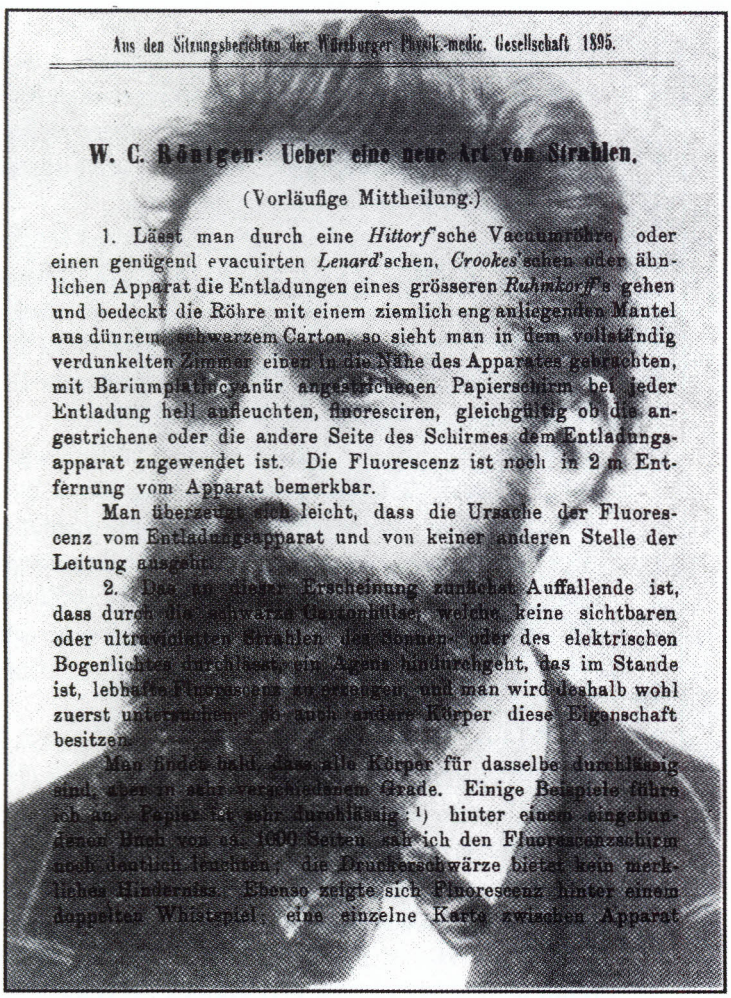
# Fra Fysikkens Verden

**Nr. 4 – 1995**
**57. årgang**

Utgiver:
Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:
Øivin Holter
Finn Ingebretsen

Redaksjonssekretær:
Karl Måseide



Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaft 1895.

**W. C. Röntgen: Ueber eine neue Art von Strahlen.**

(Vorläufige Mittheilung.)

1. Lässt man durch eine *Hittorf*'sche Vacuumröhre, oder einen genügend evacuirten *Lenard*'schen, *Crookes*'schen oder ähnlichen Apparat die Entladungen eines grösseren *Ruhmkorff*'s gehen und bedeckt die Röhre mit einem ziemlich eng anliegenden Mantel aus dünnem, schwarzem Carton, so sieht man in dem vollständig verdunkelten Zimmer einen in die Nähe des Apparates gebrachten, mit Bariumplatincyanür angestrichenen Papierschirm bei jeder Entladung hell aufleuchten, fluoresciren, gleichgültig ob die angestrichene oder die andere Seite des Schirmes dem Entladungsapparat zugewendet ist. Die Fluorescenz ist noch in 2 m Entfernung vom Apparat bemerkbar.

Man überzeugt sich leicht, dass die Ursache der Fluorescenz vom Entladungsapparat und von keiner anderen Stelle der Leitung ausgeht.

2. Das an dieser Erscheinung zunächst Auffallende ist, dass durch die schwarzen Cartonhülsen, welche keine sichtbaren oder ultravioletten Strahlen der Sonnen- oder des elektrischen Bogenlichtes durchlassen, ein Agens hindurchgeht, das im Stande ist, lebhafte Fluorescenz zu erregen, und man wird deshalb wohl zuerst untersuchen, ob auch andere Körper diese Eigenschaft besitzen.

Man findet bald, dass alle Körper für dasselbe durchlässig sind, aber in sehr verschiedenem Grade. Einige Beispiele führe ich an. Papier ist sehr durchlässig; [1]) hinter einem eingebundenen Buch von ca. 1000 Seiten sah ich den Fluorescenzschirm noch deutlich leuchten; die Druckerschwärze bietet kein merkliches Hinderniss. Ebenso zeigte sich Fluorescenz hinter einem doppelten Whistspiel, eine einzelne Karte zwischen Apparat

Wilhelm Conrad Röntgen og hans originalartikkel fra 28/12 1895

## Innhold

**Ellen Karoline Henriksen:**
Røntgendiagnostikk før og nå ... 99

**Johan Baarli:**
Fra strålebiologiens historie .... 104

**Jon Gjønnes og Berit Fjærtoft:**
Røntgen i fysikk og kjemi ..... 110

**Emil J. Samuelsen:**
Materialinnsyn med røntgen .... 112

**Øystein Elgarøy:**
Røntgenbilder av universet ..... 118

Fra Redaktørene ..... 98
In Memoriam: Tormod Riste ..... 98
Fra Fysikkens Historie ..... 123
Nobelprisen i fysikk 1995 ..... 125
Bokomtaler ..... 127
Nye Doktorer ..... 129
Dr.ing. Arne Brendmo
Dr.ing. Erling G.B. Hohler
Dr.ing. Tor Wøhni
Trim i FFV ..... 130
Nytt fra NFS ..... 131
IBMs fysikkpris 1996
Stipend

ISSN-0015-9247

# Fra Redaktørene

I forrige nummer av FFV skrev Olav Steinsvoll og Joe McCauley en artikkel om naturvitenskapelige bommerter i litteraturen. Spesielt ble det påvist alvorlige feil i *Sofies Verden*, boka som har spredt filosofiens historie i et omfang som kan få selveste Morgan Kane til å blekne. Situasjonen blir ikke noe bedre av at noen av de samme feil finnes i autoriserte lærebøker i filosofi, men for forfatteren er det en formildende omstendighet. Det ryktes også at boka blir brukt av studenter som alternativ til anbefalte pensumbøker i filosofi!

For en gangs skyld har en artikkel i FFV vakt en viss media-interesse, og vi har til og med kunnet føye nye redaksjoner til vår abonnentliste! Men igjen opplever vi at våre store profesjonelle mediekolleger fokuserer på person og ikke på sak. Steinsvoll og McCauley peker nemlig på en nesten utrolig allmenn mangel på kunnskap om naturvitenskap, i dette tilfelle fysikk. Vi har ved flere tidligere anledninger, og i flere sammenhenger, berørt dette i FFV, men det er neppe til å komme forbi; blant toneangivende kulturpersonligheter er naturvitenskapelig erkjennelse ikke akseptert som en integrert del av vår kultur. I vår lokale universitetsbokhandel er dette symbolisert ved at fysikklitteraturen, redusert til et minimum, er gjemt vekk nederst i kjelleren. Noen ganger kan en faktisk lure på om det finnes en slags smittsom realfagsfobi.

Årsakene til dette er nok flere, men kanskje den viktigste er svikten i skolen. Og verre kan det faktisk komme til å bli. Lærere i den videregående skole forteller om en stadig synkende interesse for de "harde" realfag; det skal visstnok være så mye lettere å få gode karakterer i andre fag! Den store tilstrømmingen av studenter til universitetene går heller ikke i "vår" retning, og Reform '94 gir ikke mange forhåpninger for fysikkens framtid i Norge. Det paradoksale skjer i vårt samfunn, der egalitet er en overordnet målsetning: Den grunnleggende forståelse og innsikt i vår materielle kulturs basis beherskes og overlates fullstendig til et lite "presteskap" som snakker et språk stadig færre forstår, og hvis relevans kun måles etter dens underholdningsverdi.

∞

# In Memoriam

**Tormod Riste 1925 – 1995**

Norsk Fysisk Selskaps tidligere president, professor Tormod Riste, omkom ved en tragisk drukningsulykke 12. november. Som mange sikkert husker, fylte Tormod 70 år i mai i år. Dette ble markert med et seminar i Det Norske Videnskaps-Akademi, og fysikere fra hele verden kom for å hylle ham. Tormod var en glimrende fysiker som har satt dype spor etter seg.

Tormod Riste arbeidet i alle år ved forskningsreaktoren på Kjeller. Der utførte han sin cand.real.-oppgave, og der bygde han opp en fysikkavdeling som han ledet i 25 år. Han var i 10 år knyttet til Fysisk institutt ved Universitetet i Oslo som professor II.

Noe av det som særpreget Tormod Riste var hans redelighet og ærlighet. Han hadde en faglig tyngde og integritet som førte til at han ble valgt inn i en lang rekke komiteer og råd. Tormod var også opptatt av å spre informasjon om kjernekraft og radioaktiv forurensning. Når mediene malte dystre bilder av strålefare og sykdommer, grep Tormod til pennen for å sette tingene på plass. Hans innlegg var konsise og nøkterne, og fremfor alt redelige.

Tormod Riste kom tidlig med i styret i Norsk Fysisk Selskap og var president fra 1969 til 1979. I hans periode vokste Selskapet og fikk betydning for de fleste fysikere i landet. Tormod ble æresmedlem for sin innsats for Selskapet og norsk fysikk. Mer enn 900 norske fysikere takker Tormod Riste for hans store innsats for Norsk Fysisk Selskap. Vi har mistet en fremragende forsker, en god kollega og venn.

*Thormod Henriksen*

∞

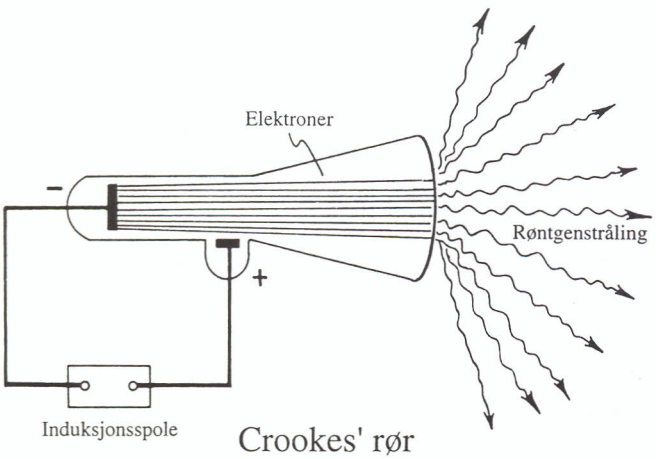
# Fra Crookes' rør til computertomograf – Røntgendiagnostikk før og nå

*Ellen Karoline Henriksen* *

## Begynnelsen

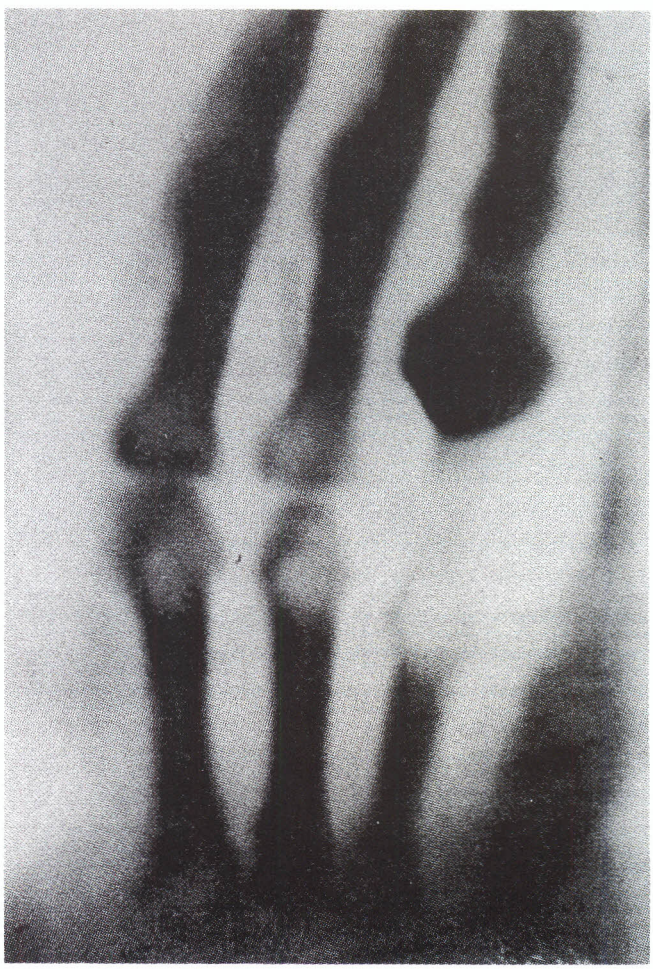
Knapt noen vitenskapelig oppdagelse har vel vakt så stor oppsikt, både blant leg og lærd, og fått så umiddelbare anvendelser som røntgenstrålingen. Moderne medisin er så godt som utenkelig uten, og strålingen har også fått utallige anvendelser innen industri og forskning.

Men la oss begynne med begynnelsen. Stedet var Würzburg, datoen var 8. november 1895. Wilhelm Conrad Röntgen, en middelaldrende professor ved Universitetet i Würzburg, arbeidet med elektriske utladninger i glassrør med svært fortynnet gass. Mange fysikere drev med lignende forsøk på denne tiden, og det fantes flere varianter av utladningsrørene. Röntgen brukte rør utviklet av engelskmannen Crookes (figur 1)




**Figur 1.** Et rør omtrent som dette var det Röntgen brukte da han gjorde sin oppdagelse den 8. november 1895.

og tyskeren Hittorf. Denne dagen hadde han dekket røret med et sort papir, og til sin forbauselse så han at en fluorescerende skjerm plassert noen meter fra røret, begynte å lyse! Han forsto at dette måtte skyldes stråling fra røret og at strålingen tydeligvis trengte igjennom det sorte papiret. Han forsøkte derfor straks med mer massive objekter som bøker, treplater og tynne metallplater, og fant at strålingen trengte igjennom alle, men i forskjellig grad. Han prøvde med hånden – og så knoklene lyse mot seg (figur 2)!



**Figur 2.** Dette bildet av hånden til fru Bertha Röntgen ble tatt 22. desember 1895, og er et av verdens aller første røntgenbilder.

Allerede 1 uker senere, den 28. desember 1895, utkom rapporten hans, *"Ueber eine neue Art von Strahlen"* (se forsiden), og den 23. januar 1896 ga han sin første fore-

*Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

lesning over emnet til Det franske vitenskapsakademi i Paris.

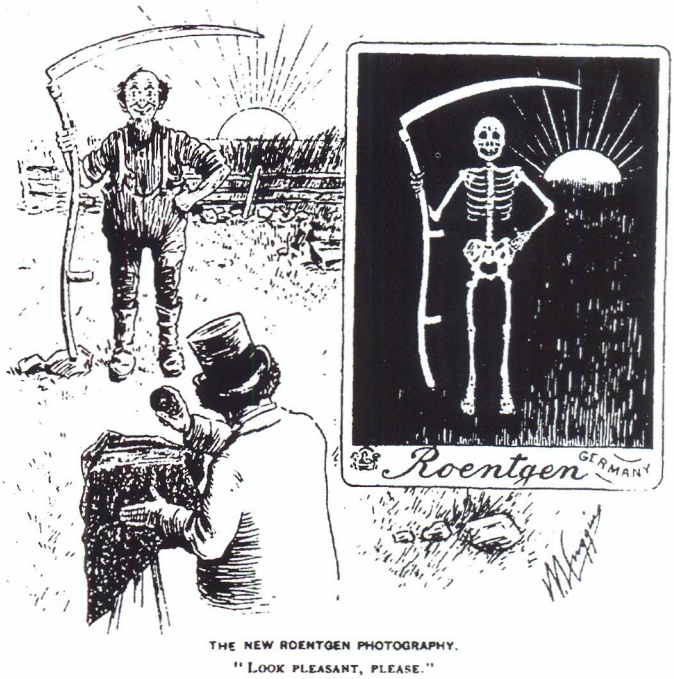
Röntgen fant at strålingen ikke lot seg avbøye av magneter, og han skjønte derfor at det ikke kunne dreie seg om ladde partikler. Han antok at strålingen hadde bølgenatur, og utførte forsøk for å demonstrere eventuell brytning og diffraksjon. Dette lyktes imidlertid ikke med datidens metoder. Ikke før i 1912, da Max von Laue foreslo at krystaller kunne virke som diffraksjonsgitter, ble røntgendiffraksjon demonstrert.

Röntgens oppdagelse er et skoleeksempel på god vitenskap: Han gjorde en uventet observasjon, og tok den straks til følge ved å utføre metodiske undersøkelser av det ukjente fenomenet. Det er grunn til å tro at flere forskere hadde observert spor etter røntgenstråling før Röntgen, men ingen av disse hadde grepet fatt i fenomenet. I England hadde Crookes (konstruktøren av røret) merket at fotografiske plater som var lagret nær utladningsrøret, fikk mørke skygger. Men i stedet for å utforske fenomenet, skrev Crookes til produsenten av platene og klaget på kvaliteten!

## Folkelig optimisme og skepsis

Pressen kastet seg straks over nyheten om den nye strålingen; dette var nettopp en oppdagelse som satte den folkelige fantasi i sving. De fleste oppslagene var positive, som Literary Digests *"Photography of unseen substances"* den 25. januar 1896. Noen var imidlertid skeptiske: London Pall Mall Gazette skrev senere samme år: *"We are sick of the Röntgen rays. . . you can see other people's bones with the naked eye, and also see through eight inches of solid wood. On the revolting indecency of this there is no need to dwell."* En del legfolk delte nok dette synet – i hvert fall var forretningsmenn i London optimistiske nok til å annonsere med *"X-ray-proof underclothing for ladies"*. Hvordan salget gikk, vites ikke.

En del av den folkelige uro omkring strålene som kunne "se inn på skjulte steder" hang nok sammen med en utbredt misforståelse på denne tiden: At røntgenfotografering, på samme måte som lysfotografering, baserte seg på reflektert stråling. Denne misforståelsen ser vi bl.a. uttrykt i den humoristiske tegningen i figur 3, og den dukker opp igjen i lovforslaget som ble fremmet i New Jersey mot "teaterkikkerter med røntgen". Et mer fantasifullt utspill angående den nye strålingen kom fra en bonde i Iowa, som hevdet at han v.hj.a. røntgenstråling hadde forvandlet en billig metallbit til rent gull! Strålingen har også avstedkommet dramatiske begivenheter som forlovelsesbrudd: En




**Figur 3.** Dette ville ikke virket i praksis! For at det skal bli et røntgenbilde, må røntgenrør og film befinne seg på hver sin side av objektet.

ung mann i New York insisterte på at hans tilkommende skulle la seg røntgenfotografere slik at han kunne være trygg på at han fikk "prima vare". Da hans utkårede (som for øvrig var fullstendig frisk) nektet, brøt han forlovelsen. Det hører med til historien at damen siden saksøkte ham med krav om 25 000 dollar!

## Tidlige kliniske erfaringer

Historien om røntgenstrålingens mange triumfer innen medisinen begynte allerede i januar 1896, da strålingen for første gang ble tatt i bruk som klinisk hjelpemiddel. Et av de første eksemplene på dette var antakelig den engelske legen J. Hall-Edwards' bilde av en nål som satt inne i en kvinnehånd. Nålen ble fjernet kirurgisk så snart den v.hj.a. røntgen var nøyaktig lokalisert. Det tok heller ikke lang tid før man fant på å prøve røntgenstråling til behandling av diverse lidelser. I 1899 lyktes det å behandle en mann for kreftsvulst på kinnet v.hj.a. røntgen. Under boerkrigen i Sør-Afrika i 1901, var røntgenapparater et viktig hjelpemiddel til å lokalisere kuler i kroppen på sårede.

Få måneder etter at strålingen var tatt i bruk som medisinsk hjelpemiddel, begynte leger og radiografer å merke at den ikke var fullstendig harmløs. Hendene til folk som arbeidet med røntgenstråling ble røde og forbrente, og øynene ble såre dersom de ble utsatt for strålingen. I begynnelsen var det ikke klart

at det var røntgenstrålingen i seg selv som forårsaket disse plagene. Siden hudskadene minnet om solbrenthet, mente noen at det kom ultrafiolett stråling fra røntgenrørene, og anbefalte tynt silkestoff som beskyttelse. Andre trakk den motsatte konklusjonen og hevdet at røntgenstråling var en naturlig komponent av solstrålingen og at også "naturlig" solbrenthet var forårsaket av røntgen. Utover på 1920-tallet ble det klart at beskyttelsestiltak var påkrevet, og det ble etablert strålevernkomiteer som skulle gi retningslinjer for beskyttelse. Siden 1928 har organisasjonen ICRP (International Commission on Radiological Protection) satt standarden for strålevern verden over, og knapt noen potensielt skadelig påvirkning er vel bedre overvåket og kartlagt enn røntgen og annen ioniserende stråling.

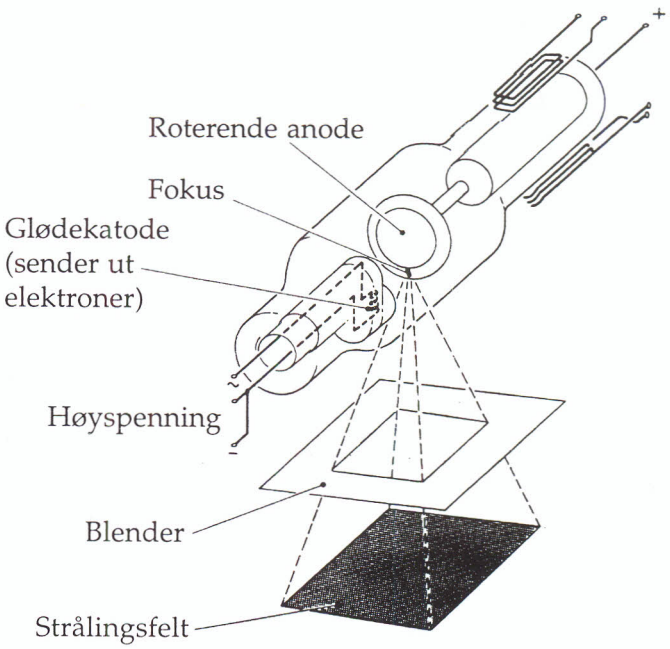
## Forbedringer i røntgenteknologien

Ikke lenge etter oppdagelsen av røntgenstrålingen viste det seg at man kunne få et langt bedre utbytte av stråling ved å modifisere utformingen av utladningsrøret. I Crookes' rør og lignende utladningsrør, framkom røntgenstråling ved at positive ioner i den fortynnede gassen ble akselerert av det elektriske feltet mot katoden og løsrev elektroner fra denne. Elektronene ble i sin tur akselerert mot anoden, og røntgenstråling oppsto når elektronene ble bremset ned i glassveggen i enden av røret. En av de første forbedringene som ble gjort i røntgenteknologien, var å sette inn en metallanode i enden av røret. Dette gjorde strålingsutbyttet langt høyere. De tidlige gassfylte rørene var upålitelige fordi gasstrykket kunne variere noe. I tillegg var intensiteten av røntgenstrålingen lav p.g.a. ionenes begrensede evne til å rive løs elektroner fra katoden. I 1913 introduserte engelskmannen Coolidge en dramatisk forbedring av røntgenteknologien: I stedet for å la ioner rive løs elektroner fra katoden, satte han inn en glødekatode i røret. Dette er en metalltråd (ofte av wolfram) som, når den varmes opp av en elektrisk strøm, emitterer elektroner (fenomenet kalles Edison-effekten). Coolidges rør var fullstendig evakuert, og man unngikk dermed problemet med varierende gasstrykk. Det er varianter av dette røret som har vært i bruk i røntgenapparater helt opp til våre dager.

Røntgenstråling produseres altså når hurtige elektroner bremses ned i et "target". Strålingen består av to komponenter: Bremsestråling og karakteristisk stråling. *Bremsestråling* oppstår når elektronene passerer nær en kjerne i targetmaterialet og retarderes. Bremsestrålingen har et kontinuerlig spektrum med en skarp nedre bølgelengdegrense bestemt av energien til elektronene, som igjen bestemmes av spenningen over røntgenrøret. *Den karakteristiske strålingen* skyldes deeksitasjon til K- og L-skallene i targetatomer som er eksitert eller ionisert av de innkommende elektronene. Denne har skarpe topper ved visse bølgelengder, karakteristiske for targetmaterialet. Jo høyere atomnummer metallet i anoden har, desto mer effektivt produseres røntgenstråling. Men samtidig med røntgenstrålingen, og langt mer effektivt, produseres også varme. Selv i et 100 kV røntgenrør med wolframanode er det bare 1 % av elektronenergien som omgjøres til røntgenstråling. For at et metall skal være velegnet som anodemateriale, må det derfor i tillegg være en god varmeleder og ha høyt smeltepunkt. I tidlige røntgenrør var wolfram det vanligste materialet; senere er også molybden blitt brukt i noen utstrekning.

Figur 4 viser skjematisk et moderne røntgenrør. Omkring katoden ligger en metallkopp som fokuserer elektronstrålen til et begrenset område (target) på anoden. Dette er viktig for å få et skarpt bilde. Anoden er ofte en roterende metallplate. På denne måten spres varmeutviklingen over hele platens periferi, mens targetflekken til enhver tid er liten. Røret avskjermes slik at stråling bare unnslipper i ønsket retning.

Røntgenstråling karakteriseres gjerne ved spenningen over røret. Denne svarer til maksimalenergien til elektronene som treffer anoden, og følgelig til maksimalenergien for røntgenfotonene, gitt i elektronvolt. Spenninger på 10–60 kV gir "bløt" røntgenstråling, mens spenninger på 100–200 kV gir "hard" stråling.




**Figur 4.** Moderne røntgenrør.

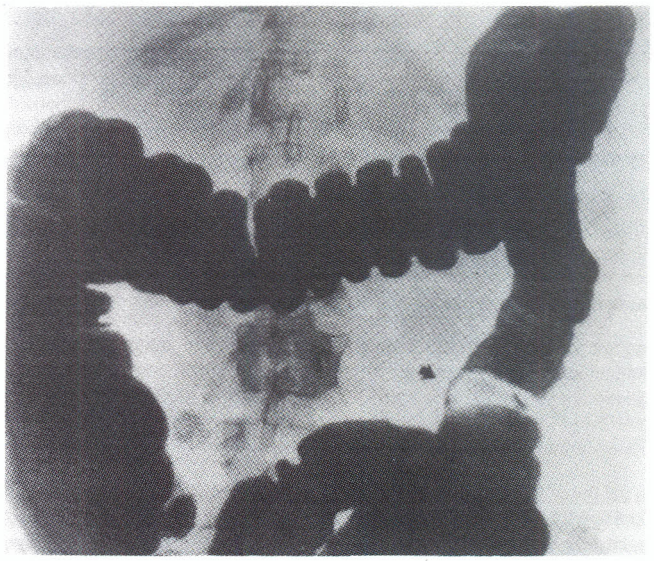
## Røntgen som diagnostisk hjelpemiddel

Like fra det nevnte tilfellet med kvinnen som hadde en nål i hånden, i 1896, har røntgenstråling vært et uvurderlig hjelpemiddel for leger og tannleger. Prinsippet for alle slags røntgenundersøkelser av menneskekroppen er at ulike typer vev attenuerer (absorberer og sprer) strålingen i ulik grad. Røntgenstrålingens attenuasjon i en substans er i første rekke avhengig av elektrontettheten til substansen. Svært tette stoffer, som bly, er derfor gode røntgenattenuatorer, mens mindre tette, som vann, transmitterer en større del av strålingen. I menneskekroppen har beinvev større elektrontetthet enn bløtvev, og vil derfor attenuere mer. Det samme gjelder kreftvev i forhold til normalvev, og muskler i forhold til fett. Ved å variere spenningen over røntgenrøret kan man optimalisere kontrasten mellom ulike vevstyper i kroppen: "Bløt" stråling (20–30 kV) brukes til å undersøke kvinner for brystkreft, mens undersøkelser av lungene eller av tarmregionen, krever "hard" stråling (ca. 150 kV).

For de fleste bløte vevstyper i kroppen (f.eks. blodsystemet eller mage- og tarmregionen) er kontrastforskjellene i et vanlig røntgenbilde så små at bildet vil ha liten informasjonsverdi. Ved slike undersøkelser brukes derfor *kontrastmidler*. Disse kan være av to ulike typer: Ved *negativ kontrast* innfører man gass (luft, oksygen eller karbondioksid) i det aktuelle organet (f.eks. tarmen). Røntgenattenuasjonen blir da mindre enn i det omkringliggende vevet, og det aktuelle organet vil framtre mørkt på bildet. Ved *positiv kontrast* innføres et kontrastmiddel med høyt atomnummer (jod, barium e.l.) i det aktuelle organet, og organet vil da framtre lyst på bildet p.g.a. den store attenuasjonen av røntgenstråling i det tunge stoffet. Figur 5 viser et negativt kontrastbilde av tykktarmen med en polypp.

Ved en konvensjonell røntgenundersøkelse plasseres pasienten (eller kroppsdelen som skal undersøkes) mellom røntgenkilden og en detektor. Man skiller mellom *fluoroskopi*, der detektoren er en fluorescerende skjerm (i dag erstrattet med bildeforsterker og TV-skjerm), og *radiografi*, der detektoren er en fotografisk film.

Fordelen med *fluoroskopi* (også kalt gjennomlysning) er først og fremst at pasient og bestrålingsbetingelser kan manipuleres under undersøkelsen, slik at bildekvaliteten, og dermed informasjonsverdien, blir optimal. Et annet fortrinn er at man v.hj.a. fluoroskopi kan studere bevegelser i kroppen, som f.eks. åndedrett eller hjerteslag. Fluoroskopi kan raskt gi et overblikk over pasientens tilstand. En ulempe med metoden er imidlertid at bildeskarpheten



**Figur 5.** Negativt kontrastbilde av tykktarm med polypp (pilen). Polyppen har ikke tatt opp kontrastmiddel og framstår derfor lys på bildet (Fra Jacobson: Medicin och teknik. Studentlitteratur, Lund, 1987).

er begrenset; en annen ulempe er at stråledosene som trengs ved fluoroskopi ofte er større enn ved radiografi.

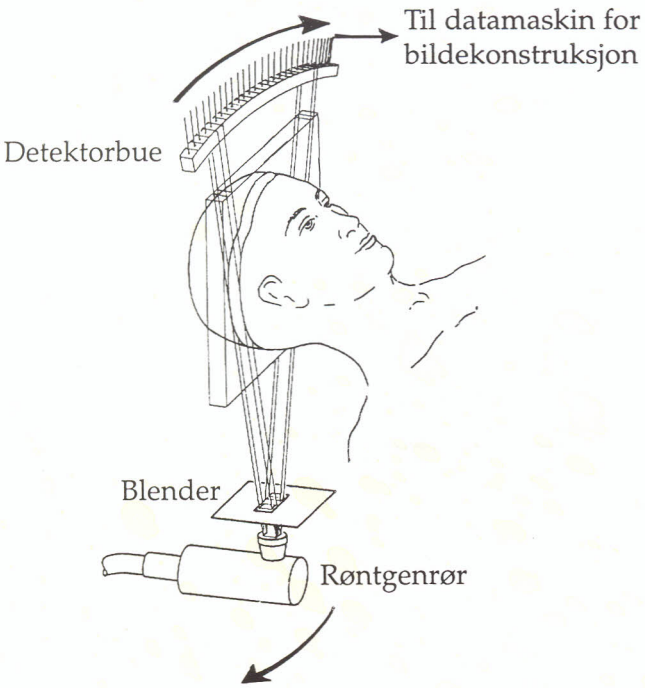
Allerede i sin artikkel fra desember 1895, bemerket Röntgen at fotografiske plater svertes av strålingen, og det er dette som utnyttes i en *radiografisk undersøkelse*. Siden røntgenstråling er svært gjennomtrengende, absorberes imidlertid bare en liten del i den tynne filmen, og "fotograferingen" er ikke særlig effektiv. Film som brukes til røntgen-"fotografering" skiller seg derfor ut fra vanlig film på en rekke punkter. For det første har røntgenfilmen fotografisk emulsjon (sølvbromid) på begge sider. Videre er filmen omsluttet av et fluorescerende materiale som ved røntgenbestråling sender ut fotoner i UV og det synlige området. Disse fotonene sverter filmen mer effektivt enn røntgenfotoner gjør. Filmen og de fluorescerende platene er innesluttet i en filmkassett av metall. Kassetten skjermer filmen mot lys før og etter røntgeneksponeringen, og gjør det dermed lettere å oppbevare og behandle filmen. Radiografi krever generelt mindre stråledoser enn fluoroskopi, og gir høyere bildeoppløsning. I tillegg fungerer et røntgenbilde som en dokumentasjon for ettertiden på pasientens tilstand da bildet ble tatt, og kan være nyttig for å overvåke pasientens utvikling gjennom en behandlingsperiode. Forbedringer i filmteknologien har ført til store reduksjoner i medisinske røntgendoser de siste årene.

I dag kan bilder tatt opp med begge teknikker digitaliseres, og avanserte bildebehandlingsteknikker gjør det mulig å framheve den interessante informasjonen i bildet.

## Computertomografi

Da computertomografien (CT) ble utviklet på 1970-tallet, åpnet det seg nye muligheter innen diagnostikken. Det var den engelske ingeniøren Godfrey Hounsfield som begynte utviklingen av denne teknikken, og sammen med den amerikanske fysikeren Allen Cormack fikk han Nobelprisen i 1979 for det som ble kalt "det største fremskrittet siden røntgenstrålingen ble oppdaget".

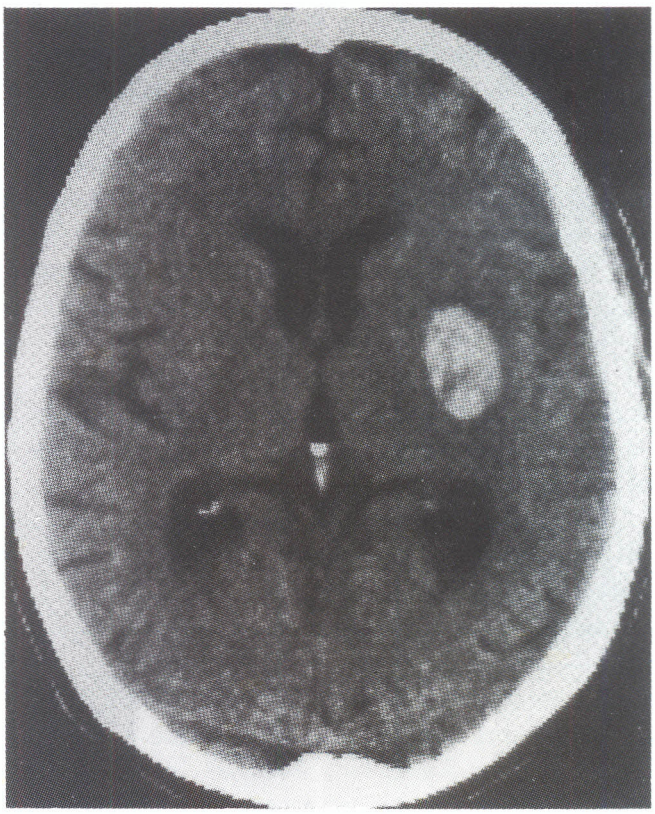
Mens man ved vanlig røntgenfotgrafering får en projeksjon av den aktuelle kroppsdelen på filmen eller skjermen, får man med CT et tverrsnittsbilde av denne delen – som om man hadde skåret en skive av pasienten og avbildet denne på filmen. Oppstillingen er skissert i figur 6. Et vifteformet stråleknippe fra røntgen-




**Figur 6.** Prinsippet for computertomografi (CT).

røret sendes gjennom pasienten og treffer et sett detektorer (f.eks. natriumiodidkrystaller) på motsatt side. Røntgenrør og detektorer dreies rundt pasienten slik at det tas opp en rekke projeksjoner av den aktuelle "skiven". Hver av projeksjonene gir en éndimensjonal attenueringsprofil av skiven. Ved hjelp av en datamaskin integreres informasjonen fra en rekke slike profiler, og et snittbilde kan konstrueres, figur 7.

Fordelene med denne teknologien er mange og store. For det første kan systemet registrere intensitetsforskjeller 100 ganger bedre enn røntgenfilm. Kontrastoppløsningen er således uovertruffen. En kreftsvulst, som kan ha ca. 2 % større attenuasjon enn



**Figur 7.** CT-bilde av hjernen. Den lyse ovalen til høyre er en blødning. (Fra Pettersson, Eglund, Sigfússon, Skjennald og Standertskjöld-Nordenstam (red.): Nordisk lärobok i radiologi. Studentlitteratur, Lund, 1993.)

det omkringliggende vevet, vil p.g.a. bakgrunnsattenuasjon fra det over- og underliggende vevet i stråleretningen bare kunne avbildes med ca. 0,2 % ekstra sverting på filmen ved vanlig røntgenfotografering, og dette er naturlig nok vanskelig å oppdage. Med CT-teknologien vil imidlertid slike små forskjeller kunne oppfanges. Videre er en CT-avbildning geometrisk korrekt, hvilket ikke er tilfelle ved konvensjonell røntgen der objektets utstrekning i stråleretningen gjør at deler nær røntgenkilden (en punktkilde) avbildes med en større forstørrelse enn deler nærmere filmen.

Den romlige oppløsningen i et CT-bilde er imidlertid ikke så god: Hver "pixel" i bildet kan dekke opptil 1 $mm^2$. En annen ulempe er at bildekvaliteten er svært følsom for bevegelser av pasienten under eksponeringen. Hjerteslag, åndedrett osv. kan således forvanske opptaket av CT-bilder.

## Røntgendiagnostikk i et samfunnsmedisinsk perspektiv

Akkurat som andre typer ioniserende stråling, har røntgenstråling biologiske konsekvenser for celler som

den absorberes i. Årlig utføres i overkant av 600 røntgenundersøkelser pr. 1000 innbyggere i Norge. I noen land, som Belgia og Japan, er tallet omtrent dobbelt så høyt. Ikke alle røntgenundersøkelser gir samme dosebelastning. Undersøkelse av tarmregionen gir de største dosene, mens tannlegerøntgen gir de minste. Røntgenundersøkelser utgjør ca. 15 % av den årlige stråledosen til gjennomsnittsnordmannen. Resten stammer fra kosmisk stråling, fra radioaktive stoffer vi får inn i kroppen gjennom maten, stråling fra berggrunn og byggematerialer, og sist, men ikke minst, fra den radioaktive gassen radon som finnes i de fleste boliger og som gir oss en betydelig stråledose til lungene.

I og med at enhver røntgenundersøkelse gir pasienten en stråledose, og enhver stråledose sett fra et strålevernperspektiv kan innebære en helserisiko (om enn liten), er det viktig at røntgenundersøkelser brukes med fornuft og at dosene holdes så små som mulig uten at informasjonsverdien reduseres. Gevinsten ved en røntgenundersøkelse må alltid oppveie den prinsipielle helserisikoen som undersøkelsen innebærer. Avveininger av denne typen har bl.a. ført til at foreslåtte masseundersøkelser (såkalt "screening") av landets kvinnelige befolkning for å kunne oppdage brystkreft på et tidlig stadium, er blitt utsatt fordi undersøkelser tyder på at risikoen kan være større enn gevinsten for kvinner under 50 år.

Brukt på fornuftig måte er røntgenstrålingen fortsatt, 100 år etter oppdagelsen, et av de viktigste hjelpemidlene legevitenskapen har til rådighet.

## Litteratur


1. DiSantis, D.J. and D.M. DiSantis: *Wrong Turns on Radiology's Road to Progress.* Proceedings of the Twenty-Ninth Annual Meeting of the National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiation science and societal decision making, ed. L.A. Sagan, (1994)
2. Henriksen, T., F. Ingebretsen, A. Storruste, T. Strand, T. Svendby og P. Wethe: *Stråling og helse (2. utgave).* Fysisk institutt, Universitetet i Oslo, (1995)
3. Jacobson, B.: *Medicin och teknik.* Studentlitteratur, Lund, (1987)
4. Larsen, J.L.: *Moderne billeddiagnostikk av hjernen.* Naturen nr. 4, s. 157–162, (1995)
5. Lindegaard-Andersen, A. og L. Gerward: *Opdagelsen af de Röntgenske stråler for 100 år siden.* Kvant nr. 2, s. 9–12, (1995)
6. Mould, R.F.: *A history of X-rays and radium.* IPC Business Press Ltd, (1980)


∞

# Fra strålebiologiens historie

*Johan Baarli* *

## Innledning

Inntil røntgenstrålingen ble oppdaget hadde man i strålebiologien hovedsakelig studert biologiske virkninger av lys. Det oppsiktsvekkende ved røntgenstrålingen var gjennomtrengningsevnen. Den passerte alle slags objekter, også de helt ugjennomsiktige, og kunne gi opplysninger om hvordan disse var inni; men den kunne ikke merkes med sansene på noen måte. Denne egenskapen vakte stor interesse, og spørsmålet var hvilke virkninger denne umerkbare strålingen kunne ha på det levende.

Det tok ikke lang tid før leger begynte å bruke den nyoppdagede strålingen til å undersøke benbrudd og andre innvendige skader. Oppdagelsen skulle vise seg å bli revlusjonerende innen medisinsk diagnostikk.

Året etter Röntgens oppdagelse, i 1896, fant Becquerel radioaktiviteten: stoffer i naturen som sendte ut gjennomtrengende stråling som liknet på røntgenstrålingen.

Mange av dem som var beskjeftiget med røntgenstråling og strålingen fra radioaktive stoffer,

*Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

opplevde alvorlige hudforbrenninger, særlig i ansiktet og på hendene. De kunne få håravfall og til dels store sår. Skadene utviklet seg først etter en tid, og de viste en langsom og vansklig tilheling. Ingen mistenkte selve røntgenstrålingen i første omgang, eller strålingen fra det radioaktive stoffet, for å være årsaken. De trodde mer på ultrafiolett lys fra apparatene og bakterier drevet inn i huden av de nye strålene. Men i 1896 fant Elihu Thomson, ved gjentatte eksponeringer av sin egen lillefinger, at det var røntgenstrålingen selv som var årsak til de skadene han fikk. Store smerter i fingeren, opphovning, stivhet, erytema og blemmer var resultatet[1,2].

I de 100 årene som er gått siden Röntgens oppdagelse, er det publisert i overkant av 100 000 vitenskapelige avhandlinger om biologiske og medisinske effekter av ioniserende stråling. Dette har gitt oss betydelige kunnskaper om hvordan det levende reagerer på denne strålingen.

Strålebiologien er et fagområde hvor det meste av det grunnleggende i naturvitenskapen inngår. Foruten strålefysikk, atom- og molekylærfysikk, inngår alle sider av biologien. Videre kommer de medisinske spørsmålene om det levende vevs egenskaper og organenes funksjoner og samspill inn. I denne fremstillingen kan det bare bli gitt et svakt glimt av dette store, mangesidige og spennende fagområdet.

## Tidlige erfaringer

Allerede i slutten av januar i 1896, mindre enn en uke etter at Røntgen holdt sin forelesning i Wurzburg i forbindelse med oppdagelsen året før, ble en brystkreftpasient som hadde fått tilbakefall etter operasjonen, strålebehandlet i Chicago. Behandlingen ble etterfulgt for flere pasienter, og med lovende resultat. Etter hvert ble også strålingen fra radiumpreparater tatt i bruk i betydelig grad.

De første stråleskadene rammet særlig radiologer, hospitalpersonell og forskere. De alvorligere skadene resulterte i at brannsårene utviklet kreft, og i 1904 kom det første kreftdødsfallet etter store eksponeringer over flere år. Dette ble etterfulgt av flere "røntgenmartyrer", og et minnesmerke over dem er reist utenfor Hamburg i Tyskland[1].

I 1901 ble det vist eksperimentelt at røntgenstrålingen kunne drepe dyr og dyrefostre. Det ble også vist at strålingen drepte bakterier og mikroorganismer, og reduserte spireevnen til frø. Man fant at cellene var mest følsomme i den aktive delingsfasen.

En epokegjørende strålebiologisk observasjon ble gjort i 1928 etter studier som går tilbake helt til 1903. Da ble det oppdaget at froskeegg befruktet med røntgenbestrålte spermceller utviklet abnormaliteter. I 1927 hadde H. J. Muller oppdaget at røntgenstrålingen induserte mutasjoner hos bananfluer. Oppdagelsen var enestående i en tid da DNA-molekylet, bæreren av arveegenskapene, enda ikke var identifisert. 15 år senere ble den samme biologiske effekten av kjemiske forbindelser påvist. Denne oppdagelsen, gjort av Muller, skapte stor uro omkring den genetiske betydningen av ioniserende stråling, en uro som har vart helt opp mot de senere år.

Optimismen over mulighetene med røntgenstrålingen og radioaktiviteten overgikk frykten for skadene. I små mengder ble strålingen ansett for å være helsebringende, være i stand til å kurere og lindre mange lidelser. Kildevann med radium, og steder med mye radioaktivitet i luften, såkalte "spas", ble anbefalt mot reumatisme bl.a. Flere vansklig identifiserbare lidelser ble behandlet med røntgen eller radium[3].

Det ble også vist at strålingen kunne stimulere vekst og derved være til stor nytte, samtidig som den kunne fremkalle kreft og genetiske forandringer. Strålebruken økte på, men det ble samtidig gjort forsøk på å begrense den i diagnostikk og ved behandling. Det utviklet seg et verneaspekt for stråling.

Utviklingen fortsatte i en periode med store epokegjørende fremskritt i stråle- og atomfysikken. Dette influerte sterkt på den strålebiologiske forskningen, og det ble utviklet målemetoder for stråling, dosimetri, som gjorde det mulig å studere hvordan de fysiske prosessene i det biologiske materialet førte til de reaksjonsmønstre som fulgte. Forskningen gikk over fra å beskrive de observerte effektene av stråling til å gjøre kvantitativ analyse av relasjonene mellom de fysiske vekselvirkningene og den biologiske responsen[2]

## Dosimetri

Det første dosesystemet var basert på hudreaksjoner. Bestrålingen ble gradert etter hvor sterk rødligheten (erytem) på huden fremstod. Men huddosen ble fort oppgitt til fordel for måling av ionedannelsen i luft. Denne ble første gang foreslått i 1905, og som enhet adoptert i 1928. Doseenheten fikk navnet *røntgen*, eller bare $R$, etter oppdageren. En $R$ ble definert som *"den strålemengde som produserer en elektrisitetsmengde på én esu (elektrostatisk enhet) i 1 cm$^3$ luft ved normal temperatur og normalt trykk (NTP)."* Enheten er fortsatt i bruk til bestemmelse av eksponeringsdoser.

En viktig videreutvikling skjedde i 1935 da Bragg–Gray-relasjonen kom. Det ble nå klarere at de bio-

logiske effektene var mer resultater av den absorberte stråleenergien enn av eksponeringsdosen. Bragg–Gray-relasjonen viste at det var mulig å bestemme denne ut fra måling av ionene i et hulrom i vevet. Det kreves ca. 33 eV for å danne et ionepar, noe avhengig av gassen. Dermed var doseenheten *rad* etablert; *1 rad = 100 erg/g*. I SI-systemet har enheten fått navnet *Gray (Gy)*; *1 Gy = 1 J/kg (= 100 rad)*.

For stråling med en annen romlig fordeling av ionene enn røntgenstråling, ble det observert større biologiske virkninger, f.eks. for $\alpha$-stråling. Begrepet *RBE (Relative Biological Efficiency)*, ble da innført. *RBE angir forholdet mellom dosene for samme biologiske effekt for stråling av forskjellig slag.* Denne observasjonen ble det tatt hensyn til teoretisk ved parameteren *LET (Linear Energy Transfer), energiavsetningen langs partikkelbanen, i keV/$\mu$.* LET-verdien er en korreksjon til doseverdien, som gjør det mulig å sammenlikne de biologiske virkningene av forskjellige slag ioniserende stråling. Avhengig av LET-verdiene skilles det mellom tungt ioniserende og lett ioniserende stråling. Røntgenstrålingen er lett ioniserende og brukes som referanse[4].

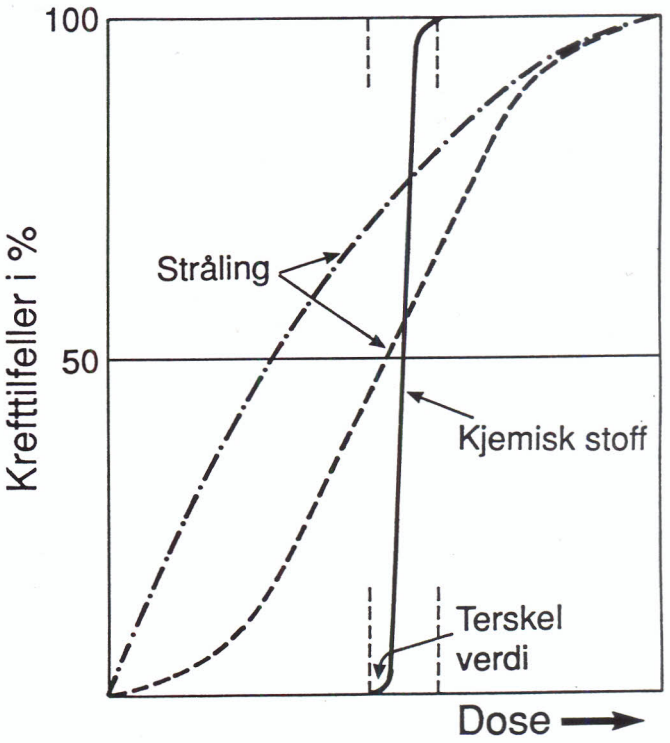
Studier viste at reaksjonene ble betydelig redusert når samme dose enten var fraksjonert eller fordelt over tid. Reduksjonen kunne komme opp i faktorer på 10–15, mest ved små doser av lav LET-stråling. Dette reiste spørsmål ved selve dosedefinisjonen. Den absorberte dosen ble derfor forsøkt erstattet med en stokastisk dosestørrelse, definert som den spesifikke energien som ble avsatt. Den spesifikke energien tar hensyn til de enkelte ionisasjons- og eksitasjonsprosessene som statistiske størrelser. Ved små doser og lave dosehastigheter, blir ikke alle cellene eller de vitale cellekomponentene i et vev berørt, og vevspesifikke egenskaper kommer dermed bedre frem i analysene.

De radioaktive stoffene som forurenser ved at de går inn i metabolismen og over i det biologiske materialet, identifiseres enkelt og måles med høy presisjon. Stråledosene fra disse fastlegges lett[3,4].

## Effekter av store doser

Den store effektiviteten til ioniserende stråling er bemerkelsesverdig. En så liten dose som energien i en kopp varm te tilført i form av ioniserende stråling, ca. 4 Gy, vil gi like store muligheter for et menneske til å dø som til å overleve. Dosen svarer til en temperaturøkning i kroppen på 0,0014 °C.

De akutte effektene viser seg hos det bestrålte individet, og graden av skade øker med økende dose (figur 1). Seneffektene opptrer med en viss sannsynlighet i en større gruppe av biologiske systemer. Ved senskader vil skaden som regel være den samme uavhengig av dosen, mens sannsynligheten vil øke med dosen. De akutte effektene krever doser over en viss størrelse og avhenger av det biologiske systemet.




**Figur 1.** Eksempler på doseeffekt-relasjoner for stråling og for et kjemisk giftstoff. Mens et kjemisk giftstoff har en terskelverdi for effekten det forårsaker, kan effekten av stråling variere over et stort doseområde og i tillegg være avhengig av det biologiske systemet.

Nedenfor er det angitt noen doser (i Gy) som er tilstrekkelige til å drepe de nevnte organismene.

Mennesker og dyr: 5–10
Innsekter: 10–1000
Bakterier: 500–10 000
Sporer: 10 000–50 000
Virus: 10 000–200 000

Ved doser fra noen Gy og oppover, viste ofrene fra Hiroshima- og Nagasaki-bombingen i 1945, de 29 som døde etter Tsjernobyl-ulykken i 1986, og andre stråleulykker, at dødsårsaken av strålingen kan variere sterkt. Mens de fleste av ofrene i Tsjernobyl døde av hudforbrenninger etter $\beta$-strålingen fra det radioaktive nedfallet, døde bombeofrene av stråleskader i benmargen, det bloddannede organet.

Et eksempel på en akutt stråleeffekt er en lokal bestråling som fører til nekrose, ødelagt vev. De stråleskadde og gjenlevende cellene vil da ikke være i stand til å generere nok nye celler til at vevet kan erstattes. Er dosen stor nok, vil organet eller organismen dø.

Stråleterapien er basert på akutte stråleeffekter. Det mest interresante ved kreftterapien er at det er mulig å kurere en kreftsykdom med stråling. Man er i stand til å drepe kreftvevet hvor det forekommer i kroppen og bevare funksjonen til det omkringliggende friske vevet. Dette kan oppnåes med sterkt varierende metoder både når det gjelder doser, fraksjoneringer og strålearter. Men på tross av iherdig søken, er det hittil ikke funnet biologiske egenskaper hos kreftcellene som er spesielle slik at stråleeffektene i disse kunne komme mer til syne.

Strålebehandling har vist at oksygenfattige celler (i kreftvev med dårlig blodtilførsel) har en betydelig mindre følsomhet enn normale celler for lav-LET-stråling. Behandlingen er derfor forsøkt utført under trykk av oksygen i håp om at kreftcellene skulle ta opp noe av oksygenet og dermed bli mer strålefølsomme. Høyere LET-stråling er mer effektiv for de oksygenfattige cellene, og kreftterapien har i noen grad dradd nytte av dette ved å bruke nøytroner, protoner og $\pi$-mesoner i behandlingen.

Studier av oksygenets betydning i cellebiologien har gitt en bedre forståelse av hvor i celledelingsfasen strålevirkningene er mest effektive, og dette har videre hatt betydning for den kjemoterapeutiske kreftbehandlingen.

Det er foretatt eksperimentelle studier av akutte stråleskader i stort omfang. Disse har vist at den biologiske kompleksiteten og variabiliteten er for stor til at det har vært mulig å stille opp en enkel generell teori for de biologiske virkningene som har kunnet verifiseres eksperimentelt[5,6,7].

## Effekter av små doser – strålevern

Strålebiologien fikk et kraftig oppsving etter oppdagelsen av fisjonsprosessen og utviklingen av atomenergien. De kunstige radioaktive stoffene aktualiserte spørsmålet om de biologiske virkningene av disse. Et gigantisk forskningsprogram på dette området ble en del av Manhatten-programmet, USAs utvikling av atombomben. Stor vekt ble lagt på metabolske, miljømessige og andre virkninger av de radioaktive forurensningene. En enorm mengde med data ble skaffet til veie om hvordan de enkelte radioaktive stoffene inngikk i de biologiske miljøene, og om mekanismene bak virkningene. LD-50-dosen (50 % overlevelse) for dyr av forskjellige slag, og stråleeffekter på en rekke organer og levende objekter, ble bestemt. Selv om overlevelseskurvene for celler ved store doser hadde en eksponetiell form, viste de en "skulder" ved de lavere dosene. Dette er en indikasjon på reparasjon av stråleskadde celler.

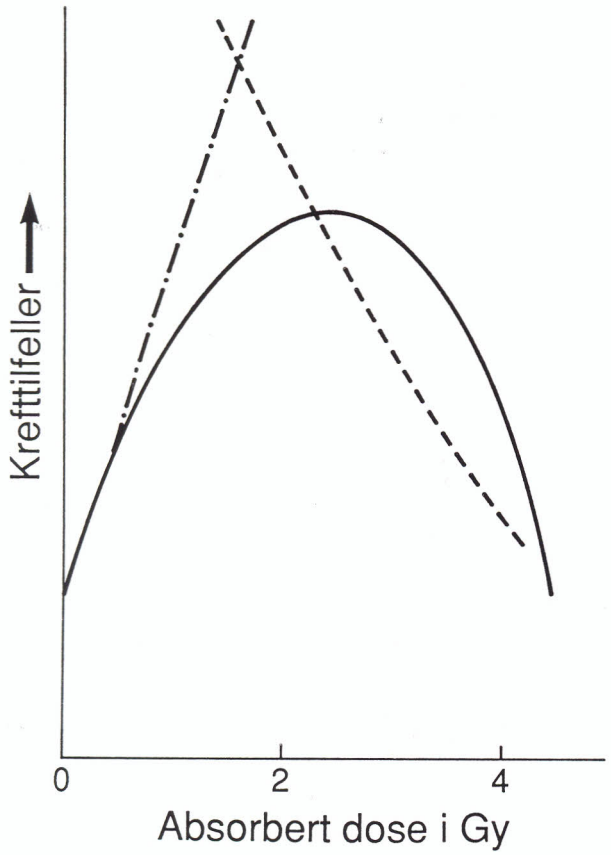
Cellebiologien viste at detaljene i reaksjonsmønstrene var vansklige å forstå, spesielt ved mindre doser og dosehastigheter. Grunnleggende forskning innen genetikk med store eksperimenter, påviste stråleinduserte mutasjoner hos mus, foruten fosterskader hvor den største strålefølsomheten var begrenset til perioden med organutvikling. Utenom denne er strålefølsomheten betraktelig redusert. Kreftdannelse ble antatt å ha sitt opphav fra mutasjon i en celle.

På 1950-tallet skjedde det viktige oppdagelser som skulle få stor innvirkning på den videre utviklingen i strålebiologien. Watson og Cricks oppdagelse av DNA-molekylets oppbygning var én, en annen var Puck og Elkinds arbeide med levende cellekulturer. Oppdagelsene ga muligheter til dypere innblikk i det grunnleggende biologiske. Celledød og celleskader, kromosomskader og forandringer av vekst og påvirkning på celledelingsprosessene, foruten latente skader som fremkommer etter en tid, ble studert. I den fundamentale forskningen ble frie radikaler indusert i vann og i biomolekyler. Trådbrudd i DNA-molekylene og mekanismen bak disse, bød på store vitenskapelige utfordringer[4].

I en periode på 30–40 år etter krigen, var det en økende oppmerksomhet mot vern av det genetiske materialet. Det ble satt opp et regelverk for bruk av stråling og radioaktivitet basert på de tilgjengelige kunnskapene. På grunn av mangel på data for de laveste dosene, ble slike fremskaffet ved ekstrapolasjon fra store doser med observerbare effekter. Kreftdannelse var en av disse.

Et par eksempler viser noen av problemene i samband med kreftdannelse. Figur 2, viser hvordan kreftdannelsen varierer med dosen, og figur 3 viser dosehastighetens innvirkning på ovariekreft hos mus. Ved små dosehastigheter er sannsynligheten for kreftdannelse betydelig redusert i forhold til sannsynligheten ved store. Dette faktum berører noe av det fundamentale i kreftdannelsen idet både en biologisk reparasjonsprosess og en stråleindusert forsinkelse av celledelingsprosessen, er til stede. En nedre doseterskel for strålevirkninger er imidlertid enda ikke fastslått selv om de minste dosene kan bestemmes med stor nøyaktighet.

I løpet av de 50 årene som er gått siden atombombene ble sluppet over Hiroshima og Nagasaki, er de 75 000 stråleeksponerte som overlevde bombene blitt studert inngående og sammenliknet med en kontrollbefolkning på 35 000. Det er påvist en økende kreftforkomst for dem som fikk stråledoser over 100 mGy, men ikke for dem som fikk lavere doser. 100 mGy svarer til ca. 25 ganger årsdosen i naturens




**Figur 2.** Sannsynligheten for kreftdannelse som funksjon av dose. De prikkede kurvene viser at strålingen dels forårsaker celledød og dels forandringer i kreftcellene. Disse prosessene til sammen gir den opptrukne kurven.

eget miljø. Sammenlikningen halter noe siden effekten av akutte bestrålinger er mange ganger større enn når dosene er fordelt over tid.

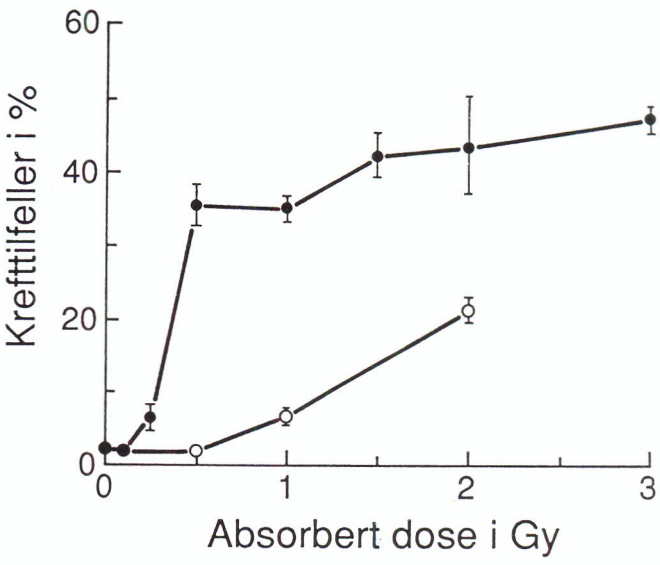
Fosterskader opptrer først etter noe større doser til tross for at stråleføIsomheten for de udifferensierte cellene i fostre er stor. Men disse cellene blir meget effektivt erstattet med intakte celler når de blir skadet eller drept, en viktig og normal prosess i all fosterutvikling. Undersøkelse av fosterskader etter Hiroshima- og Nagasaki-bombingen viste at slike skader inntrådte først for doser over 100–190 mGy. Mentale forandringer krevde doser over 500–990 mGy.

Stråleinduserte genetiske skader basert på 6 forskjellige arvelige lidelser, er også studert. Fra 40 års oppfølging av mellom 10 000 og 30 000 barn av foreldre eksponert for stråledoser på i middel 200 mGy, sammenliknet med 10 000 til 45 000 kontrollbarn, er det ikke funnet tegn til stråleinduserte genetiske skader. Dette tyder på at slike forandringer ikke forekommer så lett som man tidligere antok; og slike skader er aldri påvist hos mennesker[5,6,7]

## Bakgrunnstråling og senskader

De laveste stråledosene vi har med å gjøre skyldes naturens egen bakgrunnstråling som gir oss fra omkring 1 mGy til nesten 10 mGy pr. år, avhengig av hvor vi bor. Dette strålemiljøet består både av lette og tungt ioniserende komponenter, og alt liv har utviklet seg og levd i dette miljøet i mer enn en milliard år. I lys av den inngående kjennskapen vi har til denne naturlige strålingen, er det lite vi vet om de biologiske virkningene av den.

Siden 1972 har det pågått en helseundersøkelse av 80 000 innbyggere i China i to geografisk svært like områder som har en årlig doseforskjell på en faktor 3. Data fra perioden 1970 til 1989 har vist at kreftdødligheten var lavere i området med høy bakgrunnstråling enn i det med lav. Det samme var tilfelle for leukemi (blodkreft), mens det ikke var noen forskjell i forekomsten av skjoldbruskkjertelkreft i de to befolkningene. Derimot ble det observert en gjennomgående høyere frekvens av kromosombrudd i lymfocyttene (blodlegmene) hos kvinnene fra området med høy bakgrunnstråling, men slike kromosombrudd kan også forårsakes av andre påvirkninger, f.eks. av kjemiske stoffer.




**Figur 3.** Dosehastighetens innvirkning på dannelsen av ovariekreft hos mus. Den øverste kurven er for 450 mGy/min, den nederste for 83 mGy/dag.

Kreft er en av de alvorligste former for stråleskade. Den antaes å utvikle seg i flere steg, ikke bare fra trådbrudd i DNA-molekylet, men fra et biologisk miljø med mange aktører som innbefatter enzymer. Ved små bestrålinger kommer oppbyggingen av det biologiske

materialet inn i billedet med de vekslende strukturene og dynamikken i celledelingsprosessene. Produktene som strålingen forårsaker i det levende, er av samme slag som de som forefinnes der naturlig. Men mengden av dem er selvfølgelig viktig. Kompleksiteten i dette er stor og forståelsen enda mangelfull.

For de stråleutsatte fra Hiroshima og Nagasaki som fikk doser lavere enn 100 mGy, viser observasjonene klarere og klarere at dødsraten pr. år er lavere fra 50-årsalderen av enn i den almindelige befolkningen. Den samme tendensen er observert for 1203 kvinner som malte radium på klokkeskiver i England og for 1262 som gjorde det samme i USA. Hos alle disse ble det funnet en overhyppighet av kreft, mens dødsraten av andre grunner var betydelig redusert. For leukemi hos de bombeutsatte i Japan, er det påvist omtrent halvparten av forventet forekomst ved doser omkring 80 mGy. Resultatene synes å vise en helsefremmende virkning av den ioniserende strålingen ved slike lave doser[5,7].

Allerede i 1955 ble det funnet at en daglig stråledose på 1 mGy til mus økte levetiden fra 684±14 til 783±14 dager. I den senere tid er det funnet at kromosombrudd i blodceller reduseres med en faktor 2 dersom disse på forhand har fått en liten stråledose. Eksemplene tyder på at ved små doser kan det være en hormonliknende stimulanseffekt (hormese), en positiv påvirkning, til stede.

Noe av det aller viktigste som har skjedd i de senere årene er oppmerksomheten på virkningene av de laveste stråledosene. Disse viser at en biologisk tilpasningsevne og en stråleindusert forsvarsevne mot skader fra ytterligere bestrålinger, er til stede. Ut fra slike forhold er det ikke å utelukke at små stråledoser kan ha en positiv biologisk betydning. Dette synes å gå frem av de mange epidemiologiske data som foreligger, og styrkes ytterligere av strålebiologiske studier[8,9].

## Avslutning

Strålebiologien har i de 100 år som er gått siden oppdagelsen av den ioniserende strålingen, bidratt til en dypere forståelse av oppbyggingen og virkemåten av det biologiske materialet som utgjør alt liv. Utvikling og bruk av atomenergi har forårsaket en radioaktiv forurensning som vi har kunnet bestemme meget nøyaktig. Stråledosene er bestemt med stor presisjon også for naturens egen stråling som livet på jorden er utviklet i. 100 år med ioniserende stråling og inngående studier av den, har gitt betydelige kunnskaper om strålingens skadelige virkninger ved doser over 100 mGy; men for lavere doser har vi bare fragmentarisk forståelse av hvordan det biologiske reagerer. Dette gjelder også for naturens eget strålemiljø hvor dosene er bortimot 100 ganger mindre. Mye tyder på at det ikke kan utelukkes at de små stråledosene representerer mer et gode enn et skadepotensial. Selv etter 100 år med røntgenstråling og radioaktivitet, er de aller fleste uten fortrolighet med denne strålingen, hovedsakelig på grunn av manglende kunnskap om strålingens virkninger. Men denne strålingen er tross alt en del av vårt naturlige miljø.

## Litteratur


1. Bleich, A.R.: *The Story of X-rays from Röntgen to Isotopes.* Dover Publication, Inc. New York, USA (1960)
2. Kathren, R.L. and Ziemer, P.L., eds: *Health Physics: A backward Glance.* Pergamon Press, New York, USA (1980)
3. Macklis, R.M.: *The Great Radium Scandal.* Sci. Am. **269** , 78–83 (1993)
4. Henriksen, T., Ingebretsen, F., Storruste, A., Strand, T., Svenby, T. og Wethe, P: *Stråling og helse.* Fysisk institutt, Universitetet i Oslo (1995)
5. Kondo, S.: *Health Effects of Low-level Radiation.* Kinki University Press, Osaka, Japan (1993)
6. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR: *Sources and Effects of Ionizing Radiation.* Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York (1993)
7. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR: *Sources and Effects of Ionizing Radiation.* Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York (1994)
8. Hole, E. O.: *Effekten av ioniserende stråling: Pliteligheten av risikoberegninger ved lave doser.* Fra Fysikkens Verden, **55** Nr. 2, 43–50 (1993)
9. Baarli, J.: *De lave strledosene. Kan de være helsefremmende?* Tidsskr. Norsk Lægeforening, **115**, 977–979 (1995)


∞

# Röntgens oppdagelse – opptakten til moderne fysikk og kjemi

*Jon Gjønnes* * *og Berit Fjærtoft* * *

*Through the recent development in physics... a connection between physics and chemistry has been created which does not correspond to anything conceived of before.*

*Niels Bohr, 1920*[1]

Wilhelm Conrad Röntgens iakttagelse en sein novemberkveld i 1895 av fluorescens fra en skjerm belagt med barium-platinocyanid, ble skjellsettende i naturvitenskapen. De nye "X-strålene" fascinerte vitenskap og menigmann, og fikk umiddelbar praktisk betydning. De revolusjonerte medisinsk diagnose, og diffraksjon av røntgenstråler kom til å bli det viktigste eksperimentelle verktøy i en ny vitenskap: strukturforskning. Røntgenspektrene spilte en sentral rolle i utviklingen av den kvanteteoretiske atommodellen, og de utnyttes stadig mer i kjemisk analyse gjennom et mangfold av spektroskopiske teknikker.

Sammen med J.J. Thomsons arbeider over katodestråler som førte fram til påvisning av elektronet i 1897, danner Röntgens oppdagelse opptakten til moderne fysikk og kjemi. Deretter gikk det slag i slag med eksperimentelle og teoretiske arbeider som viste at materien er bygd opp av atomer som blir holdt sammen av elektroner. Man forsto etter hvert at røntgenstrålene er kortbølget elektromagnetisk stråling. Beviset kom i 1912, med von Laue, Friedrich og Knippings påvisning av røntgendiffraksjon fra krystaller. W.H. Bragg viste så hvordan diffraksjonsmønstrene fra krystaller kunne brukes til å bestemme atomanordningen i faste stoff, og han grunnla derved en ny vitenskap: krystallografi eller strukturforskning. Den ble fundamentet for den moderne, atomære beskrivelse av stoffenes fysiske og kjemiske egenskaper. Betydningen av struktur var til en viss grad erkjent tidligere, og et geometrisk strukturbegrep var etablert i organisk kjemi gjennom strukturformlene, som var foreslått av Kekule og andre for de organiske molekyler.

*Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

**Farmasøytisk institutt, Universitetet i Oslo

## Kjemi og geometri

I uorganisk kjemi førte strukturforskningen til nye begrep og forestillinger som ikke straks ble godtatt av alle. I boka "The development of X-ray analysis"[2], siterer Lawrence Bragg et innlegg fra en kjemiprofessor som beklaget seg over at molekylbegrepet ble borte i ionekrystaller, og over at strukturforskere blandet seg inn i kjemien:

*Prof. W.L. Bragg asserts that "In sodium chloride there appear to be no molecules represented by NaCl. The equality in number of sodium and chlorine atoms is arrived at by a chessboard pattern of these atoms: it is a result of geometry and not of a pairing-off of the atoms.*

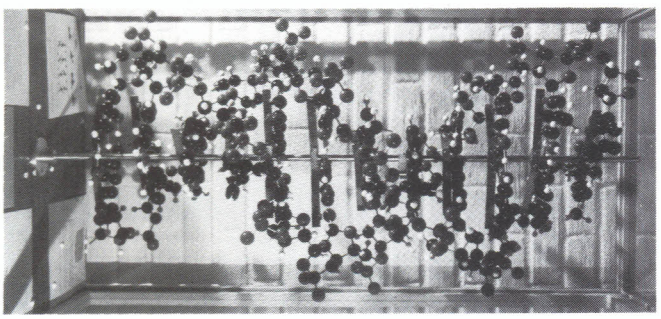
*This statement is more than 'repugnant to common sense'... Chemistry is neither chess nor geometry, whatever X-ray physics may be. Such unjustified aspersion of the molecular character of our most common condiment must not be allowed any longer to pass unchallenged... It were time that chemists took charge of chemistry once more and protected neophytes against the worship of false gods."*

*H.E. Armstrong, Nature 1928*

Men trass i denne skepsis til geometri fikk *struktur* stadig større betydning i beskrivelsen av materien. I årene som fulgte, ble krystallstrukturen til et stort antall uorganiske stoff bestemt ved hjelp av røntgendiffraksjon. Derved fikk man et detaljert bilde av atomavstander og naboforhold. Sammen med kjennskapet til atomenes elektronstruktur, førte disse undersøkelsene fram til en fundamental innsikt i de bindingskrefter som holder atomene sammen i ulike typer av faste stoff. De kvalitative forestillingene om kjemiske bindingstyper er i store trekk beholdt, og utdypes i våre dager gjennom omfattende kvantemekaniske beregninger og stadig mer presise strukturundersøkelser der man kartlegger også bindingselektronenes romlige fordeling.

## Biologiske makromolekyler

Strukturbestemmelsen av de biologiske makromolekyler står nok som det mest fascinerende gjennombruddet innen strukturforskningen – enestående også ved at det representerer forskergruppers målrettete innsats gjennom en generasjon. Sammenhengen mellom form og funksjon har stått sentralt i beskrivelsen av fundamentale biologiske sammenehenger, fra Linnés klassifikasjon av planter via Darwins evolusjonsteori og fram til våre dagers molekylærbiologi. Strukturbestemmelsen av arvestoffet, DNA (se figur 1), revolusjonerte genetikken for vel 40 år siden, og utviklingen etterpå har ført til at studier av livsprosesser på molekylært nivå blir ufullstendige uten forankring i en tredimensjonal strukturbestemmelse av de molekyler som inngår.



**Figur 1.** Modell av et DNA-molekyl, oppstilt ved Statens institutt for folkehelse. (Foto P.T. Zagierski.)

To engelske forskergrupper hadde hovedrollen: den ene i Cambridge, sentrert om M.F. Perutz, og den andre sentrert om Dorothy Hodgkin i Oxford. Hodgkin begynte allerede i 1934 da hun fikk de første milligrammene av rent krystallinsk insulin som hun samlet røntgendata for. Det skulle vise seg å gå nesten 40 år med samarbeid mellom forskere over hele verden, før insulinstrukturen var bestemt i detalj i 1972. Perutz var student i 1938, da han gjorde de første røntgendiffraksjonsopptakene fra proteinet hemoglobin, som inneholder 12 000 atomer. Til da hadde man bare bestemt strukturer med under hundre atomer i enhetscella. Men man mente at det var nok tilgjengelig informasjon til å løse strukturen *if only a way of deciphering it could be found*[2]. Det tok nær 25 år å finne ut det: i 1961 ble den første proteinstrukturen, myoglobin, publisert. Perutz og Kendrew delte Nobelprisen i kjemi i 1962. Dorthy Hodgkin fikk den i 1964, for bl.a. strukturarbeidene over vitamin $B_{12}$. Hun var også den første som studerte virus med røntgendiffraksjon og viste at de kunne krystalliseres.

## Røntgenspektroskopi

Noe av det første Röntgen merket seg med de nye strålene var at absorpsjonen av disse var ulik absorpsjonen av synlig lys – absorpsjon av røntgenstråler avhenger bare av de atomer som finnes i stoffet, ikke av hva slags forbindelser de inngår i. Den karakteristiske røntgenstrålingen kommer fra – og absorberes i – atomenes indre elektronskall, som er lite påvirket av de kjemiske omgivelser. Derfor er røntgenspektroskopi egnet til analyse av sammensetning, og til å klarlegge den indre struktur av atomene. I årene 1913–14 gjennomførte H.J.G. Mosely omfattende studier av røntgenspektre fra forskjellige elementer og viste at bølgetallet (dvs. energien) fulgte samme lovmessighet som for de optiske spektrene fra hydrogenatom, f.eks. for K-linjene:

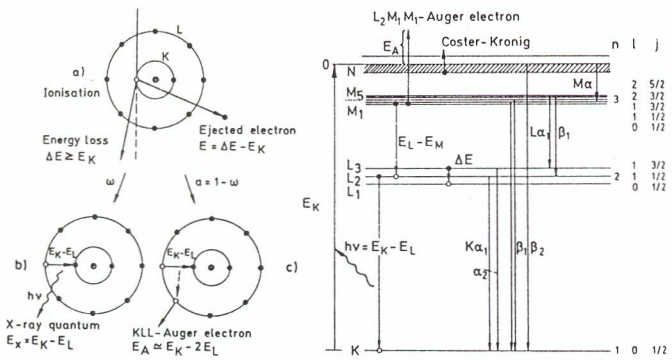
$$E_K = R(Z-1)^2(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}),$$

dvs. at den modell av elektronstrukturen som Bohr hadde foreslått for hydrogenatomet kunne utvides til atom med flere elektroner. Denne sammenhengen førte fram til forklaringen på hvordan det periodiske system er bygd opp, og pekte mot den seinere kvantemekaniske beskrivelse av elektronstrukturer i atomer, molekyler og faste stoff med én-elektronorbitaler. En annen spektroskopisk oppdagelse, Compton-effekten, d.e. energi- eller frekvensendringen ved *inkoherent* røntgenspredning, fikk en sentral plass i 1920-årenes diskusjoner om kvantemekanikk[1]. Denne effekten ble oppfattet som bevis på fotonets partikkelkarakter. I dag vil vi vel heller se den uelastiske spredningen, eller Compton-spredningen, som en konsekvens av den kvantemekaniske beskrivelse av objektets variasjoner i rom og tid, dvs. som en del av en intensitetsfunksjon av fire spredningsvariable: impuls- og energioverføring.

### Spektroskopi fra indre skall

Røntgenspektrene har få linjer og er lite påvirket av atomets omgivelser, derfor er de ideelle for analyse av kjemisk sammensetning. Særlig etter at man i 1960-årene fikk effektive, energidispersive detektorer, er røntgenspektroskopi blitt stadig mer utbredt. Emisjonspektrene kan produseres ved fluorescens (sekundær røntgenstråling) idet objektet bestråles med røntgen av høy energi. En annen måte er å nytte en elektronstråle som kan fokuseres på et lite område og gi informasjon om den lokale sammensetning. Det er prinsippet for røntgen mikrosonden (XRMA), der en kan analysere en massiv prøve med en romlig opplsøning på under en $\mu$m. Fra en tynn prøve kan en få vesentlig

bedre oppløsning, ned til under en nanometer. En kan også sende røntgenstråler inn og måle spektret av de elektroner som kommer ut (X-ray Photon Spectroscopy); mens andre teknikker er basert på elektroner inn og elektroner ut med måling av energiendring, eller av energien til sekundære elektroner, f.eks. de såkalte Auger-elektroner. Disse prosessene er illustrert på figur 2. Spektrene kan gi informasjon om sammensetning, bindingsforhold og omgivelser til de ulike atomslag i en prøve, og utfyller et bilde av strukturen til faste stoff.




**Figur 2.** Ionisasjon og emisjonsprosesser i indre elektronskall: a) ionisasjon ved et elektron, b) emisjon av røntgenkvant, c) emisjon av Auger-elektron, d) energiskjema med K,L og M-energier, samt Auger- og Coster–Kronig-prosesser[3].

## Norsk strukturforskning

Norske forskere har spilt en fremtredende rolle innen strukturforskning. Vår eneste nobelpristaker i naturvitenskap er Odd Hassel som fikk kjemiprisen i 1969 for strukturkjemiske studier. De omfattende strukturbestemmelser av sykliske organiske forbindelser som Hassel og hans medarbeidere utførte, bidro i stor grad til å utvikle begrepet *konformasjon* som er sentralt i moderne strukturkjemi. Men enda høyere rager kanskje innsatsen til V.M. Goldschmidt, som av mange regnes som en av grunnleggerne av den uorganiske strukturkjemi. De omfattende krystallografiske og spektroskopiske studier han ledet i 1920- og 30-årene, bl.a. av innskuddsmetallenes kjemi, bidro i høy grad til forståelsen av samspillet mellom atomers elektronkonfigurasjon og deres bindingsforhold, krystallstruktur og egenskaper i uorganiske kjemiske forbindelser. Begges innsats var knyttet til tverrvitenskapelige miljøer: Goldschmidt var geolog og mineralog, og ble en pionér i uorganisk og fysikalsk kjemi. Hassel utviklet et nært samarbeid med fysikere innen røntgen- og elektrondiffraksjon, og preget derved en generasjon av norske strukturforskere.

## Referanser

1. Pais, A.: *Niels Bohrs Times.* Clarendon, Oxford (1991)
2. Bragg, W.L.: *The Development of X-ray Analysis.* Bell & Sons, London (1975)
3. Reimer: *Transmission Electron Microscsopy.* Springer, Berlin (1989)

∞

# Materialinnsyn med røntgen

*Emil J. Samuelsen* *

## Røntgenkjelder

W. C. Röntgen oppdaga røntgenstrålinga medan han eksperimenterte med katodestrålerør. Høg spenning, tusenvis av volt, vart sett over eit glasrør med lågt gasstrykk. Ved katoden, den negative elektroden, blir elektron frigjorde og får gassen til å lyse bleikt. Katodestråling vart oppdaga i 1858. I 1897 fann J. J. Thomson at katodestrålar var partiklar med negativ ladning (elektron). Røntgenstrålinga oppstår ved den andre elektroden, anoden, når elektrona blir bremsa ned idet dei treffer anodematerialet (bremsestråling), eller også ved at dei eksiterer atoma i anodematerialet, som deretter de-eksiterer og sender ut karakteristisk stråling. Bølgjelengdene er i området 0,5–2 Å (0,05–0,2 nm).

*Institutt for fysikk, NTH, Trondheim.

Seinare, i 1913, fann W. D. Coolidge at utbyttet av røntgenstråling vart betre om han la ein glødetråd i katoden. Dagens laboratorie-røntgenrør er av Coolidge-typen. Eit typisk røntgenrør tåler ein effekt på opptil 1,5 kW. Ved høgre belastning tar anodematerialet til å smelte, jamvel om ein kjøler det. I eit moderne "roterande anode"-anlegg kan ein komme opp i effektar på 50 kW ved å la anodematerialet vere ein sylinder som roterer med 5000 rpm eller så. Roterande anodar er ein nødvendig del av røntgenutrustinga i laboratorium for materialstudium. Eit slikt anlegg kom i drift ved NTH i 1994.

Ei av dei mest avanserte røntgenkjeldene er synkrotronstråling. Ein elektronstraum i ein "lagringsring" blir halden inne i ringen ved akselerasjon i magnetfelt. Når elektronenergien er i GeV-området ($10^9$ eV), dvs. at elektronfarten kan vere oppe i $0,99999999c$, eller praktisk talt lik lysfarten, vil akselerasjonen i magnetfelt som er av storleik 1 tesla gi ut elektromagnetisk stråling med energiar i området 5–300 keV. Det svarar til bølgjelengder i området 0,2–0,004 nm. Utbyttet kan forsterkast mange tiarpotensar ved at ein nyttar magnetar i form av lange multipolsystem, såkalla "undulatorar" og "wigglerar". Som ein kanskje forstår av desse namna vil elektronstrålen bli sett i kraftige skakingar og bølgjerørsler, og det gir den svære utbyttevinsten.

Ved 100-årsjubileet for oppdaginga av røntgenstrålinga er Europa i leiinga på området synkrotronstråling for materialforsking, gjennom *European Synchrotron Radiation Facility*, ESRF, i Grenoble, figur 1. ESRF vart opna i september 1994 til bruk for forskarar frå dei tolv medlemslanda, der Norge er med. Utnyttinga er gratis for medlemmene; jamvel reise- og opphaldsutgifter blir dekte av ESRF. Brukarane må sjølvsagt søkje om å få tildelt stråletid på førehand. Spesialiteten til ESRF er høg brillians, basert på bruk av undulatorar og wigglerar, og på nyutvikla røntgenoptisk utstyr og registreringsutstyr. ESRF markerte 100-årsjubileet for røntgenstrålinga med å lyse ut ein konkurranse for europeisk ungdom om røntgen i framtida.

## Røntgen i materialforsking

I 1895 kunne ikkje Röntgen, eller nokon annan, ane kor stor betydning røntgenstrålane skulle få for innsyn i materiala sin indre struktur og oppbygging. Pionérane såg vel først og fremst betydninga for medisinen. No, 100 år etterpå, er vi fullt i stand til å verdsette det innsynet røntgenstrålane har opna til den mikroskopiske verda i materiala, og vi kan ha von

**Figur 1.** Det europeiske synkrotronstråleanlegget ESRF i Grenoble.

om ein gong kanskje å forstå og meistre materialeigenskapane heilt ut.

Informasjon om materiale ved røntgen får ein med tre hovudmetodar: *diffraksjon, spektroskopi og avbilding* (topografi, tomografi og mikroskopi).

Utviklinga har i stor grad følgt utviklinga av måtane å framskaffe røntgenstrålane på, og dei siste framstega har nær tilknyting til bruk av synkrotronrøntgen. Ein må likevel ikkje konkludere med at all framtidig bruk av røntgen må vere synkrotronbasert; svært mange ordinære oppgåver kan framleis løysast med laboratorieutstyr. Også dette utstyret blir vidareutvikla slik at nye felt kan takast opp. Det er særs viktig at småskalaforsking heime går hand i hand med storskalaforsking ute. Godt heimeutstyr er elles ein føresetnad for å kunne vere med ute ved storinstallasjonane.

## Røntgendiffraksjon

### Strukturbestemming

Når monokromatiske bølgjer vekselverkar med objekt med ein innebygd periodisk struktur, observerer ein fenomenet diffraksjon. Frå observert diffraksjon kan ein difor hente informasjon om periodiske strukturar.

Diffraksjon av røntgenstrålar frå krystallinsk materiale vart oppdaga av M. von Laue, W. Friedrich og P. Knipping i 1912. Denne oppdaginga varsla innleiinga til ei særs betydningsfull utvikling. Gjennom 20- og 30-åra vart krystall- og molekylstrukturar bestemte for uorganiske og mange organiske materiale og mange mineral. Etter 1945 heldt denne utviklinga fram, og meir og meir kompliserte organiske stoff vart kartlagde og strukturbestemte. Spesielt verd å nemne (jamvel om biologiske materiale til vanleg ikkje blir rekna med

i materialfysisk samanheng) er bestemminga av strukturar av biologisk viktige stoff som hemoglobin, DNA-molekylet og protein, noko som har hatt avgjerande betydning for utviklinga av biovitskapane.

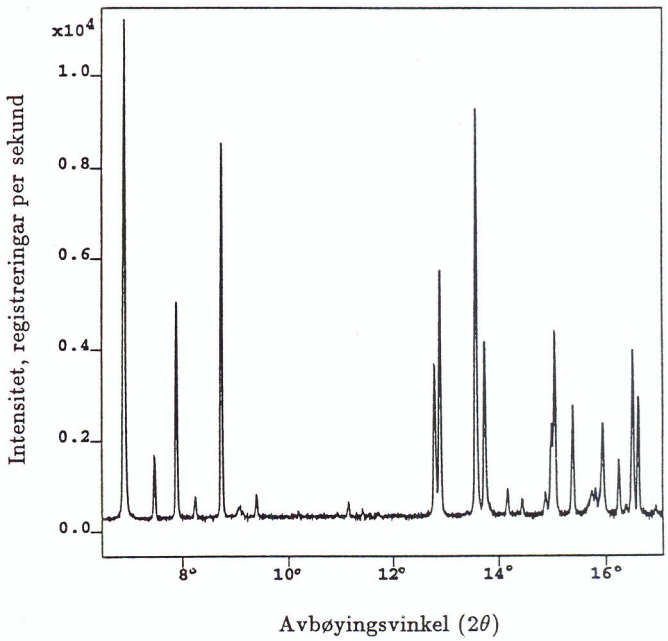
I materialfysisk samanheng er strukturinformasjonen viktig, fordi det er nære samanhengar mellom eigenskapane til materiala og den strukturen dei har i molekylskala. Såleis er supraleiingsevne i keramiske stoff knytt til førekomst av sjiktstrukturar av kopparoksid. Elektrisk leiing i organiske stoff har samanheng med trådformige strukturar. Kjemisk katalyseevne er ofte knytt til førekomst av opne kanalar i krystallgitret, slik som i zeolittar. Mange av desse eigenskapane kan framodlast gjennom at ein påverkar og styrer strukturen under framstillinga av materialet.

Å bestemme krystall- og molekylstruktur av ordinære krystallinske materiale ved hjelp av røntgendiffraksjon, er langt på veg rutinearbeid i dag og blir i stor grad utført med tradisjonell instrumentering. Synkrotronstråling i struktursamanheng er først og fremst av betydning for nye, meir krevjande problemstillingar. Røntgendiffraksjon må stundom supplerast med nøytron- og elektrondiffraksjon.

## Identifikasjon

Røntgendiffraksjon blir brukt rutinemessig for identifikasjon og analyse av materiale. Bakgrunnen for dette er at kvart materiale har sin karakteristiske krystallstruktur som gir opphav til eit karakteristisk diffraksjonsmønster. Slike mønster er katalogiserte for hundretusenvis av stoff (tilgjengelege på CD-rom), og dataprogram er også tilgjengelege som kan analysere observerte diffraksjonsopptak for å bestemme samansetjinga av ei prøve. Prøvene må føreligge i pulverform (polykrystallinsk).

Røntendiffraksjon for å fastleggje ordinære strukturar og for identifikasjon, er lite krevjande og kan utførast med laboratorieutrusting. Slik bruk av røntgen var på 1960- og 1970-talet dominerande, og blir enno av mange feilaktig oppfatta som synonym med røntgenforsking. Ein kan vel seie at fram til 1970-åra var det ein viss stagnasjon i bruken av røntgen i materialsamanheng. Dette bildet er blitt totalt endra sidan 1975, ikkje minst gjennom utviklinga av røntgenstråling frå synkrotronar. Også dei klassiske bruksområda for røntgen har utvikla seg under inspirasjon av den nye tida: Pulverdiffraksjon, tidlegare berre brukt for identifiseringsføremål, er såleis utvikla til å bli eit særs slagkraftig verkty for å kartleggje fine detaljar i strukturen til materiala på grunn av den mykje større oppløysingsevna synkrotronstrålinga opnar for. Figur 2 viser eit pulverdiffraktogram for ein zeolitt. Det viser intensitet av spreidd røntgen som funksjon




**Figur 2.** Røntgendiffraksjonsmønster av ein zeolitt (intensitet mot avbøyingsvinkel i forhold til inngangsstråle, $2\theta$) med høg vinkeloppløysing. (Tatt ved sveitsisk–norsk strålelinje ved ESRF, av Helmer Fjellvåg, UiO.)

av vinkelen i forhold til innfallsretninga. (Zeolittar er silikatmineral av stor teknisk betydning for reinsing av gassar og katalysering av kjemiske reaksjonar m.m.)

## Høge trykk

Studie av materiale under ekstremt høge trykk er no mogleg med røntgendiffraksjon. Trykk opp i gigapascal-området er samanliknbare med verdiar som materiala er utsette for i det indre av jorda, og materialoppførsla under slike forhold har stor interesse for geologar. Trykkeksperiment krev robuste celler, så massive at vanleg røntgen ikkje kan trengje gjennom. Men høgenergetisk røntgen, eit par hundre keV, har ikkje slike problem og er eit vilkår for den nye utviklinga.

## Tidsstudiar

I materialforskingssamanheng har bruk av synkrotronstråling opna for at ein kan følgje prosessar og forandringar i sann tid. Kjemiske reaksjonar og faseendringar ved temperatur- og trykkendring skjer oftast for snøgt til å kunne følgjast med laboratorierøntgen. Men ei undulatorlinje ved ESRF har så høg strålestyrke at registreringa av spreidd intensitet kan gjennomførast på 1/1000 sekunds skala, og reaksjonane kan følgjast direkte.

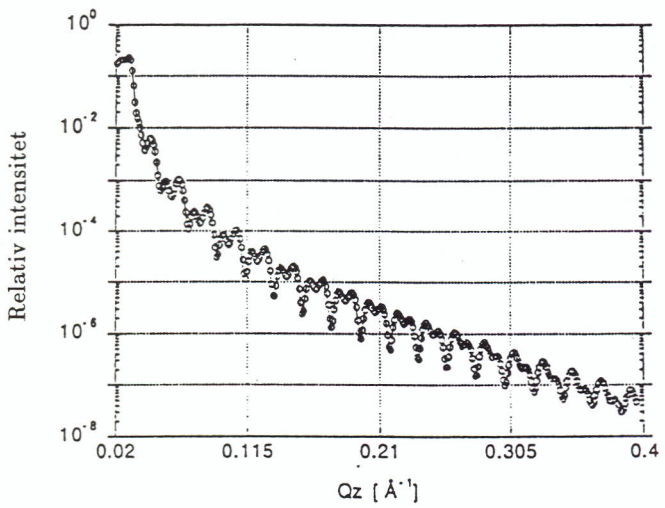
## Overflatestruktur

Sterkare strålekjelder og godt einsretta strålar har gjort det mogleg å skilje diffraksjon frå dei øvste atomlaga ved ei overflate frå diffraksjon frå resten av prøva. Ein

sender strålen inn nesten parallelt med overflata; vinkelen er berre eit par tiandedels gradar. Under så små vinklar blir strålen totalreflektert, men først etter å ha trengt eit fåtalls atomlag ned i materialet. Diffraksjonen frå dette laget kan så registrerast, og struktur og morfologi kartleggjast. Såleis kan ein fastleggje atomær "ruhet" i overflata frå røntgenintensitetsfordelinga loddrett på overflata. Det første norske eksperimentet ved ESRF var eit overflatediffraksjonseksperiment.

Overflatediffraksjon er særs viktig når ein tenkjer på at mange tekniske prosessar er knytte til overflater: korrosjon, kjemisk katalyse og adsorpsjon av gassar. Konkurrerande metode er elektrondiffraksjon (kjend under akronyma LEED og HREED); men røntgen har dei fordelane at ein ikkje treng arbeide i høgvakuum og at analysen av observasjonane er enklare.

Figur 3 viser refleksjon av røntgen som funksjon av vinkel i forhold til overflata (parameteren $Q_z$) frå eit tynt lag av ei blanding av to polymerar. Der er to periodar å sjå i intensitetsvariasjonen, som viser at dei to polymertypane er av ulik tjukkleik.




**Figur 3.** Reflektivitet av røntgen frå eit tynt lag av ein blandingspolymer (PS/PBMA) som funksjon av vinkel $\theta$ med overflata ($Q_z = 4\pi \cdot sin\theta/\lambda$). Merk at intensiteten går over seks tiar-potensar! Dei to periodane viser to tjukkleikar i laget. (Tatt ved strålelinja TROIKA ved ESRF.)

Overflatediffraksjon med røntgen, ofte i kombinasjon med reflektivitetsstudiar, kan også nyttast til å studere væskeoverflater og -grenseflater. Såleis har ein påvist at i væsker av stavforma molekyl er det ein tendens for dei molekyla som utgjer grenseflata til å orientere seg parallelt med denne flata.

### Mikrodiffraksjon

Ein kan avgrense og fokusere strålane med nyutvikla røntgenoptikk slik at tverrsnittet av strålen får ein diameter som er mindre enn ein mikrometer ($10^{-6}$ m). Med slike mikrostrålar kan små prøver studerast med diffraksjon. Det kan vere individuelle korn i ei legering, eller enkelte fibrillar i ein tekstil eller ein polymer. Andre eksempel er sferulittar, dvs. små krystallinske område i konstruksjonsplastar som polypropylen. Enkelte stoff er slik at det er vanskeleg å gro krystallar av dei som er store nok for ordinære røntgendiffraksjonsstudium, men krystallar som er mikrometerstore kan lagast. I slike tilfelle kan ein utføre mikrodiffraksjon på enkeltkrystallar. Den første norske utnyttinga av mikrodiffraksjon var i eit diplomarbeid ved NTH siste vinter.

### Småvinkeldiffraksjon

Dette er ein utnyttingsmåte av røntgen (og av nøytronstrålar) for å kartleggje materialdetaljar som er større enn molekyldimensjonar, men mindre enn dei ein kan observere med lys, dvs. av storleik $10^{-8} - 10^{-7}$ m. Eksempel er inhomogenitetar i sementar, keramar og plastar (nokre titals nanometer store), porar og veggar i porøse stoff, og partiklar i mikroemulsjonar (som såpe og olje i vatn). Dette er eit storleiksområde der ingen andre gangbare målemetodar finst. Det har opna for innsikt i nye sider ved eigenskapar til kompliserte materiale. Inhomogene materiale av dei typane som nettopp vart nemnde, var inntil nyleg lite freistande studiefelt for materialforskaren. Synkrotronrøntgen har akkurat dei rette eigenskapane for småvinkel-diffraksjon, nemleg den store graden av parallellitet kombinert med god intensitet.

### Diffraksjon frå atomkjernar

Ein kan velgje energiar for røntgenstrålane frå ein synkrotron slik at dei har resonans med atomkjernar i prøva. Eit godt eksempel er 14,4 keV-resonansen i $^{57}Fe$, Møssbauer-resonansen. Røntgen med denne energien vil vekselverke med atomkjernen, ulikt klassisk røntgen som vekselverkar med elektronsystemet.

## Røntgenspektroskopi

Medan diffraksjon gir informasjon om struktur og morfologi av materiale, kan ein med spektroskopi hente informasjon om energitilstandar som materialet kan ha.

### Absorpsjons- og fluorescensspektroskopi

Frå røntgenstrålingas barndom har ein nytta røntgen til å ta opp absorpsjonsspektrum for å bestemme

tilstandane til dei indre elektrona i atoma i materialet. Røntgenspektret for alle grunnstoffa er for lengst kartlagt, og denne kunnskapen kan nyttast til analyse av ukjende materiale. I slekt med dette er røntgenfluorescens-spektroskopi, der sekundærrøntgen blir sendt ut under bestråling med hard røntgen. Dette er klassiske område for utnytting av røntgen. I ein modernisert form blir det utvikla ein spesiell strålelinje for mikrofluorescens-analyse med ultratynne strålar ved ESRF.

### Røntgen-elektronspektroskopi

Når røntgen med tilstrekkeleg høg kvanteenergi blir send inn mot eit materiale, kan elektronsystemet i materialet bli så sterkt påverka at det gir frå seg elektron. Ein kan så analysere energi- og retningsfordelinga for elektrona som blir frigjorde, og få informasjon om kva tilstandar elektronsystemet hadde. Ved å nytte energiveik røntgen, som berre trengjer seg så vidt inn i overflata til materialet, kan ein spesielt studere overflatetilstandane. Denne typen spektroskopi er grunnstoffspesifikk, og kan også vise ulikskapar mellom ulike bindingstilstandar som atoma inngår. Spektroskopien har fleire ulike namn etter bruksområdet: XPS, ESCA, Auger o.a. Det finst spesielle synkrotroninstallasjonar for røntgen-elektronspektroskopi. I Lund i Sverige, har dei ein som heiter MAX-lab (Ein Super-MAX er undervegs), og ein del norske materialforskarar nyttar han til overflateforsking.

### EXAFS

Dette er ein enkel og slagkraftig spektroskopisk metode for å få informasjon om den næraste naboskapen til atoma i eit materiale. Akronymet står for *Extended X-ray Absorption Fine-structure Spectroscopy*. I dei enklaste formene er eksperimenta endeframme å utføre: Ein lagar ei tynn prøve av materialet, og måler absorpsjonen av røntgenstrålinga som funksjon av bølgjelengd eller energi. Ein må då ha tilgang på "kvit" røntgen, altså eignar synkrotronstråling seg best. Absorpsjonsmønstret viser ein karakteristisk kant for kvart element i prøva, svarande t.d. til K-nivå i atomet. Men i tilknyting til kanten finn ein (i fast og flytande fase) at der er ein finstruktur, ein oscillasjon av absorptansen med røntgenenergien. Effekten har sitt opphav i at naboatoma reflekterer ein del av elektrona som blir frigjorde i absorpsjonsprossen, og interferens oppstår som fører til oscillasjonen. Ved ein relativt grei analyse av spektret kan informasjon om atomavstandar og koordinasjonstall hentast ut. Metoden krev ikkje at materialet er krystallinsk, og ettersom absorpsjonskantane for alle grunnstoffa er kjende, kan ein velje det grunnstoffet ein vil lære naboskapen til. Desse to faktorane er EXAFSs store styrke.

### Comptonspreiing

Comptonspreiing er ein uelastisk prosess mellom røntgenfoton og atomære elektron i materialet. I strukturdiffraksjonseksperiment er denne prosessen berre til ugagn som må korrigerast bort. Men i moderne materialforsking er Compton-prosessen ein nyttig reiskap for å gi informasjon om elektrontilstandane, spesielt ved at impulsfordelinga av elektrona i metall og halvleiarar kan bestemmast. Det er omtrent det næraste ein kan kome i å skaffe eksperimentell informasjon om elektronet sin tilstandsfunksjon.

### Uelastisk røntgenspreiing

Ved Compton-spreiinga er energiutvekslinga mellom stråle og elektronsystemet i prøva i 10–100 eV-området. Ein har alltid vore klar over at det også skjer ei energiutveksling med dei termiske rørslene i materialet, gittersvingingane eller fonona. Men det dreier seg om 0,01–0,5 eV, og så små endringar er det ugjerleg å observere direkte med røntgen som har energiar rundt 10 keV! Til no har spektroskopi for å studere gittersvingingar berre kunna bli gjort med nøytronstrålar og laserstrålar. Men synkrotronstrålinga har opna nye vegar også på dette feltet. Ved å drive røntgenoptikken til si ytterste grense for yting, har ein ved ESRF oppnådd stor nok energi-oppløysing til at dei første resultata har kunna offentleggjerast. Ein har såleis slått fast at det i (flytande) vatn kan gå lyd av to slag, med svært ulik fart. Ordinær lyd i vatn har ein fart på 1470 m/s. Den "nye" lyden er snøggare, med ein fart på 3200 m/s både i lett og i tungt vatn, og er såleis ikkje knytt til rørsler i hydrogenatoma aleine, slik ein først trudde. (Deuterium i tungt vatn er dobbelt så tungt som hydrogen i lett vatn.)

## Avbilding

### Røntgenfotografering

På same måte som ein kan studere kroppsdelar ved røntgengjennomlysing, kan ein og studere materiale. Røntgenkontroll av sveisesaumar er eit velkjent eksempel. Men gjennomlysing (røntgenfotografering) er ikkje eit spesielt viktig bruksområde, jamvel om det er av stor praktisk betydning i materialteknikk.

Ein har no lært å "rund-gjennomlyse" det ein vil sjå inn i. Ved etterpå å sambehandle absorpsjonsdata frå gjennomlysing i alle retningar sirkelen rundt, får ein eit tredimensjonalt bilde av objektet, eit tomogram. Tomografi blir også brukt medisinsk.

**Topografi**

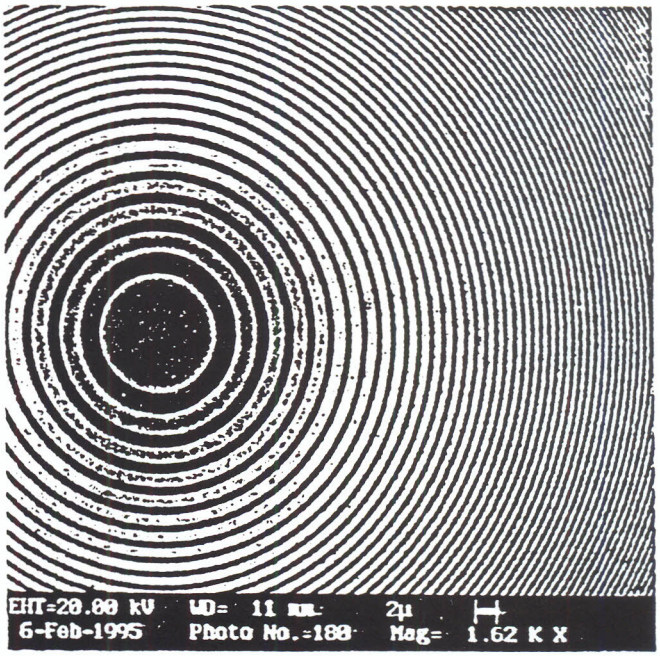
Topografi er ein avbildingsteknikk for å kartleggje defektar i ein-krystallisk materiale. Teknikken baserer seg på godt kollimerte strålar, og på at defektar fører til lokale avvik frå Bragg-diffraksjonsvilkår. Teknikken er veletablert, og kan utnyttast både i laboratorieoppstillingar og ved synkrotronanlegg. Fordelane ved høg intensitet er openberre: Ein kan kartleggje mykje snøggare (eksponeringstider i millisekundområdet), og ein kan nytte mikrostrålar som gir stor romleg oppløysing. I tillegg kan ein velje bølgjelengdområde eller nytte fleire bølgjelengder samtidig. Korte bølgjelengder blir nytta for å studere tjukke prøver.

**Litografi**

Røntgen blir mykje nytta for å teikne inn i halvleiarmateriale dei mikroskopiske mønstra ein no nyttar i dei mest avanserte elektroniske kretsbrikkane. Dette krev ultraskarpe strålar, som vi alt har nemnt, og avansert røntgenoptikk for å styre strålane.

**Mikroskopi**

Røntgenmikroskopet eksisterer. I materialteknologisk samanheng blir iblant elektronstrålemetodar og røntgenmetodar samanlikna, og det heiter seg gjerne då at røntgen er best for diffraksjonsstudiar, men har den ulempa at denne strålinga ikkje kan fokuserast, og derfor at avbilding med røntgen i eit mikroskop er umogleg. Slik er det ikkje. Med litografiske metodar er ein i stand til å lage Fresnel-ringmønster i ein-krystallinsk silisium med så stor presisjon at desse Bragg–Fresnel-soneplatene kan nyttast som linser og fokusere røntgenstrålane. Figur 4 viser eit forstørra bilde av ei slik plate litografert inn i silisium. Bruk av ei slik plate, saman med at synkrotronrøntgen er koherent over fleire mikrometer distanse, gjer avbilding mogleg. Men oppløysingsevna er dårlegare enn for elektronmikroskopet; ein kan avbilde detaljar ned til 30 nm, jamført med 0,2 nm i høgoppløysings elektronmikroskop. Dei to metodane er komplementære. Røntgenmikroskopet krev ikkje vakuum på prøvematerialet, og ein kan studere biologisk og organisk materiale, også materiale i væsker. Det er venta at det også kan utviklast holografi med røntgen, noko som m.a. kan nyttast til tredimensjonal avbilding.




**Figur 4.** Ei Bragg–Fresnel soneplate innteikna litografisk i ein-krystallinsk silisium. Høgda på rillane er 2 mikrometer. Dei ytterste rillane er 400 nm vide og totalopninga er 200 mikrometer. Plata kan fokusere røntgen til 1 mikrometer ved ein avstand på ca. 60 cm.

## Litteratur

1. Winick, H.: *Synchrotron Radiation.* Scientific American, 72–81, Nov. (1987)
2. Hazen, R.M.: *Perovskites (strukturar).* Scientific American, 52–61, June (1988)
3. Howells, M.R., J. Kirz and D.Sayre: *X-ray Microscopes.* Scientific American, 42–48, Febr. (1991)

∞

# Røntgenbilder av universet

*Øystein Elgarøy* *

## Innledning

Gjennom årtusener var det *lyset* fra Solen, planetene, stjernene og de andre himmellegemene som påkalte interesse. De astronomiske teleskopene ble utviklet nettopp med sikte på å trekke informasjon fra himmellegemenes stråling i det optiske området.

En bemerkelsesverdig utvikling fant sted i begynnelsen av 1930-årene da Karl Guthe Jansky i USA, for første gang observerte radiobølger fra universet. Man kunne da tale om at det var åpnet et nytt "vindu" mot universet. På grunn av atmosfæren og ionosfæren, er det bare elektromagnetisk stråling i det optiske området og noe av radiobølgeområdet som slipper ned til jordoverflaten.

Under siste verdenskrig ble det gjort viktige fremskritt innen elektronikk og radioteknikk. Etter krigen ble flere forskere som hadde arbeidet på disse områdene pionérer innenfor radioastronomien som skjøt frem med stor fart. Mange av observasjonsresultatene var oppsiktsvekkende; det er tilstrekkelig å nevne kvasarene og pulsarene som ble oppdaget henholdsvis i begynnelsen av og slutten på 1960-tallet.

Etter som mulighetene til å redusere eller helt unngå atmosfærens absorberende virkning ved å plassere instrumenter i ballonger, raketter og til slutt i satelitter, ble bedre, ble det mulig å utføre observasjoner i stadig nye bølgelengdeområder. En serie "astronomier" vokste frem: gamma-astronomi, røntgenastronomi, ultrafiolett astronomi og infrarød astronomi – i tillegg til den optiske astronomien og radioastronomien. En slik oppdeling er på mange måter kunstig. Riktignok har hver "astronomi" sin egenart: røntgenstråling f.eks. kommer fra energirike prosesser (høye temperaturer) mens infrarød stråling kommer fra kaldere gasser og himmellegemer. Men mange himmellegemer stråler over enorme bølgelengdeområder. Man kan derfor mer dekkende snakke om en eneste "multibølgelengde-astronomi". For å forstå mest mulig av det univers som omgir oss, er det viktig å ta alle bølgelengder i bruk og integrere informasjonen fra hvert enkelt område.

*Institutt for teoretisk astrofysikk, Universitetet i Oslo.

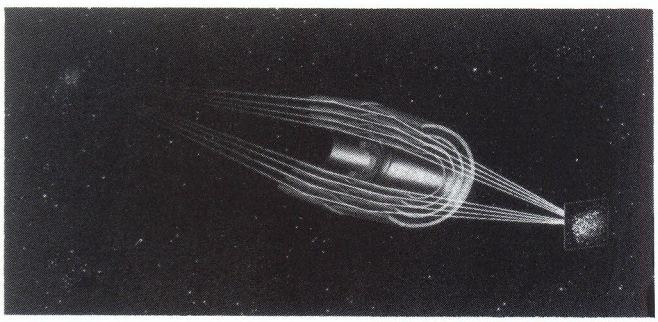
## Røntgenobservatorier

Fotoner med bølgelengde fra 0,1 til 100 Å (energier mellom ca. 100 keV og ca. 0,1 keV) regnes til røntgenområdet. Strålingen kan ha et kontinuerlig spektrum, slik som bremsestråling og synkrotronstråling. *Bremsestråling* oppstår når en ladet partikkel bremses opp, akselereres eller forandrer retning og sender ut energi i form av elektromagnetisk stråling. Betegnelsen brukes vanligvis om stråling som sendes ut av en sky av ladede partikler som kolliderer med hverandre. I astrofysisk sammenheng forekommer en slik situasjon i en varm gass. *Synkrotronstråling* oppstår når en ladet partikkel, slik som et elektron, beveger seg med relativistisk hastighet i et magnetfelt. Partikkelen tvinges da til å spinne rundt de magnetiske feltlinjene – og synkrotronstråling oppstår. Synkrotronstrålingen er alltid lineært polarisert. Man observerer også linjestråling som skyldes at gassen inneholder mange atomer av en bestemt type som er i stand til å sende ut fotoner på bestemte frekvenser i røntgenområdet. Kilden stråler derfor ekstra sterkt på disse frekvensene. Linjestrålingen kan være overlagret et kontinuerlig spektrum. Analogt kan man ha absorpsjonslinjer i spektrene som skyldes økt absorpsjon på disse bestemte frekvensene.

Den første observasjon av røntgenstråling fra universet ble gjort i 1948, da man registrerte røntgenstråling fra Solen. Siden den tid har observasjonsutstyret undergått en teknisk revolusjon, og de vitenskapelige resultatene er blitt tilsvarende mer betydningsfulle. Alle de tidlige røntgenobservasjonene ble gjort med instrumenter som ikke kunne danne bilder. Senere røntgenteleskop, som avbildet de emitterende områdene, gjorde røntgenastronomien virkelig interessant.

De store optiske teleskopene er speilteleskop. I røntgenområdet kan man også bruke speil, men da må strålingen falle inn under en svært liten vinkel med speilflaten for ikke å bli absorbert. Røntgenteleskopene blir derfor temmelig forskjellige fra de optiske. For å oppnå størst mulig speilende flate, kan man "pakke"

speil med avtagende diameter sammen til en enhet (figur 1). Som detektorer benyttes forskjellige typer tellerør, halvledere, CCD-brikker, mikrokalorimetre og annet.



**Figur 1.** Fokusering av røntgenstråler ved hjelp av "pakkede" sylindriske speil. Et slikt system er brukt i ROSAT.

For astronomene er det viktig at instrumentene har høy følsomhet, god vinkeloppløsning og stor spektral oppløsningsevne. Når det gjelder følsomhet og vinkeloppløsningsevne, kan røntgenobservatoriene nå sammenlignes med de optiske. Men med hensyn til spektral oppløsning, ligger de fortsatt langt etter. Pågående utviklingsarbeid av f.eks. mikrokalorimetre, kan føre til en radikalt bedret situasjon m.h.t. spektral oppløsning.

*Viktige røntgenobservatorier:*

Einstein Observatory, 1978–1981, NASA
Exosat, 1983–1986, ESA
Rosat (Roentgen satellite), 1990– , tysk/NASA
Yohkoh, 1991, japansk
Asca, 1993, japansk
Spektrum-X/gamma, 1996, europeisk/amerikansk
AXAF, 1998, NASA
XMM, 1999, ESA

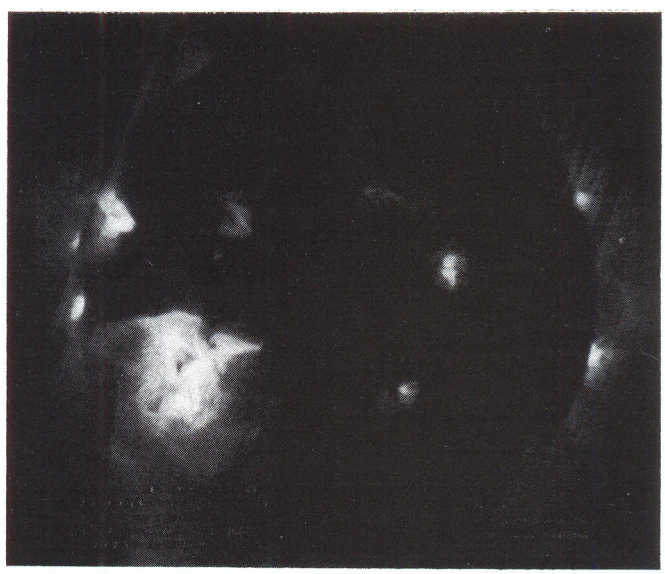
De to som er nevnt sist, er meget store og kostnadskrevende og vil overgå alle tidligere røntgensatellitter.

## Røntgenuniverset

På grunn av sin nærhet er Solen den sterkeste røntgenkilden på himmelen. Mens Solens stråling i det optiske området er ganske konstant over tid, varierer røntgenemisjonen med en faktor ca. 10 mellom solflekk minimum og maksimum. Dette henger sammen med at den optiske strålingen kommer fra den relativt stabile, synlige overflaten, fotosfæren (densitet $10^{-8}$ g/cm$^3$), mens røntgenstrålingen kommer fra koronaen, Solens ytterste lag (densitet $10^{-17}$ g/cm$^3$), som viser betydelige variasjoner under solflekkperioden. For Solens totale utstråling betyr imidlertid variasjonene i røntgenområdet svært lite. Solens (totale) luminositet er $L = 3,86 \cdot 10^{33}$ erg/s, mens luminositeten i røntgenområdet bare er rundt $10^{27}$ erg/s.

I det optiske området er Solen fullstendig dominerende på himmelen, den slår ut den sterkeste stjernen (Sirius) med en faktor ti milliarder ($10^{10}$). Slik er det ikke i røntgenområdet hvor Solen bare er dobbelt så sterk som røntgenkilden Sco-X1. Sammenlignet med mange andre himmelobjekter er Solen en lite effektiv produsent av røntgenstråling.

Temperaturen varierer fra sted til sted i Solkoronaen, men ligger gjennomgående fra én til noen millioner grader. Aktive områder (over og rundt solflekkgrupper med sterke magnetfelt) kommer tydelig frem på røntgenbilder, figur 2. I aktive områder er temperaturen og partikkeldensiteten høyere enn i omgivelsene, og de vil derfor gi forsterket bremsestråling i røntgenområdet. Under strålingsutbrudd (flares) i aktive områder, kan røntgenstrålingen øke i styrke opptil 10 000 ganger. Varigheten av slike utbrudd er fra minutter til timer. I større flares kan strålingen øke enormt over et område som strekker seg fra radiobølger til gammastråling. I tillegg sendes det ut ladede partikler med høy energi. Flares opptrer når magnetisk feltenergi omdannes til kinetisk energi ved akselerasjon av ladede partikler til høye energier. Det kan f.eks. skje når motsatt rettede magnetfelt kommer i kontakt med hverandre og magnetisk omstrukturering (reconnection) finner sted.



**Figur 2.** Røntgenbilde av Solen tatt med Yohkoh-satellittens kamera for bløt røntgenstråling.

Flares har virkninger like ut til Jorden og forårsaker bl.a. jordmagnetiske stormer og forstyrrelser i ionosfæren. Ionosfæren er av vesentlig betydning for radiobølgeforplantning over større avstander, og ioniserende

stråling (UV og røntgen) fra flares kan gjøre radiokommunikasjonen på kortbølge umulig i flere timer (short wave fade-out).

Et påfallende trekk fra røntgenobservasjonene er at de viser koronaen som bygd opp av små og store bueformede strukturer, noe som igjen henger sammen med at koronaen domineres av Solens magnetfelt. Materien følger feltlinjene. De ypperste røntgenobservasjonene av Solen i den senere tid, kommer fra den japanske Yohkoh-satelitten, som gir røntgenbilder med en vinkeloppløsning rundt 1 buesekund, og er i stand til å registrere raske forandringer.

Røntgenobservasjoner av Solen har bidratt til å gi ny kunnskap om koronaens struktur og magnetfelt, om akselerasjonsprosessene i forbindelse med flares, om solvinden og om innfangning av ladede partikler i magnetiske løkker.

Avstanden mellom Solen og de nærmeste stjernene er mer enn 300 000 ganger lenger enn avstanden mellom Jorden og Solen. Hvis disse stjernene strålte som Solen, ville fluksen her ved Jorden være svekket med en faktor mer enn $10^{11}$ sammenlignet med Solen. Med den følsomhet det tidligste observasjonsutstyret hadde, ville man da ikke engang kunne observere de nærmeste stjernene – Solen ville være i ensom majestet på røntgenhimmelen. Man kunne muligens gjøre seg håp om å observere solare røntgenstråler reflektert fra Månen, men heller ikke det lyktes i første omgang.

I 1962 skjedde noe interessant. R. Giacconi og medarbeidere monterte en proporsjonalteller på en spinn-stabilisert rakett. Mens raketten roterte, sveipet proporsjonaltelleren over himmelen i søken etter mulige røntgenkilder. Resultatet ble at man oppdaget den første røntgenkilden utenom Solen samt en diffus bakgrunn av røntgenstråling. Nye raketter førte til nye oppdagelser. Noen år senere kom de første satelitter som var instrumentert for røntgenobservasjoner, og utviklingen "tok for alvor av".

Lenge var antallet oppdagede røntgenkilder lite, og man trodde ikke at det skulle være mange flere å finne. Men naturen overgikk forventningene. I *ROSAT All Sky Survey* fra 1992, er det registrert 60 000 røntgenkilder på himmelen. Himmelen er overstrødd med røntgenkilder, slik som figur 3 viser. Utviklingen er analog med den astronomene har sett innen andre områder som radioastronomi og infrarød astronomi. Teknisk utviklingsarbeid mot stadig større følsomhet og oppløsningsevne, gir rike astronomiske gevinster. Nye røntgenobservatorier med bedre karakteristika enn ROSAT, vil føre til oppdagelsen av enda flere røntgenkilder, ny kunnskap om kildenes natur og fysikk, og kanskje hittil ukjente fenomener. Derfor er astronomene sterkt motivert for slikt arbeid og pådrivere for satsing av ressurser på det. Samtidig gis det utallige eksempler på at nyutviklet teknikk for astronomiske formål også har anvendelser på andre områder.

**Figur 3.** Røntgenopptak av et lite område ved ekliptikkens nordpol gjort med ROSAT. Overlagret en jevn bakgrunnstråling ser man flere punktkilder. De fleste av disse er kvasarer.

## Røntgenkildenes natur

Hva slags himmelobjekter skjuler seg bak de 60 000 røntgenkilder på himmelen? En grovinndeling viser at ca. tredjedelen er stjerner, mens de resterende er galakser og galaksehoper.

Antall *stjerner* som er observert med ROSAT, overstiger langt det man skulle vente hvis de hadde samme røntgenutstråling som Solen. Hvis alle stjerner strålte som Solen, ville ROSAT ha registrert stjerner ut til en avstand av ca. 30 lysår, men innenfor et slikt volum finner man bare noen hundre stjerner. Det overveldende flertall av de stellare kildene må derfor være lenger borte, og således også stråle mye sterkere enn Solen. Sterk røntgenstråling henger sammen med stor aktivitet på stjernene (analogt til, men mer utpreget enn solaktiviteten). Man kan derfor si at det er de *aktive* stjernene som dominerer i ROSAT-tellingene. Videre undersøkelser av disse stjernene vil lede til en bedre forståelse av stjernenes magnetfelt og hvorledes deres aktivitet avhenger av masse, rotasjon og alder.

Hittil har røntgenobservasjoner av stjerner bare vært utført over korte tidsrom; man har stort sett ikke mer enn enkelte "snapshots" av hvert objekt. Observasjoner over lang tid kan ventes å gi viktige resultater. I denne sammenheng kan man bare tenke på alle de interessante fenomenene som overvåkingen av Solen har gitt innsikt i. Våre kunnskaper om solflekkaktiviteten, solvinden, flares, protuberanser osv., bygger på observasjoner gjennom lange tidsrom og ved mange forskjellige observatorier. Så grundig som Solen, kan man ikke gjøre seg noen som helst forhåpninger om å observere selv et lite utvalg stjerner; men ved å ta tiden til hjelp, kan man i hvert fall gjøre situasjonen noe bedre for stjernenes vedkommende.

*Aktive galakser* tilhører de sterkeste røntgenkildene. De emitterer $10^{42} - 10^{45}$ erg/s i røntgenområdet og kan derfor registreres selv i avstander av flere milliarder lysår. Røntgen-luminositeten ligger flere størrelsesordener over den optiske. Det er forskjellige typer aktive galakser (kvasistellare objekter, radiogalakser, Seyfert-galakser og BL Lac-objekter), men det er mye som taler for at forskjellene mellom de ulike typene kan forklares ved deres orientering i forhold til oss. Aktive galakser viser variasjoner i strålingsintensiteten over så korte tidsrom som timer, hvilket betyr at kilden må være meget liten.

Det er alminnelig akseptert at det viktigste bidraget til den enorme strålingen fra aktive galakser kommer fra prosesser som oppstår når materie faller inn mot et sort hull. Da blir gravitasjonsenergi frigjort og overført til partikkelenergi og stråling. I denne sammenhengen er det tale om sorte hull med masse av størrelsesorden $10^9$ solmasser, og den massen som faller inn kan være noen solmasser per år. I en hyppig anvendt modell antas det at man har en flattrykt partikkelsky som omgir det sorte hullet. Videre utover (til en avstand på noen lys-måneder) har man en geometrisk tynn gassskive omkranset av en torus med absorberende, kjølig gass. Orienteringen av dette systemet relativt til observatøren, har betydning for hva man observerer. Når materien beveger seg nærmere og nærmere innover mot det sorte hullet, blir stadig mer energetiske fotoner emittert. Derfor må man observere i røntgenområdet når man vil studere hva som skjer meget nær det sorte hullet.

*Galaksehoper* er virkelig store objekter i universet. En hop kan inneholde hundreder eller tusener av galakser som er bundet sammen av gravitasjonen. Allerede tidlig i røntgenastronomiens historie fant man at galaksehopene er sterke røntgenstrålere, på høyde med aktive galakser. Røntgenstrålingen er termisk bremsestråling fra varm (10–100 mill. grader), tynn gass som er fanget inn i hopens gravitasjonsfelt og fyller hopens enorme volum. Tidligere var det uvisshet om hvor denne gassen kom fra. Hadde gassen falt inn i hopen utenfra? Da man oppdaget en spektrallinje i røntgenområdet som viste at det måtte være betydelige mengder av jern i gassen, ble det klart at den må skrive seg fra galaksene i hopen. Jern dannes bare i det indre av massive stjerner som blir supernovaer. Gass slynget ut fra supernova-eksplosjonene kan til slutt komme ut i det enorme området mellom galaksene i hopen. Siden kjølingstiden (pga. stråling) er av samme størrelsesorden som universets alder, er spørsmålet om oppvarmingen og utviklingen av gassen i hopen av interesse i kosmologien.

ROSAT registrerte ganske få *normale galakser* som røntgenkilder. Det henger sammen med deres lave luminositet. Når avstanden blir større enn et titals millioner lysår, blir de for svake til å kunne observeres. Studier av normale galakser kan imidlertid gi viktig informasjon om vår egen galakse. Vårt observasjonssted, inne i galaksen, er ikke bare gunstig når det gjelder å studere f.eks. den interstellare gassens fordeling og fysikk. Røntgenhaloer er lettere observerbare i andre galakser.

De røntgenkildene som har påkalt kanskje mest interesse er *supernovarester*, *pulsarer* og *binærsystemer*. Et binærsystem kan bestå av en hvit dverg og en gammel stjerne som det føres masse fra over på den hvite dvergen (kataklysmiske variable). Erstattes den hvite dvergen av en nøytronstjerne, taler man om en røntgendobbeltstjerne. Disse kildene kan være meget sterke og variable, men antallet er nokså begrenset. Et svært eksotisk binærsystem består av en langt utviklet stjerne som overfører masse til et sort hull; men man har bare funnet fire slike kandidater. Astrofysisk sett er kildene som er nevnt her viktige, for røntgenobservasjoner av dem kan bidra til å kaste lys over prosesser som ennå ikke er godt kjent.

## Norsk deltagelse i røntgenastronomiprosjekter

En gruppe forskere ved Institutt for teoretisk astrofysikk, har i en del år samarbeidet med forskere ved Dansk Rumforskningsinstitut i Lyngby, om røntgenundersøkelser av spesielle binærsystemer (RSCVn-stjerner) hvor den ene komponenten har store stjerneflekker og viser høy aktivitet. Man har fått observasjonstid på EXOSAT og ROSAT, samt tilgang til arkivdata. Interessante resultater er oppnådd hva angår

temperaturer, densiteter og størrelsesforhold på buestrukturer i den aktive stjernens korona.

I den seneste tid er det installert store programmer for regnemaskinbehandling av røntgendata fra de viktigste satelittobservatoriene, på instituttet. Det er av stor betydning å opparbeide kompetanse på dette området. Røntgenobservasjoner vil spille en sentral rolle i nærmeste decennium fordi det her ennå er så mye ugjort, fordi det skjer en rivende teknisk utvikling, og fordi mange fenomener av stor astronomisk interesse bare kan observeres i røntgenområdet.

Nordiske astronomer har arbeidet med planer om en mindre og relativt billig røntgensatelitt, NORD-X. Det spesielt viktige ved denne satelitten er at man tar sikte på å oppnå en spektral oppløsning som overgår det man tidligere har hatt i betydelig grad. På grunn av dårlig oppløsning er f.eks. observasjoner av emisjons- og absorbsjonslinjer fortsatt langt fra gode nok.

Finansielle vanskeligheter har medført at NASAs opprinnelige AXAF-prosjekt (*Advanced X-ray Astrophysics Facility*) ble delt i to: AXAF-I som innbefattet et speilsystem av meget høy kvalitet og et sett CCD-detektorer, og AXAF-S som var planlagt med speil av noe dårligere kvalitet, men med en detektor bestående av mikrokalorimetre som ville gi uovertruffen spektral oppløsning. Etter ytterligere finansielle vanskeligheter, besluttet NASA imidlertid å oppgi AXAF-S fullstendig. Men utviklingsarbeidet med mikrokalorimetrene blir fortsatt støttet. Bakgrunnen for forslaget om NORD-X, er at man ser muligheten av å få bygget høyoppløsningsdelen i det opprinnelige AXAF-forslaget inn i en liten og "billig" satellitt.

## Fremtidsmuligheter

Både ESA og NASA satser store ressurser på røntgenastronomi med sine XMM- og AXAF-I-prosjekter. Satellittene er planlagt skutt opp sent i 90-årene og vil være i bane i 10 år eller mer. AXAF-I får meget høy angulær oppløsningsevne (0,5 buesekunder) og en følsomhet som overgår den tidligere Einstein-satellittens med en faktor 100 til 1000 innenfor energiområdet 0,1–9 keV. Speilkvaliteten blir meget høy. Bare utviklingen av et prøvespeil har kostet 100 millioner dollar.

I det europeiske XMM (*X-ray Multi-Mirror mission*) legges det vekt på et meget stort speilareal (høy følsomhet) og instrumentering for spektroskopi opp til 10 keV. Det legges mindre vekt på høy vinkeloppløsning enn i AXAF-S, men oppløsningen er fullstendig god nok til å studere mer utstrakte kilder. Spektroskopi er nøkkelordet i XMM.

Disse satelittobservatoriene blir meget avanserte og vil være alle tidligere overlegne. De vil være operative godt inn i neste århundre og føre røntgenastronomien et langt skritt fremover, gi nye oppdagelser og lede til at nye spørsmål reises. Man kan vente nye bidrag til omtrent ethvert område innen høyenergi-astrofysikken i alle skalaer fra objekter i solsystemet og stjerner til galakser, galaksehoper og superhoper. Fundamentale problemer kan tas opp, slike som dynamoprosessen og dens sammenheng med stjernenes korona, stjernenes utvikling, supernovaeksplosjoner, egenskapene til supermassive sorte hull som gir energien i sentret av aktive galakser, den varme gassens bidrag til universets totale masse, tilstedeværelsen av sort masse i galakser og galaksehoper, og universets alder og størrelse. Det er god grunn til å vente at røntgenastronomien får en utvikling som vil være sammenlignbar med den man har sett innen radioastronomien. I så fall er det mye å glede seg til.

## Litteratur


1. Schmitt, J.H.M.M.: *The X-ray Universe.* Frontiers of Astrophysics. Proceedings of the Rosseland Centenary Symposium, Oslo 16–17 June, eds. P.B. Lilje and P. Maltby, (1994)
2. Longair, M.S.: High Energy Astrophysics, Vol. 1 & 2, Cambridge Univ. Press (1992) & (1994)


∞

# Fra Fysikkens Historie

## DÅ RØNTGENSTRÅLANE KOM TIL NOREG

**I 1895–96 studerte Kr. Birkeland katodestrålar ved Universitetet i Kristiania; og då han fekk kjennskap til oppdaginga som Wilhelm Röntgen hadde gjort, kommenterte han denne straks i Elektroteknisk Tidsskrift, i januar og februar 1896. Den 3. mars kunne tidsskriftet fortelje at Birkeland alt hadde demonstrert røntgenstrålar i Polyteknisk forening.**

### DEN NYE OPDAGELSE

*ET No 2, 20. Januar 1896*

Opsigtsvækkende meddelelser om nogle nye opdagelser paa elektricitetens omraade læses i disse dage i alle aviser; det gjælder en ny sort fotografisk virksomme, men usynlige straaler, som fremkommer ved elektriske udladninger gjennem fortyndede gasarter, og som skal være paavist af den bekjendte tyske professor *Röntgen*.

Den mest forbausende egenskab ved de nye straaler er den, at de formaar at gjennemtrænge mærkbare lag af alle jordiske substanser, enkelte stoffe selv i betydelige tykkelser. Saaledes skal det ved at kaste det nye "lys" paa en menneskehaand være lykkedes at projicere et skyggebillede af haandens knogler paa en bagenforstaaende fotografisk plade, idet nemlig *ben* absorberer "lysstraalerne" i langt høiere grad end haandens blødere væv.

Skjønt der, saavidt mig bekjendt, ikke endnu hertil er kommet nogen bekræftelse paa alle disse avisnotiser i form af en videnskabelig meddelelse fra Röntgen selv eller fra andet paalideligt hold, kan der neppe være tvivl om, at det af sandt, som maatte stikke under disse nyheder, maa referere sig til delvis ukjendte iakttagelser over kathodestraaler dvs. straaler, der udsendes fra den negative pol ved en elektrisk udladning gjennem meget fortyndet luft i saakaldte Geisler'ske eller Crookes'ske rør.

Det kan da være af interesse at faa høre lidt om, hvad fysikerne allerede ved om disse straaler, idet vi forbeholder os senere at komme tilbage til Röntgens eventuelle opdagelser.

...

I 1892 opdagede *Hertz*, som netop da havde fuldendt sine undersøgelser over elektriske svingninger, at katodestraaler gik tvers igjennem visse faste legemer, særlig gjennem aluminiumblik. Herved var der aabnet en udvei til at slippe kathodestraaler ud i luften fra de Geisslerske rør, hvor de altid før havde været indestængt, da straalerne ikke kan gjennemtrænge tykt glas. Hertz foreslog saa sin assistent, nu prof. *Lenard* i Pressburg, at anbringe et "vindu" af aluminiumblik i glasrøret, saa kathodestraalerne kunde slippe ud. (Det lyder bra paradoksalt: et blindvindu indsat i et glashus.) Hertz selv kunde nemlig ikke mere befatte sig med disse forsøg, han var alt begyndt at skrive sin beromte mekanik, som han fuldførte i mindre end to aar, og som udkom efter hans død i 1894. Jeg ved, at Hertz tænkte at gjenoptage forsøgene over kathodestraaler, og at han satte stor fortrøstning til dem... Ved at følge Hertz's anvisning lykkedes det ham [Lenard] at gjøre en række opdagelser, der kanske er de betydeligste i fysiken i den nyeste tid efter opdagelsen af de elektriske svingninger. Han fandt at kathodestraalerne kunde utbrede sig i decimeterlengder gjennem luften, hvor de dog snart absorberedes; i lufttomt rum derimod syntes straalerne at udbrede sig uhindret. Han fandt at alle legemer var gjennemstraalelige i mere eller mindre tynde lag. Han optog straalerne fotografisk, selv inde i en hermetisk tillukket metalkasse med aluminiumsvindu. Han fandt videre, at det var umuligt at elektrificere en leder der "belystes" af straalerne, og at disse afbøyedes og krummedes ved magneter. Endelig paaviste han ogsaa, at der ved forskjelligt gastryk i det Geisslerske rør skabes kathodestraaler af forskjellig art; jo lavere tryk, des mere kunde de frembragte straaler gjennemtrænge al substans. Kanske har Röntgen nu fundet en maade at fremstille kathodestraaler ved et lavere tryk, end det hidtil er lykkedes nogen anden?

Lenard slutter af sine forsøg i overensstemmelse med E. Wiedemann og flere, at kathodestraaler er et ætherfænomen – lysbølger af utrolig kort bølgelængde – siden de udbreder sig bedst i lufttomt rum, i et rum frit for enhver materie. Tyskerne lader til at antage denne forklaring, der medfører antagelsen af nye egenskaber ved ætheren, medens englænderne endnu synes at helde til Crookes's "straalende materie", som i virkeligheden ogsaa kan bringes til at forklare alle fænomener. Man maa isaafald antage, at de elektricerede gasmolekyler gaar gjennem det Lenard'ske vindu paa samme maade som det bevisligt ad elektrolytisk vei er lykkedes at føre atomer med den elektriske strøm tvers igjennem vel maalbare tykkelser af metalliske plader, for ikke at tale om, at vi let ved strøm kan drive f. ex. jodatomer gjennem vor egen krop – ind i den ene haand gjennem brystet og ud af den anden.

*Kr. B.*

## DE RØNTGENSKE STRAALER

*ET No 3, 5. Februar 1896*

For et par dage siden naaede endelig ogsaa herop Røntgens egen beretning: "Om en ny slags straaler." Disse fremkommer, ifølge opdageren, naar en elektrisk udladning fra et kraftigt induktorium slaar gjennem et vel udpumpet Crookes-rør, og paavises, enten derved at de bringer en papirskjærm, præpareret med bariumplatincyanur til at lyse i mørke (fluorescere), eller derved at de sværter en fotografisk plade – straalerne selv kan nemlig absolut ikke opfattes af øiet. For at kunne experimentere uden at generes af lyset fra udladningsrøret, omgav Røntgen dette med tæt sort karton; den fluorescerende skjærm lyste da op i visse stillinger i forhold til røret endog i en afstand fra det af indtil 2 m. Fluorescenslyset var altsaa aabenbart en virkning af noget, som skrev sig fra Crookes-røret, og som havde gjennemtrængt den sorte karton. Og dette *noget* gik ikke alene gjennem enkelte papirlag, selv en bog paa 1000 sider bød liden hindring.

Heller ikke er papir det eneste stof, som gjennemtrænges; alle mulige substanser har det paa samme maade om end i høist forskjellig grad. For at plader af f. ex. platina, bly, zink og aluminium skal gjennemtrænges lige godt, maa deres tykkelser forholde sig til hverandre som 1, 3, 6 og 200. Det ukjendte, som virker paa den fluorescerende skjærm, kalder Røntgen *straaler* (X-straaler) af følgende to grunde:

*Først* fordi der kastes skarp *skygge*, naar gjenstande af tunge metaller f. ex. stilles foran den følsomme skjærm. Man ser da tydelig en mørk flek paa denne, der overalt ellers er lysende, og flekken viser samme kontur, som det skyggegivende legeme vilde givet for almindeligt lys under samme omstændigheder.

Alle legemer kaster saadan skygge, mere eller mindre mørk eftersom stoffet er mere eller mindre ugjennemtrængeligt for X-straalerne. Hvis en haand stilles foran den fluorescerende skjærm, ser man skyggen af dens knogler temmelig tydelig, medens resten kun gir sig tilkjende ved en svag antydning.

*Dernæst* fordi det var muligt at fotografere et omvendt billede af det virksomme Crookes-rør, ved at opfange paa en fotografisk plade de X-straaler, som gik gjennem et lidet hul i en foran pladen stillet ugjennemtrængelig metalskjærm – det er her unødvendigt at minde om det tilsvarende forsøg i lyslæren.

Ved omhyggelige undersøgelser har Røntgen fundet, at udgangspunktet for X-straalerne er det sted af glasset i udladningsrøret, som træffes af kathodestraalerne fra den negative pol. Forandrer man dette sted, idet man afbøier kathodestraalerne ved en magnet, saa flytter ogsaa dermed strax udgangspunktet for X-straalerne sig. Paa den anden side har det vist sig, at de nye straaler aldeles ikke paavirkes af magneter; det er saaledes klart, at disse ikke kan betragtes som kathodestraalernes *fortsættelse* gjennem glasset, men kun som frembragt af dem ved en eller anden gaadefuld proces. Det vilde være experimenter af megen betydning for afgjørelsen af X-straalernes natur at undersøge, om de ophørte at udsendes fra Crookes- rørets glasvæg nøiagtig samtidig med, at kathodestraalerne ophørte at bestraale denne, og videre om de ogsaa sendes *ind* i Crookes-røret fra glasvæggen, ikke bare *ud* af det.

En anden mærkelig egenskab ved X-straalerne er den, at de ikke brydes ved overgang fra et legeme til et andet. Man faar altsaa ingen afbøining af straalerne ved at lade dem gaa gjennem et prisme; heller ikke samles de ved at gaa gjennem en linse. Nogen regelmæssig reflektion af X-straalerne har Røntgen heller ikke kunnet opdage; alle stoffe synes at forholde sig overfor dem som grumsede medier overfor lys.

En af de interessanteste omstændigheder ved Røntgens straaler er den, at de virker paa en almindelig fotografisk tørplade, hvorved det dog endnu er uafgjort, om den kemiske spaltning af sølvsaltet er en direkte virkning af X-straalerne, eller om gelatineskiktet opvækker fluorescenslys, der giver anledning til den kemiske virkning. I ethvert fald kan man paa denne maade erholde fotografier og det selv af legemer, som ikke kan sees med vort øie. Men disse billeder adskiller sig meget fra de sædvanlige fotografier; de er kun skyggebilleder og opnaaes derved at den gjenstand som skal fotograferes simpelthen stilles foran den følsomme plade, hvorpaa det hele "belyses" med X-straaler. Dersom pladen er anbragt i en tætsluttet kasset kan fotograferingen gjerne foretages i fuldt dagslys; kassettens laag byder nemlig ingen nævneværdig hindring for X-straalerne.

Røntgen har paa denne maade fotograferet en hel del mærkelige ting bl. a. et kompas, hvor tydelig sees delstreger og angivelse af N. S. E. O., uagtet kompasset var fuldstændig indesluttet i en metalkasse. Endnu mere opsigtsvækkende er fotografiet af knoglerne i en levende haand [figur]. For at faa tydelige billeder maa den fotografiske plade exponeres lige optil 20 min.

Røntgen slutter sin afhandling med den hypotese at de nye straaler skulde være longitudinelle svingninger i ætheren. Thi ultraviolet lys mener han det umuligt kan være, siden X-straalerne:

a) ikke brydes,
b) ikke kan reflekteres regelmæssig fra legemernes overflade,
c) ikke kan polariseres paa sædvanlig maade,
d) absorberes i legemerne væsentlig overesstemmende med disses specifike vægt.

Skjøndt man aldrig hidtil har opdaget longitudinelle svingninger i ætheren, er det dog slet ikke urimelig, at saadanne findes; det modsatte vilde betyde, at ætheren var fuldkommen inkompressibel.

Imidlertid er det neppe afgjørende bevist, at X-straaler ikke er ultraviolet lys af overordentlig liden bølgelængde, saa liden, at selv molekylers afstand fra hverandre er betragtelig i forhold dertil. De fleste helder vistnok foreløbig til den anskuelse.

Hvorom alting er, siden Faraday's opdagelse af den elektriske induktion har der neppe været opdaget noget for fysiken saa gaadefuldt nyt som de Røntgenske straaler; – maatte bare tilnærmelsesvis den udvikling, som følger i anvendelser og i theori, naa en høide som efter hin opdagelse.

*Kr. B.*

*ET No 5, 3. Marts 1896*

**Polyteknisk forenings elektrikergruppe** havde torsdag f. m. et overordentlig interessant møde, idet nemlig universitetsstipendiat *Kr. Birkeland* viste gruppen den imødekommenhed at holde et af experimenter ledsaget foredrag over kathodestraaler og X-straaler. Hr. Birkeland gav en grei, letfattelig fremstilling af kathodestraalernes frembringelse og virkninger i Crookeske rør og illustrerede ved experimenter med et fra universitetet velvillig udlaant kraftig induktorium kathodestraalernes lys-, varme- og mekaniske virkninger samt deres afbøining ved magnetiske indvirkninger.

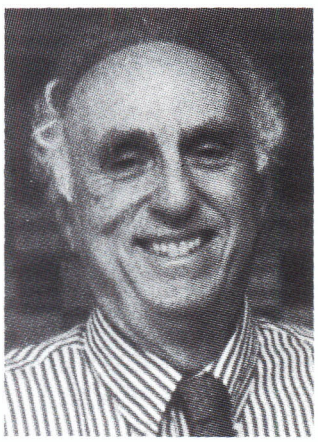
Derefter forklaredes og bevistes experimentelt kathodestraalernes overgang til X-straaler. Et Crookes rør anbragtes inde i en papæske, og induktoriet sattes i virksomhed. En papskjærm, bestrøget med bariumplatincyanur (den bestrøgne side holdtes vendt fra Crookesrøret), bragtes derved til at fluoriscere meget stærkt. Hr. Birkeland holdt derefter forskjellige gjenstande mellem Crookesrøret og pladen, og man kunde nu paa dennes præparerede flade skimte skyggebilleder af disse gjenstande... Naar en portemonæ holdtes imellem, saaes selve portemonæen kun i svage omrids, medens de indeni liggende pengestykker kastede skarp skygge. Af en lommebog med staalklemme saaes næsten intet andet end klemmen. Og man fik se meget tydelig knoklerne i en haand, som holdtes mellem den usynlige lyskilde og den præparerede papplade. Hr. Birkeland fremviste et par fotografier af hænder, tagne ved universitetes fysiske laboratorium. Det ene af disse fotografier stod fuldkommen paa høide med, maaske over de bedste tyske fotografier af denne art.

Efter foredraget fulgte en interessant diskussion, som vi desværre her savner plads til at referere.

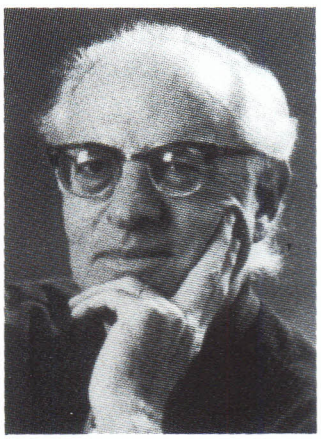
∞

# Nobelprisen i fysikk 1995

**Det Kongelige svenske vitenskapsakademiet har delt ut Nobelprisen 1995 i fysikk "for banebrytende eksperimentelle innsatser innen leptonfysikken, med den ene havparten til Martin Perl, Stanford University, Stanford, USA, for oppdagelsen av $\tau$-leptonet, og den andre halvparten til Frederick Reines, University of California, Irvine, California, USA, for påvisningen av nøytrinoet".**



*Martin Perl*



*Frederick Reines*

Det turde være kjent for FFVs lesere at nøytrinoets eksistens ble postulert i 1930 av Wolfgang Pauli for å gjenopprette energi- og impulsbevaring i radioaktivt $\beta$-henfall. Nøytrinoet kunne ikke ha elektrisk ladning og måtte være meget svakt vekselvirkende, og det skulle gå over 20 år før dets eksistens ble direkte påvist. I 1953 foreslo Reines (f. 1918), sammen med nå avdøde Clyde Cowan, å utnytte de store mengdene nøytrinoer som blir produsert under driften av kjernereaktorer til å påvise reaksjonen:

$$\overline{\nu} + \mathrm{p} \rightarrow \mathrm{e}^{+} + \mathrm{n} \qquad (1)$$

I et berømt eksperiment benyttet Reines og Cowan en tank med 400 liter vann inneholdende kadmiumklorid for å indusere reaksjonen. På begge sider av tanken fantes beholdere med flytende scintillatormateriale for å påvise $\gamma$-stråling som var forventet utsendt under positronets og nøytronets vekselvirkning med vannet i tanken. Detektoroppstillingen var avskjermet av blyvegger og ble plassert i umiddelbar nærhet av kjernereaktoren i Savannah River. I løpet av 50-årene publiserte Reines og Cowan flere artikler som påviste og beskrev hyppigheten av ovennevnte

reaksjon. Dermed var eksistensen av antinøytrinoet etablert.

Siden har Reines vært en av hovedmennene bak en rekke eksperimenter der nøytrino-reaksjoner blir indusert i store volumer vann. Han har vært leder for det store IMB (Irvine–Michigan–Brookhaven) prosjektet der detektoren ble installert dypt under jordoverflaten i en saltgruve i Ohio, USA, og han deltar også i et eksperiment som er plassert ca. 2700 m under jordoverflaten i Kamioka, Japan. Hovedmotivasjonen for disse eksperimentene var å søke etter proton-henfall, slik det var forutsagt av en enhetsteori for sterke og elektrosvake vekselvirkninger. En har til nå ikke funnet eksempler på at protonet henfaller, og teorien er falsifisert. De mest interessante resultatene herfra er isteden kommet innen deteksjon av reaksjoner indusert av nøytrinoer i kosmisk stråling, og disse detektorene var blant dem som kunne påvise nøytrinoproduksjon fra supernova SN1987A.

Perl (f. 1927) ledet en gruppe fysikere (Mark I-kollaborasjonen) som gjorde eksperimenter ved en elektron–positron lagringsring (SPEAR) ved Stanford. I desember 1975 publiserte de en artikkel under tittelen "Evidence for Anomalous Lepton Production in $e^+ - e^-$ Annihilation". Kollaborasjonen hadde funnet 24 events i elektron–positronkollisjoner der de eneste detekterte partiklene i slutt-tilstanden var ett elektron og ett myon. På samme måte som i $\beta$-henfall manglet det energi og impuls i eventene, og det var nærliggende å anta at nøytrinoer, eller lignende partikler, unnslapp detektoren uten spor. Artikkelen slutter med å angi at en forklaring kunne være at en hadde observert produksjon og henfall av et par nye partikler. Det ble nokså raskt klart at en hadde observert produksjon av et nytt lepton og dets antipartikkel, dvs. partikler som, bortsett fra massen, er identisk med elektronet og myonet, og at disse henfalt på en måte som var helt analog til myon-henfall:

$$\tau^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \overline{\nu}_\tau \qquad (2)$$

og

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \overline{\nu}_\mu + \nu_\tau \qquad (3)$$

Her ser vi at en også må innføre en ny type nøytrino, $\nu_\tau$, for å opprettholde loven om bevaring av leptontall. Dette nøytrinoet er ennå ikke påvist eksperimentelt.

Siden dets oppdagelse har $\tau$-leptonet vært gjenstand for detaljerte studier, og egenskaper som masse (1777,1 $\pm$ 0,5 MeV), levetid (295,6 $\pm$ 3,1 fs) og forgreningsforhold i de forskjellige henfallskanalene er kjent med stadig økende presisjon. Eksperimentene ved CERNs LEP-akselerator har åpnet nye muligheter for presisjonsstudier av $\tau$-leptoner, og de norske partikkelfysikkgruppene deltar meget aktivt i disse studiene. Presisjonsstudier av $\tau$-leptonet setter den såkalte standardmodellen på prøve, og en kan samtidig se etter nye, uventede egenskaper ved $\tau$-leptoner. Hittil tyder alt på at det bare er den store forskjellen i masse som adskiller $\tau$-leptonet fra elektronet og myonet.

Allerede ett år etter den spektakulære oppdagelsen av charmonium hadde en altså funnet den første partikkel i den tredje generasjonen av elementærpartikler. Dette hadde store konsekvenser for vår forståelse av naturens elementære byggestener og vekselvirkningene mellom dem. Blant annet krever standardmodellen at minst tre generasjoner kvarker skal finnes for at brudd på symmetrien mellom partikler antipartikler (CP-brudd) skal være mulig. (Et slikt brudd observeres i systemer av nøytrale K-mesoner.) Resultatene oppnådd ved LEP viser at det sannsynligvis ikke finnes en fjerde generasjon leptoner. Det tilhørende fjerde generasjons nøytrino ville måtte ha en masse minst lik den til et jernatom!

Begge oppdagelsene som det i år ble gitt Nobelpris for, var av meget stor betydning for fremveksten av standardmodellen. Selv om man ikke har funnet fenomener som bryter med denne modellen, er det mange ubesvarte spørsmål innen partikkelfysikken. Vi gir her noen eksempler: Hva er opphavet til masse og de store masseforskjellene mellom elementærpartiklene? Har nøytrinoene masse? Hva slags mekanisme ligger til grunn for CP-brudd? Her kreves fortsatt teoretisk og eksperimentell innsats, og resultater fra eksperimenter som nå er i planleggingsfasen avventes med stor spenning!

*Bjarne Stugu*

$\infty$

**Husk kontigenten**

# Bokomtaler

Pedro Waloschek, compilor and editor: The Infancy of Particle Accelerators – Life and Work of Rolf Widerøe. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1994 (200 sider) 285 kr.

**Eventyret**

Vi er glad for å kunne anmelde en bok om en landsmann, som er kommet både i tysk og engelsk utgave, og som er tuftet på vårt intervju med Rolf Widerøe (1902–) i 1983. Den mann vi møtte den gang vil leseren kunne møte i boken; for mange vil det bli et spennende og ikke minst overraskende møte.

For ti år siden ble det utgitt en liknende "samtalebok" med Odd Dahl (1898–1994) med tittelen "Trollmann og rundbrenner". Widerøe har, som Dahl, sansen for eventyret. Widerøe understreker selv dette karaktertrekket ved å sammenlikne seg med sin morfar fra Tyskland. Morfaren var i sin tidligste ungdom, før han ble bryggermester i Halden, med i politiske tumulter i Mellom-Europa, og overlevde som krigsskadd ved at hans første kvinnelige forbindelse gjemte ham i en bakerovn og pleide ham vel. I Widerøes eget liv har forøvrig hans Ragnhild vært tro mot mann og felles livsoppgaver i mer enn et halvt århundre.

**Gleden over øyeblikkets oppgaver**

Det er interessant å merke seg den vekt Widerøe legger på å få glede ut av de oppgaver livet måtte by på. Sluttkapitlet *"Some retrospectives and dreams"*, innledes med nettopp dette poenget (s. 143):

"Når jeg tar mitt liv for meg, finner jeg at jeg ofte kommer tilbake til noen ganske få hendelser som jeg nå anser som de viktigste etappene i arbeidet mitt. Mens jeg holdt på med disse tingene var jeg egentlig ikke klar over deres relevanse eller framtidige betydning. Alt jeg arbeidet med ga meg faktisk mye glede og jeg var alltid fullstendig oppslukt av det jeg holdt på med. Jeg bygget derfor reléer med samme entusiasme som jeg senere konstruerte betatroner. Jeg var alltid spesielt interessert og motivert hvis der var nye idéer involvert" (oversettelse Aa/V). Boken har faktisk et eget kapittel med overskriften *"Relays are interesting too"*.

**Kronologi**

Widerøes fantasi fostret mange av de sentrale prinsippene i akseleratorenes utvikling og anvendelser. Som et appendiks har boken en kronologisk oversikt som setter milepeler i Widerøes liv inn i en videre historisk ramme. For den som leser boken med en sterk teknisk–naturvitenskapelig motivering, kan det faktisk være en fordel etter forordet, som gir en kort oversikt, å gå gjennom kronologien og så lese selve boken.

Referanselisten er ikke uttømmende for feltet som sådant, men gir til tross for dette, sammen med kronologien, et brukbart utgangspunkt for den som ønsker å trenge dypere inn i akseleratorlitteraturen. Kronologien må imidlertid ikke forlede en til å tro at der var et organisk samspill, at aktørene alltid visste om hverandre.

**Bokens motivasjon og budskap**

Widerøes bok tar oss med på en personlig reise gjennom et felts utvikling. Den tar ikke mål av seg til å være en uttømmende vitenskapelig avhandling. Den gir oss likevel et perspektiv over akseleratoralderens utvikling. Akseleratorer er i dag viktige for mye av det vi foretar oss i grunnforskningen, i medisinsk behandling og i industri. Fra å være et redskap for kjerne- og partikkelfysikk, benyttes nå akseleratorer til logging av oljebrønner og til arkeologisk datering, og intense stråler tenkes nå også benyttet for energiproduksjon og behandling av radioaktivt avfall.

Widerøe forteller sin historie med en reflektert, men enkel sjarme. I en alder av mer enn 90 år, er han fremdeles "tent på" utfordringen og klarer ikke å la være å spekulere over nye muligheter. Etter å ha gitt tanken flukt i avslutningskapitlet, sier han (s. 150):

"Man kunne lett komme til den slutning at akseleratorbyggere som måtte følge slike fantastiske idéer, er fulstendig forrykte, hadde det ikke vært for at vi alle har vært deltakere i utviklingen i de siste ti-år: For noen få år siden ville ingen teknisk bevandret person ha trodd at den presisjon vi i dag bruker til å produsere CD-plater noen gang ville bli mulig. Eksemplet viser at vi aldri må miste motet, og at vi fortsatt må sette oss mål som ligger langt foran oss, selv om samtiden måtte mene at de er uoppnåelige."

**Widerøes viktigste oppdagelse**

I tilbakeblikket må Widerøe vedgå at hans viktigste bidrag ikke kom til å bli ungdomsdrømmen, og vel hjertebarnet, stråletransformatoren, alias betatronen. Denne fikk han ikke til å virke, og den kunne derfor heller ikke gi Widerøe noen doktorgrad. Nei, hans viktigste oppdagelse ble redningsplanken for hans eksamen, lineærakseleratoren med sitt driftrør. Om dette sier han på side 37: "Jeg gjorde selvfølgelig en stor tabbe ved ikke å få driftrøret patentert allerede i Aachen, ...mitt opprinnelige enkle driftrør ble utgangspunktet for utviklingen av alle senere varianter av 'akselererende hulrom' til bruk i sirkelformede så vel som lineære maskiner."

**Språket**

Widerøes eget norske språk er enkelt og uten akademisk jåleri, og lar seg lett tilpasse engelsk. Den engelske utgaven av boken er imidlertid ikke blitt til direkte, men via en tysk førsteutgave. Dette kan nok merkes enkelte steder, men vi føler likevel at det er den Widerøe vi kjenner som kommer fram gjennom den engelske teksten.

Det vil likevel i slike totrinns-prosjekter alltid kunne oppstå misforståelser, også fornøyelige, som den at vår baryton Grude fra Stavanger er blitt promovert til Grude von Stavanger. Selv om det på tysk kan være i orden å kalle Radiumhospitalet i Oslo for Radiumspitalet, bør den engelske teksten korrigeres tilbake til det opprinnelige. Norsk *ø* burde ellers vært brukt konsekvent, også i Widerøes navn, og ikke blitt erstattet med *ö*.

God lesning!

*Jan Vaagen og Finn Aaserud*

∞

## Knut Jostein Knutsen: Formler og data i fysikk. Med engelsk–norsk og norsk–engelsk ordliste. 7. utgave, Tapir forlag, 1995 (264 sider) 248 kr.

Ved flere av fakultetene ved NTH gjelder den ordningen innen grunnfagsundervisningen i fysikk at studentene kan få ta med seg denne boka til støtte under eksamen. Etter mitt skjønn vil det generelt være en fornuftig investering for en student i begynnerfasen på høgskole/universitet å kjøpe boka – ikke bare på grunn av behovet til eksamen, men snarere på grunn av at boka vil være nyttig som et slags minileksikon for enhver som vil komme til å arbeide med fysiske eller teknologiske fag senere i livet.

1995-utgaven er altså 7. utgave; første utgaven kom i 1973. Utgavene er blitt mer omfangsrike etter hvert, mye på grunn av tilbakemeldinger fra brukerne. De stadige omarbeidinger av et verk som dette har to åpenbare fordeler: For det første får forfatteren anledning til å luke ut trykkfeil; dernest kan moderne teknikk følges innen layout. Utstyrsmessig er denne utgaven klart bedre enn de tidligere utgaver jeg har sett. En stikkordliste gjør det også relativt enkelt å finne fram.

Hovedopplegget er som i tidligere utgaver. De første 50 sidene inneholder elementer av grunnleggende matematikk, en orientering om det internasjonale enhetssystem SI, og en oversikt over symboler og enheter for fysiske størrelser; det hele satt sammen på en meget oversiktlig måte. Dernest kommer noe over 100 sider med formler fra forskjellige deler av fysikken: mekanikk, svingninger, varmelære, optikk, atom- og kjernefysikk, kvanteteori, elektrisitet og magnetisme (inklusive Maxwells likninger) og elektronikk. Så ca. 30 sider med tabeller og skjemaer, bl.a. en tabell over elektriske, termiske og magnetiske egenskaper til noen faste stoffer, elektroniske koder og skjemasymboler, grunnstoffenes elektronkonfigurasjon, og en relativt fyldig oversikt over radioaktivitet. Bakgrunnsstrålingen i Norge, inkludert tillegg fra Tsjernobyl, er også kommet med i den nye utgaven.

Noe som er et kjærkomment hjelpemiddel for den ferske student, er den tekniske ordlisten norsk–engelsk, som nå i den nye utgaven går begge veier. Vi som er forhenværende studenter husker jo hvordan den plutselige bruk av engelskspråklig faglitteratur medførte en del strev de første ukene, i selskap med diverse ordbøker. En alminnelig ordbok er imidlertid ikke så sterk innen teknologiske emner, slik at en rimelig kort liste med faglig fokusering er et mer velegnet hjelpemiddel. Og behovet går begge veier, norsk → engelsk så vel som engelsk → norsk.

Trykkfeil eller mangelfulle opplysninger, har jeg funnet svært lite av. Litt pirk: 1) Helst burde vel verdien $\lambda_C = 2{,}43$ pm for elektronets Compton-bølgelengde på første omslagside, vært ledsaget av en formel. Denne verdien forutsetter at man definerer $\lambda_C$ som $h/mc$ istedenfor som $\hbar/mc$. I våre dager er nok sistnevnte definisjon blitt mest vanlig (på s. 142 er imidlertid opplysningene fullstendige). 2) Tilstandssummen, s. 111, skrives vanligvis med stor bokstav $Z$. 3) I tabellen s. 197 er fotonets energi angitt å være lik null. Et slikt utsagn kan forvirre leseren; det er bedre å la denne spalten i tabellen ha Masse som "heading" istedenfor Energi, selv om enheten er MeV.

Konklusjon: Boka er omfangsrik og er av meget høy kvalitet. Forelesere ved høgskoler/universiteter bør kjenne boka og vurdere dens bruk som støttebok i introduksjonskursene i fysikk. Men prisen er blitt noe høy; forrige utgave i 1991 (ca. 50 sider kortere) kostet da 150 kr.

*Iver Brevik*

∞

# Nye Doktorer

## Arne Brendmo

Sivilingeniør Arne Brendmo har tatt dr.ing.-graden ved NTH med avhandlingen: *An Investigation of Wave-Energy Absorption by Single and Double Oscillating Water Column Converters.* Avhandlingen omfatter både teoretisk og eksperimentelt arbeid.

Det teoretiske arbeidet har særlig vært konsentrert om å lage hydrodynamiske beskrivelsesmodeller av svingende vannsøyler, der mekaniske og elektriske ekvivalentskjemaer er brukt. Det er også beskrevet en matematisk simuleringsmodell som baserer seg på eksperimentelt bestemte impulsresponsfunksjoner. En slik modell kan brukes til å utføre simuleringer på datamaskin.

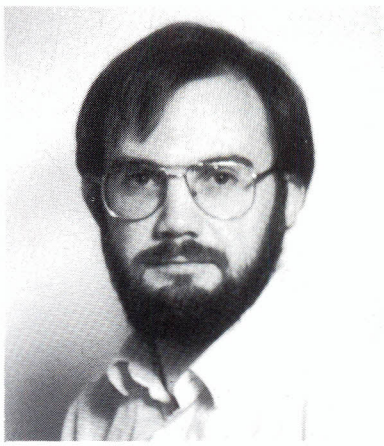
Det eksperimentelle arbeidet har dels gått ut på å prøve ut ulike måter å fasestyre en dobbel svingende vannsøyle på. En slik styring utføres ved at man holder igjen vannsøylenes svingebevegelser i deler av svingningsperioden ved å åpne og lukke luftventiler. På den måten kan fasen mellom vannsøylenes svingninger og den innfallende bølgen optimaliseres, slik at energiutbyttet kan maksimeres for ulike frekvenser. Det er også utført transienteksperimenter for å bestemme impulsresponsfunksjoner til bruk for den matematiske modellen. Til slutt er det gjort eksperimenter for å undersøke energitapsmekanismer. Disse er innarbeidet i de teoretiske ekvivalentmodellene.

Det er tidligere bygget prøvekraftverk med svingende vannsøyler i India, Japan, Storbritannia og Norge. Som en del av et EU-prosjekt, planlegges det nå bygging av en felleseuropeisk prototyp. Man håper at Brendmos arbeide kan bidra til mer avanserte og kostnadseffektive bølgekraftverk.

Avhandlingen er utført ved Institutt for fysikk med professor Johannes Falnes som hovedfaglærer. Forsker Per Magne Lillebekken har også deltatt i veiledningen. Arne Brendmo ble utdannet ved Fakultet for fysikk og matematikk i 1990.

∞

## Erling G.B. Hohler



Cand.scient. Erling G.B. Hohler har tatt graden dr.ing. ved NTH med avhandlingen *Relativistiske feltlikninger med eksponentielle vekselvirkninger.* Disse ligningene har fått navnet Toda-likninger etter den japanske fysikeren Morikazu Toda som utviklet grunnlaget for dem, delvis under et opphold ved NTH i 1973–1974.

Fysikere og matematikere har viet Toda-likningene stor interesse, bl.a. fordi de gir en representativ beskrivelse av mange ulineære fysiske fenomener, samtidig som de er eksakt løsbare. I naturvitenskap fungerer eksakt løsbare likninger som faste orienteringspunkter som viser vei for utviklingen av nye teorier. I teoretisk fysikk opptrer Toda-likningene spesielt i forbindelse med teorier som søker å gi en fundamental beskrivelse av naturen, men også for å klassifisere fenomener som opptrer ved enkelte faseoverganger.

En grunnpilar i fysikken er at enkelte kvantiteter er uforanderlige – naturen adlyder ubrytelige *bevaringslover.* Kjente eksempler er bevaring av energi, bevegelsesmengde og mengden av hvert grunnstoff.

Et viktig trekk ved Toda-likningene er at de beskriver fenomener som har et uendelig antall bevarte størrelser. I doktorgradsarbeidet har Hohler utviklet nye og mer effektive metoder til å bestemme disse eksplisitt, og vist hvordan kjennskap til bevaringslovene kan brukes til å løse likningene eksakt. Dette har bidratt til en bedre forståelse av de ekstra bevarte størrelsene i Toda-likningene, noe som er viktig når de anvendes i kvantefysikk.

Avhandlingen er utført ved Institutt for fysikk, NTH, med professor Kåre Olaussen som hovedfaglærer. Erling Hohler er cand.scient. fra Fysisk institutt, Universitetet i Oslo, 1989.

∞

**Tor Wøhni**

Sivilingeniør Tor Wøhni har tatt graden doktor ingeniør ved NTH med avhandlingen *Eksterndoser fra radioaktivt nedfall: Dosimetri og strålenivåer.*

Ekstern bestråling utgjør en vesentlig del av stråledosene ved radioaktivt nedfall, og denne komponenten bestemmes vanligvis ved indirekte metoder. Wøhnis doktogradsarbeid representerer en direkte, og dermed mer presis, metode for å bestemme eksterne stråledoser. Avhandlingen bidrar til økt kunnskap om eksterndoseproblemene ved radioaktivt nedfall, og hvilke faktorer som i den forbindelse påvirker stråledoser til mennesket.

Wøhni har utviklet passive personbårne måleinstrumenter for å registrere stråling fra radioaktivitet på bakken. Måleinstrumentene er basert på TL-detektorer og kan henges rundt halsen. Dosimetrene er brukt i to ulike måleprogrammer, ett i Øystre Slidre og ett i Sør-Russland. I sine respektive land var disse områdene blant dem som ble sterkest rammet av Tsjernobyl-ulykken. Resultatene viser at eksterndosebidraget fra nedfallet fortsatt er målbart i Øystre Slidre, selv om naturlig bakgrunnsstråling utgjør 60–90 prosent av doseregistreringene. Nedfallsmengdene i Sør-Russland var ca. 10 ganger større enn i Øystre Slidre, og målingene derfra ble analysert på bakgrunn av deltagernes hustype og yrke m.m., og hvilke tiltak som var gjort for å fjerne radioaktiviteten. De målte doseverdiene var noe lavere enn man kunne beregne ut fra kjennskap til nedfallsmengder og hustyper m.m.

Arbeidet er utført ved Institutt for fysikk med professor Tore Lindmo som hovedfaglærer. Tor Wøhni ble utdannet ved Fakultet for fysikk og matematikk i 1974. Han er nå ansatt som forsker ved Statens strålevern.

∞

# Trim i FFV

## FFVT 4/94

I bridge starter som kjent hver spiller med 13 kort. I et spill med spar i trumf har makkerparet Nord–Sør tilsammen 6 spar. I de to første stikkene spilles spar. Både Nord og Sør kaster på to spar hver, slik at dette makkerparet deretter har to spar igjen. Disse kan sitte 1–1 eller 2–0. Sannsynligheten for én spar hos hver (1–1 fordeling) er lett å beregne: Av det totale antall fordelinger av de 2 sparene og de 20 andre kortene er sannsynligheten for at Nord har 1 spar lik

$$P(1\text{–}1) = \frac{\binom{2}{1}\binom{20}{10}}{\binom{22}{11}} = \frac{11}{21},$$

der parentesene er binomialkoeffisienter.
Tilsvarende er

$$P(2\text{–}0) = \frac{\binom{2}{2}\binom{20}{9} + \binom{2}{0}\binom{20}{11}}{\binom{22}{11}} = \frac{10}{21}.$$

Altså er en spar hos hver av de to spillerne den mest sannsynlige fordeling.

På den annen side kan vi beregne sannsynligheten for at de 6 trumfene ved starten av spillet var fordelt 3–3:

$$P(3\text{–}3) = \frac{\binom{6}{3}\binom{20}{10}}{\binom{26}{13}} = \frac{286}{805}.$$

Tilsvarende for fordeling 4–2:

$$P(4\text{–}2) = \frac{\binom{6}{4}\binom{20}{9} + \binom{6}{2}\binom{20}{11}}{\binom{26}{13}} = \frac{390}{805}.$$

Altså har vi fått det paradoksale resultatet at likefordeling av de 6 sparene er *mindre* sannsynlig enn den ujevne 4–2 fordelingen, men likevel er – etter at to trumfrunder er gått – likefordeling av de to gjenværende spar *mest* sannsynlig. Finn feilen!

## Løsning FFVT 3/94

Med utgangspunkt i at 30% av de første ti potensene av 2 – altså $2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024$ – startet

med et 1-tall, var utfordringen å beregne hva denne prosentsatsen er "i det lange løp".

Vi starter med å notere at $2^n$ har et 1-tall som første siffer dersom

$$10^m \leq 2^n < 2 \cdot 10^m$$

for et eller annet heltall $m$. Ved å sette $2 = 10^x$, med $x = \log_{10} 2$, tilsvarer dette

$$m \leq n\,x < m + \log_{10} 2,$$

eller ved å ta bort heltallsdelen av $n\,x$:

$$n\,x \pmod 1 < \log_{10} 2.$$

For en irrasjonal $x$ som vi har her, vil i det lange løp $x, 2x, 3x, 4x, \ldots$, med heltallsdelen fjernet, fordele seg jevnt i intervallet $(0, 1)$. (En alternativ formulering er at på enhetssirkelen vil, med $\varphi = 2\pi\,x$, vinklene $\varphi, 2\varphi, 3\varphi, \ldots$, fordele seg jevnt. Dette er intuitivt forstålig, og kan naturligvis bevises.) Det relative antall treff i $(0, \log_{10} 2)$ blir derved lik forholdet mellom lengden av dette intervallet og enhetsintervallet, lik

$$\underline{\underline{\log_{10} 2 = 0.3010}}.$$

Dette er brøkdelen av potensene av 2 som har 1-tall som første siffer. Altså var de 30 % 1-tall for de første 10 potensene representative for hva som hender "i det lange løp"

∞

# Nytt fra NFS

## IBMs FYSIKKPRIS 1996

IBM Norge vil i 1996 gi 20 000 kr til en fagpris i kondenserte fasers fysikk. Prisen vil bli delt ut under Fysikermøtet i Trondheim i juni 1996.

Prisen kan gis til en eller flere norske forskere som har sitt arbeidssted i tilknytning til norske institusjoner. Prisen gis for forskningsarbeid av høy faglig kvalitet innenfor kondenserte fasers fysikk. Både grunnleggende og anvendt forskning kan tilgodeses. Arbeidet bør være av nyere dato, fortrinnsvis innenfor de fem siste år.

Begrunnede forslag til kandidater kan sendes Norsk Fysisk Selskaps sekretariat innen 1. februar 1996.

## STIPEND

Tidsskriftet *Physica Scripta* bar besluttet å utdele resestipend på inntil 10 000 svenske kroner. Stipendene går til unge fysikere som skal delta på konferanser. Søkeren bør helst ha publisert en eller flere artikler i *Physica Scripta* i løpet av 1995. Begrunnede søknader om stipend sendes til Styret i Norsk Fysisk Selskap innen 1. februar 1995.

∞

# God Jul!

KUNDEBLAD

**Returadresse:**
Fra Fysikkens Verden,
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo,
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo.

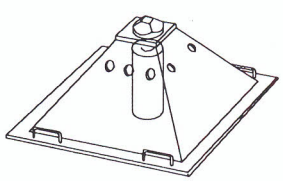

# Doppler Current Meter DCM 12

Vi benytter ultralyd for måling av en rekke miljøparametre. I denne bunnmonterte enheten blir "back-scattered" ultralyd brukt for å måle strømmen i flere nivåer.

Enheten måler:

- Strømstyrke og -retning i 6 nivåer
- Vannstand
- Signifikant bølgehøyde

Enheten er egnet for å overvåke strømforholdene i havner og i trange seilingsleder.



Et produkt fra:

**AANDERAA INSTRUMENTS**

DATA COLLECTING INSTRUMENTS FOR LAND, SEA AND AIR

Fanaveien 13B
5050 Nesttun-Bergen
Norge
Tlf. + 47 55 13 25 00
Fax + 47 55 13 79 50


GRAFISK PRODUKSJON OG TRYKK: OSLO SATS, REPRO & MONTASJE A/S

## Norsk Fysisk Selskap

### STYRE

**President:**
**Professor Thormod Henriksen,**
Fysisk inst., Univ. Oslo.

**Visepresident:**
**Professor Egil Leer,**
Inst. f. teor. astrofys., Univ. Oslo.

**Styremedlemmer:**
**Stipendiat Leni Grant,**
Nordlysobs., Univ. Tromsø.
**Professor Anne Grete Frodesen,**
Fysisk inst., Univ. Bergen.
**Professor Erlend Østgaard,**
Fysisk inst., AVH, Univ. Trondheim.

**Selskapets sekretær:**
**Stipendiat Tove Svendby,**
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo,
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo.
Tlf.: 22 85 56 41, Fax.: 22 85 56 71
E-mail: tove.svendby@fys.uio.no
Postgiro: 5 88 38 89
Bankgiro: 5102.42.00012

### Fra Fysikkens Verden

**Redaktører:**
**Professor Øivin Holter,**
**Professor Finn Ingebretsen,**
Fysisk inst., Univ. Oslo.

**Redaksjonssekretær:**
**Overingeniør Karl Måseide,**
Fysisk inst., Univ. Oslo.

**Redaksjonskomité:**
**Professor Noralv Bjørnå,**
Inst. f. mat. realfag, Univ. Tromsø.
**Professor Anne Grete Frodesen,**
Fysisk inst., Univ. Bergen.
**Lektor Ingerid Hiis Helstrup,**
Langhaugen skole, Bergen.
**Professor Per Chr. Hemmer,**
Inst. f. fys., NTH, Univ. Trondheim.
**Professor Egil Leer,**
Inst. f. teor. astrofys., Univ. Oslo.

**Ekspedisjonens adresse:**
Fra Fysikkens Verden,
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo,
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo.
Tlf.: 22 85 64 28
Fax.: 22 85 56 71 / 22 85 64 22
E-mail:
oivin.holter@fys.uio.no
finn.ingebretsen@fys.uio.no
karl.maseide@fys.uio.no
Postgiro: 0807 5 10 47 24
Bankgiro: 6094.05.40227

Fra Fysikkens Verden kommer ut 4 g. årlig. Abonnement kan tegnes fra ekspedisjonen. Årsabonnement kr. 100. (Studenter kr. 50.) Løssalg kr. 30 pr. nummer.