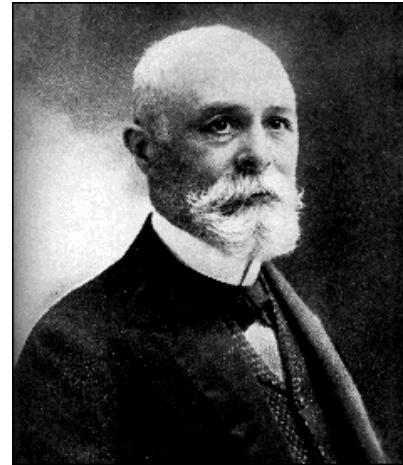


# Inleiding stralingsfysica

## *Historie*

- 1896:  
Henri Becquerel ontdekt het  
verschijnsel radioactiviteit
- 1895:  
Wilhelm Conrad Röntgen  
ontdekt Röntgenstraling



## *Wat maakt 'straling' gevaarlijk?*

- Dodelijke dosis Röntgenstraling: 10 J/kg
- Is 10 J/kg veel?
- Hoeveel warmt water op als je er 10 J/kg aan warmte instopt?
- $\Delta T = Q/C$  ( $C$ =warmtecapaciteit)
- Warmtecapaciteit van 1 kg water is  $4,2 \cdot 10^3 \text{ J/}^\circ\text{C}$
- Bij een dosis van 10 J/kg stijgt de temperatuur met  $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$
- Dat is niet veel!

## *Ioniserende straling:*

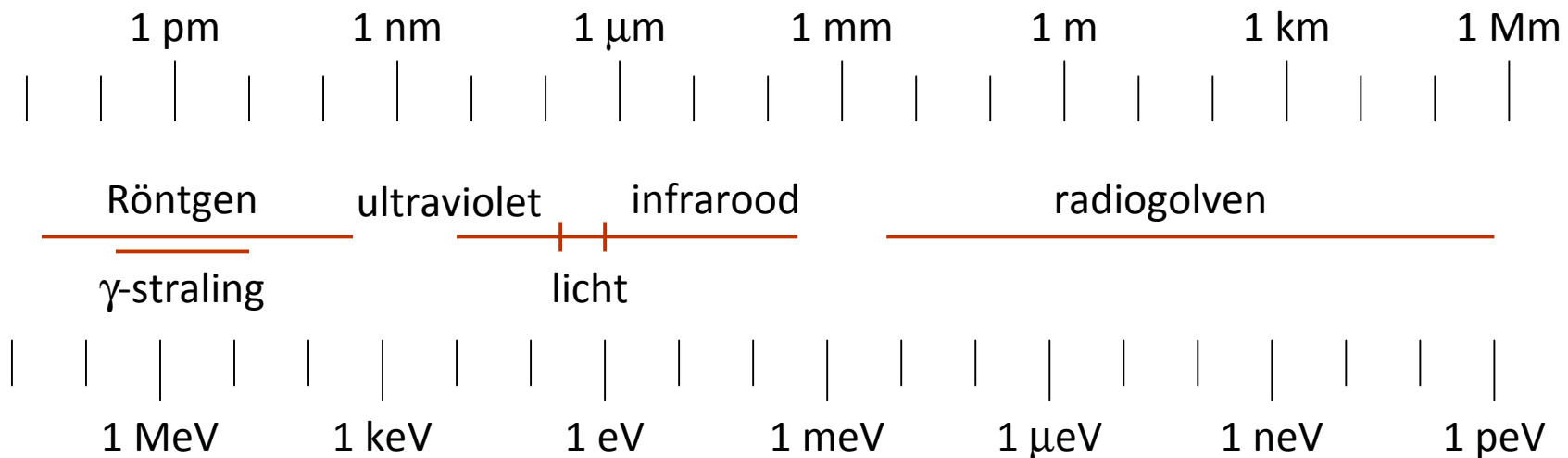
Straling die ionisaties veroorzaakt in het bestraalde medium

- Deeltjesstraling
  - Geladen deeltjes (elektronen, protonen etc)
  - Ongeladen deeltjes (neutronen etc)
- Elektromagnetische (EM) straling

NB: EM straling bestaat feitelijk ook uit deeltjes: fotonen (quantum mechanica: golf deeltje dualisme)

# Elektromagnetische straling

golflengte  $\lambda \rightarrow$



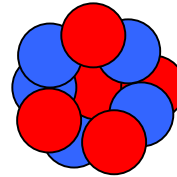
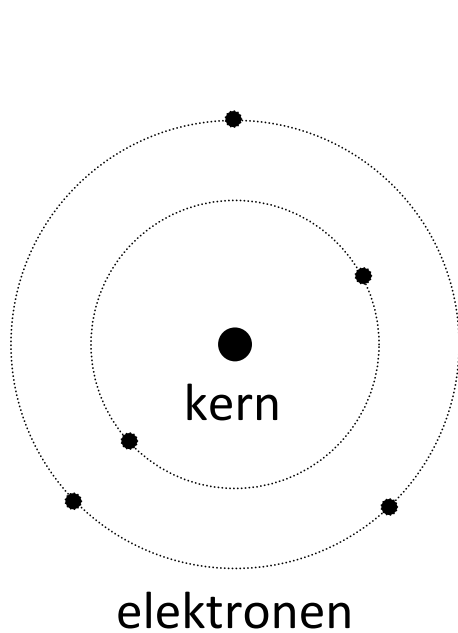
← fotonenergie  $E_f$

- fotonen uit kern:  $\gamma$ -straling
- (ioniserende) fotonen uit elektronenschil: röntgenstraling

golflengte  $\lambda = c / f$

energie  $E_{\text{foton}} = h f$

# Het atoom



kern



Proton massa: 1u  
lading: +1e



Neutron massa: 1u  
lading: 0



Elektron massa:  $0,5 \cdot 10^{-3} u$   
lading: -1e

## Karakteriseren kern

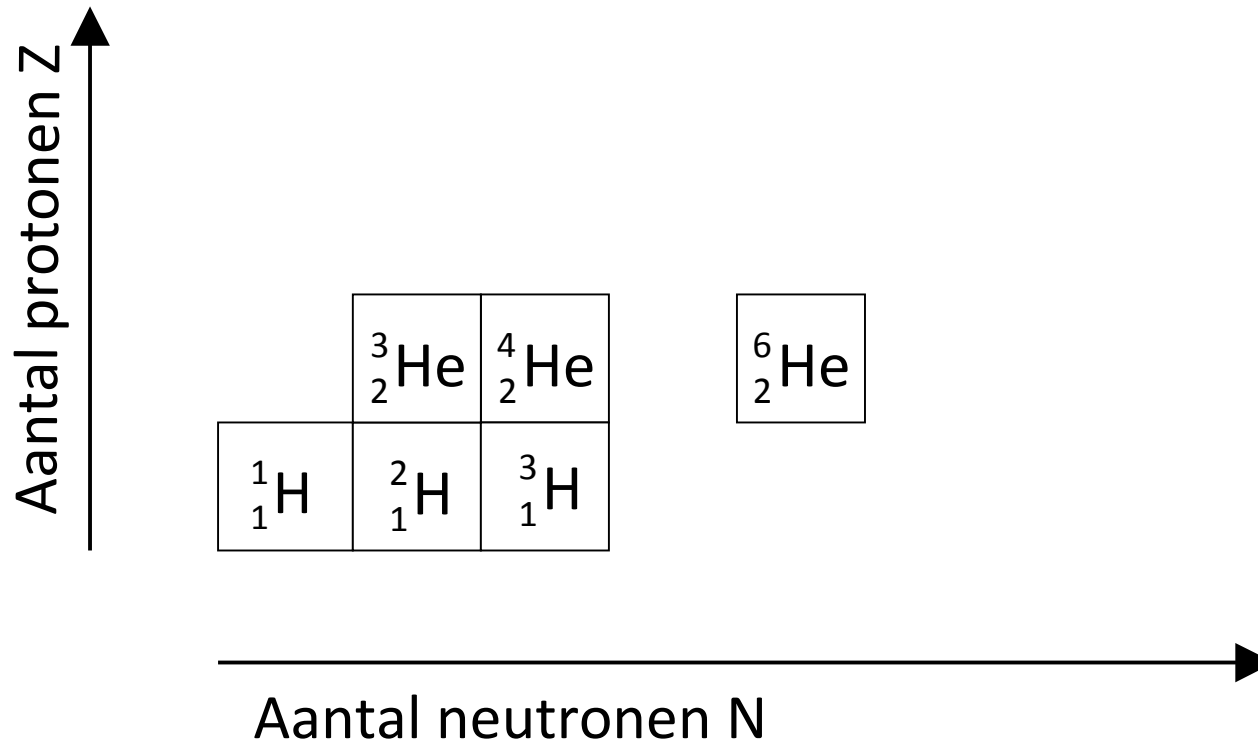
- Z: aantal protonen      *Atoomnummer*
- N: aantal neutronen
- A: Z+N                      *Massagetal*

Nuclide van element X met atoomnummer Z en massagetal A:  ${}^A_Z X$

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

- Z: bepaalt soort atoom
- Verschillende nucliden met zelfde Z en andere A heten *isotopen*

# Nuclidenkaart



## Radioactiviteit

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

Instabiele kernen vervallen onder uitzending van een radioactief deeltje

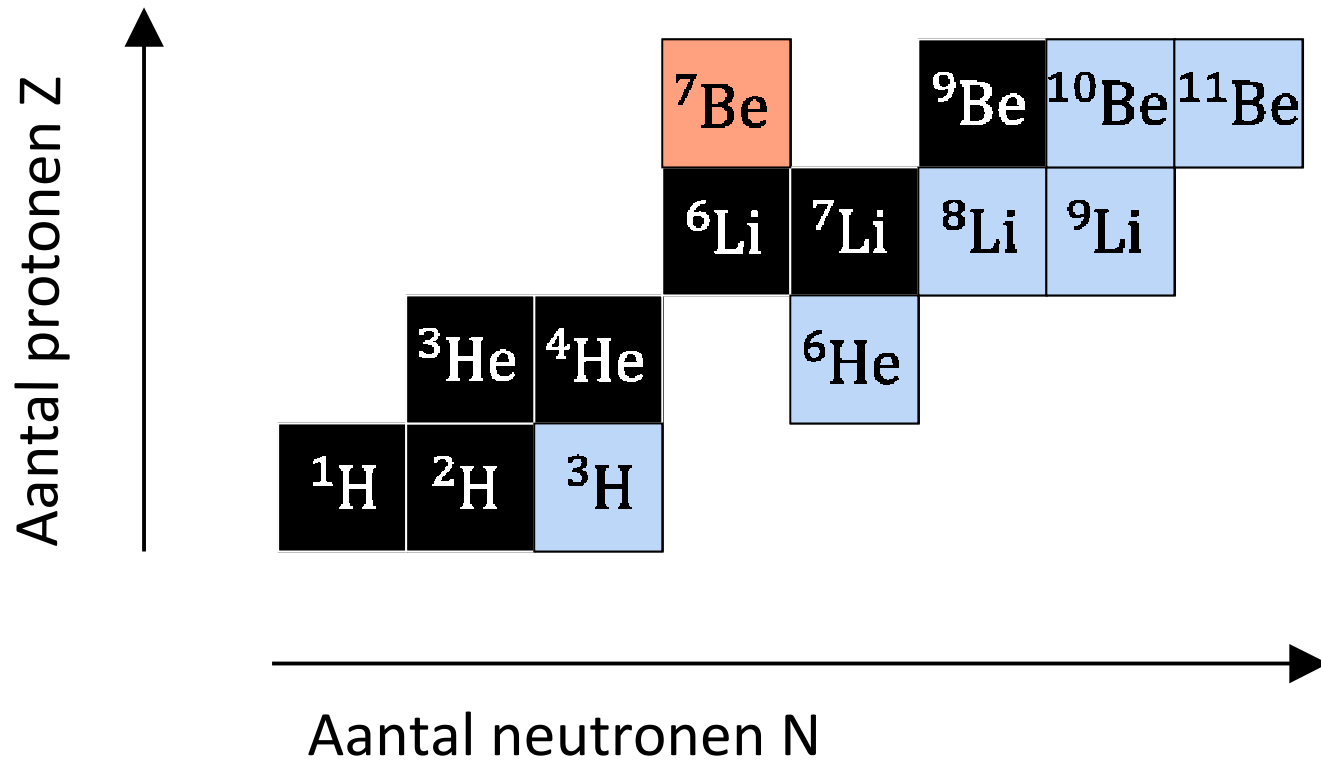
De *activiteit A* van een radioactief preparaat is het aantal kernen dat per seconde vervalt

Eenheid A: becquerel (Bq)

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



# Nuclidenkaart



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

Activiteit van een radioactief preparaat is evenredig met hoeveelheid preparaat

In formule:  $A = \lambda N$

N: aantal kernen in preparaat

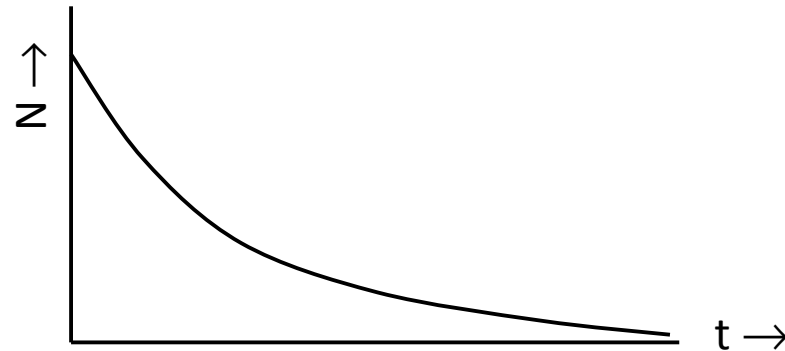
$\lambda$ : *vervalconstante* [ $s^{-1}$ ]

Voorbeeld:  $N=10^6$ ,  $\lambda=0,1$

Dus elke seconde vervalt 10% van de kernen

Vraag: zijn na 10 s alle kernen vervallen?

*Intuïtie:*



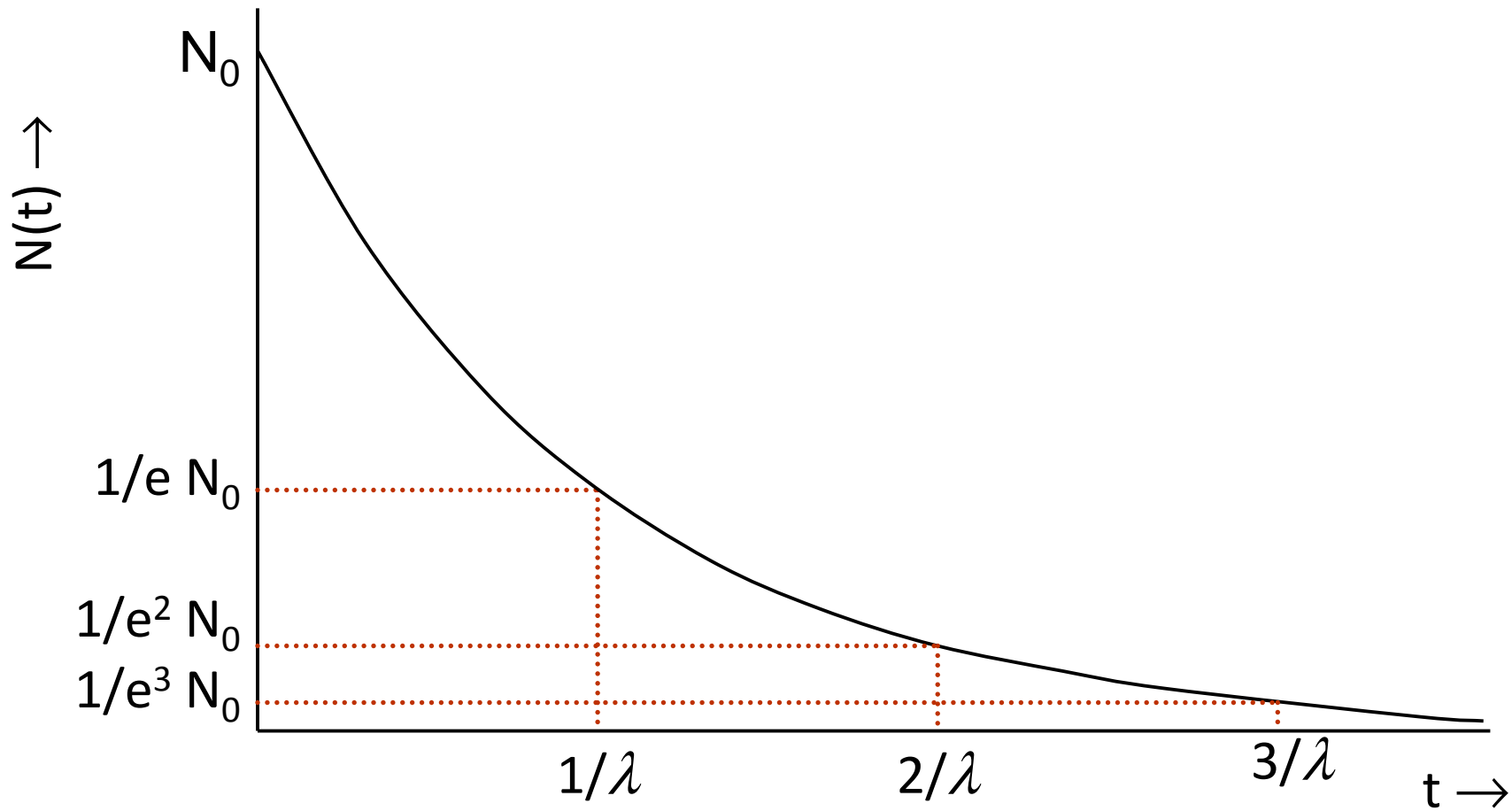
Elke seconde verdwijnen er  $A = \lambda N$  kernen, dus

$$\frac{d}{dt}N(t) = -\lambda N(t) \quad \left(\frac{d}{dt} \text{ is notatie voor "afgeleide van"}\right)$$

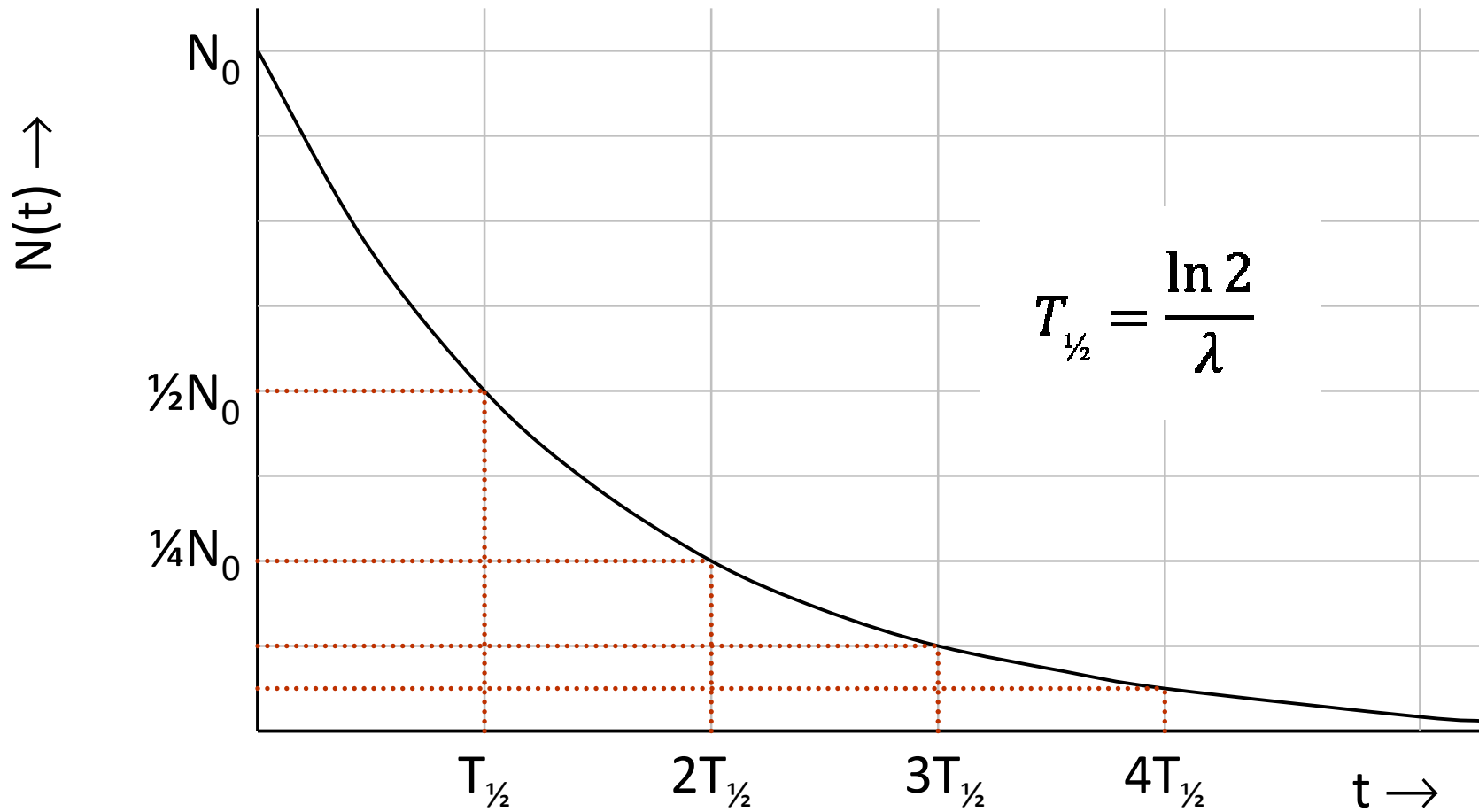
Dit is een *differentiaalvergelijking*

Oplossing:  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$  *Vervalwet*

Vervalwet  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$



Vervalwet  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$



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

Aantal kernen in preparaat:  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

Activiteit  $A$  evenredig met  $N$ :  $A(t) = \lambda N(t)$

$$A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

Voorbeeld:  $N=10^6$ ,  $\lambda=0,1\text{s}^{-1}$

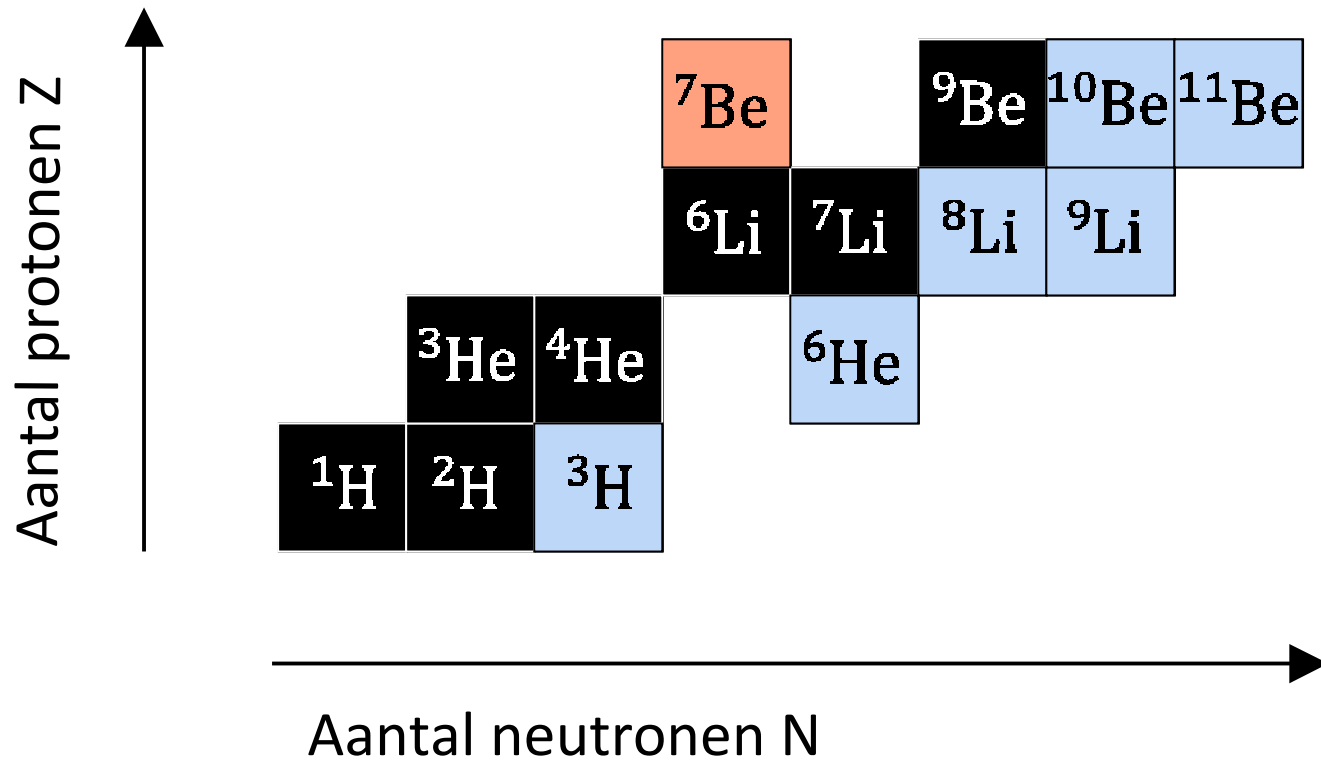
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 6,9 \text{ s}$$

$$A(10) = A_0 e^{-10\lambda} = A_0 e^{-1} = \frac{1}{e} A_0 = 0,37 A_0$$

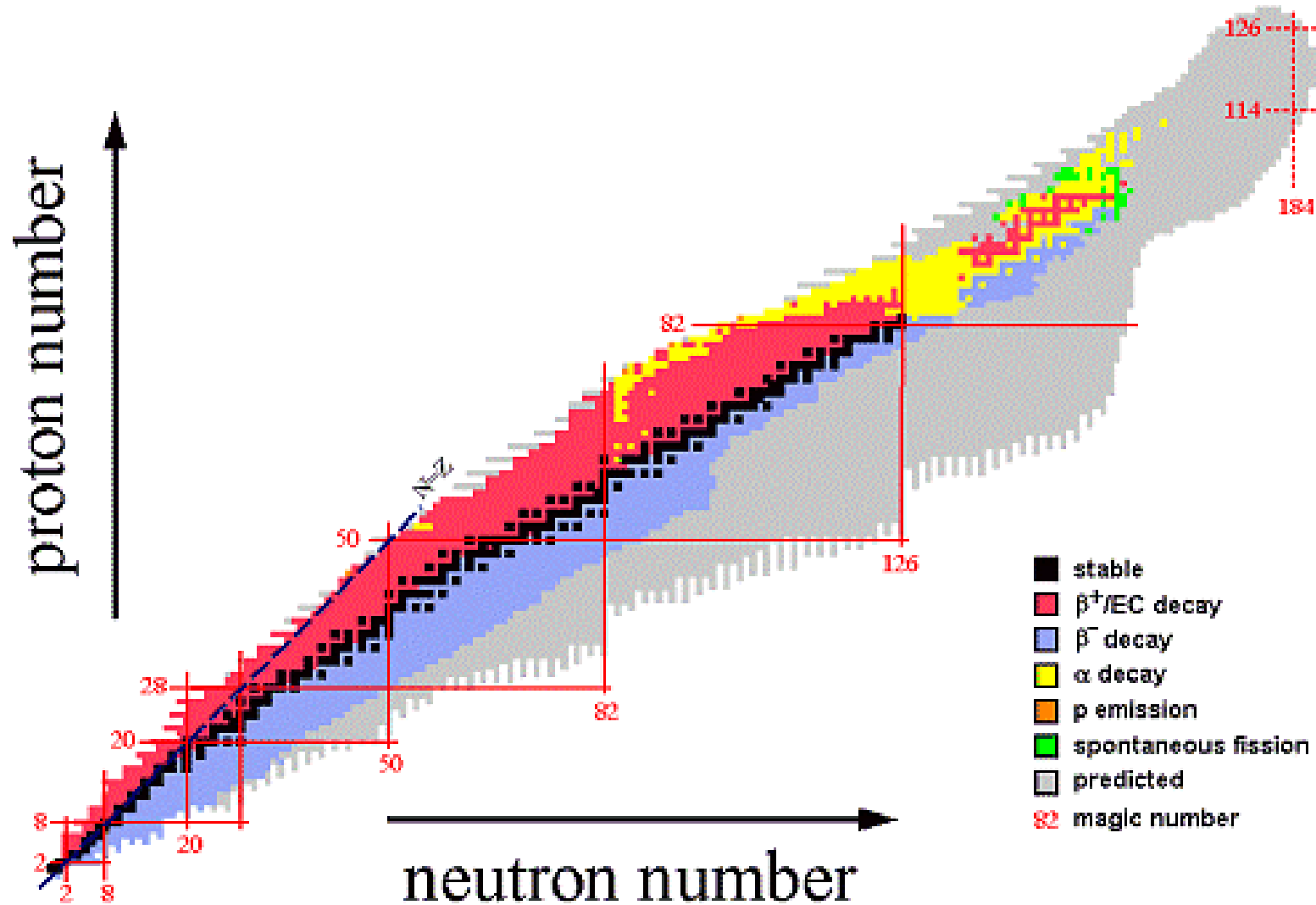
$$A_0 = \lambda N_0 = 100 \text{ kBq}$$

$$A(10) = 37 \text{ kBq}$$

# Nuclidenkaart

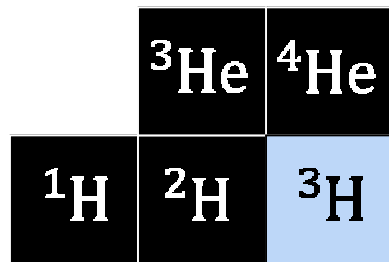


# Nuclidenkaart





## $\beta^-$ -verval



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

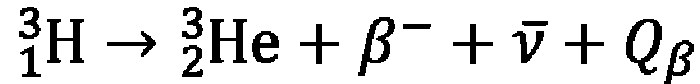
*neutronenoverschot*

Bij kernen met neutronenoverschot kan  $\beta^-$ -verval optreden:

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



$\beta^-$ -verval van  ${}^3\text{H}$ :



De vrijkomende energie  $Q_\beta$  wordt verdeeld over  $\beta^-$  en neutrino

Voor  $\beta^-$ -verval van  ${}^3\text{H}$  blijkt:

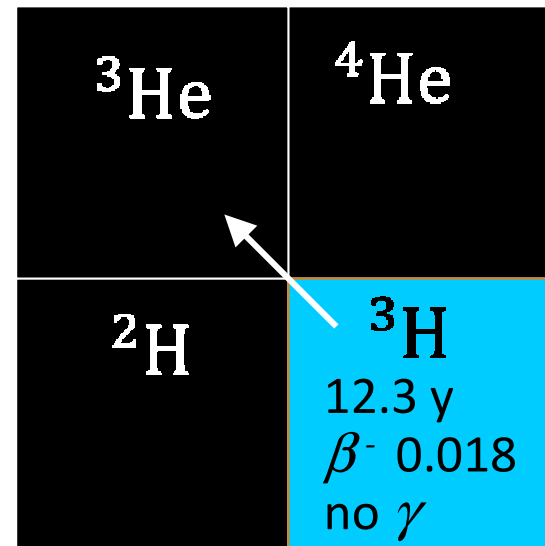
$$E_{\beta, \text{max}} = 0,018 \text{ MeV}$$

$$T_{1/2} = 12,3 \text{ jaar}$$

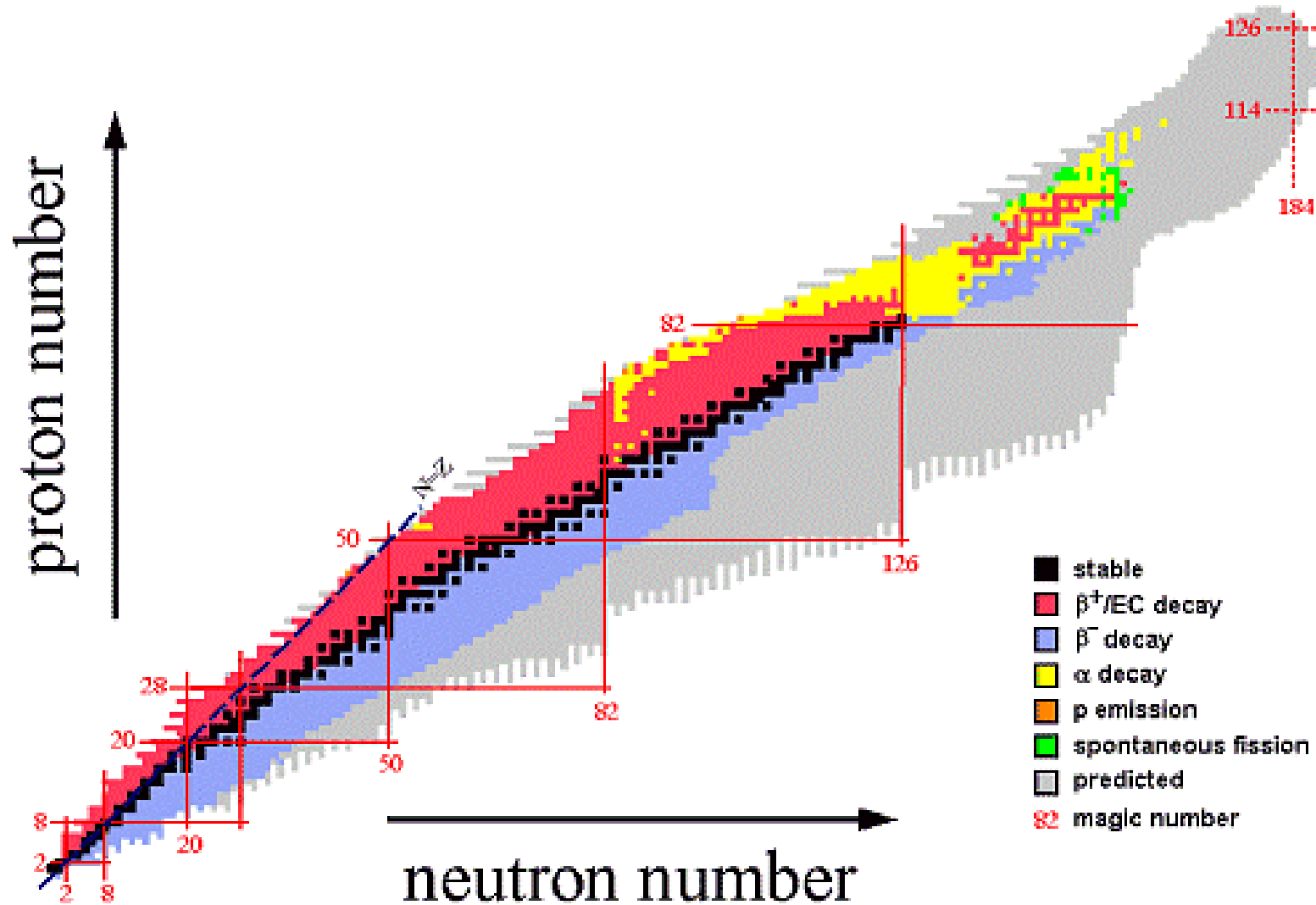
$$E_\beta \approx \frac{1}{3}E_{\beta, \text{max}}$$

Voor de gemiddelde energie geldt:  $E_\beta \approx \frac{1}{3}E_{\beta, \text{max}}$

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



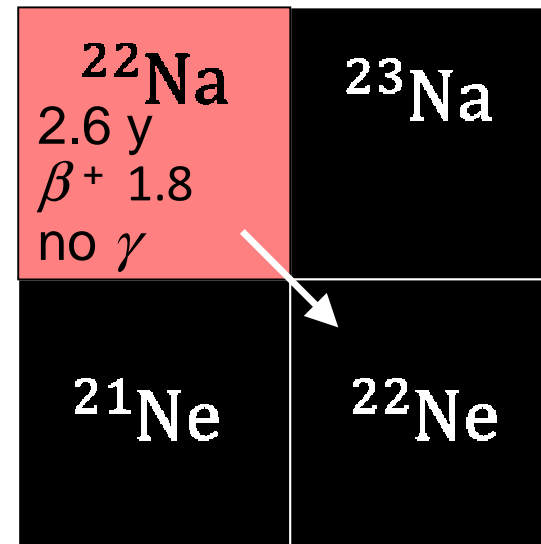
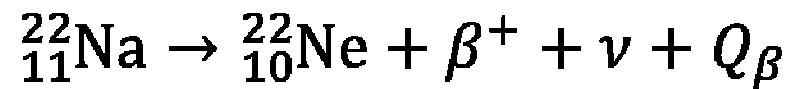
# Nuclidenkaart



## $\beta^+$ -verval

$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$  treedt op bij *neutronentekort*

bijvoorbeeld:



## 'losse' neutronen

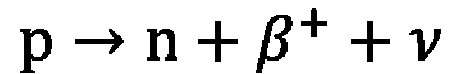


$$m_n > m_p + m_\beta + m_\nu$$

massa en energie equivalent:  $E=mc^2$

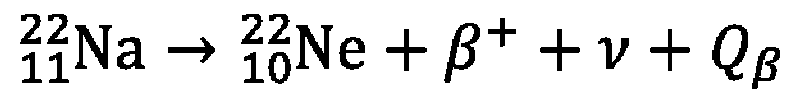
Vrijkomende energie:

$$m_n c^2 - (m_p c^2 + m_\beta c^2 + m_\nu c^2) = 836 \text{ keV}$$



'probleem':  $m_p < m_n + m_\beta + m_\nu$

Dit verval kan dus alleen optreden als de vrijkomende vervalenergie groot genoeg is om het massadefect te compenseren



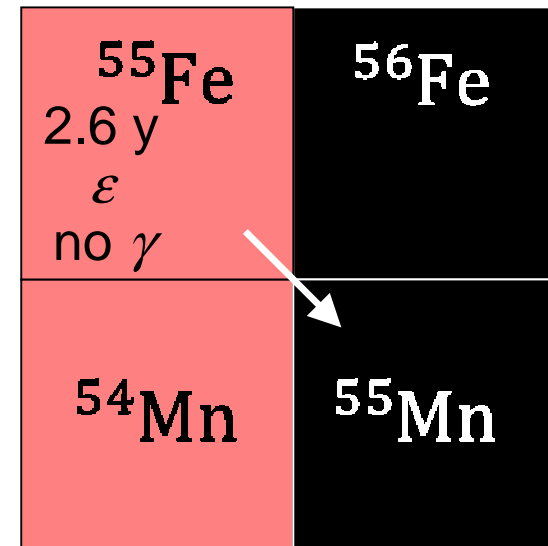
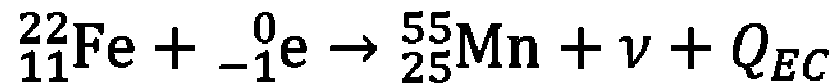
$$m_{\text{Na}22} > m_{\text{Ne}22} + m_\beta + m_\nu$$

massa kern  $\neq$  som massa's kerndeeltjes

Alternatief voor  $\beta^+$ -verval: *elektronvangst*

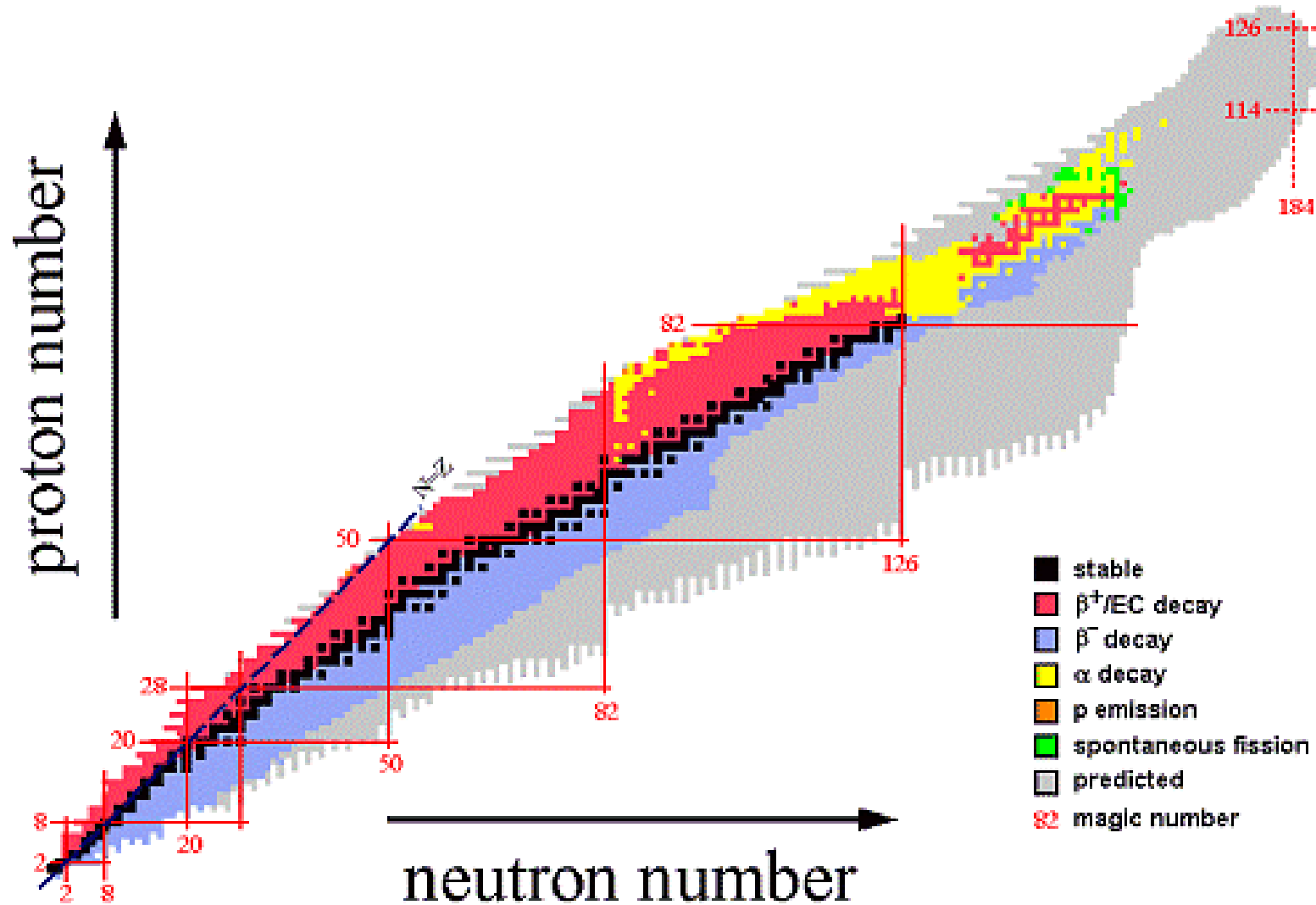


bijvoorbeeld:



NB: bij  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , en elektronvangst blijft het massagetal constant

# Nuclidenkaart

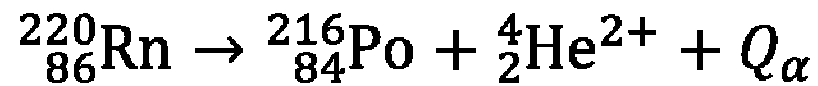




*α-verval*

Kern stoot een Heliumkern (α-deeltje) uit

bijvoorbeeld:



${}^{218}\text{Rn}$	${}^{219}\text{Rn}$	${}^{220}\text{Rn}$ 51.5 s $\alpha$ 6.28 $\gamma \dots$
${}^{217}\text{At}$	${}^{218}\text{At}$	${}^{219}\text{At}$
${}^{216}\text{Po}$	${}^{217}\text{Po}$	${}^{218}\text{Po}$

## $\alpha$ -verval

De vrijkomende energie  $Q_\alpha$  wordt verdeeld over  $\alpha$  en dochterkern (*terugstootenergie*)

Verdeling energie over  $\alpha$  enerzijds en dochterkern anderzijds elke keer anders

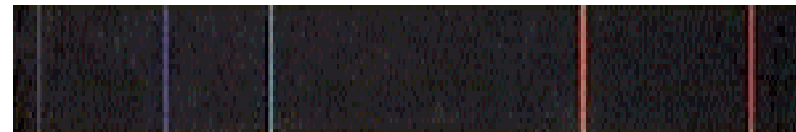
→  $\alpha$ -straling heeft *continu* spectrum

Vergelijk licht:

continu spectrum (gloeilamp)



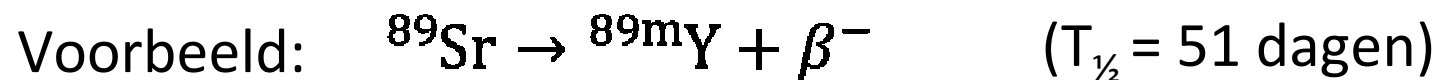
lijnspectrum (TL buis)



## *Isomeer verval*

Soms blijft kern na  $\alpha$ - en  $\beta$ -verval langer in aangeslagen toestand:

*Isomere of metastabiele toestand*

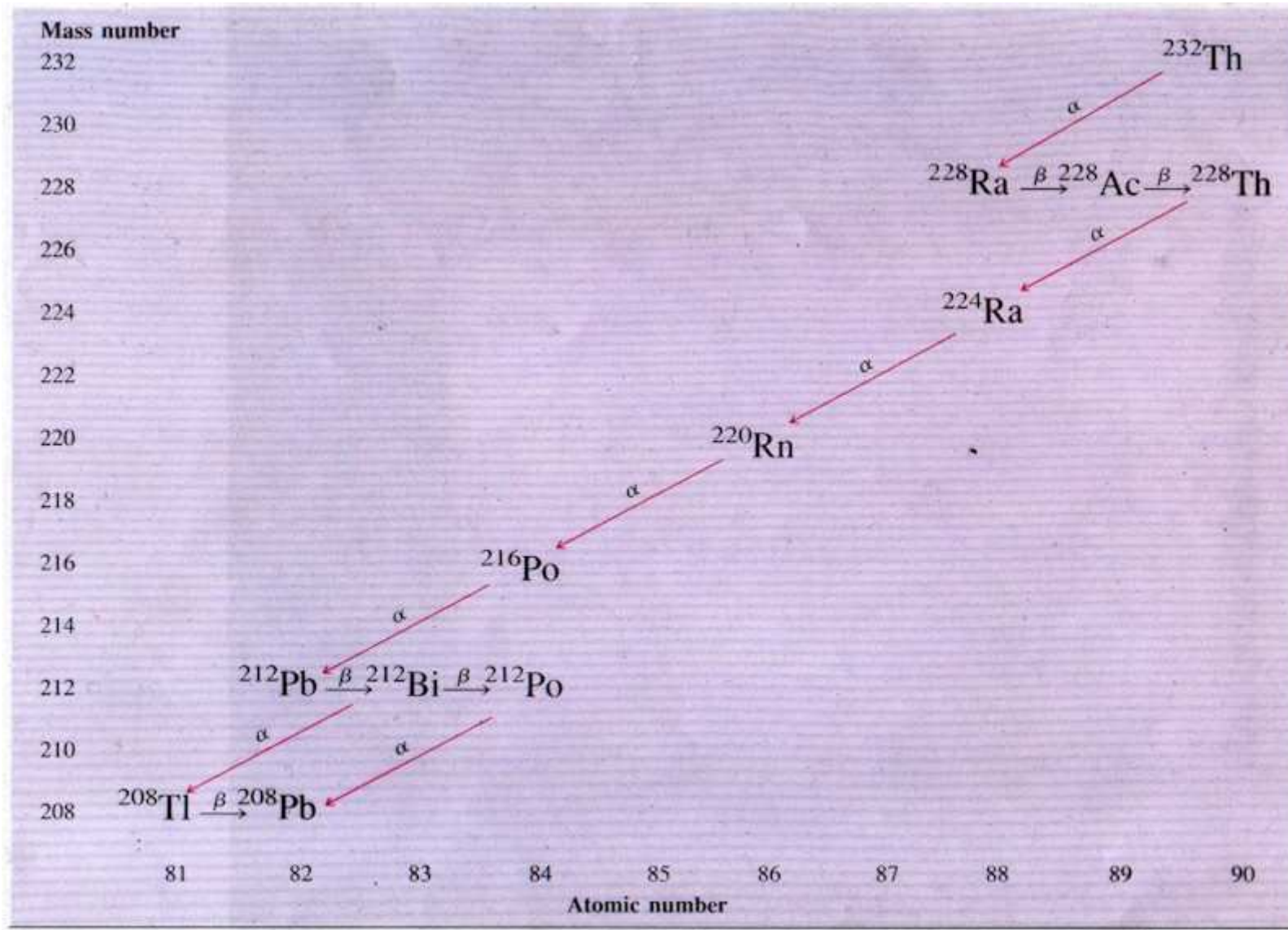


Metastabiele kern vervalt door uitzenden foton: *isomeer verval*



NB:  $\gamma$ -straling isomeer verval monochromatisch

# Vervalreeks



## Moeder-dochterrelaties

- Radioactieve nuclide vervalst in radioactieve dochternuclide
- Verloop activiteit moedernuclide:

$$\frac{d}{dt}N_1(t) = -\lambda_1 N_1(t) \quad \rightarrow \quad A_1(t) = A_1(0) e^{-\lambda_1 t}$$

- Verloop activiteit dochternuclide:

$$\frac{d}{dt}N_2(t) = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t)$$

$$\rightarrow A_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1(0) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + A_2(0) e^{-\lambda_2 t}$$

## Toepassing: melken van de radioactieve koe

- Moeder, dochter met  $T_{\frac{1}{2},\text{moeder}} \gg T_{\frac{1}{2},\text{dochter}}$

$$\frac{d}{dt}N_1 = -\lambda_1 N_1 \quad A_1(t) = \lambda_1 N_1(t) \quad \text{vrijwel constant (} T_{\frac{1}{2},1} \text{ groot)}$$

$$\frac{d}{dt}N_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad A_2(t) = \lambda_2 N_2(t)$$

- op  $t=0$  alleen moeder  $A_2(0)=0$

- na  $t=0$   $N_1$  vrijwel constant

$N_2$  groeit tot  $dN_2/dt=0$  oftewel  $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$

dan  $A_2 = \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 = A_1$

## *Toepassing: melken van de radioactieve koe*

- Dochter vervalst snel, dus evenwicht snel bereikt
- Radioactieve koe: langlevende moeder met kortlevende dochter
- Melken: dochter uit mengsel moeder/dochter oogsten
- Na tijd orde  $T_{\frac{1}{2},\text{dochter}}$  kan weer geoogst worden

Voorbeeld:      Moeder       $^{99}\text{Mo}$       ( $T_{\frac{1}{2},\text{moeder}} = 66$  uur)

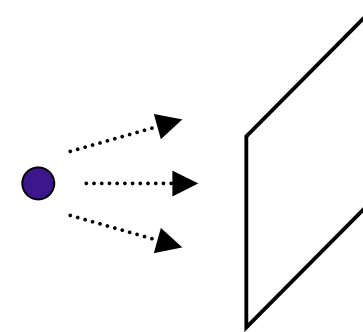
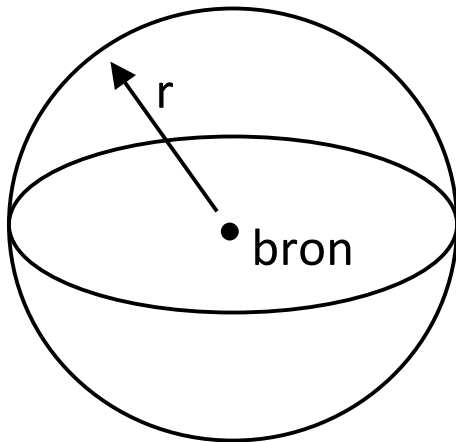
                         Dochter       $^{99\text{m}}\text{Tc}$       ( $T_{\frac{1}{2},\text{dochter}} = 6$  uur)

## Kwadratenwet

**Fluxdichtheid  $\varphi$** : aantal passerende deeltjes per oppervlak per tijd

$$[\varphi] = \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$$

Puntbron met activiteit  $A$ ,  
wat is  $\varphi$  op afstand  $r$ ?



Oppervlakte bol:  $4\pi r^2$

Per sec passeren  $A$  deeltjes het oppervlak

$$\varphi = \frac{A}{4\pi r^2}$$



**Intensiteit  $I$ :** Hoeveelheid energie per tijd per oppervlak

$$[I] = \text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} = \text{W m}^{-2}$$

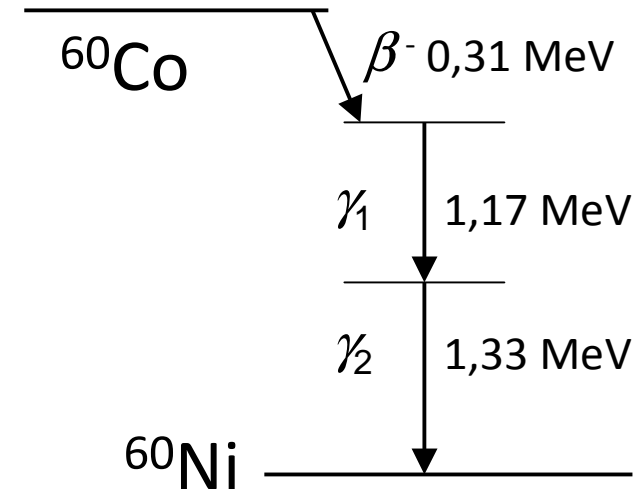
Voorbeeld:  $^{60}\text{Co}$ -bron van 3 GBq

Fotonenfluxdichtheid op 2 m:

$$\varphi_{\gamma} = \frac{2A}{4\pi r^2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^9}{4\pi 2^2} = 119 \cdot 10^6 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Intensiteit  $\gamma$ -straling op 2 m:

$$\begin{aligned} I_{\gamma} &= \frac{1}{2}\varphi_{\gamma}E_{\gamma_1} + \frac{1}{2}\varphi_{\gamma}E_{\gamma_2} = 148 \cdot 10^6 \text{ MeV m}^{-2}\text{s}^{-1} \\ &= 24 \mu\text{W/m}^2 \end{aligned}$$



## Overzicht

- Activiteit A [Bq] van radioactieve bronnen
- Vervalwet:  $A(t)$
- Nuclidenkaart
- Soorten radioactief verval
- Moeder-dochter relaties
- Fluxdichtheid  $\varphi = [\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}]$  en intensiteit  $I [\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
- Kwadratenwet



