vragen achterin.

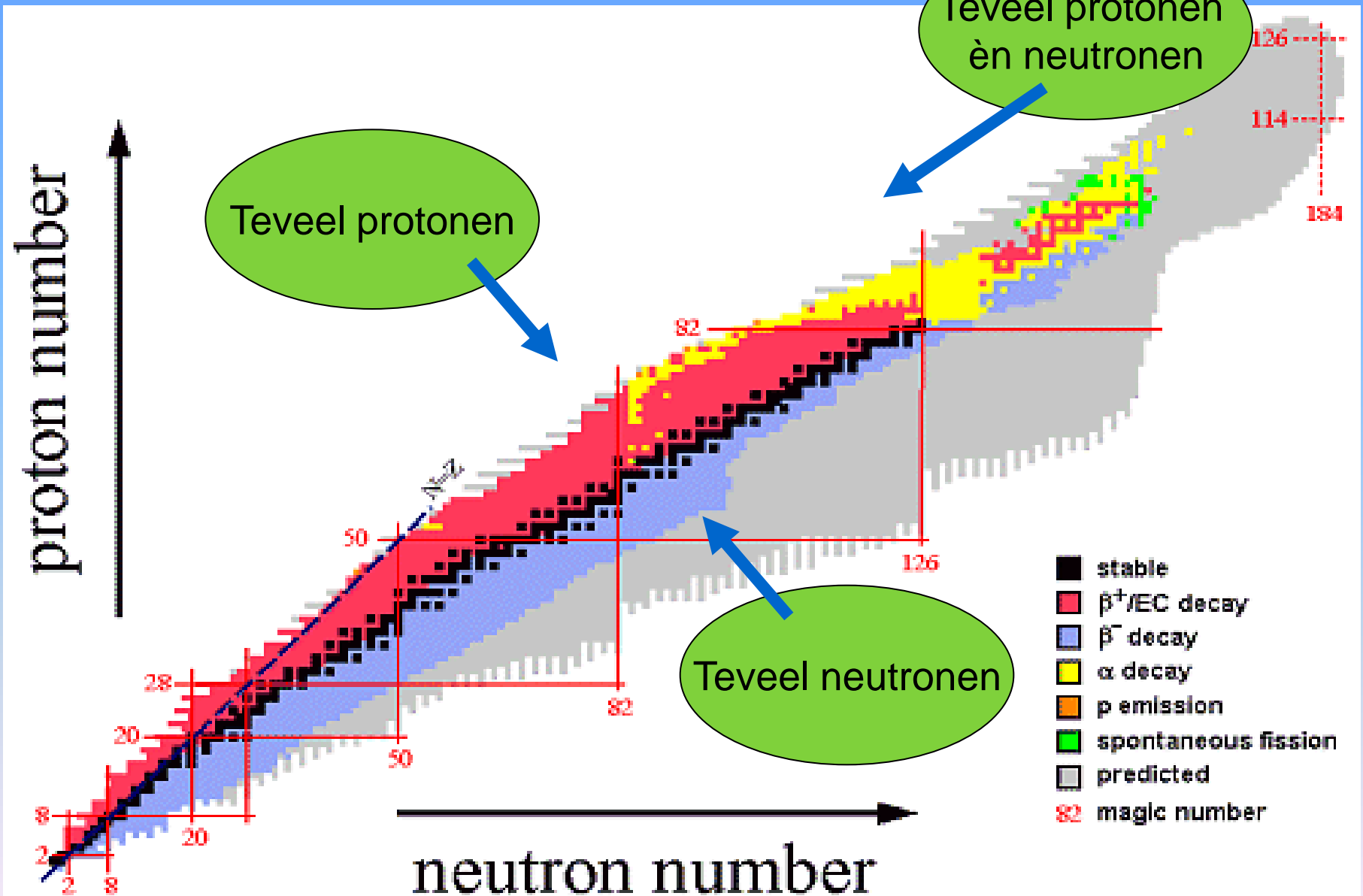
Nuclidenkaart



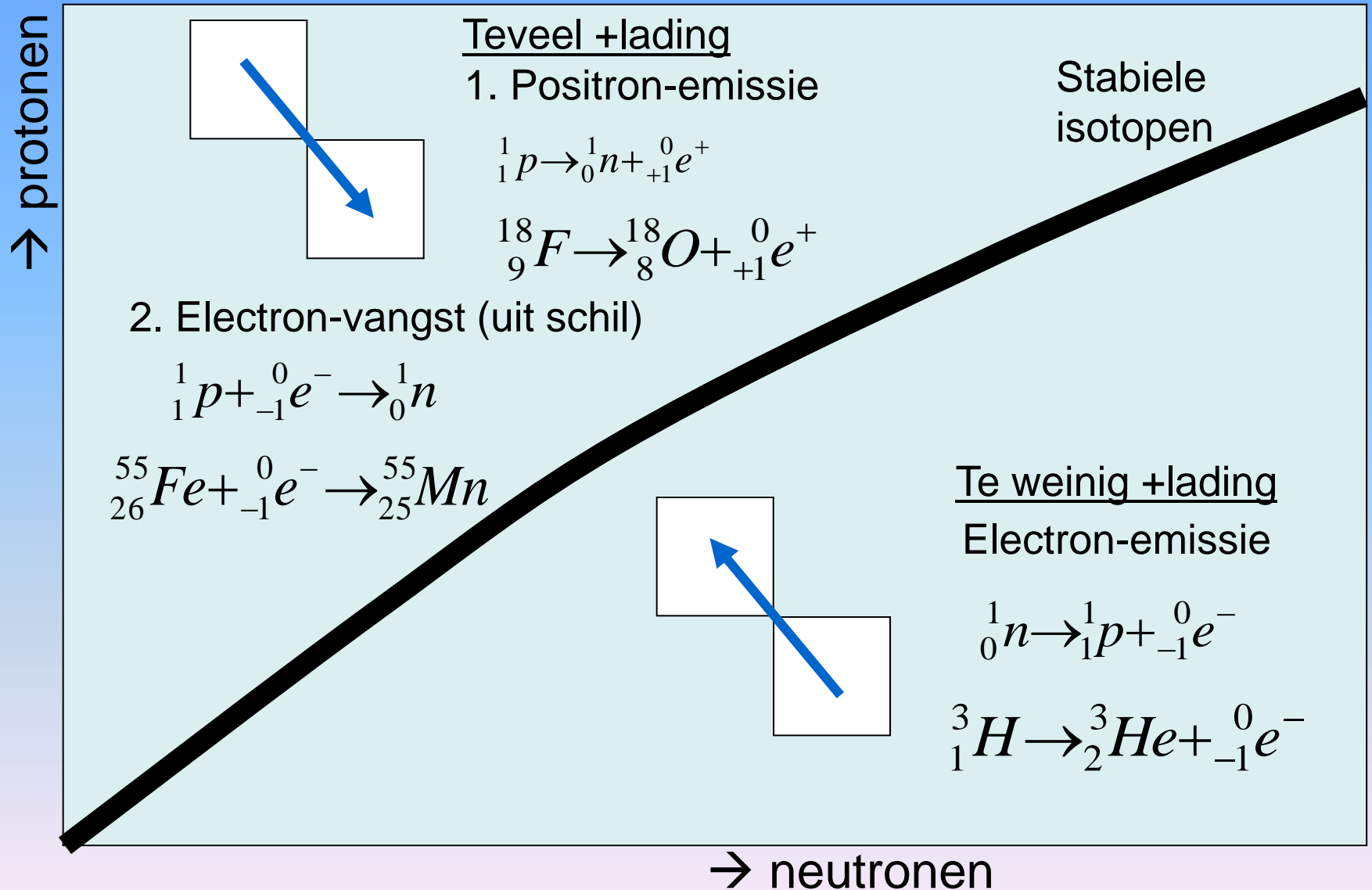
Nuclidenkaart



Nuclidenkaart



Nuclidenkaart



β^- -verval

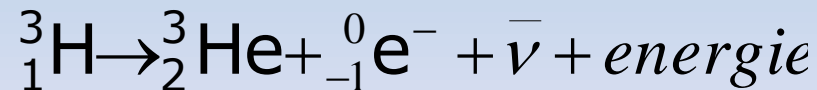
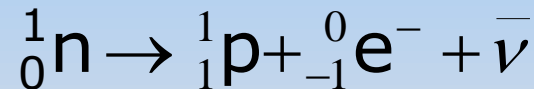
	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$
${}^1\text{H}$	${}^2\text{H}$	${}^3\text{H}$

${}^3\text{H}$ heeft een neutron teveel om stabiel te zijn
neutronenoverschot

Bij kernen met neutronenoverschot kan β^- -verval optreden:
 Er wordt een electron uitgezonden: dit elektron wordt β^- -deeltje genoemd

${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$
${}^2\text{H}$	${}^3\text{H}$ 12.3 y β^- 0.018 no γ

In de kern verandert één neutron in een proton plus een elektron (plus een antineutrino)

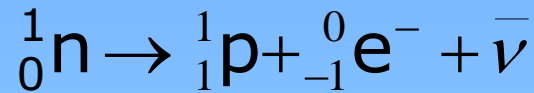


De vrijkomende energie wordt verdeeld over e^- en neutrino (levert zgn. β^- -spectrum)

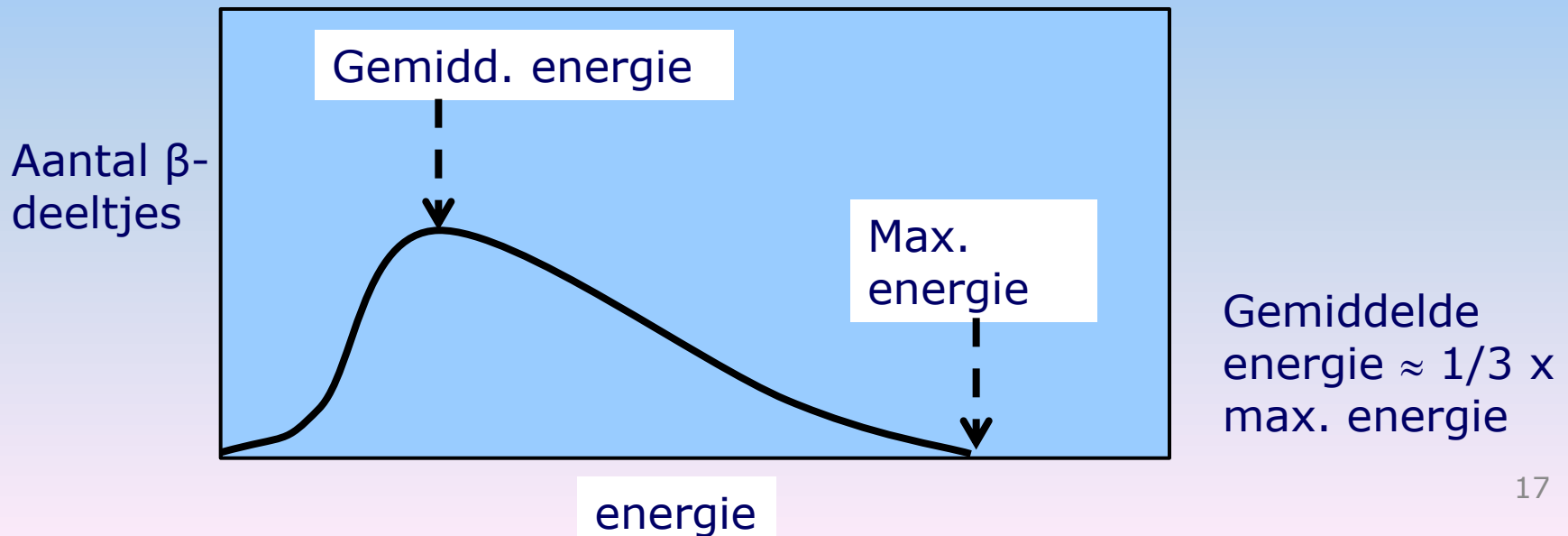
β^- -verval

${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$
${}^2\text{H}$	${}^3\text{H}$ 12.3 y β^- 0.018 no γ

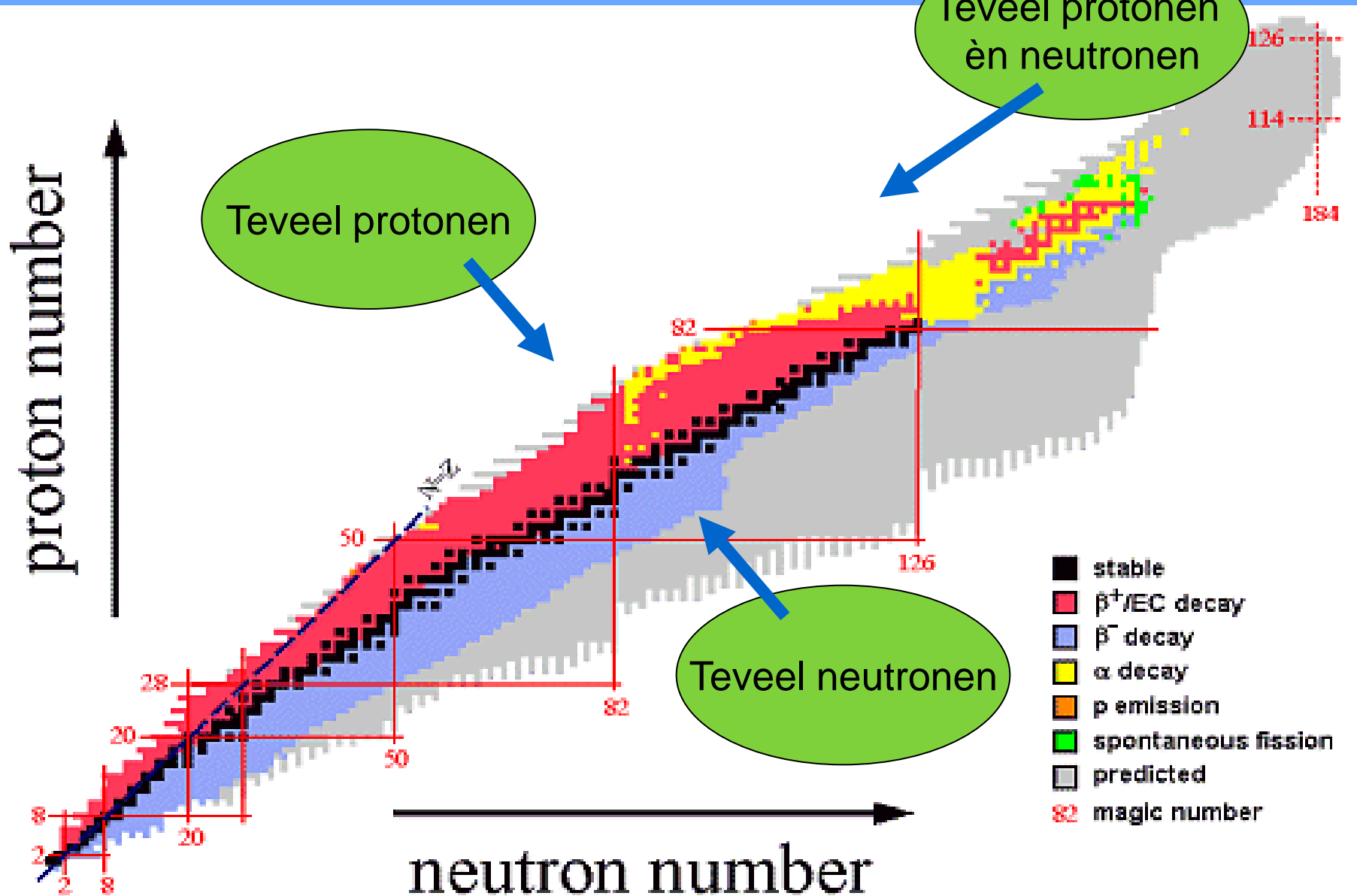
In de kern verandert één neutron in een proton plus een elektron (plus een antineutrino)



De vrijkomende energie wordt verdeeld over e^- en neutrino (levert zgn. **β -spectrum**)



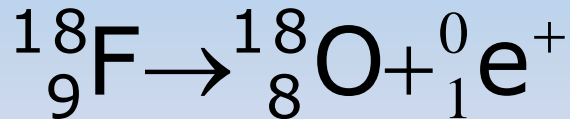
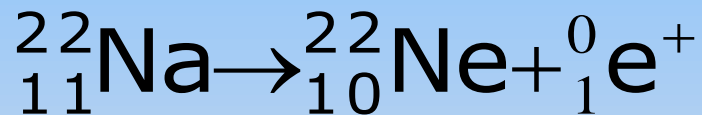
Nuclidenkaart



β^+ -verval

${}^1_1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_1\text{e}^+ + \nu$ treedt op bij neutronentekort

bijvoorbeeld:



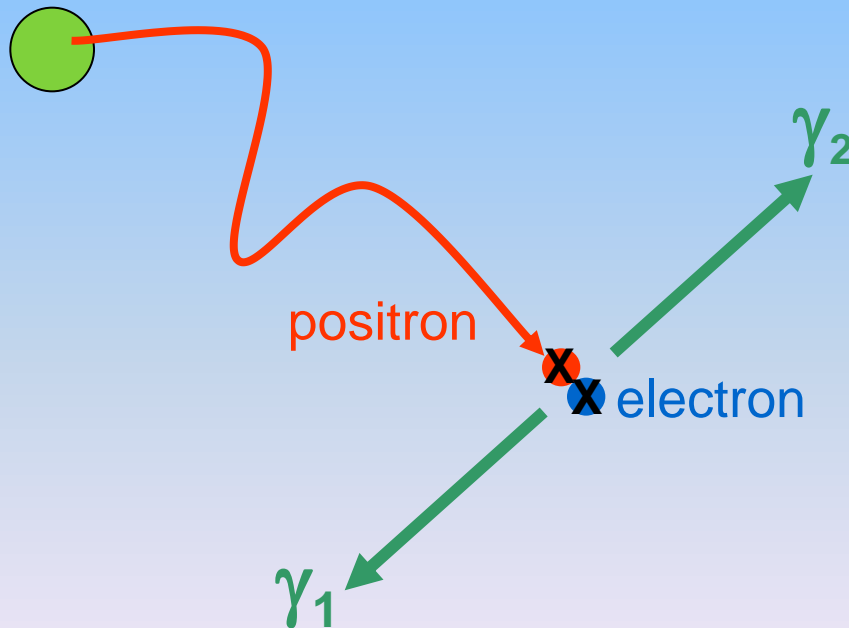
Toepassing: PET-scanners

${}^{22}\text{Na}$ 2.6 y β^+ 1.8 no γ	${}^{23}\text{Ne}$
${}^{21}\text{Ne}$	${}^{22}\text{Ne}$

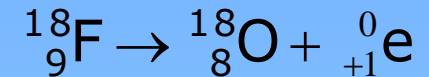
Positron Emission Tomography.

β^+ - verval: PET - scanner

Suikerhoudende verbinding met fluor-marker zoekt tumor.



1. Vervalproces:



2. Positron vindt electron.

3. Annihilatie-reactie volgens $E = mc^2$.

4. Energie wordt uitgestraald als 2 gamma-fotonen van 511 keV, tegelijkertijd, en in precies tegenovergestelde richting.

5. Detectoren in "coïncidentie-schakeling".

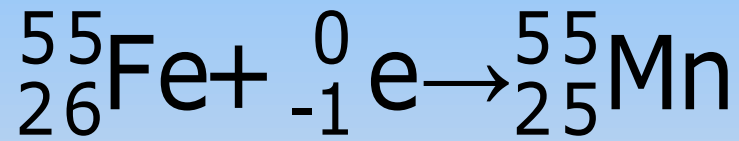
6. 2 paar detectoren (verschillende oriëntaties) nodig voor plaatsbepaling.

Electronvangst

Electronvangst: Alternatief voor β^+ -verval:



bijvoorbeeld:

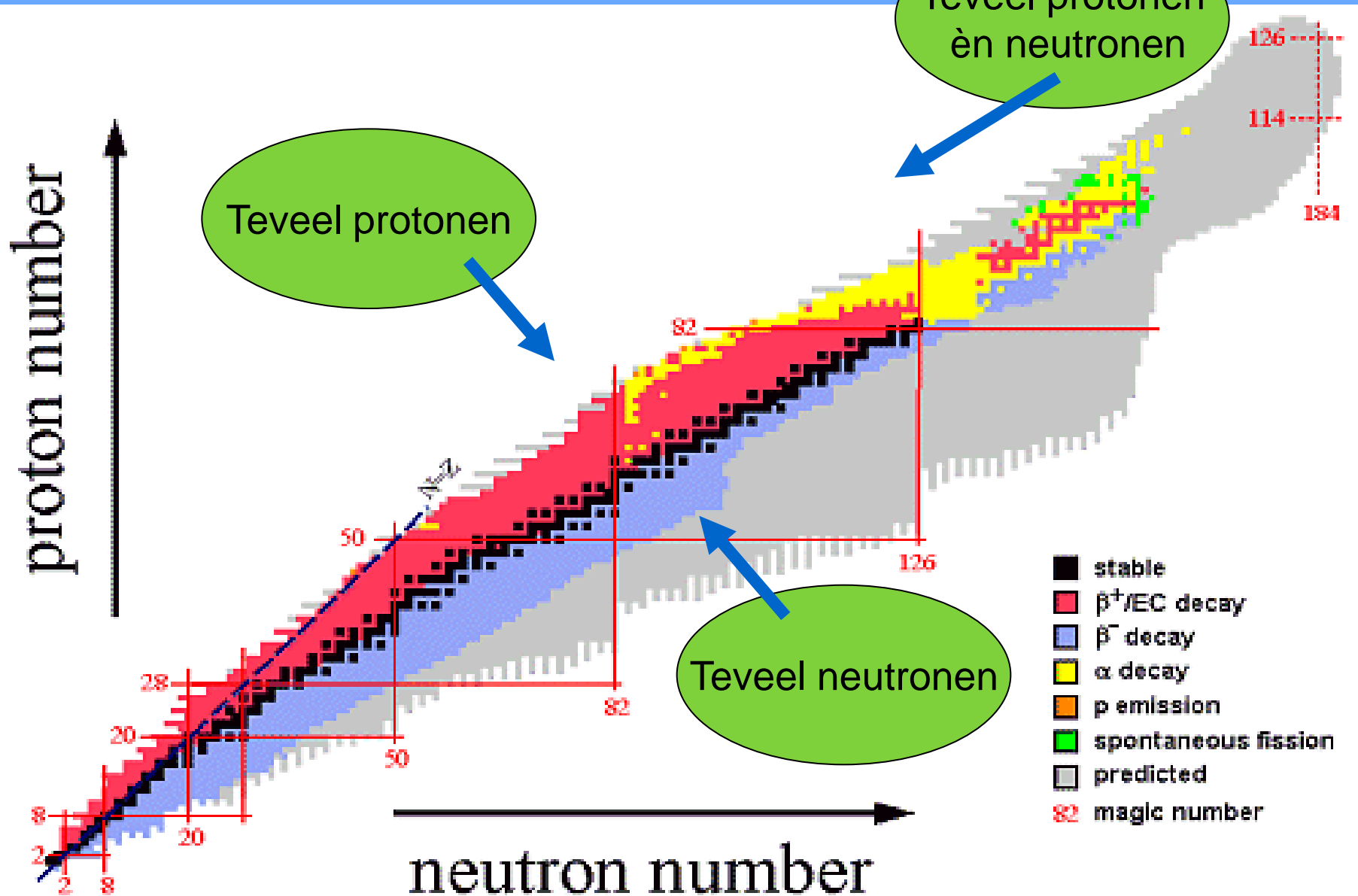


${}_{26}^{55}\text{Fe}$ 2.6 y ε no γ	${}_{26}^{56}\text{Fe}$
${}_{25}^{54}\text{Mn}$	${}_{25}^{55}\text{Mn}$

Gevolg: “gat” in schil \rightarrow een electron te weinig; \rightarrow

Gat wordt opgevuld uit hogere schillen \rightarrow **Rö-straling**

Nuclidenkaart



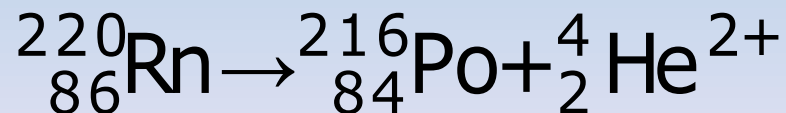
α -verval

Kern stoot een heliumkern (α -deeltje) uit
(α -deeltje = 2 protonen + 2 neutronen)

Gevolg:

- massa: - 4 u
- lading: - 2 e

bijvoorbeeld:



${}^{218}\text{Rn}$	${}^{219}\text{Rn}$	${}^{220}\text{Rn}$
${}^{217}\text{At}$	${}^{218}\text{At}$	${}^{219}\text{At}$
${}^{216}\text{Po}$	${}^{217}\text{Po}$	${}^{218}\text{Po}$

Radioactief verval

- Vraag 2:
- Er bestaan drie isotopen van hetzelfde element X, namelijk ^{86}X , ^{87}X en ^{88}X .
- De twee uiterste, namelijk ^{86}X en ^{88}X , zijn radioactief, en ^{87}X is stabiel.
- Wat geldt er:
 - a. ^{86}X heeft meer protonen dan ^{88}X
 - b. ^{86}X heeft minder protonen dan ^{88}X
 - c. ^{86}X heeft meer neutronen dan ^{88}X
 - d. ^{86}X heeft minder neutronen dan ^{88}X
- Vraag 3 :
- Zie voorgaande vraag. Welke van deze twee, ^{86}X of ^{88}X , heeft een grotere kans om een β^+ -straler te zijn?
 - a. ^{86}X
 - b. ^{88}X
 - c. Hetzelfde want ze hebben evenveel protonen (allebei X)
 - d. Het zijn beide β^- -stralers.

Isomeer verval: γ -activiteit

Soms is verval een meertraps-proces, of blijft de dochter-kern eerst even in een aangeslagen toestand (teveel energie, instabiel):

Isomere of metastabiele toestand

Voorbeeld: $^{89}\text{Sr} \rightarrow ^{89\text{m}}\text{Y} + \beta^-$ ($T_{1/2} = 51$ dagen)

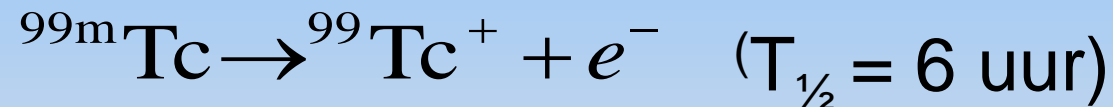
Metastabiele kern vervalt door uitzenden foton:
isomeer verval (γ -verval)

$^{89\text{m}}\text{Y} \rightarrow ^{89}\text{Y} + \gamma$ ($T_{1/2} = 16$ sec)

Interne conversie

Alternatief voor isomeer verval (γ -verval):

Uitstoten elektron uit schil: interne conversie (IC)



Uitgestoten elektron (conversie-elektron) is mono-energetisch

Radioactief verval: oefenopgave

Bedek de 4 rechter kolommen en test uzelf

Moeder	Dochter	Lading	Massa	Soort verval	Reactievgl.
${}_{15}^{32}P$	${}_{16}^{32}S$	+1	+0	β^-	${}_{15}^{32}P \rightarrow {}_{16}^{32}S + {}_{-1}^0e^-$
${}_{25}^{54}Mn$	${}_{24}^{54}Cr$	-1	+0	β^+ of EC	${}_{25}^{54}Mn \rightarrow {}_{24}^{54}Cr + {}_{+1}^0e^+$ ${}_{25}^{54}Mn + {}_{-1}^0e^- \rightarrow {}_{24}^{54}Cr$
${}_{84}^{210}Po$	${}_{82}^{206}Pb$	-2	-4	α	${}_{84}^{210}Po \rightarrow {}_{82}^{206}Pb + {}_2^4He$
${}_{29}^{64}Cu$	${}_{28}^{64}Ni$	-1	+0	β^+ of EC	${}_{29}^{64}Cu \rightarrow {}_{28}^{64}S + {}_{+1}^0e^+$ ${}_{29}^{64}Cu + {}_{-1}^0e^- \rightarrow {}_{28}^{64}S$
${}_{49}^{114m}In$	${}_{49}^{114}In$	0	+0	γ	${}_{49}^{114m}In \rightarrow {}_{49}^{114}In + {}_0^0\gamma$
${}_{21}^{47}Sc$	${}_{22}^{47}Ti$	+1	+0	β^-	${}_{21}^{47}Sc \rightarrow {}_{22}^{47}Ti + {}_{-1}^0e^-$

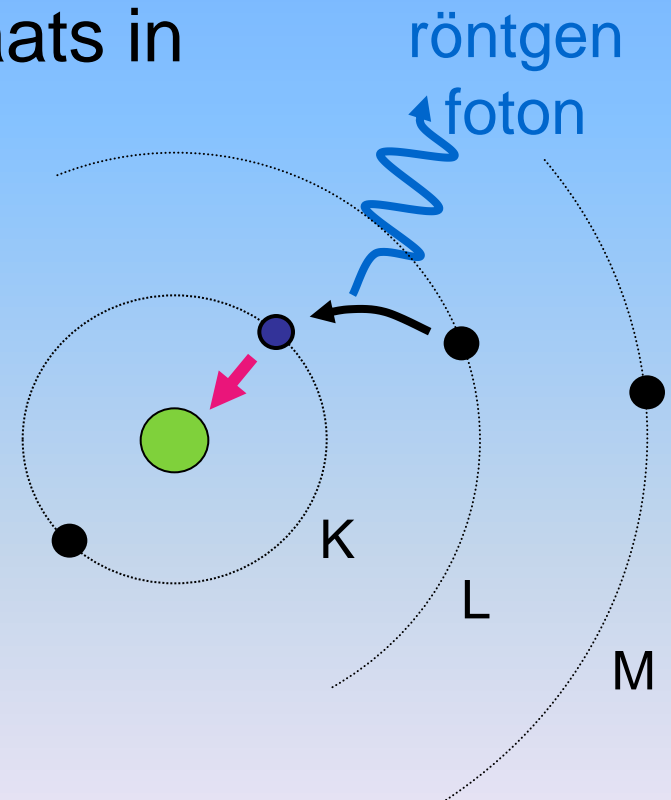
Vervolgprocessen 1: Röntgen-fotonen

Na bv. elektronvangst : lege plaats in schil

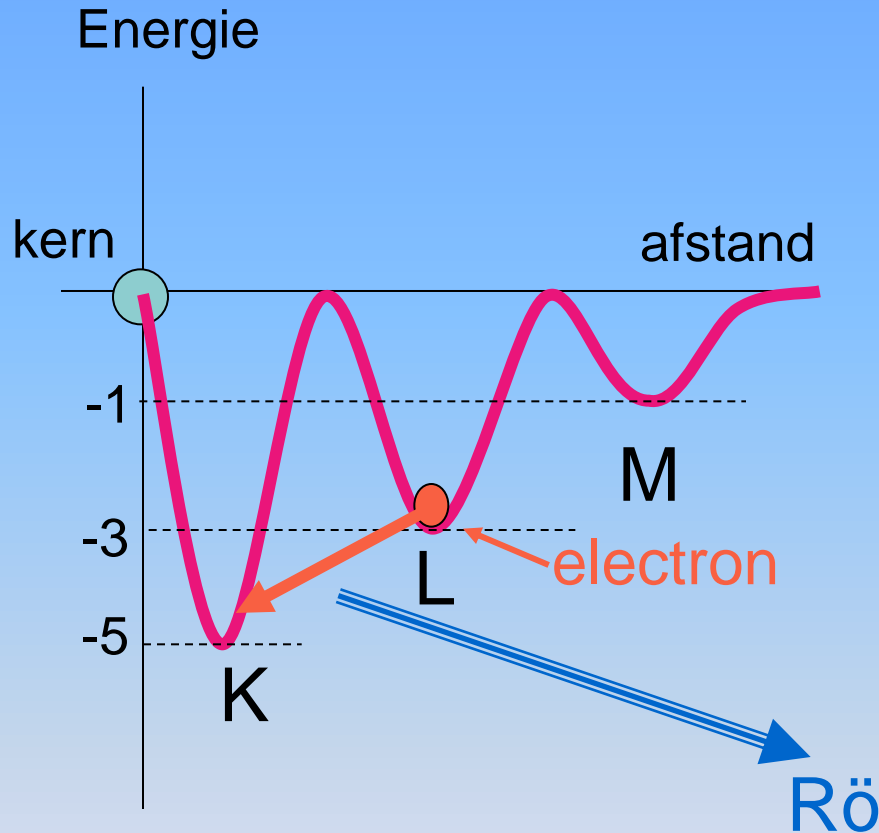
Elektron uit hogere schil vult plaats in

Afstoten vrijkomende energie:
uitzenden röntgenfoton

Karakteristieke pieken in
röntgenspectrum



Rö-straling uit electron-schilovergangen



Electronen “bewegen” in banen rondom de kernen.

Er zijn slechts bepaalde banen mogelijk: K, L, M, N,

Een electron in K is sterker gebonden dan een in L, M,

Dus om een electron van baan K naar baan L te krijgen kost **energie**.

Electron van baan L naar K:
levert **energie** op
- Energie electron: $-3 \rightarrow -5$ eV

Overschot wordt uitgezonden als Rö van 2 eV

Vervolgprocessen 2: Auger-electronen

Na elektronvangst of Interne Conversie:

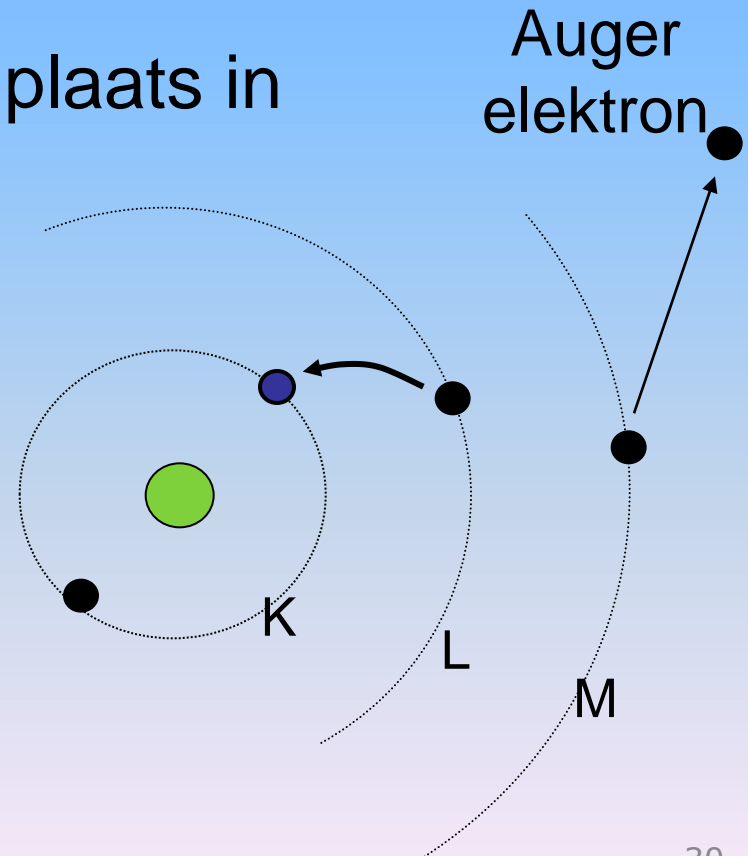
lege plaats in schil K

Elektron uit hogere schil vult plaats in

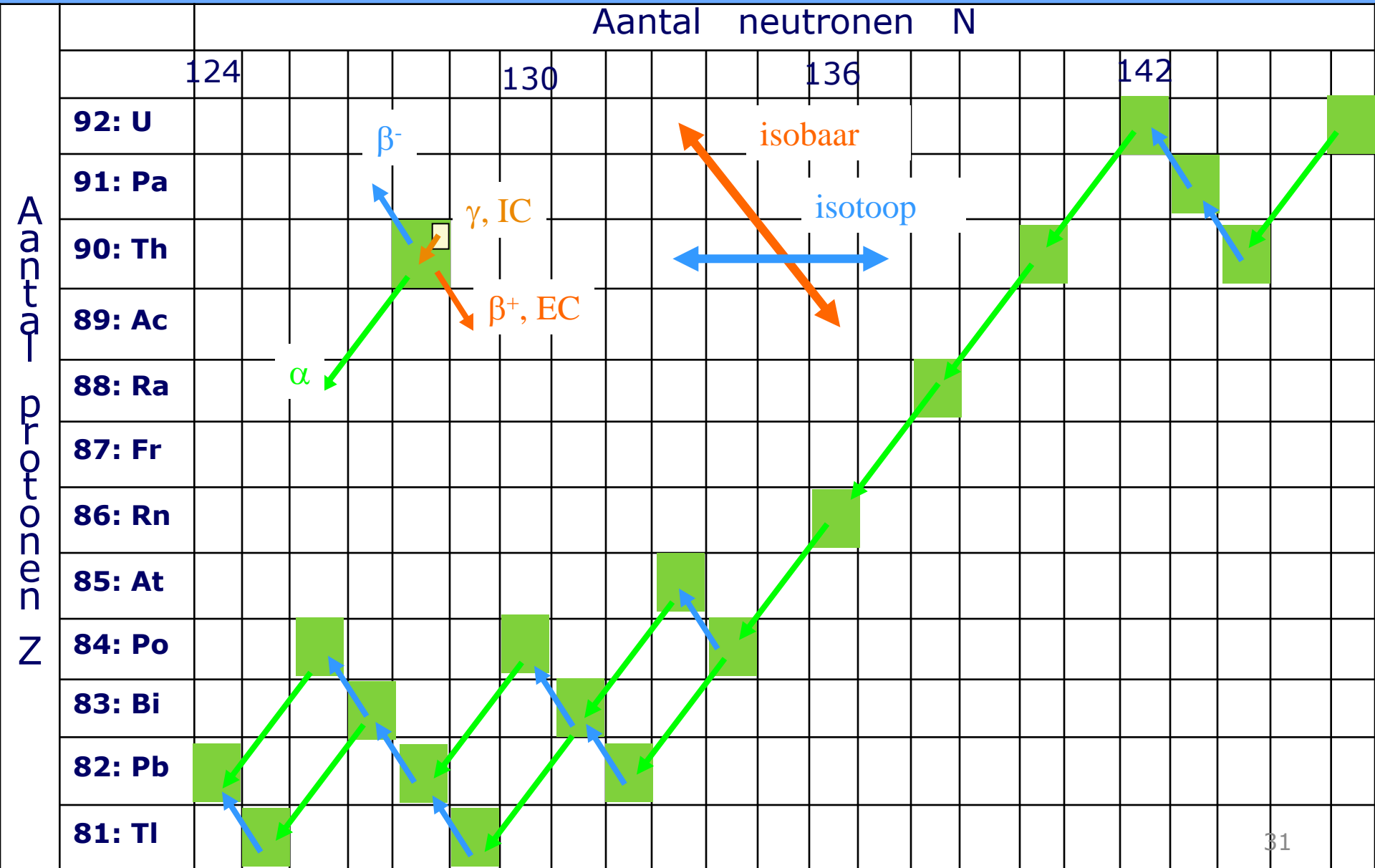
Afstoten vrijkomende energie door:

uitstoten Auger-elektron

NB. Hier zijn dus
3 electronen bij
betrokken!



Uranium 238 - vervalreeks



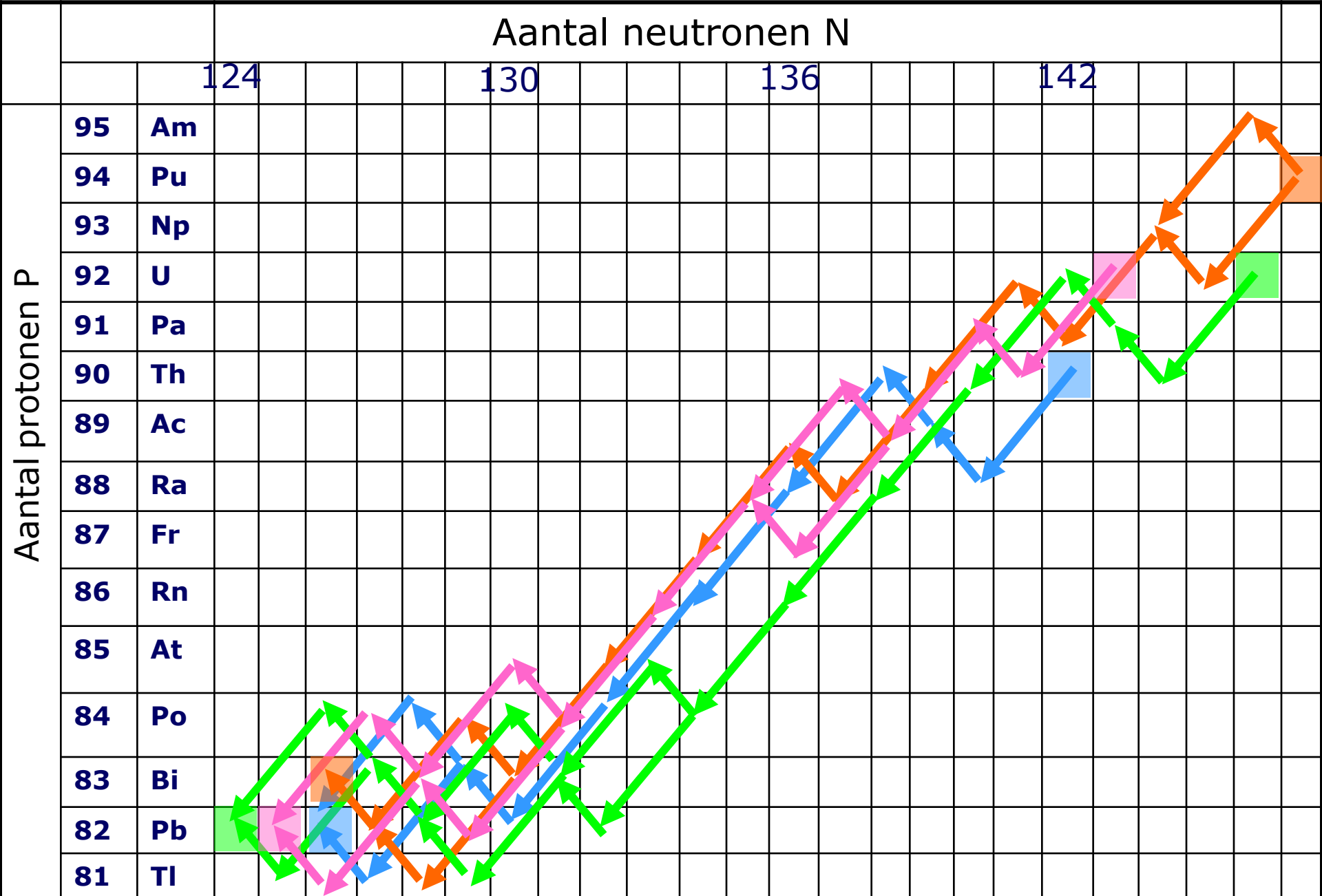
vervalreeksen

Th: $4n$

Np: $4n+1$

U: $4n+2$

Ac: $4n+3$



Radioactiviteit: Activiteit

Als verhouding aantal protonen/neutronen "ongunstig", dan nuclide **instabiel**

Instabiele kernen vervallen onder uitzending van een radioactief deeltje

Activiteit A : aantal kernen dat per seconde vervalt

Eenheid A : becquerel (Bq)

$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ (één desintegratie per seconde)

Radioactiviteit: Activiteit

Activiteit A : aantal kernen dat per seconde vervalst

Eenheid van A : **becquerel** (Bq)

$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ (één desintegratie per seconde)

Oude eenheid: $1 \text{ Ci (curie)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$

Vraag 4: $10 \text{ Bq} =$

- a. 600 desintegraties/minuut
- b. 6 desintegratie/minuut
- c. 10 desintegraties/minuut
- d. 100 desintegraties/minuut

Activiteit

Tussendoortje: Machten:

- $10^3 = 1000$
- $10^2 = 100$
- $10^1 = 10$
- $10^0 = 1$
- $10^{-1} = 1/10 = 0.1$
- $10^{-2} = 1/100 = 0.01$
- $10^{-3} = 1/1000 = 0.001$
- $2^3 = 8$
- $2^2 = 4$
- $2^1 = 2$
- $2^0 = 1$
- $2^{-1} = 1/2$
- $2^{-2} = 1/4$
- $2^{-3} = 1/8$

$$10^2 \cdot 10^3 = 10^5$$

$$2^3 / 2^2 = 2^1 = 2$$

$$\text{Regel: } 10^a \cdot 10^b = 10^{a+b}$$

$$2^a / 2^b = 2^{a-b}$$

Activiteit

- 1 kBq = 1000 Bq
- 1 MBq = 1.000.000 Bq = 1000 kBq
- 1 GBq = 1.000.000.000 Bq = 1000 MBq

- 1 kBq = 10^3 Bq
- 1 MBq = 10^6 Bq = 1000 kBq = 1000×10^3 Bq
- 1 GBq = 10^9 Bq = 1000 MBq = 1000×10^6 Bq

- 1 mBq = 0.001 Bq
- 1 μ Bq = 0.001 mBq = 0.000.001 Bq

- 1 mBq = 10^{-3} Bq
- 1 μ Bq = 10^{-3} mBq = 10^{-6} Bq

Activiteit

Vraag: kunnen we berekenen hoe de activiteit van een preparaat verloopt als functie van de tijd?

Activiteit A van een radioactief preparaat is:

- evenredig met hoeveelheid moederkernen N
- afhankelijk van de soort kern (snel vs. langzaam)

Voorbeeld: stel $N = 1000$, en: verval = $1/10^e$ deel per sec.

Vraag: hoeveel % vervalt elke seconde? **10 %**

Vraag: zijn na 10 s alle kernen vervallen?

Antwoord: telkens vervalt 10% van de **dan aanwezige** kernen.

Dus over: na sec. 1: 900, na sec. 2: 810, na sec. 3: 729

Radioactiviteit: Activiteit

Voorbeeld: stel $N=1000$, $\lambda = 0.1$ per sec

Vraag: hoeveel % vervalt elke seconde?

10 %

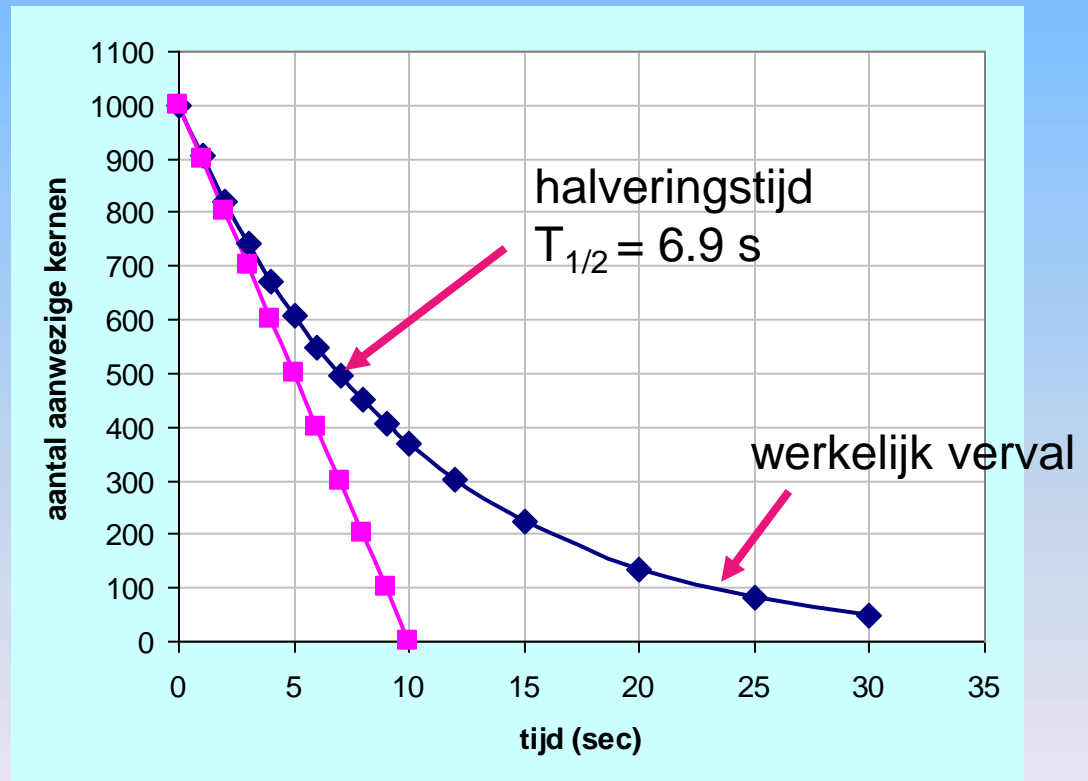
Vraag: zijn na 10 s alle kernen vervallen?

Antwoord:

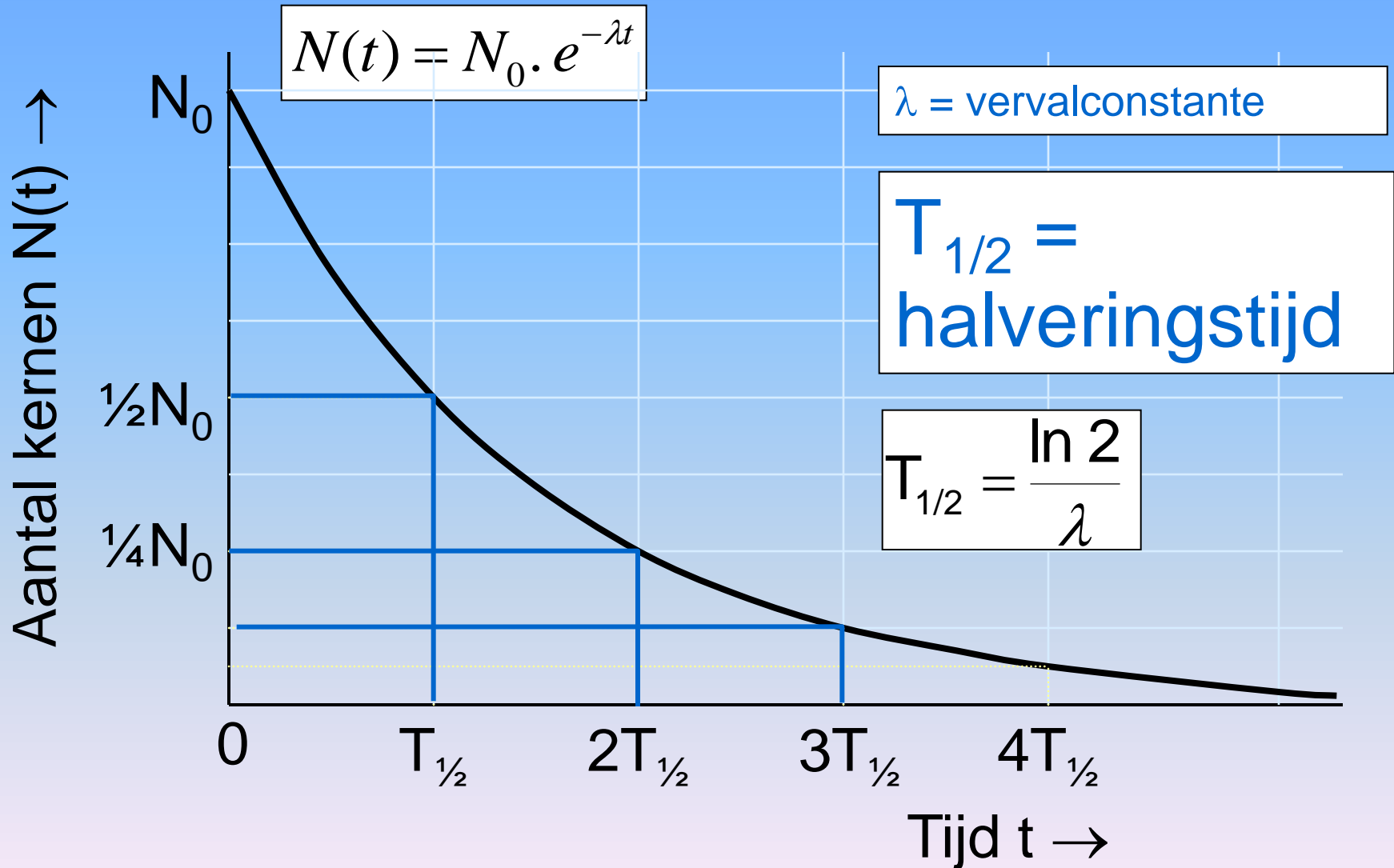
telkens vervalt
10% van de **dan**
aanwezige
kernen.

Dus over:

na sec. 1: 900,
na sec. 2: 810,
na sec. 3: 729



Vervalwet



Vervalwet

$\lambda = \text{vervalconstante} = 0.1$

$T_{1/2} = \text{halveringstijd} = 6.9 \text{ sec}$

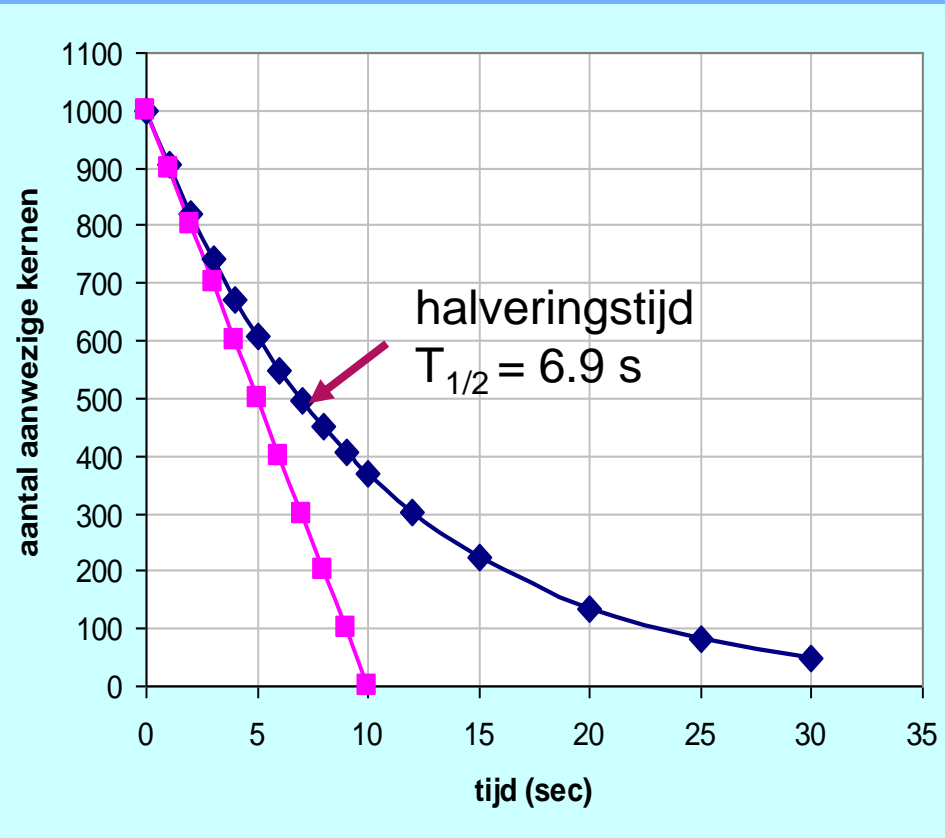
Stel verval gaat 2x zo langzaam: $\lambda \rightarrow 0.05$

Dan $T_{1/2} \rightarrow 13.8 \text{ sec}$

Dus: als λ : 2x zo klein \rightarrow
 $T_{1/2}$: 2 x zo groot

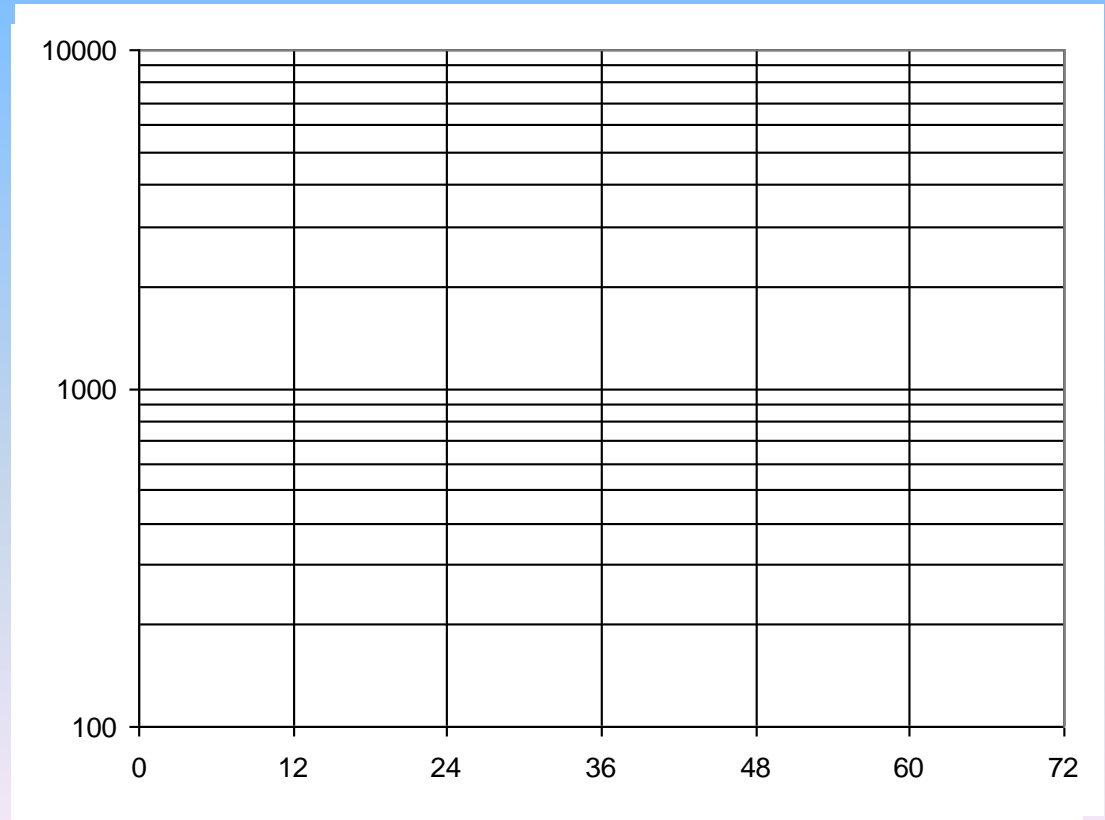
$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad ; \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$\ln 2 = 0.693$$



Radioactiviteit: Activiteit

- Vraag 5:
- De halveringstijd van een nuclide wordt bepaald met vijf metingen, 12 uur na elkaar. De metingen leveren netto op: (cpm = counts per minute)
- 1. 6000 cpm
- 2. 2600 cpm
- 3. 1130 cpm
- 4. 500 cpm
- 5. 210 cpm.
- De halveringstijd
- bedraagt ongeveer:
 - a. 10 uur
 - b. 24 uur
 - c. 5 uur
 - d. 100 uur



Verval

•Voorbeeld: ^{131}I : halveringstijd $T_{1/2} = 8$ dagen

•Na 8 dagen over: $\frac{1}{2}$

•Na $2 \times 8 = 16$ dagen over: $\frac{1}{4} = (\frac{1}{2})^2 = 0.25$

•Na $3 \times 8 = 24$ dagen over: $\frac{1}{8} = (\frac{1}{2})^3 = 0.125$

•.....

•Na $10 \times 8 = 80$ dagen over: $\frac{1}{1024} = (\frac{1}{2})^{10} \approx 0.001$

•Na 6 dagen over: (dus na $\frac{3}{4} \times T_{1/2}$): $(\frac{1}{2})^{6/8} = (\frac{1}{2})^{3/4} = 0.59$

•Na 12 dagen over: ($= 1.5 \times T_{1/2}$): $(\frac{1}{2})^{12/8} = (\frac{1}{2})^{1.5} = 0.35$

•Na t dagen over:

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

Jodium in het lichaam (niet-patiënt)

Effectieve halveringstijd in de schildklier:

- Fysisch: 8 dagen
- Fysiologisch: 80 dagen
- Effectief: ≈ 7 dagen (dan $\frac{1}{2}$ over)

Vraag 6:

Hoeveel % is over na 21 dagen?

- $3/7 = 43 \%$
- $1/8 = 12.5 \%$
- $1/21 = 5 \%$
- $1/3 = 33 \%$

Controle:

Na t dagen over:

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

Na 21 dagen: $(\frac{1}{2})^{21/7} = (\frac{1}{2})^3 = 1/8$

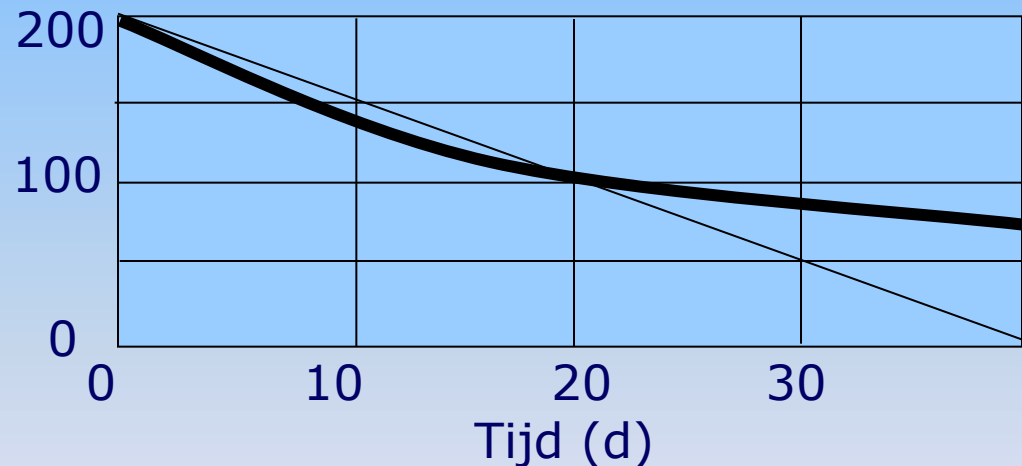
Na 1 dag: $(\frac{1}{2})^{1/7} = (\frac{1}{2})^{0.143} = 0.906 = 91 \%$

Aantal dagen	Over (%)
1	91
2	82
3	74
4	67
5	61
6	55
7	50
10	37
14	25

Radioactiviteit: Activiteit

- Vraag 7:
- Iemand wil een nuclide ($T_{1/2} = 20$ dagen) gebruiken. Na bestelling duurt het 5 dagen voor het materiaal arriveert. Na ontvangst van het materiaal moet hij echter nog 5 dagen wachten alvorens met experimenteren te kunnen beginnen.
- De benodigde activiteit is 100 MBq. Hoeveel activiteit moet hij bestellen om juist voldoende activiteit voor het experiment over te hebben?

- a. 200 MBq
- b. 141 MBq
- c. 70 MBq
- d. 400 MBq



Controle:

$$141 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = 141 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{10}{20}} = 141 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} = 141 \times 0.707 = 100$$

Radioactiviteit: Activiteit

- Vraag 8:
- De grote boosdoener na Chernobyl was ^{131}I ($T_{1/2} = 8 \text{ d}$, transport en neerslag via aerosolen en damp) dat preferentieel naar de schildklier migreerde (mede wegens een endemisch jodiumtekort). Vooral bij kinderen geboren vóór de ramp (in 1986) leverde dat problemen.
- Waarom was dat bij kinderen die erna geboren zijn, veel minder het geval? De grond was toch besmet?
 - a. Het jodium werd stevig gebonden aan mineralen in de grond.
 - b. De activiteit nam zeer snel af.
 - c. Er werden snel jodiumtabletten verstrekt.
 - d. Alle pasgeborenen werden grondig gecontroleerd en eventueel direct behandeld.

Radioactiviteit: Activiteit

Vraag 9:

In 10 g aluminium is door activering 1 MBq ontstaan van ^{24}Na ($T_{1/2} = 15$ h). Hoelang moet men wachten totdat de specifieke activiteit lager dan 100 Bq/g is geworden?

- a. 8.5 h
- b. 1 week
- c. 4 weken
- d. 3 maanden

**Specifieke activiteit =
Activiteit per gram
[Bq/g]**

Moeder-dochterrelaties

- Stel : verval: $A \rightarrow B$; $T_{1/2} = 24$ uur
- $B \rightarrow C$; $T_{1/2} = 1$ sec

- Stel: Activiteit van A = 100 Bq;
- Dan ook: activiteit van B = 100 Bq!
- (B vervalt “onmiddellijk” na A)

Algemeen:

Als $T_{1/2, \text{moeder}} \gg T_{1/2, \text{dochter}}$: $A_{\text{dochter}} = A_{\text{moeder}}$. (Evenwicht)

Gevolg: ^{238}U = begin U-reeks, $T_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ jaar.
Alle (klein...)dochters hebben $T_{1/2} \ll 4,5 \times 10^9$ jaar.
Dus alle nucliden in de reeks hebben dezelfde activiteit!!!

2

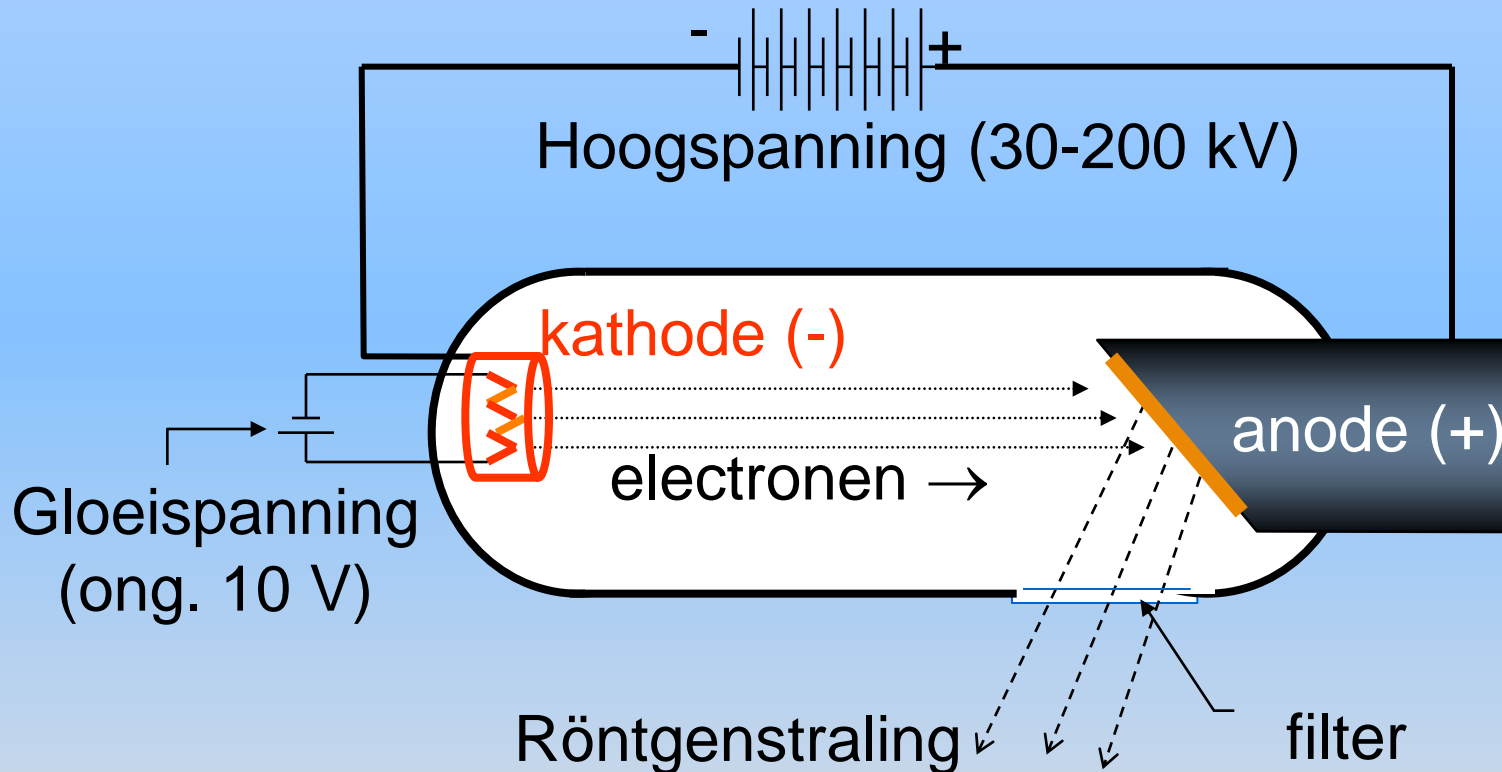
Radioactieve bronnen

Röntgen, neutronen

Hfst. 2: Bronnen: Röntgentoestellen en neutronen

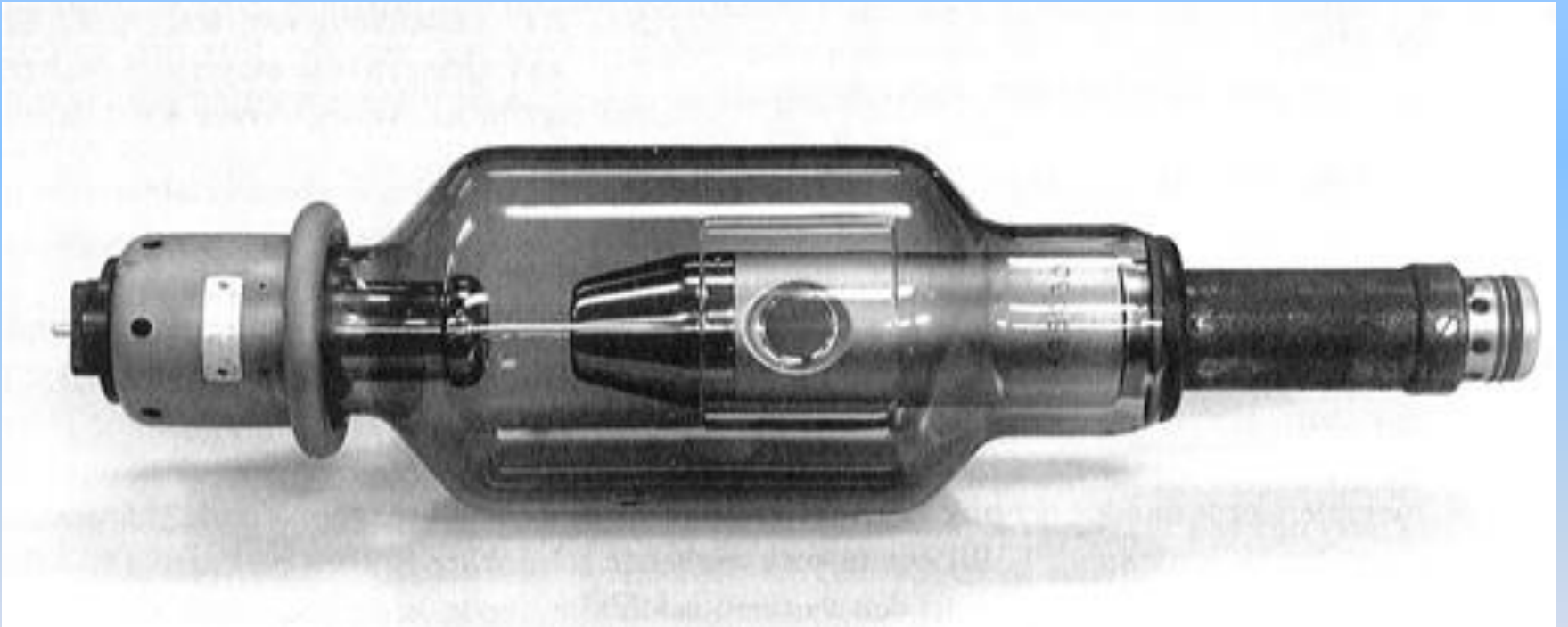
2.1 Inleiding	<ul style="list-style-type: none">•indeling•verspreidingsrisico
2.2 Ingekapselde bronnen	<ul style="list-style-type: none">•kwaliteitseisen•ISO-normen•inkapseling•toepassingen:<ul style="list-style-type: none">•radiografie / gammagrafie•röntgen-fluorescentie•rookmelders
2.3 Open bronnen	<ul style="list-style-type: none">•kans op verspreiding / eisen•toepassingen: nucleaire diagnostiek
2.4 Röntgenstraling	<ul style="list-style-type: none">•röntgenbuis / spectrum•toepassingen
2.5 Neutronen	<ul style="list-style-type: none">•voorkomen: $(\alpha, n), (\gamma, n)$•soorten: energieën•vangst•activering•veiligheidsmaatregelen.

Röntgenbuis



Electronen worden tussen kathode en anode versneld.
Bij 100 kV: Uiteindelijke electron-energie: $E = 100 \text{ keV}$
Röntgenstraling dan: 0 - 100 keV

Röntgenbuis



Remstraling

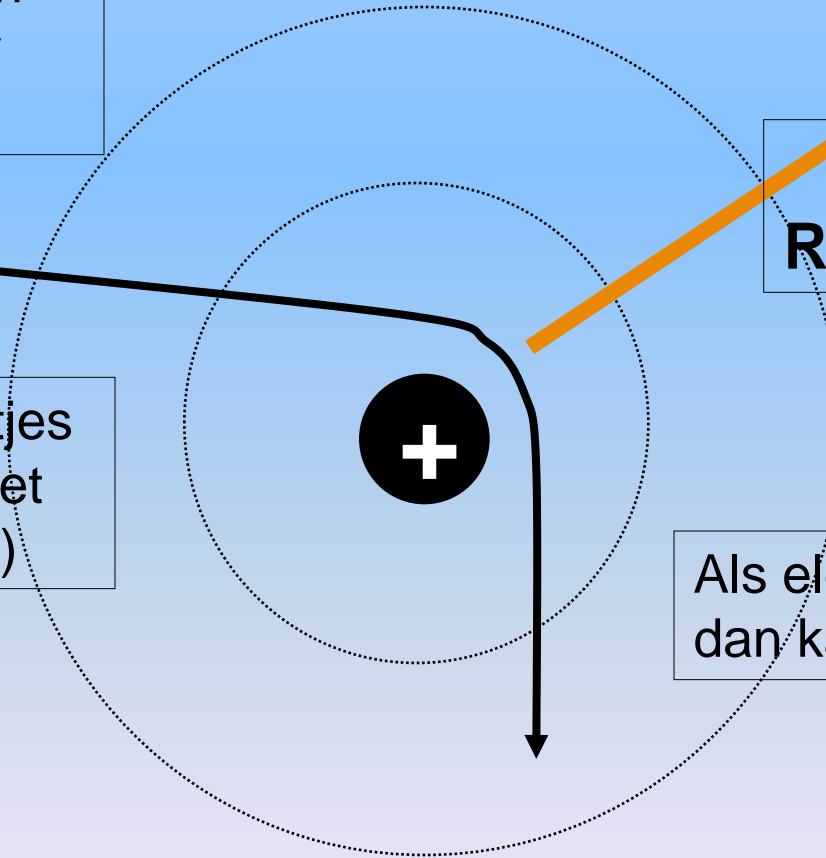
Electronen kunnen worden afgebogen en afgeremd door atoomkernen

e^-

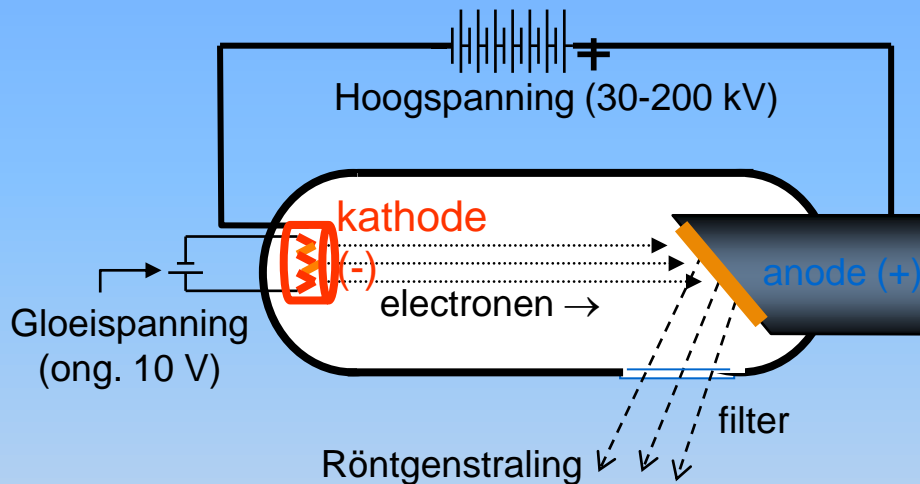
Bij afremmen deeltjes ontstaat straling (net als bij Noorderlicht)

**remstraling =
Röntgenstraling**

Als electron-energie 2x,
dan kans op dit proces: 2x.



Instellingen Röntgenbuis



- **Buisstroom (mA)**

- aantal elektronen
- van kathode naar anode

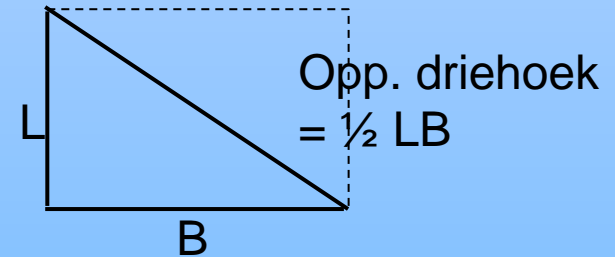
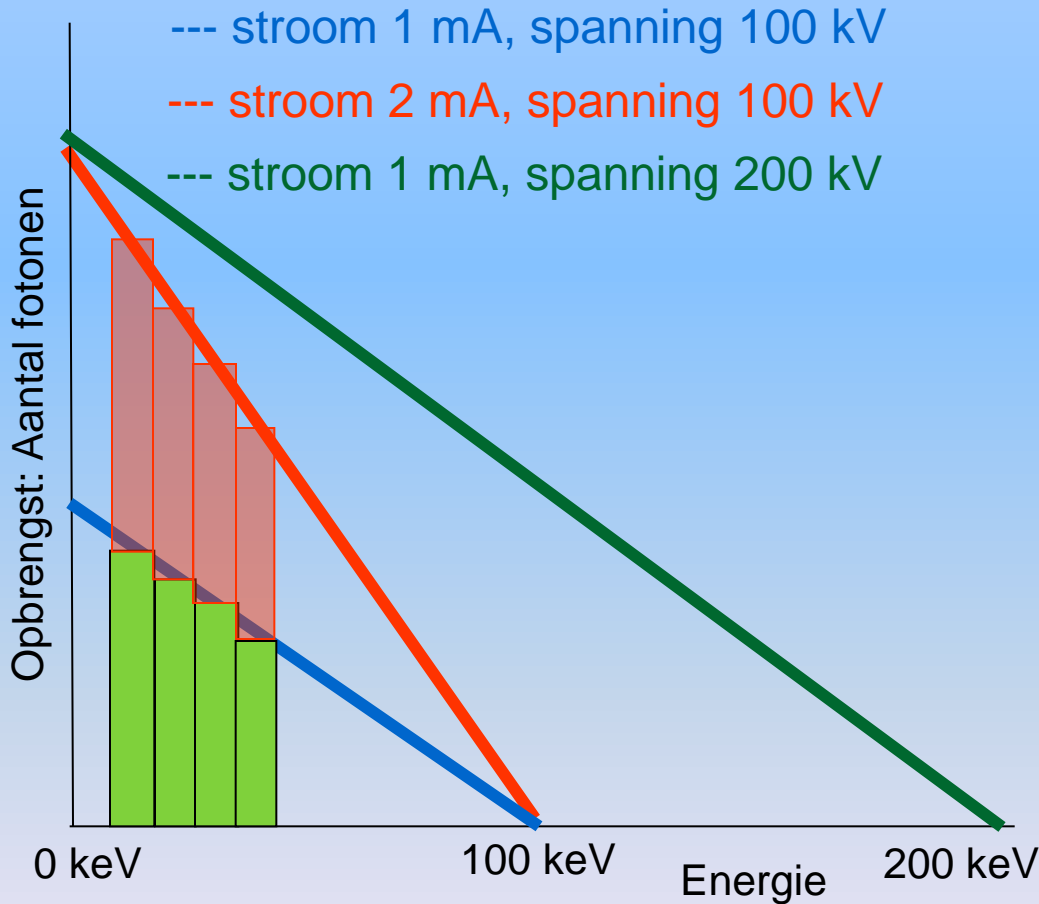
- **Buisspanning (KV)**

- spanning tussen kathode en anode

- **Filtering (mm Al)**

- materiaal in bundel

Röntgentoestel: opbrengst



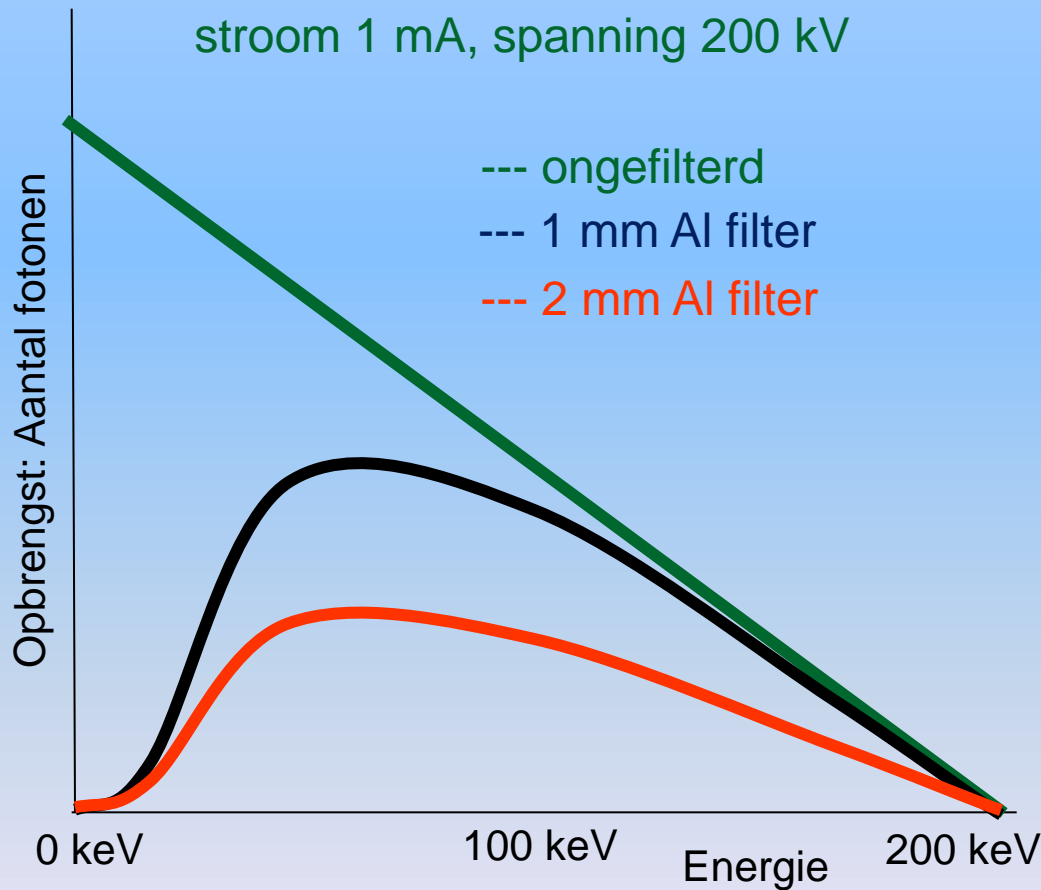
Als stroomsterkte 2x:
(bij gelijke hoogspanning):

Opbrengst: **2x**

Als hoogspanning 2x:
(bij gelijke stroomsterkte):

Opbrengst: **4x**

Röntgentoestel: filtering



Filtering:

Fotonen met lage energieën worden tegengehouden.

(deze worden geheel geabsorbeerd en dragen dus niet bij aan beeldvorming, maar berokkenen wel schade).

Gevolg: Hogere gemiddelde energie, maar lagere opbrengst (dosis)

“Straling worder HARDER”

Instellingen Röntgenbuis: Samenvatting

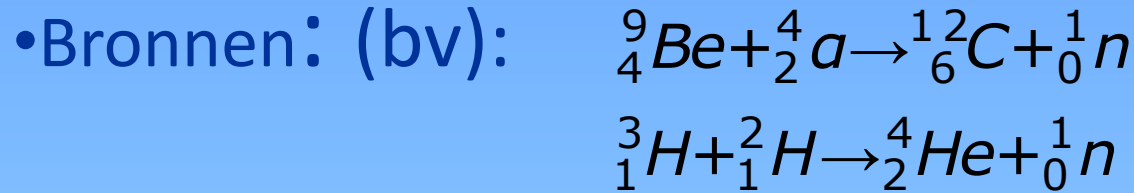
- Buisstroom (mA)
 - aantal elektronen
 - van kathode naar anode
- Buisspanning (KV)
 - spanning tussen kathode en anode
- Filtering (mm Al)
 - materiaal in bundel

Buisstroom 2 x →
opbrengst 2 x

Buisspanning 2 x →
opbrengst 4 x
Hogere energieën →
MINDER contrast !!

Dikte filter 2 x →
meer verzwakking,
vooral lagere energieën

Neutronen



Soorten neutronen:

- Relativistisch: > 20 MeV
- Snel: 0.2 – 20 MeV
- Middelsnel (epi-thermisch): 0.5 eV – 200 keV
- Langzaam (thermisch): < 0.5 eV

Thermisch = via botsingen in bewegingsevenwicht met H-atomen van water

In kernreacties:

Uranium produceert bij splijting snelle neutronen,

maar heeft om te kunnen splijten langzame neutronen nodig.

Daarom nodig: moderator (neutronenvertrager, bv. water, grafiet)

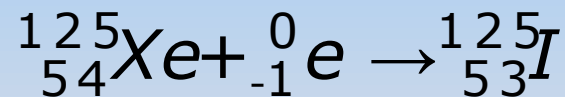
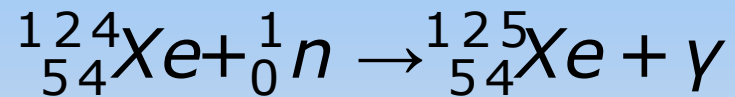
Neutronen

Afscherming van neutronen:

1. Vangst
2. Verstrooiing met vangst

Vangst → activering: productie van isotopen

Voorbeeld: productie
van ^{125}I door
activering van ^{124}Xe
in kernreactor.



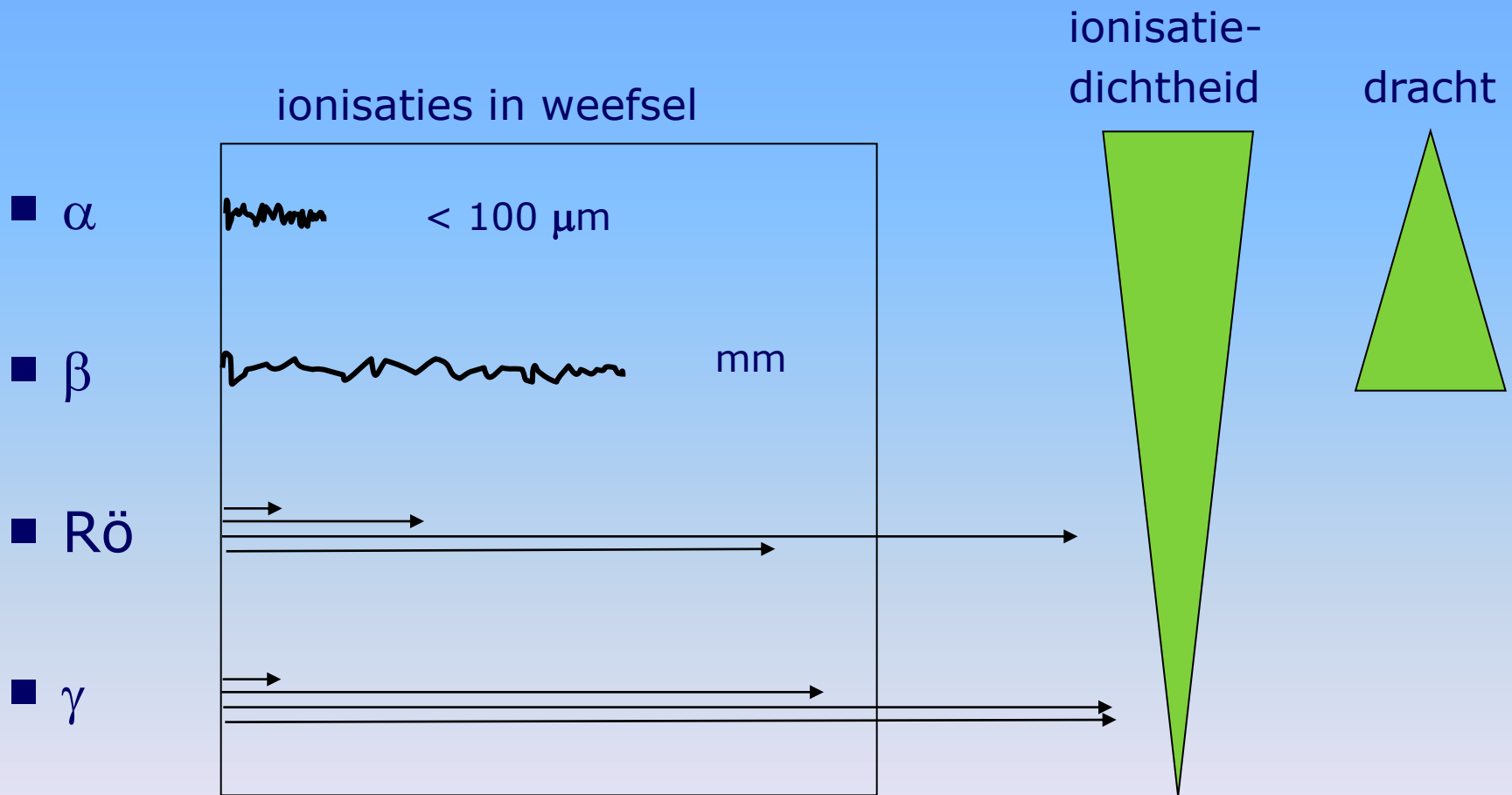
3

Wisselwerking en afscherming

Hfst. 3: Wisselwerking: interacties

3.1. Inleiding	-
3.2. Wisselwerking van α-straling	<ul style="list-style-type: none"> • ionisaties / excitaties • dracht = f (dichtheid, energie)
3.3. Id. van β-straling	<ul style="list-style-type: none"> • botsingen • remstraling: $g = 2 \cdot 10^{-4} Z E_{\beta, max}$ • Cerenkov-straling • β^+ - straling ; annihilatie
3.4. Id. van γ- en röntgenstraling	<ul style="list-style-type: none"> • verstrooiing • foto-effect : absorptie • Compton-effect • paarvorming β^+ en β^- ; annihilatie • dominantie van effecten • schade door sec. electronen
3.5. Afscherming	<ul style="list-style-type: none"> • β-straling: • lineïeke en massieke dracht $R [cm] = 0.5 \times E_{\beta, max} [MeV] / \rho [g/cm^3]$ • afschermingsmateriaal • γ-straling: • μ : verzwakkingscoëfficiënt • $d_{1/2}$: halveringsdikte = $\ln 2 / \mu$ • $I(d) = I(0) \cdot \exp(-\mu d)$ • lineïeke en massieke grootheden • build-up B

Wisselwerking: ionisaties

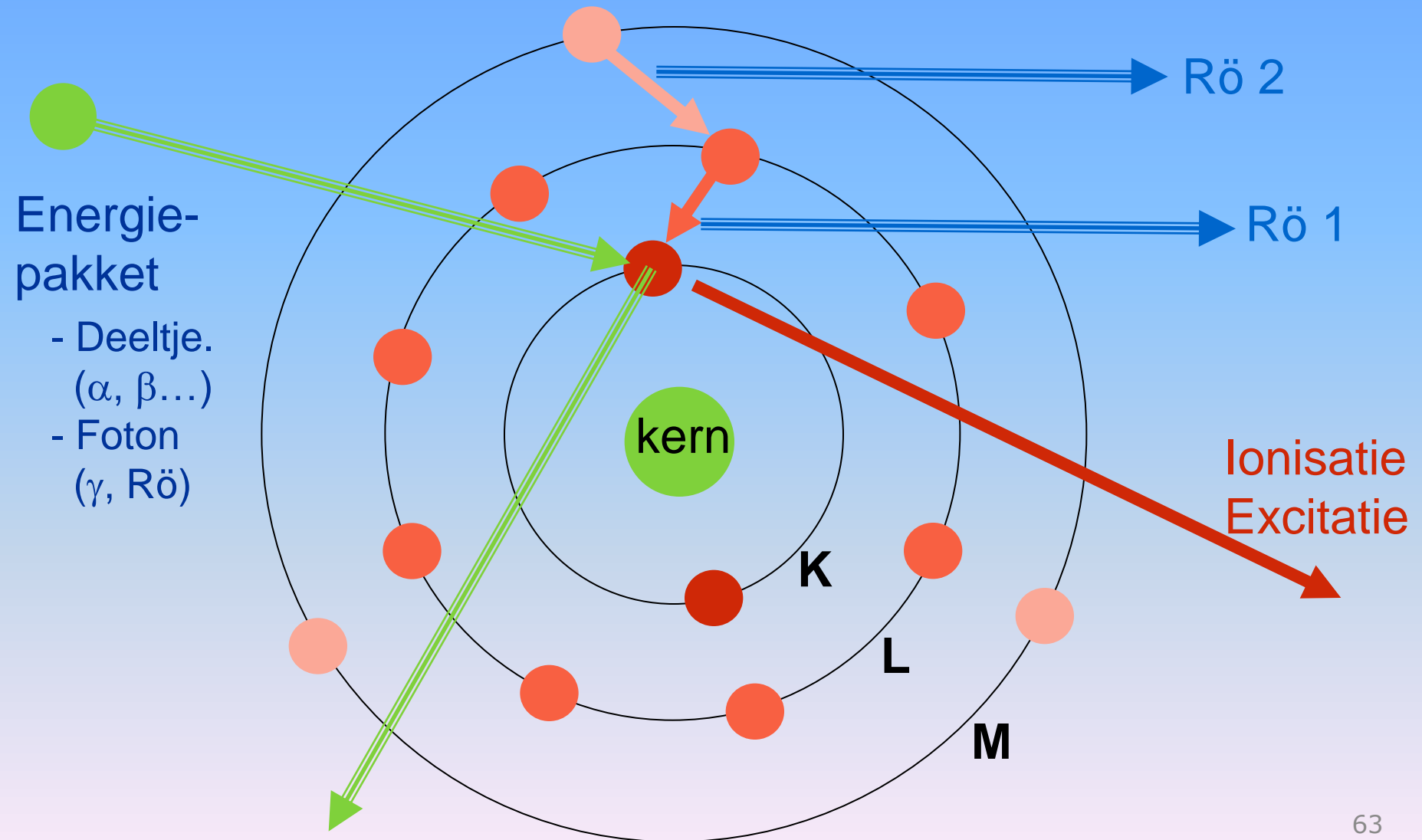


Interactie van electronen met materie

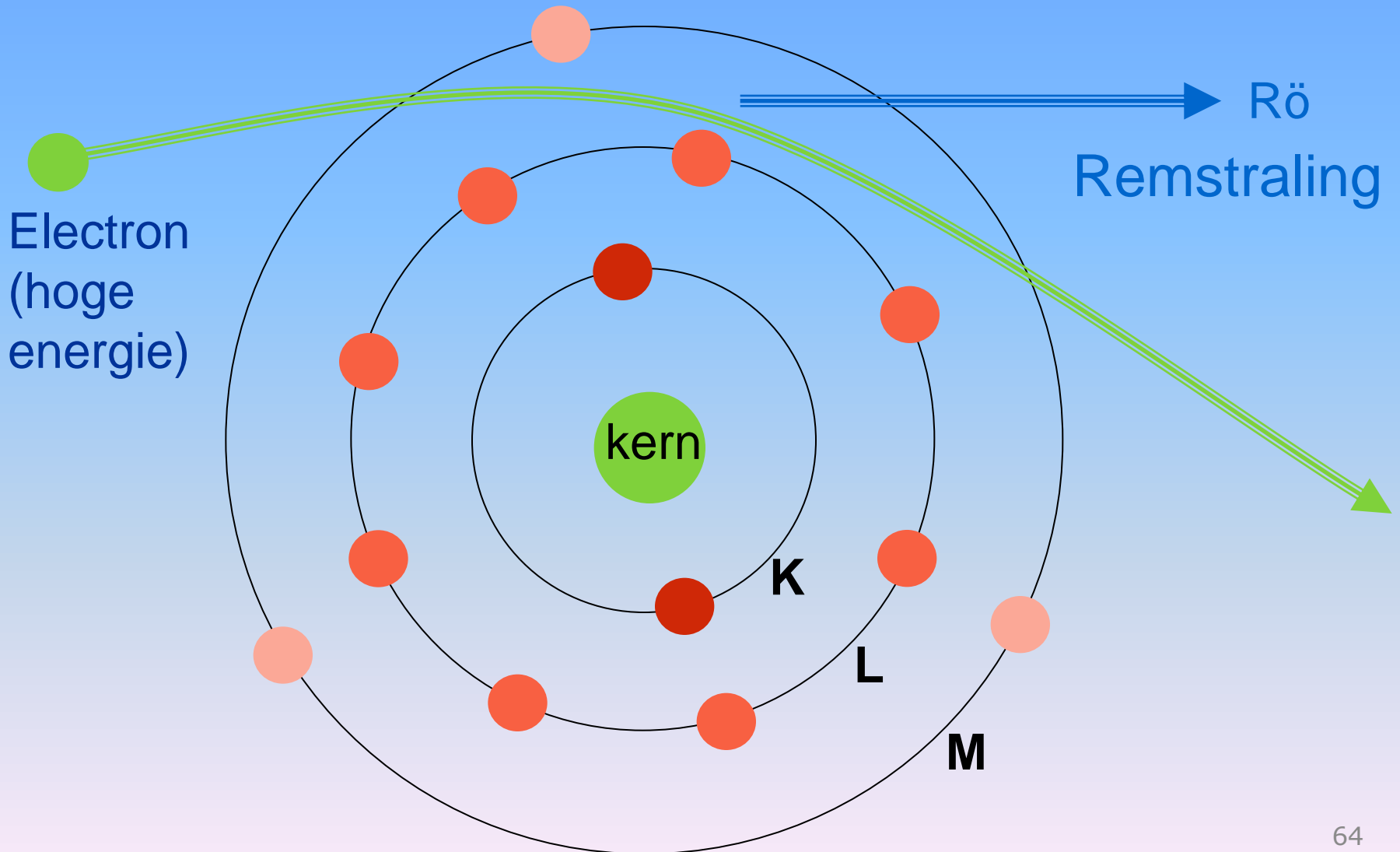
- Interactiemechanismen van electronen:
 1. Elastische botsingen
 2. Inelastische botsingen
 3. Remstraling
 4. Cerenkov-straling
 5. (bij β^+ ;) annihilatiestraling

Interactie van elektronen met materie

→ botsingen → Röntgenstraling (1)



Interactie van elektronen met atoomkern → Röntgenstraling (2)



Remstraling

Electronen worden afgebogen en afgeremd door atoomkernen

remstraling =
Röntgenstraling

Remstraling is kleine fractie (g):

$$g = 2 \times 10^{-4} Z E$$

[met E in MeV]

e^-

Bij afremmen deeltjes ontstaat straling (net als bij Noorderlicht)



K

L

Fractie remstraling: $g = 2 \times 10^{-4} \times 74 \times 0.1 = 15 \times 10^{-4} = 0.0015 = \mathbf{0.15\%}$

(de rest wordt verlieswarmte)

Stel: Anode:
wolfram: $Z = 74$

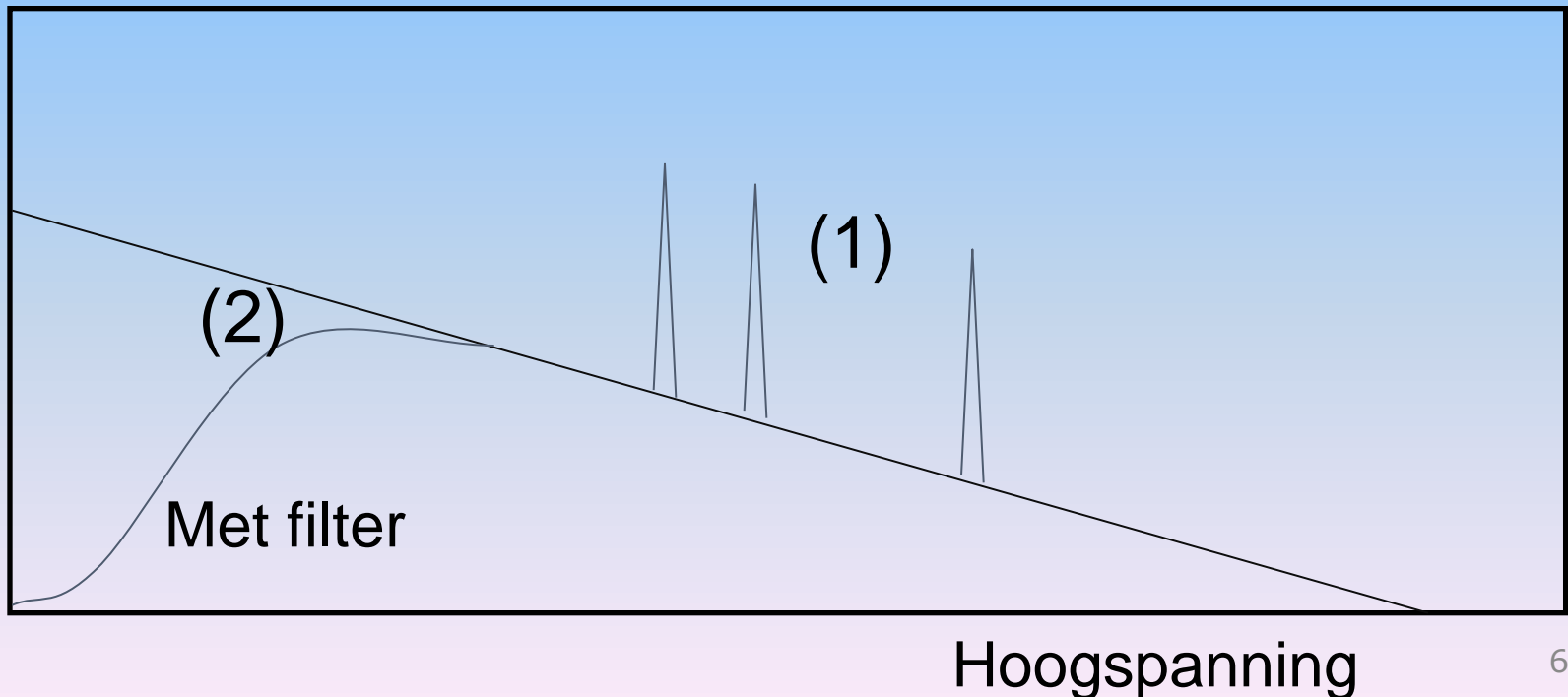
Stel: Hoogspanning:
100 kV

Electronen-energie:
100 keV = 0.1 MeV

Röntgenstraling

Ontstaan (2 mechanismen):

1. Energie ten gevolge van "omlaagvallende" electronen (van hogere naar lagere schil)
2. Remstraling: afremming van hoogenergetische electronen door aantrekking (en afremming) door atoomkern



Interacties:

1. Absorptie

(energie wordt overgedragen aan een **electron** dat in het lichaam afremt en daarbij schade berokkent)

2. Verstrooiing ("Compton-verstrooiing)

(energie wordt overgedragen aan:

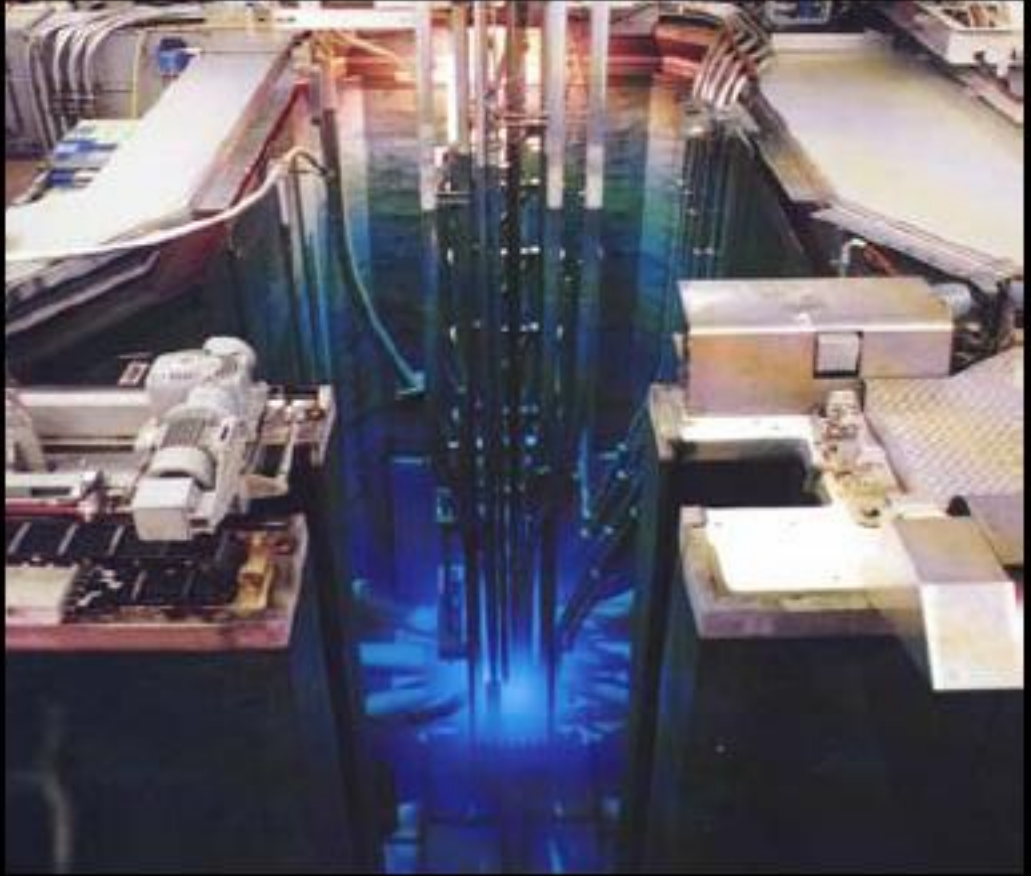
- een **electron** (dat schade berokkent, maar minder dan bij absorptie)
- een nieuw **foton** :
 - met lagere energie,
 - in willekeurige richting uitgezonden, meestal tot buiten de patiënt

Interactie van elektronen: Cerenkov-straling

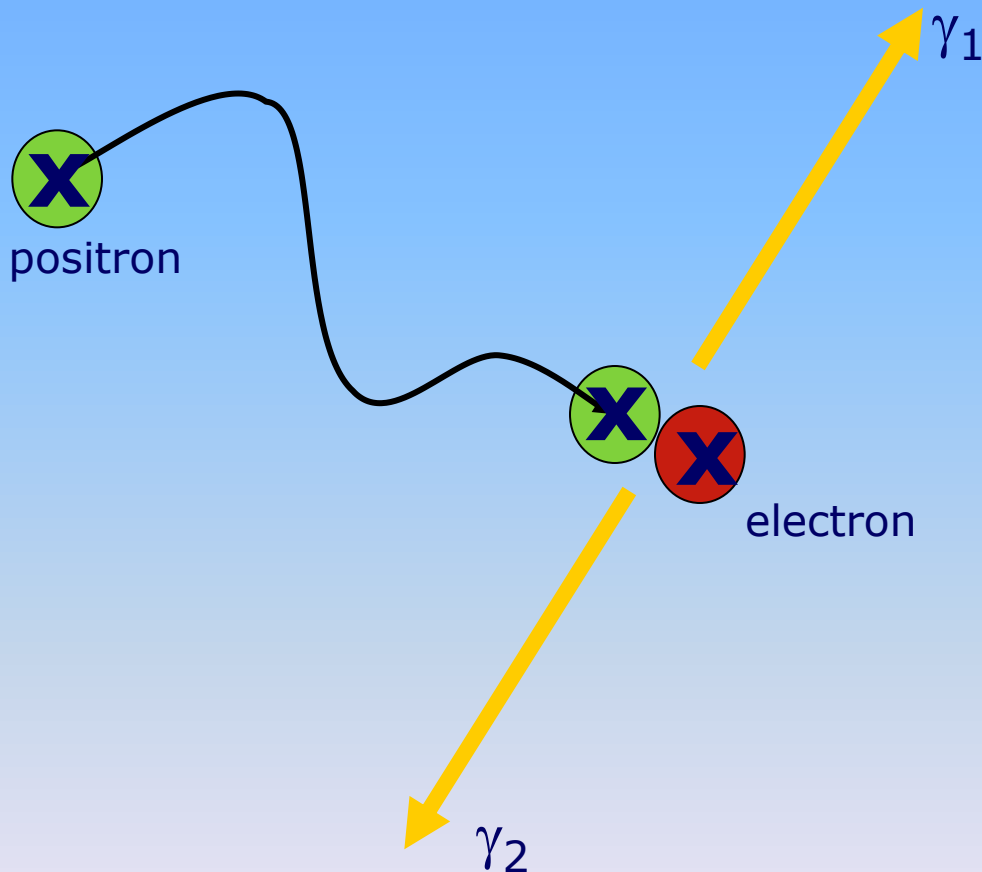
- Bij afremmen van
- “te snelle” elektronen
- in water
- (afremmen tot lichtsnelheid-in-water)
- komt straling (licht) vrij:
- Cerenkov-straling

lichtsnelheid-in-water =
lichtsnelheid-in-vacuüm /
brekingsindex-in-water
(= 1.5)

Cerenkov-effect in kernreactor

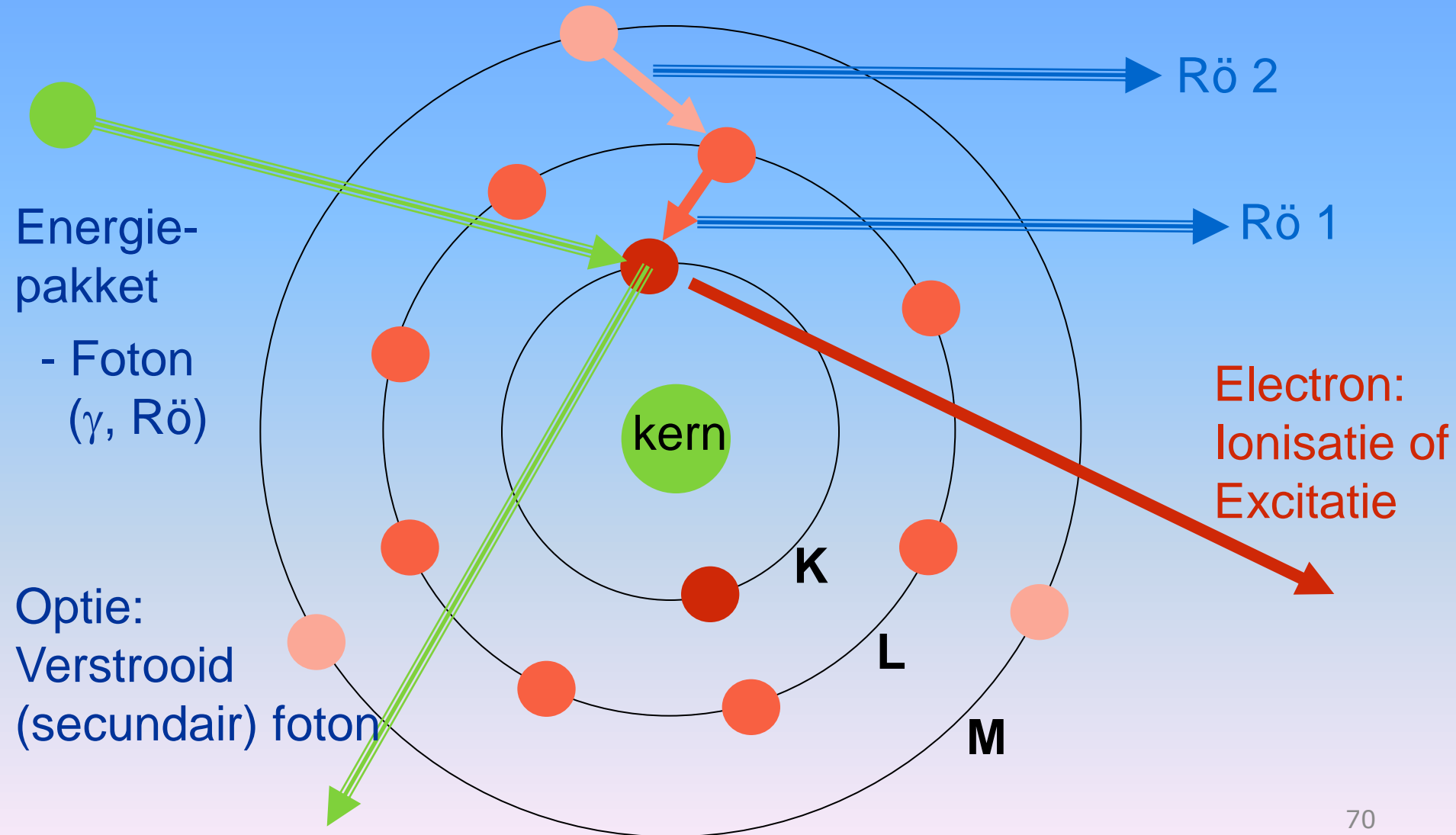


Interactie van positronen met materie: annihilatiestraling

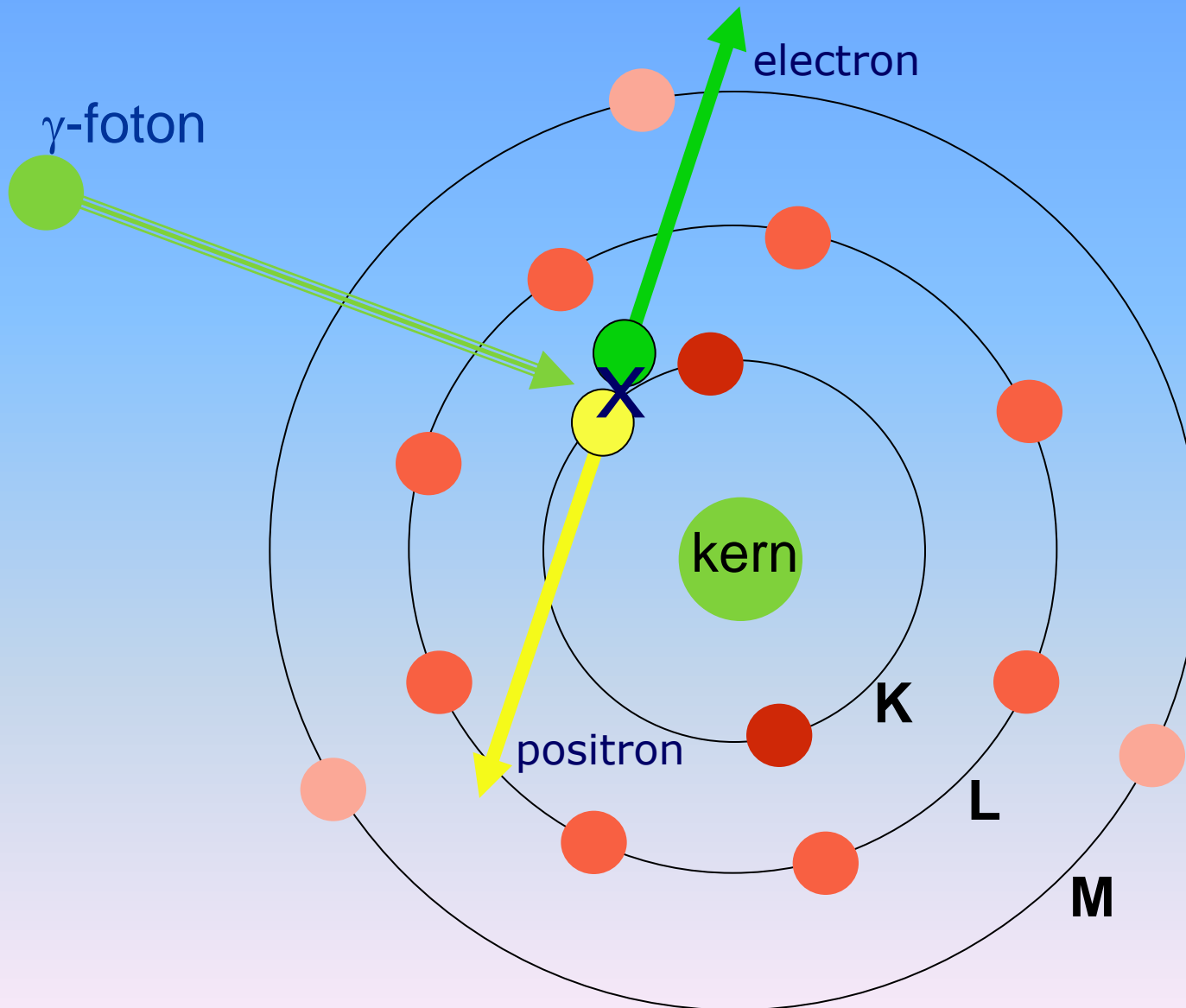


1. Positron verliest energie
2. Positron ontmoet electron
3. **Annihilatie volgens**
 $E = mc^2$
 $= 1024 \text{ keV.}$
4. Energie wordt verstrooid in de vorm van 2 gamma-fotonen, elk met 512 keV energie.

Interactie van fotonen met materie: (1) absorptie en verstrooiing



Interactie van fotonen met materie: (2) paarvorming



**Creatie van
massa
volgens:**

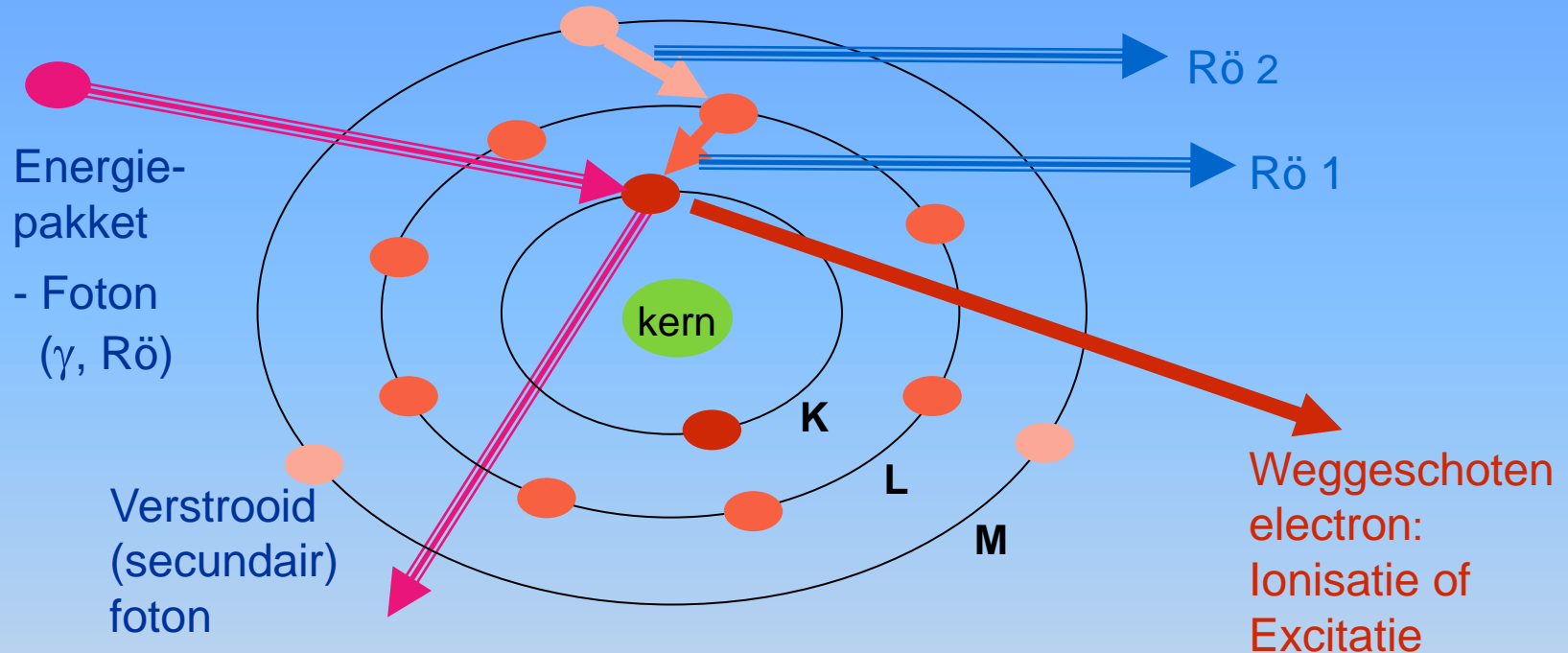
$$2mc^2 = E_{\gamma}$$

$m =$
massa
positron =
massa
electron

Nodig:

**γ-energie
≥ 1024 keV**

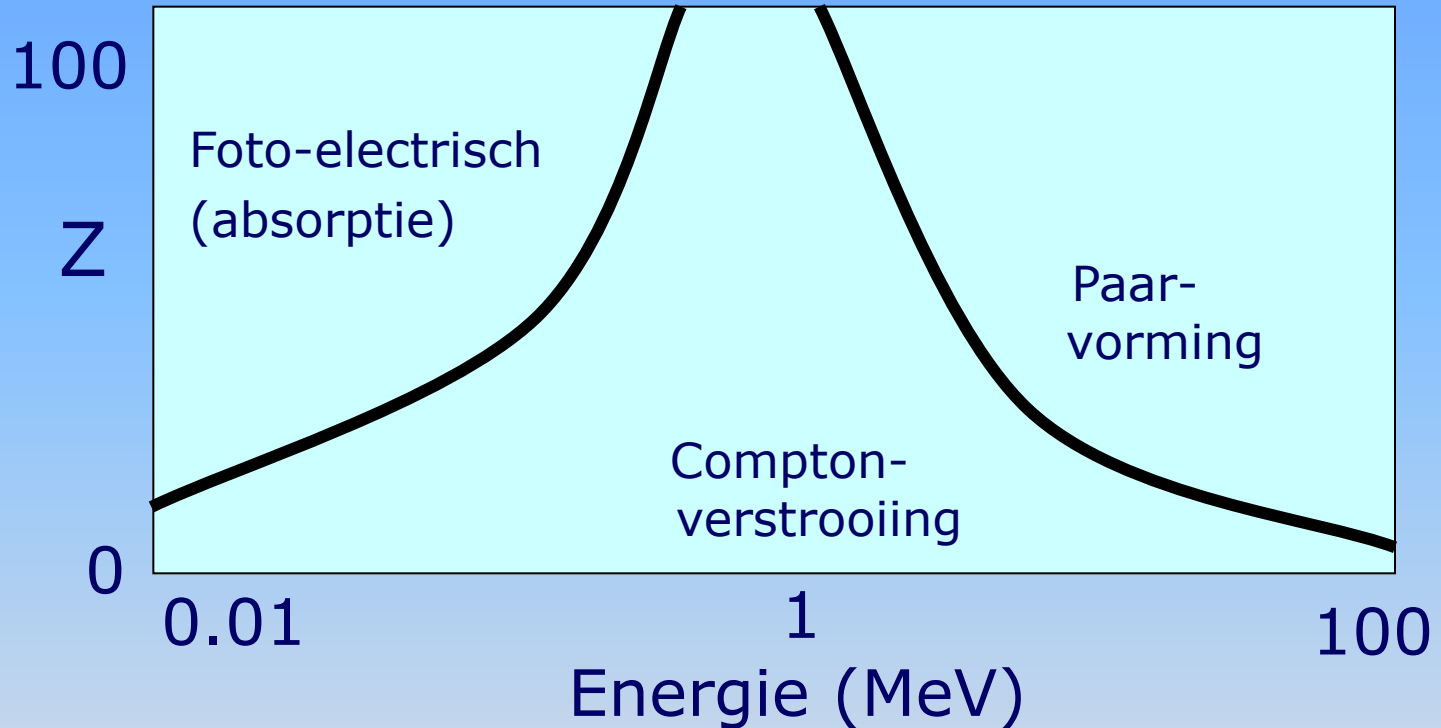
Interactie van fotonen met materie



Proces:

1. Absorptie van inkomend foton;
2. Wegstoten van electron: **ionisatie of excitatie** → **schade**
3. Optioneel (vooral bij hogere energieën):
uitzenden van secundair foton (= Compton verstrooiing) → **schade**
4. Vervolgproces: opvullen lege plekken → **Röntgenstraling** → **schade**

Interactie van fotonen met materie



Voorbeeld:

H, He (lage Z):

bij lage E : vooral Compton

U, Pb (hoge Z):

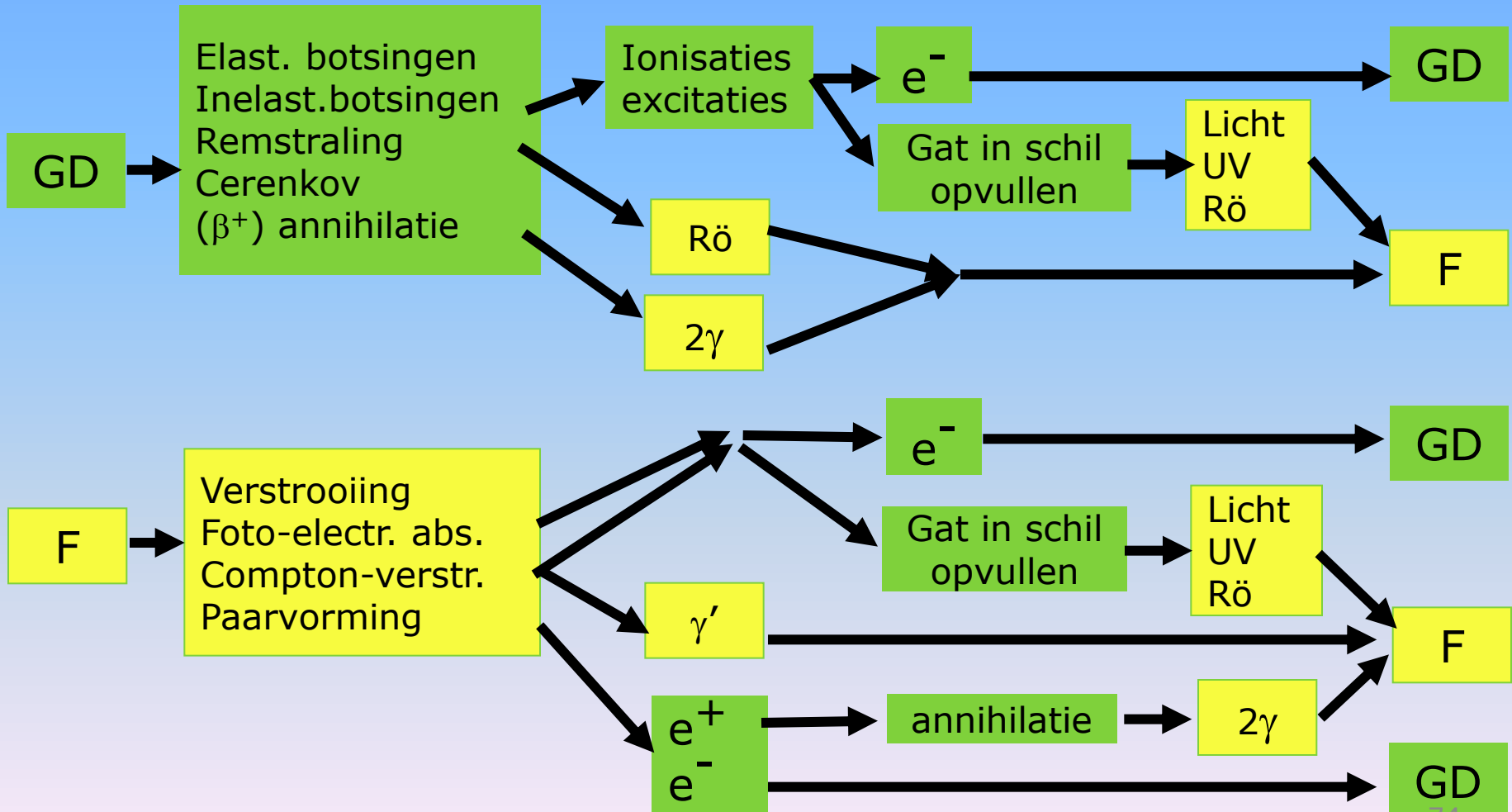
bij lage E : vooral absorptie

U, Pb (hoge Z):

bij hoge E : vooral paarvorming

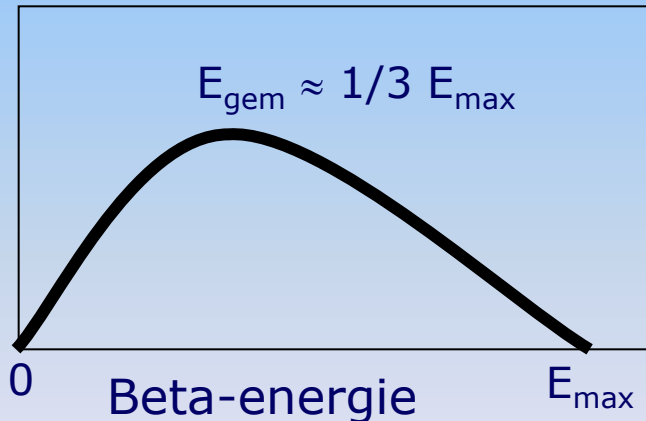
Wisselwerking: overzicht

GD = geladen deeltje (e^- , e^+ , α , p); F = foton (Rö, γ)



Afscherming: Bundelverzwakking

- Beta's (electronen):



Dracht:

$$R \text{ [cm]} = \frac{0.5 E \text{ [MeV]}}{\rho \text{ [g / cm}^3\text{]}}$$

Hier $E = E_{\max}$

Voorbeeld:

Dracht van electronen met

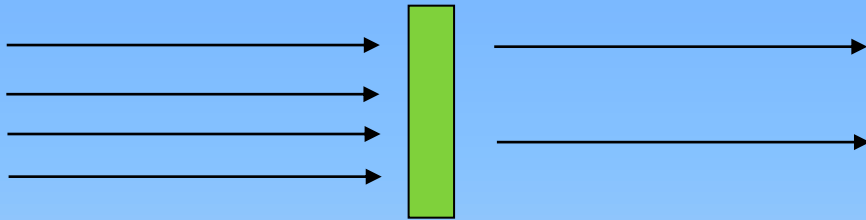
$$E_{\max} = 2 \text{ MeV} :$$

In water ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$): $R = 1 \text{ cm}$

In lucht ($\rho = 10^{-3} \text{ g/cm}^3$): $R = 1000 \text{ cm}$

Afscherming: Bundelverzwakking

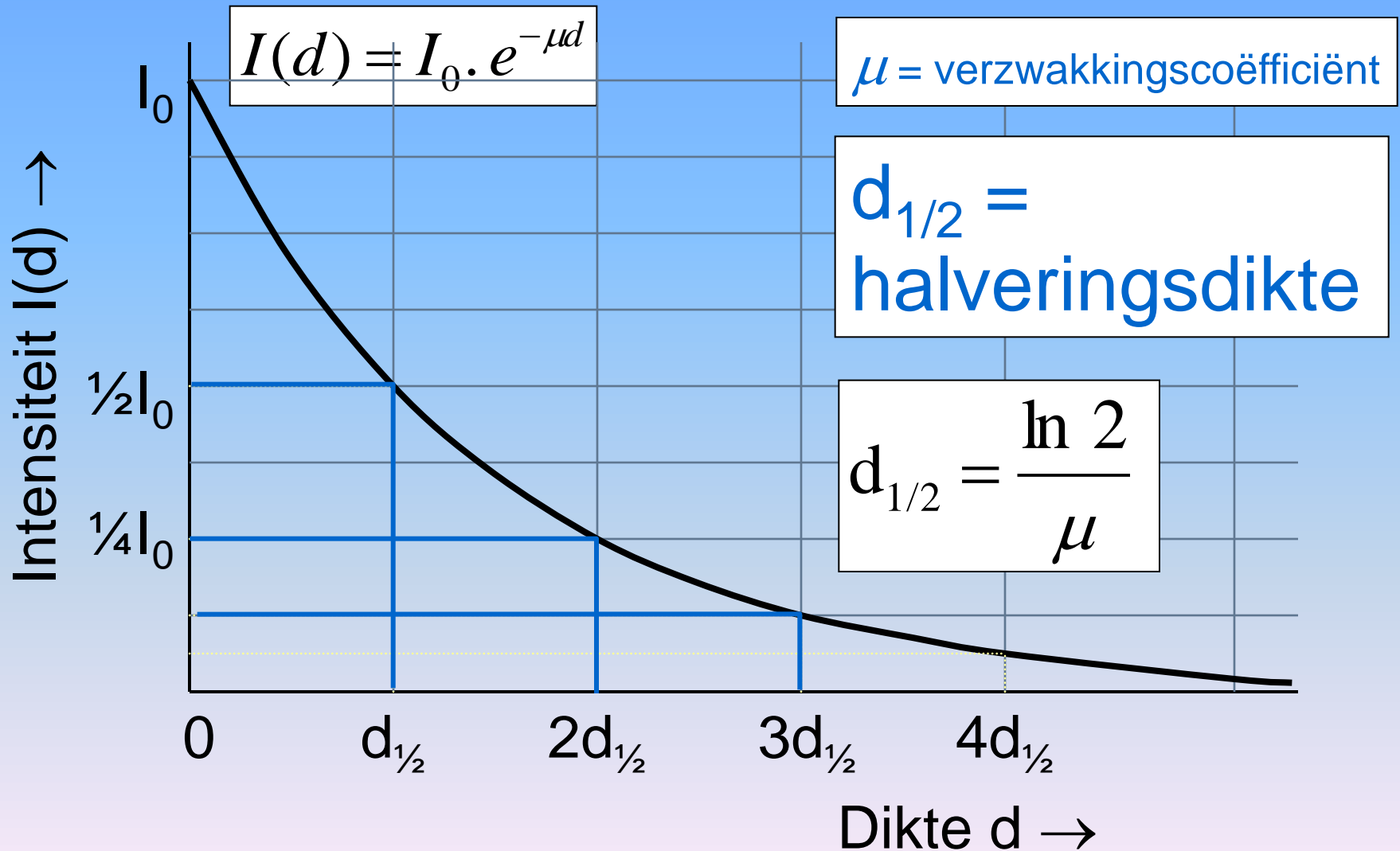
- Gamma's en Röntgens: Voorbeeld:



Plaat afschermingsmateriaal
met halveringsdikte $d_{1/2} = 5$ cm.

- Achter 5 cm: over $1/2 = 1/2^1$: transmissie = 50%
- achter 10 cm: $1/4 = 1/2^2$ 25%
- Achter 15 cm: $1/8 = 1/2^3$ 12.5%

γ -Rö: bundelverzwakking



γ -Rö: bundelverzwakking

- Vraag 10:
- De straling van een gamma-isotoop van 10 MBq heeft in een zeker materiaal een halveringsdikte van 5 cm. Voor 20 MBq bedraagt deze halveringsdikte:

- a. 1.25 cm
- b. 2.5 cm
- c. 5 cm
- d. 10 cm
- e. 20 cm

Over na:

$$5 \text{ cm: } 1/2 = (1/2) = 50 \%$$

$$10 \text{ cm: } 1/4 = (1/2)^2 = 25 \%$$

$$15 \text{ cm: } 1/8 = (1/2)^3 = 12.5 \%$$

Hoeveel % blijft over na 8 cm van dit materiaal? (8 cm = 1.6 x $d_{1/2}$)

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{d_{1/2}}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{8}{5}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1.6} = 0.33 = 33 \%$$

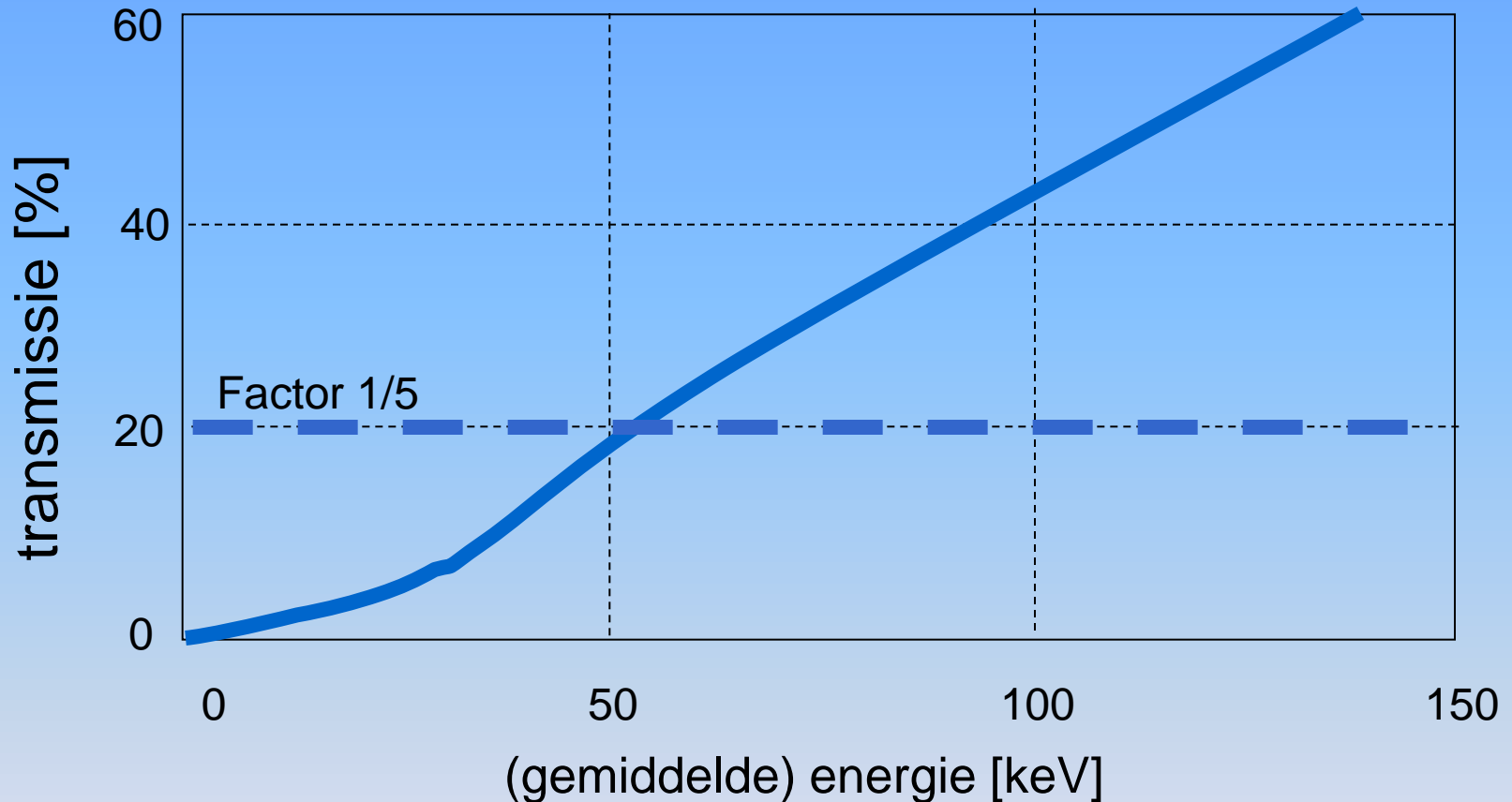
γ -Rö: bundelverzwakking

- Vraag 11:
- De halveringsdikte $d_{1/2}$ is de dikte met een transmissie van $\frac{1}{2}$.
- Achter 2 halveringsdikten: dus een transmissie van $\frac{1}{4}$.
- Een nauwe bundel passeert in een bepaald materiaal 20 halveringsdikten. De verzwakking is dan ongeveer:
 - a. 1000 keer
 - b. 1.000.000 keer
 - c. 100.000.000 keer
 - d. 20 keer

Transmissie (%) van materialen voor Röntgenstraling

	<i>energie (keV)</i>	lucht	water	lood	beton	weefsel	bot	aluminium
Dichtheid (g/cm³)		0.0012	1	11.34	2.35	1	1.85	2.7
Halveringsdikte d_{1/2} (cm)	50	2792	3.1	0.008	0.7	3.1	1.1	0.7
	100	3711	4.1	0.011	1.7	4.1	2.1	1.5
	150	4230	4.6	0.03	2.1	4.6	2.5	1.9
	200	4639	5.6	0.06	2.3	5.6	2.8	2.1
Transmissie door 5 cm (%)	50	100	32	< 0.001	1	33	4	1
	100	100	43	< 0.001	12	43	19	10
	150	100	47	< 0.001	19	37	26	16
	200	100	50	< 0.001	22	51	29	19

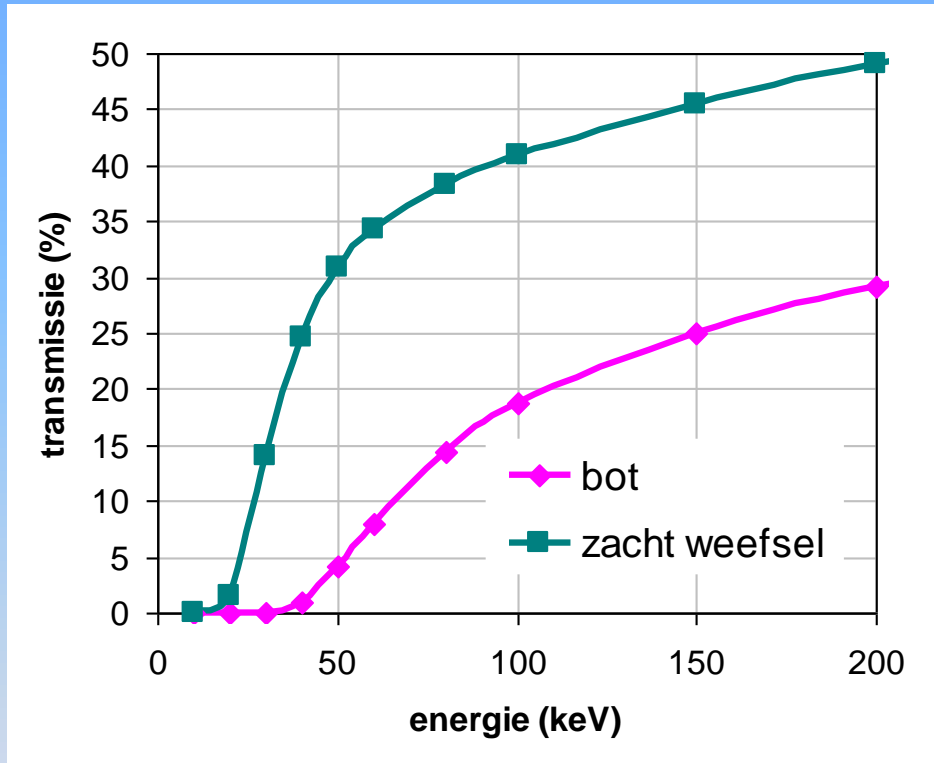
Transmissie Röntgenstraling door een loodschort (0.2 mm dik)



Voor (gemiddeld) 50 keV is de verzwakking dus 5 x.

NB. Een Röntgenspectrum bevat fotonen van verschillende energie !!

Transmissie Röntgenstraling door weefsel (5 cm dik)



E (keV)	Verhouding weefsel/bot (contrast)
10	3.0E+69
20	2.5E+09
30	1022.24
40	27.80
50	7.57
60	4.28
80	2.64
100	2.19
150	1.82
200	1.68
300	1.54

Dus: lagere hoogspanning → beter contrast !!

NB. Een Röntgenspectrum bevat fotonen van verschillende energie !!

Bundelverzwakking (γ , Röntgen)

- Vraag 12:
- Een loodafscherming van 25 mm dik verzwakt γ -straling 128 x. De halveringsdikte voor deze straling is:
 - a. 0.4 mm
 - b. 3.6 cm
 - c. 7 mm
 - d. 3.6 mm

Verschillen tussen verzwakking van fotonen- en deeltjesbundels

Fotonen (monochromatisch):

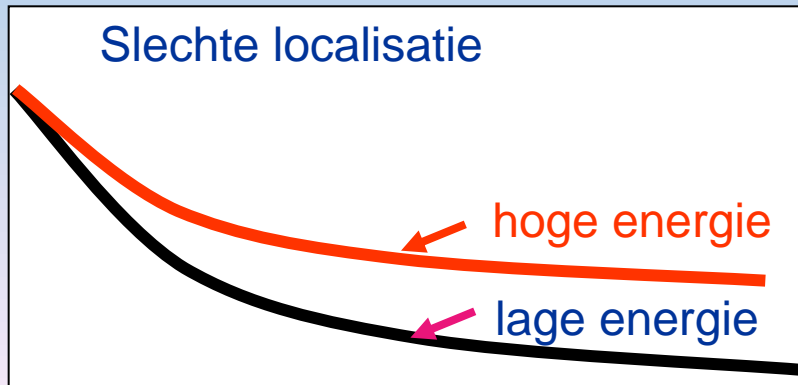
- 1 energie
- AANTAL fotonen neemt af
- Overblijvende fotonen houden hun oorspronkelijke energie
- Bij (Rö, γ)-spectra (polychrom.): lagere energieën verzwakken meer, dus straling wordt HARDER

Deeltjes (bv. Protonen, electronen)

- bij start: 1 energie
- ELK deeltje verliest energie, tot stilstand
- bij lagere energie: meer verlies, dus meer verzwakking
- deeltjes komen tot stilstand
- toepassing: **protonentherapie**

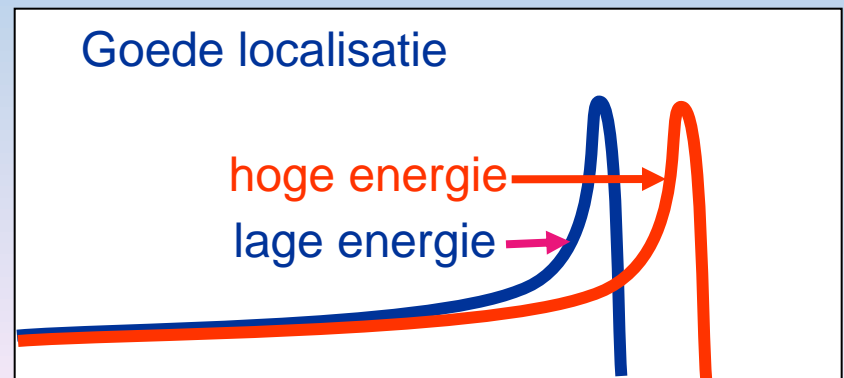
energie-depositie

Slechte localisatie



diepte

Goede localisatie



diepte

4

Detectie

Hfst. 4. Detectie

4.1. Inleiding

ionisatie → electron vrij → geleiding
excitatie → electron aangeslagen →
scintillatie

4.2. Ionisatiedetectoren

(vnl. α, β (γ))

gasgevuld
ionisatiekamer
proportionele telbuis
Geiger-Müller telbuis
vaste-stof; camera's
Halfgeleiderdetector

4.3. Scintillatiedetectoren

(Luminescentie) (vnl. γ)

vaste-stof:
direct: NaI(Tl);
bij verwarming: TLD: Ca_2F ; LiF
(Thermo-luminescentie)
vloeistof (oplossing); vnl zwak β

4.4. Beeldvorming

AgBr
autoradiografie

4.5. Toepassingsgebieden:

• Identificatie:

- spectrometer

• Kwantitatieve telling (activiteitsmeting)

- α, β : Geiger-Müller;
- γ : NaI-scint.
- efficiency & rendement

• Stralingsniveaumeting

- dosistempomonitoren
- $\alpha, \beta, (\gamma)$: Geiger-Müller

• Besmettingsmeting

- hoge gevoeligheid nodig
- als b), met dun venster

4.6. Telfouten en meetgevoeligheid

- aantal tellen N in tijd t
- fout in N : $\Delta N = \sqrt{N}$
- teltempo : $R = N/t$
- fout in teltempo: $\Delta R = \sqrt{(R/t)}$
- Achtergrond

Meetmethoden

Ionisatie:

(electron wordt weggeschoten, kan **electrisch** worden gedetecteerd)

Gas

(Geiger-Müller) telbuis

Vooral α , β ;
 γ , R \ddot{o} mits
hoge intens.

Vaste stof
(vgl. lichtsensor")

Camera

α , β , γ , R \ddot{o}

Excitatie:

(electron gaat naar hogere schil, en zendt bij terugval **licht** uit)

Direct

Scintillatie-
detector

γ , R \ddot{o}

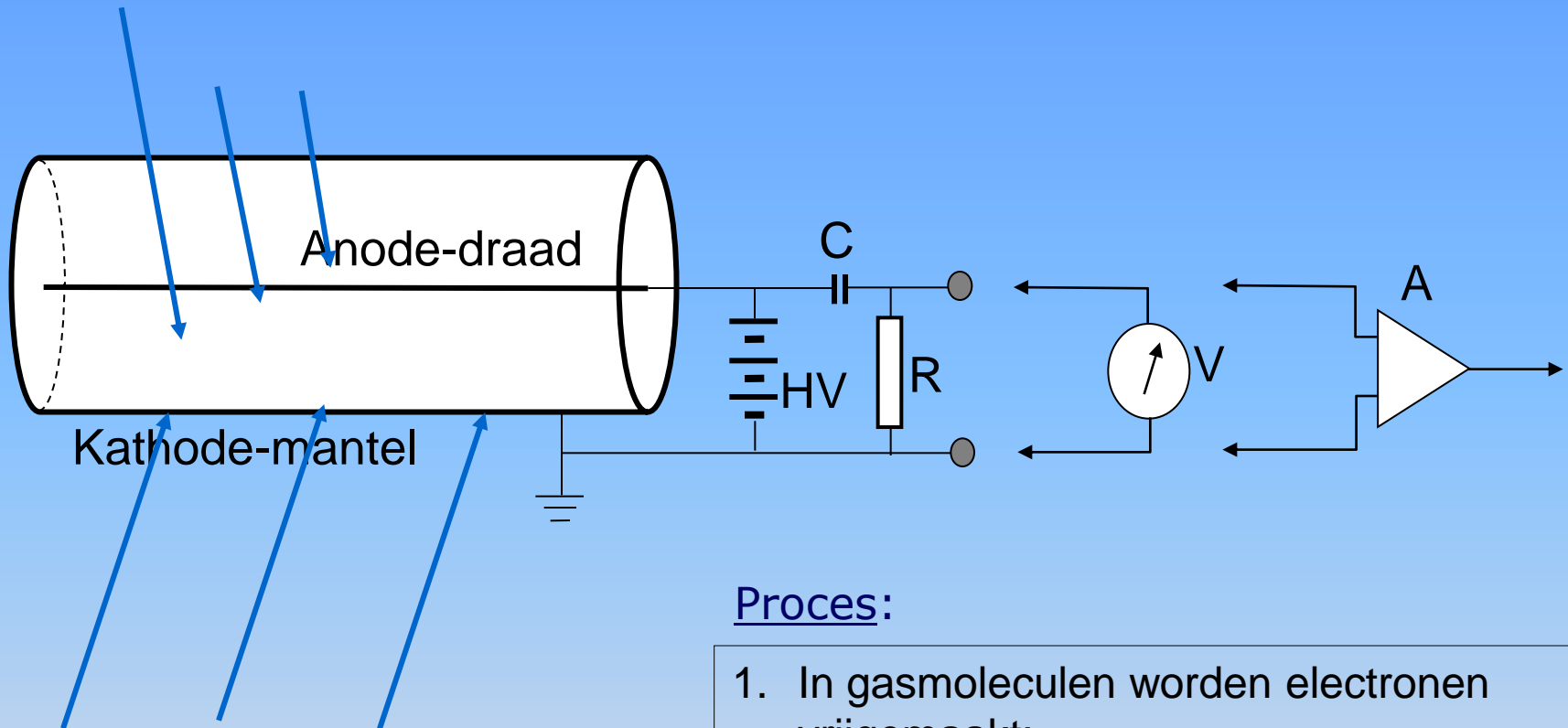
Multichannel γ -
spectrometer

Pas na
verwarming

Thermolumi-
nescentie:
TLD

Persoons-
dosimetrie

Meetmethoden: Gasdetector

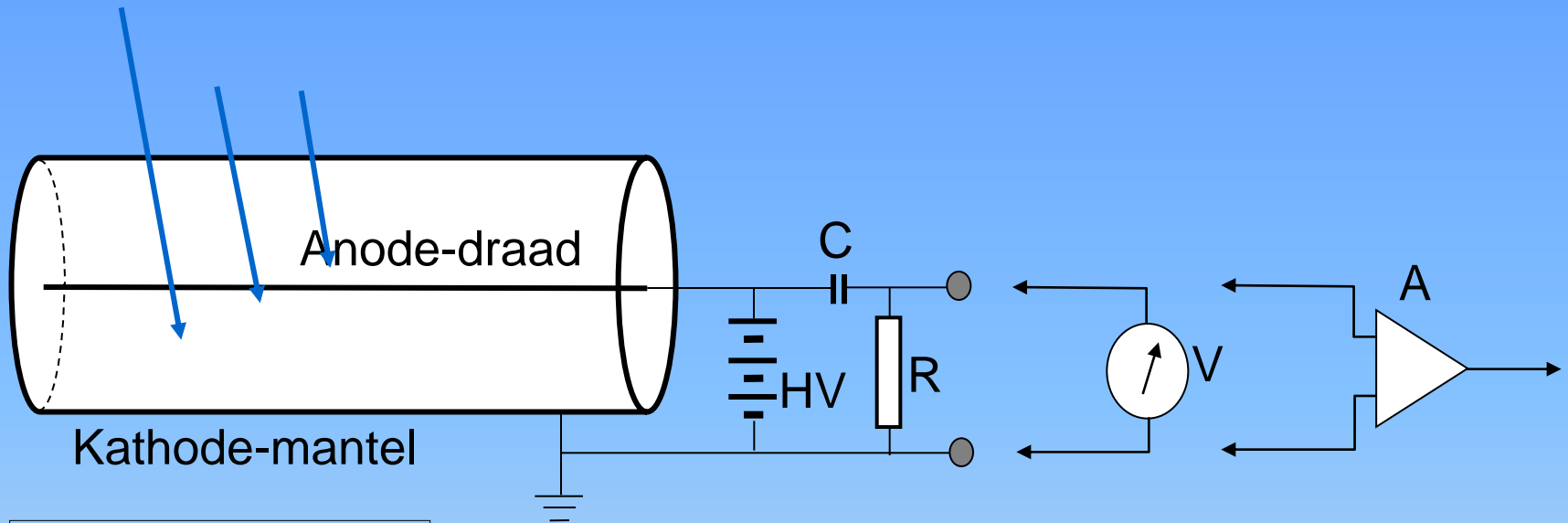


HV = hoogspanning
C = scheidingscondensator
R = weerstand
V = (volt-) meter
A = amplifier naar computer

Proces:

1. In gasmoleculen worden electronen vrijgemaakt;
2. Electronen bewegen naar + draad;
3. Resterende gasionen bewegen (langzamer) naar – mantel;
4. De – lading op de draad vloeit af als stroom door weerstand;
5. Spanning over weerstand meetbaar.

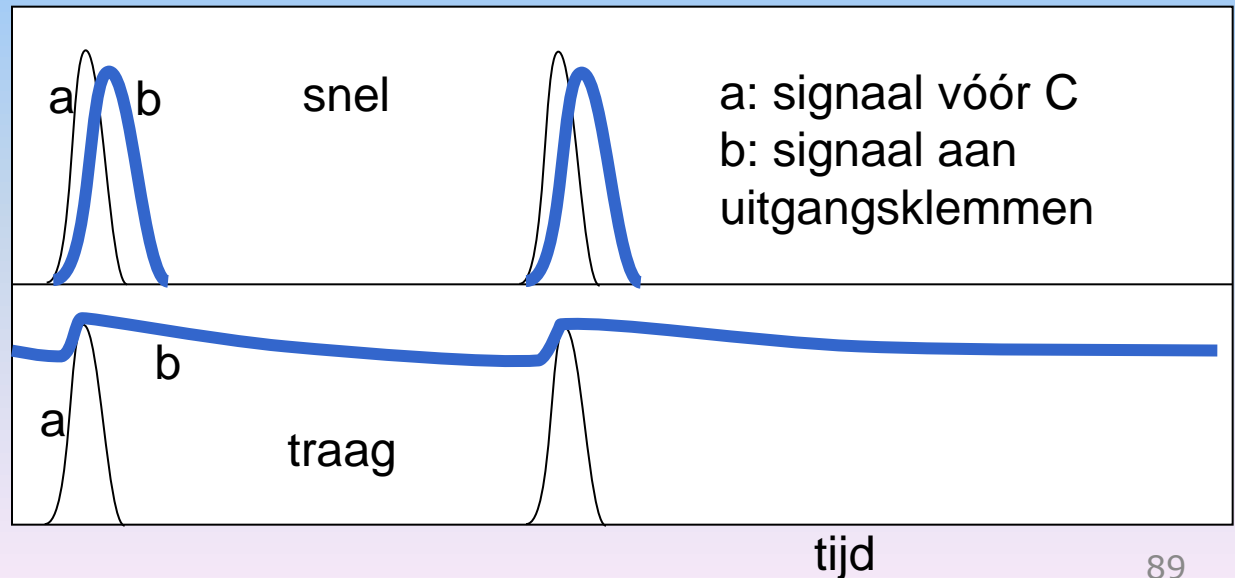
Meetmethoden: Gasdetector



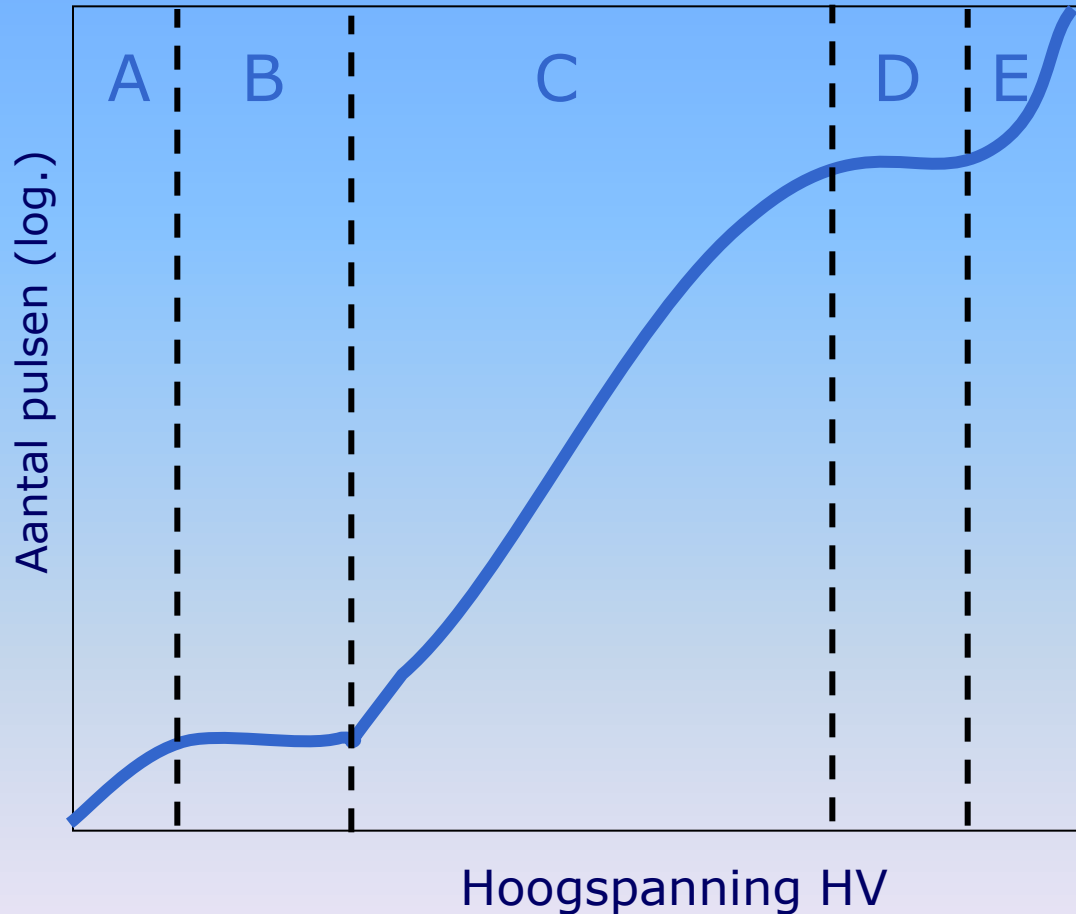
Mogelijkheden:

1.RC laag:
snel systeem:
pulsenteller

1.RC hoog: traag
systeem: pulsen
worden
uitgesmeerd,
stroommeting.



Meetmethoden: Gasdetector



A: ionisaties \sim HV

B: alle electronen bereiken anode

1e plateau

ionisatiekamer

C: gasversterking:

proportionele telbuis

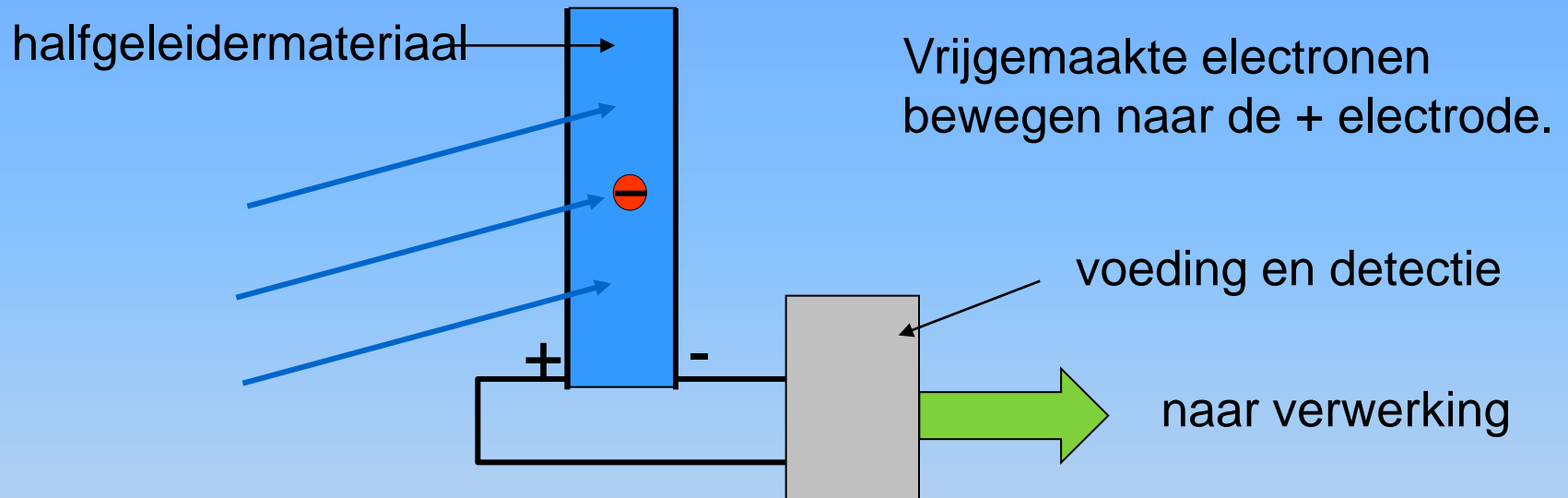
D: lawine: 2e plateau

Geiger-Müller telbuis.

E: destructieve

ontlading: buis stuk

Meetmethoden: Vaste-stofdetector

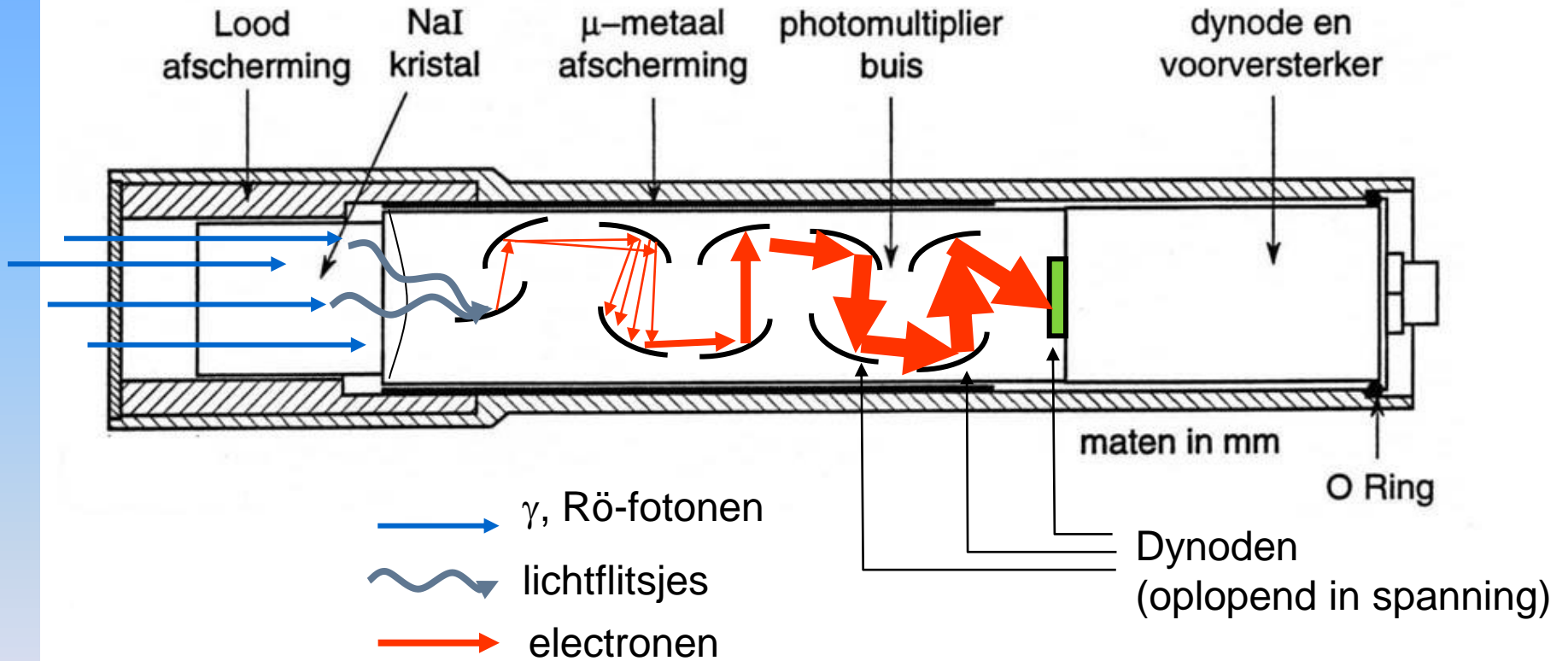


Camera-detectie:

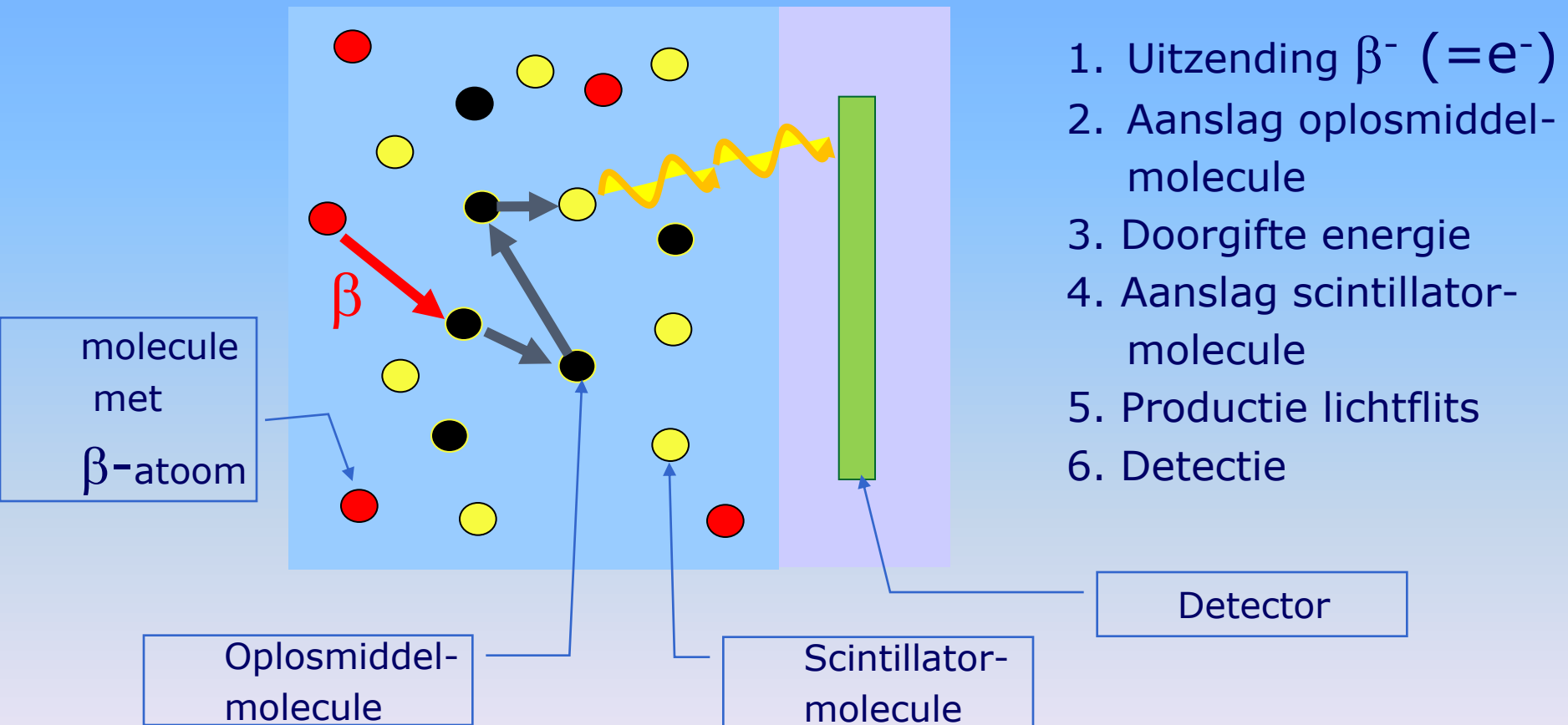
Vele kanaaltjes naast elkaar, met eigen toe- en afvoerdraden.

Uitlezing als CCD-camera.

Meetmethoden: Scintillatiedetector



Meetmethoden: Vloeibare scintillator



Meetmethoden

Vraag 13 :

Een detector meet bij een ijkbron van 50 Bq een intensiteit van 2200 cpm. De achtergrond bedraagt 1000 cpm. Een onbekende bron geeft een telsnelheid van 49000 cpm. Wat is het rendement van de detector?

- a. 25 %
- b. 40 %
- c. 80 %
- d. 100 %

**Rendement (efficiency) =
Aantal tellen per invallend deeltje
(altijd < 100 %)**

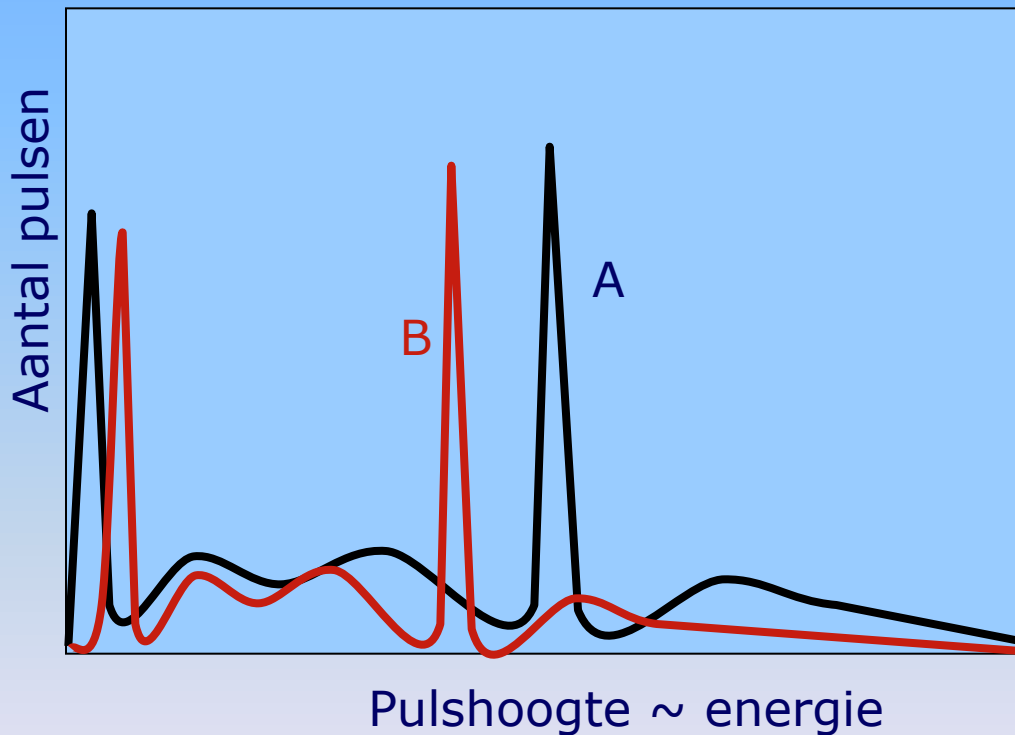
Vraag 14 :

Wat was de activiteit van de onbekende bron?

- a. 100 Bq
- b. 250 Bq
- c. 500 Bq
- d. 800 Bq
- e. 1 kBq
- f. 2 kBq
- g. 4 kBq

Meetmethoden: gamma-spectrometer

NaI-scintillatorkristal met fotomultiplierbuis.



Energiespectrum:
(nucliden A en B)

Elk γ -stralend nuclide
heeft zijn eigen
specifieke
energieën

Toepassing:
identificatie

Meetmethoden: Meetfout (1)

Stel meting $N = 400$ tellen

Dan **standaard meetfout** $\Delta N = \sqrt{400} = 20$ tellen
(standaardafwijking)

Notatie: **$N = 400 \pm 20$ tellen**

Meting: Netto = bruto – achtergrond

maar:

Fout in netto = fout in bruto **+** fout in achtergrond

(“absolute fouten tellen op”)

Meetmethoden: Meetfout (2)

Stel **telsnelheid** $R = 200$ cpm (tel/minuut) over 8 min.

$$R = \frac{N}{t}$$

N = aantal tellen (= 1600)

t = teltijd (= 8 min met fout 0.2 sec.)

Fout in N : $\Delta N = \sqrt{N}$; relatieve fout (%): $\frac{\Delta N}{N} = \frac{40}{1600} = \frac{1}{40} = 2.5\%$

Fout in t : $\Delta t = 0.2$ sec; relatieve fout (%): $\frac{\Delta t}{t} = \frac{0.2}{8 \times 60} = 0.04\%$

Fout in R : “relatieve fouten tellen op”:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta t}{t} = 2.5 + 0.04\% \approx 2.5\%$$

Meestal: Δt te verwaarlozen

5

Grootheden en eenheden

dosis, equivalente en effectieve dosis; gray en sievert

Hfst. 5. Grootheden en eenheden: Dosimetrie

•5.1. Inleiding	
•5.2. Grootheden en eenheden	
• <u>Exposie</u>	X
• <u>Dosis</u> (geabsorbeerde energie) •Kerma (uit bundel verdwenen energie)	D K
• <u>Stralingsweegfactor</u> (Gy \rightarrow Sv) • <u>Equivalente dosis</u> : $H = w_R D$ (dosequivalent): •id. per targetorgaan	w_R H H_T
• <u>Weefselweegfactor</u> • <u>Effectieve dosis</u>	w_T E
• <u>Volgdosis</u> equivalent id. per targetorgaan • <u>Effectieve (volg)dosis</u> •Eff. (volg)dosiscoëfficiënt; • <u>Dosisconversiecoëff.</u> $DCC = e(50)$; $E = DCC \cdot A$	H_{50} $H_{50,T}$ $E(50)$ $e(50)$ DCC
•5.3. Orden van grootte	
•5.4. Overzicht van namen	

Dosimetrie

Hoe kwantificeer je de stralingsbelasting van materialen en weefsel?

- **Exposie (X)** C/kg (electr. lading per kg)
 - ladingsopbouw → meetstroom
- **Dosis (D)** Gy (gray) = J/kg (energie/kg)
 - algemeen, materialen
- **Equivalente dosis (H)** Sv (sievert) = J/kg
 - in weefsels en organen
- **Effectieve dosis (E)** Sv (sievert) = J/kg
 - idem, “total body”

Dosis (D)

- Dosis (D):

- “geabsorbeerde dosis” D

- hoeveelheid stralingsenergie (J) gedeponneerd per massa-eenheid (kg)

- $\text{J/kg} = \text{Gy}$ (gray)

Equivalente dosis

- **gray** is slechte maat voor risico voor **weefsel**
- correctie voor ionisatiedichtheid nodig, afhankelijk van de stralingssoort (α , β , γ , R \ddot{o})
- **“stralingsweefactor” (W_R)**
 - $w_R = 1$ voor β (matig doordringend)
 - $w_R = 1$ voor γ , R \ddot{o} (goed doordringend)
 - $w_R = 20$ voor α (nauwelijks doordringend, compact pad)

Dosis (D)

gray (Gy) = J/kg

Equivalente dosis (H)

sievert (Sv) = J/kg

$$H = D \times w_R$$

Dosis vs. Equivalente dosis

Dosis (D) gray (Gy) = J/kg

$$H = D \times w_R$$

Equivalente dosis (H) sievert (Sv) = J/kg

$w_R = 1, 1, \text{ resp. } 20$ voor β, γ en Röntgenstraling, resp. α -straling

- Risico voor weefsel van 1 Gy α -straling
 - is groter dan van 1 Gy röntgenstraling.
- Risico voor weefsel van 1 Sv α -straling en 1 Sv röntgenstraling is equivalent.

Dosisgrootheden

- **Dosis (D)** gray (Gy)
- **Equivalentente dosis (H)** sievert (Sv)

- De equivalentente dosis is specifiek per bestraald orgaan: H_T
- (T = “tissue”)
- Elk orgaan heeft een “weefselweegfactor” w_T

• **Effectieve dosis (E)**

- (“total body”) sievert (Sv):
- sommeert de bijdragen van alle bestraalde organen

Deze Effectieve Dosis (per jaar) mag niet hoger zijn dan de (wettelijke) stralingslimieten.

Dosisgrootheden

Vraag 15 :

Welke stralingssoort geeft per eenheid van dosis (Gy) de grootste equivalente dosis (Sv)?

- a. α -straling
- b. β -straling
- c. γ -straling
- d. Röntgenstraling

Weefselweegfactoren w_T

	ICRP90	ICRP103		ICRP90	ICRP103
•gonaden0,20	0.08		•huid	0,01	0.01
•beenmerg	0,12	0.12	•bot-oppervlak	0,01	0.01
•dikke darm	0,12	0.12	•hersens	--	0.01
•longen	0,12	0.12	•speekselklieren	--	0.01
•maag	0,12	0.12	•overige	0,05	0.12
•blaas	0,05	0.04			
•borst	0,05	0.12	•totaal	1,00	1.00
•lever	0,05	0.04			
•slok darm	0,05	0.04			
•schildklier	0,05	0.04			

Effectieve dosis (E) (“total body”)
 sommeert de (gewogen) bijdragen
 van alle bestraalde organen.

$$E = \sum_T w_T H_T$$

Effectieve dosis: voorbeeld

- Hand in Röntgenbundel:
- Huid dosis door Röntgenstraling: 1 Gy
- Bereken de effectieve dosis (“total body”).
- gegeven: $w_{\text{huid}} = 0.01$

Equivalent dose $H_T = 1 \text{ Gy} \times 1 = 1 \text{ Sv}$ ($w_R = 1$)

Effective dose $E = 1 \text{ Sv} \times 0,01 = 0,01 \text{ Sv}$ ($w_T = 0.01$)

- 1 Sv huid \Rightarrow zelfde risico als 0,010 Sv total body
10 mSv is onder de limiet voor effectieve dosis

Maar: **1 Gy huid \Rightarrow deterministische effecten !!!**

Effectieve dosis: voorbeeld

Voorbeeld:

Iemand ontvangt 100 μGy α -straling op de gonaden en 200 μGy γ -straling op de maag.

Vraag: Hoe hoog is de Effectieve Dosis?

$$E = \sum_T w_T H_T$$

Antwoord:

- Equiv. dosis op de gonaden $H_{\text{gon}} = w_{\text{R,gon}} \cdot D_{\text{gon}} = 20 * 100 = 2000 \mu\text{Sv}$

- Equiv. dosis op de maag $H_{\text{maag}} = w_{\text{R,maag}} \cdot D_{\text{maag}} = 1 * 200 = 200 \mu\text{Sv}$

- Totaal: $E = w_{\text{T,gon}} \cdot H_{\text{gon}} + w_{\text{T,maag}} \cdot H_{\text{maag}} =$

$$= 0.20 * 2000 + 0.12 * 200 = 400 + 24 = 424 \mu\text{Sv}$$

Effectieve dosis

Vraag 16 :

De effectieve dosis is:

- a. De equivalente dosis voor het orgaan, maal de weefselweegfactor voor dat orgaan
- b. De som van de gewogen effectieve doses voor alle organen (gewogen met de weefselweegfactor)
- c. Als b), maar dan alleen voor de bestraalde organen
- d. Als b), maar dan de som van de gewogen equivalente doses voor alle organen.

Oude eenheden

- **geabsorbeerde dosis** (voor alle materialen)
 - Rad: “radiation absorbed dose”
 - $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

- **equivalente dosis** (voor weefsels)
 - Rem: “röntgen equivalent man”
 - $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

Weefselweegfactor w_T

Vraag 17 :

De weefselweegfactor is een maat voor:

- a. De relatieve gevoeligheid van het orgaan voor stochastische (kansgebonden) effecten
- b. Idem voor deterministische (niet-kansgebonden) effecten
- c. De door het orgaan geabsorbeerde hoeveelheid straling
- d. De gewogen dichtheid van het orgaan
- e. De soort straling (α , β , γ , ...)

6

Effecten van straling

stochastische en deterministische effecten

Hfst. 6. Effecten van straling

6.2. Effecten op moleculair en cellulair niveau	<ul style="list-style-type: none">•radicalen (H^+ en OH^-)•DNA-beschadiging, mutatie•afwijkingen celdeling•geslachtscellen → schade nageslacht		
6.3. Effecten op de mens	<table><tr><td><u>deterministisch</u><ul style="list-style-type: none">•>1 Sv•direct;•niet-kansgebonden•drempeldosis•ernst evenredig dosis•kans = 100 %</td><td><u>stochastisch</u><ul style="list-style-type: none">•>≈ 0,2 Sv•laat (>≈10 jaar)•kansgebonden•geen drempeldosis•kans evenredig dosis•ernst = 100 %</td></tr></table>	<u>deterministisch</u> <ul style="list-style-type: none">•>1 Sv•direct;•niet-kansgebonden•drempeldosis•ernst evenredig dosis•kans = 100 %	<u>stochastisch</u> <ul style="list-style-type: none">•>≈ 0,2 Sv•laat (>≈10 jaar)•kansgebonden•geen drempeldosis•kans evenredig dosis•ernst = 100 %
<u>deterministisch</u> <ul style="list-style-type: none">•>1 Sv•direct;•niet-kansgebonden•drempeldosis•ernst evenredig dosis•kans = 100 %	<u>stochastisch</u> <ul style="list-style-type: none">•>≈ 0,2 Sv•laat (>≈10 jaar)•kansgebonden•geen drempeldosis•kans evenredig dosis•ernst = 100 %		
6.4 Deterministisch	<ul style="list-style-type: none">•zie tabel boek		
6.5. Kansgebonden	<ul style="list-style-type: none">•lineaire dosis-effect-relatie•tumor-inductie; kans: 5 % per Sv (algemeen) ; rad.werkers: 4 % per Sv•latente periode•gonadendosis (op geslachtscellen)		
6.6. Effecten nageslacht	<ul style="list-style-type: none">•mutageen effect•gonadendosis•kans ernstige afwijkingen < 0.8 % per Sv•verdubbelingsdosis		
6.7 Effecten ongeboren kind	<ul style="list-style-type: none">•fasen zwangerschap; effect op IQ.		

Stralings schade

<i>Soort straling</i>	<i>Doordringend vermogen</i>	<i>Waar schade?</i>	<i>Effect</i>
Deeltjes (α , β)	Gering ($< \approx$ cm's)	Alles \approx ter plekke	Inwendig (besmetting)
Fotonen (Rö, γ)	Groot (meters)	Gespreid over volume	Uitwendig (bestraling)

^{131}I zendt zowel β 's (electronen) als γ 's uit.

- β 's : dracht in weefsel: ≈ 0.3 cm max. \rightarrow alleen schildklier
- γ 's : halveringsdikte in weefsel: ≈ 30 cm \rightarrow omgeving

Stralingschade op moleculen en cellen

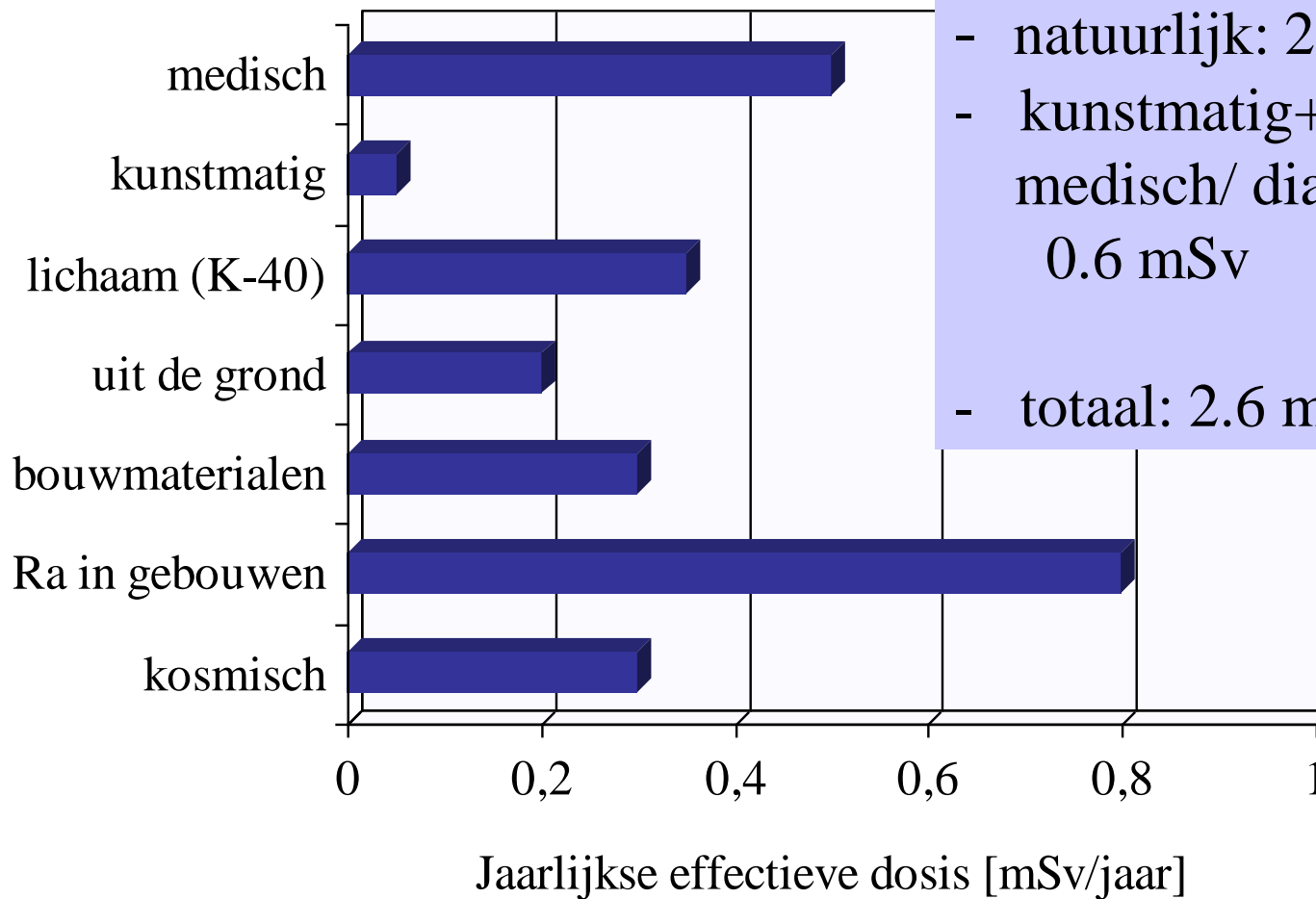
- **ontstaan radicalen:** $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^\bullet + \text{OH}^\bullet \rightarrow$
DNA-schade
- **effecten op cel:**
 1. Herstel → niet gevaarlijk
 2. Mutatie / schade → gevaarlijk
 3. Celdood (apoptose) → niet gevaarlijk
- **effecten op de mens:**
 1. Kansgebonden (stochastisch)
 2. Niet-kansgebonden (deterministisch)

Effecten van straling

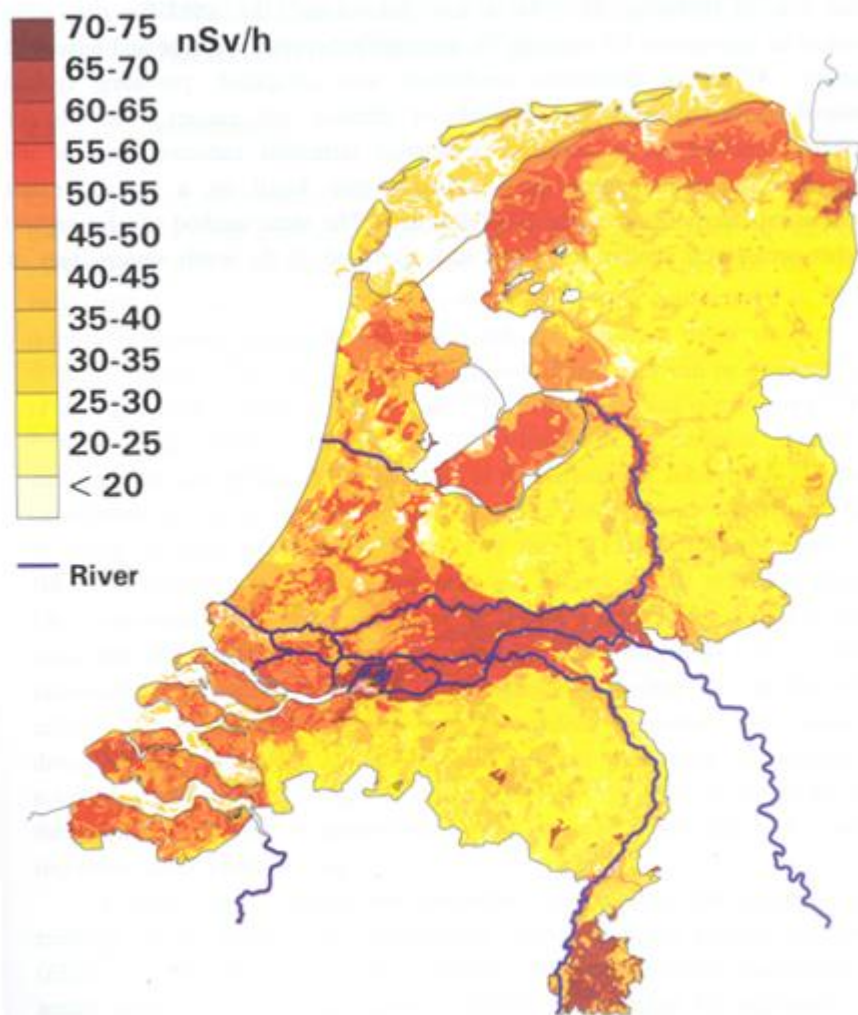
soort effect	kans	ernst	dosis	voorbeeld
Kansgebonden (afh. toeval, kans)	afh. dosis	100 %	alle	Leukemie, genetisch(?)
Deterministisch ("zeker")	100 % +drempel !!	afh. dosis	$> \approx 1 \text{ Sv}$	Zie onder

Deterministische effecten:	Dosis (Sv)	Sterftekans
Cataract (staar)	> 0.5	--
Tijdelijke steriliteit	> 1	--
"Beenmergsyndroom" (bloedcellen)	> 2	$< 50\%$ in < 1 maand
Stralingsziekte (misselijk....)	> 3	$> 50\%$ in < 1 maand
"Maag-darm-syndroom"	> 10	< 1 week
"Centraal-zenuwstelsel-syndroom"	> 50	< 1 dag

Gemiddelde natuurlijke stralingsbelasting in Nederland per jaar



- natuurlijk: 2.0 mSv
- kunstmatig+ medisch/ diagnostisch: 0.6 mSv
- totaal: 2.6 mSv



Stralingsniveaus uit de bodem



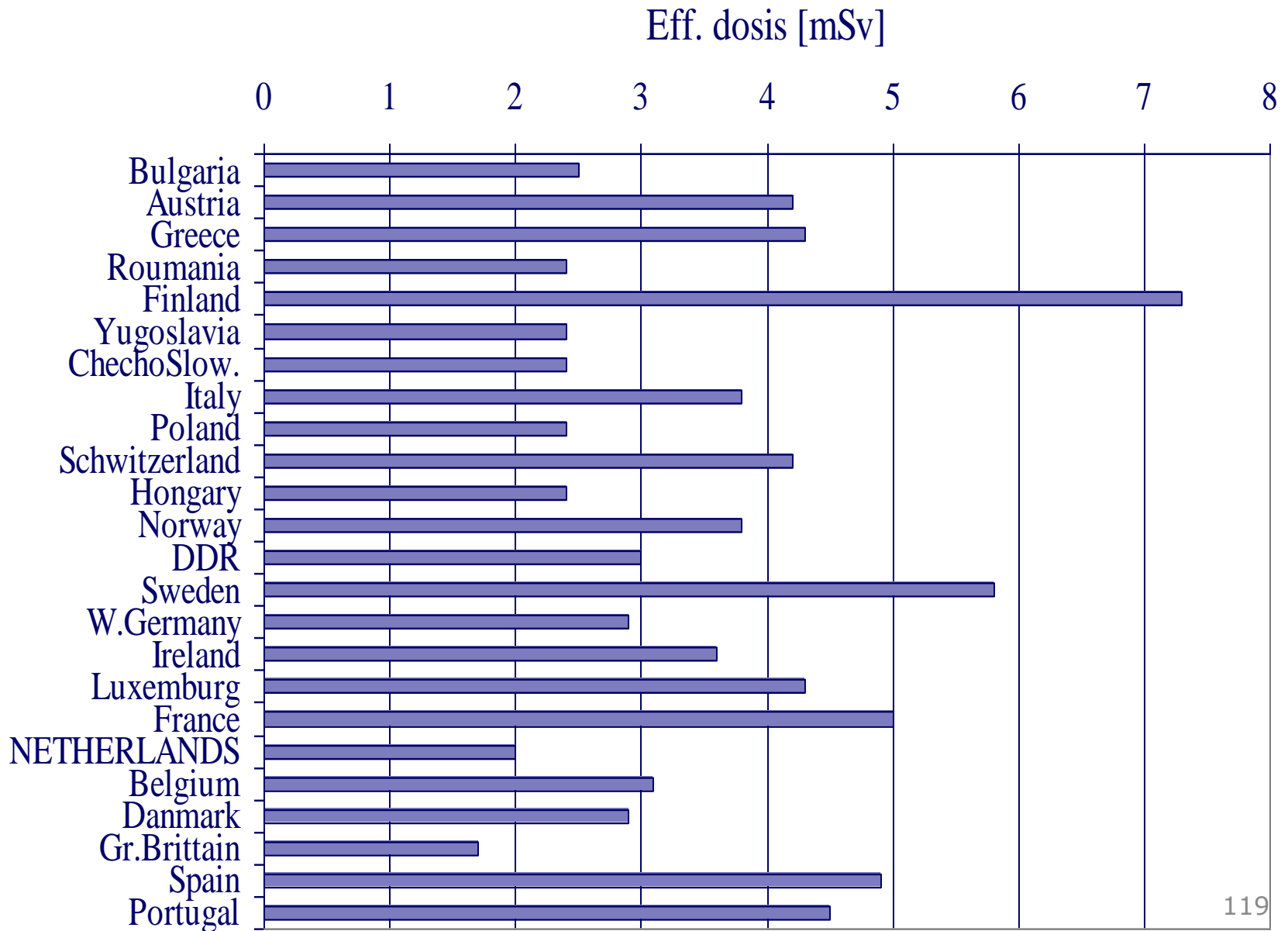
0.2 mSv/jaar



0.7 mSv/jaar

Figure 6.19B Terrestrial radiation map (ambient dose rate at 1-m height) derived from the 1:250.000 soil map [Stl85], using conversion parameters as given in Appendix 2.

Gemiddelde jaarlijkse dosis door natuurlijke straling



Voorbeelden van achtergrondstraling

•Lokatie / activiteit	Gemiddelde dosis per jaar	
•Wonen in Nederland	2	mSv
•Wonen in Finland	7	mSv
•Wonen in Guarapari (Brazilië)	15	mSv
•Wonen in Madras (India)	16	mSv
•Geneeskrachtige bronnen Ramsar (Iran)	200	mSv
•Max activiteit strand Guarapari (Brazilië)	790	mSv
•2 weken wintersport	0,03	mSv
•Gevolgen Tsjernobyl (1986)	0,05	mSv
•Vliegretour New York	0,06	mSv
•Astronaut Skylab (90 dagen)	100	mSv

Klinische toepassingen: gemiddelde effectieve dosis (mSv)

bron: Informatiesysteem Medische Stralingstoepassingen (RIVM)

Doorlichting/contrast

Colon	5.8
DDP (dunne darm passage)	5.2
Defaecogram	1.6
IVP (nier)	2.9
Oeso/maag	4.3
ERCP (alvleesklier/galwegen)	2.6
Oeso (slokdam)	1.7
MCUG (blaas/urine)	0.8
Video-oeso	0.8
HSG (baarmoeder/eileiders)	1

CT

abdomen	11
thorax	5.5
hoofd/schedel	1.2
wervelkolom	5
bekken	7.4
geleide interventies	8
overig	6

Hand/bucky

LWK 2R (lumbale wervelk.)	0.4
heup 2R	0.5
bekken 1R	0.3
thorax 2R	0.1
BOZ 1R (buikoverzicht)	0.4
BDZ 2R (buikoverzicht)	0.6
TWK 2R (thoraciale wervelk.)	0.3
bovenbeen 2R	0.3
thorax bed 1R	0.02

niet-CT

angiografie: doorl./contrast	7
id. Coronair	5
id. Overig	12
hand/bucky	0.13
interventies: overig	5.3
X-thorax	0.04
mammo	0.35

Effecten van straling

- **Stochastisch:**

Persoonlijke kans op fatale tumoren: **5 % per Sv**

(NB. Voor werknemers: 4 % per Sv)

- **Dus:** bij 2 mSv/jaar (= natuurlijke dosis):

persoonlijke kans per jaar: $0.002 \times 5 \% = \mathbf{0,010 \%}$

dus: 1 geval op 10.000 personen, per jaar

- **Nederlandse bevolking:**

16.000.000 = 1600 x 10.000 personen

Dus jaarlijks **1600** doden door natuurlijke straling!

(maar dit is “statistisch” gesproken)

Effecten van straling

Nederlandse bevolking:

$16.000.000 = 1600 \times 10.000$ personen

Dus jaarlijks **1600** doden door natuurlijke straling!

(maar dit is “statistisch” gesproken).

Andere oorzaken:

- Stel gemiddelde levensduur = 80 jaar.
- Per jaar sterven $16.000.000/80 = 200.000$ personen
- Hiervan 20 % door fatale tumoren = **40.000** personen per jaar.

Effecten van straling

Effecten op nageslacht:

- Verdubbelingsdosis (≈ 1 Gy voor β en γ)
- Wel aangetoond bij proefdieren, niet bij mensen

Effecten op ongeboren kind:

- Week 1-2: **pre-implantatie**: kans op sterfte
- Week 2-6: **orgaanaanleg**: kans op orgaanschade
- Daarna: **foetale ontwikkeling**: kans op groei- en functiestoornissen
- Week 8-25: **hersenen**: mentale retardatie
(-25 IQ-pt / Gy)

7

Regelgeving

rechtvaardiging, ALARA, limieten

Hfst. 7. Regelgeving

7.1. Terminologie

7.2. Systeem

dosisbeperking:

uitgangspunten:

• rechtvaardiging (7.3)

• optimalisering (ALARA)
(7.4)

• limieten (7.5):

7.6 . Wet- en regelgeving

• Vrijstellingsgrenzen

• Vergunningen (Rö)

• Gecontr./bewaakte zone

• limieten:

• Blootgestelde werknemers:

- **A** ○ **20 mSv/jr**
- **B** ○ **6**
- **C (?)** ○ **1**
- **huid/hand/voet** ○ **500 ..**
- **oog lens** ○ **150 ..**

• **studenten 16-18 jr.**

• **6 ..**

• **anderen (bevolking)**

• **1 ..**

• **foetus**

• **1 ..**

• **levensreddend**

• **750 mSv.**

Internationaal

• **ICRP, Euratom**

Nationaal

• **Kernenergiewet (KEW)**

• **Besluit Stralenbescherming (BS)**

• **Zie tabel 7.1**

• **Rö-toestellen**

• **$E > 6$ resp. $1 < E < 6$ mSv**

Systematiek van de dosisbeperking

- **Systematiek in stappen:**

1. **Rechtvaardiging**

(zijn er geen ongevaarlijke alternatieven?)

2. **ALARA**

(“as low as reasonably achievable”)

3. **Limitering**

(jaarlimieten: voor medewerkers en bevolking, niet voor patiënten!)

Stralingsbelasting: limieten

•Dosislimieten: per jaar:

- Blootgestelde werknemers: A-categorie: 20 mSv
- Idem: B-categorie: 6 mSv
- Idem: C-categorie (nieuw?): 1 mSv

- Andere werknemers en bevolking: 1 mSv

- Zwangeren na melding zwangerschap: 1 mSv

- NB. Natuurlijke stralingsbelasting in Ned.: 2 mSv

Stralingsbelasting: ruimten

•Indeling ruimten:

-Gecontroleerde zone: $> 6 \text{ mSv/j}$

-Bewaakte zone: $1..6 \text{ mSv/j}$

8

Veiligheid ingekapselde bronnen en Röntgentoestellen

Hfst. 8. Veiligheid bij ingekapselde bronnen en Röntgentoestellen

8.1. Inleiding

- tijd
- afstand
- afscherming
- persoonlijke bescherming

8.2. Veiligheidsmaatregelen bij ingekapselde bronnen

- organisatorisch:
 - = meting dosistempo
 - = lekkage: veegproef < 185 Bq
 - = administratie
- werkplek
- industrieel
 - = afzetting: $2\mu\text{Sv/h}$
 - = bronhouder:
 - oppervlak: < 2mSv/h
 - 1 m afstand: < 0.1 mSv/h
 - bestuurder: < $8\mu\text{Sv/h}$

8.3. Idem, extra bij Röntgenapparatuur

- apparaat-instelling
- tijd / afstand / afscherming
- persoonlijke bescherming
- strooistraling

9

Dosisberekeningen in de praktijk

bestraling en besmetting; kwadratenwet, vuistregels.

Hfst. 9. Dosisberekening in de praktijk

9.1. Dosis t.g.v. uitwendige bestraling: kwadratenwet

$$D = \Gamma A t / r^2$$

- Kwadratenwet; bronconstante
- Vuistregels voor β - en γ -straling

- β : \dot{D} [$\mu\text{Gy}/\text{h}$] = 100.A [MBq]
- γ : \dot{D} [$\mu\text{Gy}/\text{h}$] = 2.A [MBq]

9.2. Volgdosis t.g.v. inwendige besmetting

$$E(50) = e(50) \cdot A$$

- inname: ingestie / inhalatie / huid
- $E(50)$: effectieve volgdosis [Sv]
- $e(50)$: eff. volgdosiscoefficient
[Sv/Bq]
- ook: DCC : dosisconversiecoefficient
- A : activiteit [Bq]
- vuistregel voor vlakke β -bron:
→ 2 mGy/h bij besmetting 1 kBqcm²

9.3. Dosis t.g.v. uitwendige besmetting

Besmetting en Bestraling

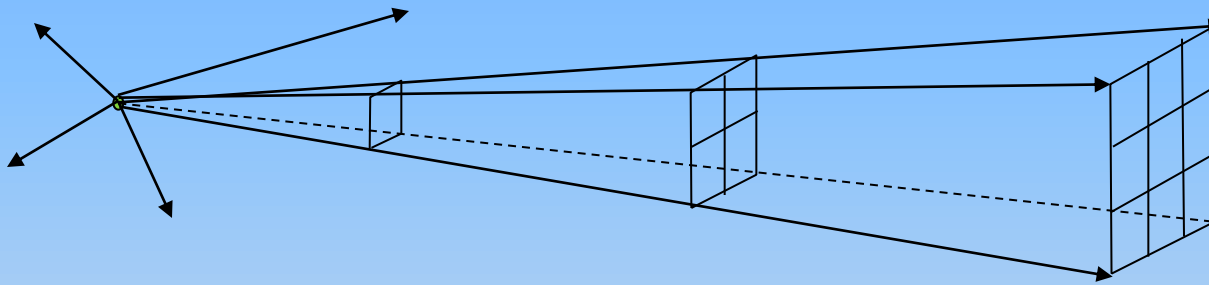
Welke mogelijkheden voor stralings schade zijn er?

1. Uitwendige bestraling
2. Inwendige besmetting
3. Uitwendige besmetting

1. Uitwendige bestraling (“puntbron”)

Equivalente dosis H : [Sv] is evenredig met:

- \sim Activiteit [Bq]: (2 x activiteit \rightarrow 2 x zoveel schade)



Schade
verspreid
over 4x..9x
zo groot
oppervlak

- $\sim 1/$ (afstand tot bron)² (2 x zo veraf \rightarrow 4 x zo weinig)
(3 x zo veraf \rightarrow 9 x zo weinig)
- \sim tijd

kwadratenwet

- 2 x zo ver: dosis $\frac{1}{4}x$
- 2 x zo dichtbij: dosis $4x$

1. Uitwendige bestraling

Equivalentente dosis H : [Sv] is afhankelijk van

\sim Activiteit A [Bq]

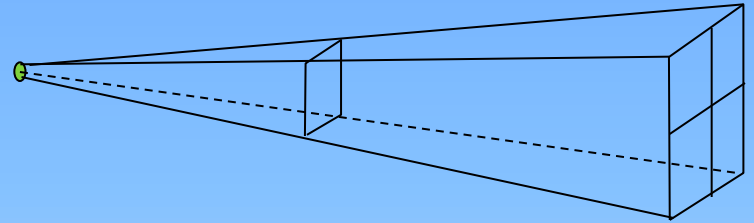
(2x zo veraf \rightarrow 4 x zo weinig)

$\sim 1/$ (afstand r tot bron)²

\sim transmissie afscherming T

= afh. nuclide
(soort straling, $T_{1/2}$, energie..)
"bronconstante" Γ

\sim tijd t



kwadratenwet

$$D = T \cdot \Gamma \cdot \frac{A}{r^2} t$$

1. Uitwendige bestraling, voorbeeld

Vraag 18: Wat is beter?

- De werktijd 8 x zo kort nemen
- De afstand 3 x zo groot nemen
- 20% van de activiteit gebruiken?

- a: dosis = $1/8$
- b: dosis = $1/9$ ($=1/3^2$)
- c: dosis = $1/5$

1. Uitwendige bestraling

Effectieve dosis D : [Sv]

kwadratenwet

Dit leidt tot **vuistregels** (“mega-micro-regels”):

Op 30 cm afstand, zonder afscherming, geldt:

$$\beta: \quad D \quad [\mu\text{Sv/h}] \quad = \quad 100 \quad A \quad [\text{MBq}]$$

$$\gamma, \text{Rö}: \quad D \quad [\mu\text{Sv/h}] \quad = \quad 2 \quad A \quad [\text{MBq}]$$

1. Uitwendige bestraling, voorbeeld

Wat is gevaarlijker?

1 uur op 3 m afstand van een β -bron van 100 MBq, geen afscherming, of
1 dag op 1.5 m afstand van een γ -bron van 100 MBq, afscherming 50 %?

- a. Niet te bepalen, want het nuclide is niet bekend.
- b. De β -bron
- c. De γ -bron
- d. Gelijk

Vuistregels ("mega-micro-regels"):

Op 30 cm afstand, zonder afscherming:

$$\beta: \quad D \quad [\mu\text{Sv/h}] = 100 \quad A \quad [\text{MBq}]$$

$$\gamma, \text{Rö}: \quad D \quad [\mu\text{Sv/h}] = 2 \quad A \quad [\text{MBq}]$$

Antwoord: b).

$$\beta: 100 \times 100 \times (1/10)^2 \times 100\% \times 1 \text{ h} = 10000 / 100 \times 1 \times 1 = 100 \mu\text{Sv}$$

$$\gamma: 2 \times 100 \times (1/5)^2 \times 50\% \times 24 \text{ h} = 200 / 25 \times 0.5 \times 24 = 96 \mu\text{Sv}$$

1. Uitwendige bestraling, voorbeeld

Vraag 19 :

Voor een bron met een bepaalde γ -energie levert 5 mm lood een verzwakking van 50 %. Men moet echter een verzwakking tot 10 % bereiken. Er is 10 mm lood beschikbaar. Welke van onderstaande maatregelen zult u nemen?

- a. die 10 mm lood zijn voldoende
- b. 10 mm lood en verdubbeling van de afstand
- c. 5 mm lood en verdubbeling van de afstand
- d. geen lood, maar drie keer zo grote afstand

1. Uitwendige bestraling (“puntbron”)

Voorbeeld: Uitwendige bestraling met ^{131}I .

Een patiënt krijgt 1 GBq = 1000 MBq toegediend = **1 GBq**.

Een behandelaar staat **1 minuut** op **1 m** afstand.

1. Hoeveel bedraagt zijn/haar dosis(equivalent) in Sv?

2. Is dit gevaarlijk?

Voor ^{131}I geldt: dosis = 0.066 $\mu\text{Sv/h}$ per MBq op 1 m afstand

Dus: dosis = **0.066 mSv** voor 1 **GBq** voor 1 u op 1 m.

dosis = 0.066 mSv voor 1 GBq voor **60 min** op 1 m.

dosis = **$0.066 \times \frac{1}{60}$** mSv voor 1 GBq voor **1 min** op 1 m.

dosis = **0.0011** mSv voor 1 GBq voor 1 min op 1 m.

(vgl. Natuurlijke achtergrond = 2 mSv/jaar)

1. Uitwendige bestraling (“puntbron”)

(Voor ^{131}I geldt:

bronconstante = 0.066 μSv per uur per MBq op 1 m afstand.)

Stel Activiteit A = 1 GBq = 1000 MBq

dosis = **0.066 mSv** voor 1 u voor **1 GBq** op 1 m afstand.

Vraag: hoelang op **1 m** afstand vóór je 1 mSv krijgt?

Antwoord: $\frac{1 \text{ mSv}}{0.066 \text{ mSv}} \times 1 \text{ uur} \approx \mathbf{15 \text{ u}}$ (continu).

(vgl. Jaardosislimieten: A, B, C: 20, 6, 1 mSv)

(vgl. Natuurlijke achtergrond = 2 mSv/jaar)

1. Uitwendige bestraling: ^{131}I : ontslagnorm

(Voor ^{131}I geldt:
bronconstante = $0.066 \mu\text{Sv/h}$ per MBq op 1 m afstand).

De **ontslagnorm** voor patiënten is: $20 \mu\text{Sv/h}$ op 1 m.

Hoe groot is dan nog de activiteit in de patiënt?

dosistempo = $0.066 \mu\text{Sv/h}$ op 1 m geldt voor 1 MBq

$20 \mu\text{Sv/h}$ op 1 m is dan voor **$20/0.066 = \underline{300 \text{ MBq}}$**

Bij een inname van 1 GBq en
een effectieve halveringstijd van 7 dagen is dit na ≈ 9 dagen.

Maar een groot deel (70%) wordt direct uitgescheiden.

Daardoor **verblijftijd** (tot ontslagnorm bereikt) $\rightarrow 3 \text{ à } 4$ dagen.

1. Uitwendige bestraling: ^{131}I : stralingsbelasting omgeving

(Voor ^{131}I geldt:
bronconstante = $0.066 \mu\text{Sv/h}$ per MBq op 1 m afstand).

De **ontslagnorm** voor patiënten is: $20 \mu\text{Sv/h}$ op 1 m.

Vraag: Hoelang kan een huisgenoot **continu** in de buurt blijven
voordat een dosis van 1 mSv wordt opgelopen?

$$\text{Op 1 m afstand: } \frac{1 \text{ mSv}}{20 \mu\text{Sv/h}} = \frac{1000 \mu\text{Sv}}{20 \mu\text{Sv/h}} = 50 \text{ h} = 2 \text{ dagen}$$

Op 2 m afstand: dosis $\frac{1}{4}$ x , dus $200 \mu\text{Sv} \approx 8$ dagen

Maar de activiteit neemt af met $T_{1/2} \approx 7$ dagen,
dus na 7 dagen nog $\approx 30\%$, dus tijdsduren ≈ 2 à 3 x zo lang.

2. Inwendige besmetting

1. Inname activiteit **A** [Bq]
 - via ingestie
 - via inhalatie
 - anders, bv. Injectie, via huid
2. Dosiscoëfficiënt **e(50)** [Sv/Bq] (*)
Internationaal getabelleerd voor elk nuclide
3. Equivalente jaardosis **E(50)** [Sv]

$$E(50) = e(50) \cdot A$$

4. Overschrijdt jaardosis de jaarlimiet?

(*) berekend over komende 50 jaar ¹⁴⁵

2. Inwendige besmetting, voorbeeld

$$E(50) = e(50) \cdot A \quad [Sv] = [Sv/Bq] \cdot [Bq]$$

Iemand morst 100 MBq ^{99m}Tc op een labtafel. Geschat wordt dat hij 1 % inademt en 10 % op zijn handen krijgt. In de consternatie vergeet hij zijn handen te wassen alvorens te gaan eten. Hoeveel kan de equivalente jaardosis bedragen?

- a. 22 μSv
- b. 240 μSv
- c. $22.2 \times 10^{-5} \text{ Sv}$
- d. 0.222 mSv

^{99m}Tc : $e(50)$ voor inhalatie = $2.0 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$
voor ingestie = $2.2 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$

Antwoord:

Inhalatie: $2.0 \times 10^{-11} \times 1\% \times 10^8 = 2 \times 10^{-5} \text{ Sv}$

Ingestie: $2.2 \times 10^{-11} \times 10\% \times 10^8 = \underline{22 \times 10^{-5}}$

Totaal: $24 \times 10^{-5} \text{ Sv} = 240 \mu\text{Sv}$, dus: **b**).

2. Inwendige besmetting, voorbeeld

$$E(50) = e(50) \cdot A$$

$$[Sv] = [Sv/Bq] \cdot [Bq]$$

Vraag 20:

Iemand drinkt in een C-lab, hoewel dit ten strengste verboden is, een glaasje water.

Het glas was echter besmet.

Er was **1 cm³** achtergebleven van een oplossing van **100 MBq/cm³** van een nuclide,

waarvan $e(50)$ voor ingestie = **$2 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$** .

Bepaal de effectieve dosis.

- a. 0.01 Sv = 10 mSv
- b. 0.002 Sv = 2 mSv
- c. 0.02 Sv = 20 mSv
- d. 0.2 Sv = 200 mSv

2. Inwendige besmetting, voorbeeld

Vraag :

Voor I-131 is de dosiscoëfficiënt voor ingestie (eten/drinken)

$$e_{\text{ing}}(50) = 2.2 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq.}$$

Stel een patiënt heeft **1 GBq** toegediend gekregen

$$(= 10^9 \text{ Bq} = 1000 \text{ MBq}).$$

De behandelaar krijgt per ongeluk **0.01 %** hiervan binnen, hoewel dit hoogst onwaarschijnlijk is.

Wat is zijn/haar stralingsbelasting en is dit gevaarlijk?

Antwoord:

$$\mathbf{1 \text{ MBq}} \text{ levert } 10^6 \times 2.2 \times 10^{-8} \text{ Sv} = 2.2 \times 10^{-2} = \\ 0.022 \text{ Sv} = \mathbf{22 \text{ mSv}.}$$

Dus aan patiënt (1 GBq): **22 Sv**

$$0.01 \% \text{ daarvan is } 1/10000 \text{ deel} = 0.0022 \text{ Sv} = \mathbf{2.2 \text{ mSv}.}$$

Dit is lager dan de max. jaardosis

voor A- resp. B-werkers (= 20 resp. 6 mSv)

Besmetting en Bestraling, voorbeeld

Vraag 21:

In een laboratorium wordt een uitgebreide besmetting over meerdere m² geconstateerd met een vloeibaar nuclide (zachte β 's; $T_{1/2} = 10$ min.). Wat moet men doen?

- a. Alle besmette apparatuur en meubilair in het laboratorium volgens de regels schoonmaken.
- b. Het laboratorium gedurende een etmaal (24 uur) afsluiten.
- c. Het laboratorium gedurende een etmaal zeer goed ventileren.
- d. De besmette apparatuur afvoeren als radioactief afval.

2. Inwendige besmetting, voorbeeld

Voorbeeld:

Iemand krijgt van een nuclide een activiteit binnen van

$$A = \mathbf{100\ MBq} (= 100 \times 10^6 = 10^8 \text{ Bq})$$

Voor dit nuclide geldt dat 1 Bq een belasting van

$$\mathbf{5 \times 10^{-10} \ Sv} \text{ oplevert (uit de internationale tabellen).}$$

- Hoe groot is de effectieve dosis E (in Sv)?
- Is dit toegestaan (de persoon is een A-medewerker (jaarlimiet 20 mSv)?

Uitwerking:

a) $5 \times 10^{-10} \times 10^8 = 5 \times 10^{-2} = 0.05 \text{ Sv} = \mathbf{50 \ mSv}.$

b) Dit is meer dan zijn limiet. Niet toegestaan dus.

3. Uitwendige besmetting

Vuistregel voor uitwendige β - besmetting:
dosistempo = 2 mSv/h bij besmetting van 1 kBq/cm²

Vraag: Bij het hanteren van een injectiespuit met **40 MBq** ¹³¹I krijgt de medewerker **10 %** op de hand. Geschat wordt dat een oppervlakte van **5 cm²** besmet is. Pas na een kwartier kan de medewerker de handen schoonmaken.

Hoeveel is dan de maximale dosis?

Antwoord:

- $10\% \times 40.000 \text{ kBq op } 5 \text{ cm}^2 = 4000 / 5 = 800 \text{ kBq/cm}^2$.
- $800 \text{ kBq/cm}^2 \times (2 \text{ mSv/h per kBq/cm}^2) = 800 \times 2 = 1600 \text{ mSv/h}$
- Een kwartier lang: $1600 \text{ mSv/h} \times \frac{1}{4} \text{ h} = \mathbf{400 \text{ mSv}}$.

Veel te veel!!!

10

Veiligheid open bronnen

Hfst. 10. Veiligheid bij open bronnen.

10.1. Inleiding

10.2. Organisatorisch

4 V's

10.3. Verminderen hoeveelheid

10.4. Voorkomen verspreiding

Containment

10.5. Verwijderen luchtactiviteit

Zuurkast

10.6. Verhinderen opname

10.7. Controle en decontaminatie

Besmettingsgrens: 4 Bq/cm²

10.8. Specifieke onderwerpen:

- Richtlijn Radionucl.Laborat.
maximaal toegestane
werkhoeveelheid A_{max}
- Annual Limit on Intake
(ALI)
- Effectieve dosiscoëfficiënt
(dosisconversiecoëfficiënt)
 $e(50)$
- Jodium / Tritium / Eiwitten /
Diversen uitwendig / Patiënten

- p : verspreidingsparameter
 - q : klasseparameter
 - r : lokale ventilatieparameter:
 $r \leq q$
- $e(50)_{inh} = DCC_{inh}$ (inhalatie)

$$ALI [Bq] = \frac{0,02 [Sv]}{e(50) [Sv / Bq]}$$

Veiligheid in het laboratorium

Maximaal
toegestane
werkhoeveelheid:

$$A_{\max} = \frac{0,02 \times 10^{p+q+r}}{DCC_{inh}} \quad [\text{Bq}]$$

- 0,02 Sv = 20 mSv = max. dosis/jaar voor A-medewerkers
- p : maat voor toestand en activiteit (bv. vluchtig/vloeibaar/vast/poeder; mengen/schenken/injecteren)
- p = -4 ... -1 (gevaarlijker → lagere p-waarde)
- q: soort laboratorium: B, C, D: q = 3, 2, 1.
- r: ventilatie: op tafel (0), zuurkast (1-2), gesloten werkkast (3)
- $DCC = e(50)_{inh}$ = dosiscoëfficiënt voor inhalatie [Sv/Bq]

Veiligheid in het laboratorium

Maximaal
toegestane
werkhoeveelheid:

$$A_{\max} = \frac{0,02 \times 10^{p+q+r}}{DCC_{inh}}$$

- Vraag: Hoeveel activiteit mag men van het nuclide ^{226}Ra :
- a) Optrekken in spuit op tafel in een C-laboratorium?
- b) als poeder mengen met plaatselijke afzuiging in een B-lab?
- c) centrifugeren in een goede zuurkast in een C-lab?
- NB. $DCC = e(50) = 1.2 \times 10^{-5} \text{ Sv/Bq}$ (tabel 9-2)

Antwoord:

a) $p = -1, q = 2, r = 0 \Rightarrow A_{\max} = 16666 \text{ Bq} = 17 \text{ kBq}$.

b) $p = -4, q = 3, r = 1 \Rightarrow A_{\max} = 1,7 \text{ kBq}$

c) $p = -3, q = 2, r = 2 \Rightarrow A_{\max} = 17 \text{ kBq}$

Veiligheid in het laboratorium

- Vraag: De ALI is de hoeveelheid activiteit (in Bq) die men jaarlijks maximaal mag innemen. Die hoeveelheid wordt beperkt door de jaarlimiet (in Sv).
- Een bepaald nuclide heeft een $DCC = e(50) = 3 \times 10^{-6}$ Sv/Bq. Bereken de ALI voor een blootgestelde werknemer (radiologisch werker A-categorie).
- Antwoord:
- Jaarlimiet = 20 mSv = 0.02 Sv.
- $DCC = e(50) = 3 \times 10^{-6}$ Sv/Bq; dus $ALI = 0,02 / DCC = 6667$ Bq (eigenlijk: Bq/jaar)

Categorie-indeling personeel

Soort personeel	Categorie tot 1000 MBq I-131	Categorie vanaf 1000 MBq I-131	Categorie overige nucliden
Dosisbereidend personeel	B	A	B
Dosistoedienend personeel	B	A	B
Personeel nucleaire geneeskunde	B	B	B
Verplegend/verzorgend personeel	-	B	-
Schoonmaakpersoneel	-	-	-
Overig personeel	-	-	-

Jaarlimieten: A: 20 - B: 6 - geen: 1 (mSv/j)

Jodium in het lichaam (patiënt)

Toediening (MBq)	Doel in Schildklier	Opname in	Uitscheiding	Belasting patiënt (mSv/MBq)
NaI Oraal 100-2000	Hyper-functie	schildklier	20-80 % via urine, < 24 u	Puntbron: Lichaam: 24 Schildklier: 360
NaI Oraal 4000-8000	Carcinomen metastasen	schildklier	95 % via urine, < 24 u	idem
I-MIBG Oraal 100-2000	Neuro- endocriene tumoren	Schildklier, spijsverte- ringsorganen	50 % via urine, < 24 u	Idem + Lever: 0.3 Beenmerg en lichaam: 0.1-0.6

¹³¹I : Mortaliteit van patiënten

Volgstudie (publ. 1998) met 7209 patiënten met hyperthyroidisme:
Gemiddelde dosis: 266 MBq (37..1850).

- Overleden op bepaalde datum: 3611
- Verwacht (controlegroep): 3186

Relatief risico: $3611/3186 = 1.17$

- man: 0.9-1.0
- vrouw: 1.1-1.2

<u>Aandoeningen:</u>	<u>rel.risico</u>
■ schildklier	24.8
■ endocrien, metabool	3.1
■ circulatie incl. hart	1.1-3.2
■ verwondingen, vergiftigingen	1.6
■ botbreuken	1.9
■ kanker en overige	1.0 (= geen stijging)

11

Radioactief afval

Hfst. 11. Radioactief afval.

11.1. Afvalstromen

- Vroeger: geen vergunning nodig als: $A < 100 \text{ Bq/g}$ (homogeen verdeeld),
- Nu: zie tabel 7.1

11.2. Inzamelen in laboratorium

- kortlevend :
na 1 jr: $< 100 \text{ Bq/g}$
- langlevend : opvangen
- vloeibaar afval
- telpotjes

11.3. Verwerking en opslag

- COVRA

11.4. Beperking afvalstromen

Antwoorden op de MC-vragen

1	d	11	b
2	d	12	b
3	a	13	b
4	a	14	f
5	a	15	a
6	c	16	d
7	b	17	a
8	b	18	b
9	b	19	b
10	c	20	c
		21	b

THE END