Fra Fysikkens Verden

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP

INNHOLD

Hva består protonet av? 25

Nytt instrument til reaktoren på Kjeller 28

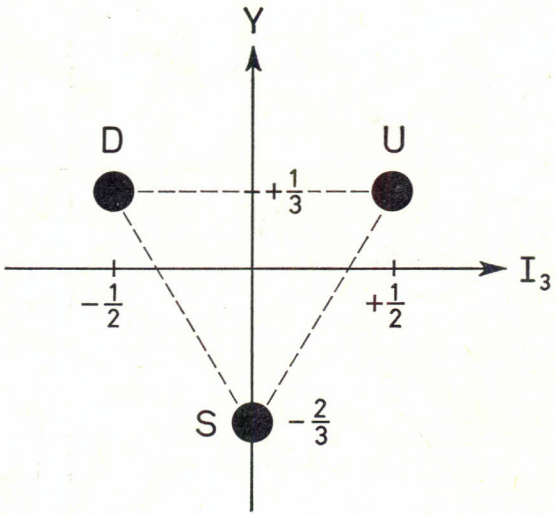
Solenergien og mulige anvendelser 29

Nye medlemmer 33

To-dimensjonal fysikk 34

Fysikk i skolen 38

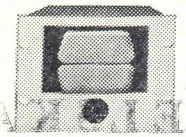
Strålebiologi og -terapi 39



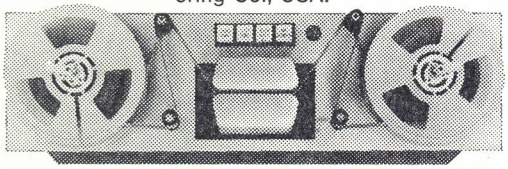
SU(3) diagram for kvarker.
(Hva består protonet av? Side 25)

Nr. 2 - 1975
37. årgang

...hulltapelesere for alle formål



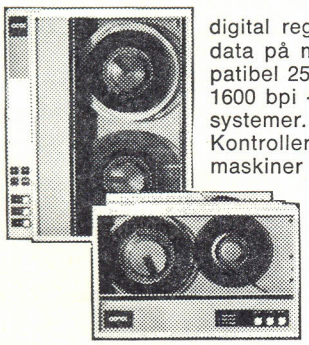
Fra enkle lesehoder til komplette enheter med spolemekanisme. 5, 6, 7 eller 8 hulls tape. Kun en bevegelig del, driftssikker elektronikk. OEM og militærversjoner. Produsent: Electronic Engineering Co., USA.



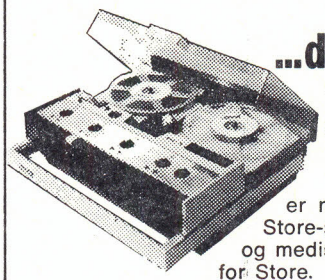
...portabel databehandling

med lagring på kasettbånd for avspilling og behandling i datamaskiner. Ypperlig for lageroppteling, datainnsamling etc. Enkel i bruk. Grei feilkonstruksjon, kontroll av registrerte data m.m. Hendig konstruksjon til akseptabel pris. Produsent: Telxon, USA.

...Kennedy magnetbåndstasjoner



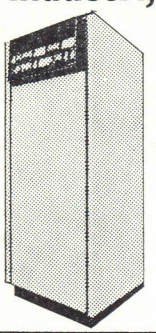
digital registrering og lagring av data på magnetbånd: IBM kompatibel 25 - 75 ips, 556, 800, 1600 bpi - også 3M-kasett drive systemer.
Kontrollere for de fleste minimaskiner kan leveres: DEC, DG, GA, HP, Modcomp m.fl.



...datainnsamling fra 4 eller 7 kanaler

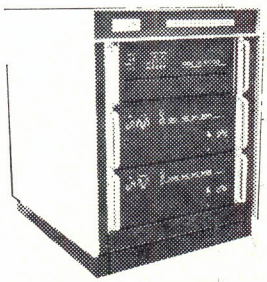
er mulig med RACAL's Store-serie. Vitenskap, industri og medisin- de kan alle ha behov for Store.
7 hastigheter. Registrering opptil 18 timer kontinuerlig. Portabel. Betjeningsvennlig. Store - den slagkraftige instrumentrecorder.
Produsent: RACAL, England.

...datamaskinen for vitenskap, industri, kommunikasjon m.m.

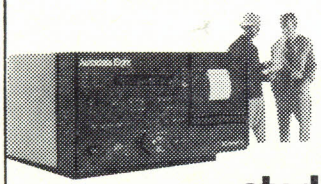


Modcomp øker stadig.
Modcomp har førsteklasses produkter og vi leverer komplette løsninger, hardware og software. Vår organisasjon er satt opp med dette for øye - også spesielle og uvanlige løsninger - for Dem.

...Codex modem og multipleksere



for de med store krav. Pålitelighet er viktig ved datatransmisjon. Derfor velges CODEX til militære, og kommersielle datanettverk over hele verden. «CODEX - we'll get you through».



...datalogging - stadig aktuelt

Innsamling av data som temperatur, strøm, trykk, strekk, torsjon m.m., opptil 1000 målepunkter automatisk. Presentasjon av data i klarskrift, lagring på magnetbånd, papirtape etc. Datalogging er et av våre spesialfelt. Priser fra kr. 20.000,- og oppover. Produsent: VIDAR Autodata/Digitec, USA.

Vårt leveringsprogram representerer noe av det beste datautstyr på markedet. Flere hundre fornøyde norske brukere er det beste bevis på kvalitet, «know-how» og service. Er du med?

Rødland & Rellsmo A.S
FORSKNINGSINSTRUMENTER - DATAUTSTYR
Postboks 6069 - Etterstad - Oslo 6.
Telefon (02) 67 45 90.

Fra Fysikkens Verden

Utgiver: NORSK FYSISK SELSKAP

Nr. 2 - 1975

Redaktør: HAAKON OLSEN

37. årgang

Redaksjonssekretær: HALVARD TORGERSEN

Hva består protonet av?

Kvarkmodellen *

F. Ravndal

Noen av de største gjennombrudd i fysikken er blitt gjort ved erkjennelsen av at den tilsynelatende komplekse og mangfoldige struktur av den materie som omgir oss, kan beskrives og forklares ved at den består av mindre og enklere enheter.

Hver gang en ny under-struktur har blitt innført, har en ny og viktig gren av fysikken samtidig oppstått. De fleste egenskaper ved gasser og væsker kan forklares når en antar at de består av små molekyler (→ kinetisk teori, statistisk mekanikk). Molekyler viste seg så å være sammensatt av mindre og mer fundamentale atomer (→molekylfysikk, moderne kjemi). Rutherford viste at atomet besto av negative elektroner rundt en positiv kjerne (→ atomfysikk, kvantemekanikk). Idag vet vi at kjernen består av nøytroner og protoner (→ kjernefysikk).

Mange hadde vel håpet at vi dermed hadde kommet til bunns i materiens oppbygning. Men heldigvis, de siste årene har vi observert over 200 andre partikler, stabile og ustabile, med lignende egenskaper som nukleonene. De kalles hadroner. Avhengig av deres spinn, kan de deles opp i to undergrupper. Partikler med heltallig spinn (bosoner) kalles mesoner og de med halvtallig spinn (fermioner) kalles baryoner.

Den mest nærliggende måte å forklare alle egenskapene ved denne mangfoldighet av nye partikler, var å introdusere et nytt sett med enklere og mindre enheter. Det ble gjort av Gell-Mann og Zweig ved Caltech i U.S.A. for vel 10 år siden. Disse nye partikler ble kalt kvarker.

For å forklare alle de observerte fenomen, var det nødvendig å innføre 3 forskjellige kvarker. Vanligvis betegnes de med bokstavene U, D og S. Deres kvantetall er gitt i Fig. 1. Langs den horisontale akse har vi angitt den tredje komponent I_3 av isospinnet og langs den vertikale akse er plottet hyperladningen Y som er lik baryontallet pluss særtallet (strangeness). Kvark U har isospinn «up» og kvark D har isospinn «down». Kvark S har null isospinn, men er sær (strange). Den elektriske ladning Q av hver kvark er gitt ved den berømte formelen

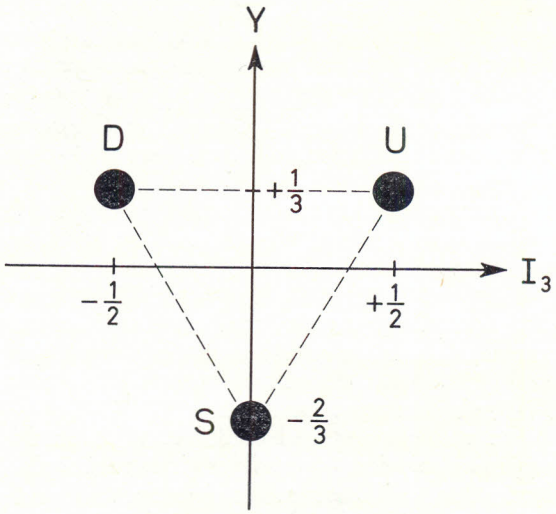


Fig. 1. SU(3) diagram for kvarker. Langs den horisontale akse er plottet tredje komponent av isospinnet og langs den vertikale akse er plottet hyperladning.

* Denne artikkel er delvis basert på et foredrag om samme emne på møte i Norsk Fysisk Selskap i Trondheim, 1973.

Finn Ravndal, Ph. D. er associated professor ved NORDITA, København.

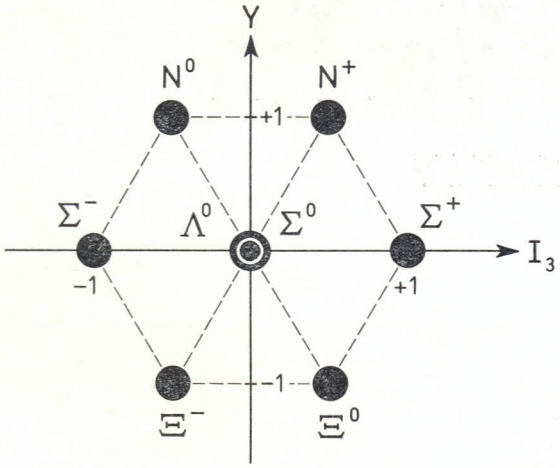


Fig. 2. Protonet N+ og nøytronet N⁰ tilhører en SU(3) oktett sammen med seks andre baryoner. Alle har spinn 1/2.

$$Q = I_3 + \tfrac{1}{2} Y$$

som ble først skrevet ned av Gell-Mann og Nishijima. Fra denne følger at U-kvarken har ladning $+\frac{2}{3}$, mens D- og S-kvarken begge har ladning $-\frac{1}{3}$.

De tre kvarkene i Fig. 1 danner en såkalt triplett representasjon av den unitære gruppen SU (3).

Vi har ennå ikke sagt noe om kvarkenes spinn. Da vi vil konstruere både baryoner med halvtallig spinn og mesoner med heltallig spinn ved hjelp av disse nye byggeblokkene, er det mest rasjonelt å gi hver kvark spinn ½. De er derfor Dirac-partikler som elektronet. Teorien for slike partikler sier at der må eksistere tilsvarende antikvarker $\bar{U}$, $\bar{D}$ og $\bar{S}$ med samme spinn, men med kvantetall med motsatt fortegn fra dem i Fig. 1.

Mesoner har baryontall lik null og kan derfor enklest beskrives som tilstander av en kvark og en antikvark. Siden der er 3 kvarker og 3 antikvarker, vil vi dermed få 9 forskjellige meson tilstander. Gruppeteori viser så at 8 av disse mesonene danner en såkalt oktett representasjon av SU(3), mens det niende meson tilhører en SU(3) singlett representasjon.

Fra vanlig kvantemekanikk vet vi at kombinasjon av to spinn ½ partikler gir et totalt spinn lik 0 eller 1. Tilsammen får vi derfor fra kvarkmodellen 8 + 1 pseudoskalare (spinn 0 og negativ paritet) mesoner og 8 + 1 vektor (spinn 1 og negativ paritet) mesoner. I den pseudoskalare oktett tilhører blandt annet de tre π-mesoner,

$$\pi^+ = U\bar{D}\,,\ \pi^- = D\bar{U}$$

$$\pi^0 = \sqrt{\tfrac{1}{2}}\ (U\bar{U} - D\bar{D}),$$

og de fire K-mesoner,

$$K^+ = U\bar{S}\,,\ K^- = S\bar{U}$$

$$K^0 = D\bar{S}\,,\ \bar{K}^0 = S\bar{D}.$$

På tilsvarende måte tror vi at baryoner består av tre kvarker og antibaryoner av tre antikvarker. Addisjon av tre spinn ½ gir et totalt spinn lik 1/2 eller 3/2. Regner vi med SU(3) kvantetallene, finner vi åtte baryoner med spinn 1/2 og ti med spinn 3/2. Den første gruppe er igjen en oktett, mens den siste gruppe på ti kalles en SU(3) decimett.

Oktett-baryonene kan vi plassere i et tilsvarende diagram som det i Fig. 1. for kvarkene. Hver tilstand av tre kvarker kan vi nå identifisere med et observert baryon som vist i Fig. 2. Vi finner herav kvark-innholdet av de to nukleonene:

$$\text{Proton} = N^+ = UUD$$

$$\text{Nøytron} = N^0 = DDU$$

De 10 baryonene med spinn 3/2 er plassert i et lignende diagram i Fig. 3. I den nederste enden av denne tegningen er den nå så berømte Ω^- partikkel plassert. På den tiden da de observerte baryonene med spinn 3/2 ble plassert i en slik decimett, var det ingen som passet inn i det nederste hjørnet i trekanten.

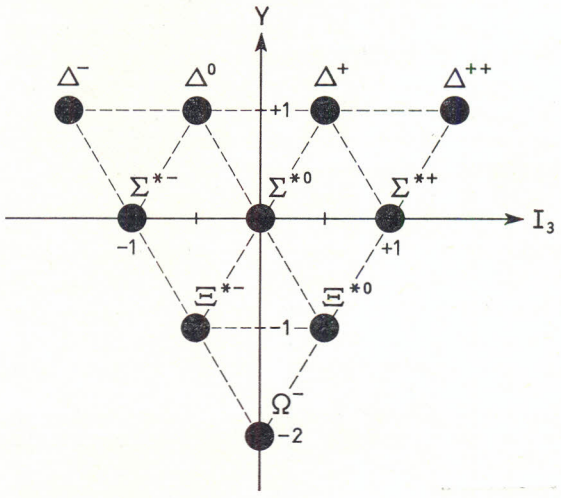


Fig. 3. 10 baryoner med samme spinn 3/2 danner en SU(3) decimett.

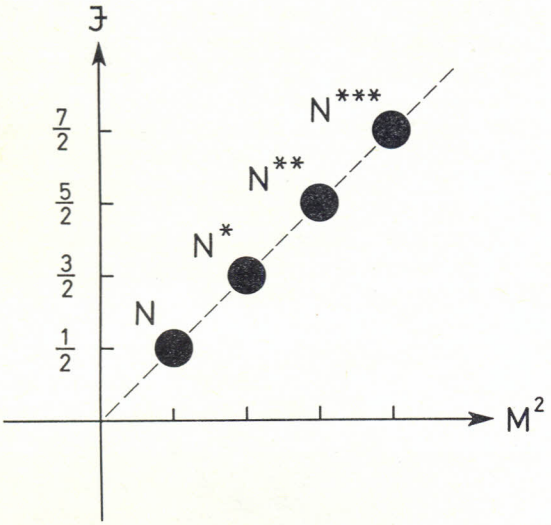


Fig. 4. Et eksempel på hvordan mange nukleon resonnanser grupperer seg langs rette Regge-spor. Den vertikale aksen gir det totale spinn til resonnansen, mens langs den horisontale aksen er plottet kvadratet av dens masse.

Gell-Mann forutsa da at en ny partikkel som han kalte Ω^-, måtte eksistere. Fra Fig. 3 følger det at den måtte ha null isospinn, hyperladning lik – 2 og elektrisk ladning – 1. Litt over et år senere ble to slike partikler observert ved den største partikkel-akselerator i U.S.A. Dette var den første eksperimentelle indikasjon på at der virkelig kunne være en underliggende SU(3) symmetri i hadronenes oppbygging.

Som allerede nevnt, tror vi at protonet kan beskrives som en tilstand av to U-kvarker og en D-kvark med totalt spinn lik 1/2. Da vi også kjenner de elektriske ladninger av hver kvark, er det en forholdsvis enkel sak å beregne det magnetiske moment til protonet. Antar vi at hver kvark har en masse m_Q , finner vi for protonet

$$\mu_p = \mu_Q = + e/2m_Q$$

$$= + 2.79\, e/2m_N \quad \text{eksperimentelt}$$

På tilsvarende måte får vi for nøytronets magnetiske moment

$$\mu_n = -2\mu_Q/3 = - e/3m_Q$$

$$= - 1.91\, e/2m_N \quad \text{eksperimentelt}$$

Fra kvarkmodellen finner vi altså følgende forhold mellom de to magnetiske moment

$$\mu_n/\mu_p = - 2/3 = - 0.667$$

De eksperimentelle verdier gir for dette forholdet – 0.685. Overensstemmelsen er god, men ikke perfekt. Det kan tyde på at kvarkmodellen er en litt for forenklet beskrivelse av de virkelige forhold. Protonet er sannsynligvis litt mer komplisert enn to U-kvarker og en D-kvark.

Fra de beregnede magnetiske moment kan vi også konkludere at kvarkmassen m_Q må være omtrent 1/3 av protonets masse, ca. 310 MeV. Dette er også den verdi en ville få fra å anta at de tre kvarker i protonet beveger seg omkring ikke-relativistisk og med liten bindingsenergi. Da er protonets masse omtrent lik summen av tre kvarkmasser.

I innledningen nevnte vi at i dag vet vi om over 200 stabile og ustabile hadroner. De ustabile kalles vanligvis hadron resonanser da de har uhyre korte levetider. Foreløpig har vi fra kvarkmodellen funnet tre oktetter, en decimett og to singletter. Det er tilsammen bare 36 hadroner. Hva består de resterende partikler av? Eksperimentelt viser det seg at alle andre hadroner også tilhører oktetter, singletter og decimetter. Den eneste forskjell er at de har spinn og paritet forskjellig fra hva man får ved å addere sammen kvarkspinn. For eksempel finner en at det er mange nukleon resonanser med spinn større en ½. Ustabile nukleoner med spinn lik 3/2, 5/2, 7/2, og 9/2 er blitt observert. Desto større spinnet er, desto større er partikkelens masse. Plotter en det totale spinn J til hver nukleon resonans som funksjon av dets kvadrerte masse M^2, finner en at mange av dem tilnærmelsesvis ligger langs rette linjer som er vist i Fig. 4. Disse linjer kalles vanligvis Reggespor. Nukleon resonansene er Regge-gjentagelser av det stabile nukleon med spinn lik ½.

Dette kan også forstås i kvarkmodellen hvis vi antar at kvarkene i nukleonet er i bevegelse slik at de har et visst vinkelmoment **L**. Det totale spinn **J** vil derfor være summen av **L** og det totale kvarkspinn **S** som for nukleonet er lik 1/2. Kvantemekanikken sier at L kan anta verdiene 0, 1, 2, 3, osv. Vi kan derfor forstå de ustabile nukleonene som tilstander hvor kvarkene er i banebevegelse med vinkelmoment forskjellige fra 0.

At Regge-sporene i Fig. 4 tilnærmet er rette linjer, er ennå ikke forstått innen kvarkmodellen. Det sier noe om kreftene som holder kvarkene sammen. Den mest nærliggende forklaring er at disse kreftene er harmoniske som elastiske fjærer. Hva det virkelig er som binder kvarkene sammen i baryoner og mesoner, er et av de mest

fundamentale og omdiskuterte problem innen teoretisk høyenergifysikk idag.

I denne meget forenklete presentasjon av kvarkmodellen har vi prøvd å gi en idé om hvordan vi tror hadronene er oppbygd. For å bruke en analogi med atomfysikk, vi har kun diskutert spektrumet av hadroner. Men det skal også sies at den samme modellen har vært meget vellykket i å gi en kvalitativ og ofte en kvantitativ beskrivelse av alle de forskjellige overgangssannsynligheter (levetider) mellom forskjellige ustabile hadron tilstander.

I de siste år har man ved såkalt dyp, uelastisk spredning av elektroner og nøytrioner på nukleoner ved Stanford i U.S.A. og ved CERN vært i stand. til å trenge inn i protonets indre og måle direkte spinnet og kvantetallene på protonets mindre deler. De oppnådde resultat er i meget god overensstemmelse med hva kvarkmodellen forutsa.

Disse viktige eksperiment og hva de forteller oss om protonets struktur, vil bli omtalt i en følgende artikkel.

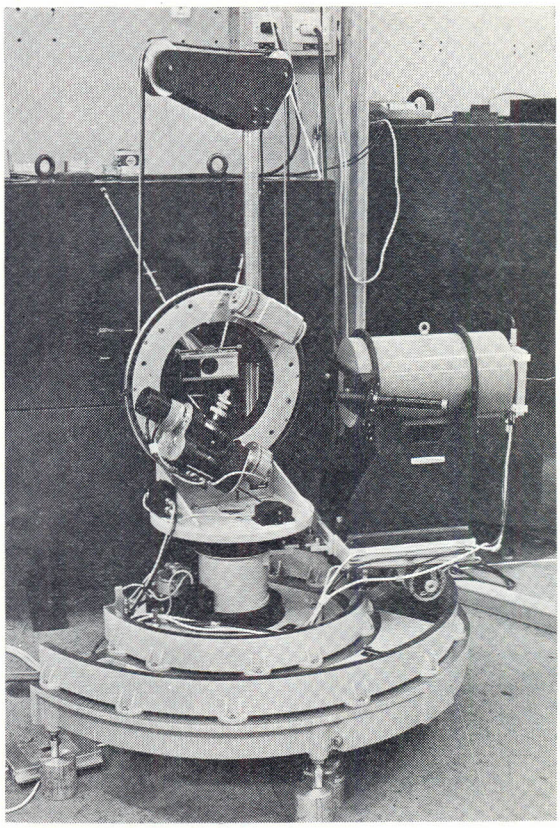
Nytt instrument til reaktoren på Kjeller

*A. F. Andresen**

Ved reaktoren på Kjeller har man i vår tatt i bruk et helautomatisk neutrondiffraktometer for strukturundersøkelser. Det er den norske nasjonalkomité for krystallografi som står bak prosjektet og som har fått bevilget de nødvendige midler gjennom NAVF. Den mekaniske delen er innkjøpt fra Grubb Parsons, Newcastle upon Tyne, England, mens det elektroniske utstyr og programmeringen er utviklet ved Institutt for Atomenergi.

Neutroner har som kjent vist seg å være et nyttig hjelpemiddel i strukturfysikken. Det som gir neutroner et fortrinn fremfor elektroner og røntgenstråler er vesentlig at spredningen av neutroner skjer på kjernen mens spredningen av elektroner og røntgenstråler finner sted på den omgivende elektrosky. Derfor bestemmer man med neutroner kjernens beliggenhet direkte uavhengig av mulige deformasjoner av elektronskyen. På grunn av kjernens lille utstrekning er spredningen i motsetning til elektron- og røntgenspredning isotrop. Spredningsamplityden er av samme størrelsesorden for både lette og tunge atomer. Dette gjør det mulig med letthet å fastlegge posisjonen til hydrogenatomene i for eksempel hydrider og organiske stoffer.

På Kjeller har vi helt siden vår første reaktor startet utført strukturundersøkelser ved hjelp av neutroner. Med det eksperimentelle utstyr som har vært tilgjengelig har disse stort sett vært begrenset til pulvermetoden. Til mer kompliserte undersøkelser, spesielt av organiske stoffer, er det nødvendig med énkrystaller. Med pulvermetoden kan man for et stoff i høyden måle ca. hundre Bragg-refleksjoner. Ved énkrystallmetoden er det derimot både mulig og ønskelig å måle opp til flere tusen Bragg-refleksjoner. Derfor trenger man et helautomatisk utstyr som kan måle dag og natt i ukevis med god pålitelighet.



Det instrument som nå er tatt i bruk ved reaktoren JEEP II på Kjeller (se bilde) er et

(Forts. s. 48)

* Institutt for Atomenergi, 2007 Kjeller.

Solenergien og dens mulige anvendelser

B. J. Brinkworth, overs.: O. Steinsvoll*

Sammendrag

En har gjort vidtrekkende studier over de mulige måter som solenergien kan bli nyttet på i hjemmene, i handelen og til industrielle formål. Noen anvendelsesmåter er allerede økonomiske og utsiktene til de andre blir bedre ettersom tidsepoken for billig brensel går ut. Norges andel av solenergi er ikke liten, og dets mulige tilskudd til landets energiforbruk fortjener nærmere undersøkelse.

Tidsepoken for fossilt brensel er nesten over, toppen i oljeproduksjonen nås sannsynligvis om 20 år og for kull innen ett århundre. Fisjonsreaktorer vil langsomt ta over innen den alminnelige energiproduksjon, men bygging av reaktorer i et slikt omfang som vil være nødvendig, fører til sikkerhetsproblemer og vansker med å bli kvitt det radioaktive avfallet. Disse problemene har ført til frykt hos store deler av befolkningen. Fusjonsreaktorer er enda i det blå og det kan tenkes at de ressurser av kapital og arbeid som blir nyttet på dette feltet heller skulle bli brukt til å utforske alternative energikilder, spesielt solenergi. Dette er den eneste uuttømmelige kilde som er i stand til å møte energietterspørselen i framtida (det nåværende energiforbruk er mindre enn den totale solenergi som faller på et område 100 km^2 i den tempererte sone). Solenergien avgir ikke støy eller giftige gasser og menneskets bruk av den trenger ikke virke inn på den globale energibalanse. Undersøkelser har vist hvordan den kan bli brukt direkte for koking og oppvarming, til å drive termodynamiske systemer som destillasjon, avsalting av sjøvann, friskluftanlegg, tørking av høy og annen avling osv. Solenergien kan også nyttes i varmekraftmaskiner, kjøleapparater og varmepumper og til direkte omforming til elektrisitet i termijoniske, termoelektriske og fotoelektriske generatorer. Den kan også nyttes i fotokjemiske og fotobiologiske prosesser der en kan syntetisere mange kjemiske og farmasøytiske produkt, deriblant også flytende og gassformig brensel (1).

Selv om store undersøkelser er blitt gjort på alle disse områder og mange av disse apparater er blitt kjørt som prototyper, gjenstår det mye arbeid før en kan regne med at de vil bli brukt i stor skala. US National Science Foundation anbefalte i 1972 at $3500 mill. skulle bli brukt til forsking og utvikling på dette området. En antok da at solenergi kunne stå for 35 % av energien til oppvarming og avkjøling av bygninger, 40 % av brenslet og 20 % av elektrisitetsproduksjonen (2). Et liknende program ble anbefalt av Australian Academy of Science siste året (3), og en vet at Japan nå setter i gang med et stort solenergiprogram. Hvis en summerer utgiftene i alle disse forskningsprogrammene, representerer de investeringer som kan sammenliknes med månelandingsprogrammet Apollo.

Det har vært mindre interesse for solenergi i Europa, selv om franskmennene har vært aktive i noen år og opererer verdens største solenergiapparat på det nåværende tidspunkt (1 MW solovn i Odeillo i Pyreneene). Et annet eksempel på et langtidsprogram er Solar Energy Unit ved The University College, Cardiff der en nå har drevet undersøkelser over en ti års periode hvordan en skal nytte solenergien i Storbritannia. Innbyggerne i nord-vest Europa blir vanligvis meget overrasket når de hører at de mottar opp til halvparten av solenergien som faller på Australia og opptil 2/3 av det som faller på USA.

Karakteristikk av solstrålinga

Fra en ingeniørs synspunkt er sola en uvanlig strålekilde. Solas høye temperatur gir opphav til høye fotonenergier (mellom 0.5–3.0 eV), men energifluksen er meget lav og tilførselen svinger i takt med døgnet og årstidene (avhenger av breddegrad) samtidig som en har tilfeldige variasjoner forårsaket av været. På toppen av atmosfæren er energifluksen omtrent

* Dr. Brinkworth er Reader in Mechanical Engineering, University College, Cardiff, England. Foredraget ble holdt under fysikermøtet i 1974.

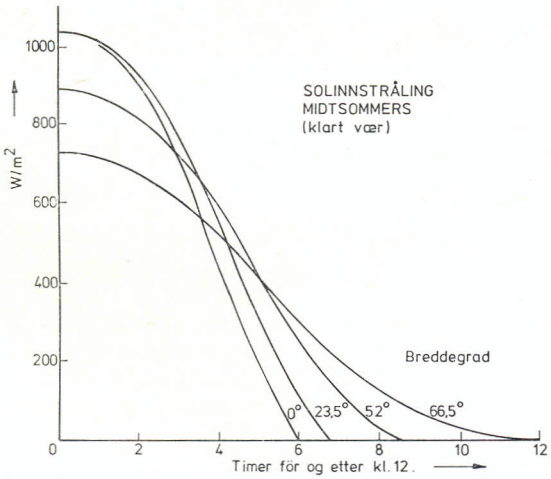


Fig. 1

1.3 kW/m², men en hærskare av spredning- og absorbasjonsprosesser reduserer dette til et maksimum på 0.9 kW/m² ved jordens overflate. På klarværsdager nærmer fluksen seg dette tallet i Norge. Den daglige variasjonen på en klar sommerdag for ulike breddegrader blir vist på fig. 1, og den totale energi som faller på en horisontal flate, er gitt ved arealene under disse kurvene. Selv om energifluksen blir redusert ved høye breddegrader på grunn av den lengere vei gjennom atmosfæren, blir dette kompensert ved en økning av dagens lengde slik at den totale energiinnstråling bare varierer svakt med breddegraden rundt en verdi på ca. 8 kWh/m² pr. dag. Om vinteren varierer likevel energien sterkt med breddegraden og for Norge er da den tilgjengelige energi nesten null. Gjennomsnittsverdiene er ikke så små som en kanskje ventet. Skydekke og tåke sprer strålinga sterkt, men fordi mesteparten av vanndråpene er større enn lysets bølgelengde, blir mesteparten av strålinga spredt framover. Unntagen når det er ekstra tykt skydekke når mye av solstrålinga ned til jordoverflaten. Denne diffuse komponent kommer fra alle kanter, og det er derfor umulig å samle solstrålinga med en reflektor. Det er sannsynlig at i Norge vil omtrent halvparten av strålinga utgjøres av den diffuse komponenten. Den sydlige delen av landet mottar på en gjennomsnitts sommerdag omtrent 4.5 kWh/m². Den årlige totalenergi for en horisontal flate vil være på ca. 780 kWh/m². Det er å bemerke at en selv i tropene bare mottar litt mer enn dobbelt så mye som dette.

Direkte bruk av solenergi

Den mest direkte bruk av solenergien som allerede blir nyttet i stor skala, er oppvarming av vann i hjemmene. Et typisk flatt oppsamlingssystem for solvarme blir vist i fig. 2. Strålinga går gjennom en gjennomsiktig dekselplate og blir absorbert i oppsamlingsplata, denne står i kontakt med en væske som sirkulerer i rør under plata. Effektiviteten i omformingen av solenergi til varme avhenger av den temperatur som innfangningsplata får ligge på. Når den varmes opp, begynner den å sende ut infrarød stråling som blir stoppet av dekslet (sammenlign drivhuseffekten). I sin tur blir så dekslet oppvarmet og avgir noe av sin energi til omgivelsene ved konveksjon og stråling. Fordi strålinga som oppsamlingsplata avgir, har lengere bølgelengde enn den primære solstrålinga, blir det mulig å behandle overflaten slik at den har god absorbsjonsevne men lav emisjonsevne. Med en temperatur på 40° C på innfangningsplata vil ca. 60 % av den innfallende solenergi kunne nyttes, men dette faller til 30 % hvis temperaturen øker til 60° C.

Millioner av vannvarmere av denne typen er nå i bruk i ulike deler av verden, og flere utgaver er blitt markedsført i Storbritannia. Inntil nå nylig har en ikke gitt disse vannvarmerne tilstrekkelig oppmerksomhet når det gjelder å optimalisere dem for bruk ved høye breddegrader. Nyere forskning og tekniske framskritt har ført til vannvarmere som kombinerer god termisk virkningsgrad med stor holdbarhet. De store svingninger i solstrålinga gjennom året betyr at vannvarmerne ikke kan være like effektive hele tida, en må se på dem mer som brenselssparere enn som erstatning for konven-

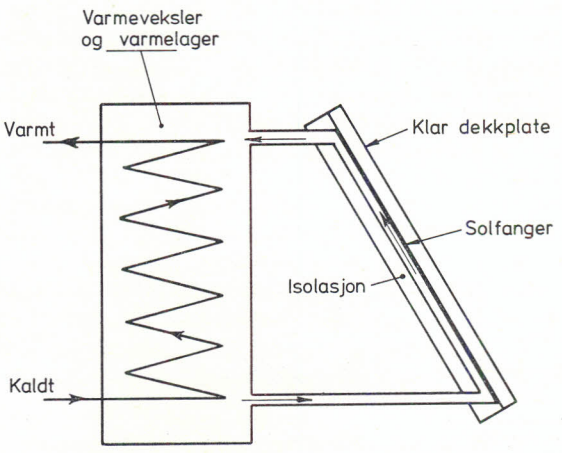
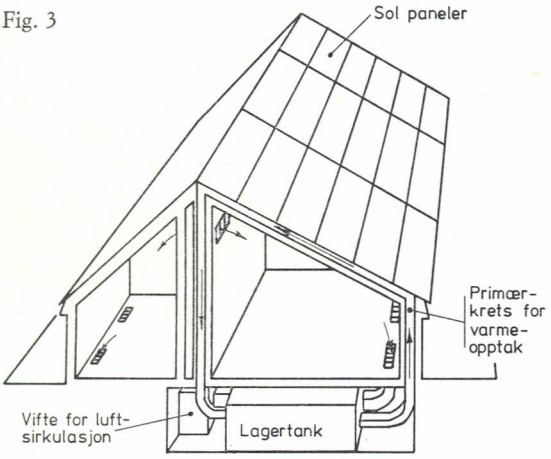


Fig. 2

Fig. 3



sjonelle varmtvannsberedere (4). Oppsamlingsflater på ca. 10 m² kan skaffe mesteparten av varmtvannet til en husholdning i sommerhalvåret. I Storbritannia kan en få en god del også om vinteren. Det er ventet at det vil bli mulig å markedsføre systemer med en økonomisk nedbetalingsperiode på omtrent 10 år. Hvis bare 1 % av boligene ble utstyrt med dem, ville Storbritannias energisparing være omtrent 1000 mill. kWh/år.

En tenker nå på store anlegg for sykehus og skoler, gårdsbruk og fabrikker. Dessuten kunne en bruke slike anlegg til husoppvarming. I de siste par tiår er det blitt bygd atskillige såkalte «solvarmehus» i Storbritannia. I disse må en bygge inn utstyr til energioppbevaring for å jevne ut svingningene i energitilførselen gjennom dagen og året, og de svingninger som skyldes været. Termisk oppsamling blir muliggjort ved å endre temperaturen på et godt isolert reservoar som kan være enten i flytende eller fast form. En kan også bygge på latent varmeutvikling når oppbevaringsstoffet går gjennom en faseovergang. Konstruksjonen av varmeoppsamlingsenheter innebærer vanskelige varmeoverføringsproblemer, og her er det bruk for originale og skapende oppfinnere. En typisk husoppvarmingsenhet som bruker varm luft blir vist i fig. 3. Varmeoppbevaringsenheten for slike anlegg må være uforholdsmessig stor ved høye breddegrader, og en er derfor igang med arbeid for å finne metoder som kan redusere størrelsen slik at en kan installere slike anlegg i vanlige bolighus. Optimaliseringsstudier viser at det ikke er økonomisk å erstatte vanlig oppvarming fullstendig med dette systemet, men ved 50° bredde vil det kunne passe å ta mellom 1/3 eller 1/2 av oppvarmingsenergien fra sola for et vanlig bolighus (5). Solenergien kan her

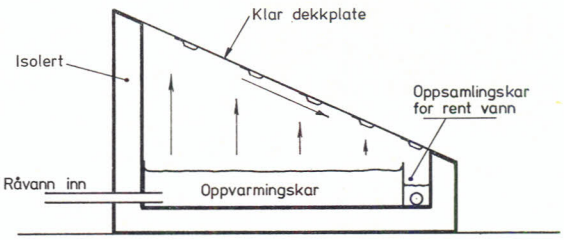


Fig. 4

bli sett på som en brenselssparing, selv om en sannsynligvis vil kunne dekke all oppvarming med solenergi i spesialkonstruerte bygninger.

Hvis en slik solabsorbsjonsinnretning står åpen om natta uten deksel, vil den tape varme når det er klarvær. I noen land vil derfor samme innretning kunne nyttes som vannvarmer om dagen og til avkjølingsformål om natta. I nord-vest Europa er fuktighetsgraden vanligvis høy, og atmosfæren der oppfører seg temmelig likt en svart hulrom ved 280 K. Under slike forhold vil ikke atmosfæren kunne ta opp særlig mye varme. Mer virkningsfull avkjøling og friskluftproduksjon vil en kunne få ved konvensjonelle kjøleapparater der en nytter solenergi som energitilførsel. Dette er en særlig tiltrekkende løsning fordi tilbud og etterspørsel etter energi her er i fase: Solenergien er på topp når avkjølingsbehovet er størst, altså motsatt av oppvarmingssituasjonen.

Et annet apparat som er blitt undersøkt, er en destillasjonsinnretning drevet med solenergi, se fig. 4. Forurenset vann fra en salt- eller brakkvannskilde blir sendt inn i et slags svart kar der det blir oppvarmet av sola gjennom et gjennomsiktig deksel. Vannet fordamper, og dampen kondenserer på det kjøligere dekslet og drypper ned i et trau. Destillasjonsinnretninger av dette slaget er blitt bygd i stor skala, flere mål i utstrekning og kan produsere rent vann som tilsvarer ca. 5 mm nedbør pr. dag.

Elektrisk kraft fra solenergi

De første maskiner drevet med solenergi ble bygd for over 100 år siden, men de har ikke kunnet konkurrere i denne tidsepoken da en har hatt tilgang på så mye billig brensel. Grunnen til denne lave konkurranseevnen har vært at en har nyttet flate energioppsamlingsplater ved lav temperatur, noe som fører til dårlig energioppsamlingsevne (< 5 %). De høye temperaturene som trengs for å få høy effektivitet i et hvert termodynamisk system kan bare oppnås ved å samle opp solenergi over et stort område

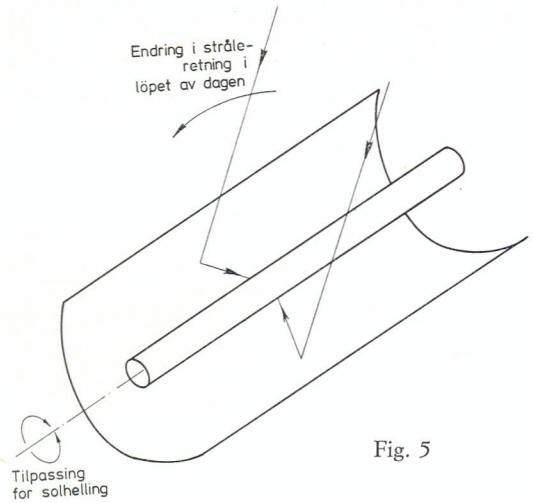


Fig. 5

og konsentrere den på et meget lite område. (Ovnen i Odeillo når opp til 1 MW i fokuseringsområdet, og en kan der få temperaturer på over 4000 K). Lange parabolske reflektorer, se fig. 5, trenger en ikke å styre etter sola, og de er derfor å foretrekke fremfor rotasjonssymmetriske reflektorer. De er likevel mindre effektive enn de sistnevnte. En kan stille dem inn i en fast øst-vest retning, og de trenger bare en vipping på ± 23.5° i løpet av året for å ta opp endringen i solas høyde på himmelen. De kan ikke fange inn den diffuse komponent fra sollyset, og på årsbasis vil effektiviteten bare ligge på ca. 40 %. Sammen med en termodynamisk innretning som på fig. 6, vil totaleffektiviteten ikke komme over 10 %. Likevel er det blitt gjennomført seriøse studier av solfangingsapparater og kraftgeneringssystemer i en størrelsesorden at det har ført til oppnavnet «solfarmer». Det er blitt hevdet at en kan produsere elektrisk kraft til en pris av ca. 5 mils/kWh (6). Anleggsomkostningene for et slikt anlegg vil ligge mellom det det koster å bygge et kjernekraftverk og et kraftverk der en nytter fossilt brensel.

Som en følge av romfartsprogrammene har en fått atskillig erfaring med termijoniske og termoelektriske innretninger som fanger inn og omformer solenergi direkte til elektrisitet. Siden begge typer innretninger (se fig. 7) trenger store temperaturdifferanser for å få høy virkningsgrad, vil de ved vanlig bruk lide av de samme begrensninger som varmekraftmaskiner.

Den høyeste maksimumstemperaturen trengs i den termijoniske generatoren, dette skyldes ikke bare kravet om høy termodynamisk virkningsgrad, men vel så mye kravet om stor strømstyrke fra katoden. Denne blir bestemt av den såkalte Richardson-funksjonen. Temperaturer i området 1500 K er nødvendig, og dette forutsetter bruk av solfangere og konsentrasjonsinnretninger med god optisk kvalitet. De må også kunne siktes inn på og følge sola med stor nøyaktighet. På grunn av begrensningene som skyldes romladningseffekter ved høye strømstyrker, må en dessuten ha en meget liten avstand mellom elektrodene, eller en må sette inn en nøytraliseringsinnretning som sender ut f. eks. positive cesium-ioner. Disse og andre vanskelige praktiske problemer har gjort at den termijoniske generatoren ikke lenger blir sett på som særlig fordelaktig i samband med utnytting av solenergien (1).

En annen begrensning møter en i samband med den termoelektriske generatoren som nytter Seebeck-effekten. Den oppstår når elektroner vandrer ned en temperaturgradient. En kan vise at den maksimale energiomformingseffekt for en slik innretning er mindre enn Carnots

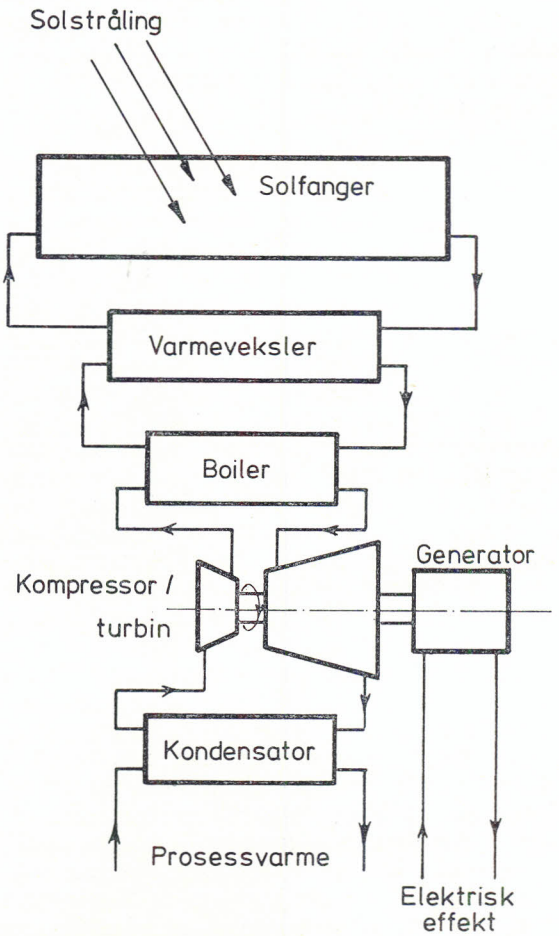
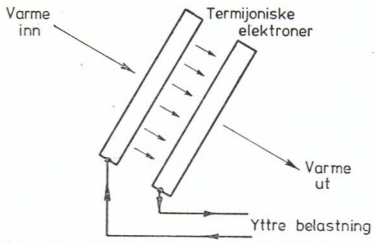
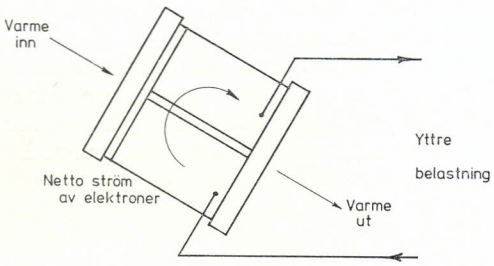


Fig. 6

Fig. 7





termodynamiske effektivitet. Reduksjonsfaktoren er $(n - 1)/(n + r)$, der r er forholdet mellom temperaturene på den kalde og varme metallskjøten, og n er gitt ved likninga

$$n = (1 + Z \cdot T_m)^{1/2}$$

Her er T_m gjennomsnittstemperaturen på de termoelektriske metallene som blir benyttet og Z er en materialkonstant som karakteriserer godheten av materialene til dette formålet. De høyeste verdier for Z har en funnet i meget spesielle halvledere. En har laget store oversikter over de materialer som er mest lovende ved ulike temperaturer. Teoretiske overlegninger forteller at det fins en øvre grense for produktet $Z \cdot T_m$ på omtrent 3, men i praksis ligger produktet rundt verdien 1. Den høyeste effektivitet får en ved å sette en rekke termoelementer i serie, der hvert element får høve til å virke ved sin optimale temperatur. For en tandem-innretning med 2 trinn har en oppnådd 13.5 % effektivitet. I dette tilfellet besto høytemperaturtrinnet av en Ge-Si-legering med en temperatur på mellom 300–500 K (7).

Som før nevnt får en bare høy effektivitet ved å nytte høy temperatur, og dette kan en bare få ved å fange inn og konsentrere solenergien. De flate solfangerne (se fig. 2) uten konsentrering av energien har svært liten omformingseffektivitet, typisk mindre enn 1 %. De er likevel av stor interesse på grunn av sin enkle konstruksjon og den evnen de har til også å ta opp den diffuse komponenten av solstrålene.

Forts. neste nr.

REFERENCES.

1. BRINKWORTH, B. J. *Solar Energy for Man,* Compton Press, 1972, ISBN 9001 9313 1.
2. DONOVAN, P. et al. An assessment of solar energy as a national energy resource. NSF RA/N-73–001, Univ. Maryland, 1972.
3. Solar energy research in Australia. Aust. Acad. Sci. Report No. 17, Sept. 1973.
4. HEYWOOD, H. Solar energy for water – and space heating. J. Inst. Fuel, *27,* 1954, 334–352 & 365.
5. LORSCH, H. G. The use of solar energy for residential space heating. Energy Conversion, *13,* 1973, 1–5.
6. MEINEL, A. B. & MEINEL, M. P. Physics looks at solar energy. Physics Today, Feb. 1972, 44–50.
7. ROSI, F. D. Thermoelectricity and thermoelectric power generation. Solid-State Electronics, *11,* 1968, 833–868.
8. Currin, C. G. et al. Feasibility of low-cost silicon solar cells. 9th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., John Hopkins Univ., Maryland, May 1972.
9. COSTE, G. Technological improvements on CdS solar cells.
   FREMY, J. &. *Solar Cells,* Gordon & Breach, 1971, 187–200.
10. MELLOR, J. M., PHILLIPS, D. B., SALISBURY, K. Photochemistry: New technological applications. Chemistry in Britain, *10,* 1974, 160–166.
11. *Statistics of Energy, 1955–1969* OECD, Paris, 1971.
12. ANDERSON, J. H. & ANDERSON, J. H., Jnr. Thermal power from sea-water. Mech Engg. *89,* 1966, 41–46.

Nye medlemmer opptatt på styremøtet 7/5 1975

Vit.ass. P. A. Amundsen. Fysisk Institutt, Universitetet i Bergen.
Dr. B. Grandal. Forsvarets Forskningsinstitutt, avd. E, Kjeller.
Forsker E. Haugen. NTNF, avd. for Romvirksomhet, Oslo.
Forsker B. S. Haugstad. Forsvarets Forskningsinstitutt, Kjeller.
Cand.real. Chr. Lunde Nilsen. 5095 Ulset.
Vit.ass E. Morild. Kjemisk Institutt, Universitetet i Bergen.
Vit.ass. L. O. Tveita. Fysisk Institutt, Univ. i Bergen.
Forskningsstip. O. J. Aashamar. Fysisk Institutt, Univ. i Bergen.

Studentmedlem
Hovedfagsstudent Jørn Wroldsen. Teoretisk Fysikk, Universitetet i Oslo.

To-dimensjonal fysikk

Emil J. Samuelsen

Samandrag: Det er enklare å forstå fysiske fenomen i to enn i tre dimensjonar, og der er døme på at eksakt løysing på eit problem finst for to-, men ikkje for tredimensjonale system. Iblant ytrar fysikken seg også ulikt for dei to tilfella; Døme på det er smelting som skjer brått for tredimensjonale stoff, men kontinuerlig for to-dimensjonale.

I det siste har fysikarane vore i stand til å studere to-dimensjonale fenomen eksperimentelt. I denne artikkelen skal vi sjå på to døme: adsorberte gassar på reine overflater, og to-dimensjonale magnetar.

1. *Innleiing*

For det meste lever vi og rører oss omkring på ei to-dimensjonal jordoverflate. Men vi har likevel full kjensle at av vi tilhører ei verd av tre dimensjonar, og naturvitskapen vår er retta mot å beskrive denne tre-dimensjonale verda. Avanserte fysikarar hevdar til og med at det er fire dimensjonar i det rommet vi lever i, og teoretikarar og matematikarar generer seg ikkje for å tale om generelle d-dimensjonale rom.

Anten rommet vårt har fire eller tre dimensjonar så syner naturen mange tilfelle av ovringar der berre ein eller to dimensjonar er viktige for dei fysiske eigenskapane. Døme på to-dimensjonale fenomen finn ein på overflater og i fasegrenser i fast og flytande stoff, men som vi skal sjå har naturen også andre eksempel å by på.

To-dimensjonale og endå meir ein-dimensjonale framstillingar av fysiske ovringar er gjerne greiare å forstå og enklare å behandle matematisk enn den fulle tredimensjonale framstillinga. Når ein i krystall-fysikken skal lære studentane om gittersvingingar, kan ein få fram dei viktige punkta ved å gå gjennom ei ein-dimensjonal berekning som er lett å følgje. For enkelte typar problem kan ein finne at ei eksakt beskriving er mogleg for ein eller to dimensjonar, men ikkje for tre. Det mest kjende dømet her er Ising-modellen, ein forenkla matematisk modell som blir brukt på ei rekke fysiske og kjemiske problem. For tre dimensjonar kan ein ikkje beskrive Isingmodellen eksakt. For den to-dimensjonale Ising-modellen vart løysinga gitt første gongen i 1944 av norsk-amerikaneren Lars Onsager, eit arbeid som blir rekna for ein av milepelane i utviklinga av den teoretiske statistiske fysikken. Onsagers løysing var likevel lenge av berre akademisk interesse, så derfor er det interessant at vi i løpet av dei aller siste åra har vore i stand til å bekrefte løysinga hans ved eksperimentelle målingar.

I mange tilfelle er det ein heilt gjennomgripande skilnad mellom eigenskapane til system av to- og tre dimensjonar. Teoretikarane har rekna ut at ordna strukturar normalt ikkje kan eksistere som ein- eller to-dimensjonale, medan tre-dimensjonale krystallar som kjent er stabile når temperaturen er under visse kritiske verdiar (smeltepunkt). Likeeins er magnetiske ordningar (ferro-, antiferro- eller ferri-magnetisme) som ein hovudregel ustabile dersom dimensjonen er mindre enn tre. Eit viktig unnatak frå denne regelen er Ising-systema, som kan opptre i ordna tilstand i både tre- og to dimensjonar, men ikkje som ein-dimensjonale.

Det er mange fundamentale spørsmål knytte til dimensjonaliteten av fysiske system. Når dei låg-dimensjonale systema til vanleg er mindre stabile, skyldest det at dei karakteristiske eigensvingingane for dei er sterkare p.gr.a. færre bindingskontaktar mellom atoma, og systema blir skaka i stykke så snart temperaturen er over det absolutte nullpunktet! Eksperimentelle målingar på system med overvegande ein- eller to-dimensjonal karakter er derfor av stor interesse for teorien om stabilitetsgrenser og faseovergangar. Av særleg interesse er det å studere tilhøva nære stabilitetsgrensene, der systema syner det som blir kalla «kritisk oppførsel». Det synest å være slik at svært ulike fysiske system viser same slag oppførsel nær fasegrensene, og ein har i mange år vore på leit etter den universelle lova som styrer dei. Mange av dei hypotesane som blir sette fram i denne samanhengen, kan berre prøvast ut med eksperiment, og eksperiment på to-dimensjonale system har her ein særs framtredande plass.

Dr. philos Emil J. Samuelsen, Institutt for Atomenergi, Postboks 40, 2007 Kjeller.

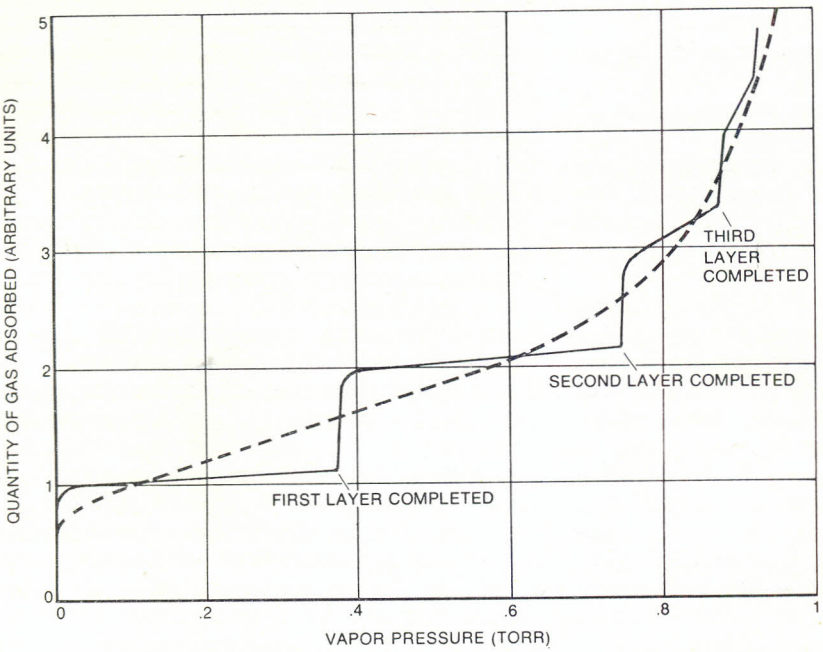
2. *Overflater av krystallinsk stoff og adsorpsjon av gassar*

Svært mykje av den to-dimensjonale fysikken er knytt til overflate- og grenseflatefenomen. Eit krystallinsk stoff består som kjent av atom eller atomgrupper som er stabla opp og bundne saman i eit tredimensjonalt nettverk eller gitter. Talet på atom i ein 1 cm^3 krystall er av storleik 10^{23}, men eit mindre tal atom, 10^{14}, må sitte på overflatene under andre vilkår enn hovudmengda av atoma. Dei vil være bundne til færre granneatom enn resten av krystallen; ein må tenke seg at dei blir sittande og vifte med ein laus bindingsende ut mot grenseflata, ein fri taustump med ingenting på. Det øvste skiktet får såleis spesielle eigenskapar. I metall og halvleiarar kan dette føre til nye elektron-tilstandar, med spesielle refleksjonseigenskapar for lys og anna stråling, med spesielle geometriske strukturar og gittersvingingstilstandar (overflatebølgjer). I overflata kan faseovergangar opptre som ikkje finn stad inne i krystallen. Og dei lause bindingane har gjerne stor evne til å binde til seg eller absorbere framandatom av ulike slag, gjerne gass-atom. Denne evna til å adsorbere gassar varierer sterkt frå stoff til stoff og frå gass til gass. Det er ein eigenskap som er overlag viktig i teknisk samanheng. Mange kjemiske industriprosessar blir drivne fram ved hjelp av finfordelt fast stoff som katalysatorar. Eit kjent døme er Haber-Bosch-syntesen av ammoniakk frå hydrogen og nitrogen. I slike kjemiske reaksjonar spelar adsorpsjonen av gasser til overflatene ei avgjørande rolle. Forsking i overflate- og adsorpsjonsfysikk kan såleis være av stor teknisk og økonomisk interesse.

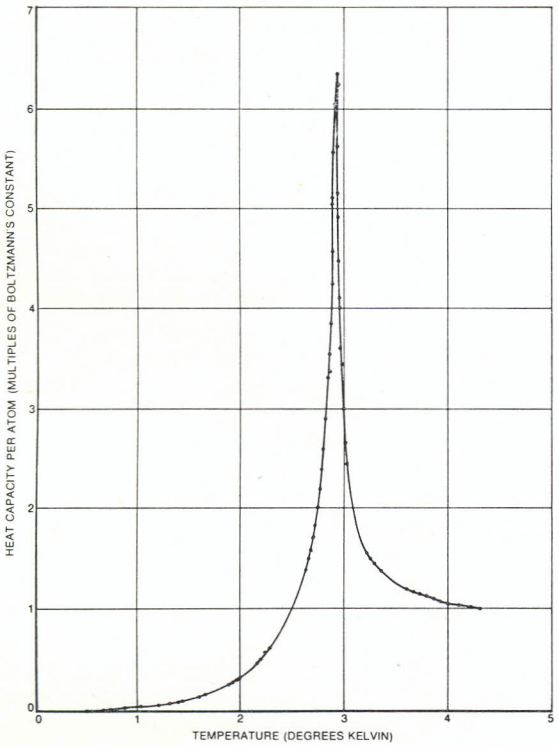
Eit felt som er sterkt i slekt med det føregåande og som også har betydning for moderne teknologi, er krystall-groing. Når ein krystall gror frå ei smelte, er det prosessen i grenseskiktet mellom krystallen og smelta som bestemmer kvaliteten av det ferdige produktet. Som kjent er mykje avansert elektronisk utstyr som transistorar, modulatorar etc. laga av einkrystallar av materiale som silicium, germanium, galliumarsenid og diverse oksyd. Vi skal ikkje her komme nærare inn på dette feltet. I resten av artikkelen skal vi sjå bort frå det tekniske, og konsentrere oss om det to-dimensjonale aspekt av adsorbert gass og av visse magnetiske krystall-system.

3. *Eksperiment med adsorbert gass*

Eit lag av adsorberte gass-atom på ei plan overflate kan under høvlege vilkår opptre som eit bortimot perfekt todimensjonalt fysisk system. Det er blitt gjort ein god del undersøkingsarbeide av adsorberte gass-sjikt i det siste, der siktepunktet har vore å studere dei to-dimensjonale eigenskapane. Eit interessant spørsmål er om slike lag kan ordne seg og oppvise faseovergangar i to dimensjonar. Kva for eigenskapar



Figur 1 Adsorbert gassmengd mot trykk målt av Thomy og Duval for kryptongass over pyrolytisk grafitt. På ujamn overflate observerer ein den stipla kurva, medan plane grafittflater gir opphav til trappetrinna, som markerer adsorberte lag av tjukkleik eitt atom og så vidare.



Figur 2 Spesifikk varme målt mot temperaturen av Dash og medarbeidarar for heliumgass adsorbert på grafoil. Kurva har ei form som er typisk for to-dimensjonale system, og ho er i godt samsvar med berekningar for ein to-dimensjonal Ising-modell. Toppen ved 2,9 Kelvin-gradar skyldest ein kontinuerleg faseovergang frå ein ordna til ein uordna tilstand.

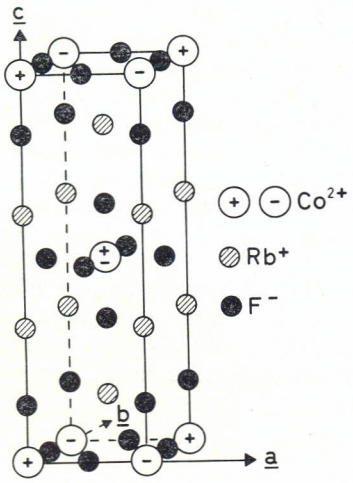
ville ein i så fall finne hos to-dimensjonale gassar, væsker og fast stoff?

For denne typen eksperiment trengst det eit materiale til å adsorbere gassane på som har reine og einsarta overflater, og ein open, lagdelt struktur. Desse eigenskapane finn ein hos ein viss type pyrolytisk grafitt som blir marknadsført av Union Carbide under nemninga grafoil.

I atomær målestokk er grafoil-flatene sjølvsagt ikkje plane. Karbonatoma i overflata ligg saman i eit mønster på same måten som kuppelsteinane i gamaldagse bygater. Når ein slepper på gass, vil gassatoma kunne legge seg i gropene mellom steinane. Så lenge gassmengdene er små, vil dei adsorberte atoma danne eit tilfeldig mønster, og dei kan hoppe frå grop til grop på ein usystematisk måte utan å påverke kvarandre i nemneverdig grad. Vi har då å gjøre med ein to-dimensjonal gass. – Aukar ein mengda av adsorberte atom, kan atoma ikkje lenger flytte fritt omkring. Er det tiltrekkande krefter mellom dei, vil dei kunne klumpe seg saman i dråpar, og vi får ei to-dimensjonal væske. Ved tilstrekkeleg låge temperaturar og store nok gassmengder vil atoma til slutt kunne danne eit regelbunde nettverk, eit to-dimensjonalt gitter. – Held ein no fram med å tilføre gass, vil det punktet bli nådd at heile grafoilflata er dekt av eit lag av gassatom som er eitt atom tjukt. Nye lag kan då berre bli adsorbert utanpå det første. At slike lag eksisterer kan ein sjå av trykkmålingane til Thomy og Duval som vist i figur 1. Dei målte gass-trykk mot gassmengd for krypton på grafitt og fann dei karakteristiske trinna som ein ser av figuren. Kvart trinn svarar til eitt atom-lag. Dersom overflata ikkje var jamn nok eller gassen ikkje vart adsorbert lagvis, ville ein vente seg ei jamn kurve (synt på figuren).

Professor Dash og medarbeidarar i Seattle studerte eit ein-atomlag av helium meir i detalj. Dei målte mellom anna spesifikk varme som funksjon av temperatur og trykk. Ved faseovergangar viser spesifikk-varme-kurver gjerne ein markert topp, og Dash og hans folk fann ein slik topp. Det viser at der skjer ein to-dimensjonal faseovergang. Figur 2 syner ei slik kurve. Dash gissa på at overgangen var mellom ein krystallinsk og ein flytande fase. Men i såfall er denne overgangen ulik vanleg tre-dimensjonal smelting, som er ein brå (såkalla diskontinuerleg eller første ordens) overgang. Dash's to-dimensjonale «smelting» går gradvis føre seg (andre ordens overgang). Ein nærare analyse av kurveforma i figur 2 viser at ho er i nesten perfekt samsvar med Onsagers teoretiske kurve for ein to-dimensjonal Ising-modell, som har ein gradvis overgang. Smelting i to-dimensjonar kan altså være gradvis. Tre-dimensjonal smelting er alltid brå. Dette er eit godt eksempel på kva rolle dimensjonaliteten kan spele.

Men av figur 2 aleine kan ein ikkje være viss på at Dash's tolking er korrekt. Ved hjelp av nøytron-spreiingseksperiment har Dash i samarbeid med Kjems ved Brookhaven, New York, prøvt å bestemme aggregattilstanden direkte. Ein ordna struktur gir nemleg opphave til eit skarpt spreiingsmønster, eit sett av skarpe toppar i diagram over mengd spreidd stråling mot spreiingsvinkel. Uordna system som væsker og gassar gir breie og mindre veldefinerte toppar. I dette eksperimentet brukte dei ikkje heliumgass, men nitrogen, som har betre spreiingseigenskapar for nøytronar. Ved tilstrekkeleg høgt trykk fann dei verkeleg nokre veike, men likevel veldefinerte indikasjonar, som tyder på «fast» nitrogen på grafoiloverflata. Dei studerte



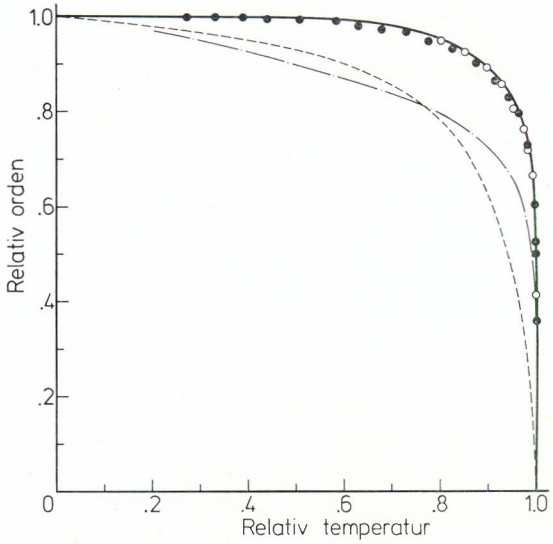
Figur 3 Minste bygge-elementet («einingscella») for det magnetiske stoffet dirubidiumkobolt tetrafluorid, Rb_2CoF_4. Slike element «stabla saman» utgjør ein krystall, og kobolt-atoma vil då danne plane rutenett med så stor innbyrdes avstand at dei magnetisk sett er mest fullstendig isolerte frå kvarandre. Kvart rutenett-plan vil då få karakteren av ein to-dimensjonal magnet.

så kva som skjer når trykket blir mindre og fann ein overgang til eit breiare væske- eller gass-liknande mønster. – Førebels er dette arbeidet enno på byrjarstadiet. Ein kan vente seg nye interessante resultat når det utviklar seg.

4. To-dimensjonale magnetar

I enkelte tilfelle kan spesielle låg-dimensjonale eigenskapar opptre også i stoff som eigentleg er fullt tre-dimensjonale. Til dømes har ein dei siste åra funne at visse salt som inneheld det organiske ionet tetracyano-kino-dimetanid (TCNQ) har elektriske eigenskapar som kan minne om eit ein-dimensjonalt metall. Ein del uorganiske materiale som tantaldisulfid har ein sjikt-struktur med elektrisk leiingsevne i plan, eit to-dimensjonalt metall. Den siste gruppa stoff kan og adsorbere gassar inne i sjikt-strukturen og er såleis dobbelt interessant.

Vi skal i dette avsnittet sjå døme på stoff der den *magnetiske* strukturen i hovudsaka er to-dimensjonal. Det gjeld stoff med ein slik struktur at dei magnetiske atoma (særleg jern, nikkel, kobolt, krom) ligg relativt tett saman i sjikt, men med ikkje-magnetiske atom mellom sjikta, som slik blir isolerte frå kvarandre. Vi nemner som typiske representantar tetrafluorida av dikaliumnikkel og dirubidium-kobolt, K_2NiF_4 og Rb_2CoF_4. Figur 3 viser atomoppbyg-



Figur 4 Grad av magnetisk orden i Rb_2CoF_4 målt mot temperaturen ved hjelp av nøytrondiffraksjon. Til samanlikning er tilsvarande kurver for den tre-dimensjonale («vanlege») magneten jern (stipla) og den to-dimensjonale magneten K_2NiF_4 (prikk – strek) tatt med. Den heil-dregne kurva er den eksakte løysinga av Onsager for ein to-dimensjonal Ising-modell. Som ein ser er målepunkta for Rb_2CoF_4 i ypparleg samsvar med den teoretiske kurva. Dei utgjør den første eksperimentelle påvisinga av at Onsagers løysing er rett.

ginga. Dette byggeelementet gjentar seg i alle tre retningar i rommet, og ein får då fram horisontale rutenett av Ni eller Co-atom. – Då Birgeneau og medarbeidarar frå Bell og Brookhaven i USA i 1969 studerte krystallar av K_2NiF_4 med nøytron-spreiing, fann dei ei merkeleg opførsel. Under ein kritisk temperatur T_c på 97 Kelvin såg dei veldefinerte magnetisk spreiingstoppar, som tyder ordning av dei magnetiske momenta i alle tre dimensjonar. Men for temperaturar over T_c fann dei langstrakte ryggar i spreiingsmønsteret med utstrekning loddrett på rutenetta av Ni. Litt innsikt i spreiingsteori* viser at dette bildet er å tolke som ei to-dimensjonal ordning innanfor kvart plan, medan kvart plan er uavhengig av dei andre plana; altså ein stabel av to-dimensjonale magnetiske skiver.

Same oppførsel fann vi for Rb_2CoF_4 då vi i 1973 undersøkte det ved Institutt for Atom-

* Dei med innsikt i spreiingsteori vil være kjende med at eindimensjonale gitter gir opphav til interferens i plan, todimensjonale gitter gir interferens i linjer, og tredimensjonale gitter gir punktformige interferensmønster.

energi. Det har ein kritisk temperatur T_c på 103 Kelvin. Ved nærare studium viser det seg at den tre-dimensjonale ordninga for temperaturar under T_c i røynda er av underordna betydning både for K_2NiF_4 og for Rb_2CoF_4. Det er det to-dimensjonale aspektet som bestemmer eigenskapane til stoffa også i dette temperaturområdet. Det som eigentleg skjer er at over T_c er den to-dimensjonale rekkevidda av ordninga avgrensa, noko ein kan finne av breidda på spreiings-toppane. Når ein kjøler ned mot T_c vil rekkevidda bli større og større, og ved T_c vil ho «gå mot uendeleg», dvs. dekke heile utstrekninga av dei to-dimensjonale rutenetta. Men i ein slik situasjon skal det berre ei uendeleg veik kopling til mellom plana for at dei skal innordne seg også i den tredje dimensjonen. – At det er det to-dimensjonale aspektet som er viktigast i K_2NiF_4 og Rb_2CoF_4 kan ein sjå av figur 4, som viser graden av magnetisk innordning mot ein relativ temperatur T/T_c. Her er samanlikna med den tre-dimensjonale magneten jern, og ein ser at kurveformene særleg nære overgangstemperaturen, er vesentleg ulike. Dei to-dimensjonale systema er mykje meir temperaturavhengige her.

Det er òg tydeleg skilnad mellom K_2NiF_4 og Rb_2CoF_4. Som ein ser er Rb_2CoF_4 i nesten fullkome samsvar med ei teoretisk kurve for den to-dimensjonale Ising-modellen. Samsvaret er så slåande at vi kunne nesten ikkje tru det var sant då vi første gongen plotta opp resultatet. Målingane i figur 4 har vakt stor interesse i den internasjonale fag-litteraturen, fordi dei gir den første direkte eksperimentelle verifikasjon på Onsagers berømte løysing. Kobolt-saltet vårt er eit nære på fullkome Ising-system. Det er ikkje vanskeleg å finne grunnar for at Co-saltet vil ha større Ising-karakter enn Ni-saltet. Det har å gjøre med viktige ulikskaper i den elektroniske strukturen av dei to atoma. Vi skal ikkje gå nærare inn på desse viktige detaljane her.

Vi har også studert nøye den «kritiske oppførsla» av Rb_2CoF_4 nære overgangstemperaturen T_c. Resultata er av den aller største interesse for dei som arbeider med faseovergangar, men det vil føre for langt å komme inn på det i denne artikkelen.

5. *Avslutning*

Vi har diskutert teoretiske og eksperimentelle sider ved to-dimensjonal fysikk og har gitt ei litt detaljert framstilling av eksperimentelle studium av

adsorberte gass-sjikt på overflater og
lag-delte magnetiske stoff.

Begge tilfelle er diskutert i forhold til Lars Onsagers berømte løysing frå 1944 av problemet med den to-dimensjonale Ising-modellen. Vi demonstrerer den første direkte verifikasjon av Onsager si løysing.

FYSIKK I SKOLEN

Otto Øgrim

Svenska Fysikersamfundet arrangerte 18. og 19. oktober en konferanse om GYMNASIAL UTBILDING I FYSIK og om FYSIKEN OCH MASSEMEDIA.

Konferansen ble holdt fordi det i de seinere år har vært en klar tendens i Sverige – som i mange andre industriland – til at ungdom under utdanning søker vekk fra fysikk og til dels også fra andre naturfag. Den samme tendensen har vi i Norge. I gymnas som følger de nye planene, kan elevene velge fag enkeltvis. Det er da relativt færre som velger fysikk enn det var som valgte reallinjen. Men de er kommet lenger i Sverige. Ved Universitetet i Lund f. eks. er bare 18 plasser besatt i et fysikklaboratorium beregnet på 72. Den svenske fysikerstanden er oppskremt av denne utviklingen og konferansen var et forsøk på å få i stand et samarbeid mellom skole- og universitetsfolk for å søke å motvirke tendensen.

Møtet var godt besøkt, ca. 200 skolelærere, universitetsfolk, departementsfolk og noen få pressefolk var til stede. De 10–15 foredragene ble avviklet med imponerende presisjon. Jeg har i hvert fall aldri før opplevd at alle holdt seg innenfor den tilmålte tidsrammen.

Foredragene og utdrag av debatten vil bli samlet og trykt, og kanskje kan interesserte få eller få kjøpt trykksaken. Her kan det bare bli tale om å peke på noen få høydepunkter.

Første dag var viet skoleundervisningen. Blant de mange gode foredragsholderne vil jeg spesielt framheve generaldirektør Jonas Orring, gymnasieinspektør Tord Adolfsson fra Skoløverstyrelsen og lektor Bjørn Andersson fra Lærer-

(Forts. s. 47)

Strålebiologi og stråleterapi

Aktuelle problemer

Rolf Widerøe

1.

Strålebiologi og stråleterapi er ofte blitt karakterisert som grunnleggende og anvendt vitenskap; jeg vil her velge en annen beskrivelse. Jeg vil sammenligne situasjonen med en undersøkelse av forskjellig dyptliggende jordlag eller geologiske formasjoner. Dypest ligger grunnfjellet og de eldste lag. Dette svarer til de mest elementære og primitive celler og deres funksjoner; virus og elementære aminosyrer («livets opprinnelse») bakterier og enkelte celle-organeller, DNA og RNA, celle-genetikk og cellenes funksjoner og livsførsel. Vi er nu allerede kommet over i det neste, høyere lag som omfatter alt om enkelte celler; metabolisme, celledeling, reaksjoner overfor ytre påvirkning som kjemikalier, enzymer eller ioniserende stråling og transformasjon til maligne former. I det høyeste lag har vi så en samvirkning mellom mange celler, forskjellige former for vev og tilslutt de levende organismer. For grunnlaget og langt opp til det høyeste lag kan miljø og livsbetingelser forenkles og standardiseres ved å anvende cellekulturer og vevskulturer. Dette er de områder hvor strålebiologene og strålegenetikerne føler seg mest hjemme. Overflatelagene har hittil vesentlig vært forbeholdt stråleterapeutene, hvis hovedoppgave det er selektivt å sterilisere maligne cellevev, tumorer. Som oftest må dog også normalvev bli bestrålt og dette har alltid vært et av stråleterapiens hovedproblemer. Stråleterapi er dog på langt nær en overfladisk beskjeftigelse (her er sammenligningens ordvalg uheldig), den har dype røtter langt ned i det store lag som omfatter mesteparten av celleforskningen. Den samarbeider her med strålebiologene og dette samarbeide har allerede gitt betydelige resultater og øket vår forståelse av hva som foregår ved bestråling. Strålebiologene på sin side arbeider seg «oppover i lagene» og er nu, etterat grunnlaget vesentlig synes å ha festet seg, ivrig opptatt med in vivo forskning av normalt og malignt cellevev. Forholdene er her naturligvis meget vanskeligere og mer kompliserte enn ved cellekulturer. Tumorceller kan etter bestråling transplanteres til forsøksdyr og reaksjonene undersøkes. Man kan f. eks. benytte evnen til å danne nye tumorer («take of the injectet cells») eller evnen til å danne cellekolonier i milten eller i lungene (injeksjon av bestrålte benmarg-celler). Man kan også etterpå dyrke de in vivo bestrålte celler i en cellekultur for å bestemme antall overlevende, prolifererende celler. Det er denne forskning som antagelig i fremtiden vil bli til størst hjelp for stråleterapeutene. Imidlertid er det ennu meget som ikke er utforsket i dette arbeidsområde. Forskningen har her ikke pågått særlig lenge og man finner her mange av dagens uløste problemer.

2.

Jeg vil nu gå den motsatte vei; starte med strålebiologi i det øverste lag og arbeide meg nedover. Som et utgangspunkt vil jeg velge det foredrag jeg holdt i Seattle i sommer om Ellisformelen for forskjellige bestrålingsprogrammer ((1)). Ellisformelen (eller formlene) er en videre utvikling av Strandquists formel som i et nøtteskall sier oss hvordan totaldosen forandrer seg med antall fraksjoner. $D_{total} = konst_1 \cdot N^{0,24}$ (1). Ifølge *Strandquist* er dette de nødvendige steriliseringsdoser som må anvendes for tumorkontroll ((2)). For toleransedosen føyet nu *Ellis* til en tidsfaktor $T^{0,11}$. Antar vi at f. eks. ukedosen

Surviving tumorcells after a dose $D\,(S_0=1)$:

Euoxic cells : $S_\Sigma = e^{-\alpha D/D_{\alpha o}} \cdot \left[1-\left(1-e^{-(1-\alpha)D/D_{\beta o}}\right)^4\right]$

Anoxic cells : $S_{anox} = e^{-0,7\,\alpha D/D_{\alpha o}}$

α = relative part of high-LET component
200 keV-X rays $\alpha = 0,16$
Co 60 - gamma rays $\alpha = 0,12$
high-energy electrons $\alpha = 0,08$
high-energy neutrons $\alpha = 0,45$

Reoxygenation : Conversion factor K .
Euoxic cells : $S^*_\Sigma = S_\Sigma + K \cdot S_{anox}$
Anoxic cells : $S^*_{anox} = (1-K)\,S_{anox}$

Sensitivity parameters : $D_{\alpha o} = 66$ rad $D_{\beta o} = 213$ rad

Fig. 1. Formler for beregning av overlevende celler.

Foredrag ved Det norske radiumhospital 12. november 1974. Dr. Ing., Dr. Ing. e.h., Dr. med. h.c. R. Wideröe er prof. emeritus ved E.T.H. Zürich.

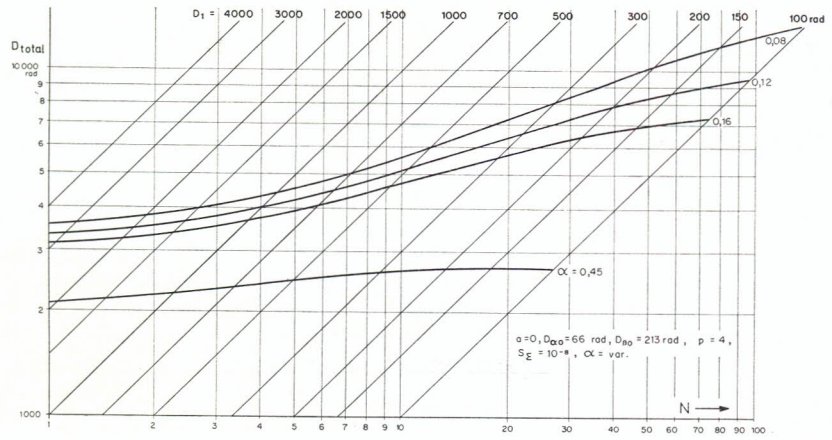


Fig. 2. Isoeffekt-kurver for sterilisering av aerobiske tumorceller ned til $S = 10^{-8}$ ved anvendelse av forskjellige stråletyper med $\alpha = 0{,}08 - 0{,}12 - 0{,}16$ og 0,45.

skal være konstant, vil dette gi $D_{total} = konst_2 \cdot N^{0,27}$ (2) for toleransedosen ((3)).

For å kunne forstå disse empiriske regler, låner vi litt opplysning fra strålebiologene i midtlaget om strålevirkninger på en cellekultur. Vi skal senere diskutere berettigelsen av dette, men her kun nevne at antallet av overlevende celler etter en bestråling kan beregnes ved hjelp av enkle formler (to-komponent-teorien, fig. 1). Vi velger nu stråleføIsomhetsparametre for humannyreceller (T1) og antar at tumorcellene må reduseres til 10^{-8} for å få sterilisert tumoren. Dette er antagelig tilstrekkelig for en middelstor tumor med ca. 10^{11} celler, med et antall av 10^8 stamceller som kan dele seg ubegrenset. Fig. 2 viser nu hvilke totaldoser vi må anvende for å oppnå dette med forskjellige strålearter. Vi ser at Strandquists verdier passer ganske bra. Eksponenten for N blir 0,26–0,30 og 0,36 for røntgenstråler, Co–60 stråler og elektroner. Strandquists verdi 0,24 var for røntgenstråler. Da også konstanten i ligningen passer bra, kan man si at de kliniske erfaringer stort sett bekrefter riktigheten av våre antagelser. For normalvevet som omgir tumoren har vi den annen Ellis-formel. Imidlertid er formelens anvendelse begrenset, erfaringer med bestråling av svinehud har vist at toleransedosene bøyer av for større N-verdier. En strålebiologisk beregning med en konstant reduksjon av normalcellene gir samme resultat. En beregning for bindevev som vi antar har halvparten av tumorcellenes strålefølsomhet, noe større (50 % større) reparasjonskapasitet og rimelig repopularisering ((4)) gir en maksimal reduksjon til ca. 11 % for de forskjellige programmer. Toleransedosene er vist på fig. 3, mens fig. 4 viser en sammenligning med steriliseringsdosene. Denne sammenligning viser tydelig hvor vanskelig situasjonen er for stråleterapeutene. For røntgenstråler ligger toleransedosene således lavere enn de nødvendige steriliseringsdoser, for Co–60 stråler er de omtrent

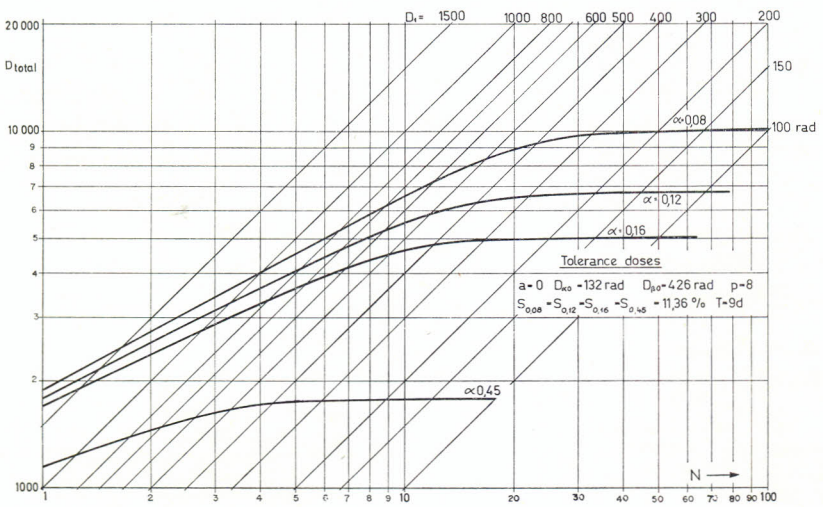


Fig. 3. Toleransedoser utregnet for isoeffekter med S = 11,36 %. $D\alpha_0$ = 132 rad, $D\alpha_0$ = 426 rad, p = 8, T = 9d. for repopulering.

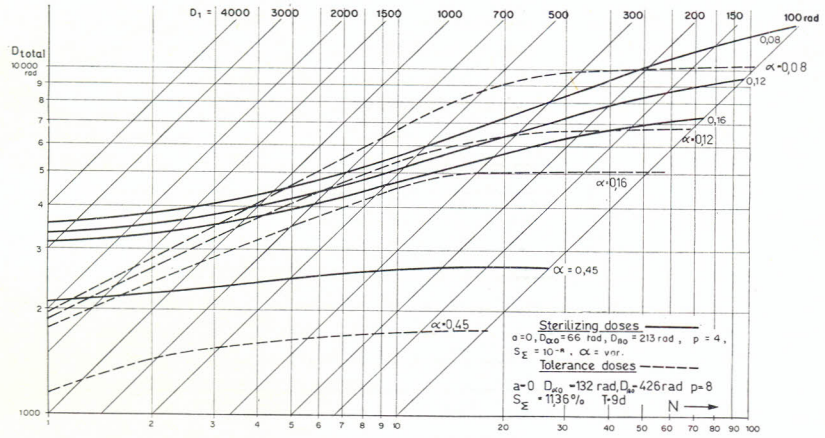


Fig. 4. Sammenligning mellom toleransedosene i fig. 3 (brudne linjer) og steriliseringsdosene i fig. 2 (hele linjer).

like og bare for elektroner med forholdsvis høye enkeltdoser ligger de klart høyere. Når man betenker at det finnes tumorer med mindre strålefølsomhet og normalvev med større følsomhet, kan man forstå at situasjonen undertiden kan synes å være håpløs. Dette er en av forklaringene på at kanskje 30 % av alle primærbestrålinger ikke når sitt mål, primærtumoren kan ikke kontrolleres og vi får rekurenser. Stråleterapeutene søker derfor hjelp fra strålebiologene og dette krever et intimt samarbeide hvis brukbare resultater skal kunne oppnås. Vårt eksempel som viser at elektronbestråling kan by fordeler når det optimale program velges, er blitt bekreftet med kliniske erfaringer i Berlin, Bern og andre steder. Jeg henviser til et symposium i Berlin 27.–31. mai i år.

3.

Vi vil nu grave oss ned i mellomlaget og se hvilke resultater strålebiologene er kommet til her. Først vil jeg dog nevne en undersøkelse av *Breur* over lungemetastaser som er av betydelig interesse ((5)). *Breur* fant at metastaser fra forskjellige primærtumorer i lungene kan utvikle seg uhemmet av det omgivende vev og vokse under forhold som nærmer seg cellekulturer. Veksten er eksponensial, celletapet er lite og etter en bestråling blir de døde celler hurtig fjernet. *Breur* betegner derfor dette som «cellekulturer in vivo». Metastasene ble bestrålt (røntgenstråler og Co–60) med lave daglige enkeltdoser (40–130 rad). Under disse forhold har vi praktisk talt utelukkende en α-effekt (S_β = 96 til 99 %). Tumorfølsomheten viste seg å ligge i to adskildte grupper. En med $D_{\alpha 0}$ = 48 – 90 rad (middelverdi 77,6 rad) og en annen gruppe med $D_{\alpha 0}$ = 149 – 406 rad (middelverdi 227 rad). Den $D_{\alpha 0}$-verdi vi benyttet for beregningen av steriliseringsdosene var 66 rad og den passer ganske bra i den strålefølsomme gruppe.

Dessverre begrenset *Breur* sine bestrålinger til svake enkeltdoser. Det burde være en interessant oppgave å føre hans arbeid videre med større enkeltdoser for derved å kunne lære mer om β-effekten in vivo og derved få sikrere holdepunkter for strålefølsomhets-parametrene.

På et symposium i Carmel (USA) 1969 om «Time and dose-relationship in radiobiology and radiotherapy» ((6)), holdt *Stell* et foredrag om «The kinetics of Cell proliferation in tumors». Jeg skal her kort nevne enkelte punkter fra foredraget og diskusjonen som fulgte etter: – For alt vev gjelder at man må skille mellom de forskjellige celletyper som finnes. Cellenes levetid, tider i delingssyklen, celletap osv. må bestemmes. Her har injeksjoner med tritiummarkert thymidin vært til stor nytte, men de anvendte metoder er ennu langt fra fullkomne. I en tumor finner vi 1) prolifererende (clonogeniske) celler. En del av disse er stamceller som kan dele seg ubegrenset og har en lang levetid. Vi finner også 2) ikke prolifererende celler. Dette kan være hvileceller som befinner seg i G_0-fasen, eller celler i andre faser som er stanset i utviklingen f. eks. grunnet mangel på næring. Det kan også være celler som er i ferd med å bli differensiert. Alle disse celler kan atter begynne å proliferere. Dessuten har vi de fullt utviklede funskjonsceller som ikke kan proliferere. I en større tumor vil man som regel finne forskjellige regioner hvor cellene lever under høyst forskjellige vilkår. *Mendelsohn* adskiller 5 forskjellige avsnitt. Ytterst, nær overflaten, finner man en tynn sone med liten eller ingen mitotisk aktivitet. Innenfor er det en større sone med små delvis organiserte celler og høy mitotisk aktivitet. Her finnes også mange degenererte celler som kan skyldes feil ved de-

lingsprosessen. Lengre inne et større område hvor cellene differensieres til et utstrakt system av forgrenede rør. Også her finner man degenererte celler ved rørveggene. Vi kommer nu til en sone som inneholder store sammenlappede områder med nekrotiske celler isprengt med celler hvor DNA-syntese fremdeles foregår. Her er tilførsel av næringsstoffer og surstoff åpenbart utilstrekkelig. Og innerst inne finner man så en nekrotisk kjerne med døde celler og svake rester av opprinnelig cellevev. Denne struktur vil naturligvis variere for forskjellige tumorer, men beskrivelsen viser hvor komplisert forholdene kan være. Egenskaper som cellevekst, proliferering, celletap og strålefølsomhet vil være forskjellige i bestemte områder selv om disse ligger like ved siden av hverandre. Det er sikkert langt igjen før vi i detaljer forstår tumorens biologi og derav kan utlede en optimal stråleterapi.

Når en tumor gror, øker i volum, så er det fordi celleproduksjonen (og cellenes volumforøkelse) overskrider celletapet. Celleproduksjonen bestemmes av delingsperioden. *Brown* angir at celleperioden for normalceller, som kan være flere hundre timer, (fra 22 til 750 hr, middelverdi 250 hr) avtar sterkt til i middel 20 timer når cellene blir maligne. Om celletapet vet vi lite. *Mendelsohn* berettet om to forskjellige cellelinjer som stammet fra samme tumortype (C3H spontan mammatumor) hvor cellene i den ene linje grodde hurtig med lite celletap mens tumorene av den annen linje grodde langsomt (3 % pr. dag) med et stort celletap (13 % pr. dag). Celleperioden for den langsomme linje var dobbelt så stor som for den hurtige. *Denekamp* angir at celletapet i sarkomer er forholdsvis lite og at delingsperioden er proporsjonal med tumorenes volumfordoblingstid. I motsetning hertil har karzinomene et stort celletap som helt bestemmer tumorens fordoblingstid. Delingsperioden er her mer eller mindre den samme. Sålenge cellene i en kultur har tilstrekkelig plass og næring, vil antallet øke eksponensielt. Blir næringen knapp, vil vi få et nivå (celletetthet ca. 10^5 pr. cm^2) hvor prolifereringen, DNA- og RNA-syntese, praktisk talt er stanset. Celletapet er relativt lite (1–3 % pr. dag) og cellenes viabilitet og evne til å reparere subletal stråleskade er uforandret. Med nok næring men trang plass får man et høyere nivå med omtrent 10–dobbelt celletetthet (10^6 pr. cm^2). Dette er betinget av celletrengsel som er noe vi ennå ikke forstår. Det dreier seg åpenbart om innflytelse fra nabocellene og det kan være kjemisk kommunikasjon (enzymer) eller avfallsprodukter som endrer livsvilkårene. I dette tilfelle har vi en viss celleproduksjon (ca. 10 % pr. dag) med tilsvarende celletap. Cellenes vitalitet er nedsatt og de har mistet evnen til å reparere subletal stråleskade. Man antar at undersøkelser i platåtilstand kan kaste lys over tumorceller som vegeterer under begrensede livsvilkår *(G. M. Hahn).*

Når en tumor etter bestråling skrumper sammen, skyldes dette at celletapet som følge av stråledød tiltar sterkt. Oppløsning og bortskaffelse av døde celler vil dog ofte være uavhengig av celletapet og tumorens tilbakegang vil derfor ikke alltid kunne vurderes som et tegn på strålefølsomhet.

Etter en større stråledose vil antallet av klonogeniske celler synke sterkt (f. eks. etter 2000 til ca. 0,8 %). Delingsperioden vil en viss tid bli noe forminsket ($T_{G1} \sim 0$), men dette er av liten betydning de første dager etter bestrålingen. Noe senere, når ernæring og plassforhold er blitt gunstigere, vil tumoren for en tid gro hurtigere. – Under diskusjonen gjorde Bush oppmerksom på den betydning man må tillegge tumorens stamceller. Som allerede nevnt er dette celler som vil kunne danne metastaser og forårsake rekurenser; etter bestrålingen det kritiske punkt. Det er disse celler som må destrueres for å oppnå en kontroll av tumoren. Dessverre vet vi lite om hvor mange stamceller en tumor kan inneholde, men kliniske erfaringer tyder på at det kan være fra 1 til ca. 0,1 %.

Vi ser av disse korte glimt at forholdene i en tumor som regel vil være meget kompliserte og de kan variere meget under forskjellige forhold. Det er selvsagt en fare for å drukne i det hav av detaljopplysninger som her foreligger – vi står i fare for ikke å se skogen for bare trær. Vi må derfor søke å finne ledd som knytter detaljene sammen og prøve å finne generelle retningslinjer som kan lette forståelsen og stimulere videre undersøkelser.

4.

Jeg vil nu vende meg til et konkret problem: surstoffeffekten. Man er nu temmelig enig om at surstofftrykket virker dosemodifiserende. I et arbeide i 1970 viste jeg hvorledes dette kunne uttrykkes matematisk med tokomponentteoriens formler ((7)). Både α-effekten og β-effekten blir redusert når surstofftrykket minsker. For absolutt anoksia forsvinner β-effekten helt ifølge *Revesz* og *Brustad,* men som regel oppnås dog ikke absolutt anoksia og det blir da en liten β-effekt igjen. For α-effektens surstoffavhengighet gir forskjellige målinger motstridende re-

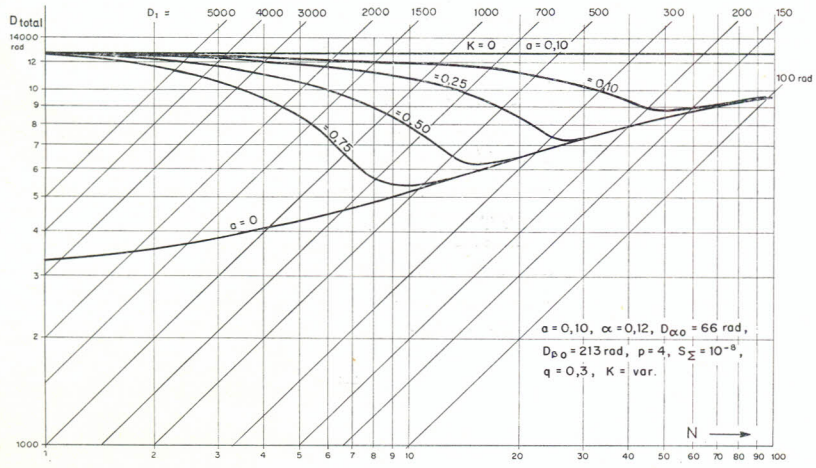


Fig. 5. Isoeffekt-kurver for bestråling med Co–60 gammastråler ($\alpha = 0{,}12$) når man har 10 % absolutt anoksiske celler og forskjellige grader av reoksygenering. K = 0,10 – 0,25 – 0,50 og 0,75. S = 10^{-8}.

sultater. *Barendsen* fant en reduksjon til 44 %, *Revesz* derimot ingen reduksjon. En reduksjon til 70 % syntes rimelig. Nylig (på kongressen i Seattle) meddelte *Chapman* at han hadde funnet en reduksjon til 70 % ((8)), men på det siste Graymeeting i London i september var hans nyeste resultat: ingen reduksjon. Møtet brakte for øvrig ingen klarhet over dette spørsmål; det ble referert målinger som svarte til en stor reduksjon, en middels reduksjon og ingen reduksjon. Det er mulig at forholdet er forskjellig for forskjellige celletyper. Undersøkelsene omfattet bl. a. alger, bønnerotceller og pattedyrceller.

Når det gjelder reoksygenering er det ikke meget nytt å meddele. Fig. 5 viser hvorledes isoeffektkurvene forandres (for Co–60 gammastråler) når vi har en viss, konstant, reoksygenering etter hver enkeltbestråling ((1)). Vanligvis kan man regne med en konversjonsfaktor på 20 % eller mindre og vi ser at i disse tilfeller vil enkeltdoser på 200 eller 250 rad være gunstigst. Hvis imdlertid 50 til 60 % av de anoksiske celler kan tilføres surstoff, blir det fordelaktig å anvende enkeltdoser på 500 rad eller mer.

Forskjellige undersøkelser med mus og rotter har vist at høye enkeltdoser gir bedre reoksygenering *(du Sault)*. For høyere enkeltdoser enn 1000 rad opptrer dog vasculær skade og tromboser *(Thomson)*. Ved små doser er 1 dag det beste intervall, ved høyere doser 3–4 dager *(Howes)*. Reoksygeneringen holder seg neppe konstant, men blir mindre når benhandlingen skrider frem. Det er dog tvilsomt om de tidsintervaller man har funnet for mus også vil gjelde for mennesker; sannsynligvis må man her regne med lengre tider.

På møtene i Seattle og London ble det berettet om interessante forsøk med kjemiske stoffer som øker straleføIsomheten for anoksiske celler. Det dreier seg her særlig om stoffene Metronidazole ((9)) (5-nitroimidazole) og Ro–07–0582 ((8)), som har stor elektronaffinitet og kan binde (oksydere) frie radikaler. Det siste stoff kan øke straleføIsomheten 2–2,2 ganger ved konsentrasjoner som kan tåles godt av mennesker. Disse forsøk er utført i England (*Fowler, Denekamp*) og i Canada (*Chapman, Rauth* etc.). Forsøkene er foretatt in vitro og blitt bekreftet in vivo på C3H mus ((10)). En KHT transplantabel tumor ga en OER-verdi på 1,5 in vivo. Dette er omtrent den samme verdi som man finner ved bestråling med hurtige neutroner. Kliniske forsøk er allerede i gang og hvis de holder hva resultatene hittil lover, betyr det at surstoffproblemet praktisk talt er løst. Det er i så fall ingen grunn til terapeutisk å anvende neutronstråler som byr på så mange vanskeligheter og ulemper foruten at strålebelastningen på det normale vev er langt større enn for lav-LET bestråling. Det er neppe mange som vil gråte tårer hvis denne motebetonte retning blir lagt i graven!

I London berettet *Shirley Lehnert* fra Montreal i Canada om undersøkelser med å forhøye konsentrasjonen av 3'5' syklisk adenosin monofosfat (syklisk AMP) før og under bestråling ((11)). Dette vil bevirke at ekstrapolasjonstallet stiger (øket reparasjonskapasitet) mens D_0 blir mindre og straleføIsomheten større. Konsentrasjonen av syklisk AMP kan økes ved behandling med kjemiske stoffer som stimulerer adenyl syklase eller forhindrer syklisk AMP-fosfordiesterase. Her kan nevnes stoffene: Ro–20–1724 og DL–152 eller Prostaglandin E_1. Virkninger

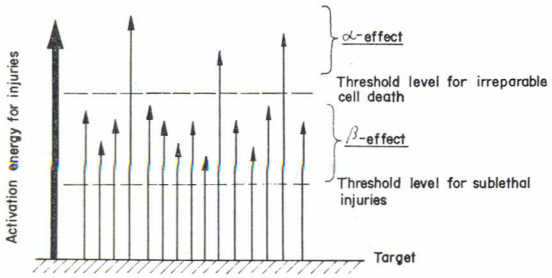


Fig. 6. Prinsipskjema for stråleskader som kan forårsake α- og β-effekter.

av disse stoffer på bestrålte vevskulturer (V–79 celler) er meget interessant og sikkert av klinisk interesse. α-effekten synes å minske, β-effekten forsterkes, samtidig som reparasjonskapasiteten øker. Stoffene er i de anvendte konsentrasjoner ikke giftige. Det er ennu mange uklarheter, men de foreløpige resultater synes lovende.

5.

Jeg vil til slutt berette litt om nyere teorier som beskjeftiger seg med en forklaring av β-effekten. Vi har nu gravet oss helt ned til grunnlaget, men vi skal se at dette også vil ha betydelig interesse for de høyere liggende prosesser.

De fleste er nu overbevist om at α-effekten skyldes et dobbelt brudd på de to kjeder i DNA-molekylet ((12)). Flere, helt forskjellige, erfaringer såsom strålefølsomhet, inkorporert tritiumthymidin, ploidtall i forbindelse med strålefølsomhet og inkorporasjon av halogen-pyrimidin-forbindelser i DNA-molekylet gir tydelige bevis på at så må være tilfelle. Dobbeltbrudd kan muligens i sjeldne tilfeller repareres (micrococus radiodurans), men som regel vil skaden være irreparabel og vi får interfase død.

Når det gjelder β-effekten som skyldes lav-LET-komponenten dvs. mindre ioneansamlinger med lavere energi, fig. 6. er vår viten meget liten. Her finnes derfor flere hypoteser. Den første hypotese var at flere mål i cellen måtte treffes («multitarget»-treffere) for å fremkalle reproduktiv død. Denne hypotese som ligger til grunn for «multitarget-ligningen» for overlevende celler, er i dag praktisk talt forlatt. Ligningen betraktes i dag kun som en fordelaktig beskrivelse av empiriske resultater: ingen tror at 10–20 eller flere hundre mål i cellen må treffes for å drepe cellene. Man er enig om at effekten må skyldes mindre skader enn DNA-dobbeltbrudd men vet intet om hvilke cellestrukturer som blir skadet ((13)). Det kan være enkeltbrudd i DNA-molekylet, som blir feilaktig reparert, men også membranskader – f. eks. på kjernemembranen eller på lysosomene – eller skader på mitoseapparatet (sentriolene) har vært nevnt som muligheter. Den enkleste, minst krevende, hypotese lar targetspørsmålet helt åpent og forklarer β-effektens karakteristiske egenskaper utelukkende som et resultat av reparasjonseffekter ((14)).

Hvis skadevirkningen (den reproduktive død) tiltar proporsjonalt med dosen D, vil vi, uten reparasjon, få følgende ligning for de overlevende celler.

$$dS_\beta = \div S_{l\beta}\ d(D/D_0) \qquad (3)$$

hvor $1/D_0$ er proporsjonalitetskonstanten. Antar vi nu at en viss del av skaden, vi vil betegne den med R, blir reparert (hurtig reparasjon) vil ligningen bli:

$$d\,S_\beta = (R \div 1)\ S_\beta\ d(D/D_0) \qquad (4)$$

Hvis vi nu kjenner forløpet for S_β som en funksjon av D, kan vi lett beregne reparasjonsfunksjonen R som en funksjon av D. Vi får:

$$R = 1 + \frac{1}{S_\beta}\,\frac{dS_\beta}{d(D/D_0)} = 1 + \frac{d \ln S_\beta}{d(D/D_0)} \qquad (5)$$

Setter vi her inn multitargetligningens verdier

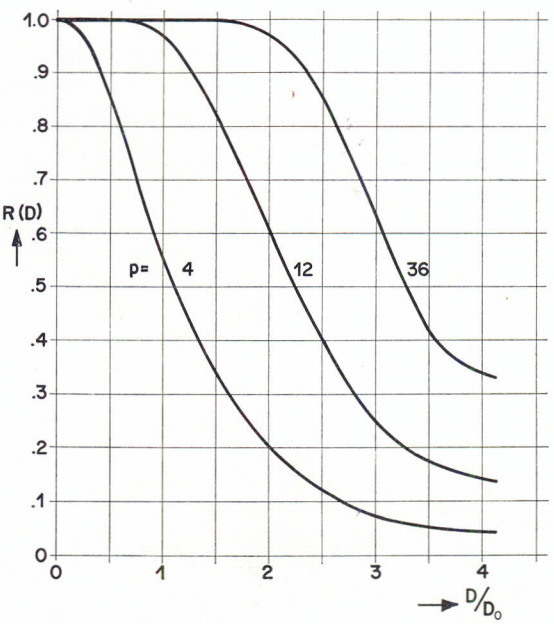


Fig. 7. Reparasjonsfunksjonen R for forskjellige ekstrapolasjonstall p = 4 – 12 og 36.

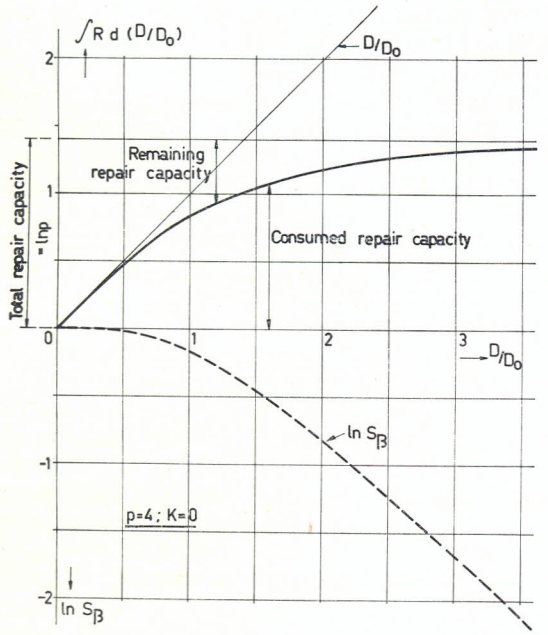


Fig. 8. Reparasjonspoolen tappes ved strålebelastning.

for S_β har vi reparasjonsfunksjonen R(D). Fig. 7 viser hvorledes denne funskjon ser ut for forskjellige verdier av ekstrapolasjonstallet p. Vi kan lett forestille oss hvordan prosessen forløper. Cellen har et visst forråd av reparasjonsstoff til disposisjon. Ved små doser, hvor også skadene er små, minsker dette forråd bare litt; reparasjonen er fullstendig med R = 1 og de overlevende celler avtar ikke i antall dvs. S_β = 1. Ved større skader må «reparasjonspoolen» (uttrykket skriver seg fra *Powers* i 1962 ((15)) tappes ned mer, ikke all skade kan bli reparert og overlevendetallet synker. Ved store skader er reparasjon virkningsløs og $1/D_0$ blir nu et uttrykk for cellens stråleføIsomhet. Fig. 8 viser hvorledes poolen tappes for reparasjonsstoff. Vi får av ligning (5):

$$\text{Forbrukt stoff} = D/D_0 + \ln S_\beta \qquad (6)$$

Setter vi D = ∞ blir poolens totale stoffmengde = ln p. Det er ikke urimelig å sette reparasjonen i forbindelse med cellens forråd av ATP, men også andre muligheter foreligger. ATP produseres stadig i mitrokondriene og når den angrepne reserve i poolen melder seg, vil mer ATP bli produsert og poolen eller «tanken» således bli etterfylt. Denne etterfylling vil naturligvis avhenge av hvor langt ned «tanken» er kommet; er tanken nesten tom skjer etterfyllingen hurtig, ved nesten full tank går det langsomt. Dette kan igjen regnes ut med enkle ligninger og fig. 9 viser resultatet. Vi ser her hvorledes reparasjonsfaktoren R forandres når vi har forskjellig sterk etterfylling. Hvis vi har ganske liten dosehastighet, vil etterfyllingen kunne skje allerede mens dosen gies og dette vil da forandre overlevelseskurven S_β slik at vi tilsynelatende vil få en mindre stråleføIsomhet. Dette er vist på fig. 10. Kurvene her kan lett prøves og kontrolleres med eksperimenter hvor man benytter lav dosehastighet. Vi kan på denne måte finne tidskonstanten for etterfylling. Målinger av *Hall* ga en tidskonstant på 6,75 hr for HeLa-celler. Etter 13 ½ hr vil tanken være fylt til ca. 85 %. Dette gir en fullstendig forklaring på et fenomen som betegnes som *«Elkind recovery»*. En viss tid etter en bestråling vil en overlevende celle «av seg selv» vende tilbake til den opprinnelige tilstand før bestrålingen. Som vi ser forklarer «reparasjonshypotesen» alle erfaringer på en enkel, tvangfri måte uten nye antagelser, men den besvarer i virkeligheten ingen av våre mange spørsmål. Vi vet intet om hvorledes cellen skades og hvilke deler som skades, vi vet intet om hvorledes og hvorfor denne (eller disse) skade(r) fører til reproduktiv død (man har foreslått «misrepair») og vi vet

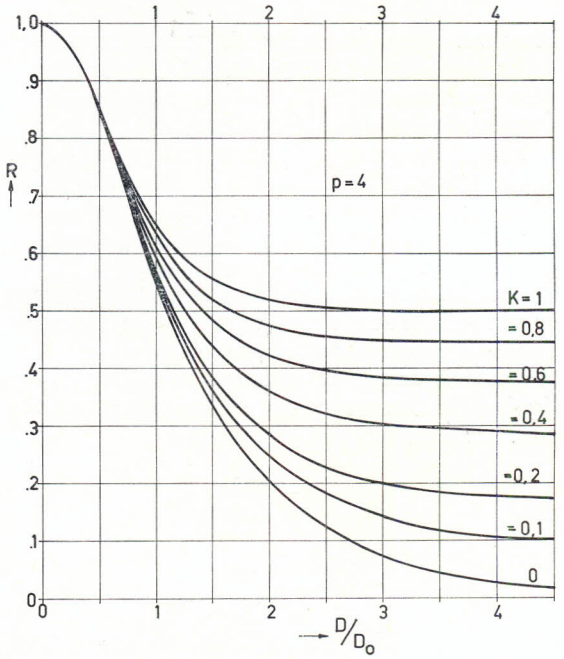


Fig. 9. Reparasjonsfunksjonen forandres ved etterfylling. K = etterfyllingskonstant, p = 4.

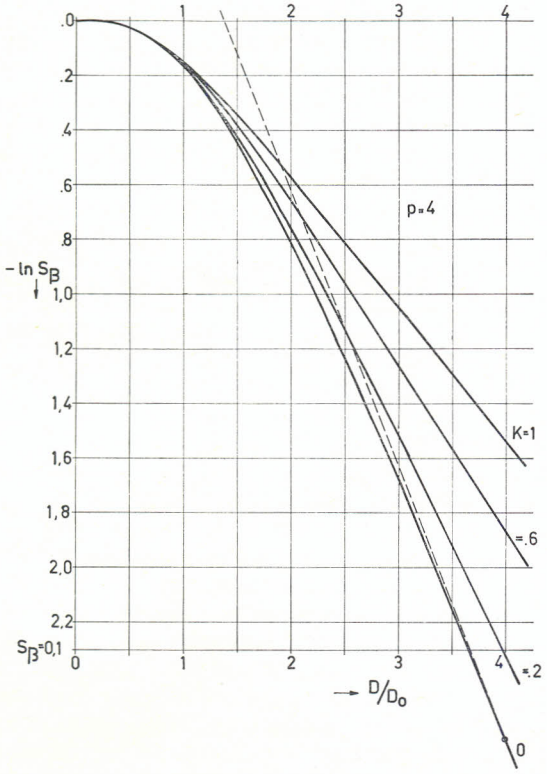


Fig. 10. Overlevendekurver for β-effekt med etterfylling. Disse kurver viser også forandringer av overlevendekurven ved små dosehastigheter.

intet om reparasjonen og om reparasjonsstoffet (eller stoffene). Disse spørsmål krever ytterligere forskning for å bli løst, men det er sikkert fordelaktig å vite hva vi vil vite!

Nu til den annen, konkurrerende, hypotese. Den skyldes *Chadwick* og *Leenhouts* og ble fremsatt for noen år siden ((16)). Hypotesen går ut på at β-effekten skyldes to uavhengige enkeltbrudd på DNA-molekyet som «tilfeldigvis» er kommet så nær hverandre at virkningen er den samme som om vi hadde et dobbeltbrudd. Sannsynligheten for at så skal skje, kan utregnes forholdsvis enkelt og vi kommer da frem til en ligning for de overlevende celler etter α-effekten som har formen:

$$S_{\beta} = e^{-\beta D^2} \qquad (7)$$

Den fullstendige ligning blir da:

$$S_{\Sigma} = e^{-(\alpha D + \beta D^2)} \qquad (8)$$

Hvis man velger konstantene α og β fornuftig, og dette synes å være mulig, kan man finne en kurve som for et ganske stort område praktisk talt faller sammen med multitarget-kurven. For store doser faller dog kurven for sterkt (vi har således intet ekstrapolasjonstall) og for å rette på dette må man supplere ligningen med flere ledd, D^3, D^4 osv. som er falt bort i den første tilnærmelse. Også denne hypotese kan til en viss grad (ved å manipulere konstantene α og β) ta hensyn til reparasjon og recovery, men sammenhengen er ikke så klar og liketil som ved reparasjonshypotesen. Den største innvending mot hypotesen ligger i uklarheten om hvor nære hverandre de to brudd må være. *Chadwick* taler om ca. 100 baseavstander (dvs. ca. 700 Å) mens andre mener at 3 baseavstander er største tillatte avstand. I siste fall vil chansene for så nære treff være for liten for de doser det her dreier seg om. Hypotesen kan ikke forklare at β-effekten gir reproduktiv og ikke interfase død, den kan heller ikke tilfredsstille overlevelseskurver med høye ekstrapolasjonstall, 20 eller 100. Hypotesen synes derfor ikke særlig sannsynlig og må antagelig modifiseres på mange slags vis før den kan bli brukbar som arbeidshypotese. Det samme gjelder også for en lignende hypotese fremsatt av *Rossi* og *Kellerer* («dual radiation injury theory») hvor de to enkeltbrudd («sensitive loci») skal kunne opptre i stor avstand, $> 1\mu$, fra hverandre ((17)). Man har ingen forestilling om hvordan de samvirker for å fremkalle celledød.

Sammenfatning

Strålebiologi og stråleterapi kan sammenlignes med undersøkelser i forskjellig dyptliggende jordlag. Strålebiologene arbeider seg oppover fra det elementære grunnlag, terapien arbeider seg nedover med røtter for å sikre og forbedre det kliniske «overflatearbeid». Ellis-formelen (Strandquist) som er en sammenfatning av kliniske erfaringer, er egnet til å knytte forbindelser med strålebiologi i «mellomlaget» og samarbeidet her kan gi nye impulser for videre forskning. Som et del-referat fra et symposium i Carmel (USA) i 1969 beskrives forholdene i tumorer og de kompliserte problemer man her støter på. Surstoffproblemet i forbindelse med anoksiske tumorer er ennu ikke løst. De eksperimentelle undersøkelser av selve effekten gir til dels motstridende resultater. Klinisk sett er reoksygenering av vesentlig betydning for å oppnå kontroll av primærtumoren; avanserte bestrålingsprogrammer vil her kunne gi bedre resultater enn de tradisjonelle. Nye kjemiske stoffer som f. eks. Ro–07—0582 synes å kunne bringe

OER-verdien ned til 1,5 og de kan derved gjøre neutronterapi overflødig.

Til sist behandles et problem fra grunnlagsforskningen hvor to hypoteser til forklaring av β-effekten beskrives. Reparasjonshypotesen gir en utvungen og enkel forklaring, men lar dog mange spørsmål ubesvart. Den annen hypotese forklarer β-effekten som to nært sammenliggende enkeltbrudd på DNA-molekylet. Hypotesen byr ennu på store vanskeligheter og gir neppe den riktige forklaring.

LITTERATUR

1) *Widerøe, R.:* The Ellis formula. A study in applied radiobiology. 5th international congress of Radiation research. Seattle, July 1974.
2-komponent-teorien for strålingseffekter er bl. a. beskrevet i følgende publikasjoner:
Radiol. clin. biol. 36 (1968) 308–322,
Acta Radiologica (Stockholm) V. 10, Fasc. 6 (1971) 605–624,
«Biophysical Aspects of Radiation Quality», IAEA–SM–145/44 (1971) 311–330.
2) *Strandquist, M.:* Acta Radiologica. (Stockholm) Suppl. 55 (1944) pp 1–300.
3) *Ellis, F.:* In Modern Trends in Radiotherapy, Vol. 1, eds. Deelay and Wood, Butherworths. London (1966) pp 34–51.
4) *Cohen, L.:* Am. I. Roentgenol. 84 (1960), 741 Radiology Vol. 101 Nr. 2 (1971) 419–427.
5) *Breur, K.:* Growth rate and Radiosensitivity of human tumors. Europ. I. Cancer Vol. 2, Nr. 2 (1966) 157–171 and 173–188.
6) Time and Dose Relationships in Radiation Biology as Applied to Radiotherapy. Proceedings NCI–AEC Conference. Carmel, Calif. 1969 BNL 50203 (c–57).
7) *Widerøe, R.:* Radiol. clin. 39 (1970), 20–31. Se også: Remarks on oxygen effects (1975), printing.
8) *Chapman, J. D. et al.:* The inactivation of Chinese Hamster Cells by X-rays. Radiation Research (submitted).
9) *Asquith, J. C. et al.:* Brit. I. Radiol. 47 (1974), 474–481.
10) *Stone, H. B. and Withers, H. R.:* Radiology, November eller December 1974.
11) *Lehnert, S.:* Relation of Intracellular cyclic AMP to the Shape of Mammalian Cell Survival curves. Proceedings 6th L. H. Gray Conference, London, Sept. 1974.
12) *Coggle, J. E.:* Biological Effects of Radiation. Wykeham, London 1971.
13) *Widerøe, R.:* Short remarks on the 2-component theory of radiation. Radiology (submitted).
14) *Widerøe, R.:* Cellular repair and recovery after radiation damage. 4th Symposium on Microdosimetry. Verbania Pallanza 1973.
15) *Powers, E. L.:* Physics in Medicine and Biology. (1962) 6, 3–28.
16) *Chadwick, K. H. and Leenhouts, H. P.:* A common mechanism in Radiobiology and its implications in Radiological Protection. 3rd Int. Congress of the Int. Radiation Protection Ass., Sept. 1973 Washington. Proceedings pp. 457–468. Conf.–730907–P1.
17) *Rossi, H. H.:* Dual Radiation Injury and its Consequences. In: Biophysical Aspects of Radiation Quality. Symposium Lucas Heights, March 1971, pp. 333–341. IAEA STI/PUB/286, Vienna 1971.

(Forts. fra s. 38)

høgskolen i Gøteborg. Det ble pekt på at en stor del av elevene vantrives i skolen og at man på langt nær har klart å bygge en gledes-skole for alle. Det ble nevnt at mens ca. 50 % av gymnaselevene har stemmerett og dermed er med å bestemme om generelle samfunnstiltak, har de samme elevene nesten ingen ting å si når det gjelder styringen av den skolen de går på.

Spesielt når det gjelder grunnskolen, ligger fysikkundervisningen på et avgjort for høyt nivå. Det ser ut til at man nå har klare vitenskapelige prov fra mange land på at av barn i 15–16 års alderen er det bare ca. halvparten som er i stand til å forstå begrep som har med proporsjonalitet å gjøre, f. eks. massetetthet. Undervisningsmidlene er lagt opp for de få som er mest modne, og da er det ikke noe rart at det store flertallet finner fysikken kjedelig og interesseløs. En gymnaslærer brukte ofte i sin undervisning oppgaver hentet fra læremidler for 6. og 7. klasse. Mange slike oppgaver var for vanskelige for realgymnasets elever. (Det var hans ord, ikke mine.)

En annen ting som er med om å holde elevene borte fra fysikken i gymnaset, er karaktersettingen. Man er strengere i bedømmelsen av fysikk/matematikk enn i andre fag. Det viser seg nemlig at elever på reallinjen hadde bedre gjennomsnittsresultater på ungdomsskolen enn elever på andre linjer hadde. I gymnaset er så karaktersettingen slik at alle linjer får omtrent samme gjennomsnittskarakter. De som går på reallinjen blir da rangert i forhold til de mest skoleflinke, mens elever på de andre linjene blir rangert i forhold til noen som er mindre skoleflinke, og reguleringen synes å skje ved hjelp av fysikk/matematikk-karakterene. Elevene vet at det er vanskeligere å få gode karakterer på reallinjen, og de som vil inn på lukkede studier, velger derfor andre linjer. Resultatet av dette er igjen at reallinjen blir enda mer en utpreget elitelinje, og kanskje går da karakterene ytterligere ned når vi altså ser dem i forhold til de samme elevenes prestasjoner på ungdomsskolen.

Ved universitetene er man i ferd med å differensiere fysikkundervisningen i høyere grad enn før. Man har bl. a. fått egne kurs for dem

(Forts. s. 48)

(Forts. fra s. 28)

helautomatisk firesirkeldiffraktometer som styres via en NORD-I datamaskin. Det er utviklet et avansert program som regner ut de riktige vinkler for innstilling av krystall og teller, gir de nødvendige instruksjoner for måling av refleksjonene og lagrer data på hullbånd eller magnetisk tape. Når instrumentet kalles et firesirkeldiffraktometer skyldes det at man trenger tre akser eller sirkler φ, χ og ω for innstilling av krystallen og en akse eller sirkel, Θ, for innstilling av telleren.

Krystallen er sentrert på et goniometerhode som kan dreies rundt sin egen akse. Denne kalles φ-aksen. φ-aksen er festet til den store sirkelen som sees på bildet, og kan dreies rundt dennes akse,χ -aksen. Endelig kan hele χ-sirkelen dreies rundt en vertikal akse, ω-aksen. Parallelt med denne ligger Θ-aksen som er forbundet med telleren. Posisjonen av aksene avleses ved hjelp av posisjonsindikatorer av typen More & Reed. Disse er av en mekanisk type med 8 kontaktbørster som beveger seg over en plate med et bestemt mønster. De gir 36.000 bits pr. omdreining slik at en bit svarer til 0.01 grad. De kan nullstilles ved en ønsket posisjon.

Alle aksene kan dreies simultant og drives av likestrømsmotorer som gir en maksimal rotasjonshastighet av ca. 10° pr. sek. Når en bestemt refleksjon er lest inn og marsjordre gitt, dreier aksene seg med full hastighet til det gjenstår 8 bit fra beregnet posisjon. Derpå går de med avtagende hastighet inn mot korrekt posisjon. Nøyaktigheten i posisjoneringen er bedre enn $\pm$ 1 bit eller $\pm$ 0.01°. Posisjoneringen kan også utføres manuelt fra en transportabel kontrollboks, og man kan da velge mellom 3 hastigheter: hurtig (10 grader/sek.), langsom (0.2 grad/sek.) eller inkrementell (ett bit av gangen). Braggrefleksjonene måles ved stepscan metoden, dvs. at tellingene utføres med krystall og teller stasjonær for et bestemt antall posisjoner over Bragg-toppen, som regel ca. 40. Med telletider på ca. 30 sek. vil man kunne måle mellom 50 og 100 refleksjoner i døgnet. Dette er omtrent fjerdeparten av det man kan måle med et tilsvarende røntgenanlegg.

Et instrument av denne typen krever en monokromatisk neutronstråle med bølgelengde 1–2 Å. For å fremstille denne er det installert i en kanal i JEEP II en såkalt dobbeltmonokromator bestående av to krystaller av pyrolyttisk grafitt. Ved å dreie disse parallelt er det mulig å endre bølgelengden uten å endre retningen av den to ganger reflekterte strålen. Man kan derfor med et enkelt håndgrep variere bølgelengden uten å behøve å flytte instrumentet. Tilgjengelige bølgelengder med den nåværende oppstilling ligger mellom 1.27–1.90 Å.

Det er meningen å benytte dette instrumentet til mer kompliserte strukturundersøkelser hvor neutron-diffraksjon har spesielle fortrinn. Instrumentet vil bli stilt til disposisjon for forskere ved norske universiteter og forskningsinstitusjoner som har egnede problemer. En brukerkomité med representanter for alle universiteter i Norge og Institutt for Atomenergi vil være ansvarlig for driften av instrumentet og allokere tid. Forespørsler og anmodninger om bruk av instrumentet kan rettes til formannen, førstelektor J. Hvoslef, Kjemisk Institutt, Universitetet i Oslo eller avd. fysiker A. F. Andresen, Institutt for Atomenergi, Kjeller.

(Forts. fra s. 47)

som tenker å spesialisere seg i tilgrensende naturfag. Den samme utviklingen har vi jo i Norge også. Det ble antydet at man kunne tenke seg et introduksjonsår med naturfag før selve fagstudiene begynte. Dette skulle kompensere for det lavere nivå noen mente at artianerne hadde nå i forhold til før. Det ble ikke lagt frem statistikk eller andre bevis for at påstanden om et lavere gymnasnivå er riktig, og det ble delvis bestritt fra skoleadministrasjonens side.

På konferansens 2. dag ble man orientert om fysikkens behandling i aviser og radio. Det er tydeligvis et vanskelig emne å få en meningsfylt debatt om. Ett av foredragene var svært interessant, syns jeg. Det handlet om bildet i forskningens tjeneste og ble holdt av Eric Dyring. Foredraget bestod i at han viste og kommenterte en lang rekke ypperlige fotografier beregnet for forskningsformål: spektrer, røntgenbilder, satellittbilder, sammensatte bilder der enkeltbildene var tatt med ulike filtere osv. Konklusjonen var at når forskere kunne få så mye viten ut av bilder, så måtte det også være mulig å nytte bildet til opplysningsformål på en mer systematisk måte enn vi gjør nå. Nå har ofte illustrasjonene bare det formålet å kvikke opp det typografiske inntrykket av en ellers kjedelig trykkside.

DEN NEDERLANDSK-NORSKE REAKTORSKOLEN

Institutt for Atomenergi — 2007 Kjeller

KURS I DATABEHANDLING HØSTEN 1975

Kursene i databehandling omfatter både generelle kurs og spesielle kurs i bruk av Control Data CYBER–74 ved Regneanlegget Blindern–Kjeller (RBK).

8/9 —12/9	Grunnkurs i databehandling
15/9 —24/9	Assembly programmering — MIXAL
29/9 —15/10	FORTRAN
20/10—24/10	Sanntidsanvendelse av datamaskiner i prosess-styring og data-innsamling
3/11— 6/11	Programmeringsteknikk, programstrukturering
10/11—11/11	INTERCOM
12/11—13/11	UPDATE
17/11—21/11	Programmering i PASCAL
24/11—26/11	Videregående FORTRAN
1/12— 2/12	Control Data CYBER–74, maskinarkitektur og optimalisering av FORTRAN-program
8/12—11/12	Filebehandling

Endelig kursprogram vil foreligge i slutten av juni og kan fåes ved skriftlig henvendelse til

Reaktorskolen
Institutt for Atomenergi
Postboks 40, 2007 Kjeller

eller pr. telefon til:

kurssekretær G. Jarrett, 71 25 60, linje 285, 303

Utgiverpoststed: 7034 Trondheim — NTH

Norsk Fysisk Selskap

Formann: Dr. philos. Tormod Riste, Inst. for Atomenergi, Kjeller.

Styre: Professor dr. philos. Arnfinn Graue, Universitetet i Bergen.
Amanuensis Ove Bratteng, Universitetet i Tromsø.
Dosent dr. philos. Thormod Henriksen, Universitetet i Oslo, Blindern.
Dosent Ivar Svare, Ph.D., Universitetet i Trondheim, Norges tekniske høgskole.

Selskapets sekretær:
Gerd Jarrett, Nøytronfysikkavdelingen, Institutt for Atomenergi, Boks 40, 2007 Kjeller.

Postgirokonto: 88388 Bankgirokonto: 5102.20.16001

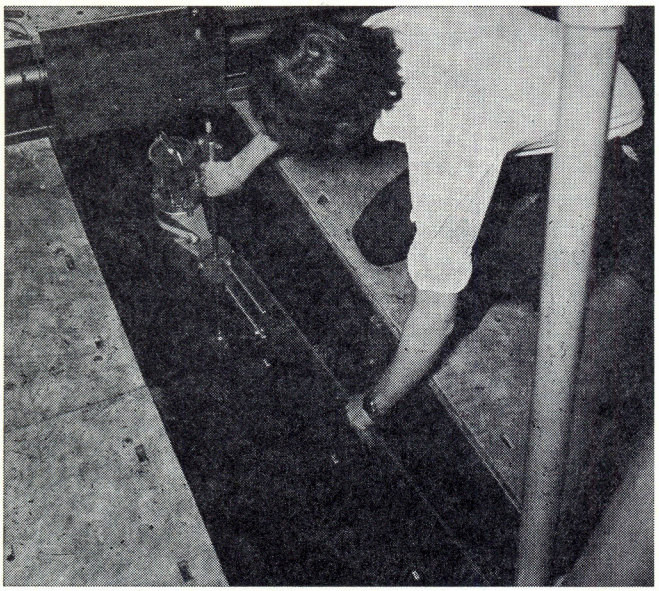
Fra Fysikkens Verden

Redaktør:
Professor dr. techn. Haakon Olsen, Universitetet i Trondheim, Norges lærerhøgskole.
Redaksjonssekretær:
Lab.ing. Halvard Torgersen, Universitetet i Trondheim, Norges tekniske høgskole.
Redaksjonskomité:
Lektor K. Jostein Knutsen
Luftkrigsskolen, Trondheim.
Universitetslektor Wilhelm Løchstøer, Universitetet i Oslo, Blindern.
Forsker, cand. real. Olav Steinsvoll, Institutt for Atomenergi, Kjeller.
Dosent Leif Owren, Ph.D., Univ. i Bergen.
Fagsekretær Helge Klemsdal, Nordlysobservatoriet, 9000 Tromsø.
Dr. techn. Helge Øverås, CERN Genéve.

Fra Fysikkens Verden utkommer kvartalsvis. Abonnement kan tegnes gjennom postverket eller direkte fra ekspedisjonen. Årsabonnement kr. 20,00. Årsabonnement for studenter og skoleelever kr. 15,00.

Sekretær: Gudrun Græsmann.
Ekspedisjonens adresse: Fra Fysikkens Verden, Fysisk institutt, Universitetet i Trondheim, Norges lærerhøgskole, 7000 Trondheim.

Postgirokonto: 10472 Bankgirokonto: 8601 236545



Recording Current Meter model 4, the widest used instrument for recording ocean currents, under tow test at National Institute of Oceanography, England.

RECORDING CURRENT METERS
for ocean currents down to 5000 meters depth.

TEMPERATURE PROFILE RECORDERS
for recording vertical temperature profiles in the sea.

CLIMATOLOGICAL RECORDING STATIONS
Land-based or mounted on buoys.

WATER HEIGHT GAUGES
based on recording hydrostatic pressure.

TAPE READERS for reading magnetic tape from the above instruments.

AANDERAA INSTRUMENTS

DATA COLLECTING INSTRUMENTS FOR LAND, SEA AND AIR

FANAVEIEN 13
5050 NESTTUN
NORWAY
TEL.: BERGEN (05) 27 40 30
CABLE HELICON

Aktietrykkeriet Trondhjem