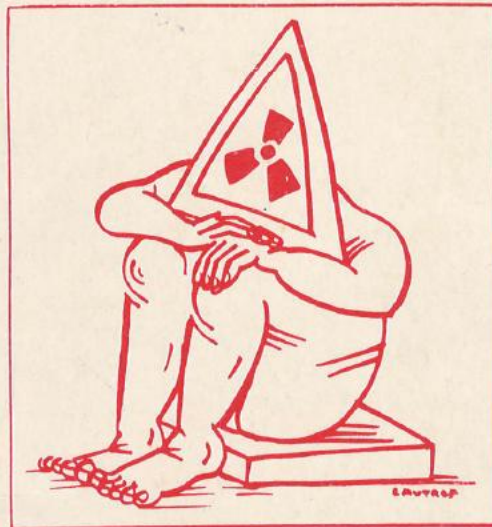


NATURFAG

Helsefysik



Kai Hjortgaard Christensen



Indholdsfortegnelse

Forord	5
1. Atomernes opbygning og radioaktivitet	7
1.1 Atomer	7
1.2 Kerner	8
1.3 Radioaktivitet	9
1.4 Aktivitet og halveringstid	12
1.5 Vekselvirkning med stof	17
2. Helsefysiske måleenheder	19
2.1 En historisk måleenhed	19
2.2 Nutidens måleenheder	19
3. Baggrundsstrålingen	22
3.1 Strålingen fra jorden	22
3.2 Den kosmiske stråling	23
3.3 Den interne stråling	24
3.4 Andre bidrag	25
4. Biologisk virkning af ioniserende stråling	27
4.1 Virkninger i cellen	27
4.2 Direkte skader	30
4.3 Stokastiske skader	31
4.4 Genetiske skader	34
5. Normer for strålingsbeskyttelse	36
5.1 Generelle principper	36
5.2 Dosisgrænser	37
5.3 Hvordan har man fastsat grænser for stråling?	38
6. Helsefysiske beregninger	41
6.1 Nødvendige forudsætninger	41
6.2 Beregning af ligevægtsaktiviteten	42
6.3 Beregning af dosisækvivalentet i ligevægtstilstanden	45
6.4 Vurdering af det beregnede dosisækvivalent	46
Ekskursioner	50
Film/video	50
Litteratur	51
Stikordsregiser	52

1. Atomernes opbygning og radioaktivitet

Vi skal i dette afsnit omtale atomernes opbygning, deres bestanddele og se på, hvilke egenskaber, der gør visse grundstoffer radioaktive. Halveringstiden for radioaktive stoffer indføres, og vi skal se, hvordan den kan bestemmes eksperimentelt. Til sidst i dette afsnit vil vi se, hvordan man afskærmer radioaktive kilder.

1.1 Atomer

På grundlag af eksperimenter og teoretiske overvejelser i begyndelsen af dette århundrede, lykkedes det at forklare væsentlige dele af atomets struktur.

Et atom består af nogle negativt elektrisk ladede partikler, kaldet *elektroner*, og en positiv elektrisk ladet *kerne*.

Elektronerne er partikler med en utrolig lille masse ($9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$) og en negativ ladning på $-e$, hvor e står for elementarladningen.

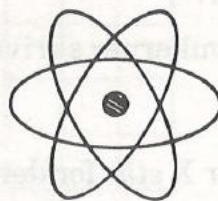


Fig 1 Et atom tegnes ofte på denne måde.

Kernen var ikke, som man oprindeligt troede, en enkelt partikel. Den viste sig at indeholde et antal positivt ladede partikler kaldet *protoner*, hver med en positiv elementarladning e og et antal neutrale partikler, kaldet *neutroner*. Protoner og neutroner har næsten samme masse, nemlig ca. 1840 gange elektronens ($1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$). I neutrale atomer er der lige mange elektroner og protoner. Neutroner og protoner kaldes under et *nukleoner*.

På figur 2 kan man se størrelsesforholdene i et atom. Skal man anskueliggøre disse meget små længder, kan man antage, at kernen er 1 cm. i diameter, så vil atomets diameter være ca. 100 m.

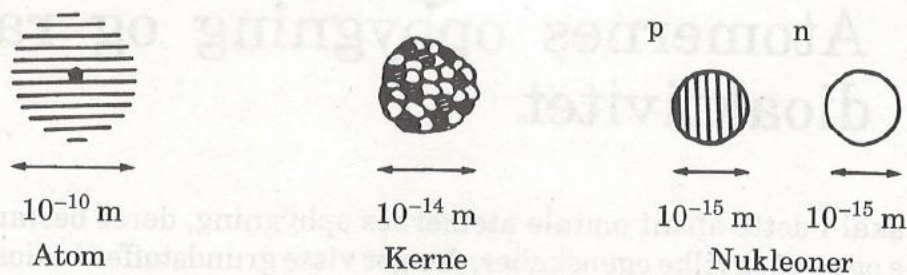


Fig 2 Størrelsesforhold i et atom.

1.2 Kerner

Vi skal i det følgende se lidt nøjere på kernens opbygning.

Antallet af protoner i kernen kaldes Z og antallet af neutroner N . Z kaldes *atomnummeret* og $A = Z + N$ kaldes *massetallet*, fordi man stort set kender atomets masse, når man kender antallet af nukleoner.

Atomkerner skrives derfor på følgende måde



hvor X står for den kemiske betegnelse for grundstoffet.

Eksempel 1.

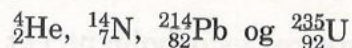
${}^{12}_6\text{C}$ betyder en kulstofkerne med 6 protoner og 6 neutroner.

${}^{14}_6\text{C}$ betyder en kulstofkerne med 6 protoner og 8 neutroner.

Som det fremgår af eksemplet kan et grundstof, dvs. en bestemt Z -værdi, have flere forskellige A -værdier. Disse kaldes *isotoper*.

Opgave 1.

Angiv antallet af protoner og neutroner i følgende kerner:



Da Z -værdien og den kemiske betegnelse for grundstoffet er synony-

me, kan man udelade Z -værdien og i stedet skrive C-12, C-14, U-235 osv., idet man så ved, at C har nummer 6 og U har nummer 92.

Man afbilder ofte de naturligt forekommende grundstoffer i et koordinatsystem med N ud af 1.aksen og Z op ad 2.aksen (figur 3). F.eks. får C-12 i et sådant koordinatsystem koordinaterne (6,6) og U-235 (143,92).

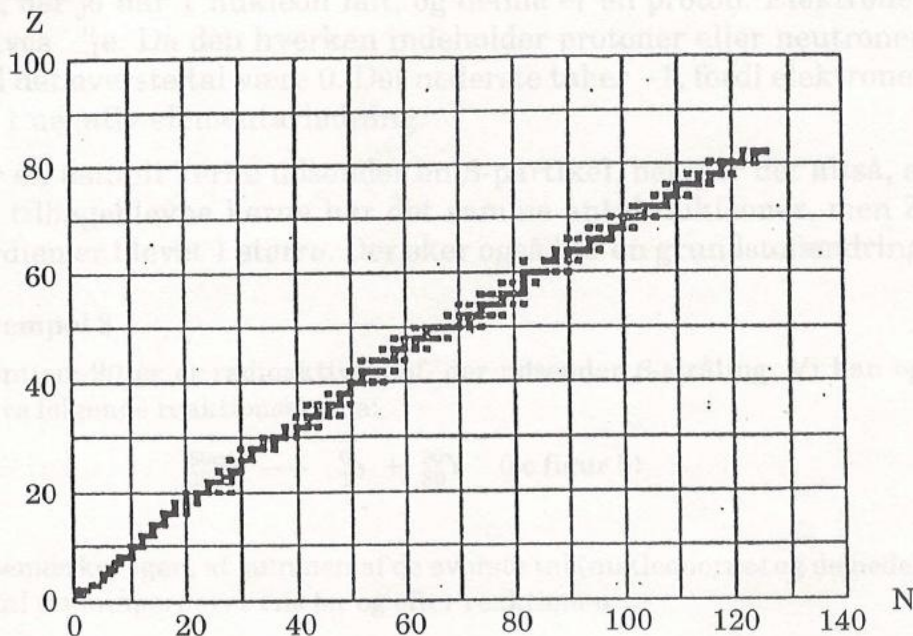


Fig 3 De naturligt forekommende kerner.

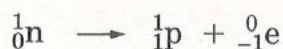
Opgave 2.

Gør ud fra figur 3 rede for, hvordan det forholder sig med antal protoner og neutroner i tunge og lette kerner.

1.3 Radioaktivitet

Man kan undre sig over, at atomkerner overhovedet hænger sammen. Bortset fra ${}^1_1\text{H}$ består de jo alle af mindst 2 protoner og et antal neutroner, men da protonerne er positivt ladede og befinder sig meget tæt på hinanden, frastøder de hinanden med en stor elektrisk kraft. Når de alligevel hænger sammen, skyldes det, at der eksiste-

lertid ved, at der foregår en omdannelse af en neutron til en proton og en elektron. Denne proces angives på følgende måde:

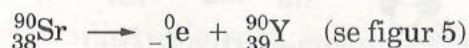


At en neutron skrives ${}^1_0\text{n}$ følger af, at den består af 1 nukleon ialt (det øverste tal) og 0 protoner (det nederste tal). Tilsvarende for protonen, der jo har 1 nukleon ialt, og denne er en proton. Elektronen skrives ${}^0_{-1}\text{e}$. Da den hverken indeholder protoner eller neutroner, skal det øverste tal være 0. Det nederste tal er -1 , fordi elektronen har 1 negativ elementarladning.

Når en ustabil kerne udsender en β -partikel, betyder det altså, at den tilbageblevne kerne har det samme antal nukleoner, men Z -værdien er blevet 1 større. Der sker også her en grundstofændring.

Eksempel 3

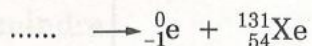
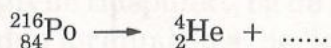
Strontium-90 er et radioaktivt stof, der udsender β -stråling. Vi kan opskrive følgende reaktionsskema:



Vi bemærker igen, at summen af de øverste tal (nukleonerne) og de nederste tal (ladningerne) er ens før og efter reaktionen.

Opgave 3

Afstem følgende reaktioner:



Find de kemiske betegnelser for de ukendte grundstoffer i det periodiske system.

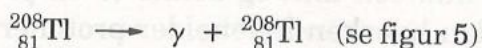
γ -stråling er bølgestråling ligesom lys- og radiobølger, men betydelig mere energirig. Da den γ -stråling, der udsendes fra et bestemt γ -radioaktivt grundstof, har en bestemt bølgelængdesammensætning, kan en bestemmelse af bølgelængderne bruges til at identificere, hvilket stof strålingen kommer fra. Denne metode kaldes gam-

maspektrometri. Ved en udsendelse af γ -stråling sker der ikke nogen grundstofændring, idet der ikke sker ændringer med proton- og neutrontallet.

Eksempel 4

Thallium-208 er et radioaktivt stof, der udsender γ -stråling.

Reaktionen skrives således:



Den *røntgenstråling*, vi får fra røntgenapparater på hospitalet eller hos tandlægen, ligner den γ -stråling, der kommer fra radioaktive stoffer. At den har fået et specielt navn skyldes, at den frembringes ved en helt anden metode og har noget mindre energi. Radioaktiv stråling og røntgenstråling kaldes også for *ioniserende stråling*, fordi de er istand til at danne ioner i det stof, de passerer.

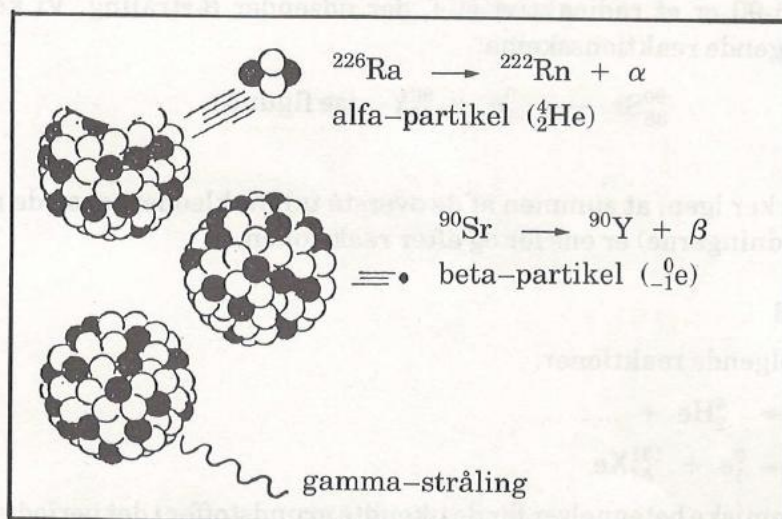


Fig 5 Den udsendte ioniserende stråling kan være partikler (α -, β -) eller den kan være bølgestråling (γ -).

1.4 Aktivitet og halveringstid

Når et radioaktivt materiale henfalder, sker det ved, at de enkelte

kerner udsender radioaktiv stråling. Det antal henfald, der sker pr. sekund varierer fra stof til stof.

Definition:

Ved *aktiviteten* A forstås det antal kerner, der henfalder pr. sek. Enheden for aktivitet kaldes Bq (becquerel).

Eksempel 5

At en given mængde radioaktivt stof har $A = 50.000$ Bq betyder, at 50.000 kerner henfalder i løbet af 1 sek.

Det viser sig, at alle kerner har en bestemt sandsynlighed for at henfalde i løbet af det næste sekund. Kaldes denne sandsynlighed k , fås

$$A = k \cdot N$$

hvor N betegner antallet af kerner. k kaldes *henfaldskonstanten*.

Eksempel 6

Hvis $k = 0,001 \text{ s}^{-1}$ og $N = 50 \cdot 10^6$ fås, at $0,001 \cdot 50 \cdot 10^6 = 50.000$ kerner henfalder på 1 sek; altså $A = 50.000$ Bq.

Da antal henfald pr. sekund afhænger af antallet af kerner på det givne tidspunkt, og da antallet af kerner af en bestemt slags hele tiden formindskes (de henfalder) vil aktiviteten også hele tiden blive mindre.

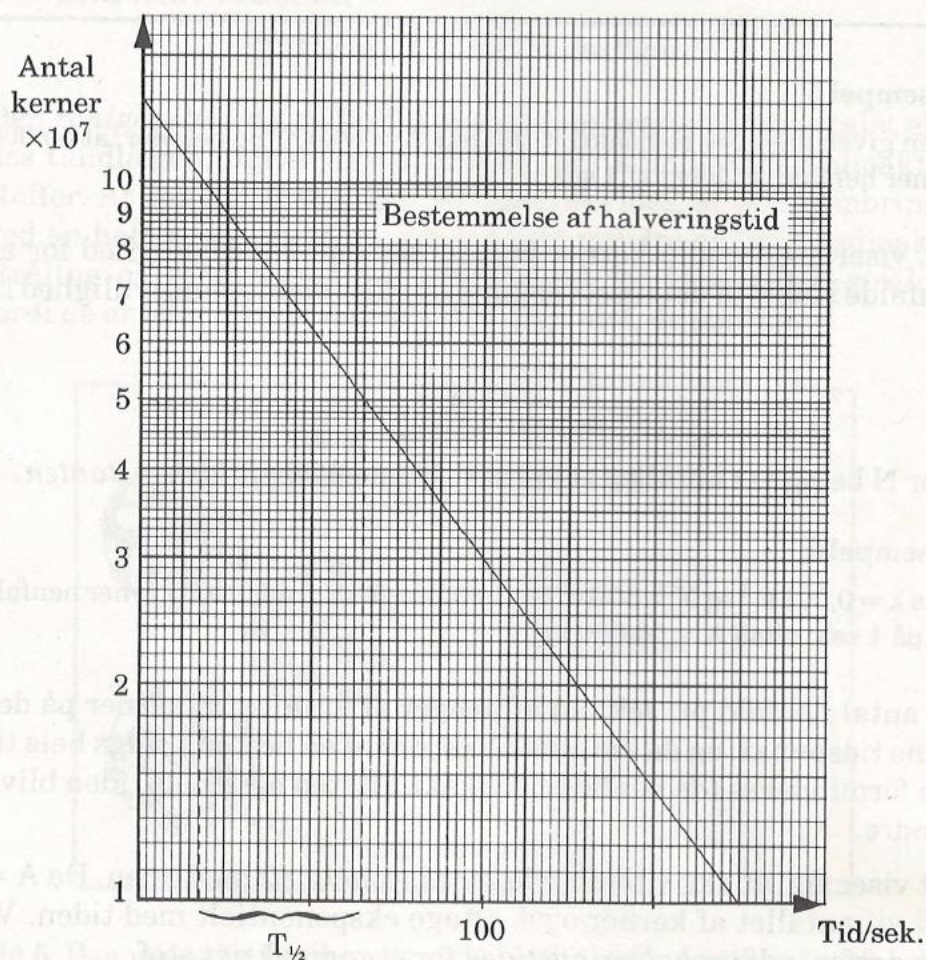
Det viser sig, at aktiviteten *aftager eksponentielt* med tiden. Da $A = k \cdot N$ vil antallet af kerner også aftage eksponentielt med tiden. Vi kan derfor indføre *halveringstiden* for et radioaktivt stof.

Definition:

Ved halveringstiden, $T_{1/2}$, forstås den tid der går, inden halvdelen af et vist antal radioaktive kerner er henfaldet.

Det fremgår af det foregående, at jo større henfaldskonstanten k er, jo hurtigere henfalder kernerne, og jo mindre er halveringstiden. Det kan vises, at der er følgende sammenhæng mellem k og $T_{1/2}$

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{k}$$



Opgave 4

På figuren er sammenhørende værdier af antal kerner og tiden indtegnet i et enkeltlogaritmisk koordinatsystem. Da grafen i et sådant koordinatsystem er en ret linie, ved man, at antal kerner aftager eksponentielt med tiden.

Aflæs halveringstiden og beregn k .

Eksempel 7

Når $k = 0,037 \text{ s}^{-1}$, kan halveringstiden beregnes således:

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{0,037 \text{ s}^{-1}} = 18,7 \text{ sek.}$$

Hvis $A = 30.000 \text{ Bq}$ kan antallet af radioaktive kerner i stoffet beregnes:

$$\text{Vi har } A = k \cdot N, \text{ dvs. } N = \frac{A}{k} = \frac{30.000 \text{ Bq}}{0,037 \text{ s}^{-1}} = 810810.$$

Opgave 5

For en mængde radioaktivt materiale har vi bestemt $A = 5 \cdot 10^6 \text{ Bq}$ og $T_{1/2} = 2 \text{ døgn}$.

Bestem antallet af kerner.

Opgave 6

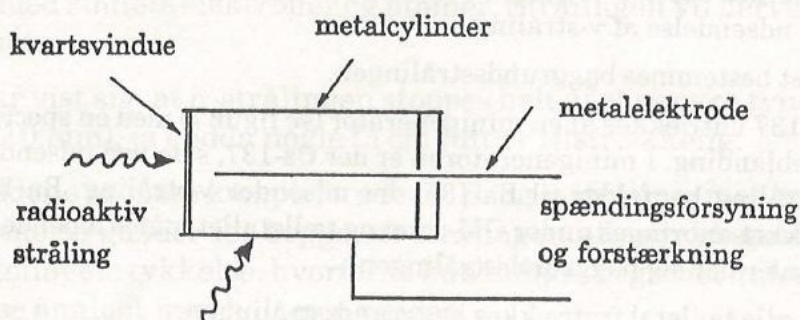
Man har foretaget følgende målinger på et radioaktivt stof:

tid/timer	0	20	40	80	120
antal kerner	$3,5 \cdot 10^7$	$2,4 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$	$0,8 \cdot 10^7$	$0,4 \cdot 10^7$

Indtegn måleresultaterne på enkeltlogaritmisk papir og bestem halveringstiden $T_{1/2}$, henfaldskonstanten k samt aktiviteten til tiden 0.

Da N er eksponentielt aftagende, og A og N er proportionale, må A også være eksponentielt aftagende med samme halveringstid. Dette har betydning, idet det er langt lettere at måle aktiviteten end det er at måle antal kerner. Til dette formål bruges et *Geiger-Müller rø*, hvis princip fremgår af figur 6.

Fig 6 Geiger-Müller rør i tværsnit.



I Geiger-Müller røret (GM-røret) findes ganske små mængder af en luftart. Når radioaktiv stråling kommer ind i røret, rammes nogle af atomerne i denne luftart. Der løsriveres en elektron, så atomet fra at have været neutralt ladet, bliver positivt ladet. Den løsrevne elektron bevæger sig mod metalelektroden, der er positiv. Elektronen slår undervejs flere elektroner løs fra andre atomer. Denne kædereaktion forårsager altså en kortvarig strøm af elektroner, der giver en såkaldt puls, der kan forstærkes op og registreres af en tæller. Mellem den positive metalelektrode og den negative metalcylinder er der typisk en spændingsforskel på 500-600 V. Kvartsvinduets formål er dels at holde på luftarten dels at røret skal kunne registrere både α -, β - og γ stråling (α -stråling kan ikke trænge gennem metalcylinderen).

Bemærk at det ikke er aktiviteten, der måles med et GM-rør, men en brøkdel af aktiviteten. Det gør imidlertid ikke noget, da den nævnte brøkdel har samme halveringstid som aktiviteten.

Anbringes et GM-rør et tilfældigt sted, vil det altid give udslag. Det skyldes radioaktiv stråling, som findes overalt, den såkaldte *baggrundsstråling*. (I afsnit 3 omtales baggrundsstrålingen nærmere).

Er vi kun interesseret i den stråling, der kommer fra en bestemt radioaktiv kilde, må vi ved behandlingen af måleresultaterne tage hensyn til baggrundsstrålingen, idet den jo bevirker, at måleresultaterne bliver for høje. Baggrundsstrålingen skal derfor fratrækkes måletallene, inden vi arbejder videre med dem.

Forsøg 1

Formålet med dette forsøg er, at bestemme halveringstiden for Ba-137 henfald ved udsendelse af γ -stråling.

1. Først bestemmes baggrundsstrålingen.
2. Ba-137 udtrækkes af en minigenerator (se figur 7) med en speciel salt-syreblanding. I minigeneratoren er der Cs-137, som ved udsendelse af β -stråling henfalder til Ba-137, der udsender γ -stråling. Ba-137 udtrækket anbringes under GM-røret og tællertallet måles løbende, indtil det nærmer sig baggrundsstrålingen.
3. Fra alle tællertal fratrækkes baggrundsstrålingen.

4. De således korrigerede tællotal indtegnes i et enkeltlogaritmisk koordinatsystem og punkterne forbindes med den bedst mulige rette linie.
5. Halveringstiden kan nu aflæses af grafen og sammenlignes med tabelværdien, som er 153 sekunder. Udregn hvor mange % den fundne værdi afviger fra tabelværdien.

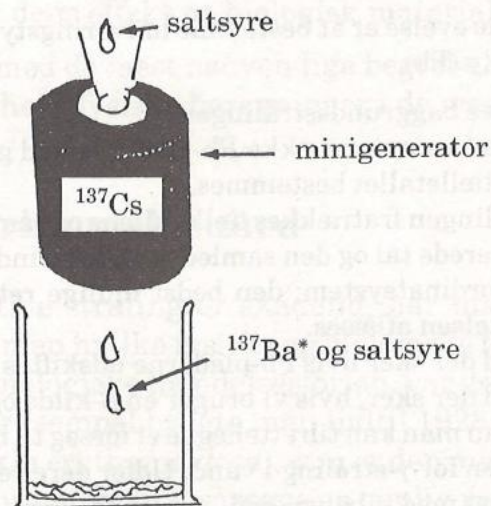


Fig 7 Fremstilling af den radioaktive væske.

1.5 Vekselvirkning med stof

Når radioaktiv stråling passerer et stoflag, vil strålingen vekselvirke med stoffets elektroner og atomer. Strålingen vil derved blive svækket.

Det har vist sig, at α -strålingen stoppes helt af et ganske tyndt stoflag (1/10 mm), ja endda nogle få cm luft er tilstrækkelig.

Forholdene er mere komplicerede for β - og γ -stråling, men med god tilnærmelse gælder for begge, at strålingen aftager eksponentielt med stoflagets tykkelse, hvorfor vi kan indføre begrebet *halveringstykkel* analogt med halveringstiden.

Definition:

Halveringstykkelsen er den stoftykkelse, som er i stand til at halvere strålingen.

Forsøg 2

Formålet med denne øvelse er at bestemme halveringstykkelsen for γ -strålings absorption i bly (Pb).

1. Først bestemmes baggrundsstrålingen.
2. Foran kilden sættes nu en række Pb-plader, en ad gangen. Deres tykkelse måles og tællertallet bestemmes.
3. Baggrundsstrålingen fratrækkes tællertallene og sammenhørende værdier af de reducerede tal og den samlede tykkelse indsættes i et enkeltlogaritmisk koordinatsystem; den bedst mulige rette linie tegnes og halveringstykkelsen aflæses.
4. Prøv at se, hvad der sker hvis Pb-pladerne udskiftes med Al-plader.
5. Prøv at se, hvad der sker, hvis vi bruger en β -kilde og Pb.
6. Overvej, hvordan man kan tilrettelægge et forsøg til bestemmelse af halveringstykkelsen for γ -stråling i vand. Udfør derefter forsøget og sammenlign resultatet med tabelværdien, som er ca. 7 cm.

2. Helsefysiske måleenheder

Vi har i det foregående afsnit målt strålingen i Bq. Skal man vurdere, hvor farlig strålingen er, må man have andre måleenheder, da det viser sig, at arten af og energiindholdet i strålingen spiller en afgørende rolle for dens effekt på biologisk materiale.

Vi vil her nøjes med de mest nødvendige begreber og enheder for at kunne forstå de helsefysiske beregninger i de næste afsnit.

2.1 En historisk måleenhed

At den radioaktive stråling er skadelig, har man vidst siden århundredskiftet, men hvilke fysiske og biologiske forhold, der var afgørende for det biologiske hændelsesforløb, var der længe stor usikkerhed om. For eksempel brugte man indtil 1928 enheden *hudrødmedosis SED* (skin erythema dose), som er den mængde røntgen- eller γ -stråling, der netop vil forårsage en synlig rødmen af huden.

Det var en meget dårlig måleenhed, som det ses af følgende overvejelser: Den såkaldte bløde røntgenstråling, dvs. energisvage stråling, vil afsætte det meste af sin energi i huden uden at der afsættes ret meget i den øvrige del af legemet. Meget energirig γ -stråling afsætter derimod kun en lille del af energien i hudlaget, men meget i den øvrige del af legemet. Da det kun er den del, der afsættes i huden, der giver hudrødmen, vil forskellige bestrålinger af legemet kunne give samme SED-værdi.

2.2 Nutidens måleenheder

Efterhånden blev man klar over, at der er to forhold, der er afgørende for den biologiske virkning af radioaktiv stråling, nemlig den mængde energi der afsættes, og fra hvilken strålingstype den stammer. Det forholder sig sådan, at en bestemt energimængde afsat af α -stråling er 20 gange farligere end den samme energimængde afsat af β - eller γ -stråling.

Definition:

Ved den *absorberede dosis*, D , forstås den energi, der afsættes, divideret med den masse energien afsættes i.

Enheden for D bliver Joule pr. kg (J/kg).
Den kaldes Gy (gray).

Eksempel 8

En person på 75 kg har været udsat for radioaktiv bestråling og derved modtaget en energimængde på 10 J. Den absorberede dosis bliver:

$$D = \frac{10 \text{ J}}{75 \text{ kg}} = 0,133 \text{ Gy}$$

Den enhed, man bruger til at måle strålingens biologiske effekt, kaldes *sievert* (Sv). Den fås ved at multiplicere absorberet dosis D med en faktor Q , der afhænger af strålingstypen. For α -stråling er faktoren 20, for β - og γ -stråling er faktoren 1.

Denne størrelse kaldes dosisækvivalentet og betegnes H . Dvs. $H = Q \cdot D$.

Eksempel 9

Har personen fra eksempel 8 udelukkende været udsat for β - eller γ -stråling bliver $H = 0,133 \text{ Sv}$. Drejer det sig derimod om α -stråling bliver $H = 20 \cdot 0,133 \text{ Sv} = 2,66 \text{ Sv}$.

Eksempel 10

En α -kilde har aktiviteten $A = 50 \cdot 10^6 \text{ Bq}$. Energien af de enkelte α -partikler er $5,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. Al energien afsættes i 5,0 g biologisk væv. Beregn den absorberede dosis og dosisækvivalentet på 1 sek.

Hvert sek. udsendes $50 \cdot 10^6$ α -partikler, hver med en energi på $5,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. Den samlede energi, der udsendes pr. sek. er derfor $(50 \cdot 10^6) \cdot (5,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}) = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ J}$. Da massen $m = 0,005 \text{ kg}$, fås:

$$D = \frac{2,8 \cdot 10^{-5} \text{ J}}{0,005 \text{ kg}} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Gy} = 5,6 \text{ mGy}$$

Da al energien stammer fra α -stråling bliver $H = 20 \cdot (5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}) = 0,112 \text{ Sv}$.

Opgave 7

En β -kilde har aktiviteten $A = 20 \cdot 10^6$ Bq. Energien af de enkelte β -partikler er $1,0 \cdot 10^{-13}$ J. Idet al energien absorberes i 8,0 g biologisk væv, skal den absorberede dosis og dosisækvivalentet på 1 sek. beregnes.

Opgave 8

Lad os antage, at en radioaktiv kilde med samme egenskaber som i opgave 7 anbringes i nærheden af en kræftsvulst på en sådan måde, at svulsten absorberer al den energi, der udsendes, og lad os antage, at aktiviteten hele tiden er den samme. Svulsten vejer 12 g.

Beregn den absorberede dosis efter 20 dages bestråling.

Skema

Omregning mellem nye og gamle enheder.

Fysisk størrelse	Definition	Enhed	Tidligere enhed	Omregningsfaktorer
Absorberet dosis	E/m	$Gy = J/kg$	rad	$1 \text{ rad} = 0,010 \text{ Gy}$
Dosisækvivalent	$(E/m) \cdot Q$	$Sv = J/kg$	rem	$1 \text{ rem} = 0,010 \text{ Sv}$
Aktivitet		$Bq = s^{-1}$	Ci	$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

4.2 Direkte skader

Direkte virkninger af ioniserende stråling optræder kun ved store doser. Man kan stort set sige, at dosisækvivalenter til hele kroppen på under 1 Sv. ikke giver symptoner (der kan naturligvis godt opstå senere skader eller genetiske skader). Helkrops-dosisækvivalenter på 4 Sv. medfører, at ca. halvdelen af de bestrålede individer dør og over 5 Sv. dør næsten alle.

De akutte direkte virkninger af helkropsbestråling kaldes *strålesyge*. De første beskrivelser af symptonerne på strålesyge stammer fra Hiroshima og Nagasaki, som i 1945 blev udsat for atombombean-greb.

Ved en dosis til hele kroppen på 2 Sv. ses følgende symptoner:

Efter 3-4 uger: Hårtab, appetitløshed, halsinfektion, blødning og diarre. Derefter langsom helbredelse.

Ved doser på ca. 4 Sv. ses følgende symptoner:

Efter et par timer: Kvalme og opkastning

Efter 3-4 uger: Hårtab, appetitløshed, træthed, feber. Sår i mund og svælg, blødning, diarre og død (halvde-len).

Ved doser på ca. 6 Sv. ses følgende symptoner:

Efter et par timer: Kvalme og opkastning

Efter 2-3 uger: Diarre, kvalme, opkastning. Sår i mund og svælg, feber, afkøling og død.

I de her omtalte tilfælde er dødsårsagen det såkaldte knoglemarvs-syndrom, dvs. en beskadigelse af de bloddannende knoglemarvs-celler, hvilket bevirker, at der er for få røde blodlegemer, hvide blod-legemer og blodplader. Mangel på røde blodlegemer giver træthed og åndenød, for få hvide blodlegemer bevirker nedsat modstand-skraft mod infektioner og et lavt antal blodplader giver blødninger, da de er årsag til, at blodet størkner, når det kommer i forbindelse med luften.

Direkte virkninger af ioniserende stråling kan også vise sig på enkelte organer f.eks. kan man få grå stær (uklar linse) ved bestråling af øjet, eller nedsat stofskifte ved bestråling af skjoldbruskkirtlen.