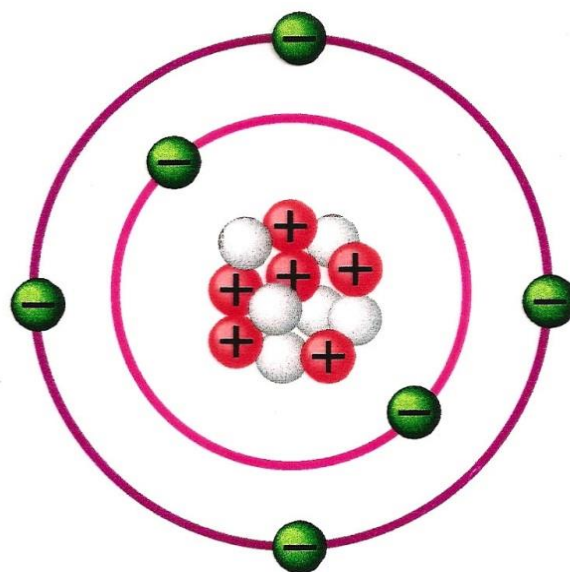


# Formelsamling

til nuklearmedicinsk  
isotopteknik og kinetik



⊖ - Electron

⊕ - Proton

○ - Neutron



# Formelsamling

## Indholdsfortegnelse

<b>Forord</b> .....	5
<b>Del 1: Isotopkurser</b> .....	6
Absorberet dosis .....	6
Absorption og attenuation ( $\alpha$ ) .....	6
Absorption og attenuation ( $\beta$ ) .....	6
Absorption og attenuation (elektromagnetisk stråling) .....	7
Aktivitet og henfald.....	7
Atomkerneradius .....	9
Biologisk effekt af stråling.....	9
Bremsestråling ( $\beta$ ).....	9
Compton-spredning .....	10
Detektion .....	10
Detektor-typer .....	12
Dødtid .....	12
Effektiv dosis .....	13
Effektiv halveringstid .....	13
Ekstern dosimetri .....	13
Emissions- og absorptionsspektre .....	14
En partikels totale energi.....	14
Figure of Merit (FoM).....	14
Fotoelektrisk effekt .....	14
Fotonenergi.....	15
Henfald af en blanding af radionuklider .....	15
Interaktion mellem fotoner og stof .....	15
Intern dosimetri .....	15
Karakteristisk røntgenstråling ved skift mellem energi-niveauer.....	16
Masse og energi .....	16
Masseattenuationskoefficient (elektromagnetisk stråling).....	16
Massetæthedstallet (density thickness) .....	17
Mikroskopisk tværsnit.....	17
Mol, masse og antal .....	18

Momentum (p).....	18
Nedre detektionsgrænse (lower limit of detection, LLD) .....	19
Optimal fordeling af måletid.....	19
Præcision.....	19
Radionuclide purity (RNP).....	19
Statistik til isotopkurser .....	19
Stopping power .....	20
Strålingstyper .....	20
Usikkerhed på tællehastighed .....	21
Ækvivalent dosis.....	22
<b>Del 2: MASTAKI-kursus.....</b>	<b>23</b>
Basale regneregler .....	23
Enheder .....	27
Begreber.....	27
Formler.....	29
<b>Egne noter .....</b>	<b>33</b>
<b>Hypigt anvendte isotoper .....</b>	<b>35</b>
<b>Det periodiske system.....</b>	<b>36</b>

## Forord

Dette hæfte er udarbejdet som en hjælp til læger der er i hoveduddannelse i klinisk fysiologi og nuklearmedicin, særligt i forbindelse med A-kurserne i isotopteknik og kinetikdelen af MASTAKI.

Det skal fungere som en slags formelsamling, samt en begrebsoversigt over de vigtigste begreber.

Der tages forbehold for, at der kan være fejl i hæftet, og vi må understrege at der ikke er tale om en 'officiel' formelsamling.

Vi forventer at udarbejde 3. udgave i 2021 eller 2022 – så hvis du inden da støder på fejl eller lignende, så skriv til os.

Venlig hilsen

Ronan Berg

Louise Brinth

August 2019

## Del 1: Isotopkurser

### Absorberet dosis

$$D = \frac{E}{m}$$

### Absorption og attenuation ( $\alpha$ )

$\alpha$ : Rækkevidde  $\sim 0.1$  mm in tissue  $\rightarrow$  Al energi absorberes.

Når R er rækkevidde i cm,  $\rho$  er densitet i  $\text{g/cm}^3$ , E er partiklens energi i MeV og A er atomvægt af absorber gælder:

Rækkevidden  $R_{\text{luft}}$  af  $\alpha$ -partikler (med energi-niveau  $2\text{MeV} < E < 8\text{MeV}$ ) i luft (empirisk bestemt, 10% usikkerhed):

$$R_{\text{luft}} = 0,322 \times E^{3/2}$$

Rækkevidden  $R_{\text{medium}}$  af  $\alpha$ -partikler i andre medier:

$$R_{\text{medium}} = \frac{\rho_{\text{luft}}}{\rho_{\text{medium}}} \times \sqrt{\frac{A_{\text{medium}}}{A_{\text{luft}}}} R_{\text{luft}}$$

### Absorption og attenuation ( $\beta$ )

For  $\beta$ -stråling/elektroner gør følgende forhold sig gældende for sammenhængen mellem rækkevidde (R, i formen massetæthedstykkelse med enheden  $\text{g/cm}^2$ ) og maksimal energi E i MeV:

Ukendt E (MeV):

$$R \text{ under } 0,3 \text{ g/cm}^2: \quad E = 1,92 \times R^{0,725}$$

$$R \text{ over } 0,3 \text{ g/cm}^2: \quad E = 1,85 \times R + 0,245$$

Ukendt R ( $\text{g/cm}^2$ ):

$$E \text{ under } 0,8 \text{ MeV}: \quad R = 0,407 \times E^{1,38}$$

$$E \text{ over } 0,8 \text{ MeV}: \quad R = 0,542 \times E - 0,133$$

Det er den maksimale energi, der skal bruges her. R kan herefter omregnes til den lineære afstand (cm) ved at dividere med absorberens densitet ( $\text{g/cm}^3$ )

Rækkevidden i en absorber er ca. 8 x halveringstykkelsen.

Den fraktion der ikke attenueres (t=er tykkelsen af materialet):

$$f_{\mu} = e^{-\mu \times t}$$

Dette er en tilnærmet formel, som primært bruges ved gamma-stråling.

## Absorption og attenuation (elektromagnetisk stråling)

Fotoelektrisk effekt ( $E < 0.1$  MeV), Compton-spredning ( $E = 0.1-10$  MeV), parproduktion ( $E > 1.02$  MeV).

$$I = I_0 \times e^{-\mu \times t}$$

hvor  $\mu$  er den lineære attenuationskoefficient og  $t$  er absorberens tykkelse.  $I$  er strålens intensitet. Den lineære attenuationskoefficient beregnes:

$$\mu = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

hvor  $t_{1/2}$  er halveringstid.

Masseattenuationskoefficienten  $\mu_m$  beregnes:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

hvor  $\rho$  er absorberens densitet

$$\mu = -\frac{\ln \frac{A}{A_0}}{t} = -\frac{\ln \frac{N}{N_0}}{t}$$

$$t = -\frac{\ln \frac{A}{A_0}}{\mu} = -\frac{\ln \frac{I}{I_0}}{\mu}$$

Den effektive attenuation (parentes i ligning repræsenterer annihulationsenergien):

$$\mu_e = \mu_{pe} + \mu_{ce} + \mu_{pp} \left( \frac{hf - 1.02}{hf} \right)$$

Den fraktion der ikke attenueres:

$$f_{\mu} = e^{-\mu \times t}$$

hvor  $t$  er tykkelsen af materialet. Er ca. 1 for  $\gamma$  i luft.

## Aktivitet og henfald

$T_{1/2}$ = Halveringstid;  $\lambda$ =Henfaldskonstant (fractional decrease in activity per unit time);  $N_0$ = Antallet af atomkerner til tiden 0;  $N$ = Antallet af atomkerner til tiden  $t$ ;  $A_0$ = Aktivitet til tiden 0;  $A$ = aktivitet efter tiden  $t$ ;  $\tau$ = middellevetid;  $SA$ = specifik aktivitet (aktivitet pr vægtenhed af den radioaktive substans).;  $A_A$ = Atomvægt

Gennemsnitlig aktivitet:

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Øjeblikkelig aktivitet:

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

Henfaldsloven:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = \frac{A}{\lambda} = \frac{A \times T_{1/2}}{\ln 2}$$

Aktivitet:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Aktivitet og antal kerner:

$$A = \lambda \cdot N$$

Henfaldskonstant  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

Middelevetid for et radioaktivt atom ( $\tau$ ) ( $\lambda$  er henfaldskonstanten):

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln(2)}$$

$$A_0 = \frac{A}{2^{\frac{-t}{T_{1/2}}}}$$

$$A = N \times \lambda = N \times \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} = -\frac{t \times \ln 2}{\ln \frac{A}{A_0}}$$

$$t = \ln \frac{A}{A_0} \times \frac{1}{-\lambda} = \ln \frac{A}{A_0} \times \frac{-T_{1/2}}{\ln 2}$$

$$SA = \frac{A}{m} = \frac{\lambda N}{m} = \frac{\lambda N_A}{\text{Atommasse}}$$



$$SA = \lambda \times N = \frac{\lambda \times 6,02 \times 10^{23} \text{ Bq}}{A_A} \frac{1}{g} = \frac{4,18 \times 10^{23} \text{ Bq}}{A_A \times T_{1/2}} \frac{1}{g} = \frac{\ln 2 \times N_A}{T_{1/2} \times M_w}$$

Enheden er Bq/kg. Atommassetallet og molekylvægt ( $M_w$ ) er i g/mol.  $N_A$  = Avogadros konstant.

Ønskes specifik aktivitet i enheden Curie per gram relateres til Radium ( $A_w=226$  og  $T_{1/2}=1620$ år):

$$SA = \frac{A_w(Ra) \times T_{1/2}(Ra)}{A_w \times T_{1/2}} = \frac{226 \frac{g}{mol} \times 1620 \text{ år}}{A_w \times T_{1/2}}$$

### Atomkerneradius

Hvis  $r$  er atomkernens radius og  $A$  er atommassetallet (antallet af nukleoner i kernen) gælder:

$$r \sim 1,2 \times 10^{-15} \times A^{1/3} \text{ meter}$$

### Biologisk effekt af stråling

Non-stokastiske effekter **vil** ses (over  $\sim 0,2$  Gy) og stokastisk effekt (overvejende cancer) **kan** forekomme (over 0 Gy)

$$\text{Stokastisk effekt/skade} = P(\text{cancer}) = X \times \sum T \times H_T$$

$X$  er en risikofaktor som ofte ligger omkring 5% per Sievert.

### Bremsestråling ( $\beta$ )

Når en elektron decelereres, fordi den kommer for tæt på en kerne og derfor ændrer retning frigives den overskydende energi i form af elektromagnetisk stråling.

En strøm af ladede partikler rettet mod en absorber giver elektromagnetisk stråling med en kontinuert energifordeling fra 0 til maksimalenergien ( $E_{max}$ ) = bremsestråling.

$$fb = 3,5 \times 10^{-4} \times Z \times E_{max}$$

$fb$  = andel af beta energi, der omdannes til fotoner, dvs. bliver til bremsstrahlung

$Z$  = det absorberende materiales atomnummer

$E_{max}$  = den maksimale energi af betapartiklen i MeV

## Compton-spredning

Ved Compton-spredning absorberes noget af  $\gamma$ -fotonens energi af en elektron i absorbereren, samtidig med at der dannes en ny foton med lavere energi (= lavere frekvens og større bølgelængde). Hvor stor denne energi er afhænger af Compton-vinklen  $\theta$ , dvs. den vinkel der er mellem den primære og sekundære fotonens bane. Sammenhængen mellem stigningen i bølgelængde  $\lambda\Delta$  (og dermed faldet i  $\gamma$ -fotonens energi) og  $\theta$  er givet ved ligningen:

$$\Delta\lambda = 2.43 \times 10^{-12} \text{ m} \times (1 - \cos\theta).$$

Det ses heraf, at hvis  $\theta$  er 0, dvs. hvis den sekundære foton fortsætter den primære fotonens bane (elektronen absorberer ingen energi), så sker der ingen ændring i fotonens energi, da  $\cos(0) = 1$  (dvs. i praksis sige ingen Compton-spredning). Såfremt den har præcis den modsatte bane ( $\theta = 180$ ;  $\cos(180) = -1$ ) vil der ske det største tab i  $\gamma$ -fotonens energi, dvs. elektronens absorption af energi vil være maksimal. Det er altså det punkt, hvor den primære  $\gamma$ -foton afsætter den maksimale energi i absorptionsmaterialet ved Compton-spredning, at Compton-skulderen fremkommer.

Compton-skulderen ses hvor fotonen har afsat sin maksimale energi ved Compton-spredning, dvs. hvor Compton-vinklen  $\theta$  er  $180^\circ$ . Ændringen i fotonens energi kan nemt beregnes ved en omskrivning af ligningen for ændring i bølgelængde:

$$\Delta E = \frac{E_{\text{primær}}}{1 + \frac{E_{\text{primær}}}{m_0 c^2} \times (1 - \cos\theta)}$$

hvor  $E_{\text{primær}}$  er energien af den indkommende foton, og som for  $^{22}\text{Na}$  er 1275 keV. Udtrykket  $m_0 c^2$  (511 keV) er hvilemassen af den elektron fotonen rammer, udtrykt som energi. Og som sagt er  $\theta$  180, hvorfor  $\cos\theta = -1$ . Ved at trække  $\Delta E$  fra  $E_{\text{primær}}$  fås Comptonskulderen placering.

## Detektion

Sammenhængen mellem det målte tælleantal og en radioaktiv kildes aktivitet ( $A$ ), attenuationsfaktoren ( $f_\mu$ ), afstandsfaktoren ( $f_r$ ), detektorens effektivitet ( $\varepsilon$ ) og dødtidsfaktoren ( $f_t$ ), samt baggrund ( $R_b$ ):

$$R_o = A \times f_\mu \times f_r \times \varepsilon \times f_t + R_b$$

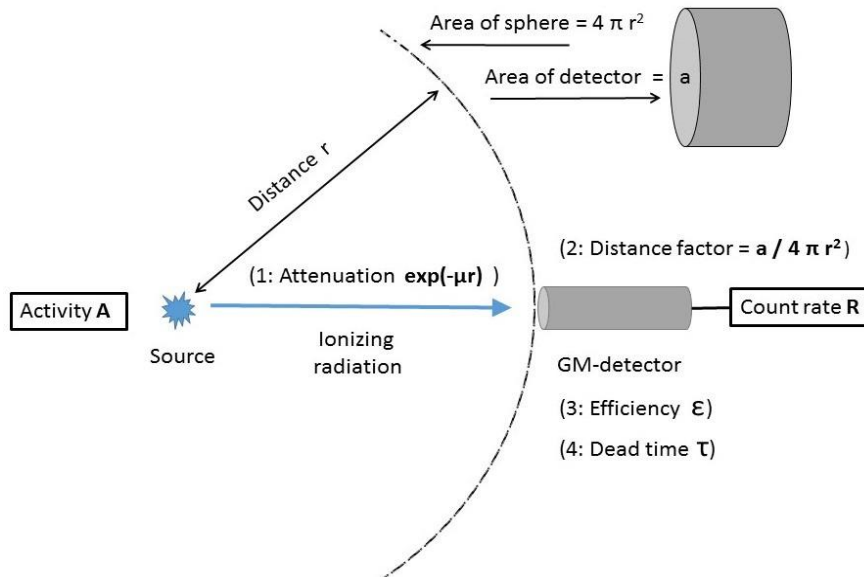
Hvis tælleantal er lavt kan dødtidsfaktoren  $\sim 1$  og hvis der er tale om gammastråling og mediet er luft kan attenuationsfaktoren  $\sim 1$ . I disse tilfælde kan man nøjes med at tage højde for afstandsfaktoren, således at  $\varepsilon$  beregnes:

$$\varepsilon = \frac{R_{\text{net}}}{A \times f_r}$$

Her beregnes afstandsfaktoren:

$$f_r = \frac{a}{4\pi r^2}$$

hvor  $a$  er detektorens areal  $= \pi r_{\text{detektor}}^2$  og  $r'$  er afstanden fra kilde til detektor.



Effektivitet for en opstilling:

$$\epsilon = \frac{R_{net}}{A}$$

hvor  $\epsilon$  altså omfatter både attenuationsfaktoren  $f_\mu$ , afstandsfaktoren  $f_r$  og dødtidsfaktoren  $f_\tau$ , samt detektorens egentlige effektivitet.

En detektors effektivitet beregnes:

$$\epsilon = \frac{R_{net}}{A \times f_\tau \times f_\mu}$$

Hvor der altså både korrigeres for dødtid ( $\tau$ ) og attenuation ( $\mu$ ).

Præcision for en opstilling:

Hvis:

$$A = \frac{R_{net}}{\epsilon} = \frac{N_{net}}{\epsilon \times t} = \frac{1}{\epsilon \times t} \times N_{net}$$

Da det kun giver mening at tale om præcision for  $N_{net}$  beregnes usikkerheden /præcisionen for opstillingen:

$$\begin{aligned}\sigma_A &= \frac{1}{\varepsilon \times t} \times \sigma_{net} \\ &= \frac{1}{\varepsilon \times t} \times \sqrt{N_{gross} + N_{background}}\end{aligned}$$

## Detektor-typer

- GM-tæller: Nem at anvende men ingen oplysning om energi-niveau og lav effektivitet for gamma-stråling

God til høj-energi  $\beta$ -stråling ( $\varepsilon \rightarrow 100\%$ )

Røntgen- og gammastråling ( $\varepsilon \sim 1\%$ )

Alfa-stråling - kun hvis passende vindue bruges ( $\varepsilon = 0-100\%$ )

- Fast-stofs-skintillator: Giver oplysning om energi-niveau. Bruges især til gamma-stråling.

Røntgen- og gammastråling ( $\varepsilon \sim 20-80\%$  - afhængig af E og størrelse af krystal)

Høj-energi  $\beta$ -stråling ( $\varepsilon \rightarrow 100\%$ )

- Væske-skintillator: Giver (begrænset) oplysning om energi-niveau. Bruges især til  $^3\text{H}$  og  $^{14}\text{C}$ . Lille detektor-volumen.

God til lav-energi  $\beta$ -stråling ( $\varepsilon \rightarrow 100\%$ )

Lav-energi røntgen- og gammastråling

## Dødtid

Det relative tab i tælleantal udregnes som følger:

$$\frac{R - R_0}{R} = 1 - \frac{R_0}{R} = 1 - (1 - R_0\tau) = R_0\tau$$

$$R = \frac{R_0}{1 - (R_0 \times \tau)}$$

## Effektiv dosis

$$E = W_T \times H_T$$

E: effektiv dosis som hele organismen udsættes for

$H_T$ : ækvivalent dosis optaget i vævet T.

$W_T$ : Vægtet vævsfaktor af vævet T (se tabel)

Hvis hele kroppen stråles jævnt er  $W_T = 1$ .

$$E = \sum_T W_T \times H_T$$

Tissue	Tissue Weighting ICRP 2007
Gonads	0.08
Bone Marrow (Red)	0.12
Colon	0.12
Lung	0.12
Stomach	0.12
Breast	0.12
Remainder	0.12
Bladder	0.04
Liver	0.04
Oesophagus	0.04
Thyroid	0.04
Skin	0.01
Bone surface	0.01
Brain	0.01
Salivary Glands	0.01
Total	1

ICRRP 103, 2008

## Effektiv halveringstid

Den effektive halveringstid  $T_E$  er afhængig af isotopens radioaktive halveringstid  $T_R$  og den biologiske halveringstid  $T_B$ :

$$T_E = \frac{T_R \times T_B}{T_R + T_B}$$

## Ekstern dosimetri

For elektromagnetisk stråling er den ækvivalente dosis-rate fra en punktkilde med afstand  $x$  hvor  $\mu_0$  er masseabsorptionskoefficient gældende for vævet der bestråles (enhed  $\text{cm}^2/\text{g}$ ),  $f$  er den fraktion af henfald som resulterer i fotoner med energien  $E$

$$\dot{H} = \frac{A \times E \times f \times \mu_0}{4 \times \pi \times x^2}$$

Hvis gamma-faktor (dosishastighedskonstant)  $\Gamma$  beregnes (enhed typisk  $(\text{Sv} \times \text{M}^2)/(\text{MBq} \times \text{h})$ ):

$$\Gamma = \frac{E \times f \times \mu_0}{4 \times \pi}$$

Kan ækvivalent dosisrate skrives:

$$\dot{H} = \Gamma \times \frac{A}{x^2}$$

Ækvivalent dosis fås ved at gange ækvivalent dosis-rate med tiden  $t$ :

$$H = \Gamma \times \frac{A}{x^2} \times t$$

Build-up-faktor (B) er afhængig af gammastrålingens energi og absorberens. Væsentlig når behov for afskærmning beregnes (her er  $\mu$  den lineære attenuationskoefficient med enheden  $\text{cm}^{-1}$  og t er tykkelsen på afskærmningen):

$$\dot{H} = \Gamma \times \frac{A}{x^2} \times B \times e^{-\mu t}$$

$$t = -\frac{\ln\left(\frac{\dot{H} \times x^2}{\Gamma \times A \times B}\right)}{\mu}$$

### Emissions- og absorptionsspektre

Et spring fra en eksciteret til en mindre energi-rig tilstand svarer til frigørelse af en specifik energi-mængde af en karakteristisk bølgelængde ( $\lambda$ ) ( $c$ =lysets hastighed,  $h$ =Plancks konstant):

$$E = h \times \frac{c}{\lambda}$$

### En partikels totale energi

Hvis  $m_0$  er hvilemassen (partiklens masse ved  $v=0$ ) og hvis  $v \ll c$  gælder:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$E = E_{\text{kin}} + m_0 c^2 = \frac{1}{2} \times m \times v^2 + m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m \times c^2$$

### Figure of Merit (FoM)

FoM karakteriserer vores målesystems evne til at lave præcise målinger. Siger noget om signal/støj-forhold.

Givet at  $R_{\text{net}} = R_0 - R_b$ :

$$FoM = \frac{R_{\text{net}}^2}{R_{\text{net}} + 2R_b} \cong \frac{\varepsilon^2}{R_b}$$

### Fotoelektrisk effekt

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \times m \times v_{\text{max}}^2 = E_{\text{foton}} - \phi$$

Hvor  $E_{\text{kin}}$  er elektronen kinetiske energi,  $E_{\text{foton}}$  er fotonens energi og  $\phi$  er elektronens bindingsenergi.

## Fotonenergi

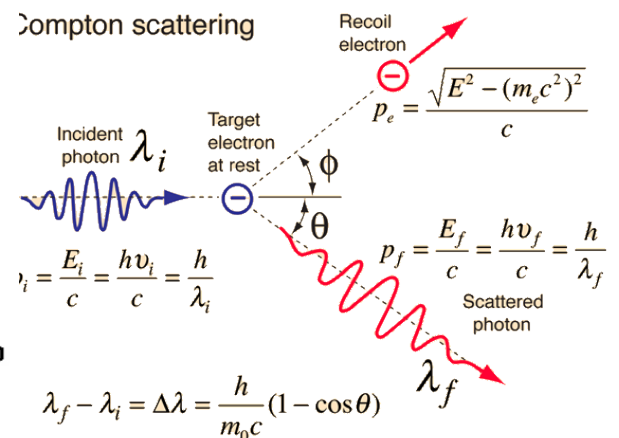
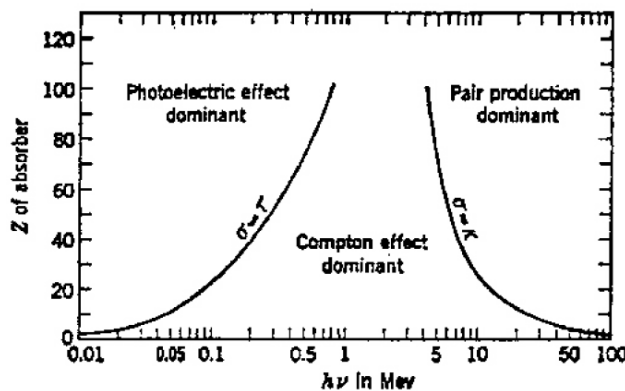
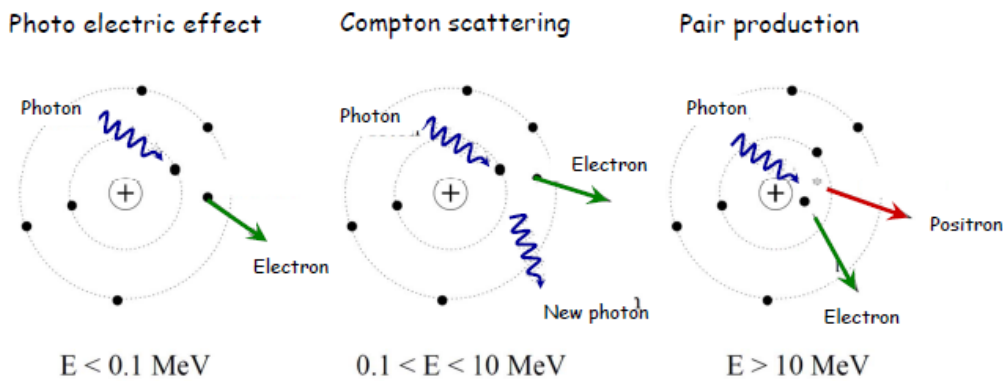
En foton har karakter af en "energipakke" med en impuls/bevægelsesmængde og et energi-indhold ( $E_{\text{foton}}$ ) der er bestemt af strålingens frekvens ( $f$ ) eller bølgelængde ( $\lambda$ ) hvor  $h$  er Plancks konstant og  $c$  lysets hastighed:

$$E = h \times f = \frac{h \times c}{\lambda}$$

## Henfald af en blanding af radionuklider

$$A = A_{0,1} \times e^{-\lambda_1 t} + A_{0,2} \times e^{-\lambda_2 t}$$

## Interaktion mellem fotoner og stof



## Intern dosimetri

Oftest bruges målet  $E(50)$  som er den effektive dosis summeret over 50 år.

Dosis-koefficienten er et udtryk for absorberet dosis per henfald og har typisk enheden Gray/Bq eller J/(kgxBq)

Dosiskoefficienten  $e(50)$  for de enkelte radionukleotider (ved hhv inhalation og spisning) kan slås op i tabel.

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

## Karakteristisk røntgenstråling ved skift mellem energi-niveauer

Hvis en elektron i K-skallen fjernes fra et atom, kan der vindes energi ved at føre en fri elektron til den ledige plads. Hvis den ledige plads i K-skallen udfyldes af en elektron fra et af de ydre elektronniveauer, fx fra L-skallen fås en stråling med bølglængden ( $E_K$  er bindingsenergi af elektron i K-skal og  $E_L$  tilsvarende bindingsenergi i L-skallen). Den indvundne energi kan maksimalt svare til K-elektronens bindingsenergi. Energien afgives som røntgenstråling der har energi og bølglængde der er karakteristisk for det aktuelle grundstof ( $h$ = Plancks konstant,  $c$ = lysets hastighed). Den karakteristiske røntgenstrålings bølglængde  $\lambda$  beregnes:

$$\lambda = \frac{h \times c}{\Delta E} = \frac{h \times c}{E_K - E_L}$$

## Masse og energi

Der er ækvivalens mellem masse ( $m$ ) og energi ( $E$ ) ( $c$ =lysets hastighed):

$$E = m \times c^2$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ amu} &= 1,6604 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ E_{amu} &= 1,6604 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ &= 1,4923 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2 \times \text{kg}}{\text{s}^2} = 1,4923 \times 10^{-10} \text{ J} \\ &= \frac{1,4923 \times 10^{-10} \text{ J}}{1,602 \times 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}} = 931 \text{ MeV} \end{aligned}$$

## Masseattenuationskoefficient (elektromagnetisk stråling)

Den totale masseattenuationskoefficient ( $\mu_m$ ) er summen af de partielle massesattenuationskoefficienter, dvs. sandsynligheder for at der sker fotoelektrisk effekt ( $\frac{\tau}{\rho}$ ), Compton-spredning ( $\frac{\sigma}{\rho}$ ) og pardannelse ( $\frac{\kappa}{\rho}$ ) i en absorber, ved en given fotonenergi. Det gælder således, at:

$$\begin{aligned} \mu_m &= \frac{\mu_0}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho} \\ 1 &\cong \frac{\tau}{\mu_0} + \frac{\sigma}{\mu_0} + \frac{\kappa}{\mu_0} \end{aligned}$$

Her er  $\mu_0$  absorberens lineære attenuationskoefficient og  $\rho$  er absorberens densitet.



## Massetæthedstallet (density thickness)

En ladet partikel har begrænset rækkevidde i materie, idet den standser så snart al dens kinetiske energi er brugt op. Jo større densitet et materiale har, desto kortere er rækkevidden, mens selve absorberens atomnummer er af mindre betydning. Hertil anvendes massetæthedstallet ( $t_d$ ), som fx har enheden  $\text{g/cm}^2$ :

$$t_d = \rho \times t$$

hvor  $\rho$  er absorberens densitet ( $\text{g/cm}^3$ ) og  $t$  er absorberens lineære tykkelse (cm).

For  $\beta$ -stråling/elektroner gør følgende forhold sig gældende for sammenhængen mellem rækkevidde ( $R$ , i formen massetæthedstykkelse med enheden  $\text{g/cm}^2$ ) og energi  $E$ :

Ukendt  $E$  (MeV):

$$R \text{ under } 0,3 \text{ g/cm}^2: \quad E = 1,92 \times R^{0,725}$$

$$R \text{ over } 0,3 \text{ g/cm}^2: \quad E = 1,85 \times R + 0,245$$

Ukendt  $R$  ( $\text{g/cm}^2$ ):

$$E \text{ under } 0,8 \text{ MeV}: \quad R = 0,407 \times E^{1,38}$$

$$E \text{ over } 0,8 \text{ MeV}: \quad R = 0,542 \times E - 0,133$$

Det er den maksimale energi, der skal bruges her.  $R$  kan herefter omregnes til den lineære afstand (cm) ved at dividere med absorberens densitet ( $\text{g/cm}^3$ ). Densitet af "standard" luft ved  $20^\circ\text{C}$  er  $1,204 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$

## Mikroskopisk tværsnit

Et estimat for atom-attenuationen af  $\gamma$ -stråling i en absorber. Udtryk for den del af en  $\gamma$ -stråle, der attenueres af et enkelt absorber-atom, og er hermed samtidig sandsynligheden for at et absorber-atom vil interagere med en foton fra den indkommende  $\gamma$ -stråle. Det mikroskopiske tværsnit ( $\mu_a$ ; i  $\text{cm}^2$ ) beregnes:

$$\mu_a = \frac{\mu_l}{\rho_{atom}}$$

hvor  $\mu_l$  er den lineære attenuationskoefficient, og  $\rho_{atom}$  er absorberens atomare densitet (antal atomer pr  $\text{cm}^3$ ), som beregnes:

$$\rho_{atom} = \frac{\rho \times N_A}{A}$$

hvor  $\rho$  er absorberens densitet ( $\text{g/cm}^3$ ),  $N_A$  er Avogadro (antal atomer pr mol) og  $A$  er atommassetallet ( $\text{g/mol}$ ).

Det mikroskopiske tværsnit angives i barn (b) og omregnes hertil fra  $\text{cm}^2$ .

$$1b = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

## Mol, masse og antal

1u = 1 amu = vægten af 1/12 af massen af et  $^{12}\text{C}$ -atom =  $1,660420 \times 10^{-24}$  g

Deraf følger:  $1 \text{ g} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ u}$

Massen af en nukleon (proton eller neutron) svarer i runde tal til 1u, og der er derfor  $6,02 \cdot 10^{23}$  nukleoner (Avogadros tal) = 1 mol i en stofmængde på 1 g.

Man får molarmassen ud fra atommassen ved at erstatte enheden amu med g/mol. Dette gælder også for grundstoffer, der jo er sammensat af forskellige isotoper.

Molarmassen  $M$  er masse pr. mol.

Molekylmassen  $m$  er massen af ét molekyle.

Antal atomer eller molekyler betegnes  $n$ .

$$M = \frac{m}{n}$$

Med methan som eksempel, der består af molekyler af formen  $\text{CH}_4$ , som indeholder 1 kulstofatom og 4 hydrogenatomer fås:

$$m(\text{CH}_4) = 12,011 \text{ u} + 4 \cdot 1,0079 \text{ u} = 16,043 \text{ u}$$

Vi får altså:  $M(\text{CH}_4) = 16,043 \text{ g/mol}$

dvs. at molarmassen af et stof er den samlede masse pr. mol af stoffets molekyler.

## Momentum (p)

E: fotonens energi; p: momentum; c: lysets hastighed; h: Plancks konstant; f: lysets

*Foton*

$$p = \frac{E}{c}$$

$$E = hf$$

$$c = \lambda f$$

*Partikel*

$$p = mv$$

Hvor m er partiklens hvilemasse og v er dens hastighed. Partiklens kinetiske energi beregnes:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

## Nedre detektionsgrænse (lower limit of detection, LLD)

$$LLD = 4.66 \times \sigma_{baggrund} + 3$$

## Optimal fordeling af måletid

$$\frac{t_{total}}{t_{background}} = \sqrt{\frac{r_{total}}{r_{background}}}$$

## Præcision

Præcision  $\sigma$  beregnes

$$\sigma = \frac{\sqrt{N_{total} + N_{baggrund}}}{\varepsilon \times tid} = \frac{\sqrt{(A \times tid \times \varepsilon + N_{baggrund}) + N_{baggrund}}}{\varepsilon \times tid}$$

## Radionuclide purity (RNP)

$$RNP = 100 \% - \left( 100 \times \frac{'Uren' aktivitet}{Total aktivitet} \right)$$

## Statistik til isotopkurser

### Poisson-fordeling

Ved et lavt antal henfald ( $N \times p < 20$ ).

Sandsynligheden for præcis  $n$  henfald:

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} \times e^{-\bar{n}}$$

Hvor  $\bar{n} = N \times p$

$N$  = antal molekyler, der kan henfalde

$p = \lambda \times \Delta t$

### Gaussisk fordeling

Ved et større antal henfald ( $N \times p > 20$ ).

Sandsynligheden for præcis  $n$  henfald:

$$P(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times e^{\left(\frac{-(n-\bar{n})^2}{2\sigma^2}\right)}$$

hvor  $\sigma = \sqrt{\bar{n}}$ .

Hvor  $\bar{n} = N \times p$

$N$  = antal molekyler, der kan henfalde

$$p = \lambda \times \Delta t$$

Spredning

$$\sigma(n) = \sqrt{n}$$

$$\sigma(n_1 + n_2) = \sqrt{n_1 + n_2}$$

## Stopping power

Både ladede og uladede partikler taber energi når de bevæger sig igennem og interagerer med stof. Stopping power beskriver kun energitab af ladede partikler og afhænger af type og energi af aktuel stråling og på egenskaber af det stof der bestråles.

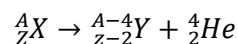
Stopping power for et materiale er numerisk lig med tabet af energi (dE) per enhed længde af banen for partiklen (dx):

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

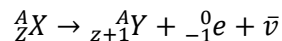
## Strålingstyper

Ioniserende stråling:  $E > 10 \text{ eV}$

- Partikelstråling
  - $\alpha$ -henfald: Der frigives en heliumkerne (to protoner og to neutroner), hvormed Z falder med 2 og A falder med 4. Ses ved lav neutron/proton-ratio. Ses kun ved  $A > 82$ , fraset  ${}^{147}_{62}\text{Sm}$ . Monoenergetisk.



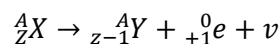
- $\beta^-$ -henfald: en neutron konverteres til en proton (nedkvark til opkvark), hvormed Z stiger med én, mens A forbliver uændret. Der frigives en elektron og en antineutrino fra atomkernen, der fordeler energien imellem sig. Den resulterende stråling ses derfor som et spektrum. Ses ved høj neutron/proton ratio.



Hvis et radionuklid giver anledning til forskellige  $\beta^-$ -henfald med hver sin karakteristiske maksimale energi  $E_{\text{max}}$  vil hvert af disse have en tilhørende middelenergi der kan tilnærmes ved

$$E_{\text{middel}} \sim \frac{E_{\text{max}}}{3}$$

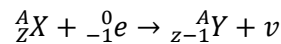
- $\beta^+$ -henfald: en proton konverteres til en neutron (opkvark til nedkvark), hvormed Z falder med en, mens A forbliver uændret (skråt ve.). Den overskydende energi fordeles mellem en positron og en neutrino.



Positronen forenes med en elektron, og ved den deraf følgende annihilation frigives to  $\gamma$ -fotoner med energien 511 keV. Ses ved

lav neutron-proton ratio. I princippet et spektrum, men det der observeres er den karakteristiske 511 keV-energi.

- Elektromagnetisk stråling
  - γ-stråling: isomerisk transition. En anslået/exciteret atomkerne frigiver overskydende energi i form af fotoner. A og Z er uændret.
 
$${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$$
  - Røntgenstråling: energetisk som γ-stråling, men skyldes frigivelse af energi fra atomet i form af fotoner når elektroner skifter position imellem elektronskallerne.
- Andet
  - Elektronindfangning (EC): Kernen indfanger en af de indre elektroner, hvormed en proton omdannes til en neutron. Z falder med en, mens A forbliver uændret (skråt ve.). Ses ved lav neutron/proton ratio.



- Intern konversion (IC): En elektron bevæger sig ind i en anslået kerne og absorberer den overskydende energi, hvorefter den skydes ud af kernen med en energi der er differencen på den overskydende energi i kernen ('γ-energi') og elektronens bindingsenergi.
- Deltastråling: 'sekundære elektroner', der skydes ud fra materialet ved en β<sup>-</sup>-partikels passage gennem ene absorber.
- Bremsestråling: overskydende energi i form af røntgenstråling, der udsendes ved 'opbremsning' af en elektron idet den interagerer med en atomkerne i absorbereren.

## Usikkerhed på tællehastighed

R<sub>net</sub>: netto-tællehastighed. R<sub>gros</sub>: målt tællehastighed. R<sub>b</sub>: tællehastighed for baggrundsstråling. σ: standard deviation~usikkerhed på tælleantal. n: antal counts. t:tid.

$$R_{net} = R_{gros} - R_b$$

$$R \pm \sigma_R = \frac{n}{t} \pm \frac{\sqrt{n}}{t}$$

Spredningen på netto-tællehastighed:

$$\sigma_{net} = \sqrt{\sigma_{gros}^2 + \sigma_b^2} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\text{counts}_{gross}}}{t_{gross}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\text{counts}_b}}{t_b}\right)^2} = \sqrt{\frac{R_{gross}}{t_{gross}} + \frac{R_b}{t_b}}$$

Spredning på netto-tælleantal (N<sub>net</sub>=N<sub>gross</sub>-N<sub>background</sub>)

$$\sigma_{N_{net}} = \sqrt{N_{gross} + N_{Background}}$$

## Ækvivalent dosis

$$H_T = W_R \times D_{R,T}$$

$H_T$ : ækvivalent dosis optaget af vævet T.

$W_R$ : Vægtet strålingsfaktor; 1 for  $\gamma$  og  $\beta$ ; 20 for  $\alpha$ .

$D_{R,T}$ : absorberet dosis af strålingstypen R i vævet T.

## Del 2: MASTAKI-kursus

### Basale regneregler

Løsning af andengradsligning:  $ax^2 + bx + c = 0$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

*Parenteser*

$$(a + b)(c + d) = ac + ad + cb + bd$$

$$(a + b)^2 = a^2 + b^2 \pm 2ab$$

*Brøker*

$$\frac{a}{b} \pm \frac{c}{d} = \frac{ad \pm cb}{bd}$$

$$\frac{a}{b} \times \frac{c}{d} = \frac{a \times c}{b \times d}$$

$$\frac{\left(\frac{a}{b}\right)}{\left(\frac{c}{d}\right)} = \frac{a}{b} \times \frac{d}{c} = \frac{a \times d}{b \times c}$$

*Parenteser og kvadratsætninger*

$$x \cdot (a + b) = a \cdot x + b \cdot x$$

$$(a \pm b)^2 = a^2 + b^2 \pm 2a \cdot b$$

$$a^2 - b^2 = (a - b)(a + b)$$

*Potenser*

$$a^r \cdot a^s = a^{r+s}$$

$$\frac{a^r}{a^s} = a^{r-s}$$

$$(a^r)^s = a^{r \cdot s}$$

$$(a \cdot b)^r = a^r \cdot b^r$$

$$\left(\frac{a}{b}\right)^r = \frac{a^r}{b^r}$$

$$a^0 = 1, \quad a \neq 0$$

$$a^{-r} = \frac{1}{a^r}$$

$$\sqrt[s]{a^r} = a^{\left(\frac{r}{s}\right)}$$

### Logaritmer

$$\log(a^x) = x \cdot \log(a)$$

$$\log(a \cdot b) = \log(a) + \log(b)$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b)$$

$$\log(10) = 1$$

$$\text{Log}(1) = 0$$

Tilsvarende regler gælder for den naturlige logaritme

$$\ln(a^x) = x \cdot \ln(a)$$

$$\ln(a \cdot b) = \ln(a) + \ln(b)$$

$$\ln\left(\frac{a}{b}\right) = \ln(a) - \ln(b)$$

$$\ln(e) = 1$$

### Differentialer

$$[f(x) \pm g(x)]' = f'(x) \pm g'(x)$$

$$[f(x) \times g(x)]' = f'(x) \times g(x) + g'(x) \times f(x)$$

$$\left[\frac{f(x)}{g(x)}\right]' = \frac{f'(x) \times g(x) - f(x) \times g'(x)}{g(x)^2}$$

$$f(g(x))' = f'(g(x)) \times g'(x)$$

$$[x^n]' = nx^{n-1}$$

$$(e^x)' = e^x$$

$$(a^x)' = \ln(a) \times a^x$$

$$\ln(x)' = \frac{1}{x}$$

$$\sin(x)' = \cos(x)$$

$$\cos(x)' = -\sin(x)$$

$$(e^{-\lambda t})' = -\lambda \times e^{-\lambda t}$$

### Integraler



$$\int_a^b f(x)dx = [F(x)]_a^b = F(b) - F(a)$$

$$\int_a^b x dx = \left[ \frac{1}{2} x^2 \right]_a^b = \frac{1}{2} (b^2 - a^2)$$

$$\int_a^b x^2 dx = \left[ \frac{1}{3} x^3 \right]_a^b$$

$$\int x^n dx = \frac{1}{n+1} x^{n+1} \text{ forudsat } n \neq -1$$

$$\int \frac{1}{x} dx = \ln(x)$$

$$\int e^x dx = e^x$$

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln(a)}$$

$$\int \ln(x) dx = x \ln(x) - x$$

$$\int \sin(x) dx = -\cos(x)$$

$$\int \cos(x) dx = \sin(x)$$

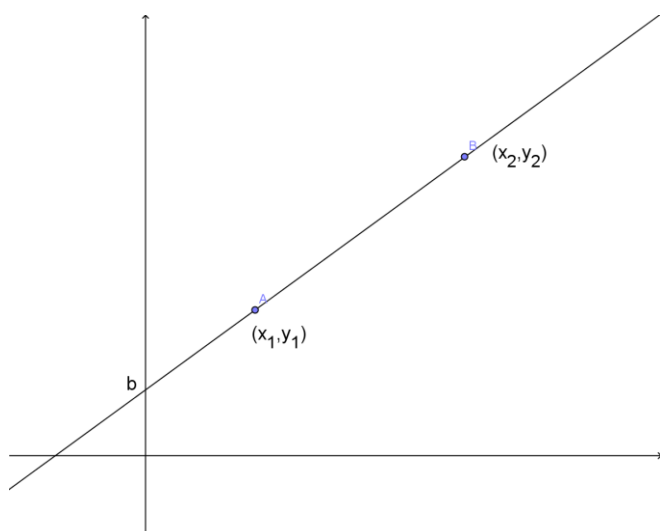
$$\int_0^T A_0 \times e^{-\lambda t} = \left[ A_0 \times \left( -\frac{1}{\lambda} \right) \times e^{-\lambda t} \right]_0^T = -\frac{A_0}{\lambda} (e^{-\lambda T} - e^0) = \frac{A_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T})$$

$$\int_0^{\infty} A_0 \times e^{-\lambda t} = \frac{A_0}{\lambda}$$

### Vektorer

$$\text{Skalarproduktet} = \text{prikproduktet} = \bar{a} \times \bar{b} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = a_1 \times b_1 + a_2 \times b_2$$

## Lineær funktion



Ligning  $y = a \cdot x + b$   
Forskrift  $f(x) = a \cdot x + b$

a er hældningskoefficienten.  
b er skæringen med y-aksen.

Hældningskoefficienten kan bestemmes ved kendskab til to punkter  $(x_1, y_1)$  og  $(x_2, y_2)$  som linjen

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Tangentens ligning

$$y = a \cdot (x - x_1) + y_1$$

Lineær funktion skrevet som lineær ligning

$$a \cdot (x - x_0) + b \cdot (y - y_0) = 0$$

## Trigonometri

Radianer	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\pi$	$2\pi$
Grader	0	30	45	60	90	180	360
Cosinus	1	0,87	0,71	0,5	0	-1	1
Sinus	0	0,5	0,71	0,87	1	0	0

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

En cirkels omkreds

$$O = 2 \times \pi \times r$$

En cirkels areal

$$A = \pi \times r^2$$

En kugles rumfang

$$V = \frac{4}{3} \times \pi \times r^3$$

## Enheder

Variabel	Forkortelse	Enhed
Hastighedskonstant (transportkonstant)	k	Enhedsløs
Fordelingsvolumen	$V_D$	Enhedsløs eller volumen
Permeabilitetsoverfladeprodukt	PS	ml min <sup>-1</sup>
Flux	J	mmol min <sup>-1</sup>
Flow (blodgennemstrømning)	F	ml min <sup>-1</sup>
Perfusionskoefficient	f	ml min <sup>-1</sup> 100 g væv <sup>-1</sup>
Minutvolumen (cardiac output)	Q	Liter min <sup>-1</sup>
Middeltransittid	$\bar{t}$	sek
Clearance	Cl	ml min <sup>-1</sup>

## Begreber

Blackbox model:

non-kompartmental kinetisk model

Clearance:

den hastighed hvormed et givet stof fjernes fra en referencevæske (fx plasma). Hvis referencevæsken er plasma svarer clearance til den mængde plasma det givne organ renser fuldstændig for stoffet pr tidsenhed.

Ekstraktionsfraktion:

andelen af et stof der ekstraheres fra blodbanen under blodets passage gennem et givet organ eller område.

Flux:

antal partikler, der passerer en reel eller tænkt flade pr tid.

Fordelingsfraktion:

forholdet mellem indikatorens vævs- og plasmakoncentration ved konstant infusion af indikator (*partition coefficient*).

Fordelingsrum:

se fordelingsvolumen

Fordelingsvolumen:	det ækvivalente volumen hvori et stof fordeler sig med en referencekoncentration. Hvis plasmakoncentrationen af et stof fx anvendes som referencekoncentrationen, så er fordelingsvolumen i et kompartment det tænkte volumen det givne kompartment skulle have, for at koncentrationen ville være den samme som i plasma
Hastighedskonstant:	den brøkdelen af indholdet i et kompartment der transporteres til et andet kompartment pr tidsenhed.
Indikator:	substanser, herunder tracere, som anvendes til kinetiske bestemmelser.
Katenær model:	kompartments, der er forbundne i serie.
Kompartiment:	et område (også kaldet pool), hvor et stof er homogent fordelt. Et kompartment betragtes som <i>lukket</i> , hvis det ikke er i direkte forbindelse med omgivelserne (dvs. områder der ikke er del af modellen) og <i>åbent</i> , hvis det er i direkte forbindelse med omgivelserne.
Lumped pools:	en sammenlægning af compartments, hvor koncentrationerne af en substans kan antages at være i et fast indbyrdes forhold.
Mamillær model:	et centralt kompartment, der er forbundet med perifere compartments.
Permeabilitets-overfladeprodukt:	afspejler et kapillærs <i>in vivo</i> gennemtrængelighed for en substans, idet både kapillærvæggens beskaffenhed (permeabilitet) og dens overflade tages i betragtning.
Steady state:	ligevægtstilstand, hvor der ikke sker nogen nettoændring i et system.

Transportkonstant:	se hastighedskonstant
Tracer:	mærket sporstof, der på trods af mærkningen opfører sig fuldstændig som sit moderstof.

## Formler

I et system med  $n$  kompartments, kan koncentrationstidskurven fra det første kompartment ( $C_1$ ) beskrives med en sum af eksponentialfunktioner:

$$C_1(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-b_i t}$$

Læg mærke til at formlen her minder om "Henfaldsloven."  $A$  beskriver udgangskoncentrationen i det første kompartment og  $b$  er her en konstant (typisk  $k$ , jf. begrebsoversigten ovenfor), der beskriver det fraktionelle koncentrationsfald per tidsenhed ( $t$ ).

### Lineære metoder

Patlak-plot anvendes ved irreversible tracere:

$$K_1 = \text{metabolic rate} = \kappa_3 (\text{hældning}) = \frac{K_1 \times k_3}{k_2 + k_3}$$

$$V_d = \text{Distributionsvolumen} = \frac{K_1 \times k_2}{(k_2 + k_3)^2}$$

Ved reversible tracere anvendes Logan-plot.

Fordelingsvolumen: Hvor mange enheder plasma skal til for at kunne indeholde den mængde sporstof der er i en enhed væv:

$$V_T = \frac{\text{Koncentration i væv}}{\text{Koncentration i plasma}}$$

### Transkapillær transport

Generel ligning for flux:

$$J = F \cdot C$$

$$J_{in} = F \cdot C_a \text{ (unidirektional influx i et organ, undertiden kaldet } \textit{delivery})$$

$$J_{out} = F \cdot C_v \text{ (unidirektional efflux fra et organ)}$$

Nettoflux (fx optagelse i eller udskillelse fra organ, også kaldet retentionsflux), jf. Ficks princip:

$$J_{net} = J_{in} - J_{out}$$

$$J_{net} = F \cdot C_a - C_v$$

$$F = \frac{J_{net}}{C_a - C_v}$$

Et givet sted  $x$  i kapillærer, hvor koncentrationen er  $C(x)$  vil den unidirektionale flux over kapillæret være:

$$J_{in} = PS \cdot C(x)$$

Ekstraktionsfraktion (Renkin-Crone):

$$E = \frac{C_a - C_v}{C_a}$$

$$E = 1 - e^{-\frac{PS}{F}}$$

Transmitteret fraktion T:

$$T = 1 - \frac{C_a - C_v}{C_a} = 1 - E$$

Permeabilitets-overflade (PS)-produkt:

$$PS = -F \cdot \ln\left(\frac{C_v}{C_a}\right) = -F \cdot \ln(1 - E)$$

$$C_v = C_a \cdot e^{\frac{-PS}{F}}$$

hvor  $C_v$  og  $C_{in}$  er ud- og indløbskoncentrationer i kapillæret.

Clearance:

Den renale clearance af et stof beregnes:

$$Cl = (U \times \dot{V}) / C$$

hvor  $U$  er koncentrationen i urin,  $\dot{V}$  er diuresen og  $C$  er plasmakoncentrationen af det givne stof

$$Cl = \frac{J_{ret}}{C_{ref}}$$

$$Cl = \frac{V_D}{\bar{t}}$$

$$Cl = E \cdot F$$

$$Cl = F \cdot \left(1 - e^{\frac{-PS}{F}}\right)$$

Cerebral metabolic rate (CMR<sub>glc</sub>):

$$CMR_{glc} = \frac{C_p}{Lc} \times \frac{K_1 \times k_2}{k_2 + k_3}$$

hvor  $C_p$  er koncentration af glukose i plasma, og  $Lc$  er 'lumped constant'

### Bestemmelse af hjertets minutvolumen

- Ficks princip:  
Iltoptagelsen i lungerne måles, og der måles iltkoncentrationer i blandet venøst blod (fra højre atrium eller a. pulmonalis) og fra en systemarterie.

$$Q = \frac{VO_2}{C_a - C_v}$$

- Henriques-Hamiltons metode (indikatorfortynding):  
Bolusinjektion af indikatormængden  $n$  i højre atrium eller a. pulmonalis. Seriel prøvetagning i systemarterie mhp. måling af indikator før recirkulation (ellers korrektion for dette):

$$Q = \frac{n}{\int_0^{\infty} C_a(t) dt}$$

- Stewarts princip (konstant infusion): infusion af indikator med konstant hastighed i højre atrium eller a. pulmonalis; stofmængden  $n$  injiceres i tidsrummet  $\Delta t$ . Prøvetagning mhp. indikatorkoncentration i systemarterie før recirkulation (ellers korrektion for dette), hvor stofmængden  $n$  injiceres i tidsrummet  $\Delta t$ .

$$Q = \frac{n}{C_a \cdot \Delta t}$$

### Bestemmelse af blodvolumen

Blodvolumen i et organ eller område:

$$V = F \cdot \bar{t}$$

$$V_D = \bar{t} \cdot Cl$$

Hvor  $V$  er det givne volumen og  $\bar{t}$  er middeltransittiden.



## Egne noter



## Hyppigt anvendte isotoper

Isotop	Halveringstid	Vigtigste henfald og energier
<sup>51</sup> Cr	27,7 dage	EC, $\gamma$ -fotoner 320 keV
<sup>64</sup> Cu	12,7 timer	$\beta^+$ , annih-fotoner 511 keV
<sup>68</sup> Ga	67,7 minutter	$\beta^+$ , annih-fotoner 511 keV
<sup>18</sup> F	109,8 minutter	$\beta^+$ , annih-fotoner 511 keV
<sup>123</sup> I	13,2 timer	EC, $\gamma$ -fotoner 159 keV
<sup>131</sup> I	8,0 dage	$\beta^-$ , $\gamma$ -fotoner 364 keV
<sup>111</sup> In	67,3 timer	EC, $\gamma$ -fotoner 245 keV (94%)
<sup>81m</sup> Kr	13,1 sekunder	IT, $\gamma$ -fotoner 190 keV (68%)
<sup>177</sup> Lu	6,6 dage	$\beta^-$ (79%)
<sup>15</sup> O	2,0 minutter	$\beta^+$ (100%), annih-fotoner 511 keV
<sup>223</sup> Ra	11,4 dage	$\alpha$
<sup>82</sup> Rb	75 sekunder	$\beta^+$ (82%), annih-fotoner 511 keV
<sup>99m</sup> Tc	6,0 timer	IT, $\gamma$ -fotoner 190 keV

# Det periodiske system

## The Periodic Table of the Elements

group 1	2	13	14	15	16	17	18											
period 1	<b>H</b> Hydrogen 1.00794 1	<b>He</b> Helium 4.002602 2																
2	<b>Li</b> Lithium 6.941 3	<b>Be</b> Beryllium 9.012182 4																
3	<b>Na</b> Sodium 22.98976 11	<b>Mg</b> Magnesium 24.3050 12																
4	<b>K</b> Potassium 39.0983 19	<b>Ca</b> Calcium 40.078 20	<b>Sc</b> Scandium 44.95591 21	<b>Ti</b> Titanium 47.88 22	<b>V</b> Vanadium 50.9415 23	<b>Cr</b> Chromium 51.9962 24	<b>Mn</b> Manganese 54.93804 25	<b>Fe</b> Iron 55.845 26	<b>Co</b> Cobalt 58.93319 27	<b>Ni</b> Nickel 58.6934 28	<b>Cu</b> Copper 63.546 29	<b>Zn</b> Zinc 65.38 30	<b>Ga</b> Gallium 69.723 31	<b>Ge</b> Germanium 72.64 32	<b>As</b> Arsenic 74.92160 33	<b>Se</b> Selenium 78.96 34	<b>Br</b> Bromine 79.904 35	<b>Kr</b> Krypton 83.798 36
5	<b>Rb</b> Rubidium 85.4678 37	<b>Sr</b> Strontium 87.62 38	<b>Y</b> Yttrium 88.90585 39	<b>Zr</b> Zirconium 91.224 40	<b>Nb</b> Niobium 92.90638 41	<b>Mo</b> Molybdenum 95.96 42	<b>Tc</b> Technetium (98) 98	<b>Ru</b> Ruthenium 101.07 44	<b>Rh</b> Rhodium 102.90545 45	<b>Pd</b> Palladium 106.42 46	<b>Ag</b> Silver 107.8682 47	<b>Cd</b> Cadmium 112.411 48	<b>In</b> Indium 114.818 49	<b>Sn</b> Tin 118.710 50	<b>Sb</b> Antimony 121.760 51	<b>Te</b> Tellurium 127.60 52	<b>I</b> Iodine 126.90447 53	<b>Xe</b> Xenon 131.293 54
6	<b>Cs</b> Cesium 132.90545 55	<b>Ba</b> Barium 137.327 56	<b>Lu</b> Lutetium 174.9668 71	<b>Hf</b> Hafnium 178.49 72	<b>Ta</b> Tantalum 180.9478 73	<b>W</b> Tungsten 183.84 74	<b>Re</b> Rhenium 186.207 75	<b>Os</b> Osmium 190.23 76	<b>Ir</b> Iridium 192.222 77	<b>Pt</b> Platinum 195.084 78	<b>Au</b> Gold 196.96657 79	<b>Hg</b> Mercury 200.59 80	<b>Tl</b> Thallium 204.3833 81	<b>Pb</b> Lead 207.2 82	<b>Bi</b> Bismuth 208.9804 83	<b>Po</b> Polonium (209) 209	<b>At</b> Astatine (210) 210	<b>Rn</b> Radon (222) 222
7	<b>Fr</b> Francium (223) 223	<b>Ra</b> Radium (226) 226	<b>Lr</b> Lawrencium (262) 262	<b>Rf</b> Rutherfordium (261) 261	<b>Db</b> Dubnium (262) 262	<b>Sg</b> Seaborgium (266) 266	<b>Bh</b> Bohrium (264) 264	<b>Hs</b> Hassium (277) 277	<b>Mt</b> Meitnerium (268) 268	<b>Ds</b> Darmstadtium (271) 271	<b>Rg</b> Roentgenium (272) 272	<b>Cn</b> Copernicium (285) 285	<b>Uut</b> Ununtrium (284) 284	<b>Fl</b> Flerovium (289) 289	<b>Uup</b> Ununpentium (288) 288	<b>Lv</b> Livermorium (292) 292	<b>Uus</b> Ununseptium (294) 294	<b>Uuo</b> Ununoctium (294) 294

atomic mass

most stable mass number

1st ionization energy in kJ/mol

chemical symbol

name

electron configuration

alkali metals

alkaline metals

other metals

transition metals

lanthanoids

actinoids

metalloids

nonmetals

halogens

noble gases

unknown elements

radioactive elements have masses in parentheses

oxidation states most common as in bold

atomic number

electronegativity

oxidation states most common as in bold

oxidation states most common as in bold

group 1	2	13	14	15	16	17	18											
period 1	<b>H</b> Hydrogen 1.00794 1	<b>He</b> Helium 4.002602 2																
2	<b>Li</b> Lithium 6.941 3	<b>Be</b> Beryllium 9.012182 4																
3	<b>Na</b> Sodium 22.98976 11	<b>Mg</b> Magnesium 24.3050 12																
4	<b>K</b> Potassium 39.0983 19	<b>Ca</b> Calcium 40.078 20	<b>Sc</b> Scandium 44.95591 21	<b>Ti</b> Titanium 47.88 22	<b>V</b> Vanadium 50.9415 23	<b>Cr</b> Chromium 51.9962 24	<b>Mn</b> Manganese 54.93804 25	<b>Fe</b> Iron 55.845 26	<b>Co</b> Cobalt 58.93319 27	<b>Ni</b> Nickel 58.6934 28	<b>Cu</b> Copper 63.546 29	<b>Zn</b> Zinc 65.38 30	<b>Ga</b> Gallium 69.723 31	<b>Ge</b> Germanium 72.64 32	<b>As</b> Arsenic 74.92160 33	<b>Se</b> Selenium 78.96 34	<b>Br</b> Bromine 79.904 35	<b>Kr</b> Krypton 83.798 36
5	<b>Rb</b> Rubidium 85.4678 37	<b>Sr</b> Strontium 87.62 38	<b>Y</b> Yttrium 88.90585 39	<b>Zr</b> Zirconium 91.224 40	<b>Nb</b> Niobium 92.90638 41	<b>Mo</b> Molybdenum 95.96 42	<b>Tc</b> Technetium (98) 98	<b>Ru</b> Ruthenium 101.07 44	<b>Rh</b> Rhodium 102.90545 45	<b>Pd</b> Palladium 106.42 46	<b>Ag</b> Silver 107.8682 47	<b>Cd</b> Cadmium 112.411 48	<b>In</b> Indium 114.818 49	<b>Sn</b> Tin 118.710 50	<b>Sb</b> Antimony 121.760 51	<b>Te</b> Tellurium 127.60 52	<b>I</b> Iodine 126.90447 53	<b>Xe</b> Xenon 131.293 54
6	<b>Cs</b> Cesium 132.90545 55	<b>Ba</b> Barium 137.327 56	<b>Lu</b> Lutetium 174.9668 71	<b>Hf</b> Hafnium 178.49 72	<b>Ta</b> Tantalum 180.9478 73	<b>W</b> Tungsten 183.84 74	<b>Re</b> Rhenium 186.207 75	<b>Os</b> Osmium 190.23 76	<b>Ir</b> Iridium 192.222 77	<b>Pt</b> Platinum 195.084 78	<b>Au</b> Gold 196.96657 79	<b>Hg</b> Mercury 200.59 80	<b>Tl</b> Thallium 204.3833 81	<b>Pb</b> Lead 207.2 82	<b>Bi</b> Bismuth 208.9804 83	<b>Po</b> Polonium (209) 209	<b>At</b> Astatine (210) 210	<b>Rn</b> Radon (222) 222
7	<b>Fr</b> Francium (223) 223	<b>Ra</b> Radium (226) 226	<b>Lr</b> Lawrencium (262) 262	<b>Rf</b> Rutherfordium (261) 261	<b>Db</b> Dubnium (262) 262	<b>Sg</b> Seaborgium (266) 266	<b>Bh</b> Bohrium (264) 264	<b>Hs</b> Hassium (277) 277	<b>Mt</b> Meitnerium (268) 268	<b>Ds</b> Darmstadtium (271) 271	<b>Rg</b> Roentgenium (272) 272	<b>Cn</b> Copernicium (285) 285	<b>Uut</b> Ununtrium (284) 284	<b>Fl</b> Flerovium (289) 289	<b>Uup</b> Ununpentium (288) 288	<b>Lv</b> Livermorium (292) 292	<b>Uus</b> Ununseptium (294) 294	<b>Uuo</b> Ununoctium (294) 294

oxidation states most common as in bold

oxidation states most common as in bold

oxidation states most common as in bold

oxidation states most common as in bold

oxidation states most common as in bold

electron configuration blocks

notes

- as of yet, elements 113, 115, 117 and 118 have no official name designated by the IUPAC
- elements in the shaded area are radioactive
- all elements are expected to have an oxidation state of zero.