

Strålingsdosimetri med ESR-spektroskopi

Eli Olaug Hole *

ESR-dosimetri for måling av ioniserende stråling finner stadig nye bruksområder. Metoden baserer seg på å utnytte elektronspinn-resonans (ESR) for å detektere stabile strålingsinduserte radikaler. Innenfor gitte grenser er mengden av radikaler proporsjonal med stråledosen. Metoden kan benyttes både til industriell og medisinsk doseovervåking, til katastrofedosimetri, datering, og til deteksjon av bestrålte matvarer.

Ioniserende stråling

Røntgenstråling og naturlig radioaktivitet er i løpet av de 100 år som er gått siden deres oppdagelse, blitt viktige faktorer innen både forskning, industri, medisin og i dagliglivet.^(1,2)

Siden mengden av stråling (*stråledosen*) som skal til for å oppnå en gitt effekt varierer med bruksområdene, er det viktig å benytte korrekte doser i hvert enkelt tilfelle. Skal en f.eks. bestråle en matvare for å drepe salmonella, er det viktig at stråledosen er høy nok til dette, men ikke så høy at matvaren forringes.

Absorbent dose defineres som den midlere energi som er deponert pr. masseenh. Enheten er Joule pr. kg, og kalles *Gray* (Gy). Dersom en vokter den absorberte dosen med en faktor som tar hensyn til at energiavsetningen varierer med strålekvaliteten, kalles den *ekvivalent dose*. Den har også enheten Joule pr. kg, men kalles *Sievert* (Sv).⁽³⁾

Ulike dosimetriformer

Det finnes mange måter å måle stråledoser på, og hvilken metode som er best avhenger av situasjonene. Ved måling med *ionisasjonkamre* måles ionisasjonen i luft. Dette gir en nøyaktig dosebestemmelse i luft, men det er en ulempe at medier som bestråles vanligvis er svært forskjellige fra luft. *Fricke-dosimetri* er en annen vanlig dosimetriform. Med denne metoden måles oksydasjon

av Fe²⁺ til Fe³⁺, og konsentrasjonen av Fe³⁺-ioner vil være et mål for den absorberte stråledosen. Ved oppvarming av *termoluminescensdosimetre* (TLD) vil strålingsinduserte frie elektroner og hull rekombinere under utsendelse av lys, og lysintensiteten vil være et mål for den absorberte stråledosen. En ulempe ved denne metoden er at lysintensiteten varierer med tiden etter bestråling, samt at prøven kun kan måles én gang. En fjerde målemetode er *ESR-dosimetri*. I denne metoden måles stabile strålingsinduserte frie radikaler. Mengden av disse benyttes som mål for den absorberte stråledosen. En fordel med metoden er at antall stabile radikaler er relativt konstant og at dosimetret kan avleses gjentatte ganger siden det ikke endrer seg.

Et ideelt dosimeter skal oppfylle en lang rekke kriterier med hensyn til bl.a. presisjon, stabilitet, doserate, strålingsenergi, strålingstype, bestrålings- og lagringstemperatur. Det bør være lett og raskt å utføre eksponering så vel som avlesing av dosimetret, og det bør kunne kalibreres mot en standard. Det finnes ikke noe ideelt dosimeter, men ESR-dosimetri hevdes å være den metoden som best oppfyller kravene til et ideelt dosimetrisystem.

ESR-spektroskopi

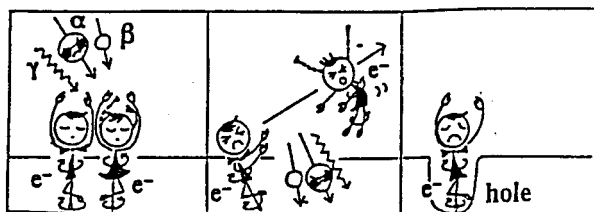
I molekylære system vil elektronene normalt opptre parvis i kjemiske bindinger. Når et slikt system utsettes for ioniserende stråling vil mediet ioniseres, dvs. at et elektron sparkes ut, og et uparet elektron (samt et hull) blir tilbake i molekylet, som illustrert i figur 1a. Et molekyl med et uparet elektron kalles for et *fritt radikal*.

ESR er en målemetode som er suveren for studier av frie radikaler i og med at den utnytter de magnetiske egenskapene til de uparede elektronene som dannes når ioniserende stråling vekselvirker med materien. Et elektron er en ladd partikkel som har et egenspinn \underline{S} . Gjennom disse fysikalske egenskapene har elektronet et magnetisk moment $\underline{\mu}$:

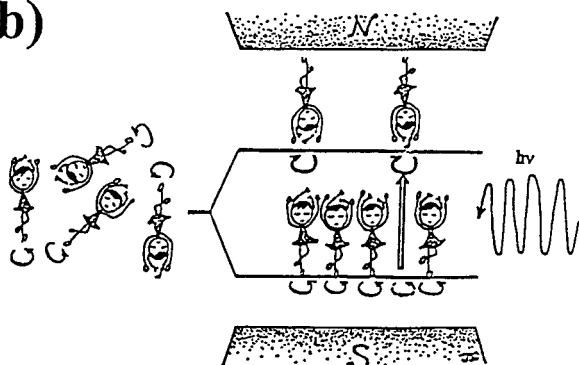
$$\underline{\mu} = -g\beta\underline{S}$$

*Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

a)



b)



Figur 1. Illustrasjon av ESR-metodens prinsipp. a) Bestråling av et elektronpar med ioniserende stråling resulterer i et uparet elektron. b) Uparede elektroner har et magnetisk moment med en vilkårlig orientering. Dersom en stor ansamling av uparede elektroner plasseres i et ytre magnetfelt, vil de fleste innrette seg med spinn parallelt med feltet, men også noen vil innrette seg med spinn antiparallelt med feltet. Overganger mellom disse to tilstandene kan induceres ved å tilføre en energi $h\nu$ tilsvarende energidifferansen mellom de to tilstandene (fritt etter figurer av M. Ikeya, ref. 7).

der g er en karakteristisk konstant og β er Bohr-magnetonet $e/2m_e$. I en kjemisk binding, hvor det er parvise elektroner, er elektronenes magnetiske momenter rettet slik at de opphever hverandre. I et fritt radikal derimot, hvor det er et uparet elektron, vil nettomentet være forskjellig fra null.

I en prøve med mange radikaler kan en se på de uparede elektronene som en ansamling av små dansende elementærmagneter, som vist i figur 1b. I et magnetfelt B , vil de vekselvirke med det pålagte magnetfeltet og deres magnetiske momenter vil rette seg inn enten parallelt eller antiparallelt med feltet. Disse to orienteringene er forbundet med tilstander som har litt forskjellig energi, og det vil være flest elektroner i den tilstanden som er forbundet med lavest energi. Energidifferansen mellom de to tilstandene er gitt ved:

$$\Delta E = g\beta B$$

der B er den magnetiske flukstettheten (dvs. styrken av magnetfeltet).

Det kan induceres overganger mellom de to energitilstandene hvis systemet utsettes for elektromagnetisk stråling med en energi $h\nu$, som nøyaktig tilsvarende energidifferansen ΔE mellom tilstandene.

$$h\nu = \Delta E = g\beta B$$

der ν er frekvensen til det elektromagnetiske strålingsfeltet. Fenomenet kalles *resonans*, og ligningen ovenfor kalles følgende *resonansbetingelsen*.

Sannsynligheten for stimulerte overganger er den samme uansett hvilken vei overgangen skjer; men siden det i utgangspunktet er flest elektroner i det laveste energinivået, og ulike prosesser opprettholder denne populasjonsdifferansen, vil det være flere elektroner som hopper fra nedre til øvre energinivå enn fra øvre til nedre nivå. Det finner følgende sted en *netto energiabsorpsjon* fra strålingsfeltet. Det er denne energiabsorpsjonen som utgjør et ESR-signal.

En ESR-absorpsjon avhenger av de uparede elektronenes nære omgivelser. Dersom det finnes kjerner med spinn I forskjellig fra null i nærheten av uparede elektroner, vil disse kjernenes magnetiske momenter og det uparede elektronets magnetiske moment kunne vekselvirke med hverandre. Slike vekselvirkninger fører til at den enkle energiabsorpsjonslinjen som en får ved resonans fra det uparede elektronet alene, blir splittet opp. Oppsplittingen vil være karakteristisk for hvilke kjerner elektronet vekselvirker med, antallet av slike kjerner, samt for styrken av koplingen til de forskjellige kjernene. Ulike radikaler vil således gi opphav til forskjellige ESR-spektra.

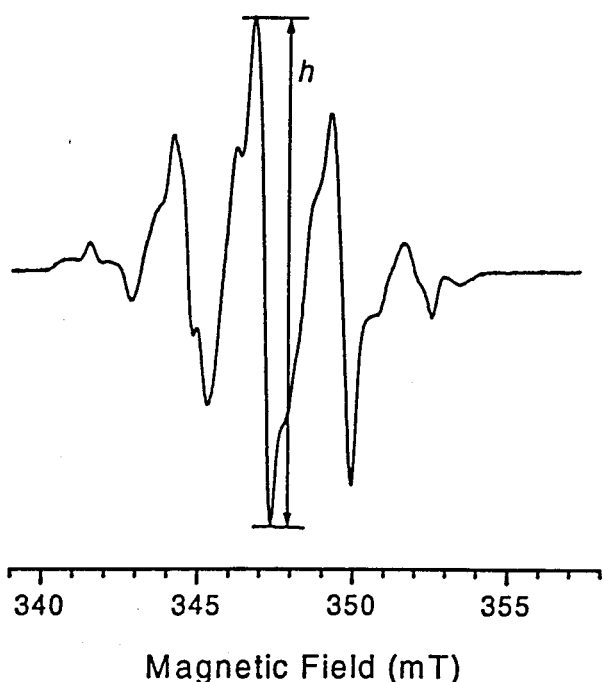
De fleste frie radikaler som dannes ved bestråling, er svært ustabile og har i løpet av få sekund etter dannelsen reagert med omgivelsene og dannet *diamagnetiske* (ikke-radikale) produkter. I slike tilfeller vil det normalt ikke kunne observeres noe ESR-spektrum selv om stråledosene har vært svært høye. Det finnes imidlertid en del forbindelser der det dannes meget stabile radikaler, og det er disse forbindelsene som kan benyttes til ESR-dosimetri.

ESR-dosimetri

ESR-dosimetri for måling av ioniserende stråling baserer seg på å utnytte elektronspinnresonans for å detektere stabile strålingsinduserte radikaler. Innenfor gitte øvre grenser er mengden av radikaler

som dannes proporsjonal med stråledosen. Metoden kan benyttes både til industriell og medisinsk doseovervåking, til retrospektiv katastrofedosimetri, til datering, og til deteksjon av bestrålte matvarer.

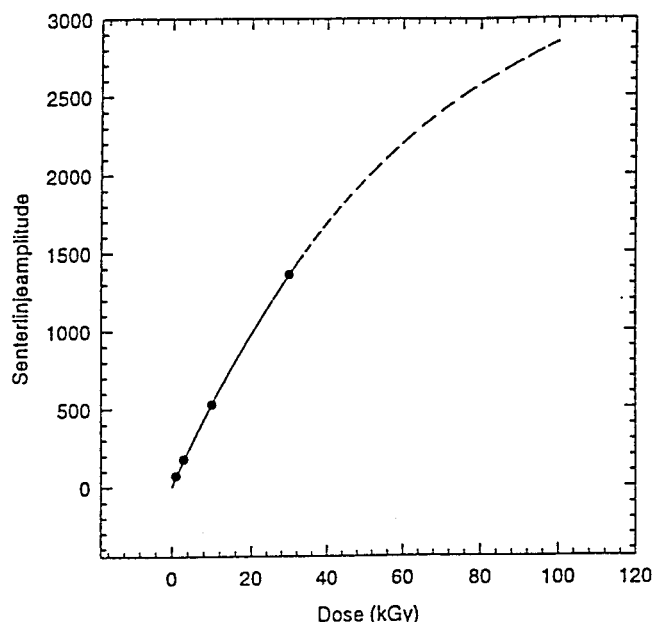
Intensiteten til et ESR-spektrum (dvs. arealet under energiabsorpsjonskurven) er proporsjonal med antall uparede elektroner i prøven, og dette antallet er videre proporsjonalt med mengden av stabile radikaler i prøven. *ESR-signalets intensitet vil følgelig kunne være et mål for den stråledosen som er absorbert i mediet.* Et typisk eksempel på et ESR-spektrum er vist i figur 2. Figuren viser et førstederivert ESR-spektrum av bestrålt alanin (en aminosyre). Av tekniske grunner registrerer en vanligvis den deriverte av absorpsjonskurven slik at ESR-spektrums intensitet vil være proporsjonalt med den dobbeltintegreerte av den registrerte kurven. I en del tilfeller vil amplituden til linjene i det deriverte spektret være proporsjonal med arealet under absorpsjonskurven. I slike tilfeller rekker det å måle linjeamplituder, og den avmerkede amplituden i figur 2 kan således brukes som mål for den absorberte dosen.



Figur 2. Førstederivert ESR-spektrum av et bestrålt alanin-dosimeter. Den avmerkede amplituden h benyttes vanligvis som mål for ESR-signalets intensitet, og gir et mål for absorbert stråledose.

Figur 3 viser et eksempel på en kalibreringskurve for ESR-intensitet som funksjon av absorbert dose. I dette tilfellet er det igjen aminosyren alanin som

er brukt som ESR-dosimeter. ESR-signalets intensitet for et sett referansedosimetre som er bestrålt med kjente doser, plottes som funksjon av dose og gir en kalibreringskurve. Når kalibreringskurven er kjent, kan en ukjent dose til et alanin-dosimeter bestemmes direkte ut fra ESR-spektrums



Figur 3. Kalibreringskurve for bestrålt alanin. Kurven viser ESR-intensitet som funksjon av absorbert dose. Amplituden h av senterlinjen (se figur 2) er brukt som mål for intensitet. For doser under 10 kGy er sammenhengen mellom amplitude og dose tilnærmet lineær. For høyere doser er den eksponentiell.

intensitet og den etablerte kalibreringskurven. Det er tilstrekkelig å bruke relative enheter for linnehøyden ettersom kalibreringskurven og de ukjente dosimetrene måles samtidig.

ESR/alanin-dosimetri

Den mest kjente formen for ESR-dosimetri er trolig ESR/alanin-dosimetri hvor en måler stabile strålingsinduserte radikaler i alanin. Allerede i 1962 ble det foreslått å bruke alanin som strålingsdosimeter, men det var først omkring 1980 at alanin-dosimetre ble tatt i bruk i noe større skala. I dag benyttes metoden bl.a. ved sterilisering av emballasje og medisinsk utstyr, ved matvarebestråling, ved industriell strålingsprosessering og ved strålingsovervåking i industri og forskningsanlegg. (I CERN er alaninkabler brukt til å overvåke både stråledoser og ozonkonsentrasjoner i LEP-akseleratoren.) Som en følge av den store interessen for ESR/alanin-dosimetri, har ledende

spektrometerfabrikanter utviklet egne bordspektrometre for kommersiell bruk.

Japaneren Miagawa har viet store deler av sitt liv til studier av radikaldannelsen i alanin, $\text{CH}_3\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$. Når alanin ioniseres, frigis det elektroner som kan fanges opp av andre ikke-ioniserte alaninmolekyler. Dette negativt ladde produktet er ustabil og spalter av en aminogruppe. Etter en reorientering av det nydannede produktet dannes det stabile alanin-radikalet $\text{CH}_3\dot{\text{C}}\text{HCOOH}$. Dette var lenge ansett for å være det eneste stabile radikalet ved romtemperatur, men det ble nylig kjent at det dannes minst ett radikal til som er stabilt ved romtemperatur. Dette "nye" radikalet er dannet ved en netto hydrogen-abstraksjon fra centralatomet $\text{CH}_3\dot{\text{C}}(\text{NH}_2)\text{COOH}$. Det stabiliseres omlag like mengder av de to radikalene, og det er mengden av disse radikalene som gir et mål for den absorberte dosen.

ESR/alanin-dosimetri er i dag den formen for dosimetri som best tilfredsstiller kravene til gode dosimetre for måling av ioniserende stråling.⁽⁴⁻⁶⁾ Alanin har høy strålefølsomhet, og gir derfor rom for deteksjon av relativt små stråledoser. Foruten en meget høy presisjon i dosebestemmelse, har alanin-dosimetrene en doserespons som er lite avhengig av faktorer som strålingsenergi, dose, doserate, temperatur og tid mellom bestråling og avlesing. Dosimetrene ødelegges ikke ved avlesingen som er relativt hurtig å utføre. ESR/alanin-metoden ble i utgangspunktet utviklet for måling av γ -stråling, men videreutvikles nå for bruk med røntgen-, elektron-, proton- og nøytronstråling.

Figur 3 viser kalibreringskurver for alanin-dosimetre. For doser under 10 kGy vil sammenhengen mellom linjehøyde og dose være tilnærmet lineær, mens den for høyere doser vil være eksponentiell.

ESR/alanin som klinisk dosimeter

I tillegg til gode dosimeteregenskaper som nevnt ovenfor, har alanindosimetrene en atomær sammensetning som er svært lik den atomære fordelingen i vev. Dette har bidratt til å vekke de medisinske miljøene med tanke på klinisk dosimetri i forbindelse med strålebehandling, og det arbeides derfor med muligheter for klinisk bruk, både for intern og ekstern dosemåling.

Ved all form for klinisk strålebehandling er dosimetrien kritisk. For å oppnå den ønskede effekt, f.eks. å fjerne en svulst, er det nødvendig at

hele svulsten mottar en relativt høy dose. Det er imidlertid nesten like viktig at stråledosen til det friske vevet omkring svulsten blir minimal. Ved *brachyterapi* bestråles svulstene direkte fra radioaktive kilder som implanteres i kroppen. Det arbeides med mulighetene for å kunne bruke et vevs-ekvivalent fantom som inneholder alanin. Med et slikt fantom kan man i prinsippet måle dosen på et hvilket som helst sted i fantomet før behandlingen utføres, og en kan således forsikre seg om at alle områder i svulsten mottar tilstrekkelig høy dose, og at områdene utenfor ikke belastes mer enn akseptabelt.

ESR/alanin som sekundærstandard

Det internasjonale atomenergibyrådet IAEA driver en dosesikringservice som betyr at strålingsbrukerne over hele verden kan få sjekket sine kalibreringssystemer, og forsikre seg om at utstyret de bruker leverer den dosen det skal. Dette innebærer at dosebestemmelser gjort på ulike innstallasjoner kan sammenliknes med en standard.

Etter en meget kritisk vurdering av ulike dosimetrimetoder, besluttet IAEA i 1985 å innføre ESR/alanin-dosimetri som både *sekundærstandard* (referanse) og *transfer-dosimeter* for industriell bruk av ioniserende stråling for doser over 100 Gy. Med dette valget av referanse og "transfer"-dosimetrimetode trenger brukerne, foruten sine egne strålingsfasiliteter, kun en liten alanintablett som etter bestråling sendes til IAEA (eller andre institusjoner med kalibreringssett) hvor den eksakte dosen kan bestemmes. Faktorer som energi-uavhengighet, robuste materialer, og langsom reduksjon i signalintensitet, er viktige parametre i denne sammenheng siden dosimetrene må kunne tåle en langsom postgang i varme og fuktige omgivelser.

IAEA forsøker å innføre ESR/alanin-metoden også for doser lavere enn 100 Gy til medisinsk bruk. ESR/alanin-dosimetri er ennå ikke noen etablert metode i Norge, men ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo, arbeides det med flere aspekter ved metoden.

Katastrofedosimetri

ESR-spektroskopi har også et stort potensiale som metode for katastrofedosimetri. Med katastrofedosimetri siktes det spesielt til måling av ikke-planlagte og ukontrollerte utslipp av radioaktive stoffer. Utgangspunktet for slike undersøkelser er at

det ofte stabiliseres radikaler når stråling absorberes i tørre stoffer, og at mengden av strålingsinduserte radikaler er proporsjonal med stråledosen.

Det er over tjue år siden det ble foreslått at ESR-spektroskopi på bestrålt organisk materiale kunne være en fruktbar metode for γ -dosimetri. Åtte år senere gikk ESR-laboratoriet ved Fysisk institutt, UiO, inn i historien som det første som noen gang benyttet ESR-dosimetri i forbindelse med en virkelig strålingsulykke.⁽⁸⁾ Som et resultat av både teknisk og personlig svikt ble en mann ved Institutt for energiteknikk på Kjeller, i april 1982, utsatt for en dødlig stråledose fra instituttets Co-60 kilde. Dosen ble bestemt ut fra ESR-spektroskopi på sukkerholdige tabletter som mannen hadde i bukselommen.

Personer i stråleutsatte yrker vil normalt være overvåket ved hjelp av film, ionisasjonskamre, eller andre former for persondosimetre, slik at deres doser ved mindre ulykker kan bestemmes rimelig enkelt. Ved Kjeller-ulykken var det så store doser involvert at filmdosimetret ble overeksponert og kun en minimumsdose kunne fastsettes. Ved mer omfangsrrike ulykker derimot, hvor store mengder radiaktive isotoper slipper ut i omgivelsene, vil det normalt være enkeltindivider som *ikke* har båret persondosimetre som vil utsettes for en ekstra strålebelastning. I slike tilfeller vil det være en absolutt fordel både helsemessig og samfunnsøkonomisk, å kunne foreta presise dosebestemmelser for enkeltindividene. Tsjernobyl-ulykken viste klart behovet for å kunne utføre lokale, pålitelige dosebestemmelser i løpet av kort tid.

Siden ulykken på Kjeller i 1982, hvor sukkerholdige nitroglyserintabletter ble benyttet som dosimetre, er både legemsdeler og andre sukkerholdige produkter blitt benyttet for retrospektiv dosimetri. Basert på husholdningssukker er det gjort doseestimat i områder omkring Tsjernobyl etter ulykken i 1986. Også etter ulykken i Estland for noen få år siden, der en høyaktiv radioaktiv kilde ble stjålet fra en skraphandler og deretter etterlatt i en kjøkkenskuff, ble dosen til dødsofferet og de overlevende beregnet på bakgrunn av radikaldannelse i husholdningssukker.

De ulike sukkerartene er av spesiell interesse fordi disse ofte er strålefølsomme og gir et høyt utbytte av stabile strålingsinduserte radikaler, og dessuten er flere sukkerarter en viktig bestanddel i de fleste husholdninger.

Det drives utstrakt forskning for å finne materialer som er godt egnet for ESR-basert

katastrofedosimetri.⁽⁴⁻⁷⁾ Både klær, knapper, negler, tenner, bein og hår har vært vurdert som dosimetre. Nå er det bein og tenner som synes å være mest i skuddet.

Deteksjon av bestrålte matvarer

Deteksjon av bestrålte matvarer er ved siden av ESR/alanin-dosimetri trolig den mest anvendte formen for ESR-dosimetri i dag.^(5,9,10) Allerede i 1905 kom det første patentet for matvarebestråling, og i dag er slik bestråling tillatt i mer enn 35 land.

Bestråling av matvarer gjøres for flere formål. Den kan f.eks. forlenge levetiden ("shelf life") for et produkt. Dette kan være av stor betydning i u-land hvor lagrings- og kjølingsmulighetene ofte er dårligere enn hva vi er vant med, og hvor matvarene på grunn av lav omsetning, kan bli lagret svært lenge før de selges. Ved kontrollert bestråling kan således kassasjon av fordervet mat reduseres, og næringverdien/kvaliteteten kan opprettholdes lenger enn om matvarene ikke bestråles. En annen hensikt med bestråling av matvarer kan være å tilintetgjøre mikroorganismer og parasitter som trikiner, bendelorm og salmonella. Det er dette nytteaspektet som er bakgrunn for bestråling av krydder i Norge. Et potensielt misbruk er "forbedring" av lavkvalitetsprodukter ved bestråling.

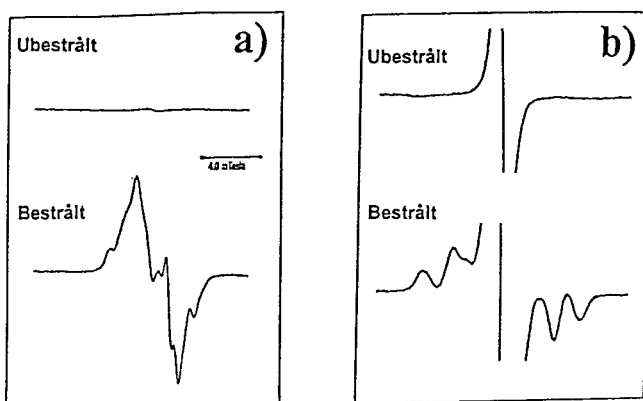
Til tross for en utstrakt bruk av matvarebestråling er det svært forskjellige regler i de enkelte land; heller ikke EU-landene har kunnet enes om én lovgivning. Mens f.eks. Nederland tillater bestråling av 10 matvaregrupper, er ingen matvarer tillatt bestrålt i Tyskland. I Norge er bare bestråling av krydder tillatt. Den store variasjonen i bestrålingspraksis kombinert med en økende fri flyt av varer, har økt behovet for å kunne bestemme hvorvidt en matvare er blitt bestrålt. Internasjonale regler har satt 10 kGy som maksimalt tillatt dose ved matvarebestråling, men det er mange matprodukter som har fått lavere maksimumsgrenser for å forhindre at næringsverdi, smak eller lukt forringes. For å verifisere hvorvidt en matvare har vært bestrålt, eventuelt at korrekte doser har vært benyttet, er det viktig å kunne detektere *hva* som er bestrålt og også med hvilke *doser*.

ESR og bestrålte matvarer

I en rekke matvarer vil det ved bestråling dannes stabile radikaler, og ESR-spektre fra disse matvarene vil derfor kunne fortelle hvorvidt et produkt

er bestrålt eller ikke. Etersom ESR-signalenes form varierer avhengig av hva slags radikaler som er dannet, vil det også være mulig å identifisere *hva* som er bestrålt i et blandingsprodukt (f.eks. paprika i en gryteblanding). I tillegg er det mulig å fastlegge bestrålingsdoser for en del produkter. Metoden er hurtig og ikke-destruktiv og utfyller andre metoder der disse ikke strekker til. ESR-dosimetri benyttes i dag internasjonalt til rutinemessig overvåking av matvarer og er bl.a. å finne ved de aller fleste matvarekontroll-laboratoriene i Tyskland.

Figur 4a viser ESR-spektret for ubestrålte og bestrålte dadler. En del stoffer inneholder stabile radikaler *før* de blir bestrålt. Dette representerer ikke noe problem såfremt ESR-spektrene fra disse radikalene er forskjellige fra de som dannes ved bestråling. Et eksempel på en matvare som inneholder radikaler allerede før bestråling, er dill. ESR-spektret fra ubestrålt og bestrålt dill er vist i figur 4b.



Figur 4. Førstederiverte ESR-spektra av ubestrålte og bestrålte matvarer. a) Dadler. Spektrene viser at det ikke finnes nevneverdige mengder frie radikaler i ubestrålte dadler, og at signalet fra bestrålte dadler er svært markant. b) Dill. Spektrene viser at både ubestrålt og bestrålt dill gir opphav til sterke ESR-signaler, men at det er enkelt å skille de to spektrene siden spektret etter bestråling er bredere og inneholder flere linjer enn før bestråling.

ESR-metoden anses i dag for totalt sett å være den mest suksessfulle metoden når det gjelder deteksjon av bestrålte matvarer. Der andre metoder, som gasskromatografi og termoluminisens, ikke strekker til, representerer ESR-metoden et effektivt alternativ; spesielt innen matvaregruppene kjøtt, fisk, nøtter, tørket frukt, skaldyr, krydder, og egg er metoden meget vel egnet.

Datering

En annen viktig anvendelse av ESR-dosimetri er knyttet til geologisk og arkeologisk datering.^(6,7) Basert på radikaldannelse induisert av naturlig bakgrunnstråling, kan en ved hjelp av ESR-dosimetri datere geologiske og arkeologiske funn. Datering av steinarter (dryppstein), koraller og skjell, samt skjeletter fra urtidsmennesker, er blant de mest oppsiktsvekkende anvendelser av metoden.

Metoden dekker en tidsperiode som er relativt dårlig dekket av andre dateringsmetoder, dvs. fra ca. tusen til ca. en million år bakover i tid. Metoden baserer seg på at naturlig bakgrunnstråling gir opphav til meget stabile frie radikaler (stabile over størrelseorden 10^6 år). Ut fra kjennskap til bakgrunnstrålingens doserate, kan en beregne hvor lang tid det har tatt for å danne den mengden av radikaler som er representert ved ESR-spektrets intensitet.

Referanser

1. Ellen Karoline Henriksen: *Fra Crookes' rør til computertomograf - Røntgendiagnostikk før og nå*. Fra Fysikkens Verden, 57, 99-104 (1995)
2. Trygve Holtebekk: *100 år med Becquerel*. Fra Fysikkens Verden, 58, 37-43 (1996)
3. Eli Olaug Hole: *Effekten av ioniserende stråling: Påliteligheten av risikoberegninger ved lave doser*. Fra Fysikkens Verden, 55, 43-50 (1993)
4. Applied Radiation and Isotopes, 40 10-12 (1989)
5. Applied Radiation and Isotopes, 44 (1/2) (1993)
6. Applied Radiation and Isotopes, 47 (11/12) (1996)
7. Motji Ikeya: *New Applications of Electron Spin Resonance: Dating, Dosimetry and Microscopy*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (1993)
8. E. Sagstuen, H. Theisen, and T. Henriksen: *Dosimetry by ESR spectroscopy following a radiation accident*. Health Physics, 45, 961-968 (1983)
9. *Detection of irradiated food containing bone, Method by ESR spectroscopy*. European standard, Final draft, prEN 1786 E (1996)
10. *Detection of irradiated food containing cellulose. Method by ESR spectroscopy*. European standard, Final draft, prEN 1787 E (1996)