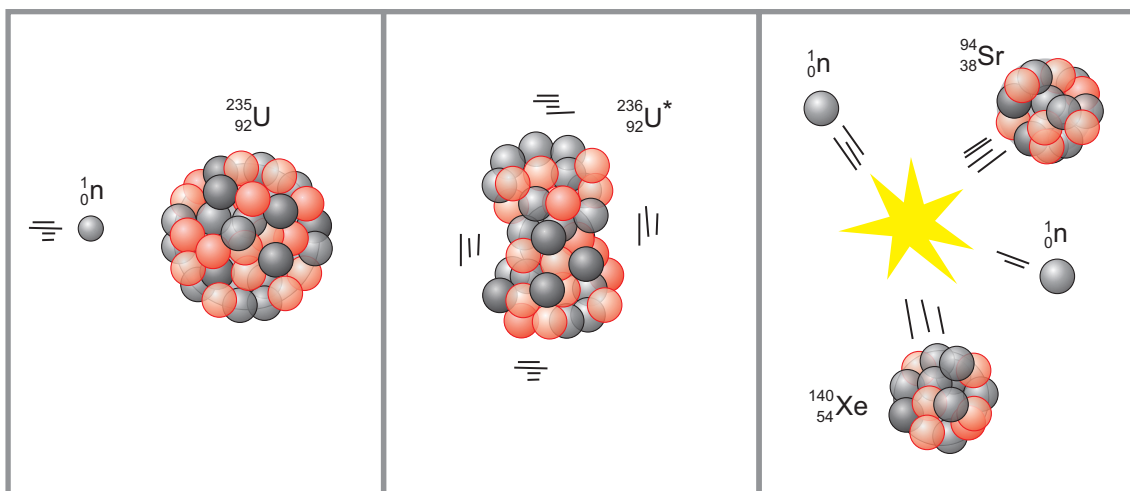


The Manhattan Project & Atombomben



©ERIK VESTERGAARD

Indholdsfortegnelse

1. Indledning.....	5
2. Facts om kernen i atomet.....	5
3. Gammastråling og energiniveauer i kernen.....	7
4. Betastråling.....	8
5. Alfastråling.....	9
6. Brug af kernekort.....	9
7. Henfaldsloven – en terningemodel.....	11
8. Absorption af radioaktiv stråling.....	14
9. Absorptionsloven for gammastråling	15
10. Baggrundsstråling.....	17
11. Dosimetri	19
12. Forholdsregler mod bestråling.....	22
13. Fission.....	23
14. Masse og energi to sider af samme sag	24
15. Kædereaktioner.....	25
Opgaver	28

1. Indledning

Mens atomfysik overvejende handlede om elektronerne i banerne udenfor kernen, så handler *kernefysik* om, hvad der foregår i atomets kerne. Herunder kan nævnes fænomener som *radioaktiv stråling* og *fission*. Sidstnævnte proces kaldes også for *kernespløtning*. Det er kernefysikken, som skal sætte os i stand til at forstå forskellige aspekter af fysikken i forbindelse med emnet *The Manhattan Project* og *atombomben*.

2. Facts om kernen i atomet

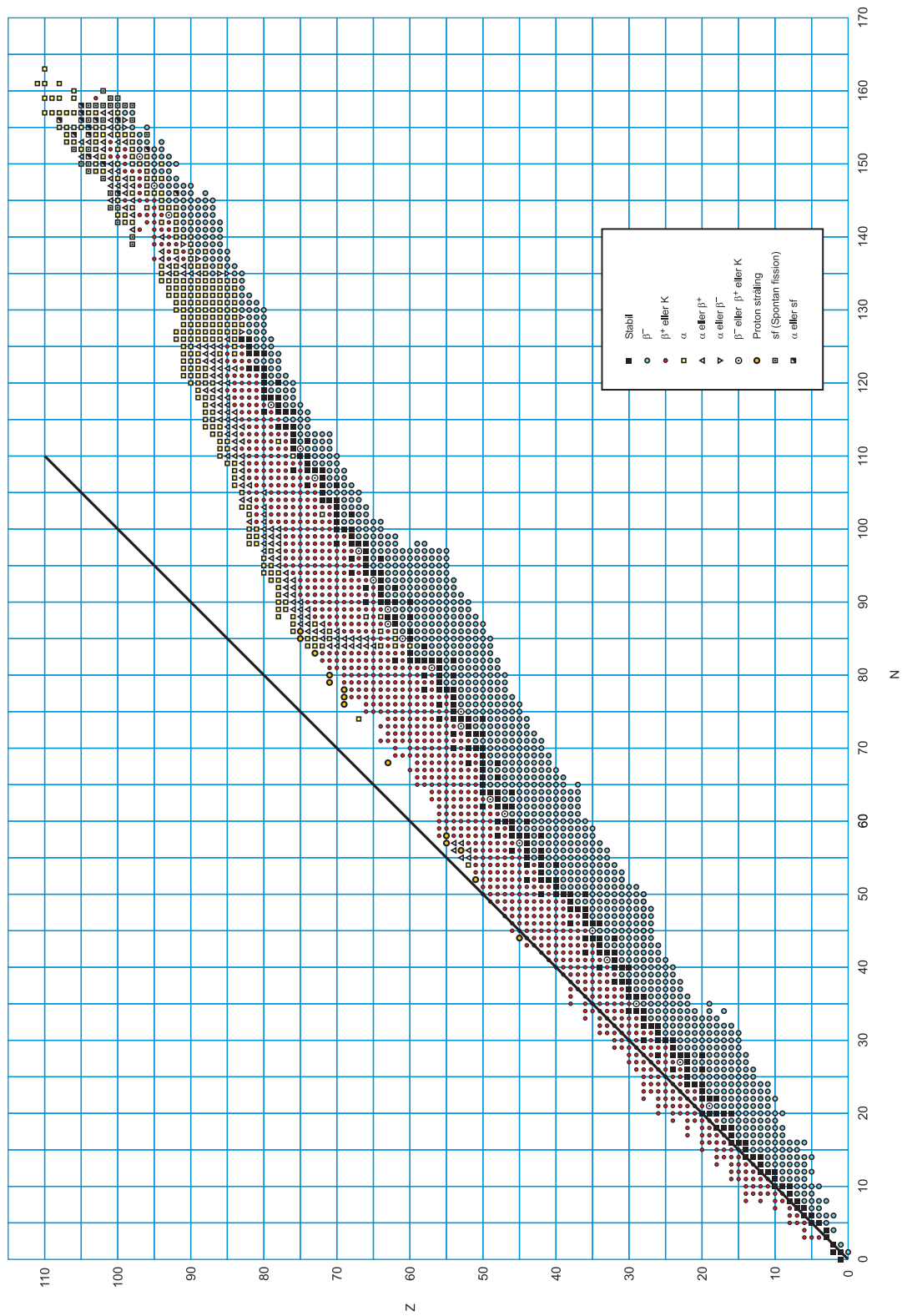
Kernen består af *protoner*, som har en *positiv ladning* af samme numeriske størrelse som elektronens, samt *neutroner*, som er elektrisk neutrale. Antallet af neutroner kalder vi N og antallet af protoner kalder vi Z . Z kaldes udover *protontallet* også for *ladningstallet*, eftersom det angiver, hvor mange positive ladninger, der er i kernen. Dette tal angiver også atomnummeret i det periodiske system. Hvis atomet ikke er ioniseret vil der endvidere være Z elektroner, som kredser i baner udenfor kernen. Protoner og neutroner kaldes under ét for *nukleoner*. Antallet af nukleoner, *nukleontallet*, betegnes A og opfylder altså formelen $A = Z + N$. Dette tal kaldes også for *massetallet*, da det omtrent angiver atomets masse, udtrykt i units (u). Når vi omtaler et stof, sætter vi ofte massetallet øverst og ladningstallet nederst, som for eksempel i ${}^{238}_{92}\text{U}$.

Imellem atomerne i kernen virker der *elektriske kræfter*, idet protonerne vil søge at frastøde hinanden. Heldigvis er der også en kraft, som søger at holde sammen på kernens partikler, nemlig *kernekræfterne*, som er meget kraftige og i modsætning til de elektriske kræfter kun virker over meget kort afstand. Nu viser det sig, at der fint kan eksistere atomer med det samme antal protoner, men med et *forskelligt* antal neutroner. Disse kaldes *isotoper* af det samme grundstof. På næste side har jeg afbildet et såkaldt *kernekort*. Det egentlige formål med dette kort vil vi komme ind på lidt senere. Lige nu kan vi imidlertid benytte det til at konstatere hvor mange isotoper der findes af et bestemt grundstof. Isotoper af samme grundstof har i øvrigt de samme *kemiske* egenskaber.

Eksempel 1

Grundstoffet bly har atomnummeret 82, altså $Z = 82$. På kernekortet på næste side eller på den forstørrede udgave bag i noten, kan du se, at bly kan indeholde fra 98 til 132 neutroner. Lad os for eksempel antage, at neutrontallet er 126 i en bly-isotop. Så ser vi, at massetallet er $A = Z + N = 82 + 126 = 208$. Vi kalder denne isotop for Pb-208. Der er tale om en af de få *stabile* isotoper af bly.

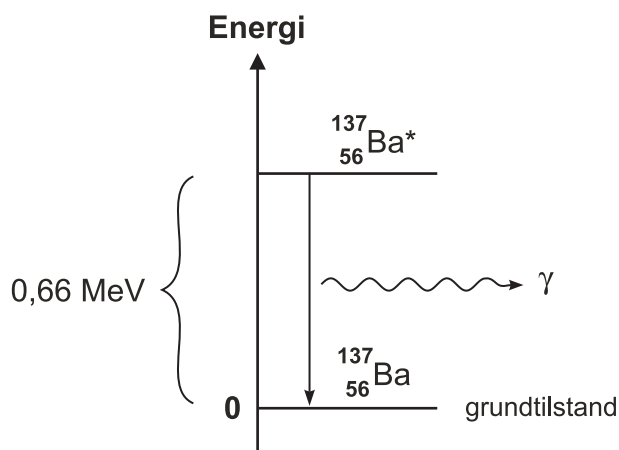
KERNEKORT



Kernekortet kan altså bruges til at se, hvilke isotoper, der kan eksistere. På kortet på forrige side er indtegnet en linje med vinklen 45 grader, svarende til, at isotoper langs denne linje vil have lige mange neutroner som protoner. Vi ser dog, at langt de fleste stoffer har flere neutroner end protoner og at denne tendens er særligt udtalt for grundstoffer med højt atomnummer. Dette kan forklares ved, at de stærke kernekræfter ikke virker over hele kernen i store kerner, hvorfor der må være relativt flere neutroner til at forhindre at de elektriske kræfter ”får overtaget”.

3. Gammastråling og energiniveauer i kernen

En atomkerne kan befinde sig i forskellige energiniveauer. Når kernen er i laveste energiniveau, så siges kernen at befinde sig i *grundtilstanden*. Hvis kernen er i et højere liggende energiniveau, så siges kernen at være *exciteret* eller at befinde sig i en *exciteret tilstand*. Kernen kan godt lide at befinde sig i grundtilstanden, så hvis den er i en exciteret tilstand, så vil den hurtigt falde tilbage til grundtilstanden, eventuelt i flere trin. Når en kerne falder tilbage til et lavere liggende energiniveau, så udsender den energi i form af en *foton*. Det er *elektromagnetisk stråling*. I tilfældet med en kerne er energierne så store, at der er tale om den del af det elektromagnetiske spektrum, som kaldes *gammastråling*. Energien af gammafotonen er netop lig med forskellen mellem energierne af de to energiniveauer: $E_{\text{foton}} = \Delta E = E_2 - E_1$. Fotonens frekvens f kan findes af formlen $E_{\text{foton}} = h \cdot f$, hvor $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ er den såkaldte *Plancks konstant*. Jo højere fotonens energi er, jo højere er dens frekvens, som det fremgår. Gammastråling skriver vi også ofte ved brug af det græske bogstav gamma: γ -stråling. Energimæssigt ligger gammastråling langt over den del af det elektromagnetiske spektrum, som er synligt lys. Som vi senere skal se er strålingen meget farlig, hvis man bliver udsat for meget af den, da den kan ionisere atomerne i de menneskelige celler. Nedenfor ses et energidiagram for Barium-137. I kernefysikken sætter man grundtilstandens energi til 0. Stjernen over barium hentyder til, at kernen er exciteret. Vi ser, at når barium falder tilbage til grundtilstanden, så udsendes en gammafoton med energien 0,66 MeV. MeV skal læses som ”mega elektron volt”, dvs. millioner elektron volt. Enheden *elektron volt* er en hensigtsmæssig enhed, da man arbejder med meget små tal: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, hvilket betyder, at $0,66 \text{ MeV} = 0,66 \cdot 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,057 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.



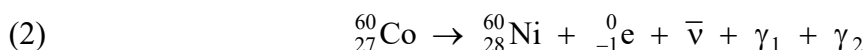
4. Betastråling

Der findes andre typer radioaktiv stråling end gammastråling. Hvis kernen for eksempel har "for mange" neutroner, så vil der ske et såkaldt *betahenfald*. Herved skydes der en elektron udfra kernen samt en særlig partikel, kaldet en *antineutrino*. Elektronen kommer, i modsætning til, hvad man skulle tro, *ikke* fra banerne udenfor kernen. Derimod dannes elektronen i kernen ved følgende proces:

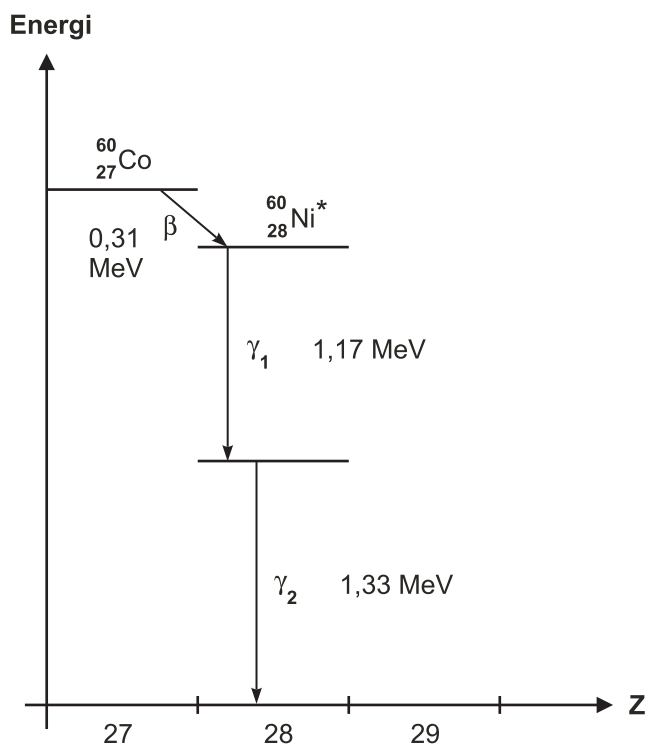


En neutron i kernen omdannes altså til en proton, en elektron og en antineutrino. Sidstnævnte partikel er uhyre svær at detektere, da den ingen ladning har og en masse, som er forsvindende lille. Det betyder, at den har svært ved at vekselvirke med andre partikler. Faktisk kan en antineutrino godt passere igennem jordkloden uden at vekselvirke. Historisk var det derfor også en partikel, som blev opdaget meget sent, ja faktisk forudsagde man dens eksistens før man detekterede den: Den var "nødvendig" for at få energiregnskabet til at gå op!

Et eksempel på en betaproces er følgende:



Bemærk, at de sidstnævnte to led er medtaget, fordi det viser sig, at β -processen efterfølges af udsendelse af to gammakvanter. Den egentlige betaproces består derimod kun i, at Cobalt-kernen omdannes til Nikkel under udsendelse af en elektron og en antineutrino.



5. Alfastråling

Det kan også forekomme, at en isotop er ustabil og skiller sig af med en *heliumkerne*, dvs. to protoner og to neutroner. Strålingen kaldes alfastråling eller α -stråling. Et eksempel på en sådan proces er



Der er herved sket en omdannelse af grundstoffet Radium til ædelgassen Radon. Netop Radon vil vi vende tilbage til i forbindelse med baggrundsstråling.

6. Brug af kernekort

Når man har et *kernekort* og et *periodisk system* til rådighed, så kan man nemt finde ud af hvordan en bestemt kerne henfalder. Man kan derefter fortsætte med at undersøge *datterkernen*. Nogle kerner vil resultere i en hel serie af henfald, *kaskadehenfald*. Man taler om *radioaktive familier*. Bag i denne note kan du finde et kernekort, bredt ud over to sider. Vi får brug for et par *bevarelseslove*:

Bevarelse af massetal

Det samlede nukleontal (= massetal) før og efter en kernereaktion er det samme.

Bevarelse af ladningstal

Den samlede ladning før og efter en kernereaktion er den samme.

Prøv selv at kontrollere, at det samlede ladningstal og massetal er uændret i reaktionerne (2) og (3) ovenfor.

Kernekortet benyttes på følgende måde: Find først antallet af neutroner under anvendelse af formlen $N = A - Z$. Find kernen i kernekortet og aflæs ud fra symbolet, hvilken type stråling, der er tale om. Derefter skal vi finde datterkernen. Lad mig kort beskrive hvordan i tilfældet med alfa- og betastråling. De øvrige processer overlades til læseren:

α -stråling

Da der udsendes en alfapartikel, giver bevarelseslovene os, at datterkernen må have to færre protoner og neutroner. Ladningstallet er altså reduceret med 2, mens massetallet er reduceret med 4. Navnet på det nye grundstof finder man altså ved at bevæge sig to skridt tilbage i det periodiske system. I kernekortet bevæger man sig altså to til venstre og to ned!

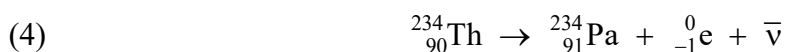
β -stråling

Da der ifølge (1) er blevet omdannet en neutron til en proton og en antineutrino – sidstnævnte med både massetal og ladningstal lig med 0 – må datterkernens ladningstal være 1 større end moderkernens. Derudover må massetallet være uændret. For at finde navnet på det nye grundstof, skal vi bevæge os et skridt frem i det periodiske system. I kernekortet bevæger man sig altså en til venstre og en op, da der er en proton mere og en neutron mindre!

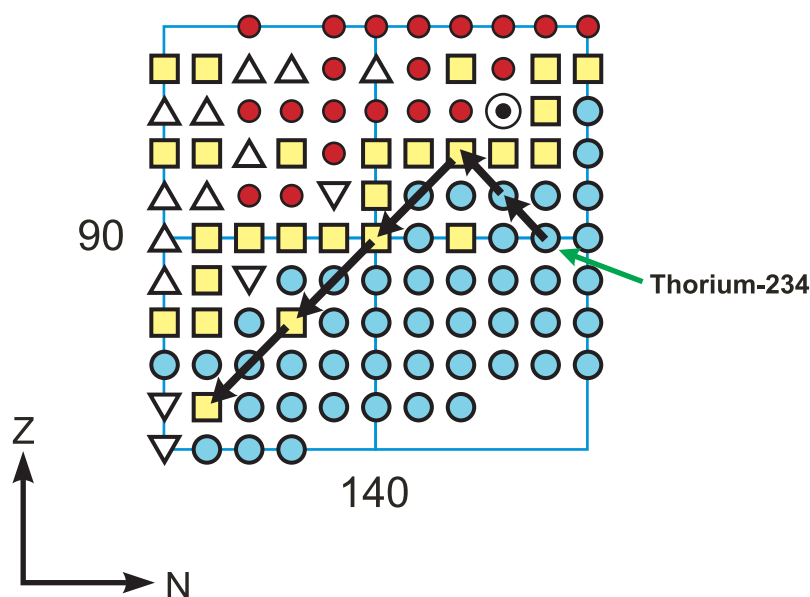
Bemærk, at det ikke i alle tilfælde er *entydigt*, hvad der sker. Nogle steder i kernekortet kan der nemlig foregå flere processer!

Eksempel 2

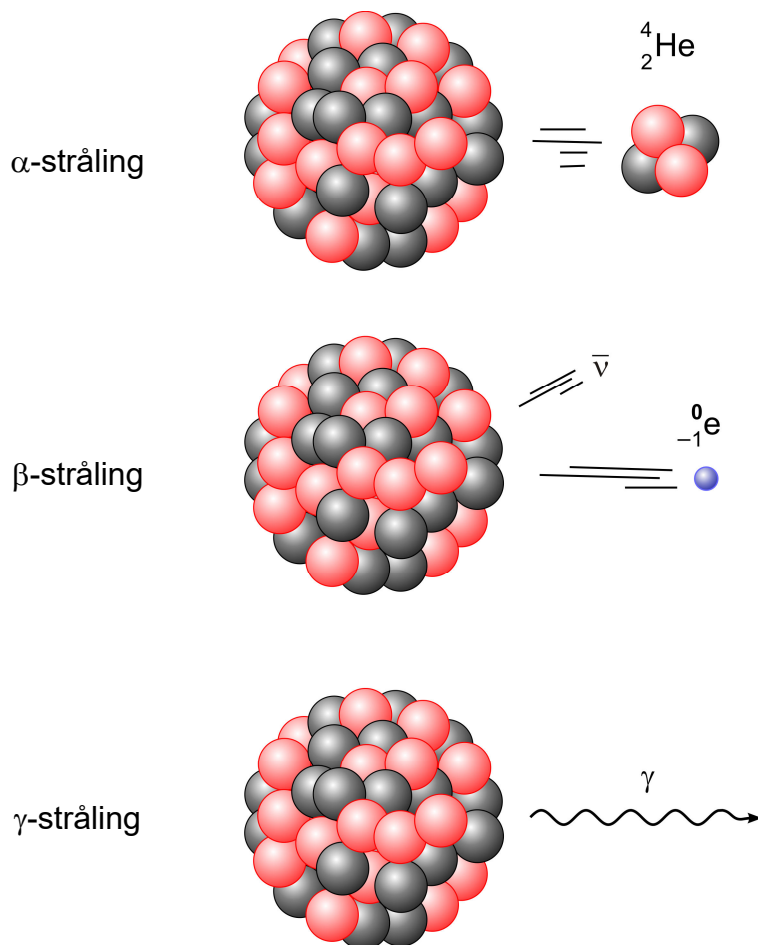
Givet Thorium-isotopen $^{234}_{90}\text{Th}$. Moderkernens massetal og ladningstal er henholdsvis 234 og 90. Antallet af neutroner er dermed $N = A - Z = 234 - 90 = 144$. Vi går ind i kernekortet under $Z = 90$ og $N = 144$. Vi finder her en åben bolle, som symboliserer et betahenfald. Dermed må datterkernen have samme massetal og ladningstal en højere. Datterkernen ses i det periodiske system at være grundstoffet Protactinium:



På figuren herunder kan du et udsnit af kernekortet. Pilen peger på Thorium-234. Figuren viser endvidere, at datterkernen også er betaradioaktiv og at der herefter foregår tre alfa-henfald. Jeg vil overlade det til læseren at opskrive reaktionerne.



□



7. Henfaldsloven – en terningemodel

I dette afsnit skal vi se på i hvilket ”tempo” strålingen foregår fra en radioaktiv kilde, altså en klump stof bestående af nogle radioaktive kerner. Da gælder følgende:

Henfaldsloven

Når et radioaktivt præparat kun indeholder én type radioaktive kerner, så aftager strålingen eksponentielt med tiden.

I det følgende skal vi give et godt argument for, at henfaldsloven er rigtig. Argumentet bygger på nogle fundamentale egenskaber for radioaktive henfald: Det er vigtigt at forstå, at radioaktive henfald har noget med *sandsynligheder* at gøre. Man kan ikke forudsige, hvornår en given kerne henfalder. Derimod kan man tildele en radioaktiv kerne en vis *sandsynlighed* for, at den henfalder i et givet tidsrum. Denne sandsynlighed afhænger ikke af tidspunktet, men kun af tidsrummets størrelse. Man kunne tro, at det vil betyde, at man ikke kan sige noget som helst om radioaktive henfald – at det hele er tilfældigt. Da der imidlertid under normale



omstændigheder er et meget stort antal radioaktive kerner tilstede i ens radioaktive kilde, så vil tilfældighederne så at sige udjævne sig på grund af *De store tals lov*. Man kan sammenligne situationen med terningekast. Hvis antallet af terninger er lille, fx. 6, så vil det ikke være usandsynligt, at man får uregelmæssigt mange seksere, fx 3 seksere. Hvis antallet af terninger er stort, fx 6000, så vil antallet af 1'ere, 2'ere, ..., 6'ere med meget stor sandsynlighed være tæt på 1000.

Lad os blive i analogien med terninger for at give et argument for henfaldsloven. Lad hver terning svare til en radioaktiv kerne. Man slår med alle terninger hvert sekund. De terninger, der viser 6 øjne vil vi lade svare til henfaldne kerner. De fjernes fra spillet. Lad os betegne antallet af kerner, som endnu *ikke* er henfaldet efter t sekunder, med $N(t)$. Det svarer til de terninger, som endnu ikke har vist 6 øjne. $N(0)$ er altså antallet af terninger fra start. Efter 1 sekund, dvs. efter første kast, vil der forventeligt være $1/6$ af terningerne, som har vist 6 øjne, mens $5/6$ af terningerne har vist noget andet. Det svarer til, at der efter 1 sekund forventeligt er $\frac{5}{6} \cdot N(0)$ ikke henfaldne kerner, dvs. $N(1) = \frac{5}{6} N(0)$. Vi slår nu med de tilbageværende $N(1)$ terninger. Her vil forventeligt $1/6$ vise 6 øjne, mens $5/6$ vil vise noget andet. Det svarer til, at der efter 2 sekunder forventeligt vil være $N(2) = \frac{5}{6} N(1)$ ikke henfaldne kerner. Vi gentager processen og efter 3 sekunder vil der forventeligt være $N(3) = \frac{5}{6} N(2)$ ikke henfaldne kerner, osv. Forventeligt har vi:

$$\begin{aligned}
 &N(0) \\
 &N(1) = \frac{5}{6} N(0) \\
 &N(2) = \frac{5}{6} N(1) = \frac{5}{6} \cdot \frac{5}{6} N(0) = \left(\frac{5}{6}\right)^2 \cdot N(0) \\
 (5) \quad &N(3) = \frac{5}{6} N(2) = \frac{5}{6} \cdot \left(\left(\frac{5}{6}\right)^2 \cdot N(0)\right) = \left(\frac{5}{6}\right)^3 \cdot N(0) \\
 &\dots\dots\dots \\
 &N(t) = \left(\frac{5}{6}\right)^t \cdot N(0)
 \end{aligned}$$

Efter hvert sekund (kast) fremskrives (ganges) antal ikke henfaldne kerner altså med $5/6$. Vi har altså at gøre med en *aftagende eksponentiel udvikling*. Det er netop hvad henfaldsloven siger: at antallet af ikke henfaldne kerner aftager eksponentielt. I matematik vil man sige, at man har en funktion $f(x) = b \cdot a^x$, hvor x svarer til t , $f(x)$ svarer til $N(t)$, b til $N(0)$ og a til $5/6$. I fysik foretrækker man af forskellige grunde ofte at skrive den eksponentielle udvikling på en af følgende former:

$$(6) \quad N(t) = N_0 \cdot e^{-kt}$$

$$(7) \quad N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

hvor k er den såkaldte *henfaldskonstant*, N_0 er antal ikke henfaldne kerner til tiden $t = 0$ og $T_{1/2}$ er halveringstiden. Man kan udlede følgende formel for halveringstiden: $T_{1/2} = \ln(2)/k$.

I øvrigt vil det være en god idé at gennemføre et terningeksperiment i klassen, men husk at benytte mange terninger fra start, helst ikke under ca. 200. Man vil selvfølgelig ikke fuldstændigt få en udvikling som den *forventede* under (5), da der er tale om tilfældigheder, men hvis man benytter tilstrækkeligt mange terninger fra start og afbilder $N(t)$ som funktion af t (antag 1 kast svarer til 1 sek), så skulle det gerne resultere i en tilnærmelsesvis eksponentielt aftagende sammenhæng.

Ovenfor har vi argumenteret for, at antallet af ikke-henfaldne kerner til tiden t , dvs. $N(t)$, aftager eksponentielt med tiden. Men hvad med den hastighed, hvormed kernerne henfalder til et givet tidspunkt? Aftager det tal også eksponentielt med tiden? Svaret er ja, for antallet af kerner, som henfalder pr. sekund til et givet tidspunkt er *proportional* med antallet af ikke-henfaldne kerner til dette tidspunkt. I terningemodellen er det også ret logisk: Hvis der fx er dobbelt så mange kerner (terninger) tilbage, så vil der i gennemsnit også blive slået dobbelt så mange seksere. Generelt kaldes proportionalitetskonstanten for k , dvs. $A(t) = k \cdot N(t)$, og konstanten betegnes *henfaldskonstanten*. Det giver umiddelbart følgende to formler for aktiviteten, svarende til (6) og (7):

$$(8) \quad A(t) = A_0 \cdot e^{-kt}$$

$$(9) \quad A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

hvor A_0 er aktiviteten til tiden $t = 0$. Aktivitet er altså *øjeblikshastigheden*, hvormed antallet af kerner henfalder. Enheden er 1/s, hvilket i denne sammenhæng kaldes Bq for Becquerel.

Eksempel 3

I 1 kubikmeter luft i en kælder måles en aktivitet fra radon på 240 Bq. Vi forestiller os nu, at luften fjernes fra kælderen, så der ikke tilføres ny radon fra betonen i væggen. Halveringstiden for radon-222 er 3,82 dage.

- Hvad vil aktiviteten være efter 3,82 dage?
- Hvad vil aktiviteten være efter 10 dage?

Løsninger:

- Da tiden netop er lig med halveringstiden, kan vi straks besvare opgaven. Så vil der nemlig være halvt så stor en aktivitet, altså 120 Bq.
- Da vi kender halveringstiden, så kan vi slippe udenom at skulle bestemme henfaldskonstanten, ved at benytte formel (9):

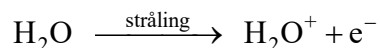
$$A(10 \text{ dage}) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = 240 \text{ Bq} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{10 \text{ dage}}{3,82 \text{ dage}}} = 240 \text{ Bq} \cdot 0,1629 = 39,1 \text{ Bq}$$

8. Absorption af radioaktiv stråling

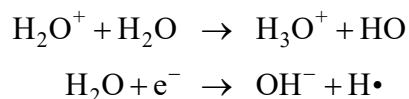
Når radioaktiv stråling rammer et stof, vil strålingen eller dele af den blive *absorberet* i stoffet. Den afsatte energi vil resultere i, at nogle atomer i stoffet vil ioniseres, dvs. der vil blive slået elektroner løs. Hvad der nærmere bestemt sker afhænger blandt andet af, hvilken stråling der er tale om, idet strålingstyperne α -, β - og γ -stråling jo er vidt forskellige af natur. Førstnævnte er som bekendt *heliumkerner*, som er meget store partikler i sammenligning med betastrålingens *elektroner*. Igen er γ -strålingen vidt forskellig fra de to andre typer, idet der her er tale om *elektromagnetisk stråling*, dvs. består af *fotoner* med meget høj energi, og det bevæger sig med lysets hastighed, men har masse 0. I næste afsnit skal vi specielt fokusere på absorption af gammastråling.

Absorption i biologisk væv

Ved radioaktive udslip kan legemet blive udsat for radioaktiv stråling. Herved vil der foregå en ionisering af nogle af organismens molekyler. Der kan ske følgende:



hvorefter der kan foregå følgende:



Der er blevet dannet et *frit radikal*, dvs. en molekylestump med en fri binding. Disse frie radikaler har meget stor tendens til at lave *reaktioner*, og som følge heraf kan der ske forandringer i cellerne, herunder cellernes DNA-molekyler. De forskellige typer celler i legemet har forskellig følsomhed overfor ioniserende stråling. Nerve- og muskelceller har lav følsomhed, mens bloddannende celler i kønsglandlerne er meget sårbare. Strålingens skadelige virkning afhænger i høj grad også af strålingens type og dens energi.

Ioniserende stråling på hospitaler

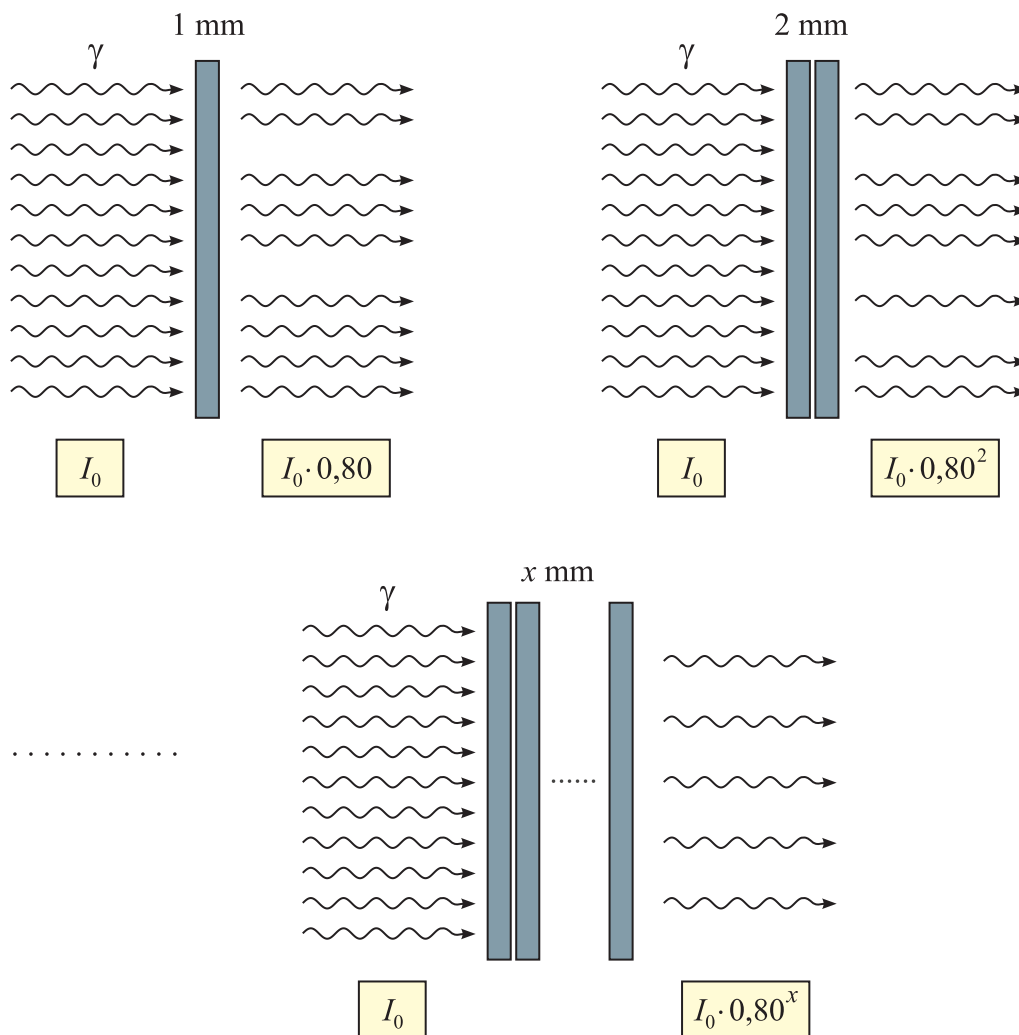
Radioaktiv stråling kan også bruges til noget positivt, nemlig indenfor hospitalsverdenen til *diagnostik* og til *behandling*. Ved sygdom i skjoldbruskkirtlen kan man for eksempel indsprøjte en forbindelse af Jod-isotopen I-131 i blodkredsløbet. I-131 udsender både β - og γ -stråling. Joden vil hurtigt blive optaget i skjoldbruskkirtlen. Kirtelvævet absorberer β -strålingen, mens γ -strålingen kan måles udenfor organismen, eftersom sidstnævnte har en stor rækkevidde. Med en såkaldt *scintillationsdetektor* kan man få et nøje billede af skjoldbruskkirtlen og herved bestemme dens størrelse og eventuelt finde syge områder. Er kirtlen forstørret kan man eventuelt uden operation fjerne en del af den ved at indsprøjte store doser I-131. β -strålingen har her kun en rækkevidde på ca. 1 mm og kan derfor effektivt bruges til at destruere sygt eller overskydende væv. På grund af den korte halveringstid på 8 dage, vil radioaktiviteten hurtigt aftage, så patienten ikke udsættes for en for stor dosis.

9. Absorptionsloven for gammastråling

Det viser sig, at der ved absorption af gammastråling i et materiale med god tilnærmelse gælder følgende princip:

For en γ – foton med en given energi er der en bestemt sandsynlighed for, at fotonen slipper igennem 1 mm af det givne materiale.

Det betyder, at intensiteten af gammastråling aftager eksponentielt med tykkelsen af det absorberende lag. Man kan argumentere for denne påstand ved at bruge ovenstående princip samt lidt rentesregning.



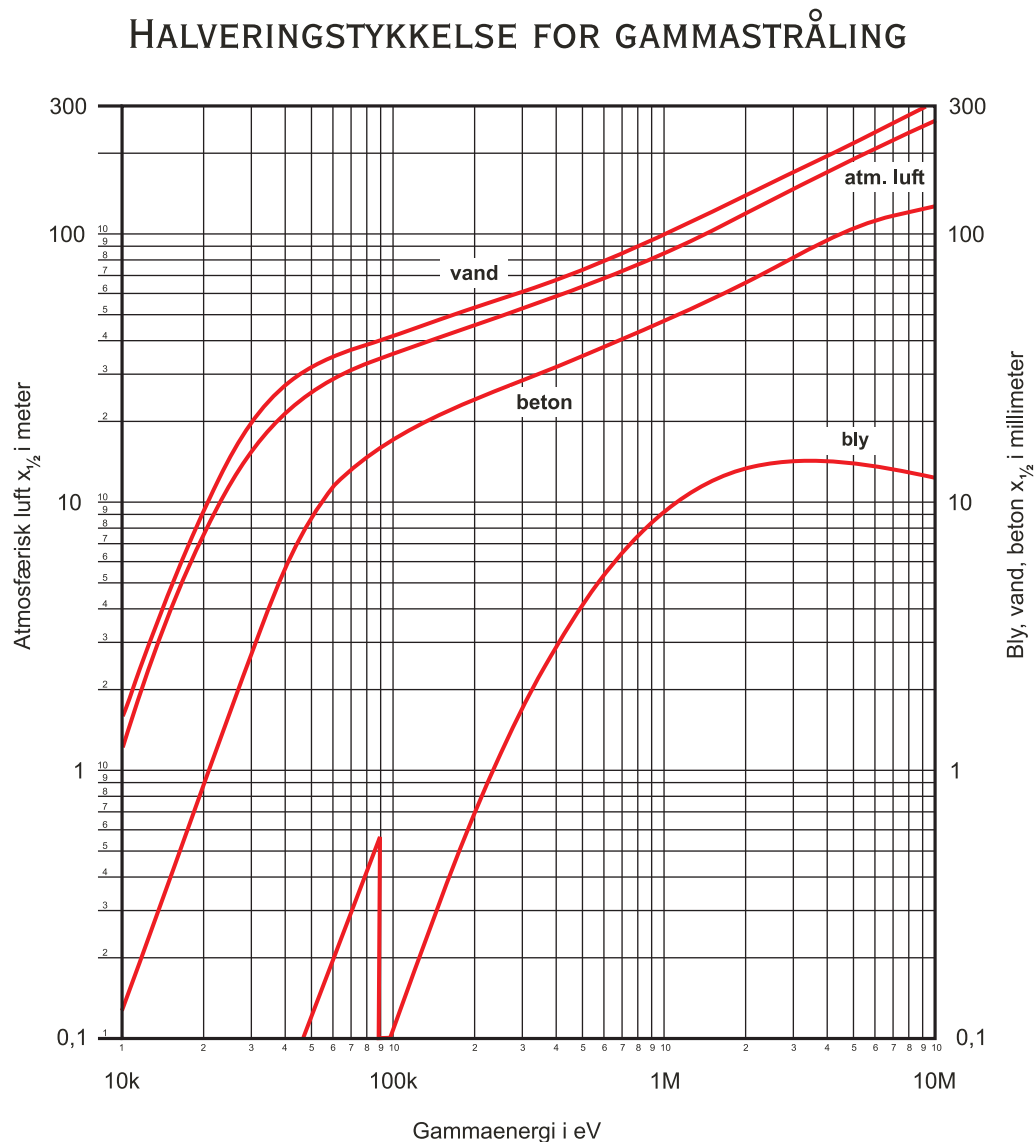
Lad os se på et tænkt eksempel: Antag, at intensiteten af den indkommende gammastråling er I_0 og at en plade på 1 mm af det givne stof absorberer 20% af strålingen. Så vil der være 80% tilbage på den anden side. Altså vil intensiteten være $I_0 \cdot 0,80$ her. Tilføjes endnu en plade på 1 mm, vil den allerede reducerede stråling blive reduceret til yderligere 80%, dvs. til $(I_0 \cdot 0,80) \cdot 0,80 = I_0 \cdot 0,80^2$. Vi ser – når argumentet fortsættes – at x mm stof vil reducere intensiteten til $I_0 \cdot 0,80^x$. Vi har altså at gøre med en eksponentielt aftagende

sammenhæng, hvor b -leddet svarer til I_0 og fremskrivningsfaktoren (for 1 mm stof) er lig med 0,8. I fysik angiver man formlerne på en af følgende former:

$$(10) \quad I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

$$(11) \quad I(x) = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{x_{1/2}}}$$

hvor μ er den såkaldte *lineære absorptionskoefficient*, og $x_{1/2}$ er *halveringstykkelsen*. Sidstnævnte angiver, som navnet antyder, den tykkelse af stoffet, som skal til, for at strålingen halveres. Halveringstykkelsen afhænger af det pågældende materiale og af energien af gammastrålingen. Bly er et af de stoffer, som bedst absorberer gammastrålingen. Derfor er halveringstykkelsen for bly ret lille, afhængig af gammaenergien. Halveringstykkelsen for forskellige stoffer (luft, vand, beton og bly) kan aflæses på nedenstående figur. 1. aksens indeholder gamma-fotonens energi.



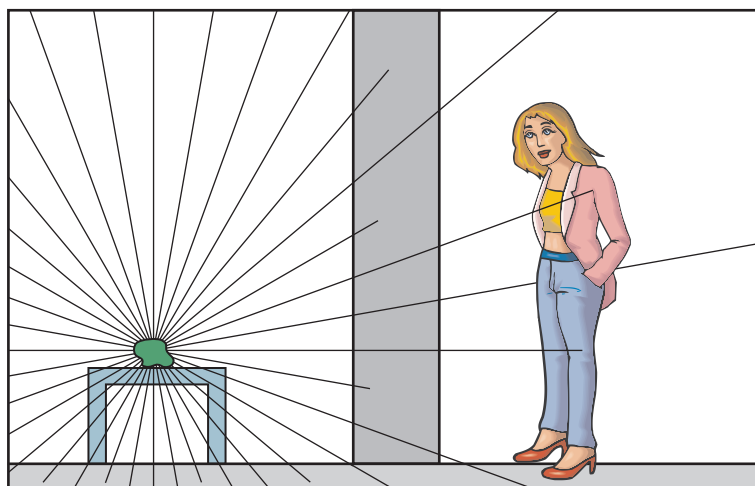
Eksempel 4

En radioaktiv kilde indeholder den radioaktive isotop Cs-137, og kilden udsender γ -stråling med energien 0,66 MeV. Hvor meget reduceres strålingen *med*, hvis man befinder sig bag en 25 cm tyk betonmur?

Løsning: Vi kender ikke startintensiteten, men vi behøver den heller ikke til at besvare dette spørgsmål. Vi kalder blot startintensiteten for 100%. På figuren på side 16 finder man på 1. aksen gammaenergien 0,66 MeV = 660 keV, går op til kurven for beton og aflæser på højre akse en halveringstykkelse på ca. 40 mm, altså 4 cm. Dette giver:

$$I(x) = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{x_{1/2}}} \Leftrightarrow I(25\text{ cm}) = 100\% \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{25\text{ cm}}{4\text{ cm}}} = 1,3\%$$

Strålingen er reduceret *til* 1,3%, og dermed reduceret *med* $100\% - 1,3\% = 98,7\%$.



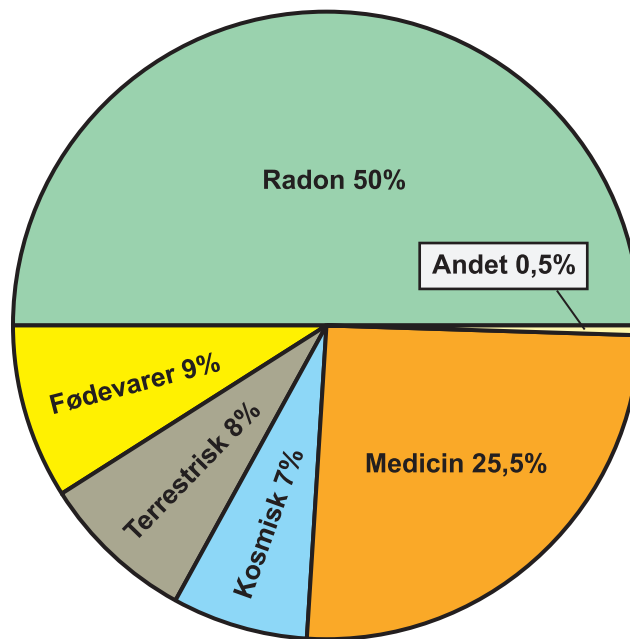
□

Bemærkning

Det bør lige bemærkes, at det kun er gammastråling, der med stor nøjagtighed kan siges at aftage eksponentielt med tykkelsen af det absorberende lag. Betastråling aftager i nogen grad eksponentielt, mens alfastråling opfører sig helt anderledes: Alfapartikler med en bestemt energi trænger alle omtrent lige langt ind i stoffet!

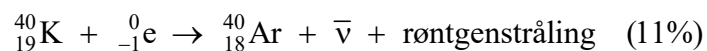
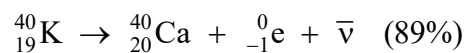
10. Baggrundsstråling

Mennesket udsættes dagligt for stråling fra omgivelserne. Det er stråling, vi for det meste vedkommende ikke kan undgå, og den betegnes *baggrundsstrålingen*. På næste side har jeg opdelt strålingen i seks forskellige kategorier. Den *menneskeskabte stråling* er den fra medicin, og derudover er der stråling efter atomuheld og atomprøvesprængninger. Sidstnævnte er talt med under ”andet”, som heldigvis er en lille post! Den *naturlige stråling* er den øvrige stråling, som skyldes radioaktive isotoper, der stammer fra stjerneprocesser i en fjern fortid. Isotoperne blev brugt som byggesten ved jordens skabelse for 4-5 milliarder år siden, eller også er de døtre af sådanne isotoper. En meget stor del af den radioaktivitet kan henføres til enten U-238 eller Th-232-familierne, som begge har et stort antal familiemedlemmer.



Radon Radon er tilstede som en del af den atmosfæriske luft, vi indånder. I indendørsluft er koncentrationen særlig stor, ca. 10 gange så stor som udenfor. Mest udsat er kælderrum med revner i gulvet, hvor radon kan sive op. Udluftning er meget vigtig. I middel er den specifikke aktivitet 50 Bq/m³ i danske boliger. I sig selv er Radon α -radioaktiv, og har derfor en kort rækkevidde. Når Radon kommer ned i lungerne, vil α -strålingen påvirke lungeslimhinderne. Derudover henfalder Radon til forskellige datterkerner, som selv er radioaktive. Disse faste datterprodukter kan bindes til støvpartikler og små vanddråber. Når sådanne partikler kommer ned i lungerne, kan de sætte sig fast og forårsage længerevarende bestråling.

Fødevarer Den væsentligste kilde til stråling fra fødevarer er K-40. 0,0118% af alt Kalium er af denne radioaktive isotop. Halveringstiden er 1,27 mia. år. K-40 findes naturligt i fødevarer. Henfaldet kan ske således:



Terrestrisk Dette hentyder til gammastråling fra undergrund, byggematerialer etc.

Kosmisk Stråling fra verdensrummet, især fra solen. Strålingen bliver heldigvis reduceret meget på vej ned igennem atmosfæren.

Medicin Anvendelsen af stråling på hospitaler bidrager overraskende med omtrent en fjerdedel af al den stråling, et menneske gennemsnitligt modtager. Strålingsbelastningen stammer først og fremmest fra røntgenundersøgelser.

11. Dosimetri



Begrebet *dosimetri* dækker over teorien for, hvordan man beregner størrelsen af den radioaktive dosis for eksempel et menneske modtager. Det kan blandt andet være relevant i forskellige medicinske behandlinger, hvor der benyttes ioniserende stråling, eller ved atomuheld eller atombomber, hvor mennesket udsættes for særlig stor stråling.

Absorberet dosis

Den *absorberede dosis* eller bare *dosis* betegnes med bogstavet D og hentyder til den absorberede strålingsenergi i kroppen pr. masseenhed.

$$(12) \quad D = \frac{E_{\text{abs}}}{m}$$

Enheden er derfor J/kg. I denne sammenhæng kalder man også enheden for *gray* (Gy), altså $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

Dosisækvivalent

Det viser sig, at den *absorberede dosis* ikke siger alt om skadevirkningen. Strålingstyperne har nemlig vidt forskellig biologisk virkning, selv om de har samme energi. α -stråling medfører i gennemsnit 20 gange så mange celledskader end røntgen-, β - og γ -stråling, ved samme absorberede dosis. Dette skyldes α -partiklernes store størrelse og ladning, som resulterer i mange flere ioniseringer. Man indfører derfor lidt makabert betegnelsen *kvalitetsfaktor* for stråling:

Strålingens art	Kvalitetsfaktor Q
α	20
neutron	10
β , γ , røntgen	1

Herefter defineres den såkaldte *dosisækvivalent* H ved:

$$(13) \quad H = Q \cdot D$$

Enheden for dosisækvivalent er derfor også J/kg, men da H udtrykker noget helt andet end D , har man valgt at give enheden for H en særlig betegnelse, nemlig *Sievert* (Sv), dvs. $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

Beregninger af absorberede doser og dosisækvivalenter er i princippet blot ”købmands-regning”, selv om det undertiden kan være ganske involveret. Man kan stille sig følgende spørgsmål:

- a) Hvor mange radioaktive kerner er der?
- b) Hvor mange radioaktive kerner henfalder i bestrålingstidsrummet?
- c) Hvor stor en del af de udsendte partikler/kvanter *rammer* personen?
- d) Hvor stor en del af de partikler/kvanter, der rammer, bliver *absorberet* i personen?
- e) Hvor meget energi repræsenterer hver partikel/kvant?
- f) Hvor meget vejer personen eller det organ, som udsættes for stråling?
- g) Hvad er kvalitetsfaktoren for strålingen?

Spørgsmål b): Her handler det ofte om, hvor lang *tid*, man har været udsat for strålingen. Henfaldsloven kan altså komme i spil.

Spørgsmål c): Afhænger blandt andet af, hvor tæt man befinder sig på kilden. Og af, om man er beskyttet af en form for afskærmning.

Spørgsmål d): Hvis det er γ -stråling, kan afsnit 9 benyttes.

Spørgsmål e): Kan findes ved tabelopslag for den aktuelle radioaktive isotop.

Når c)-e) er besvaret, kan den totale absorberede energi i Joule bestemmes. Efter f) er besvaret, kan den absorberede dosis bestemmes, og efter g) er besvaret, kan dosisækvivalenten beregnes. Lad os se på et eksempel.

Eksempel 5

En Cs-137 kilde har en aktivitet på $A_0 = 8,5 \cdot 10^7$ Bq. Katrine, som vejer 60 kg, befinder sig tæt på denne kilde i 2 timer. Så tæt, at hun bliver ramt af 5% af strålingen. Antag, at 75% af den stråling, der rammer hende, bliver absorberet. Hvor stor en absorberet dosis modtager Katrine? Hvor stor er dosisækvivalent?

Løsning: Antal γ -kvanter udsendt: Da 2 timer er et meget lille tidsrum i sammenligning med Cs-137's halveringstid på 30 år, så behøver vi ikke tage henfaldsloven og afsnit 7 i brug. Vi kan antage, at kildens aktivitet konstant er lig med $8,5 \cdot 10^7$ Bq i de to timer. Dette fortæller os, at kilden konstant udsender $8,5 \cdot 10^7$ γ -kvanter hvert sekund. Da der går 3600 sekunder på en time, udsendes dermed $7200 \text{ sek} \cdot 8,5 \cdot 10^7 \text{ Bq} = 6,1 \cdot 10^{11}$ gammakvanter.

Antal γ -kvanter, som rammer: 5% rammer, så svaret er $0,05 \cdot 6,1 \cdot 10^{11} = 3,1 \cdot 10^{10}$ gammakvanter.

Antal γ -kvanter, der rammer og absorberes: 75% af de kvanter, som rammer, absorberes, så vi får: $0,75 \cdot 3,1 \cdot 10^{10} = 2,3 \cdot 10^{10}$ gammakvanter.

Energi af hvert γ -kvant: Ved vi allerede fra eksempel 4 er lig med 0,66 MeV, hvilket omregnet til enheden Joule er $0,66 \text{ MeV} = 0,66 \cdot 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,057 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.

Energi af alle γ -kvanter, som absorberes: Vi ganger blot antallet af absorberede kvanter med energien af 1 kvant: $2,3 \cdot 10^{10} \cdot 1,057 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 0,0024 \text{ J}$.

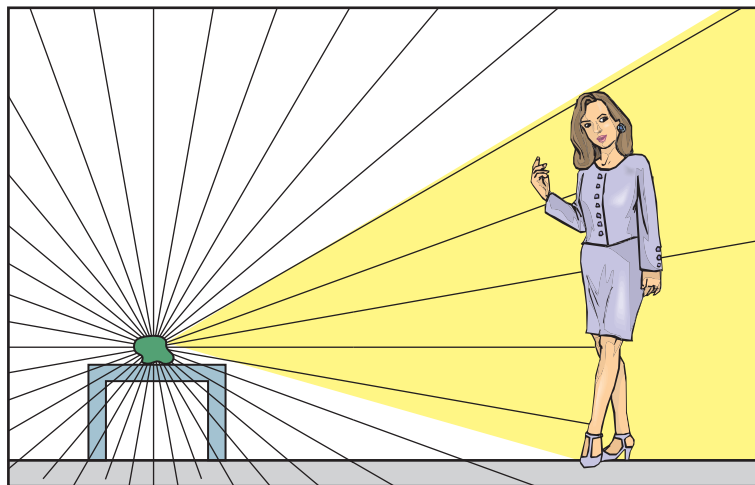
Da Katrine vejer 60 kg, fås følgende absorberede dosis:

$$D = \frac{E_{\text{abs}}}{m} = \frac{0,0024 \text{ J}}{60 \text{ kg}} = 0,000040 \text{ Gy} = 0,040 \text{ mGy}$$

Da kvalitetsfaktoren for gammastråling er 1, fås dosisækvivalent:

$$H = Q \cdot D = 1 \cdot 0,040 \text{ mGy} = 0,040 \text{ mSv}$$

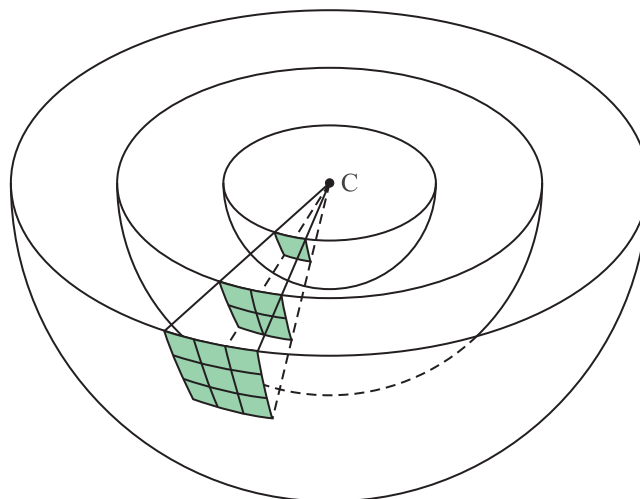
Dette er ikke nogen speciel stor dosis.



□

Afstandskvadratloven

Hvis en radioaktiv kilde kan betragtes som punktformig, så aftager strålingsintensiteten med kvadratet på afstanden fra kilden. Det betyder for eksempel, at hvis man bevæger sig ud i den dobbelte afstand, så reduceres strålingen til 1/4 af det oprindelige.



12. Forholdsregler mod bestråling



Den internationale organisation, ICRP, har opstillet en række regler for arbejde med radioaktiv stråling. Organisationen anbefaler, at den årlige ækvivalentdosis for enkeltpersoner ikke overstiger 5 mSv. For folk, som arbejder med radioaktivitet, for eksempel atomfysikere, sættes grænsen dog ved 50 mSv pr. år. I omgangen med radioaktiv stråling kan nævnes tre kodeord:

Afstand	Hold afstand til radioaktive kilder. Se blandt andet afstandskvadraten ovenfor.
Tid	Hvis aktiviteten er konstant, så er den modtagne dosis proportional med tiden, man er udsat for strålingen. Begræns derfor tiden!
Afskærmning	Afskærmning kan kraftigt reducere den modtagne stråling, jvf. afsnit 9.

Man bør være særlig påpasselig med ikke spise eller på anden måde indtage radioaktive stoffer, da det er sværere at gardere sig mod *indre stråling*. Her kan man være nødsaget til at vente på en biologisk udskillelse eller vente på, at alle de radioaktive kerner er henfaldet. α -stråling kan gøre særlig stor skade ved indtagelse!

Langtidsvirkninger ved lavere doser

Ved lave strålingsdoser mærker personen ikke noget. Risikoen for at få kræft på et senere tidspunkt er dog øget. Det er imidlertid meget svært at forudsige, hvor meget sandsynligheden for cancer er forøget.

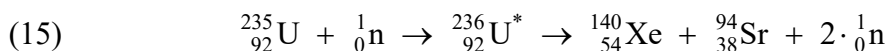
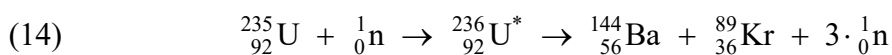
Akutte strålingsskader

Akut strålesyge opstår ved en kortvarig og stor ækvivalentdosis på $1 \text{ Sv} = 1000 \text{ mSv}$.

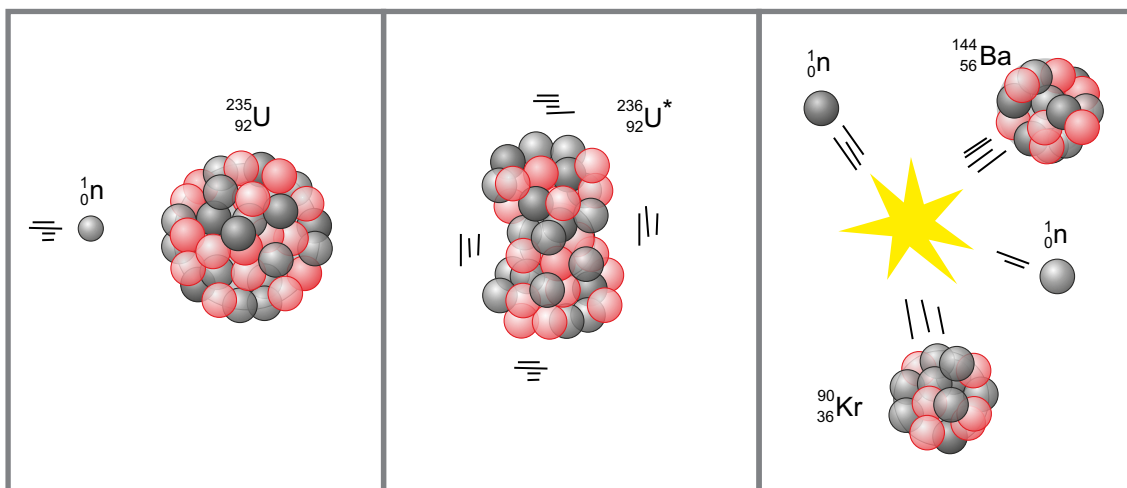
Det er især de bloddannende organer og tarmenes slimhinder, som skades. Efter få timer bliver den ramte dårlig med kvalme og opkastninger. Dagen efter føler han sig rask igen, men bliver syg igen efter 2-3 uger. Antallet af blodlegemer er faldet stærkt og kroppens modstandskraft mod infektioner er nedsat. Personen bliver dog normalt rask igen efter nogen tid. Ved 3 Sv dør halvdelen efter yderligere et par uger. Ved 5 Sv dør næsten alle.

13. Fission

Det har vist sig, at kerner af visse tunge grundstoffer kan spaltes i mindre dele, hvorved der frigøres energi. En sådan kernespaltning kaldes *fission*. Dette fænomen blev først opdaget i 1939 af de to fysikere *Hahn* og *Strassman*. De bombarderede uran med neutroner, og efter omhyggelige kemiske analyser kom de frem til, at der var blevet skabt en radioaktiv isotop af barium. Senere opdagede man også krypton. Fysikerne *Meitner* og *Frisch* tolkede resultaterne korrekt: Uran-235 var blevet spaltet i to massive dele, kaldet spaltningsfragmenter. Siden dengang har man gjort mange flere erfaringer. Blandt andet viser det sig, at nogle kerner godt kan undergå *spontan* fission, men dette er en sjælden begivenhed. Normalt skal kernerne først bombarderes med neutroner. Det har vist sig, at U-238 skal rammes af *hurtige* neutroner for at en fission kan foregå, mens U-235 skal have *langsomme* neutroner. For U-235's vedkommende, så kan for eksempel følgende spaltninger foregå:



men også andre fragmenter kan tænkes. Den sidstnævnte proces har jeg illustreret nedenfor: En neutron skydes ind imod urankernen. Neutronen optages, og en der opstår en såkaldt *compound-kerne*: U^* -136. Den er i en meget energirig og ustabil tilstand, og kernen spaltes i to ca. lige store dele næsten øjeblikkeligt. Samtidigt skabes der 2 nye neutroner. Fissionsfragmenterne fra fissionsprocesser vil altid have for mange neutroner i forhold til protoner. De vil derfor skille sig af med nogle af neutronerne gennem en serie af β -henfald, indtil en stabil kerne er opnået. Overskuddet af neutroner forklarer i øvrigt også, hvorfor 2 eller 3 neutroner frigives under selve fissionsprocessen. Niels Bohr sammenlignede kernen med en *væskedråbe*, hvor overfladespændingen er et billede på kernekrafterne, der forsøger at holde sammen på kernens bestanddele. I den ustabile fase med compoundkernen er dråben i voldsom bevægelse og på et tidspunkt deles dråben i to, da overfladespændingen ikke længere kan holde sammen på dråben.



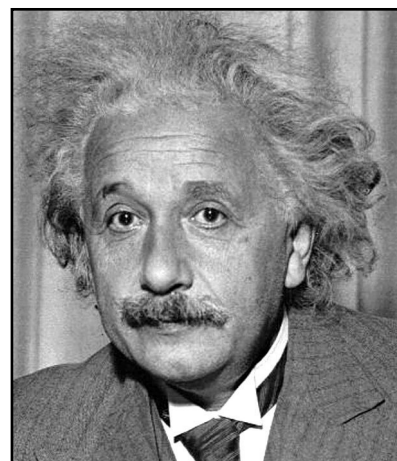
14. Masse og energi to sider af samme sag

En af de største fysikere igennem tiderne var den tyske fysiker *Albert Einstein* (1879–1955). Han viste ud fra meget generelle overvejelser, at masse og energi er nært forbundne. Enhver masse m svarer nemlig til en energi E , efter følgende formel:

$$(16) \quad E = m \cdot c^2$$

hvor c er lysets hastighed. Det viser sig, at summen af masserne af de protoner og neutroner, som udgør kernen, er større end massen af selve kernen. Forskellen i masse betegnes *massedefekten*. Man kan forklare den

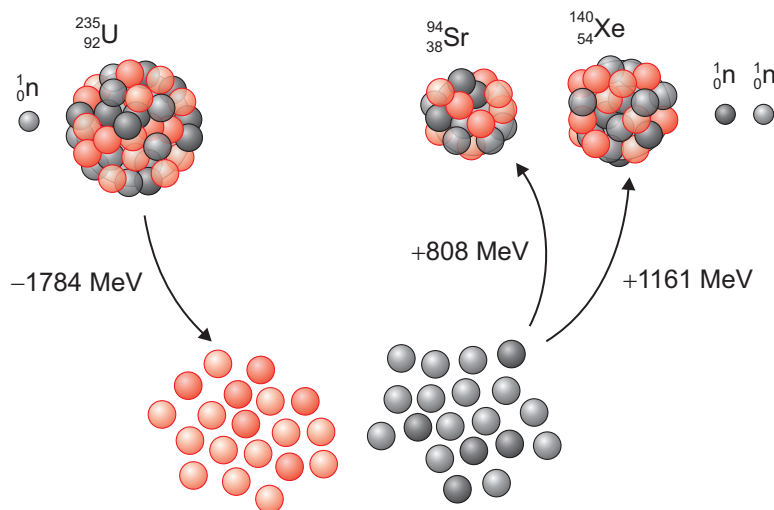
forøgede masse ved at sige, at *energi er blevet til masse*. Det koster energi at løsrive kernens bestanddele fra hinanden, nemlig kernens såkaldte *bindingsenergi*. Til gengæld har man fået mere masse ud af det. På tilsvarende måde får man energi foræret, når de enkelte protoner og neutroner samles til en kerne. For at beregne den energi, som udvikles ved en fissionsproces, kan man, som illustreret på figuren på næste side, forestille sig indskudt et tænkt mellemstadium, hvor alle nukleonerne er skilt ad. Det samlede energiregnskab fremgår af nedenstående regning. Der frigives altså 185 MeV ved denne kernespaltnings!



Energi frigjort ved fissionsproces (15)

Det kan vi gøre direkte ved hjælp af bindingsenergiene, som kan slås op i en databog:

Energitab ved at spalte U-235:	– 1784 MeV
Energigevinst ved at samle Sr-94:	+ 808 MeV
<u>Energigevinst ved at samle Xe-140:</u>	<u>+ 1161 MeV</u>
Samlet energigevinst ved fission:	+ 185 MeV



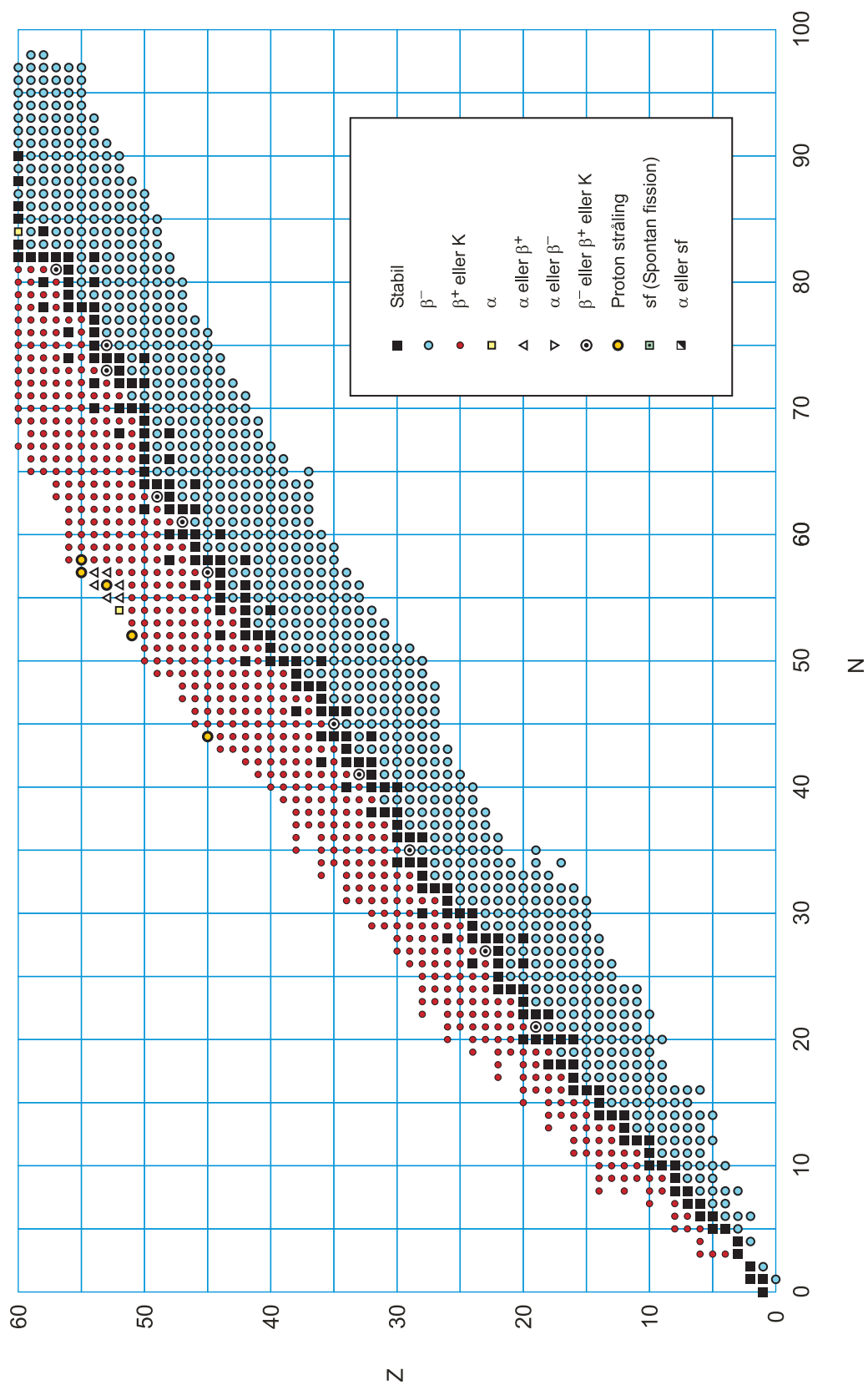
15. Kædereaktioner

Ved hver spaltning af en urankerne frigøres der 2-3 neutroner. De kan bruges til at bombardere andre urankerner med. Det viser sig, at ikke alle de frigivne neutroner skaber fission, selv om de rammer en anden urankerne. Der kan nemlig ske tre ting:

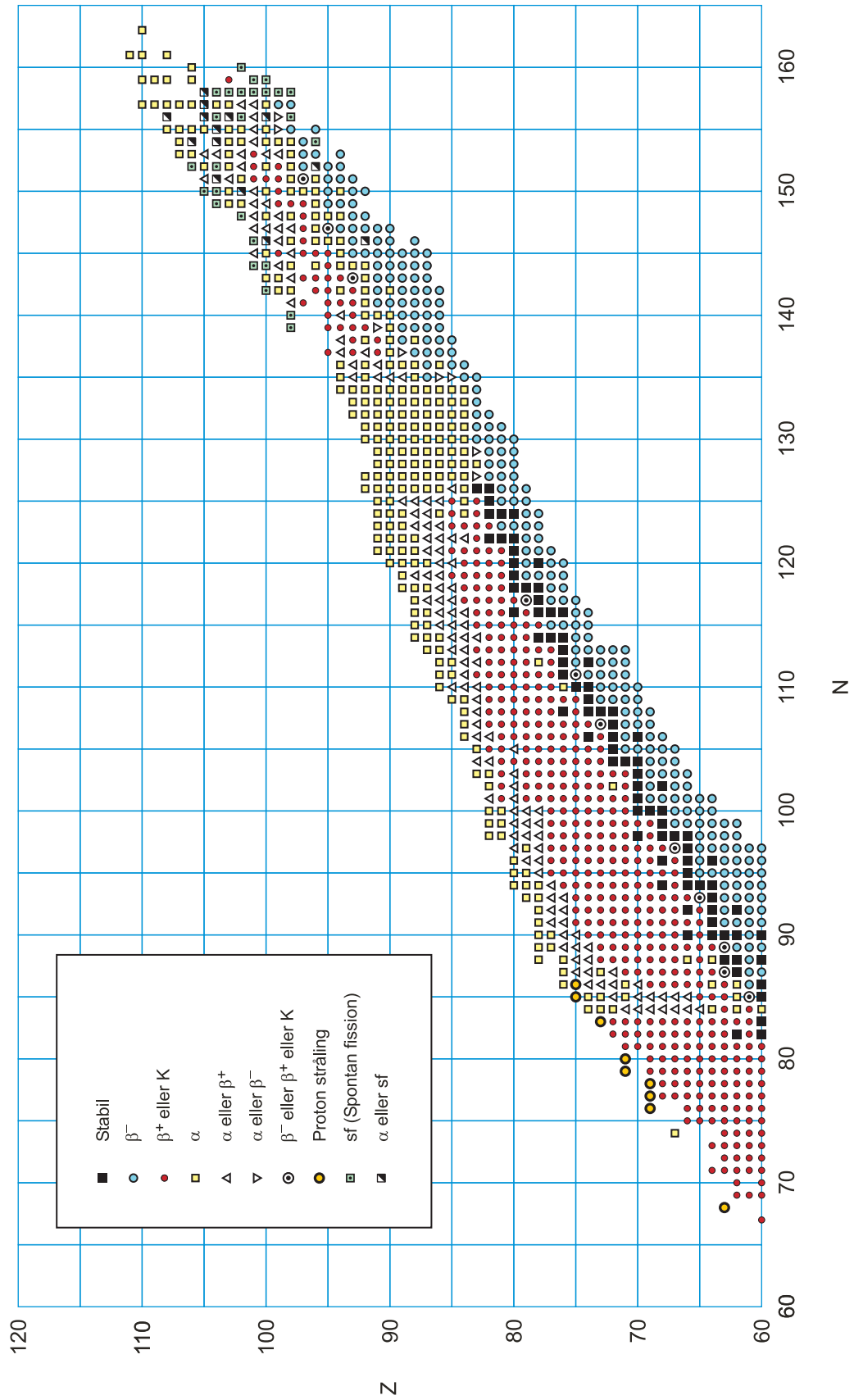
- a) Neutronen *spredes* på urankernen, dvs. neutronen fortsætter efter mødet, dog ofte med reduceret energi.
- b) Neutronen absorberes i urankernen, men bliver der (kaldes *indfangning*), hvorefter kernen efterhånden vil henfalde under udsendelse af gamma-og betastråling.
- c) Neutronen absorberes og forårsager fission.

Afgørende for at en kædereaktion kan foregå er, at der for det første er tilstrækkelig med uran tilstede: man skal have nået den *kritiske masse*, som for U-235 er ca. 5 kg. Men tilfælde c) ovenfor skal også ske ofte nok. Det viser sig imidlertid, at neutronens energi, og dermed *hastighed*, har kraftig indflydelse på sandsynlighederne for de tre processer ovenfor. Hvilken isotop, U-238 eller U-235, man har med at gøre er også væsentligt. For at gøre en lang forklaring kort, så viser det sig, at man kan sætte en kædereaktion i gang, hvis man anvender en *moderator* i forbindelse med *naturligt* uran (til atomreaktor) eller hvis man *beriger* uranen, dvs. forøger den procentvise andel af U-235, der forekommer i naturligt forekommende uran (til atombombe). En moderator er et stof, som er i stand til at sænke neutronernes hastighed.

KERNEKORT



KERNEKORT



Opgaver

I denne opgavesektion har jeg nummereret opgaverne, så det afsnit, de hører til, står foran kommaet. Opgave 6.3 er altså opgave 3 til afsnit 6.

Opgave 6.1

Opskriv henfaldet for nedenstående radioaktive kerner. Angiv om datterkernen er stabil. Hvis datterkernen ikke er stabil, skal du *ikke* udregne de efterfølgende henfald.

- a) ${}_{39}^{90}\text{Y}$ b) ${}_{55}^{137}\text{Cs}$ c) ${}_{86}^{220}\text{Rn}$ d) ${}_{92}^{238}\text{U}$ e) ${}_{84}^{218}\text{Po}$ f) ${}_{6}^{14}\text{C}$

Opgave 6.2

Opskriv henfaldet for nedenstående radioaktive kerner. Angiv om datterkernen er stabil. Hvis datterkernen ikke er stabil, skal du *ikke* udregne de efterfølgende henfald.

- a) ${}_{95}^{241}\text{Am}$ b) ${}_{83}^{210}\text{Bi}$ c) ${}_{94}^{245}\text{Pu}$ d) ${}_{90}^{232}\text{Th}$

Opgave 6.3

Isotopen ${}_{88}^{225}\text{Ra}$ giver anledning til *kaskadehenfald*, dvs. en række af henfald. Opskriv samtlige henfald i kæden. Gå ud fra, at ${}_{88}^{225}\text{Ra}$ *ikke* giver spontan fission! Hvad er det stabile slutprodukt?

Opgave 6.4

Der er også mulighed for andre typer henfald end dem, der er nævnt i hovedteksten. Der er noget, der hedder β^+ -henfald. Her udsendes elektronens *antipartikel*, den såkaldte *positron*. Den har ladning +1 og vi vil betegne den ${}^0_1\text{e}$. I stedet for en antineutrino, som i tilfældet med et almindelig β^- -henfald, udsendes her en *neutrino*. Her er et eksempel på en β^+ -proces: ${}_{15}^{30}\text{P} \rightarrow {}_{14}^{30}\text{Si} + {}^0_1\text{e} + \nu$.

- a) Hvad tror du, at der sker inden i kernen ved β^+ -proces? (analogt til (1) side 8).
b) Opskriv henfaldet for ${}_{11}^{22}\text{Na}$.

Opgave 6.5

Opskriv de første 4 reaktioner i henfaldskæden for plutonium-isotopen ${}_{94}^{241}\text{Pu}$.

Opgave 7.1

Halveringstiden for Cs-137 er 30 år. Hvor stor en procentdel af de radioaktive kerner vil der være tilbage i kilden efter a) 30 år? b) 60 år? c) 155 år? *Hjælp:* Til de to første spørgsmål: Tænk logisk! Til c): Benyt formel (9) side 13 (henfaldsloven), idet du sætter A_0 til 100%.

Opgave 7.2

Halveringstiden for Cs-137 er 30 år. Hvor lang tid går der, før aktiviteten af en Cs-137 kilde er nede på 2% af dens aktivitet ved start?

Opgave 7.3

Aktiviteten for et radioaktivt stof aftager med 90% på 15,95 minutter. Hvad er stoffets halveringstid?

Opgave 7.4

Sr-90 er beta-radioaktiv med en halveringstid på 29 år. Benyt henfaldsloven (9) side 13 til at løse følgende spørgsmål, idet du sætter A_0 til 100%.

- a) En kilde har ligget i 5 år. Hvad er dens styrke reduceret til, målt i procent?
- b) Samme spørgsmål, når der er gået 100 år.

Opgave 7.5

Grunden til, at der stadig er naturlige forekomster af uran-isotoperne $^{235}_{92}\text{U}$ og $^{238}_{92}\text{U}$ tilbage på Jorden er, at de har meget lange halveringstider. Førstnævnte har en halveringstid på $7,04 \cdot 10^8$ år og sidstnævnte $4,468 \cdot 10^9$ år. Jorden antages i det følgende at være at være ca. $4,5 \cdot 10^9$ år gammel.

Beregn hvor mange procent forekomsten af de to isotoper er reduceret *med* i løbet af de $4,5 \cdot 10^9$ år. Der var altså mere af de to uran-isotoper ved Jordens skabelse!

Opgave 7.6

Isotopen $^{14}_6\text{C}$ (kulstof-14) er en radioaktiv kulstof-isotop. Den benyttes til at datere arkæologiske fund med. Sagen er nemlig, at levende organismer indeholder kulstof. Det meste er af isotopen $^{12}_6\text{C}$, som ikke er radioaktivt. En ganske lille fast del af den naturligt forekommende kulstof er imidlertid kulstof-14, og den har en halveringstid på 5730 år. Når en levende organisme dør, stopper det med at optage kulstof fra omgivelserne, dvs. den lille del $^{14}_6\text{C}$, som allerede er i organismen, henfalder. Hvor stor en procentdel af $^{14}_6\text{C}$ er henfaldet efter 10000 år? *Hjælp:* Benyt formel (9) side 13 (henfaldsloven).

Opgave 8.1

- a) Hvorfor er radioaktiv bestråling farligt for mennesker og dyr? *Hjælp*: Se side 14.
- b) Hvilke organer er mest udsatte for radioaktiv stråling. Søg eventuelt på Internettet.
- c) Nævn nogle sammenhænge, hvor radioaktivitet kan udnyttes *positivt*.

Opgave 9.1

Halveringstykkelser for gammastråling med energien 500 keV er 4 mm i bly. Hvor stor en brøkdel af gammakvanterne slipper igennem en blyafskærmning på 2 cm?

Opgave 9.2

Isotopen $^{137}_{55}\text{Cs}$ udsender gammastråling med energi 0,66 MeV.

- a) Benyt kurven på side 16 til at aflæse halveringstykkelser for gammastrålingen i vand.
- b) Hvor mange procent vil strålingen blive reduceret *til*, hvis der afskærmes med et vandlag på 0,5 meters tykkelse? *Hjælp*: Benyt formel (11) side 16 med $I_0 = 100\%$.

Opgave 9.3

Ifølge databogen udsender den radioaktive isotop thorium-232 gammakvanter med en energi på 0,059 MeV.

- a) Bestem udfra figuren på side 16 i noten halveringstykkelser for ovenstående γ -stråling i henholdsvis bly og atmosfærisk luft.
- b) Hvor stor en del af strålingen vil passere igennem en blyafskærmning på 2 cm? *Hjælp*: Benyt formel (11) side 16 med $I_0 = 100\%$.

Opgave 9.4

Den radioaktive isotop Ra-226 udsender γ -stråling med energien 0,187 MeV.

- b) Aflæs halveringstykkelser for gammastrålingen i vand på side 16 i noten.
- c) Hvor stor en procentdel slipper igennem et vandlag på 10 cm?

Opgave 9.5

En patient gennemlyses med 100 keV røntgenstråling. Patienten er 20 cm tyk, og vi antager, at den pågældende består af vand.

- a) Find halveringstykkelser ved at bruge figuren på side 16 i noten (røntgenstråling er elektromagnetisk stråling ligesom gammastråling!).
- b) Hvor mange procent af strålingens intensitet kommer ud på den anden side af patienten?

Opgave 10.1

- a) Hvad er baggrundsstråling for noget, og hvorfra stammer det?
- b) Hvad er de vigtigste bidragsydere til baggrundsstrålingen?

Opgave 10.2

På hvilken måde kan *radon* være skadeligt? Benyt eventuelt Internettet!

Opgave 11.1

Det farligste stof, som dannes ved en atombombesprængning er $^{90}_{38}\text{Sr}$. Denne isotop af strontium falder ned over markerne og optages af køerne, når de spiser græs. Derefter fås vi stoffet i os, når vi drikker mælk. Dets farlighed skyldes, at det kemisk ligner calcium, hvilket betyder, at strontium-atomerne kan gå ind og erstatte calcium-atomerne i knoglerne. Her kan det gøre stor skade, idet det kan ødelægge knoglemarven. Hermed hindres dannelsen af de røde blodlegemer, og man kan få kræft (*leukæmi*).

- a) Opskriv henfaldet for $^{90}_{38}\text{Sr}$ ved brug af kernekortet.

Som du (forhåbentligt) opdagede, er isotopen beta-radioaktiv, og hver beta-partikel har en energi på 0,55 MeV. Lad os sige, at en person har indtaget strontium med en aktivitet på $6,2 \cdot 10^5 \text{ Bq}$, dvs. hver sekund udsender det radioaktive materiale $6,2 \cdot 10^5$ beta-partikler. Isotopens halveringstid er 29 år, og da den er meget større end 1 år, så vil kildens styrke stort set ikke aftage i løbet af en bestrålingstid på 1 år. Det betyder, at vi kan antage, at kilden bliver ved med at udsende $6,2 \cdot 10^5$ beta-partikler i sekundet i denne periode.

- b) Hvor mange beta-partikler udsendes i løbet af 1 år?
- c) Hvor stor en energi har alle disse beta-partikler fra spørgsmål b)? *Hjælp:* Husk, at 1 betapartikel har energien 0,55 MeV og at $1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.

Med spørgsmål c) haves energien af alle de partikler, som udsendes i løbet af 1 år. Da det radioaktive stof er optaget i kroppen, antager vi, at 100% af de udsendte beta-partikler rammer personen. Vi antager desuden at 100% absorberes. Personen oplyses at veje 70 kg.

- d) Bestem den absorberede dosis på 1 år.
- e) Bestem dosisækvivalent.
- f) Hvor mange procent vil aktiviteten være aftaget til efter 10 år? *Hjælp:* Her skal du bruge formel (9) side 13 (henfaldsloven). Sæt A_0 til 100%.

Opgave 11.2

Radium er et af de første radioaktive stoffer, som blev fundet – i øvrigt af ægteparret Marie og Pierre Curie! I bare et gram af isotopen $^{226}_{88}\text{Ra}$ henfalder hvert sekund 37 milliarder kerner. Radium er et blødt sølvhvidt metal. Hvis man får radium ind i sig, så ender det til sidst i knoglerne, hvor det optages i stedet for calcium. I knoglerne ødelægger den kraftige stråling produktionen af røde blodlegemer, så man får leukæmi. Lad os sige, at en person har fået $1\text{ }\mu\text{g }^{226}_{88}\text{Ra}$. Da $1\text{ }\mu\text{g}$ er en milliontedel af et gram, får vi af ovenstående oplysning, at det har en aktivitet på 37000 Bq , dvs. at der udsendes 37000 radioaktive partikler pr. sekund.

a) Vis, at isotopen er α -radioaktiv og opskriv henfaldet.

Det oplyses, at energien af α -partiklen er $4,78\text{ MeV}$. Isotopens halveringstid er 1620 år, og da den er meget større end 1 år, så vil kildens styrke stort set ikke aftage i løbet af en bestrålingstid på 1 år. Det betyder, at vi kan antage, at kilden bliver ved med at udsende 37000 α -partikler i sekundet i denne periode.

b) Hvor mange partikler udsendes i løbet af 1 år?

c) Bestem hvor meget energi, der udsendes i løbet af et år. *Hjælp:* Hver partikel udsender en energi på $4,78\text{ MeV}$ og $1\text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13}\text{ J}$.

Det antages, at 100% af de udsendte α -partikler rammer og 100% absorberes. Desuden oplyses det, at personen vejer 90 kg.

d) Bestem den absorberede dosis.

e) Bestem dosisækvivalent.

f) Er det en betydelig årlig dosis? (se afsnit 12).

Bemærkning: Lige efter 1. verdenskrig opdagede man, hvor farligt radium er. På en fabrik havde nogle kvinder malet selvlysende radiummaling på urvisere, og efter 10-15 år døde mange af kvinderne af knoglekræft og blodmangel. Kvinderne havde ofte spidset penslerne med læberne, hvorved de havde fået radium i kroppen!

Opgave 11.3

En svulst på 0,5 kg bestråles med gammastråling i 50 sekunder. Kilden er en Co-enhed, der bestråler svulsten med $3,0 \cdot 10^{12}$ kvanter (fotoner) pr. sekund. Gennemsnitsenergien af kvanterne er $1,25\text{ MeV}$. Antag, at $1/4$ af den udsendte energi absorberes i svulsten.

a) Hvor stor er den absorberede dosis i svulsten?

b) Hvor stor er dosisækvivalent?

Opgave 11.4

En kvinde skal have bestrålet livmoderhalsen med en radiumkilde, som indeholder 40 mg Ra-226. 1 gram Ra-226 har aktiviteten $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq. Bestrålingen varer i fire dage. Vi antager, at $\frac{1}{4}$ af den afgivne stråling afsættes i det syge væv, som vejer 120 g.

- b) Hvor stor er den absorberede dosis?
- c) Hvor stor er dosisækvivalenten?

Opgave 11.5

En 70 kg tung person bliver udsat for en helkrops dosis α -stråling med energien 4,78 MeV. I alt $2,3 \cdot 10^{12}$ partikler bliver absorberet.

- a) Hvor stor er den absorberede dosis?
- b) Hvor stor er dosisækvivalenten?

Kommentar 11.6

Et andet af de farlige radioaktive isotoper ved atomuheld eller ved atombombesprængninger er $^{137}_{55}\text{Cs}$. Rent kemisk ligner cæsium kalium så meget, at kroppen ikke kan skelne de to stoffer fra hinanden. Begge stoffer optages i kroppens muskler. Ved Tjernobyl-ulykken spredtes radioaktivt materiale med vinden. En del endte i Skandinavien. Rensdyr her fik cæsium i kroppen via den lav, de spiste. Derfor opstillede man grænser for hvor meget stråling rendyrkødet måtte afgive pr. kg. Heldigvis udskiller kroppen en ret stor del af det radioaktive cæsium, før det når at henfalde. Alligevel kan det være en betydelig kilde til radioaktiv bestråling!



Opgave 13.1

En mulighed for en fissionsproces er, at en $^{235}_{92}\text{U}$ kerne rammes af 1 neutron og splittes i to større dele, hvor det ene er $^{88}_{35}\text{Br}$, under udsendelse af 4 neutroner. Hvad er det andet spaltningsprodukt?

Opgave 14.1

Hvor meget energi er der i 1 kg vand ifølge Einsteins formel (16) side 23? Danmarks totale energiforbrug på 1 år ligger på lidt under $1 \cdot 10^{18}$ J. Hvor mange kg vand skulle benyttes, hvis al energien kunne udnyttes?

Opgave 14.2

Bestem den energi, der frigives i fissionsproces (14) side 23. Bindingsenergiene for $^{235}_{92}\text{U}$, $^{144}_{56}\text{Ba}$ og $^{89}_{36}\text{Kr}$ er henholdsvis 1784 MeV, 1190 MeV og 767 MeV.