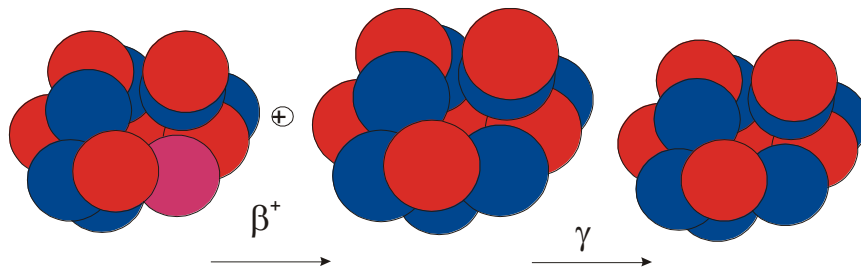
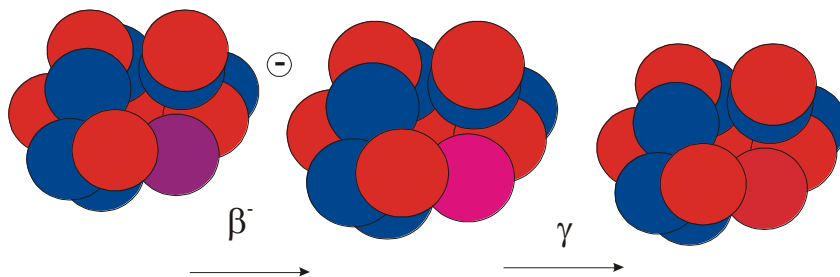


Over 100 år med radioaktivitet - men hva er radioaktivitet?

Av
Dag Øistein Eriksen,

Oslo, januar 2022



Innledning

I 1896 oppdaget Henri Becquerel radioaktivitet - en oppdagelse som skulle vise seg å ha den største betydning for vår forståelse av hvordan naturen er bygget opp. I 1986 ble det norske folk kjent med Becquerels navn gjennom enheten becquerel, Bq, etter katastrofen i Tsjernobyl. Selv om en kjenner måleenheten er det tvilsomt om den vanlige nordmann har en forståelse for hva radioaktivitet er og hvordan den påvirker oss. Trrettifem år etter Tsjernobyl er igjen kjernekraft aktuelt som et alternativ til CO₂-utslippende fossile varmekraftverk. Fremdeles kan en imidlertid møte standpunkt som "Radioaktivitet er farlig! Det har Fukushima og Tsjernobyl vist". Denne oppfatningen er egentlig ikke urimelig siden forekomst, virkning og påvisning av radioaktiv stråling faktisk er et komplisert emne hvor flere fagfelt er involvert, bl.a. kjernefysikk, kjemi, biofysikk og biologi. Hensikten med dette skrivet er å gi så mye bakgrunnsinformasjon at de viktigste begrepene kan forstås og derved bidra til færre misforståelser.

*Radioaktive grunnstoffer er bl.a.:
hydrogen,
karbon,
kalium,
platina, bly,
thorium og
uran.*

Bakgrunn

Henri Becquerel oppdaget stråling fra et naturlig forekommende mineral som han visste inneholdt uran. Uran er derfor det eldste radioaktive grunnstoffet vi kjenner og er naturlig forekommende. I 1896 var de fleste grunnstoffers forekomster og kjemi kjente, som uran, thorium og kalium. Disse tre grunnstoffene viste seg alle å være radioaktive. At også de biologisk viktige elementene hydrogen og karbon er naturlig radioaktive ble ikke kjent før i mellomkrigstiden. Det er påvist naturlig radioaktivitet i grunnstoff som rubidium, tellur, platina og bly.

Radioaktivitet er følgelig i seg selv en naturlig ting.

Kunstig framstilt er de helt radioaktive elementene technetium, promethium og alle transuranene (elementene etter uran): neptunium, plutonium, americium, curium, berkelium, californium, o.s.v.

Det at naturlig radioaktivitet ikke følger grunnstoffene systematisk, antyder at de kjemiske egenskapene ikke er avhengige av radioaktiviteten, eller motsatt. Kjemiske forhold har med atomets elektroner å gjøre, mens radioaktivitet er en nukleær (dvs. kjernemessig) egenskap.

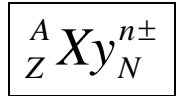
Isotoper

Et grunnstoffs kjemiske egenskaper bestemmes av elektronene som omgir kjernen, spesielt de ytterste som kan brukes til å danne bindinger med andre atomer. Et (elektrisk nøytralt) atom har like mange negative elektroner omkring seg som det har positive ladninger i kjernen. De positive ladningene skyldes protonene i kjernen. Antall protoner bestemmer atomnummeret, mens summen av antall nøytroner som er elektrisk nøytrale, og protoner bestemmer massen på nukliden (atomkjernen). Nøytronenes plass i kjernen er nødvendig for å hindre at protonene skal frastøte hverandre fordi like elektriske ladninger frastøter (coulombfrastøtning). Kreftene mellom protoner og nøytroner kalles sterke vekselvirkninger og er tiltrekkende, men har svært kort rekkevidde. Samme type krefter er også gjeldende mellom to nøytroner og to protoner, dersom disse kommer svært nær hverandre (ca 10^{-15} m).

Nuklider med samme antall protoner, men med forskjellig antall nøytroner kaller vi isotoper (av gresk "iso topos" = samme sted, dvs. i det periodiske system over grunnstoffene). Enkelte elementer som natrium, aluminium, fosfor, mangan og gull har bare en stabil (ikke-radioaktiv) isotop, mens f.eks. tinn, som har flest, har hele ti.

Alle grunnstoffer har i tillegg radioaktive isotoper som kan framstilles kunstig. Vi beskriver et grunnstoff med en eller to bokstaver, Xy , f.eks. karbon, C, natrium, Na, osv. En isotop av et grunnstoff betegnes som i figur 1.

Figur 1. Isotopsymbol, med massetall (A), protontall (Z), nøytrontall (N) og kjemisk ioneladning (n). Dette er den UPAC-godkjente måten å skrive på.



I figur 1 er A massetall, Z atomnummer (= antall protoner) og N antall nøytroner. Vi har altså at $A = Z + N$. Siden symbolet for grunnstoffet entydig angir Z er ofte både Z og N , som fås fra $N = A - Z$, sløyfet, og vi skriver ${}^A Xy$. $n\pm$ angir den kjemiske tilstanden (over- eller underskudd av elektroner) til atomet/ionet og er bare med dersom en også vil angi kjemisk tilstand. (Plasseringen av N må ikke forveksles med tall i kjemisk betegnelse, f.eks. i CO_2 - gassen karbondioksid.)

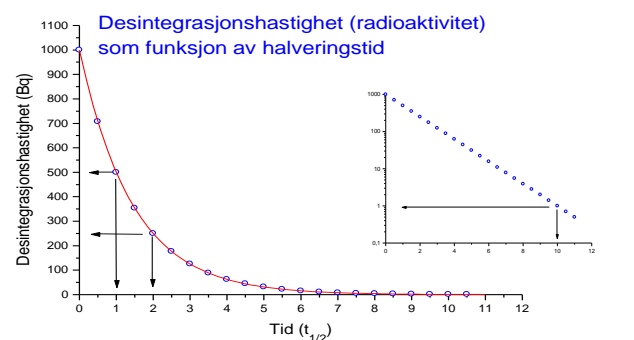
Halveringstid

Å forklare årsaker til radioaktivitet kan ikke gjøres med klassisk fysikk, men fysiske lover gjelder og vi kan derfor angi kvalitative og gode analoge forklaringer. Radioaktivitet skyldes at atomkjernen er ustabil - antall protoner og antall nøytroner er ikke tilstrekkelig tilpasset hverandre, eller det er rett og slett for mange av dem.

Som alle ustabile systemer som vi kjenner fra dagliglivet, f.eks. en stein som ligger oppe i ei li, vil systemet søke mot å bli mere stabilt ved å kvitte seg med energi. Steinen vil rulle nedover lia og få mindre potensiell energi. I atomets verden er masse og energi ekvivalente størrelser. Derfor har vi at jo mer energi som frigjøres (masse som tapes), desto mer sannsynlig er det at omdanning av kjernen vil finne sted. Tilsvarende eksempelet med steinen vil atomkjernene kvitte seg med overflod av energi (masse) ved å sende ut stråling.

Det vil være en viss sannsynlighet for at steinen skal begynne å rulle. Jo mer ustabil den ligger, desto mer sannsynlig er det at det vil skje. Nå må en stein påvirkes av ytre krefter for å komme i gang, mens en radioaktiv atomkjerne omdannes spontant, men i en prosess hvor statistisk teori kan anvendes. Nukliden kan tilordnes en viss sannsynlighet for at kjerneomvandlingen skal finne sted. Det har vist seg hensiktsmessig å angi halveringstid som et sannsynlighetsmål, dvs. den tid det tar til vi har halvparten av nuklidene tilbake. Halveringstid er forsøkt anskueliggjort i figur 2 hvor desintegrasjonshastighet, dvs. antall kjerneomvandlinger pr. tid, er skissert. Enhet for desintegrasjon er becquerel, Bq. 1 Bq = 1 desintegrasjon pr. sekund. $1Bq = 1s^{-1}$

Figur 2. Grafisk framstilling av hvordan aktiviteten i en radioaktiv prøve med 1000Bq avtar. Innskutt er samme diagram i halvlogaritmisk skala. Her vises at etter 10 $t_{1/2}$, så er $1/1000$ (eg. 2^{-10}) av opprinnelig aktivitet tilbake.



Strålingstyper

α - alfa, den første

β - beta, den andre

γ - gamma, den tredje bokstav i det greske alfabetet

Vi kan dele inn radioaktiv stråling avhengig av om det foregår en kjerneomvandling eller bare avgivelse av eksitasjons-(overskudds)energi. Til de førstnevnte prosesser hører tre hovedtyper: α , β og spontan fisjon. Spontan fisjon betyr at tunge kjerner deler seg i to jamnstore kjerner. Alle kjerneomvandlinger fører til overgang fra et element til et annet. Dette betyr at det nydannede atom har kjemiske egenskaper som er forskjellige fra moratomet.

$$\alpha \equiv {}^4_2\text{He}^{2+}$$

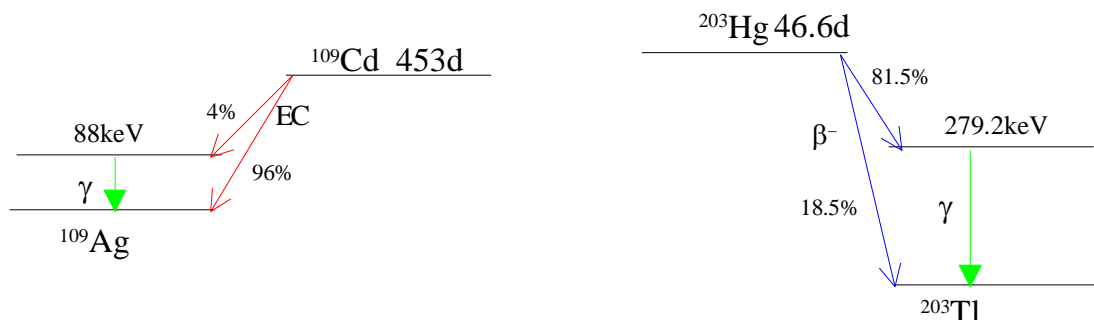
α -partikler er det samme som ${}^4\text{He}$ -kjerner - et ion som sendes ut med høy energi. Her har datteratomet to atomnumre og fire masseenheter mindre enn moratomet. α -partikler sendes ut med bestemte energier, karakteristisk for mor-nukliden.

$$\beta^- \equiv e^-$$

$$\beta^+ \equiv e^+$$

β -stråling er mindre dramatisk. β -partikkelen er enten et positivt eller negativt ladet elektron, dvs. elektrisk elementærladning med punktformig masse, $1/1837$ av protonets masse. Vi skiller mellom β^+ - og β^- -partikler. β^- -partikler er identiske med elektroner som finnes i alle atomer. β^+ -partikler, de positive elektronene (positronene), har samme ladning som protoner. De var den første type antimaterie som ble påvist og har derfor spilt en viktig rolle i forståelsen av sammenhengen mellom relativitetsteori og kvantemekanikk. Vanligere enn utsendelse av β^+ er det at atomkjernen fanger inn et elektron fra atomet og derved reduserer sin ladning med en enhet. Dette er en energimessig gunstigere prosess enn β^+ -utsendelse, og kalles elektroninnfangning - Electron Capture, EC. Ved utsendelse av β -partikler eller elektroninnfangning sendes det også ut partikler med meget spesielle egenskaper, nøytrino. Disse skal vi imidlertid ikke omtale nærmere her, bare konstatere at deres tilstedeværelse innebærer at β -partiklene ikke sendes ut med en entydig energi, men β -partiklene fra en type nuklide utgjør en kontinuerlig, karakteristisk energifordeling med en bestemt maksimumsenergi.

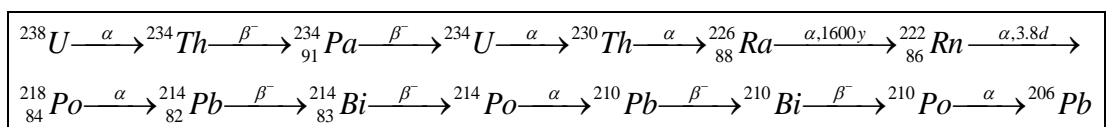
Etter at en α - eller β -partikkel har blitt sendt ut foreligger ofte den nydannede nukliden (datternukliden) i en tilstand hvor den ikke er kvitt all sin ekstra energi. Avgivelse av slik eksitasjonsenergi skjer i hovedsak som utsendelse av γ -stråling. γ -stråling er tilsvarende stråling som røntgenstråler (og lys, dvs. elektromagnetiske bølger), bare med mye høyere energi. I figur 3 er to enkle eksempler på henholdsvis EC og β^- , med påfølgende γ -utsending vist. γ -stråling sendes ut med bestemte energier og et γ -spektrum er derfor et "fingeravtrykk" av nukliden.



Figur 3. Eksempler på β -desintegrasjon med påfølgende γ -utsending.

Naturlig radioaktivitet

Som nevnt i innledningen er flere elementer radioaktive. Opphavet til denne radioaktiviteten er imidlertid delt: Enten stammer de radioaktive isotopene fra dannelsen av elementene i solsystemets barndom, de skyldes kontinuerlig produksjon som følge av desintegrasjon av radioaktive nuklider som ^{232}Th , ^{235}U og ^{238}U eller de dannes ved at kosmisk stråling forårsaker kjernereaksjoner i nuklider som finnes i atmosfæren, spesielt ^{14}N , som gir opphav til ^3H og ^{14}C . (Atmosfæren består bl.a. av 78% nitrogengass, N_2 og 21% oksyngengass, O_2 .) I tabell 1 er de viktigste, naturlig forekommende nuklider ført opp. I figur 4 er rekka av radioaktive datternuklider fra ^{238}U vist. En viktig nuklide er ^{222}Rn som sender ut α -stråling og har halveringstid 3.8 døgn. Radon, Rn, er en edelgass, som f.eks. helium og argon. Dette innebærer at nukliden opptrer kjemisk som en ikke-reaktiv gass. Gassen kan derfor unnvike fra berggrunnen og befinne seg i den lufta vi puster inn.



Figur 4. ^{238}U og de vesentligste datternuklider.

Tabell 1. Naturlig forekommende isotoper med halveringstider mindre enn 10^{12} år (1000 milliarder), deres hyppighet, halveringstid og desintegrasjonsmåte. Også grunnstoffets gjennomsnittlige hyppighet på jorda er tatt med.

Isotop	Halveringstid (år)	Isotophyppighet (%)	Desintegrasjonsmåte	Hyppighet på jorda (g/kg)*
^3H	12,3	-	β^-	1,4
^{14}C	5730	-	β^-	0,2
^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$	0,0117	EC/ β^-	20,9
^{87}Rb	$5,7 \cdot 10^{10}$	27,8	β^-	0,09
^{190}Pt	$6,1 \cdot 10^{11}$	0,01	α	$5 \cdot 10^{-6}$
^{232}Th	$1,39 \cdot 10^{10}$	100	α , spontan fisjon	$9 \cdot 10^{-3}$
^{234}U	$2,48 \cdot 10^5$	0,0056	α , spontan fisjon	
^{235}U	$7,13 \cdot 10^8$	0,7205	α , spontan fisjon	
^{238}U	$4,51 \cdot 10^9$	99,274	α , spontan fisjon	$2,7 \cdot 10^{-3}$

*Gjennomsnittlig mengde av grunnstoff, f.eks. hydrogen - H, i g pr. kg av jorda.

Strålings gang gjennom stoff

Da Becquerel oppdaget at røntgenfilm svertes av uran hadde han, uforvarende, også funnet opp en *detektor* for radioaktiv stråling. Årsaken til svertinga skyldes at radioaktiv stråling tilhører den kategorien vi i dag kaller "ioniserende stråling". Dette betyr at det stoff (materie) som utsettes for stråling vil få atomer og molekyler ionisert, dvs. elektroner i atomene løsrives. Siden elektronet var bundet til atomet måtte det følgelig tilføres energi for å løsrive elektronet. At stråling ioniserer innebærer derfor også at strålens energi avsettes i stoffet.

Ladete partikler som α - og β -partikler ioniserer mye kraftigere enn elektromagnetisk stråling som γ - eller røntgenstråling. Derved stoppes de også mye lettere. Som tommelfingerregel kan vi si at et papirark stopper α -partikler, mens ei glassplate stopper β -

$$1 \text{ eV} = 160 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

$$1 \text{ keV} = 160 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

partikler. γ -stråler er ikke elektrisk ladet, og kan derimot gå gjennom tykke metallrør og murvegger, avhengig av energien. γ -energi varierer fra 50 - 3000 keV (kilo elektronvolt, eV). Mekanismene for hvordan de forskjellige strålingstypene bremses opp i (vekselvirker med) materie skal vi ikke gå inn på, bare konstatere at det er vesensforskjeller på ladet (α , β , fisjonsfragmenter) og ikke-ladet stråling (røntgen og γ).

Radioaktive kilder sender ut stråler i alle retninger. Strålingsintensiteten vil derfor avta som f.eks. lysintensiteten fra en lyspære - altså omvendt proporsjonal med kvadratet av avstanden fra kilden. Dette betyr at i 2m avstand fra kilden er intensiteten 4 ganger mindre enn i 1m avstand. Å holde god avstand fra kilden er en god leveregel når en omgås radioaktivitet.

Som en kan tenke er skjerming av γ -stråling avhengig av hvor høy γ -energien er. I tillegg er kildestyrken (desintegrasjonshastigheten) en viktig parameter, samt at skjermingsmaterialet også er svært viktig. Reduksjon i strålingsintensiteten er gitt ved likningen:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \text{ eller } \mu d = \ln(I_0/I)$$

hvor I_0 er kildens intensitet, μ er en konstant som er avhengig av stoffet og d er tykkelsen på stoffet. De mest brukte skjermingsmaterialene er bly, stål og betong.

Stråledoser

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \cdot Q$$

$$1 \mu\text{Sv} = 10^{-6} \text{ J/kg}$$

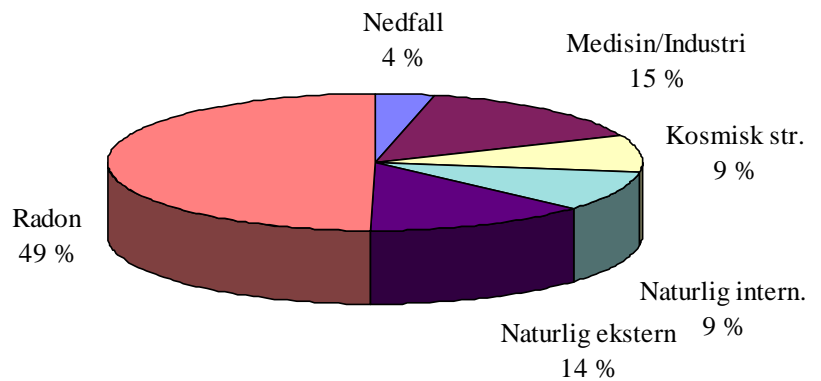
Når det gjelder den biologiske påvirkning av radioaktiv stråling er det flere forhold som er viktige: stråletype, -energi, -mengde, eksponert organ og eksponeringstid. Vi sammenfatter disse i begrepet dose. En stråledose er en mengde avsatt energi pr. masse. Dette kalles *absorbert dose* og angis i enheten gray, Gy. Hvor skadelig strålingen er, avhenger av stråletypen. Ved å multiplisere absorbert dose med en vektfaktor, Q , fås den *ekvivalente dosen* som angis i sievert, Sv. For α benyttes $Q = 20$, mens for β og γ er $Q = 1$. 1Sv er en stor enhet, og for vanlige doser benytter vi en milliontedels sievert, μSv . For doserate, som sier noe om hvor sterk eksponering vi er utsatt for, benyttes microsivert pr. time, $\mu\text{Sv/h}$. I tabell 2 og figur 5 er de gjennomsnittlige stråledosene pr. år til befolkningen i Norge angitt. Som en ser er radon den viktigste stålekilden. Radon stammer fra uran og thorium i berggrunnen. Det er derfor store geografiske variasjoner i luftas radonkonsentrasjon rundt om i Norge. Det er f.eks. mye uran i leirskiferen under Oslo sentrum. Konsentrasjonen utendørs avhenger også av meteorologiske forhold som vindretning, nedbør o.l. Radon siver inn i hus gjennom kjelleren. Det har vist seg at lufting av husene er viktig for å redusere konsentrasjonen. Det er derfor mye høyere verdier i innelufta om vinteren enn om sommeren. Radon og døtrene gir dose til lungene.

Naturlig radioaktivitet i kroppen er i gjennomsnitt 4000Bq. Dette stammer hovedsakelig fra ^{40}K , men også ^{14}C og ^3H gir bidrag. Kalium finner vi i muskelvev.

Kroppen har en stor evne til å reparere seg selv. Dette gjør kroppen hele tiden som følge av bakterier, virus, mutasjoner (feil i arveanlegget) og bakgrunnsstråling. Små doser kan derfor kroppen reparere selv. Selv større doser kan repareres dersom kroppen ikke utsettes for andre doser eller virus- eller bakterieangrep. I medisinsk stråleterapi blir enkelte organ utsatt

for spesielt store doser slik at vev med kreftceller ødelegges. Det samme oppnås med cellegift. Resultatet for pasienten er imidlertid ofte det samme: en nedsatt motstandskraft mot infeksjoner og pasienten må derfor holdes i isolat.

Strålingskilde	Dose (mSv)
Radon	2
Nedfall	0,15
Medisin/Industri	0,6
Kosmisk str.	0,35
Naturlig intern.	0,37
Naturlig ekstern	0,55



Tabell 2 og figur 5:

De gjennomsnittlige stråledosene pr. år til befolkningen i Norge.

I kroppen foregår det hele tiden et stoffskifte, metabolisme. Resultatet er at mange stoffer har vi nokså kort tid i kroppen. Som mål på denne utskiftingstiden bruker vi "biologisk halveringstid". Et eksempel er ^{137}Cs som bl.a. er en del av nedfallet etter kjernefysiske bombesprengninger i atmosfæren og Tsjernobyl-ulykka. Den fysiske halveringstiden er 30 år, mens kroppens biologiske halveringstid er bare ca 100 dager. For ^{131}I , som også er et nedfallsprodukt, er den fysiske halveringstiden 8 dager, mens den biologiske er 120 dager. Cesium, Cs, vil søke mot muskelvev, mens jod, I, vil tas opp i skjoldbruskkjertelen. Siden denne kjertelen er et lite organ (ca 25g) kan den derfor få en stor dose. En måte å redusere dosen på er å spise ikke-radioaktivt jod før nedfallet når fram til oss. Da vil kjertelen ha tatt opp ikke-radioaktivt jod slik at bare en mindre del av den radioaktive vil bli sittende i kjertelen. En del av beredskapen rundt kjernekraftreaktorer er å dele ut jodtabletter til befolkningen i tilfelle utslipp.

Deteksjon av radioaktivitet

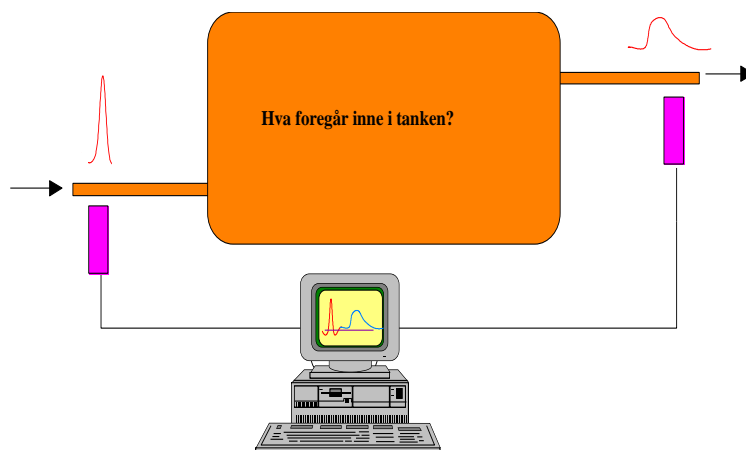
Strålingens ioniserende evne gjør at det er lett å detektere radioaktiv stråling. Men ingen detektor er perfekt for alle typer stråling og forhold. Detektorer for α - og β -stråling er ikke følsomme for γ og omvendt. Jo høyere γ -energi desto lavere deteksjonssannsynlighet. Det finnes mange typer detektorer fra små bærbare til store, tunge kolosser. Som en kan se fra figur 5 utgjør kosmisk stråling 9% og naturlig ekstern bakgrunnsstråling 14% av våre stråledoser. Dette betyr at vi for å måle sann mengde av radioaktivitet i vår prøve må være påpasslige med å skjerme detektoren og prøven. Nøyaktige detektorer er derfor ofte utstyrt med passende skjermingsmateriale.

Siden strålingen sendes ut i alle retninger er geometrien mellom kilde og detektor viktig. Absorpsjon av stråling i prøven kan være vanskelig å estimere. Slike faktorer gjør at dosemålinger av indre organer er spesielt vanskelige. Ofte benyttes såkalte fantom, dukker eller lemmer med bestemt mengde radioaktivitet, for å kalibrere dosedetektorer.

Praktisk nytte av radioaktivitet

Måling av radioaktivitet kan benyttes innen studier av så forskjellige ting som korrosjon av stål, utbredelse av utslipp fra kjernefysiske anlegg, strømning av væskefaser i oljereservoar, måling av oppholdstider i tanker og ovner, lekkasjesøk og kjemisk prosessutvikling, i tillegg til bruk innen medisinsk og biologisk forskning.

En radioaktiv jernnuklide, f.eks. ^{59}Fe , opptrer kjemisk som jern, men kan følges lett p.g.a. γ -stråling. Ved å sveise inn radioaktivt stål i veggen på et stålrør kan korrosjonen lett måles, siden radioaktiviteten på utsiden av røret vil avta etter som rustdannelse fjerner jernpartikler fra røret. ^{59}Fe opptrer her som et sporstoff, tracer, for alt jernet i røret.



Figur 6. Tenkt eksempel på en tank med ett innløp og ett utløp. Oppholdstid kan måles ved å sende inn en tracer og måle tiden det tar før den kommer ut. Tracerpulsens fasong inneholder viktig informasjon om strømningsforholdene i tanken.

Det faktum at ^{14}C dannes kontinuerlig i atmosfæren benyttes som utgangspunkt for dateringsmetoder. Alle planter tar

opp ^{14}C fra CO_2 i luften, men når livet slutter (treet felles) slutter også opptaket. Fra dette tidspunkt av vil mengden av ^{14}C dø ut. Dannelsen av ^{14}C har ikke vært konstant igjennom tusenvis av år. Dette har en kunnet konstatere ved å måle innholdet i svært gamle trær og trerester. Imidlertid har en klart å bestemme den historiske dannelseshastigheten. Ved å måle innholdet av ^{14}C i materialet i dag kan vi så regne ut hvor mye det må ha vært ved fellingstidspunktet og derved anslå alderen på materialet.

Tritium, ^3H , har en svært lavenergetisk β -stråling som gjør det umulig å måle tritium som er innelukket, f.eks. bak glass. β -strålene er imidlertid sterke nok til at fluorescerende stoff kan få tilført nok energi til at de lyser. Tritium benyttes derfor som energikilde i selvlysende klokker og ikke minst, i selvlysende skilt som skal vise vei til nødutganger i situasjoner hvor f.eks. strømforsyningen svikter.

Innen medisin har avbildninger vha radioaktiv stråling lenge vært i bruk. Ved å injisere en γ -tracer i blodet, for eksempel $^{99\text{m}}\text{Tc}$, så kan denne følges med et gammakamera. Trange blodårer eller organ som tar opp ekstra mye (svulster) eller lite (infarkt) kan detekteres. I dag regnes PET – Positron Emisjons Tomografi, å være den mest anvendelige nukleære avbildningsmetode. I PET benyttes at når et positron vekselvirker med et negativt elektron, så annihileres de (massene går over til energi) og det sendes det ut to fotoner med energi lik hvert av elektronenes masse (511keV) i ca 180° vinkel i forhold til hverandre. En kan derved oppnå en romlig avbildning av organene ved å detektere begge fotonene.