

Dosimetri, radioaktivitet og strålebiologi

Begreper, definisjoner og måleinstrumenter



Referanse:

Bjerke H. Dosimetri, radioaktivitet og strålebiologi: Begreper, definisjoner og måleinstrumenter. Teknisk dokument nr. 9. Østerås: Statens strålevern, 2015.

Emneord:

Dosimetri, radioaktivitet, strålebiologi, radionuklide, dose, gray, sievert, becquerel, ionisasjonskammer, klyngestørrelse

Resymé:

En norsk oversettelse av begrepsdefinisjoner for dosimetri, radioaktivitet og strålebiologi fra den internasjonale kommisjonen for stråleenheter og -målinger (ICRU) med tillegg av moderne referanser.

Reference:

Bjerke H. Dosimetry, radioactivity and radiation biology: Quantities, units and measuring instruments.

Teknisk dokument nr. 9. Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority, 2015.

Language: Norwegian.

Key words:

Dosimetry, radioactivity, radiation biology, radionuclide, dose, gray, sievert, becquerel, ionisation chamber, cluster size.

Abstract:

A Norwegian translation of quantities and units in dosimetry, radioactivity and radiation biology from the international commission on radiation units and measurements (ICRU) with novel references.

Prosjektleder: Hans Bjerke.

Godkjent:

Unn Hilde Refset, avdelingsdirektør, avdeling OFO

19 sider.

Publisert 2015-10-19.

Statens strålevern, Postboks 55, No-1332 Østerås, Norge.

Telefon 67 16 25 00, faks 67 14 74 07.

E-post: nrpa@nrpa.no

www.nrpa.no

ISSN 2387-5240 (online)

Dosimetri, radioaktivitet og strålebiologi

Begreper, definisjoner og måleinstrumenter

Hans Bjerke

Statens strålevern
Norwegian Radiation
Protection Authority
Østerås, 2015

Forord

Dosimetri og radioaktivitet er fysiske fenomener. Naturen i dosimetri og radioaktivitet, stiller opp med de mest fantastiske fenomener som mennesker kan tenke seg. Fenomener på sola og i verdensrommet kan forklares med denne fysikken. Tar en for seg et omdanningsskjema for en radionuklide viser det en nesten uendelighet av mangfoldighet i atomene. Human strålebiologi forsøker å forklare effekter av stråling på mennesker. Strålebiologi har utviklet seg fra å forstå ioniserende strålings overflatiske skader og behandling av kreft i hudoverflaten til strålingens påvirkning i celler.

Denne rapporten er en norsk oversettelse av begrepsdefinisjoner for dosimetri, radioaktivitet og strålebiologi fra den internasjonale kommisjonen for stråleenheter og -målinger (ICRU). Kapitlet om strålebiologien omfatter noe mer, her blir nyere publikasjoner sitert. Begreper i rapporten omfatter bare skalare størrelser, og du finner slik ikke en fullstendig behandling av begrepene, men her finnes mulighet til videre lesning. Rapporten er forsøkt å være så presis som ICRU er i sine definisjoner på de utvalgte begrepene. I den elektroniske utgaven vil en finne lenker til noen sider som oppdateres etter hvert som ny forskning gir resultater om strålingens dosimetri, radioaktivitet og strålebiologi.

Innhold

1	Bakgrunn	5
2	Enhetene for ioniserende stråling	5
3	Fundamentale størrelser og enheter for ioniserende stråling	5
3.1	Den internasjonale kommisjonen for stråleenheter og -målinger (ICRU)	5
3.2	Radioaktivitet.	6
3.3	Radiometri	7
3.4	Vekselvirkningskoeffisienter	7
3.5	Dosimetri	9
4	Normaler	10
4.1	Normaler for enheten Gy	10
5	EURAMET TC-IR og CCRI.	11
6	Strålebiologi	12
6.1	Ioner, eksitasjoner og radikalfangere	12
6.2	Sporet av ioner og eksitasjoner i en celle	13
6.3	Absorbert dose og midlere linjalenergi bestemmer biologiske effekter	14
6.4	Klyngestørrelse og multiskalamodell.	15
7	Diskusjon	17
8	Referanser	18
9	Stikkordregister med sideangivelse	19

1 Bakgrunn

De fysiske begreper og måling av ioniserende stråling er viktig for å forstå og å bruke stråling trygt. I denne rapporten vil vi beskrive de spesielle enhetene for ioniserende stråling og størrelser for radioaktivitet, dosimetri og radiometri som alt er verktøy til å forstå ioniserende stråling og dens vekselvirkning med materie, samt strålebiologi. Det internasjonale målenettverket for ioniserende stråling vil også bli omtalt.

Ioniserende stråling og dens vekselvirkning er kilder til innovasjon og utvikling frembrakt i blant annet stråleterapi, røntgenavbildning og PET (positron emisjon tomografi). Den internasjonale kommisjonen for stråleenheter og -målinger (ICRU) går foran i denne utviklingen. Leter en i ICRUs referanser etter nordmenn som har deltatt i utviklingen av ioniserende strålings metrologi, finner en artikler av Henriksen^(1,2) og Baarli^(1,3). Onsager⁽⁴⁾ har i 1938 en artikkel som beskriver initial rekombinasjon av ioner, og Øverbø^(5,6) beskriver atomets formfaktorer. Arbeidene til Onsager og Øverbø er arbeider som fortsatt refereres.

2 Enhetene for ioniserende stråling

Måleenhetene vi har til å beskrive ioniserende stråling er vedtatt av Generalkonferansen for vekt og mål (CGPM). De spesielle enhetene for ioniserende stråling er becquerel (Bq), gray (Gy)⁽⁷⁾ og sievert (Sv)⁽⁸⁾. Disse ble vedtatt i 1975 og 1979 og er ikke endret siden. Bq er enheten for aktivitet og er lik invers av et sekund, Gy er enheten for absorbert dose og er lik J/kg, Sv er enheten for doseekvivalent i området strålevern og er også lik J/kg. Enhetene Bq og Gy ble innført for å gjøre det enklere for ikke-fysikere å bruke størrelsene og å senke risiko for feilbruk. Strålevernheten Sv ble innført for ikke å underestimere helserisiko fra ioniserende stråling. Sv tar hensyn til høyere risiko for noen typer stråling og kroppens mer strålefølsomme organer.

3 Fundamentale størrelser og enheter for ioniserende stråling

3.1 Den internasjonale kommisjonen for stråleenheter og -målinger (ICRU)

ICRU utgir anbefalinger for definisjoner og begreper innen ioniserende stråling. ICRU har en historie tilbake til 1925 og har som mål å utvikle internasjonale akseptable anbefalinger om:

1. Størrelser og enheter for stråling og radioaktivitet.
2. Egnede prosedyrer for måling og anvendelse av disse størrelsene i klinisk radiologi, stråleterapi og strålebiologi.
3. Nødvendige fysiske data i anvendelse av disse prosedyrene for å sikre lik bruk ved rapportering.

ICRU har siden 1950 publisert 6 rapporter med anbefalinger om størrelser og enheter for ioniserende stråling. Den vitenskapelige utvikling har påvirket forståelsen, og teksten er forenklet. Det er også klart at det har tatt svært lang tid å innføre absorbert dose. Denne ble introdusert i 1951, men fikk sin egen enhet, Gy, i 1975 og ble først innført i primærlaboratoriene på 90-tallet. Noen temaer fra siste gjennomgang av størrelser og enheter fra ICRU rapport 85⁽⁹⁾ fra 2011 vil bli omtalt her på ICRUs vis. Det starter med enkel tekstforklaring, så ligningen med beskrivelse av leddene i denne. Litt tekst fra ICRU er også tatt med i oversettelsen.

3.2 Radioaktivitet.

Radioaktivitet beskriver spontane omdanninger som uttrykker endringer av atomenes kjerne. I slike omdanninger frigjøres energi som stråling. Radioaktivitet er en tilfeldig prosess. Hele atomet er med i prosessen fordi kjerneomdanningene også kan påvirke atomskallets struktur og føre til utsendelse av elektroner, fotoner eller begge deler.

Atomene er oppdelt i nuklider. En *nuklide* er en gruppe av atomer som har et bestemt antall protoner og nøytroner i kjernen. Ustabile nuklider som omdannes til stabile eller ustabile datternuklider kalles *radionuklider*. Omdanningen resulterer i en annen nuklide eller i omdanning til en lavere energitilstand for samme nuklide.

Tabell 1 Atomdata⁽¹⁰⁾ og luftkerma-konstanten⁽¹¹⁾ for noen radionuklider, bare energier, $\delta > 20$ keV, er medregnet i $\Gamma_{20\text{keV}}$.

Radionuklide	Halveringstid $T_{1/2}$	Fotonenergi, E (MeV)	Luftkerma-konstanten, $\Gamma_{20\text{keV}}$ ($\mu\text{Gym}^2\text{GBq}^{-1}\text{h}^{-1}$)
¹⁸ F	1,8288 t	0,511	135,1
⁵⁷ Co	271,80 d	0,12206065	14,11
⁶⁰ Co	5,2711 år	1,173228 1,332492	309,0
⁶⁷ Ga	3,2613 d	0,093307	19,45
^{99m} Tc	6,0067 t	0,140511	14,10
¹³¹ I	8,0233 d	0,36449	52,20
¹³⁷ Cs	30,05 år	661,659	82,10
¹⁹² Ir	73,827 d	0,31650618	109,1
²⁰¹ Tl	3,0421 d	0,011785 0,07082	10,22
²⁴¹ Am	432,6 år	0,0595409	3,97

Størrelser som brukes til å beskrive radioaktivitet er *omdanningskonstanten*, *halveringstid*, *aktivitet* og *luftkerma-konstanten*.

Omdanningskonstanten, λ , for en radionuklide i en bestemt energitilstand er forholdet mellom $-dN/N$ og dt , der $-dN/N$ er midlere endring av brøkdelen i antall nuklider i den bestemte energitilstanden på grunn av spontan kjerneomdanning i tidsintervallet dt ; $\lambda = -dN/N/(dt)$. Enheten er s^{-1} .

Halveringstiden $T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda$ er den midlere tiden det tar for radionuklider i en bestemt energitilstand å avta til halvparten av det opprinnelige antall. Ved tid t vil antall radionuklider være $N = N_0 e^{-\lambda t}$, der N_0 er antall radionuklider ved $t=0$.

Aktiviteten, A , til en mengde av en radionuklide i en bestemt energitilstand ved en bestemt tid er forholdet mellom $-dN$ og dt , der dN er gjennomsnittlig endring i antallet nuklider i den bestemte energitilstanden på grunn av spontan kjerneomdanning i tidsintervallet dt ; $A = -dN/dt$. Enheten for aktivitet er Bq. A er også lik produktet av omdanningskonstanten, λ , og antall nuklider, N , for denne tilstanden; $A = \lambda N$.

Luftkerma-konstanten, Γ_δ , for en radionuklide som sender ut fotoner i luft er forholdet mellom \dot{K}_δ og A , der \dot{K}_δ er luftkermaratet (kerma definert under dosimetri) fra fotoner med energi større enn δ , i avstand l i vakuum fra en punktkilde av denne nukliden med aktivitet A . Luftkerma-konstanten har enhet $\text{m}^2\text{Jkg}^{-1}$, men kan også uttrykkes ved Gy og Bq som i tabell1 $\mu\text{Gym}^2\text{GBq}^{-1}\text{h}^{-1}$. Fotonene dannes ved gammastråling, karakteristisk røntgen eller intern bremsestråling.

Måling av *aktivitet* samordnes i arbeidsgruppen for radionuklider under den konsultative komiteen for ioniserende stråling (CCRI)⁽¹³⁾. På vegne av CCRI publiserer det internasjonale kontoret for vekt og mål

(BIPM) anbefalte data om radionuklider⁽¹⁰⁾. Websiden vedlikeholdes av det franske nasjonale laboratoriet Henri Becquerel (LNHB). Her finnes referanser til alle publikasjoner opp gjennom tidene til målinger på hver radionuklide. En rik natur å leve seg inn i. I tabell 1 er data for noen radionuklider gjengitt fra LNHB⁽¹⁰⁾ og Ninkovic et al⁽¹¹⁾. Bare fotonenergi med størst sannsynlighet er tatt med her.

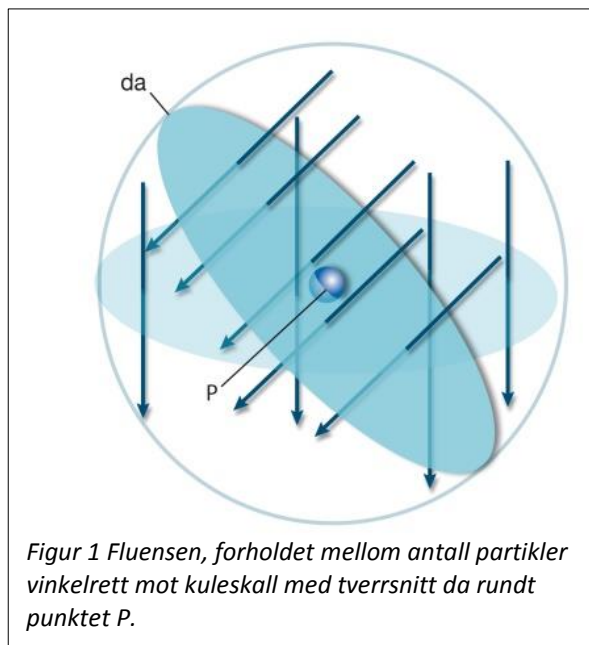
3.3 Radiometri

Radiometriske størrelser karakteriserer strålefelt i målinger, i undersøkelser og ved bestemmelse av effekter fra stråling. Bare noen av strålestørrelsene er gjengitt.

Det er to generelle størrelser for å beskrive et strålefelt: antallet partikler, N og stråleenergien, R . N er antallet av partikler som er utsendt, overført eller mottatt og er ubenevnt. R er energien (uten hvileenergi) til en partikkel som er utsendt, overført eller mottatt. Enheten er J eller eV. For et felt av partikler med energi E er stråleenergien, R , lik produktet NE , $R=NE$.

Fluensen, Φ , er forholdet mellom dN og da der dN er antall partikler som faller inn på en kule med tverrsnittsareal da rundt et punkt P, se figur 1. Planet da kan bevege seg fritt rundt P for å fange alle partikler vinkelrett på deres bevegelse og former kulen av det roterende planet da , $\Phi=dN/da$. Enhet er m^{-2} . For definisjon av virkningstverrsnittet trenger en den inverse fluensen, $1/\Phi$, som er forholdet mellom da og dN .

Energifluensen, Ψ , er forholdet mellom dR og da der dR er stråleenergien som faller inn mot en kule med tverrsnitt da , $\Psi=dR/da=dNE/da$. Enheten er Jm^{-2} .



Figur 1 Fluensen, forholdet mellom antall partikler vinkelrett mot kuleskall med tverrsnitt da rundt punktet P.

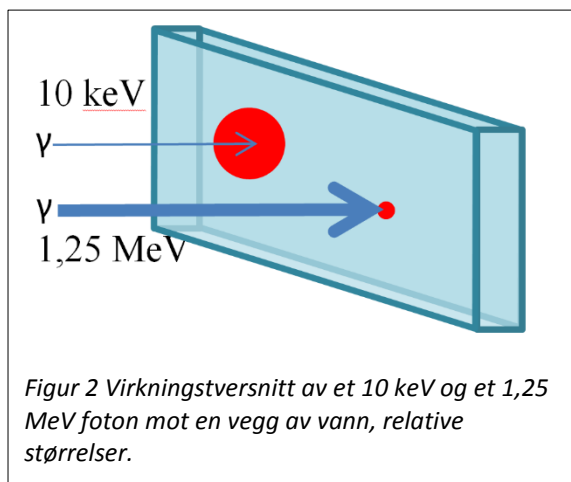
3.4 Vekselvirkningskoeffisienter

Stråling vekselvirker med materie i forskjellige prosesser. I en slik prosess vil en innkommende partikkel endre energi og/eller retning, og partikkelen kan bli absorbert. En vekselvirkning kan bli fulgt av utsending av en eller flere sekundære partikler. Sannsynligheten for slike prosesser karakteriseres med *vekselvirkningskoeffisienter*. Disse beskriver spesielle vekselvirkningsprosesser avhengig av strålingenes type og energi, og målets materiale. USAs nasjonale institutt for standarder og teknologi (NIST) har en hjemmeside med vekselvirkningskoeffisienter^(12,13).

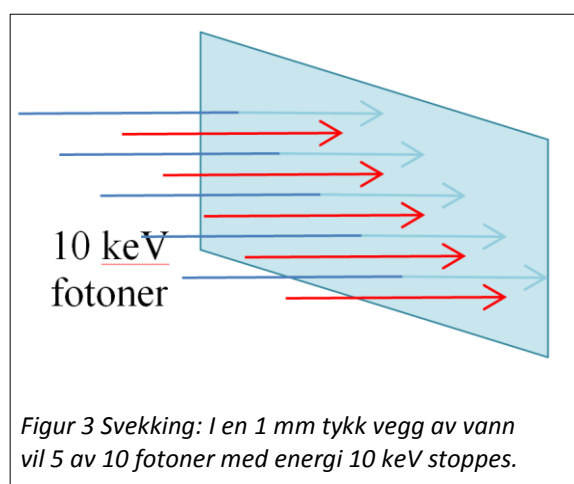
Den fundamentale vekselvirkningskoeffisienten er *virkningstverrsnittet*. Konseptet kan forstås ved at strålingen kan se et areal (virkningstverrsnitt) hvis det krysser igjennom et vekselvirkningscenter, og derved

gi anledning til en vekselvirkning. Virkningstverrsnittet beskriver strålingens natur, og kvantifisering av strålingen bygger på denne naturkonstanten.

Virkingstverrsnittet, σ , for en bestemt vekselvirkning produsert av en innkommende ladd eller uladd partikkel av en bestemt type og energi er forholdet mellom N og Φ , der N er gjennomsnittlig antall av slike vekselvirkninger per målentitet som følge av partikkelfluensen, Φ , $\sigma=N/\Phi$. Enheten er m^2 . Virkingstverrsnittet er antall vekselvirkninger ganger areal per innkommende partikkel. Dette er illustrert i figur 2 der fotoner med to energier skal krysse en vannvegg. Fotoner med lave energier ser store virkingstverrsnitt, mens fotoner med høye energier ser vesentlig mindre areal for vekselvirkning.



Massevekkingskoeffisienten, μ/ρ , til et materiale for uladde partikler av en gitt type og energi er forholdet mellom dN/N og ρdl , der dN/N er den midlere brøkdel av partikler som vekselvirker når det går gjennom en lengde dl i materialet med tetthet ρ , $\mu/\rho=(dN/N)/(\rho dl)$. Enheten er m^2kg^{-1} . Massevekkingskoeffisienten kan også uttrykkes som en funksjon av virkingstverrsnitt, σ , og N_A/M der N_A er Avogadros tall og M er den molare massen til målmaterialet, $\mu/\rho=(N_A/M)\sigma$. μ er den *lineære svekkingskoeffisienten* illustrert i figur 3. Enheten er m^{-1} .



Masseenergioverføringskoeffisienten, μ_{tr}/ρ , til et materiale for uladde partikler av en gitt type og energi er forholdet mellom dR_{tr}/R og ρdl , der dR_{tr} er den midlere energien som er overført til ladde partiklers kinetiske energi fra uladde partikler av den innkommende stråleenergien R som har gått en avstand dl i materialet med tetthet ρ , $\mu_{tr}/\rho=(dR_{tr}/R)/(\rho dl)$. Enheten er m^2kg^{-1} . En del g av den kinetiske energien som overføres til de ladde partiklene, blir i gjennomsnitt tapt til stråleprosesser (bremsestråling, annihilasjon og fluoessens) mens de ladde partiklene kommer til ro i materialet. Produktet av μ_{tr}/ρ og $(1-g)$ kalles masseenergiabsorpsjonskoeffisienten, μ_{en}/ρ , til materialet for uladde partikler, $\mu_{en}/\rho=\mu_{tr}/\rho(1-g)$.

Massestoppeevnen, S/ρ , til et materiale for ladde partikler av en bestemt type og med en bestemt energi er forholdet mellom dE og ρdl , der dE er gjennomsnittlig energitap av de ladde partiklene mens de går en avstand dl i materialet med tetthet ρ , $S/\rho=(dE)/(\rho dl)$. Enheten er m^2kg^{-1} .

Overført lineærenergi (LET) eller *elektronisk stoppeevne*, L_Δ , til et materiale for ladde partikler av en gitt type og energi er forholdet mellom dE_Δ og dl , der dE_Δ er den midlere energi som tapes fra ladde partikler på grunn av elektronisk vekselvirkning når det går en lengde dl , minus den midlere summen av den kinetiske energien utover Δ til alle frigjorte elektroner av den ladde partikkelen, $L_\Delta=dE_\Delta/dl$. Enheten er Jm^{-1} , men uttrykkes ofte i $keV\mu m^{-1}$. LET kan beskrive hvor tett ioniseringen er.

Den midlere energien som trengs i en gass til å lage et ionepar, W , er forholdet E på N , der N er midlere total frigjort ladning fra ladde partikler av begge tegn, dividert med elementærladningen, og E er den initiale kinetiske energien til en ladd partikkel som kommer inn i gassen, når energien blir fullstendig opptatt i gassen, $W=E/N$. Enheten er J eller eV. W for luft er fastsatt av CCRI til å være $33,97\pm 0,07$ eV for ^{60}Co stråling. Burns⁽¹⁵⁾ har bekreftet verdien i 2014.

3.5 Dosimetri

Dosimetrisk størrelse er karakterisert ved stråleenergi som enten blir overført eller absorbert per masse.

Energideponering, ϵ_i , er energien deponert i en enkel vekselvirkning, i , $\epsilon_i = \epsilon_{in} - \epsilon_{out} + Q$ der ϵ_{in} er energien til den innkommende partikkelen (uten hvileenergi), ϵ_{out} er summen av energiene til alle ladde og uladde ioniserende partikler som forlater vekselvirkningen (uten hvileenergi) og Q er endringen i hvileenergien til nuklidene og alle elementærpartiklene involvert i vekselvirkningen. Enheten er J eller eV.

Tildeltenergi, ϵ , til materialet i et bestemt volum er summen av all energideponering i volumet, $\epsilon = \sum \epsilon_i$, der summeringen skal gjøres over alle energideponeringene, ϵ_i , i volumet. Enhet er J eller eV. ϵ er en tilfeldig størrelse.

Midlere tildeltenergi, $\bar{\epsilon}$, til materiale i et gitt volum er lik den midlere stråleenergien, R_{in} , av innkommende ladde og uladde ioniserende partikler i volumet minus den midlere stråleenergien, R_{out} , av ladde og uladde ioniserende partikler som forlater volumet pluss den midlere summen, ΣQ , av alle forandringer av hvileenergi til nuklider og elementærpartikler i volumet, $\bar{\epsilon} = R_{in} - R_{out} + \Sigma Q$.

Linjalenergi, y er forholdet mellom ϵ_s og \bar{T} der ϵ_s er tildelt energi til materialet i et gitt volum ved en enkel energideponering og \bar{T} er midlere kordelengde i det volumet, $y = \epsilon_s / \bar{T}$. Enhet er Jm^{-1} . y er en tilfeldig variabel og uttrykkes ofte i $keV\mu m^{-1}$. Den midlere kordelengde er en tilfeldig orientert korde i volumet. For en kule er $\bar{T} 2/3$ av kulens diameter. \bar{y}_D , middelverdien til linjalenergis dosefordeling, er $\int y d(y) dy$, der $d(y)$ er den deriverte av dosen, $D(y)$, med hensyn på y .



Figur 4 Typiske ionisasjonskamre til å måle kerma og absorbert dose

Absorbert dose, D , er forholdet mellom $d\bar{\epsilon}$ og dm der $d\bar{\epsilon}$ er den midlere tildelte energi av ioniserende stråling til materiale med masse dm , $D = d\bar{\epsilon}/dm$. Enheten er Gy.

Kerma, K , for ioniserende uladde partikler er forholdet mellom dE_{tr} og dm der dE_{tr} er den midlere summen av de kinetiske energiene til alle frigjorte ladde partikler i en masse, dm , til et materiale (luft, vann) fra den innkommende uladde partikkel, $K = dE_{tr}/dm$. Enheten er Gy. For en fluens, Φ , av uladde partikler med energi, E , er kerma, K , i et bestemt materiale $K = \Phi E \mu_{tr}/\rho = \Psi \mu_{tr}/\rho$, der μ_{tr}/ρ er masseenergioverføringskoeffisienten til materialet for disse partiklene. Kerma er forkortelse for: Kinetic energy relased per

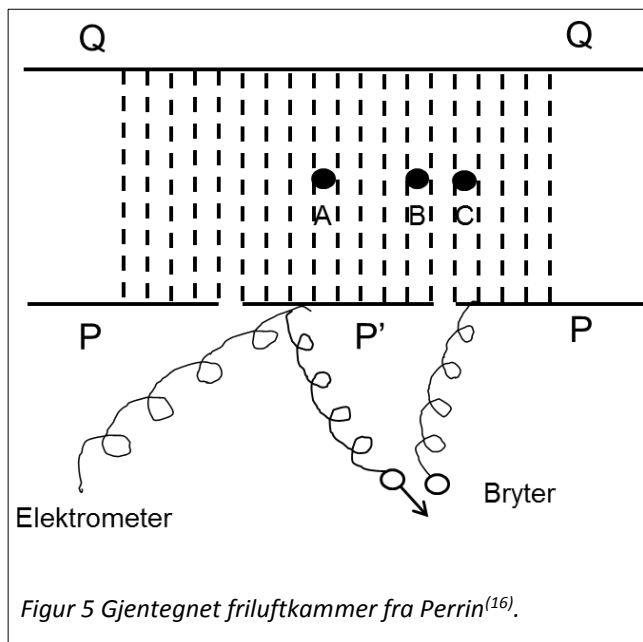
unit mass. Figur 4 viser noen ionisasjonskamre for måling av absorbert dose og kerma.

Eksposisjon, X , er forholdet mellom dq og dm , der dq er den absolutte verdi av den midlere totalt produserte ladning av ioner av et tegn (+ eller -) når alle frigjorte eller dannede elektroner og positroner av innkommende fotoner mot en masse dm av tørr luft er fullstendig stoppet i den tørre lufta, $X = dq/dm$. Enheten er Ckg^{-1} . I 1962 ble enheten røntgen, R, definert som $R = 2,58 \cdot 10^{-4} Ckg^{-1}$. Enheten for eksposisjon er Ckg^{-1} og R ble tatt ut av bruk i 1975. For fotoner med energi under ca. 1 MeV (som fotoner fra ^{60}Co) er $X \approx (e/W)K_{air}(1-g)$, der K_{air} er luftkerma til den tørre lufta fra de primære fotonene.

4 Normaler

Normaler er en gjenstand eller målesystem til å realisere en måleenhet til en målestørrelse. Bare enheten Gy blir omtalt her.

4.1 Normaler for enheten Gy



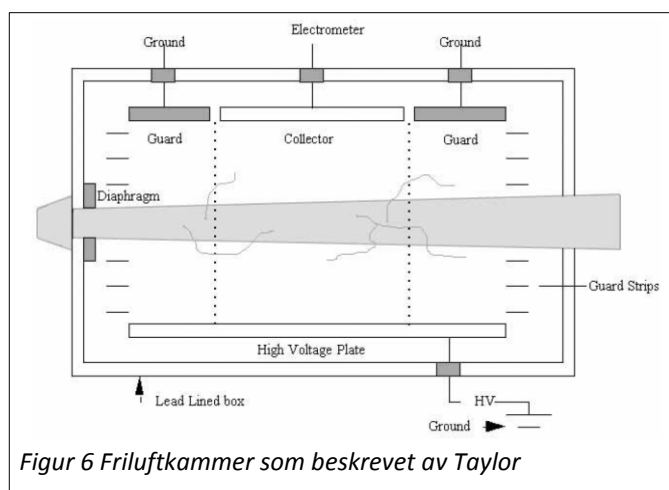
Friluftkammer ble presentert som instrument til å måle ioniserende stråling i november 1896 av

Perrin⁽¹⁶⁾. Den tidlige utviklingen foregikk i Sorbonne, Paris. I figur 5 sees de kollimerte røntgenstrålene A, B og C parallelt inn mot kondensatorens to parallelle plater.

Den ene platen, Q, har påsatt en spenning og den andre, P, er jordet og har en isolert kollektor, P'. Elektrometeret nullstilles med bryteren. Perrin har rapportert at en røntgenstråle i A gir en strøm, det samme i B, men strømmen er nær null i C. Når en skal måle må ikke strålen komme nær platene Q og P. Perrin kunne fra målingene konkludere med at mengden av røntgenstråler: 1) er proporsjonal med strømmen som måles, 2) avtar med kvadratet av avstanden til kilden 3) er avhengig av gassen i kondensatoren og dens miljø (trykk

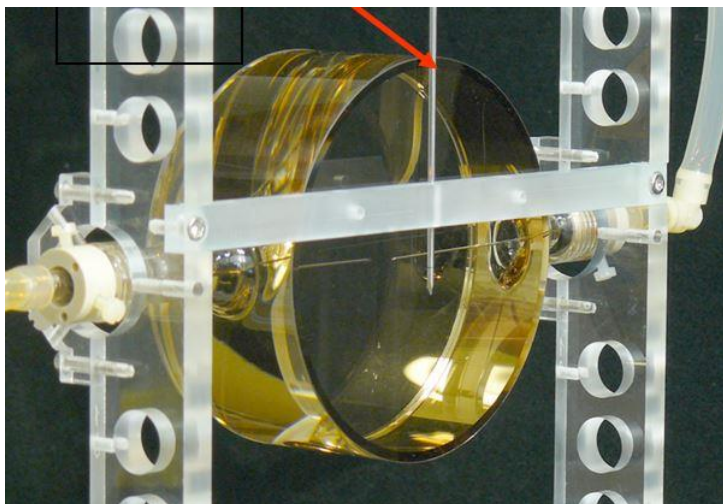
og temperatur) og 4) strømmen kommer umiddelbart. På 1920-tallet bygget Sievert⁽¹⁷⁾ de første dosimetre til å måle dybdedoser i vann og Taylor⁽¹⁸⁾ startet diskusjonen av et friluft-ionisasjonskammer. I 1972 bygget Aird⁽¹⁹⁾ det moderne Farmerkammeret. Dette brukes i dag i all dosimetri i medisinsk strålebruk.

En prinsipp tegning av et friluftkammer er vist i figur 6. Slike ble bygget på Statens fysiske kontrollaboratorium (opprettet i 1939, nå Statens strålevern). Laboratoriets oppgave var å studere strålingens fysiske egenskaper, og spesielt kontrollere mengde radium og stråling fra røntgenrør.



Brødrene Pierre og Jacques Curie demonstrerte i 1880 den piezoelektriske effekten som Becquerel anvendte i sine målinger da han oppdaget radioaktiviteten i 1896. Marie Sklodowska og Pierre Curie forbedret senere Kelvins kvadrant-elektrometer og bestemte strålemengden fra radionuklidene ved å balansere strømmen fra en vektbasert piezoelektrisk kilde mot strømmen fra ionekammeret. En

kopi av dette arbeidet er utført av Molinié og Boudia⁽²⁰⁾. De konkluderte med at i 30 år var Marie Sklodowska Curie alene om måling av aktivitet til radionuklider. Atom- og kjernefysikk erstattet studiet av radioaktivitet ved universitetene.



Figur 7 Glassbeholder med to vertikale termistorer plasseres i et 30x30x30 cm³ vannfantom.

Kalorimeteret⁽²¹⁾ fikk sitt gjennombrudd i 1990-åra og er blitt det viktigste måleinstrumentet til å måle absorbert dose til vann i forskjellige typer av strålefelt. Det er to hovedtyper kalorimetre, vannkalorimeteret og grafittkalorimeter. Vannkalorimeteret er vist i figur 7, det kan måle små temperaturøkninger i stillestående vann fordi den termiske spredningsevnen i vann er lav. Temperaturfordelingen etter bestråling blir værende på plass og temperaturøkningen i et punkt kan måles med høy nøyaktighet⁽²¹⁾. I et vannkalorimeter kan en måle temperaturøkningen, ΔT , i et punkt og ganget med den spesifikke varmekapasiteten for vann ved konstant

trykk, $c_{W,P}$, leder dette umiddelbart til absorbert dose til vann i punktet, $D_W = c_{W,P} \Delta T$. $c_{W,P}$ er bestemt til 4206.8 Jkg⁻¹K⁻¹. Bruken av vannkalorimeteret var før 1990-tallet praktisk begrenset fordi varmedefekten i bestrålt vann var ukjent og usikkerheten i målingene ble for stor. Det kanadiske dosimetrlaboratoriet NRC viste på 1990-tallet at denne effekten er forårsaket av kjemiske reaksjoner i vann. Organiske urenheter i vann kan fungere som «scavengers», på norsk kalles de radikalfangere. Hydroxyl-radikaler (OH•) som dannes fra strålingens radiolyse kan fanges av radikalfangerne og føre til at energibalansen blir forstyrret av varmedefekten som ikke er null. En metode til å redusere varmedefekten er å senke temperaturen til 4 °C, ha svært godt rensset vann og sende H₂ eller N₂ gjennom vannet like før bestråling. Mange store dosimetrlaboratorier bestemmer absorbert dose til vann etter denne metoden.

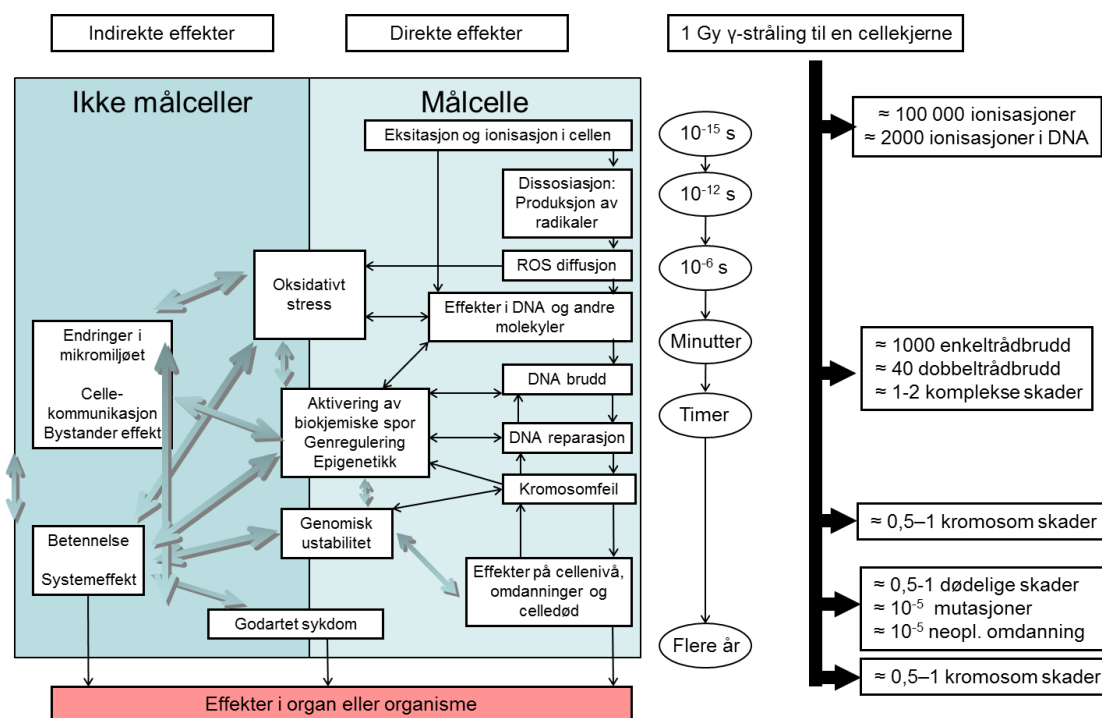
Måling med friluftkammer og kalorimeter er i dag de to dominerende prinsippene innen dosimetrien. I CCRIs jubileumsartikler om dosimetri⁽²²⁾ kan en lese om dette. Normaler ved kontoret for vekt og mål (BIPM) i Paris bestemmer referanseverdien for størrelser med enhetene Bq, Gy og Sv.

5 EURAMET TC-IR og CCRI.

EURAMET er en europeisk organisasjon for nasjonale kalibreringslaboratorier med 10 tekniske komiteer (TC), der ioniserende stråling (IR) er én. Fra 2009 til 2013 ledet forfatteren TC-IR og kom tett på det internasjonale metrologinettverket. Europa har på verdensbasis en dominerende rolle innen ioniserende strålings metrologi og gir viktige bidrag til utvikling av begreper og målemetoder. Ved siden av å drive kalibreringslaboratorier er BIPM knutepunkt for diskusjoner om målemetoder, resultater og strategisk arbeid. Arbeidet organiseres i den konsultative komiteen for ioniserende stråling CCRI⁽¹³⁾ som har tre undergrupper; dosimetri, radionuklider og nøytroner. Etter CCRIs 50-årsjubileum i 2009 ble det publisert tre spesialnummer i *Metrologia* om stråledosimetri⁽²²⁾, radionuklidemetrologi⁽²³⁾ og nøytronmetrologi⁽²⁴⁾. Disse tre spesialnumrene er tilgjengelig på BIPMs hjemmeside⁽¹³⁾.

6 Strålebiologi

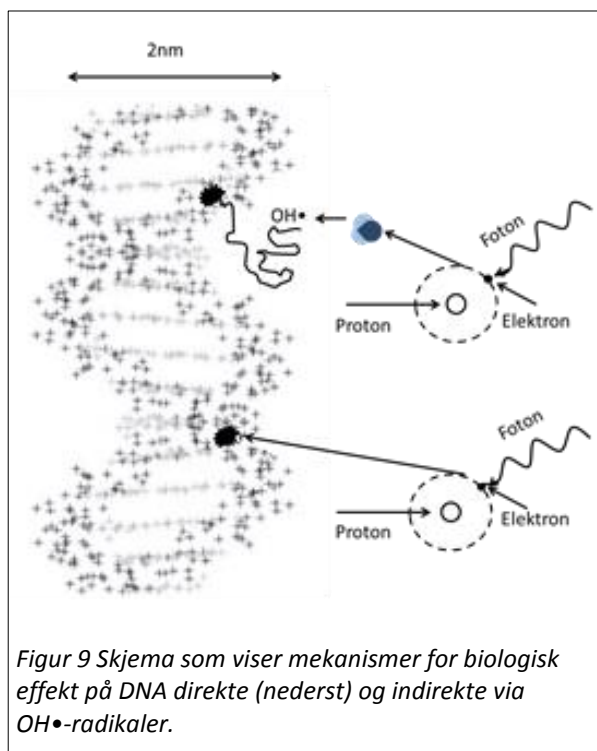
Strålebiologisk effekt kan vanligvis beskrives som en stokastisk (tilfeldig) prosess i mange steg, og som spenner over mange dimensjoner i tid (fra 10^{-15} s til år) og rom fra 1nm til flere $\mu\text{m}^{(25)}$. Prosessene er illustrert i figur 8. Stråling i celler lager *eksitasjoner* og *ionisasjoner* i DNA, vann og andre biologisk viktige molekyler. Figur 10 illustrerer et spor med eksitasjoner og ionisasjoner i vann fra et 10 keV elektron. Ioniserende stråling vekselvirker inne i cellen. Strålingen danner mange eksitasjoner og ionisasjoner langs spor som fører til endringer av biokjemiske strukturer i cellene. Endringene i cellekjernens DNA kan være enkel- eller dobbel-trådbrudd, og brudd i base og komplekse biologiske molekyler.



Figur 8 En **tidsskala** over cellens effekter fra ioniserende stråling som viser den fysiske vekselvirkning ved ionisasjon og eksitasjon, produksjon av radikaler (reaktive oksygenforbindelser) og de påfølgende biologiske effekter i cellen⁽²⁵⁾. En forutsetning i tegningen er at DNA utgjør 2 % og at resten er vann.

6.1 Ioner, eksitasjoner og radikalfangere

Strålingen ioniserer vannet i en rekke ioner: H^+ - og OH^- -ioner, frie elektroner og positivt ladde molekyler med hydrogen og oksygen atomer. Strålingen eksiterer også, både elektroner, atomer og molekyler. Denne delen av strålebiologien foregår etter den fysiske vekselvirkningen som skjer i tidsrommet 10^{-15} til 10^{-12} s. I denne tiden faller substratet til ro og former reaktive kjemiske stoffer og det blir termisk likevekt. De fleste ioniserte molekyler deler seg i et pluss og et minus ion, mens eksiterte atomer og molekyler faller til ro termisk, ioniserer eller de kan også dele seg og ved dette danne frie radikaler og andre stoffer. *Ioner rekombinerer raskere enn eksitasjoner*, eksitasjoner kan derfor diffundere lenger bort fra sporet for vekselvirkning og er opphav til flere biokjemiske effekter enn ioner. De stoffene som er høyt reaktive diffunderer eller vekselvirker, og hvis de når DNA molekylet kan de endre dette. DNA-endringen kan så utvikle seg videre i to forskjellige retninger, enten korrekt eller feil reparasjon av skaden.



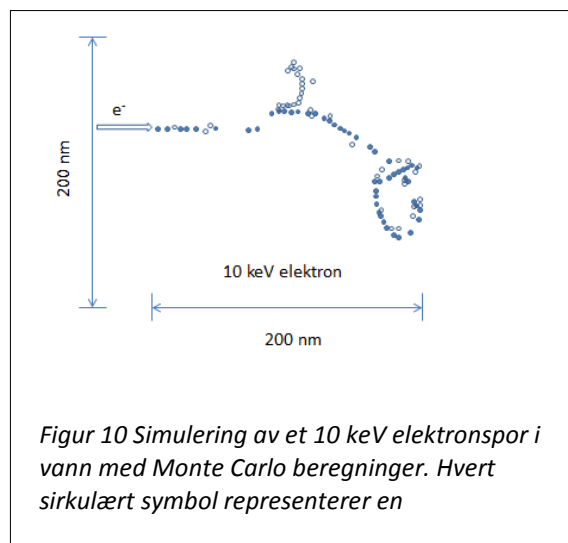
Et paradoks i forståelsen av strålebiologien er at kunnskapen om den avtar når prosessen sprer seg i tid og rom. Faktum er at det er lettere å beskrive det som skjer innen 10^{-15} s enn å forstå det som skjer i de følgende minutter og timer. Da overtar biologiske fenomener og blir dominerende, og kompleksiteten øker dramatisk. Historisk er DNA i cellens kjerne sett på som stedet for biologiske effekter fra ioniserende stråling. Dette er den direkte skaden av DNA når energien avsettes i DNAet. Dette er tegnet nederst i figur 9. Når energien avsettes i vannet som omgir DNA dannes ioner eller eksitasjoner av vannmolekylet. Når disse faller til ro kan de danne ioner, frie radikaler eller kjemiske stoffer som kan angripe DNA. Den mest reaktive oksygenforbindelsen er OH•-radikalet som er vist øverst i figur 9. Andre reaktive oksygenforbindelser er det hydrerte elektronet og H_2O_2 og ionene H_3O^+ og OH^- . Felles for disse funksjonene er det fysiske opphavet i spor av ioner og eksitasjoner som er simulert i figur 10. Ionene er raskest til å vekselvirke innenfor en tid på 10^{-9} s og er derfor begrenset i rom. Eksitasjonene kan vare i

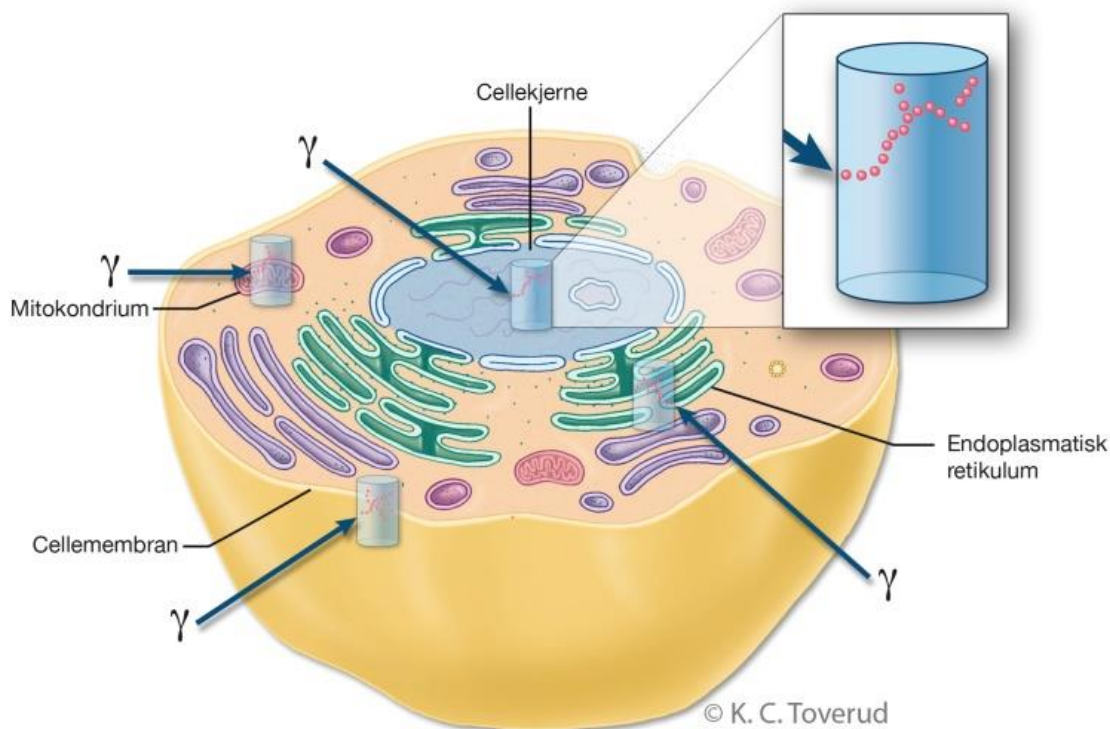
10^{-7} til 10^{-6} s og kan reise lenger og gjøre mer skade. Spesielt ser det ut til at OH•-radikalet reagerer hundre ganger mer med DNA enn andre stoffer.

Scavenger her kalt radikalfangere, er molekyler som kan reagere med frie radikaler og fjerne effekten av dem. Radikalfangere har en kjemisk form som ligner på DNA og kan derfor påvirke reaksjonsraten til de frie radikaler som OH•-radikalet. På denne måten kan radikalfangere absorbere en del av den kjemiske påvirkningen som strålingen lager, og redusere frie radikalers levetid og hvor langt de diffunderer. Radikalfangerkapasiteten (scavenger capacity, SC) er det inverse av midlere levetid til de frie radikaler, $\tau=1/SC$. τ settes lik den midlere levetid til OH•-radikalet fordi det dominerer over andre frie radikaler.

6.2 Sporet av ioner og eksitasjoner i en celle

Sporet av et 10 keV elektron som ioniserer har en bredde på 200 nm som vist i figur 10. Elektronet står for en stor del av energideponeringen, også som sekundærpartikkel fra andre primære partikler. Sporet fra et 15 MeV karbonion strekker seg til 5 μ m. Andre energier og typer av partikler vil ha andre tykkelser på sporet. DNA finnes i cellekjernen og er viklet opp ved hjelp av kromatinfibre. Tykkelsen til kromatinfiberet er ca. 25 nm som er vesentlig mindre enn sporene fra ioniseringer og eksitasjoner som har en bredde på 200 nm eller mer. Av denne grunn kan en tenke at variasjonene i ionisasjonene kan påvirke den biologiske effektiviteten, som er avhengig av stedet inne i ionisasjonssporet. Derfor er strukturen til sporene viktige for å bestemme strålekvaliteten og strålingens evne til å lage alvorlige biologiske skader. Figur 11 viser hvordan sekundærelektron fra gammastråling kan lage spor av ionisasjoner i de fire mest følsomme deler av cellen.





Figur 9 Klyngen (1 nm sylinder) viser sekundærelektroner fra fotoner (gammastråling betegnet i figuren med γ) som vekselvirker i cellens fire mest følsomme områder: Cellekjernen, mitokondriet, endoplasmatisk retikulum og cellemembran.

6.3 Absorbert dose og midlere linjalenergi bestemmer biologiske effekter

Absorbert dose til vann anbefales brukt til å beskrive strålingens effekter i cellen. Men cellen er inhomogen og har i tillegg til vann (H og O) også atomer som C, N, Na, Cl og Ca. Molekyler forskjellig fra vann påvirker dosefordelingen og biologisk effekt i cellen. Kromatinfibrene (25 nm) er små i forhold til de «store» sporene fra ioniseringene (200 nm – 20 μ m), og i tillegg er energien deponert svært inhomogent ved små doser. Vann er brukt som medium for beregning av dosen. Vann er dominerende i cellen med hele 98 %, se figur 8, men på grunn av at cellen og spesielt DNA har tyngre atomer er det vist at sannsynligheten for dobbetrådbrudd i et materiale med DNA er 50 % høyere enn i flytende vann⁽²⁸⁾.

I mikrodosimetrien og nanodosimetrien er linjalenergi brukt for å vise forskjellig biologisk effektivitet avhengig av stråletypen (røntgenstråling, gammastråling fra ^{60}Co , protoner, nøytroner eller lette ioner som ^{12}C) og partiklenes energi. Biologisk effektivitet (BE) i stråleterapi kan forklares med lineærkvadratiske (LQ) relasjoner og relativ biologisk effektivitet (RBE). I LQ-modellen er $BE = \alpha d + \beta d^2$ der d er fraksjoner av absorbert dose D levert i n fraksjoner, og α og β er fallet i overlevelseskurven til bestrålte celler, henholdsvis initialt og mot slutten. Lindborg et al.⁽²⁶⁾ skriver om ligningen til $BE = \alpha D [1 + d/\alpha/\beta]$. I stråleterapi med høyenergi fotoner og elektroner er $\alpha/\beta \approx 10$ Gy for vev tidlig i en behandlingsserie. Typisk fraksjonsdose er 2 Gy, andre ledd i hakeparentesen bidrar med 20 % til den biologiske effekten. Andre ledd blir lite når strålefeltet består av nøytroner, protoner og andre tungt ioniserende partikler. Ved introduksjon av disse partiklene i stråleterapien er det behov for å finne den biologiske effektiviteten for disse. Stråleterapi med fotoner og elektroner har over mange ti-år gitt god erfaring med biologiske effekter. Når denne erfaringen overføres til dosen fra tyngre ioner, D_{ion} , anbefaler ICRU/IAEA⁽²⁷⁾ en vektfaktor, $W_{\text{isoE}} = D_{\gamma}/D_{\text{ion}}$, der D_{γ} er dose fra ^{60}Co γ -stråler eller fotoner 2-30 MeV.

Lindborg beregner $W_{\text{calc}} = \bar{y}_{D_{\gamma}}/\bar{y}_{D_{\text{ion}}}$ for røntgenstråling, og $W_{\text{calc}} = \bar{y}_{D_{\text{ion}}}/1,2\bar{y}_{D_{\gamma}}$ for andre tyngre partikler. $\bar{y}_{D_{\text{ion}}}$ er midlere linealenergi med hensyn på dose for tunge ioner. Resultatet er angitt i tabell 2. I klinisk dosimetri er W_{isoE} anbefalt brukt.

Tabell 2 Strålebiologiske vekt faktorer fra litteratur og beregnet av Lindborg et al ⁽²⁶⁾

Strålekvalitet	W_{isoE}	W_{calc}
Røntgenstråler/ ⁶⁰ Co γ	1,25	1,2
Protoner (175 MeV) / ⁶⁰ Co γ (SOBP ved 5 cm)	1,1	1,1
Karbonioner ¹² C/ ⁶⁰ Co γ (senter av SOBP)	2,4	1,8
Karbonioner ¹² C/ ⁶⁰ Co γ (dypeste delen av SOBP)	3,0	3,0
nøytroner/ ⁶⁰ Co γ	3,2	3,1

6.4 Klyngestørrelse og multiskalamodell.

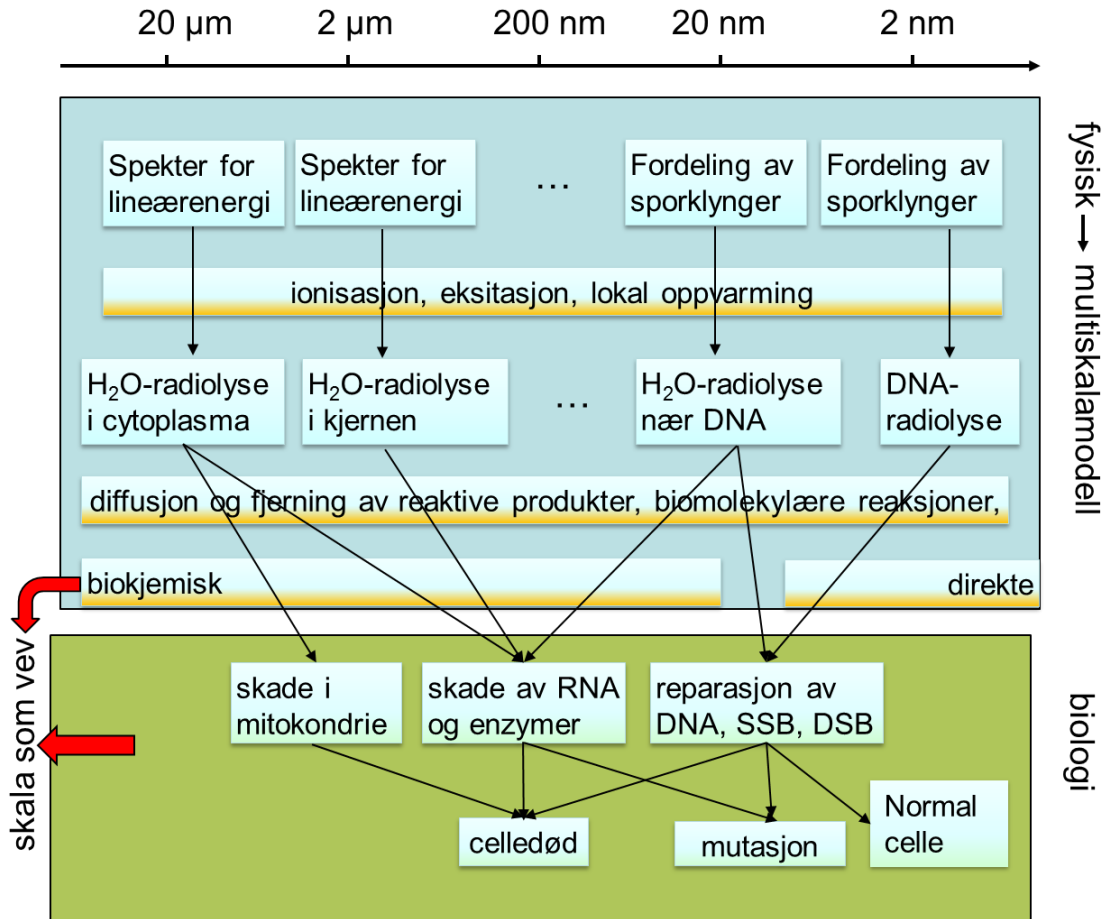
Palmans⁽²⁸⁾ har innen nanodosimetrien foreslått en *klyngestørrelse*, v , (cluster size) som er antallet av produserte ionisasjoner i et målvolum på størrelse med en nanometer. Nanodosimetri er en utvikling av mikrodosimetrien mot mindre lengder, og er en teoretisk tilnærming basert i målbare størrelser. Antallet produserte ionisasjoner gjelder for et enkelt partikkelspor, og ionisasjoner fra både primære og sekundære partikler innenfor volumet telles med. Det eksisterer bare tre anlegg for nanometerdosimetri, Jet Counter (Narodowe Centrum Badån Jadrowych, Polen), StarTrack (Legnaro National Laboratories, Italia) og Ion Counter (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Tyskland). Resultater fra forsøk ved disse har stor nytte av Monte Carlo beregninger, og de programmene som er spesiallaget for dette er PARTRACK, KURBUC, PITS04 og Geant4-DNA. Palmans⁽²⁸⁾ har karakterisert disse programmene i en tabell.

Klyngestørrelse kan brukes som parameter for å beskrive fordeling av ionisasjoner i partikkelspor. Tre nanodosimetrisk størrelser knyttet til klyngestørrelse er definerte her:

- P_v , er sannsynlighetsfordelingen av klyngestørrelser,
- F_k , er den kumulative sannsynlighetsfordelingen av klyngestørrelser med k eller flere ionisasjoner i klyngen, $F_k = \sum P_v$ og
- M_k , er det k -te statiske momentet til P_v , $M_k = \sum v^k P_v$, og kalles også midlere klyngestørrelse.

Det er vist⁽²⁸⁾ at om en plotter F_3/M_1 som funksjon av M_1 vil kurven overlappe eksperimentelle målepunkter med protoner og ¹²C-ioner der RBE_{10} er plottet mot M_1 . RBE_{10} er den strålebiologiske effekten ved 10 % overlevelse av V79 celler som er eksponert for protoner og ¹²C-ioner.

Palmans et al⁽²⁸⁾ foreslår også en multiskalamodell som spenner over rom (20 μm til 2 nm) og tid. Denne modellen er gjentegnet i figur 12. I boksen øverst beskrives de fysiske prosessene. Punktene (...) indikerer kontinuerlige fysiske og kjemiske prosesser ved flere forskjellige lengder. De røde pilene viser at det er andre skalanivåer med prosesser som enda ikke er med i modellen. I den nederste boksen vises forskjellige biologiske effekter.



Figur 10 **Multiskalamodell** for strålefysiske og -biologiske prosesser. Øverst i den blå figuren de fysiske prosesser med den kjemiske radiolyse. I den grønne delen skjer de biologiske prosessene. Skalaen fra 20 μm ned til 2 nm illustrerer strålespors tykkelse i den fysiske delen, typer av radiolyse og cellens deler som skades eller repareres.

7 Diskusjon

I forskning på strålingens virkning på mennesker og annet liv benyttes relativ biologisk effektivitet (RBE) for å sammenligne virkning av forskjellige stråletyper og energier. Nanodosimetri avløser nå mikrodosimetri i forskningen for å søke mer kunnskap om biologiske effekter. I nanodosimetri foreslås det nå nye dosimetriske målestørrelser som mål på ulike effekter avhengig av strålekvalitet eller type og energi for partiklene.

Absorbert dose til vann anbefales fortsatt til å beskrive effekter i cellen. Nanodosimetriens nye størrelser vil åpne nye måter å forklare prosesser i cellen ved bestråling. En forutsetning for god forståelse av ioniserende stråling er å holde seg til ICRUs begreper med de definisjonene som er gitt her. Dette er spesielt viktig for dosimetri tilknyttet strålebiologi for å unngå misforståelser og gi en effektiv formidling av forskningsresultater på området. Stråleterapien har benyttet absorbert dose til vann i doseringen. Dette fungerer godt og har vært en forutsetning for stråleterapiens behandlingssuksess av kreft med hjelp av fotoner og elektroner. Med protoner trengs bedre vekt faktorer for å beskrive biologisk effektivitet. ICRU arbeider med definisjoner for vekt faktorer og å finne verdiene til disse. Det gjenstår å se om ICRU i dette arbeide foreslår en ny størrelse for dosering i stråleterapi.

8 Referanser

1. Henriksen T, Baarli J. The effective atomic number. *Radiation Research* 1957; 6(4): 415-423.
2. Henriksen T. A scintillation dosimeter for 31 MeV betatron radiation. *Acta Radiologica* 1958; 49(5): 377-381.
3. Baarli J. An experimental study of gamma-ray backscattering using scintillation gamma-ray spectroscopy. *Arkiv for Matematik og Naturvitenskap* 1961. Bd LV, nr. 8: 121.
4. Onsager L. Initial recombination of ions. *Physical Review* 1938; 54(8): 554-557.
5. Øverbø I. Atomic Form Factors for Large Momentum Transfers, *Nuovo Cim. B* **40**, (1977) 330-338.
6. Øverbø I. Large-q Form Factors for Light Atoms, *Phys. Scripta* **17**, (1978) 547-548.
7. Terrien J. News from the Bureau International des Poids et Mesures. *Metrologia* 1975; 11(4): 179-183.
8. Giacomo P. News from the BIPM. *Metrologia* 1980; 16(1): 55-61.
9. International Commission on radiation units and measurements. *Fundamental quantities and units for ionizing radiation (revised)*. ICRU Report 85a. Oxford: Oxford University Press, 2011.
10. Laboratoire National Henri Becquerel. Recommended data. http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
11. Ninkovic J MM, Raicevic JJ, Adrovic F. Air kerma rate constants for gamma emitters used most often in practice. *Radiation Protection Dosimetry* 2005; 115(1-4): 247-250.
12. Hubbell JH, Seltzer SM. Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z =1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>
13. Consultative Committee for Ionizing Radiation. <http://www.bipm.org/en/committees/cc/ccri/>
14. Berger MJ et al. Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions. <http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm>
15. Burns DT et al. Use of the BIPM calorimetric and ionometric standards in megavoltage photon beams to determine W_{air} and I_c . *Physics in Medicine and Biology* 2014; 59(6): 1353-1365.
16. Perrin J. Rôle du dielectrique dans la decharge par rayons de röntgen. *C.R. Hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 1896; 123: 351-354.
17. Sievert RM. Eine einfache, zuverlässige Vorrichtung zum Messen von Tiefendosen. *Acta Radiologica* 1926; 5(5): 468-470.
18. Taylor LS. The precise measurement of x-ray dosage. Read before the Radiological Society of North America, Dec 5 1928. *Bureau of Standards Journal of Research* 1929; 2(4): 771-785.
19. Aird EGA, Farmer FT. The design of a thimble chamber for the Farmer dosimeter. *Physics in Medicine and Biology* 1972; 17(2): 169-174.
20. Molinié P, Boudia S. Mastering picocoulombs in the 1890s: The Curies' quartz–electrometer instrumentation, and how it shaped early radioactivity history. *Journal of Electrostatics* 2009; 67(2-3): 524–530.
21. Seuntjens J, Duane S. Photon absorbed dose standards. *Metrologia* 2009; 46(2): 39–58.
22. Special issue: Radiation dosimetry. *Metrologia* 2009; 46(2).
23. Special issue: Radionuclide metrology. *Metrologia* 2007; 44(4).
24. Neutron metrology. *Metrologia* 2011; 48(6).
25. Alloni et al. Early events in radiation-induced biological effects. In: Brahme A (ed). *Comprehensive biomedical physics. Vol. 7: Radiation biology and radiation safety*. Oxford: Elsevier, 2014: 1-22.
26. Lennart L et al. Nanodosimetry and RBE values in radiotherapy. *Radiation Protection Dosimetry*; 2015 May 6. pii: ncv196. [Epub ahead of print].
27. International Atomic Energy Agency. *Relative biological effectiveness in ion beam therapy. Technical report series, TRS 461*. Vienna 2008.
28. H Palmans et al. Future development of biologically relevant dosimetry. *British Journal of Radiology*, 2015; 88(1045): 20140392.

Stikkordregister med sideangivelse

<i>Absorbert dose</i>	9	<i>Kerma</i>	9
<i>Aktiviteten</i>	6	<i>Linjalenergi</i>	9
becquerel (Bq).....	5	<i>Luftkerma-konstanten</i>	6
biologiske effektivitet.....	14	Masseenergioverføringskoeffisienten	8
BIPM	11	<i>Massestoppeevnen</i>	8
CCRI	7	<i>Massestøkkingskoeffisienten</i>	8
<i>Den midlere energien som trengs i en gass til å lage et ionepar, W</i>	8	<i>Midlere tildeltenergi</i>	9
<i>Eksposisjon</i>	9	Multiskalamodell	16
<i>Energideponering</i>	9	Normaler.....	10
<i>Energifluensen</i>	7	<i>Omdanningskonstanten</i>	6
EURAMET	11	<i>Overført lineærenergi (LET)</i>	8
<i>Fluensen</i>	7	<i>Radioaktivitet</i>	6
Friluftkammer	10	RBE.....	14
Generalkonferansen for vekt og mål (CGPM)	5	<i>Scavenger</i>	13
gray (Gy)	5	sievert (Sv)	5
<i>Halveringstiden</i>	6	Strålebiologiske vektfaktorer.....	15
ICRU	5	<i>Tildeltenergi</i>	9
Kalorimeteret	11	<i>vekselvirknings-koeffisienter</i>	7
		<i>Virkningstverrsnittet</i>	8



Statens strålevern
Norwegian Radiation Protection Authority