Fra Fysikkens Verden

Nr. 2 – 1993
55. årgang

Utgiver:
Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:
Øivin Holter
Finn Ingebretsen

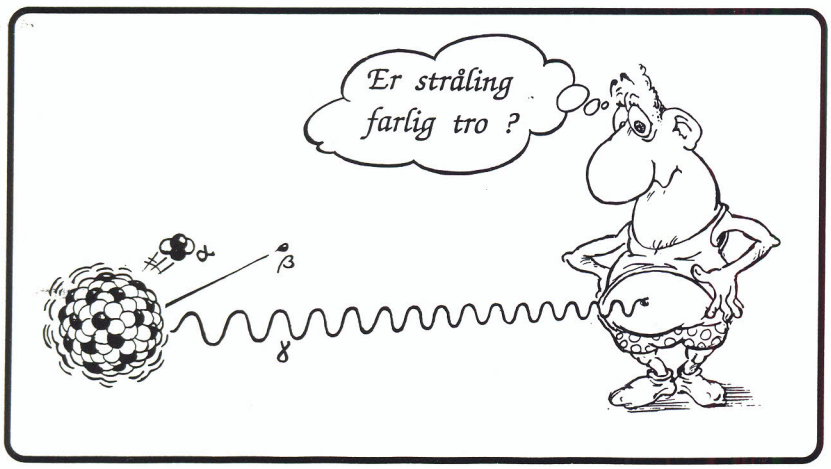
Redaksjonssekretær:
Karl Måseide

Innhold

Alexis C. Pappas:
Energi via kjernekraft – Del I ... 35

Eli Olaug Hole:
Effekten av ioniserende stråling . 43

Gjest i FFV 34
FFV Gratulerer 34
Nobelprisen i fysikk 1992 51
Tvillingparadokset 54
Tsjernobyl igjen 59
Bokomtaler 60
Nye Doktorer 61
Dr.ing. Bård J. A. Bjørkvik
Dr.ing. Gunnar Taraldsen
Dr.ing. Erik Wold
Trim i FFV 62
Nytt fra NFS 63
Plasma- og gassutladnings-symposiet 1993
Nye medlemmer



Se artikkel: Effekten av ioniserende stråling

ISSN-0015-9247

Gjest i FFV

Reform 94 og 1MA

Hernes vil ha mer kunnskap inn i skolen. Det lyder bra. De store endringene skjer først og fremst på de yrkesfaglige studieretningene, men også allmennfaglig blir berørt. Vi mister en gymnastikktime, så noe må ha skjedd.

Plutselig kommer høringsutkastet til ny fagplan for 1MA dalende ned på skrivebordet og fordriver søvnrusket fra matematikk- og fysikk-lektorers øyne. Her gikk vi og ventet – med grunnlag i virkeligheten (seminar, kursforedrag og forlengst nedsatt fagplan-gruppe) – på en etterlengtet nyordning av matematikken på første årstrinn, med ett kurs for dem som vil avslutte etter 1MA, og et annet for dem som går videre. Slik man har det i andre land på gymnas-nivå.

Den gang ei. Nå skal ikke bare allmennfaglig, men hele fødselskullet gjennom samme 3 uketimers kurs, mens de som vil ha generell studiekompetanse, der i inkludert handel og kontor, må bygge på med to uketimer til. Innholdet er nedtonet tilsvarende (med temmelig svulstig beskrivelse).

Begrunnelse: "Mange elever har vanskeligheter med matematikk-faget i første klasse i videregående skole og har derfor en negativ holdning til faget. Vi finner det derfor nødvendig at matematikken får et innhold som kan motvirke noen av de negative holdningene." Nestleder i Norsk Lærerlag er glad for at "de uforståelige abstraksjoner" ikke lenger dominerer.

Men hvor ble det av matematikken for dem som har en positiv holdning til faget – eller som har bruk for å lære det? Det som vil gå tapt i 1MA får nødvendigvis konsekvenser for både 2MN og 2FY, og så videre.

Det er spørsmål som etter min oppfatning angår flere enn "de tre i landet som skal ta matematikk hovedfag." (Sitat fra sentral KUF-persons forsvar for fagplanutkastet.) Jeg håper mange lesere av FFV tilhører høringsinstanser og kjenner sin besøkelsestid.

Ingerid Hiis Helstrup

∞

FFV Gratulerer

Meltzer-prisen til Sverre Jakob Alvsvåg

Dr.scient. Sverre Jakob Alvsvåg (31) er blitt tildelt Meltzer-prisen for yngre forskere for 1992. Prisen er på 30 000 kroner.

L. Meltzers Høyskolefond har opprettet forskningspriser "til formål å stimulere det vitenskapelige arbeid ved Universitetet i Bergen," som det heter i statuttene. Spesielt gis en pris til yngre forskere "som en anerkjennelse av fremragende vitenskapelig arbeid utført av yngre forskere, ikke over 40 år." Prisene utdeles ved den årlige middagen som arrangeres på innstifterens fødselsdag, den 8. mars.

Alvsvåg har utviklet et avansert triggersystem som brukes i DELPHI-eksperimentet ved LEP (omtalt i forrige nummer av FFV). Juryen, bestående av alle dekanene ved UiB, fant at "Alvsvåg står i ein særklasse mellom unge forskarar, ikkje berre fordi han har ei grundig forståing av kva moderne elektroniske prinsipp og konstruksjonsmogelegheiter inneber, men at han og har evne til å nytta dei i praksis."

Bildet viser prisvinneren Sverre Jakob Alvsvåg med diplom og sjekk, sammen med Magne Lerheim, Meltzerfondets forretningsfører, og universitetsdirektør Ole Didrik Lærum. FFV Gratulerer!

∞

Energi via kjernekraft – Del I
50 år siden den første atomreaktoren ble startet

Alexis C. Pappas *

I anledning atomreaktorens 50-års jubileum i 1992, holdt professor emeritus Alexis C. Pappas, som har hatt personlige kontakter med mange av aktørene, to felleskollokvier over denne spennende historien på Fysisk institutt ved Universitetet i Oslo. FFV har vært så heldig å få trykke foredragene, og det første presenteres her.

Fra E. Rutherford i 1902 til O. Hahn i 1938/39

Diskusjonen om atomenergi begynte tidlig i vårt århundre, bare få år etter oppdagelsen av radioaktiviteten i 1896, og av polonium og radium i 1898.

På grunnlag av studier av radioaktiviteten i thorium, uttaler E. Rutherford og F. Soddy i 1902: "Radioaktivitet er samtidig et atomistisk fenomen og gjennomføring av en kjemisk endring der nye typer stoff blir produsert. Disse to betraktninger tvinger oss til å konkludere med at radioaktivitet er en manifestasjon av subatomisk kjemisk endring."

Men såvidt vites, åpnes diskusjonen om atomenergi av Charles Darwins sønn, astrofysikeren G. Darwin, som i 1903 skriver: "Vi har nylig lest om eksistensen av andre energikilder (atomenergi)... Jeg tror vi har ingen rett i å anta at solen er ute av stand til å frigjøre atomenergi i en grad minst sammenlignbar med hva den ville gjøre dersom den bestod av (Becquerels) radium."

En antydning av energi frigjort fra atomene finner vi også i Rutherfords bok *Radioactivity* fra 1904, der han uttaler seg om de store energimengder som frigjøres i radioaktive desintegrasjoner: "Dersom det noensinne blir funnet mulig å kontrollere hastigheten av radioelementers desintegrasjon, ville en enorm mengde energi kunne oppnås fra en liten mengde stoff."

I 1906 skriver Kr. Birkeland til direktør K.A. Wallenberg i Skandinaviska Enskilda Banken i Stockholm, under henvisning til radiums desintegrasjon: "Den senere tids undersøkelser over materiens desintegrasjon viser at man etter all sannsynlighet ville kunne utvinne omtrent en million ganger mer energi pr. gram materie dersom man bare ble i stand til innen en rimelig tid å oppløse selve atomene hvorav molekylene består... Jeg har gjort en oppdagelse som bringer meg til å tro at jeg står overfor oppdagelsen av en metode til å utløse atomenergien på praktisk måte og det hos sedvanlige elementer som jern og bly..." Og han fortsetter med at utviklingen av metoden sannsynligvis vil ta 2 år og koste 100 000 kr., foruten at han måtte ha 10 000 kr. om året så lenge arbeidet pågikk, og 20 000 kr. for overdragelse av patentet. Hva hans oppdagelse nærmere gikk ut på, har det ikke vært mulig å finne ut! Det ble ikke noe av samarbeidet da Wallenberg-brødrene ikke ville satse mer penger på hans prosjekter: "... før vi får en avkastning av de midler som er nedlagt i Deres geniale oppdagelse..." – dvs. Birkeland-Eyde prosessen til binding av luftens nitrogen, og starten på Norsk Hydros Kvælstoff Aktieselskab i 1907, som mange år senere skulle spille en betydelig rolle i denne historien.

I sine populærforelesninger ved Universitetet i Glasgow i 1908, tar Soddy opp problemet: "Hvorfor er radium unikt blant elementene?" Og han svarer: "Radium har lært oss at det ikke er noen grense for den energimengde som er tilgjengelig i verden for å opprettholde liv – bare begrenset av rekkevidden av våre kunnskaper."

Radium var altså vidunderstoffet med uante perspektiver. Men Soddy sier mer: "Er det ikke vidunderlig å reflektere over at i en liten flaske med ca. 30 gram uran sover og venter på å bli utnyttet en energimengde svarende til minst 150 tonn kull?"

Profetiske ord, men vi skal være oppmerksomme på at alle diskusjoner om energi var knyttet til energi frigjort ved radioaktiv desintegrasjon, da først og fremst α-desintegrasjoner. Men α-strålene skulle vise seg å bli et viktig verktøy i ødeleggelsen av den klassiske kjemi og fysikk.

Rutherford, som ble utålmodig dersom for mye tid ble brukt på å oppnå nøyaktighet, eller for å få et appa-

*Professor emeritus, Universitetet i Oslo

rat til å arbeide godt, pleide å uttrykke sin utålmodighet enten ved å si: "Det er alltid en eller annen, et eller annet sted som ikke har egne ideer som vil måle nøyaktig," eller ved å si: "Dersom ditt eksperiment trenger statistikk, burde du ha gjort et bedre eksperiment."

Med denne innstillingen sa han i 1909 til sine medarbeidere E. Marsden og H. Geiger: "Vi har ikke penger, så vi må bruke hodet ... så la oss gjøre et vanvittig eksperiment." Og i 1911 benyttet de seg av noe av det enkleste utstyret en kan tenke seg: En radiumkilde som sendte ut α-partikler (4,8 MeV) mot et tynt gullfolie, se figur 1. De observerte α-partiklene

Fig.1. Ernst Rutherford med sitt apparat for påvisning av atomets kjerne. (Foto tatt i 1920 av The Svedberg og forært forfatteren senere.)

som traff foliet og ble spredt fra dette, ved hjelp av en liten fluorescerende skjerm av sinksulfid som ble studert gjennom en lupe i fullstendig mørke. Til sin store forbauselse fant de at de fleste α-partiklene gikk upåvirket gjennom foliet, mens bare et meget lite antall ble spredt, og noen ble til og med støtt tilbake. Resultatet av dette eksperimentet ble ødeleggelsen av atomistenes mest avholdte ide – atomets udelelighet. De oppdaget til sin forbauselse at kjernen har en diameter på ca. 10^{-4} av atomets[1)].

I 1919 gjorde Rutherford en ny stor oppdagelse. Til sin forbauselse oppdaget han at noen få α-partikler endret sin positive ladning fra 2 til 1 etter å ha passert gjennom nitrogengass. Han fant forklaringen: α-partiklene hadde reagert med nitrogenkjerner og slått ut protoner fra kjernene, se figur 2. Rutherford hadde gjennomført den første transmutasjon av et kjemisk element i et annet: Nitrogen var blitt overført til oksygen[2)].

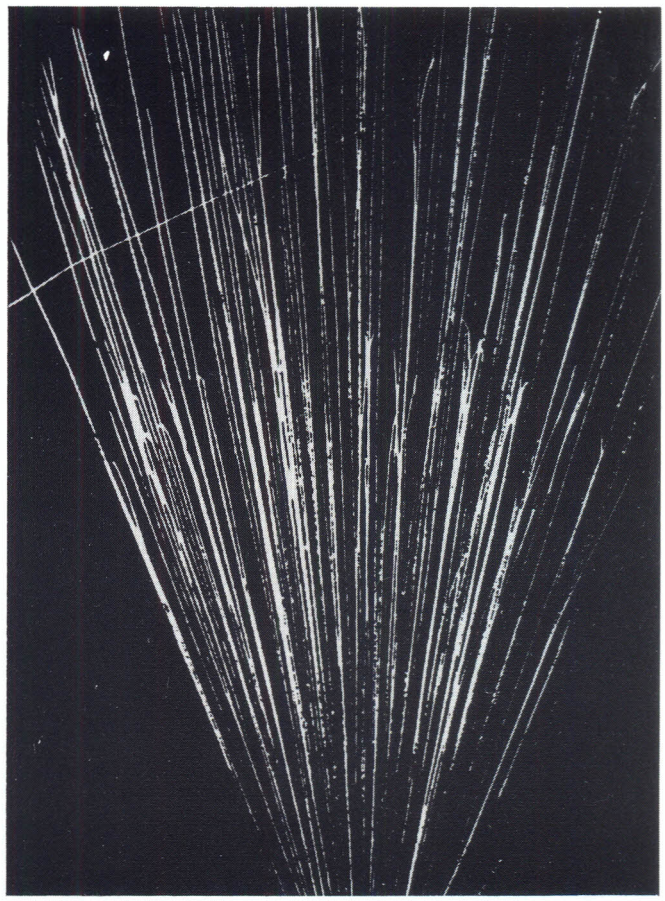


Fig.2. Transmutasjon av nitrogen til oksygen, $N(\alpha, p)O$, tatt med et tåkekammer. α-strålekilden, er under bildets nedre kant. En av α-partiklene har reagert med en nitrogenkjerne, og en ser sporet etter protonet som sendes ut (linjen tvers over figuren øverst til venstre). Ved å følge sporet bakover, ser en noenlunde midt på figuren et kort spor rett oppover mot høyre etter oksygenkjernen som dannes.

Disse oppdagelsene ble av mange mottatt med forskrekkelse og uro. Fr. Nansen, som hadde vært en typisk representant for den materialistiske livsoppfatning, uttalte på et møte i Universitets Aula i 1924: "Jeg vil komme med en bekjennelse. Jeg må bekjenne at det ikke er sten tilbake på sten, ikke atom tilbake på atom, av det naturvitenskapelige grunnlag for min livsoppfatning. Den var bygget på elementenes uforanderlighet og materialismens realitet. Nå vet vi at atomene er fylt av en levende kraft. De uendelige små er selv solsystemer av liv og bevegelse..." Dette skal han ha sagt mens tårene strømmet nedover hans ansikt.

Med Ruthefords eksperimenter i 1911 og 1919, begynte en ny epoke i fysikken, en epoke som ikke bare fullstendig ville komme til å revolusjonere vår oppfatning av naturen omkring oss, men også åpne for muligheten av teknisk utnyttelse av kjerneenergien ca. 40 år senere.

I 1933 er Rutherford igjen interessert i atomenergi,

men han er ikke videre optimistisk: "... vi kan ikke kontrollere atomenergien slik at det vil være av noen kommersiell verdi, og jeg tror at vi aldri vil bli i stand til å gjøre det." Og han fortsetter i typisk Rutherford-stil: "Meget nonsens har vært sagt om transmutasjon."

Rutherford tok her feil, og da han falt bort i 1937, var de første indikasjoner på en ny og merkelig prosess allerede i full anmarsj; dette delvis som et indirekte og uventet resultat av hans forutsigelse i 1920: "... muligens eksisterer et atom med masse én og ingen elektrisk ladning... Eksistensen av slike atomer ser ut til å være nødvendig for å forklare oppbyggingen av tunge elementers kjerner." (Betegnelsen 'nøytron' skyldes visstnok W.D. Harkins.)

Dette førte til at J. Chadwick oppdaget nøytronet 19 år senere, i 1932, samtidig med Irène og F. Joliot-Curie[3].

I motsetning til oppdagelsen av røntgenstrålene og radioaktiviteten, er ikke nøytronets oppdagelse en tilfeldighet, men resultatet av en utholdende søken etter noe Chadwick (som Rutherford) intuitivt følte måtte eksistere.

Kunstig radioaktivitet og transuraner

Den neste store oppdagelse kom bare et par år senere, i 1934[4], da I. og F. Joliot-Curie etter å ha bestrålt enkelte lette elementer (B, Mg og Al) med α-partikler fra polonium (5,3 MeV), fant at det ble dannet radioaktive isotoper av nitrogen, fosfor og silisium som de kalte henholdsvis *radionitrogen, radiofosfor og radiosilicium*, dvs. kunstig radioaktivitet; og med ett blir radioaktivitet og radioaktive fenomen ikke lenger begrenset til de få naturlige radioaktive elementers isotoper, men et daglig fenomen. De sier: "De fremtidige arbeider vil sansynligvis åpenbare nye radioaktive familier eller ukjente former for radioaktivitet med utsendelse av protoner, nøytroner eller andre partikler."

Vi skal merke oss at radioaktivitet under utsendelse av nøytroner (såkalte 'forsinkede nøytroner') ble oppdaget først i 1939 og er forutsetningen for en kontrollert fisjon.

Om oppdagelsen av kunstig radioaktivitet, sier A. Eddington: "Tidenes sosiale forvirring har nu nådd atomenes verden. Et atom som i de siste milliarder av år har levd fredelig som silisium kan imorgen finne seg selv som fosfor."

Nå begynner overraskelsenes og forvirringens tid. E. Fermi og hans medarbeidere, bl.a. kjemikeren O. D'Agostino og fysikerne E. Segré, E. Amaldi og F. Rasetti i Roma, gikk i gang med å bestråle sølv og andre elementer med nøytroner. De fant at det bestrålte sølv oppførte seg merkelig – dets aktivitet var ikke alltid den samme. Til å begynne med var de fleste fristet til å tilskrive fenomenet statistiske feil og unøyaktige målinger. Men Fermi, som var av en helt annen oppfatning, foreslo å bestråle sølvet med nøytronkilden i en parafinboks.

Nå viste sølvet en enorm aktivitet – de trodde ikke sine egne observasjoner – "fantastisk, utrolig, sort magi," ble det ropt. Under lunsjen mente Fermi å ha funnet forklaringen: "Nøytronene bremses i parafin, og de langsomme nøytronene har da meget større sjanser til å bli fanget inn av sølvkjernene. "La oss prøve hva en stor mengde vann vil resultere i," sa Fermi, og alle gikk til en fontene (med gullfisker) bak laboratoriet samme ettermiddag, gjentok eksperimentet, og bekreftet Fermis teori. Sannsynligheten for nøytroninnfanging var enorm. Fermi ropte: *"As big as a barn* (låve)!" Derav betegnelsen en *barn* (10^{-24} cm^2) som sannsynlighet for kjernereaksjoner.

Amaldi ble sendt til byen for å kjøpe "hele det periodiske system", og ivrige tok de fatt på å bestråle alle elementene i tur og orden med nøytroner. Andre fulgte etter, og det tok ikke lang tid før en hadde framstilt kunstige radioaktive isotoper av de fleste naturlig forekommende elementer.

Nå fulgte en fortvilelsens og overraskelsens tid, en tid som til slutt kulminerte i oppdagelsen av kjernefisjon i 1938–39, og med frigjøringen og kontroll av kjerneenergi i 1942.

Når vi skal følge denne utviklingen, må vi gå tilbake til Roma i mai 1934, da Fermi og hans medarbeidere tar fatt på å bestråle det siste elementet i det periodiske system, uran, med nøytroner i håp om å finne transuraner. Ad radiokjemisk vei, isolerer de fire-fem 'aktiviteter' fra reaksjonsblandingen, hver med sin karakteristiske halveringstid (10 s, 40 s, 13 min, 90 min og én lenger).

De resonnerte helt riktig ut fra alle tidligere erfaringer: Når uran tar til seg et nøytron, så dannes en nøytronrik uranisotop som pga. sitt høye nøytroninnhold i kjernen, og ellers generelle ustabilitet, må ventes å ville desintegrere under utsendelse av iallfall én negativ β-partikkel fra kjernen. En slik prosess vil øke kjernens atomnummer, og derved vil det dannes en isotop av elementet etter 92 uran, dvs. 93.

Ved hjelp av kjemiske studier, viser Fermi og hans medarbeidere at i det minste de fleste av de 'funne aktivitetene' ikke har kjemiske egenskaper svarende til elementene 86 radon til og med 92 uran, og kan derfor ikke tilskrives isotoper av disse elementene.

Med kjente kjernereaksjoner, dvs. slike som gir

reaksjonsprodukter i nærheten av de bestrålte atomkjerner, er den eneste forklaring som kan tenkes at det er blitt dannet isotoper av transuraner. Element 93 *EkaRe* skal i samme gruppe (VIIa) i det periodiske system som *Mn* og *Re*, og ha kjemiske egenskaper i overensstemmelse med dette, se figur 3. To av de 'funne aktivitetene' (13 min og 90 min) følger *Mn* og *Re*, mens prøver med isotoper av de radioaktive elementene ^{88}Ra, ^{89}Ac, ^{90}Th og ^{91}Pa ikke gjør det.

Dette synes å bekrefte at radioaktive isotoper av $^{93}EkaRe$[5], dvs. grunnstoffet etter uran, er blitt dannet. Fermi uttrykker seg meget forsiktig, men blir likevel misforstått: "Imidlertid da flere elementer lett felles i denne form (dvs. med *Mn* som bærer) kan dette bevis ikke bli betraktet som å være meget sterkt." Til Fermis store fortvilelse gjør den italienske og internasjonale presse et stort nummer av denne "oppdagelse". Spørsmålet om transuraner gjør ham urolig i lang tid. Han motsetter seg bestemt presset for å foreslå navn til "transuranene", og gir seg i kast med studier av nøytronet.

Kritikk – på villstrå – nesten riktig, men nye feiltagelser

Nye elementer interesserer naturligvis kjemikerne, og Ida Noddack som sammen med sin mann hadde oppdaget nettopp elementet ^{75}Re, kritiserer sterkt den kjemi som er blitt benyttet i Roma. Hun mener at flere av de allerede kjente elementer fra midten av det periodiske system vil kunne rives med i den kjemi som er blitt benyttet. Hun er inne på det riktige når hun sier: "Det er tenkbart at det ved bestråling av tunge kjerner med nøytroner, at disse deles i flere store deler som er isotoper av kjente elementer, men ikke naboer av de bestrålte."

På rent logisk grunn har Ida Noddack rett: Det er ikke blitt vist at den aktuelle (13 min) 'aktiviteten' kan skilles fra alle kjente elementer, bare fra de i slutten av det periodiske system. Imidlertid er alle fullstendig blinde for en slik mulighet, og tanken om at en kjerne kan deles i flere deler blir i det hele tatt ikke diskutert. En slik prosess strider jo imot alle forestillinger en har om fenomen innen kjernefysikken, og forslaget

Tabelle 1. Periodisches System der Elemente.

Die Zahlen vor den Elementsymbolen sind die Ordnungszahlen, die Zahlen darunter die praktischen Atomgewichte.

Periode	I. Gruppe	II. Gruppe	III. Gruppe	IV. Gruppe	V. Gruppe	VI. Gruppe	VII. Gruppe	VIII. Gruppe	0. Gruppe
I	1 H *1,008*								2 He *4,00*
II	3 Li *6,94*	4 Be *9,02*	5 B *10,82*	6 C *12,000*	7 N *14,008*	8 O *16,000*	9 F *19,00*		10 Ne *20,18*
III	11 Na *23,00*	12 Mg *24,32*	13 Al *26,97*	14 Si *28,06*	15 P *31,04*	16 S *32,06*	17 Cl *35,46*		18 Ar *39,94*
IV	19 K *39,10*	20 Ca *40,07*	21 Sc *45,10*	22 Ti *47,90*	23 V *51,0*	24 Cr *52,01*	25 Mn *54,93*	26 Fe *55,84* 27 Co *58,94* 28 Ni *58,69*	
	29 Cu *63,57*	30 Zn *65,38*	31 Ga *69,72*	32 Ge *72,60*	33 As *74,93*	34 Se *79,2*	35 Br *79,92*		36 Kr *82,9*
V	37 Rb *85,45*	38 Sr *87,63*	39 Y *88,93*	40 Zr *91,22*	41 Nb *93,5*	42 Mo *96,0*	43 Ma *(98)*	44 Ru *101,7* 45 Rh *102,9* 46 Pd *106,7*	
	47 Ag *107,88*	48 Cd *112,4*	49 In *114,8*	50 Sn *118,7*	51 Sb *121,8*	52 Te *127,5*	53 J *126,93*		54 X *130,2*
VI	55 Cs *132,8*	56 Ba *137,4*	57 bis 71 Lanthaniden	72 Hf *178,6*	73 Ta *181,4*	74 W *184,0*	75 Re *186,3*	76 Os *190,9* 77 Ir *193,1* 78 Pt *195,2*	
	79 Au *197,2*	80 Hg *200,6*	81 Tl *204,4*	82 Pb *207,2*	83 Bi *209,0*	84 Po *(210)*	85 —		86 Rd *222*
VII	87 —	88 Ra *226,0*	89 Ac *(227)*	90 Th *232,1*	91 Pa *(231)*	92 U *238,1*			

Lanthaniden: oder Seltene Erden	57 La *138,9*	58 Ce *140,1*	59 Pr *140,9*	60 Nd *144,3*	61 — —	62 Sm *150,4*	63 Eu *152,0*	64 Gd *157,3*	65 Tb *159,2*	66 Dy *162,5*	67 Ho *163,5*	68 Er *167,2*	69 Tu *169,4*	70 Yb *173,5*	71 Cp *175,0*

Fig.3. 30-årenes periodiske system for de kjemiske elementene der tansuranenes plasser er i nederste periode (VII) etter $92U$ og under $75Re$, $76Os$, $77Ir$, $78Pt$ og $79Au$, og med prefix Eka.

kan ikke tas alvorlig. Dessuten har I. Noddack ikke understøttet sine argumenter med noen eksperimenter, og heller ingen annen prøver en slik idé i laboratoriet hverken i Roma eller i Berlin.

Fermis interpretering av de 'funne aktiviteter' blir sterkt diskutert av mange og i noen grad betvilt. A.V. Grosse i Tyskland, mener at Fermis transuraner må være isotoper av elementet foran uran, dvs. protactinium – et element han selv hadde vært den første til å framstille i ren form.

I Berlin overtaler i 1929, fysikeren Lise Meitner kjemikeren O. Hahn til å fornye det samarbeidet disse hadde hatt 12 år tidligere, og sammen tar de fatt på de arbeider som etter 5 års "kvaler og hodepine" til slutt skal vise seg å gi forklaring på hva som virkelig skjer når uran (eller thorium) bestråles med nøytroner.

Samarbeidet mellom Lise Meitner og Otto Hahn er kjent som meget fruktbart og så innarbeidet at da en kollega, som hun i farten ikke gjenkjenner, hilser på henne med ordene: "Vi har dog tidligere lært hverandre å kjenne," så svarer hun: "Jeg tror De forveksler meg med professor Hahn." Lise Meitner og Otto Hahn hadde sine laboratorier i Kaiser-Wilhelm Institut für Chemie, utenfor Berlin.

Selv om forholdet mellom de to var basert på respekt for hverandres faglige egenskaper, så hendte det at Lise Meitner kunne møte Hahns syn med følgende kommentar: "Lille Hahn, av fysikk forstår du intet. Gå ovenpå!"

Hahn hadde en årelang erfaring fra radiokjemien (fra 1904) basert på sine allsidige studier av mange ledd og genetiske forhold i de 3 naturlige radioaktive seriene: thorium-, actinium- og uran-seriene, hver med 10–15 radioaktive medlemmer før de ender i bly. Disse sender ut α- og β-stråler, og har levetider fra brøkdelen av sekunder til milliarder av år. Gjennom isolasjon, studier og karakterisering av mange av disse var han sjeldent godt kjent med deres oppførsel, noe som senere viste seg å bli avgjørende for oppklaringen av gåten: Hva skjer med uran og thorium når disse bestråles med nøytroner?

Samarbeidet Hahn–Meitner (fra 1907) forsterket dessuten studiene av β- og α-stråler. Hahn hadde oppdaget rekyleffekt i radioaktive desintegrasjonsprosesser. Sammen oppdaget de kjerneisomeri i 1921. I midten av 1930-årene, konsentrerer Meitner og Hahn seg om Fermis "transuraner" fra 1934, og ber snart den meget yngre Fritz Strassmann om å bli med.

Hahn og Meitner viser først at Gross' påstand om at Fermis transuraner må være isotoper av protactinium, ikke er riktig. Disse to var de første som fant den eneste naturlige forekommende isotop av protactinium ^{231}Pa. De viser snart at de 'aktiviteter' som er funnet i Roma, ikke kan være isotoper av noe grunnstoff mellom 82 kvikksølv og 92 uran.

Etter to års arbeider med alle tenkelige muligheter prøvet, summerer Hahn, Meitner og Strassmann resultatene slik i 1937[6]: "Ved bestråling av uran med nøytroner, vil det dannes tre tilsynelatende forskjellige radioaktive 'isotoper' av uran. Hver av disse desintegrerer under utsendelse av negative β-partikler og gir tre radioaktive kjeder som hver fører til $^{98}EkaAu$, $^{96}EkaIr$, og $^{93}EkaRe$. De to første seriene dannes enten en benytter hurtige eller langsomme nøytroner, mens den tredje, som gir $^{93}EkaRe$, bare dannes med langsomme nøytroner." Se figur 4.

$$_{92}U + {}_0n \rightarrow {}_{92}U \xrightarrow[10\,s]{\beta^-} {}_{93}EkaRe \xrightarrow[2.2\,m]{\beta^-} {}_{94}EkaOs \xrightarrow[59\,m]{\beta^-}$$

$$ {}_{95}EkaIr \xrightarrow[66\,t]{\beta^-} {}_{96}EkaPt \xrightarrow[2.5\,t]{\beta^-} {}_{97}EkaAu?$$

$$_{92}U + {}_0n \rightarrow {}_{92}U \xrightarrow[40\,s]{\beta^-} {}_{93}EkaRe \xrightarrow[16\,m]{\beta^-} {}_{94}EkaOs \xrightarrow[5.7\,t]{\beta^-} {}_{95}EkaIr?$$

$$_{92}U + {}_0n \rightarrow {}_{92}U \xrightarrow[23m]{\beta^-} {}_{93}EkaRe?$$

Fig.4. O. Hahns, L. Meitners og F. Strassmanns resultater i 1937 for dannelsen av transuraner ved bestråling av uran med nøytroner. 3 serier er dannet.

At en av de 'funne aktivitene' (23 min) må skyldes en isotop av uran, blir med sikkerhet påvist (^{239}U), men de er ikke i stand til å finne dens 'datter' som jo bør ha atomnummer 93 og være et virkelig transuran (dvs. ^{239}U 23,5 min $\rightarrow$ ^{239}Np 2,3 d).

For en annen av aktivitetene (16 min), kan reaksjonstverrsnittet for dannelsen fra ^{238}U beregnes til 0,16 b. Å anta dannelse fra ^{235}U eller ^{234}U, som forekommer ca. 0,7% og ca. 0,006% i naturlig uran, vil kreve usannsynlig høye reaksjonstverrsnitt, henholdsvis 23 b og 2700 b, som med den tids erfaring måtte ansees som utelukket. Men den sammenheng som foreslås mellom de 'funne aktiviteter' er ytterst merkelig, og fysikeren Lise Meitner føler seg langt fra vel. "Jeg fant det meget foruroligende å oppdage slike lange β-desintegrasjonskjeder med uran," fortalte hun senere.

De tvinges til å anta at innfangingen av ett nøytron i uran fører til dannelsen av tre isomere av uran. Disse isomere er høyst β-ustabile, og det til tross for at de naturlig forekommende uran-isotoper er β-stabile! Videre antok de at det oppstår isomere kjeder hver med opptil fire-fem medlemmer. Men dette kan ikke stemme selv om resultatene blir bekreftet av andre forskere, og ytterligere understøttet av W. Bothes

og W. Gentners oppdagelse i 1937, av at isomeri av og til vil opptre når elementer blir bestrålt med nøytroner. Derfor er man med Hahn tvunget til å si: "Det er ingen andre forklaringer enn antagelsen om disse transuraner."

I Paris studerer fysikeren Irène Curie og kjemikeren P. Savitch disse fenomen i 1937/38, og de kommer fram til andre og nye interessante resultater. De konsentrerer seg om å gjøre alt for å identifisere en av de mange radioaktive produkter som ser ut til å dannes ved bestråling av uran med nøytroner, nemlig en 3,5-timers aktivitet. Men de er heldigvis til å begynne med ikke oppmerksomme på at en tilsvarende aktivitet var funnet i 1935 i thorium bestrålt med nøytroner, og da identifisert av I. Curie, v. Halban og Preiswerk som en actinium isotop, et element med tilsvarende kjemiske egenskaper som lanthan. Det viser seg at 3,5-timers aktiviteten som de nå har funnet, lar seg skille fra "transuranene", og at denne tilsynelatende også følger lanthan slik som actinium. Men to ganger kommer de fram til resultater som senere viser seg å være gale[7]. Irène Curie fortalte ofte senere at hun i 1938 tenkte at hun hadde alle elementene i Det periodiske system i sin blanding.

Den 'funne (3,5-timers) aktiviteten' kunne godt være den tidligere kjente isotop av actinium. Men til slutt viser det seg at 3,5-timers aktiviteten i uranløsningen ser ut til å være mer lik lanthan enn actinium: "Egenskapene til 3,5 t aktiviteten er som lanthans hvorfra det foreløbig ser ut til at den ikke kan separeres uten ved hjelp av fraskjonering." Her stopper de uten å gi svar.

De er nå meget nær den riktige løsning. Men uten at de kan vite det, så er det minst to forskjellige aktiviteter med samme halveringstid i deres blanding – en isotop av lanthan (3,9 t ^{141}La) som følger lanthan, og en isotop av yttrium (2,5 t ^{92}Y) som ikke helt følger lanthan – og de blir lurt.

Å ta skrittet fullt ut og akseptere at det dannes en isotop av lanthan, vil i realiteten si at en deling av urankjernen i to omtrent like store deler har funnet sted – og hvem tør dette? Iallfall ikke en fysiker i 1938. De forløsende ord "deling av urankjernen" blir ikke sagt, og skyldtes ifølge Frederik Joliot, fysikernes vanskelighet med fullt ut å akseptere en kjemikers resultater: "Enkelte ganger kan samarbeidet mellom en fysiker og en kjemiker vise seg å bli en dårlig kombinasjon." Joliot er selv kjemiker og har erfart at samarbeidet med fysikeren Irène Curie også kan være meget fruktbart og til og med resultere i en nobelpris!

En forsøker lengst mulig å forklare dannelsen av de 'funne aktiviteter' ut fra kjente prosesser som β- eller α-desintegrasjon av den tunge urankjernen som dannes ved bestråling av naturlig uran med nøytroner.

I 1938 (10. november) får Fermi Nobelprisen i fysikk "for oppdagelsen av langsomme nøytroners virkning og for oppdagelsen av transuraner," bare få måneder før L. Meitner og O.R. Frisch slipper "fisjonskatten" ut av sekken. Fermi og familien reiser til Stockholm og benytter anledningen til å forlate Mussolini og det fascistiske Italia for godt.

Høsten 1938 marsjerer Hitler inn i Østerrike, og Lise Meitner som østerriksk jøde, føler seg truet i Berlin. Hun blir nektet utreisetillatelse, men Hahn og andre venner får henne i all hemmelighet til Holland der myndighetene ser gjennom fingrene med visum. Hun reiser så til København, der Niels Bohr prøver å overtale henne til å bli. Men som den beskjedne hun alltid er, avslår hun å bli da hun ifølge nevøen Frisch "ikke vil stå i veien for de unge". (Hun var da 60 år.)

Med Bohrs hjelp kommer hun til Nobelinstituttet i Stockholm med Manne Siegbahn som sjef. Hun har altså måttet forlate samarbeidet med vennene i Berlin bare 3 måneder før den riktige løsningen blir funnet. Men Hahn holder henne stadig underrettet.

Hahn og Strassmann tar nå opp studiet av 3,5-timers aktiviteten som var blitt funnet i Paris, og som i Berlin blir kalt *Curieosium*. De benytter nå både barium (elementet foran lanthan) og lanthan som bærere i oppløsningen av det med nøytroner bestrålte uran. De gjennomfører sin kjemi og finner til sin forbauselse: "Foruten de av oss tidligere beskrevne transuraner, dannes som resultat av to på hinannen følgende α-desintegrasjoner tre kunstige β-radioaktive isotoper av radium med forskjellige halveringstider. Disse omdannes så til kunstige β-radioaktive actinium-isotoper."

Dette er igjen noe nytt og uforståelig: Vi har også her dannelsen av tre radioaktive serier. Én serie kunne tenkes dannet ut fra uranisotopen 238 ved reaksjonen[8]

$$^{238}_{92}U\ (n,2\alpha)\ ^{231}_{88}Ra$$

mens uranisotopen 235 ville gi ^{228}Ra, det vil si den velkjente radiumisotop MTh_1 som har en halveringstid på 6,7 år. Denne var imidlertid ikke blitt funnet. At uranisotopen 234, som forekommer i overordentlige små mengder (0,006%) i naturlig uran, skulle kunne gi opprinnelsen til så høye aktiviteter som observert, var helt utelukket. Det gjensto da bare én forklaring: En hadde fått dannet tre isomerer av radium som hver for seg desintegrerte videre slik at isomeri ble nedarvet gjennom flere ledd (generasjoner) slik en tidligere også hadde måttet anta var tilfelle for "transuranene". Se

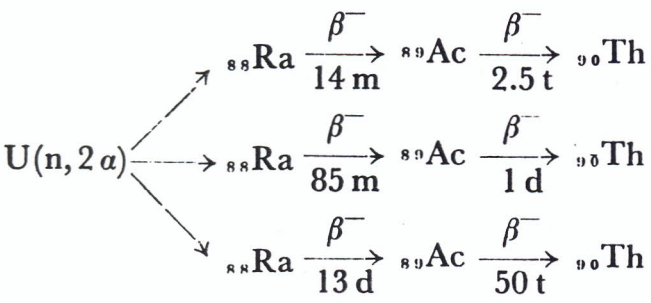


Fig.5. Dannelsen av 3 radium-isomere med nedarvet isomeri gjennom flere generasjoner når uran bestråles med nøytroner og 2 α-partikler sendes ut. (Ref. O. Hahn og F. Strassmann, 1938.)

figur 5. Hahn og Strassmann avslutter sin avhandling med: "For første gang er her påvist dannelsen av isomeri-rekker gjennom α-desintegrasjon." At to α-partikler sendes ut etter innfangingen av et nøytron, til og med med lav energi, i uran, er så uforståelig at α-partiklene må påvises før prosessen kan aksepteres. Så nå tar fysikerne fatt.

Allerede i 1937 hadde A. Braun, P. Preisswerk og P. Sherrer i Zürich, lett etter α-partikler. De finner hva de tror er α-partikler og bestemmer energien til over 9 MeV (α fra $U \sim 4{,}5$ MeV). Dette gjøres ut fra målte rekkevidder. Men de er uten å vite det blitt lurt, da α-partikler og fisjonsfragmenter har noenlunde samme rekkevidde, 2-3 cm, i luft!

G. Droste i Berlin leter også etter α-partikler, men han måler den ionisasjon som frambringes av de produkter som sendes ut fra uran under bestråling med nøytroner. Han finner noe som ioniserer kraftig, men dette blir borte når uranet dekkes med et tynt folie som erfaringsmessig absorberer α-stråler; og han finner ikke de kraftige ioniserende fisjonsfragmenter da disse også stoppes! Kraftige pulser blir også observert i Cavendish-laboratoriet, men der blir de tillagt feil i det elektroniske utstyret. Det var ikke lett å være fysiker i de dager!

Senhøstes 1938 får Niels Bohr i København, vite om de nye radium-isotopene. Den foreslåtte (n, 2α) prosess gjør ham 'ulykkelig', da en slik prosess ikke kan tenkes mulig med langsomme nøytroner. Han spør derfor Hahn om ikke de nye radio-isotoper kan være transuraner. Hahn går ikke med på det, og sammen med Strassmann vil han ennå en gang gjenta forsøkene og derved gi det endelige bevis for riktigheten av deres tidligere funn.

Kjemisk kontroll gir riktig løsning

For å være sikre i sine konklusjoner, ville Hahn og Strassmann nå arbeide med 'sterkere' preparater. De foreslår nå "... ut fra vår lange erfaring" fraksjonert krystallisasjon for å skille radiumisotoper fra den benyttede barium-bærer. (Det var på denne måten Marie og Pierre Curie hadde funnet radium.) Stor ble Hahns og Strassmanns forskrekkelse over å finne at deres "radium" ikke lar seg separere fra tilsatt barium, og at alle de aktivitetene som tidligere var tilskrevet isotoper av radium (dvs. 14 min, 86 min og 13 d) nå følger barium fullstendig, dvs. et element i midten av det periodiske system. For å kontrollere separasjonsmetoden, den fraksjonerte krystallisasjon, blander de litt naturlig forekommende radium (^{226}Ra) med noen få gram barium og foretar den fraksjonerte krystallisasjon på nytt. Som ventet, lar det naturlige radiumet seg separere fra barium.

"Vi kommer til det skrekkelige resultat at våre 'Ra-isotoper' ikke oppfører seg som radium, men som barium," skriver Otto Hahn til Lise Meitner 19. desember 1938, og han fortsetter: "Vi vil fortelle dette bare til deg, kanskje kan du foreslå en eller annen fantastisk forklaring. Vi vet jo selv at uran ikke kan spaltes til barium." Den 21. desember får han Lise Meitners svar: "Foreløbig synes jeg at en så kraftig deling er meget vanskelig, men vi har i kjernefysikken opplevet så mange overraskelser at man ikke uten videre kan si: Det er umulig."

I mellomtiden har Hahn og Strassmann i løpet av kort tid gjennomført en rekke kjemiske studier av aller høyeste klasse. Etter hvert drives de motvillig, men ubønnhørlig, til en konklusjon som strider imot alle tidligere erfaringer om hva en visste om atomkjernens egenskaper. Denne var jo blitt studert i over 30 år både av fysikere og av kjemikere.

Her gjelder det derfor å uttrykke seg meget forsiktig før manuskriptet for offentliggjørelse skrives ferdig. Dette mottas 22. desember av Die Naturwissenschaften (en kopi sendes Lise Meitner samtidig). Hahn og Strassmann konkluderer med: "Som kjemikere må vi på grunnlag av de kort omtalte forsøk egentlig endre det ovenfor gitte skjema og i stedet for Ra, Ac og Th sette inn symbolene Ba, La og Ce." Se figur 6. De avslutter med: *"Als der Physik in gewisser Weise nahestende 'Kernchemiker' können wir uns zu diesem allen bisherigen Erfahrungen der Kernphysik wiedersprechenden Sprung noch nicht entschliessen. Es könnte doch noch vielleicht eine Reihe seltsamer Zufälle unsere Ergebnisse vorgetäuscht haben*[9]*."* Med andre ord, som kjemikere er de sikre, men alle erfaringer fra den fysikk som står kjernekjemikerne nær sier at dette ikke kan være riktig, og de prøver å angi en forklaring.

Men hvis de 'nye' symboler er riktige, betyr det at

Tidligere antatt:	Virkelig reaksjon:
(5a)	(5b)
$\mathrm{RaIII} \xrightarrow[86\,\mathrm{m}]{\beta^-} \mathrm{AcIII} \xrightarrow{\text{dager}}$	$\mathrm{Ba}^{139} \xrightarrow[85\,\mathrm{m}]{\beta^-} \mathrm{La}^{139}\,\mathrm{st}$
$\mathrm{RaIV} \xrightarrow[250-300\,\mathrm{t}]{\beta^-} \mathrm{AcIV} \xrightarrow[<40\mathrm{t}]{\beta^-}$	$\mathrm{Ba}^{140} \xrightarrow[300\,\mathrm{t}]{\beta^-} \mathrm{La}^{140} \xrightarrow[40\mathrm{t}]{\beta^-}$
$\mathrm{RaII} \xrightarrow[14\,\mathrm{m}]{\beta^-} \mathrm{AcII} \xrightarrow[2.5\,\mathrm{t}]{\beta^-}$	$\mathrm{Ba}^{141} \xrightarrow[18\,\mathrm{m}]{\beta^-} \mathrm{La}^{141} \xrightarrow[3.7\,\mathrm{t}]{\beta^-}$
$\mathrm{RaI} \xrightarrow[1\mathrm{m}]{\beta^-} \mathrm{AcI} \xrightarrow[30\,\mathrm{m}]{\beta^-}$	$\mathrm{Ba}^{142} \xrightarrow[6\,\mathrm{m}]{\beta^-} \mathrm{La}^{142} \xrightarrow[77\,\mathrm{m}]{\beta^-}$
	$\mathrm{Ba}^{143} \xrightarrow[0.5\,\mathrm{m}]{\beta^-} \mathrm{La}^{143} \xrightarrow[30\,\mathrm{m}]{\beta^-}$

Fig.6. Den riktige løsningen på hva som finner sted når man bestråles med nøytroner. (Ref. O. Hahn og F. Strassmann, desember 1938.)

urankjernen deles i to deler som resultat av bestråling med nøytroner. Men hva er da den andre halvparten? Urans atomnummer 92 minus bariums 56 gir atomnummer 36, dvs. elementet krypton, og i januar 1939 finner Hahn og Strassmann radioaktive isotoper av en edelgass, antagelig krypton.

Nå behøver de ikke å skrive usikkert og nølende, men kan være sikre i sin sak, og uten engstelse ta det drastiske skritt helt ut, den 28. januar 1939. De summerer opp[9]:

1. Dannelsen av barium-isotoper fra uran er definitivt bevist.

2. Dernest ble strontium og yttrium fastlagt som den andre gruppen av bruddstykker.

3. Ved hjelp av en dertil egnet forsøksanordning, ble tilstedeværeslen av en edelgass bevist.

Med det utstyr en den gang (i 1930-årene) hadde tilgjengelig ($Ra-Be$ kilde $10^4 n_{th}$ pr. cm^2 s), fikk man meget lave aktiviteter (100-400 pr. min.) etter radiokjemiske separasjoner og målt med Geiger-Müeller rør. Se figur 7. Sett i lys av trettiårene, er disse arbeider et mesterstykke innen radiokjemien som neppe noen annen enn Hahn og Strassmann kunne ha gjennomført så elegant og utvetydig.

Det problemet som i 5 år hadde beskjeftiget en rekke av verdens aller dyktigste fysikere og kjemikere, og stadig ledet disse på villspor, er til slutt løst, men løsningen er funnet ad den absolutt vanskeligste vei en overhodet kunne tenke seg – den kjemiske; idet vi nå vet at i denne prosessen dannes det over 500 forskjellige 'aktiviteter' eller produkter, fordelt som isotoper på over 35 kjemiske elementer i området $_{30}Zn$ til $_{66}Dy$,

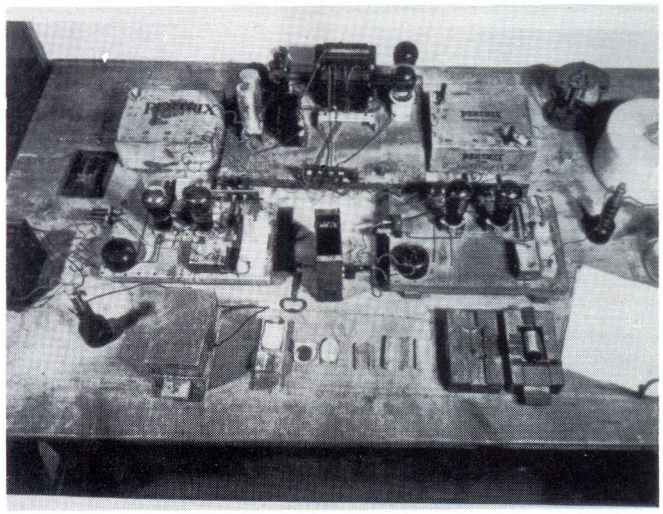


Fig.7. Instrumenter benyttet av O. Hahns team, nå i Deutsches Museum i München. Geiger-Müeller teller i forgrunnen, forsterkere og mekaniske tellere (telefon) i midten, høyspenningskilde bak, nøytronkilde ($Ra-Be$), og parafinblokk bakerst til høyre.

og med ca. 90 kjeder, hver med ca. 6–7 medlemmer. Fisjonsproduktene har levetider fra brøkdeler av sekunder til mange år.

Referanser

1. E. Rutherford: Phil. Mag. **21** 669 (1911)
2. E. Rutherford: Phil. Mag. **37** 581 (1919)
3. J. Chadwick: Proc. Roy. Soc. **A136** 692 (1932)
   I. Curie og F. Joliot: Compt. Rend. **194** 708 (1932)
4. I. Curie og F. Joliot: Compt. Rend. **198** 254 (1934)
   Radioactivité artificielle, Hermann & Cie (1935)
5. E. Fermi: Nature **133** 898 (1934)
6. O. Hahn, L. Meitner og F. Strassmann: Chem. Ber. **69** 905 (1937); **70** 1274 (1937);
   Zeit. f. Phys. **106** 1249 (1937)
7. I. Curie og P. Savitch: J. Phys. radium **8** 385 (1937); **9** 355 (1938)
8. O. Hahn og F. Strassmann: Naturwiss. **26** 755 (1938)
9. O. Hahn og F. Strassmann: Naturwiss. **27** 11, 89 (1939)

∞

Effekten av ioniserende stråling: Påliteligheten av risikoberegninger ved lave doser

Eli Olaug Hole *

Er små mengder ioniserende stråling farlig? At store doser ioniserende stråling kan være meget skadelig er det ingen tvil om, men effekten av små doser er langt fra klarlagt. Det vil i denne artikkelen bli lagt vekt på grunnlaget for de faktorene som benyttes for beregning av risiko for stråleskader ved lave doser. For å vurdere påliteligheten av slike beregninger, er det viktig å skille mellom vitenskapelige fakta og antagelser.

Naturlig strålemiljø

Vi lever alle i et strålemiljø, og helt siden tidenes morgen har livet på jorda vært utsatt for kontinuerlig bestråling fra verdensrommet, fra radioaktive kilder i jord og berggrunn, samt fra radioaktive isotoper i kroppen. Den midlere stråledosen som skyldes denne naturlige bakgrunnstrålingen er noen få millisievert (mSv) pr. år (1), men på grunn av geologiske forskjeller kan det være store geografiske variasjoner. Som vist i Tabell 1, varierer bakgrunnstrålingen i Norge mellom 1 og 250 mSv med en gjennomsnittsverdi på 4.25. De største variasjonene skyldes ulike mengder av radon (2).

Menneskelig aktivitet har ført til endringer i strålemiljøet det siste århundret. Dosene som skyldes menneskelig aktivitet (medisinsk og industriell bruk) er i dag omkring 1 mSv pr. person pr. år (1), altså en del lavere enn dosene fra den naturlige bakgrunnstrålingen. Også denne strålingen har store geografiske variasjoner.

Det finnes en rekke nasjonale og internasjonale organisasjoner som har til oppgave å optimalisere bruken av ioniserende stråling, det vil si å sørge for mest mulig nytte og minst mulig skade. To av de aller viktigste er UNSCEAR og ICRP. UNSCEAR (*United Nation's Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation*) er FN's faglige råd som arbeider med effekten av ioniserende stråling. Rådet ble opprettet i 1955 og har til hovedoppgave å samle og vurdere all tilgjengelig kunnskap om effekten av ioniserende stråling. ICRP (*International Commission on Radiological Protection*) kan på mange måter betegnes som strålevernets høyeste organ. Dette rådet ble dannet i 1918, og har siden den tid hatt til hovedoppgave å utarbeide retningslinjer for *planlagt* bruk av stråling. Hensikten er å begrense den ekstra strålebelastningen hvert enkelt individ får på grunn av menneskelig aktivitet, samtidig som at nytteverdien av ioniserende stråling skal ivaretas.

Tabell 1. Bakgrunnstrålingen i Norge. Gjennomsnittsverdier pr. person pr. år.

STRÅLINGSKILDE	EFFEKTIV DOSE	
	Middelverdi	Dose område
Naturlig bakgrunnstråling (eksterne og interne kilder)	4,25 mSv	1 - 250 mSv
Menneskelig aktivitet (medisin, industri)	0,65 mSv	
Total bakgrunnstråling	**4,90 mSv**	**1 - 250 mSv**
Tillegg fra Tsjernobyl (middel over 50 år)	**0,04 mSv**	0 - 2 mSv

Dosebegrep

Dosebegrepet står sentralt når det snakkes om effekten av ioniserende stråling (3). **Absorbert dose** (D_T) er definert som den midlere energimengden som er absorbert i et gitt organ. Enheten som brukes er joule pr. kg og kalles gray (Gy). Den gamle doseenheten rad tilsvarer en hundredels Gy.

Ioniserende stråling avsetter sin energi ved å ionisere molekyler innover i vevet. Gjennomtrengeligheten og måten energien avsettes på, avhenger imidlertid av strålingstypen og strålingsenergien. Stråletyper som trenger langt inn, men som avsetter sin energi over et relativt spredt område, kalles for lav-LET stråling (f.eks. røntgen). Stråletypene som har kort rekkevidde og som følgelig gir en høy ioniseringstetthet, kalles for høy-LET stråling (f.eks. α-partikler). LET (*Linear Energy Transfer*) er altså et mål for den lineære ionisasjonstettheten. Høy-LET stråling anses for å være mer effektiv når det gjelder å produsere skader i biologisk

*Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

ABSORBERT DOSE: $D_{T,R}$ J/kg gray (Gy)

EKVIVALENT DOSE: $H_T = D_{T,R} \cdot w_R$ J/kg sievert (Sv)

EFFEKTIV DOSE: $E = \Sigma_T H_T \cdot w_T$ J/kg sievert (Sv)

LET: Linear Energy Transfer
lav LET ($w_R = 1$) γ-stråling, røntgen, elektroner
høy LET ($w_R > 1$) α-partikler, protoner, nøytroner,

STRÅLINGSVEKTFAKTOR w_R:			ORGANVEKTFAKTOR w_T:	
fotoner, elektroner og muoner: (alle energier)		1	hud, beinoverflate: skjoldbruskkjertel, lever,	0.01
nøytroner:	< 10 keV	5	bryst, blære og spiserør:	0.05
	> 10 - 100 keV	10	lunge, rød beinmarg,	
	> 0.1 - 2 MeV	20	mage og tykktarm:	0.12
	> 2 - 20 MeV	10	gonadene:	0.20
	> 20 MeV	5	resten av kroppen:	0.05
protoner:	> 2 MeV	5		
α-partikler, fissjons fragmenter: og tunge partikler		20		

Dosestørrelser: Lave doser < 200 mGy
Høye doser > 2 Gy

Maksimal dosegrense (Sv/liv) = $\frac{\textbf{Akseptabel sannsynlighet} \text{ (skade/liv)}}{\textbf{Risiko} \text{ (skade/Sv)}}$

Antall forventet skadde = **Risiko** (skade/Sv) • **Kollektiv dose** (Sv)

Kollektiv dose = Σ **Individdose**

materiale enn lav-LET stråling. For å kunne sammenlikne biologisk effekt av doser fra ulike stråletyper har ICRP definert begrepet ekvivalent dose.

Ekvivalent dose ($H_T = D_{T,R} \cdot w_R$) er gitt ved den midlere stråledosen til et organ T, fra stråletypen $R(D_{T,R})$, multiplisert med en vektfaktor for stråletypen og -energien (w_R) (se ramme). Vektfaktoren er satt lik 1 for røntgen- og γ-stråling. De andre verdiene er beregnet ut fra den kunnskap en har om stråletypenes relative biologiske effekt i forhold til røntgen-stråling. Ekvivalent dose har også enheten joule pr. kg, men kalles sievert (Sv).

Effekten av ioniserende stråling er imidlertid ikke bare avhengig av absorbert dose og stråletype, den varierer også med hvilke organ som bestråles. For direkte å kunne sammenlikne skadene av en dose gitt til ett organ med skadene av en dose gitt til hele kroppen, innføres nok et dosebegrep, effektiv dose.

Effektiv dose ($E = \sum_T H_T \cdot w_T$) er gitt ved produktet av den ekvivalente dosen (H_T) og en spesifikk organvektfaktor (w_T), summert over alle de bestrålte organene. Organvektfaktoren varierer fra organ til organ, og illustrerer hvor alvorlig skaden er. F.eks., ettersom helbredelsesprosenten for skjoldbruskkjertelkreft er høyere enn den for lungekreft, er organvektfaktoren for skjoldbruskkjertelen satt lavere enn den for lungene (se ramme). Bestråling av samtlige organer skal tilsvare bestråling av hele kroppen; organvektfaktorene er derfor normert til 1. Også effektiv dose har enheten joule pr. kg. og kalles sievert (Sv).

Både strålingsvektfaktorene (w_R) og organvektfaktorene (w_T) er gitt avrundede verdier (se ramme), og representerer ikke eksakte biologiske verdier. Dette skyldes at ekvivalent og effektiv dose er 'administrative' enheter konstruert for å gjøre de praktiske regningene i forbindelse med strålevern mest mulig enkle. ICRP (3) understreker at verken ekvivalent eller effektiv dose er ment for, eller egnet til, å beregne virkelige risika. Men dessverre, i mangel av noe annet blir de begge ofte benyttet til nettopp slike beregninger.

UNSCEAR og ICRP regner doser under 200 mGy, eventuelt mSv, for små doser, og doser over 2 Gy eller 2 Sv, for store doser.

Stråleskader

Skader som følger av ioniserende stråling deles i to kategorier, akutte og stokastiske. Det kreves relativt høye stråledoser for at **akutte skader** skal inntreffe. Disse innebærer som regel celledød og organsvikt, og observeres relativt kort tid etter bestrålingen, dvs. minutter til dager. Det er svært sjelden at folk utsettes for stråledoser av denne størrelsesorden.

De **stokastiske skadene** kan induseres av langt lavere doser og kan dukke opp mange år etter at bestrålingen har funnet sted. Den mest omtalte stokastiske skaden er strålingsindusert kreft. Det er vanligvis risiko for stokastiske skader som brukes som mål på strålingsrisiko, i hovedsak risiko for dødelig kreft. Risiko for ikke-dødelig kreft, samt risiko for arvede defekter, blir også benyttet.

Strålevern

Det er den planlagte bruk av stråling som strålevernet konsentrerer seg om. Hovedoppgaven er å sørge for at de individuelle stråledosene som skyldes menneskelig aktivitet til enhver tid ligger langt lavere enn de dosene som vil kunne gi akutte stråleskader. I tillegg skal strålevernet sørge for at de stokastiske skadene som kan følge av lavere doser begrenses til et såkalt akseptabelt nivå, bl.a. ved å angi grenser for hvor høy stråledose hvert enkelt individ skal tillates å motta som følge av menneskelig aktivitet. For å angi slike maksimaldoser, må stråledosene relateres til en *risikofaktor* for stråleskade. Ut fra "risiko for stråleskade pr. dose-enhet", samt et tall for "akseptabel sannsynlighet for stråleskade", beregnes maksimalt tillatt dose pr. person (se ramme). ICRP beregner akseptabel sannsynlighet for stråleskade ut fra den normale dødsfrekvensen ellers i samfunnet, og benytter et nivå som generelt oppfattes som trygt.

I 1990 kom ICRP ut med nye reviderte forskrifter for strålevern og angir både maksimale dosegrenser og

Tabell 2. ICRP's nominale risikofaktorer for lave doser og/ eller for lave doserater (< 200 mGy og/eller < 100 mGy/t). Verdiene gjelder kun for lav-LET stråling.

	Dødlig kreft pr. Sv	Ikke-dødlig kreft pr. Sv	Genetiske endringer pr. Sv	Total risiko pr. Sv
Befolkningen (alle aldersgrupper)	$5{,}0 \cdot 10^{-2}$	$1{,}0 \cdot 10^{-2}$	$1{,}3 \cdot 10^{-2}$	$7{,}3 \cdot 10^{-2}$
Yrkesbefolkningen (18 - 65 år)	$4{,}0 \cdot 10^{-2}$	$0{,}8 \cdot 10^{-2}$	$0{,}8 \cdot 10^{-2}$	$5{,}6 \cdot 10^{-2}$

en rekke risikofaktorer forbundet med stråling (3). Som vist i Tabell 2, skilles det mellom befolkningen generelt og stråleutsatt personell. Risikofaktoren i den første gruppen er satt noe høyere da denne inkluderer barn, som i enkelte tilfeller synes å være mer strålefølsomme enn voksne. ICRP inkluderer også risiko for ikke-dødelig kreft, samt risiko for arvede defekter som følge av stråling.

Det skal bemerkes at genetiske endringer som følge av ioniserende stråling ikke noen gang er observert hos mennesker, verken etter små eller store stråledoser (1), ikke engang blant etterkommerne til de som overlevde bombingen av Hiroshima og Nagasaki. Risikofaktoren for arvelige defekter er altså ikke basert på data fra mennesker, men ICRP antar allikevel at det kan finnes en slik risiko ut fra teoretiske beregninger og dyreeksperimenter.

Ut fra risikofaktoren kan en også beregne forventet antall stråleskadde, forutsatt at en kjenner dosene gitt til en gruppe mennesker (se ramme). I slike beregninger benyttes ofte *kollektive doser* som er den algebraiske summen av individ-dosene. Påliteligheten i tallet for antall stråleskadde er helt og holdent avhengig av påliteligheten av risikofaktoren og av estimatene for den kollektive dosen. Doseestimatene vil normalt være relativt usikre. Først skal absorbert dose i de enkelte organ beregnes – og det er ikke nødvendigvis noen lett oppgave. Deretter benyttes relativt usikre vektfaktorer for å ta hensyn til strålетype, stråleenergi, og bestrålt organ. Og da har ikke individuelle forskjeller som kan påvirke effekten av bestrålingen, f.eks. helsetilstand og røykevaner, blitt tatt hensyn til. I tillegg kan bruk av kollektive doser gjøre doseberegningene totalt meningsløse.

Hvordan er det så med risikofaktoren, representerer den en biologisk virkelighet?

Epidemiologiske undersøkelser

Kunnskapen om virkningen av ioniserende stråling på mennesker er i hovedsak hentet fra epidemiologiske undersøkelser hvor en kun observerer, og ikke kontrollerer forsøksbetingelsene. Det skilles mellom to typer av epidemiologiske undersøkelser. I **case-control** studier søkes *årsaken* til en bestemt sykdom. I denne sammenhengen vil det si å bestemme hvorvidt stråling kan føre til kreft, og i så fall hvilke doser som er involvert. Istedenfor å søke etter årsaken til en skade, kan en se på *virkningen* av en ytre påkjenning, dvs stråledose. I slike undersøkelser - **cohort-studier** - følges helseutviklingen til en i utgangspunktet frisk gruppe som er blitt eksponert for mer eller mindre kjente doser ioniserende stråling. Disse undersøkelsene kan være svært tidkrevende da kreft kan ha en latenstid på mange ti-år. Et av de best kjente cohort-studiene er oppfølgingen av atombombeofrene som overlevde bombingen av Hiroshima og Nagasaki.

I begge type studier sammenliknes kreftforekomsten i studiegruppen med kreftforekomsten i en kontrollgruppe. Det kan imidlertid lett oppstå systematiske feil i sammenlikningen mellom eksponert gruppe og kontrollgruppe da det aldri vil være mulig å ha full kontroll over alle de individuelle forskjellene. Dette kan føre til at forskjellen i kreftforekomst mellom to grupper tilskrives stråling, mens den i virkeligheten skyldes andre forhold som f.eks. ulikt kosthold, eller ulike røykevaner. Da egnede kontrollgrupper kan være vanskelige å finne, benyttes ofte landsgjennomsnittet som sammenlikningsgrunnlag. I tillegg til eventuelle systematiske feil, er det ofte store usikkerheter på grunn av et begrenset statistisk materiale.

Tre av de største kategoriene av epidemiologiske undersøkelser på effekten av ioniserende stråling er oppfølgingen av de overlevende etter atombombene i Japan, studier av yrkeseksponerte arbeidstakere, samt studier av pasientgrupper som gjennom behandling eller diagnose er blitt utsatt for ioniserende stråling (1,2,5). Grovt sett kan resultatene fra disse undersøkelsene oppsummeres i tre punkter:

- Det observeres en signifikant økning i de fleste kreftformer ved doser over 1 Sv.
- Det observeres ingen signifikant økning av kreft ved doser under 200-500 mSv.
- Ingen genetiske endringer er observert – uansett doser.

Til tross for at det ikke observeres noen økning i kreftforekomsten når dosene er lavere enn noen hundre mSv, forutsetter ICRP at også lavere doser statistisk sett representerer en viss risiko for stråleskade. Data relatert til høye doser og høye doserater benyttes til å estimere risika ved lave doser og lave doserater.

Beregning av risikofaktorer

Studiet av overlevende etter bombingene av Hiroshima og Nagasaki er på mange måter unikt, og ICRP bygger det aller meste av sine risikoberegninger på nettopp disse dataene. I de fleste epidemiologiske undersøkelser er den utsatte gruppen svært begrenset både med hensyn på alder, kjønn, dose og bestrålt organ. I Japan-studiet derimot, er en stor gruppe bestående av begge kjønn og av alle aldre, blitt bestrålt med helkroppsdoser fra noen få mSv opp til flere Sv. I hovedsak dreier det seg om γ-stråling gitt ved høye doserater. Japan-dataene gir ingen informasjon om effekten av ioniserende stråling gitt ved lave doserater.

Gruppen av overlevende inkluderer nærmere 80000 individer, og kontrollgruppen består av folk fra samme området. Ut fra de enkeltes posisjon i forhold til eksplosjonssentret, både i avstand og i kroppsstilling, er de individuelle dosene beregnet for ca. 80% av gruppen. Det er imidlertid mange usikkerhetsmomenter knyttet til disse doseberegningene. De baserer seg bl.a. på at folk husker hvor, og i hvilken stilling, de sto flere år tidligere. Helsetilstanden til de bestrålte personene og til kontrollgruppen er blitt fulgt opp i over 40 år, og vil bli fulgt opp fram til alle er døde. En forhøyet kreftforekomst i den eksponerte gruppen antas å være forårsaket av strålingen fra atombombene og vil kunne gi et mål for risikoen for strålingsindusert kreft pr. doseenhet. Ettersom ca. 60% av de eksponerte fortsatt lever, vil det på grunn av lange latenstider trolig fortsette å dukke opp strålingsrelatert kreft i flere år framover. Av den grunn postuleres det *projeksjonsmodeller* for å anslå det totale antall kreft-døde i den eksponerte gruppen.

Fram til 1990 benyttet ICRP en *additiv projeksjonsmodell*. Da antok de at økningen i kreftforekomst som følge av bestråling ville holde seg konstant etter en latensperiode på 2 år for leukemi og 10 år for alle andre kreftformer. Nå antyder imidlertid Japan-dataene at økningen i enkelte kreftformer ikke holder seg konstant, men derimot øker med alderen til de eksponerte, dvs. med tiden fra eksponering. Denne tidsavhengigheten i kreftforekomst førte til at ICRP i 1990 gikk over til en *multiplikativ projeksjonsmodell* hvor dødssannsynlighetsraten for en gitt kreftform ikke bare er proporsjonal med dosen, men også avhenger av den normale kreftforekomsten i befolkningen. Også i denne modellen antas latensperioder på henholdsvis 2 og 10 år for leukemi og andre kreftformer. Hvilke risikoverdier som beregnes, avhenger av hvilken projeksjonsmodell som benyttes, samt av ulike ytre faktorer. Verdiene blir f.eks. forskjellige for kvinner og menn, og for ulike aldersgrupper.

Risikofaktorene beregnet for det japanske folk vil ikke nødvendigvis gjelde for andre folkegrupper ettersom den normale kreftforekomsten varierer fra land til land. Det er f.eks. langt mer magekreft og mye mindre brystkreft i Japan enn i de fleste vestlige land. Dersom målet var å beregne den biologisk korrekte risikoen for strålingsindusert kreft, måtte faktorer som bl.a. kjønn, alder, nasjonalitet, rase, helstilstand og røykevaner tas med i beregningen. For ICRP som skal lage praktiske retningslinjer og gjøre strålevernsarbeidet enklest mulig, er det viktigere med enkle matematiske modeller enn med en nøyaktig biologisk beskrivelse. De beregner derfor en universell risikofaktor. Risikofaktorene for hvert enkelt organ (ulike kreftformer) beregnes ved å midle over bl.a. kjønn, alder, land, og projeksjonsmodeller; og summen av disse midlere organrisikofaktorene gir den totale risikofaktoren.

På grunnlag av enkeltdoser omkring 1 Sv og høye doserater, er risikofaktoren for dødelig strålingsindusert kreft beregnet til 0.1 pr. Sv. De dosene og doseratene som normalt er aktuelle (også etter store uhell og prøvesprengninger) ligger imidlertid langt lavere (1,2,5). Dette leder fram til et av de mest kritiske/omstridte punktene i risikoberegningene: ekstrapolering fra høye doser og høye doserater til lave doser og lave doserater. I denne prosessen gjør ICRP flere omdiskuterte antagelser, hvorav den mest omstridte trolig gjelder formen på dose-responskurven i lavdoseområdet.

Dose-responskurver

Dose-responskurver illustrerer effekten av ioniserende stråling som funksjon av stråledose, som oftest som i Fig. 1, med økende negativ effekt langs y-aksen. En skiller mellom tre hovedtyper av dose-responskurver:

1) **Ikke-terskel**, hvor en antar at absolutt all stråling har en skadelig virkning.

2) **Terskel**, hvor en antar at doser under en gitt verdi ikke har noen effekt.

3) **Hormesis**, hvor en antar at små doser kan ha en positiv effekt.

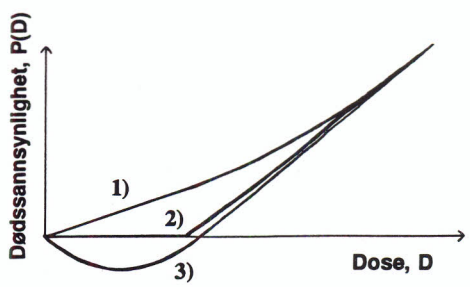


Fig.1. Dose-responskurver i lavdoseområdet: 1) Ikke-terskel, 2) Terskel, og 3) Hormesis.

De observerte dose-responskurvene har som oftest en form som i høydose-området tilnærmelsesvis kan beskrives ved enkle matematiske uttrykk, men det bør understrekes at det her er snakk om å tilnærme meget komplekse biologiske responsfunksjoner til enkle matematiske modeller. Noe av usikkerheten ved slike tilnærminger illustreres ved at Japan-dataene på leukemi og brystkreft med like stor sikkerhet kan tilpasses en lineær, en lineær-kvadratisk, eller en reint kvadratisk dose-responskurve. Og tilpasningen for doser under 4-5 Sv er like bra enten en multipliserer med et eksponential ledd eller ikke (4). Ved ekstrapolering ned til de lave dosene vil denne usikkerheten gjøre seg spesielt gjeldende slik at *valg av modell vil ha vel så stor betydning for de beregnede risikofaktorene som det materialet dataene bygger på har.*

Hvorvidt det er ikke-terskel modellen, terskel modellen, eller hormesis modellen som gir det mest korrekte bilde i lavdoseområdet er derfor, hvor brutalt den enn må høres ut, overlatt til fantasien.

Strålevernets primære oppgave er å beskytte mot potensielle skader. Følgelig velger ICRP en konservativ linje for ikke å underestimere risikoene. De antar at det ikke finnes noen terskel, og at all stråling, uansett hvor liten dosen er, representerer en viss fare.

Det meste av de data en har pr. i dag tyder på at skader i DNA er en av hovedmekanismene bak strålingsindusert kreft. Argumentasjonen for en ikke-terskel modell benytter det faktum at én ionisasjon kan være tilstrekkelig til å initialisere en skade i DNA, og at det derfor alltid vil være en viss risiko forbundet med ioniserende stråling.

Det er viktig å huske at *initialisering av en DNA-skade ikke er det samme som utvikling av kreft.* En lang rekke fysiske, kjemiske, og biologiske prosesser må finne sted for at den opprinnelige DNA-skaden skal resultere i utvikling av kreft. Årlig skjer det mer enn 10^{12} ionisasjoner i DNA i hvert enkelt menneske som følge av den naturlige bakgrunnstrålingen. Ettersom vi i det hele tatt er i live, er det helt klart at ytterst få av disse DNA-endringene fører til alvorlige biologiske skader. Menneskekroppen må derfor i løpet av millioner av år med kontinuerlig bakgrunnstråling ha 'lært seg' til å hanskes med et lavt og varierende strålingsmiljø, og har som kjent utviklet et uhyre effektivt reparasjonsapparat som på kort tid kan rette opp skader som er dannet ved ionisasjon.

ICRP forsvarer sitt valg av en ikke-terskel modell ut fra antagelsen om at reparasjonsmekanismene aldri vil kunne være 100% effektive, uansett hvor små stråledosene måtte være. For doser under 3-4 Sv beskriver de den totale dose-responskurven på en lineær-kvadratisk form: $P(D) = \alpha D + \beta D^2$. Det lineære leddet representerer sannsynligheten for en én-treff skade i DNA, f.eks. baseskade eller enkelt-trådbrudd. Det kvadratiske leddet representerer sannsynligheten for dobbelt-trådbrudd (som ICRP antar krever minst to ionisasjoner) og andre fler-treff skader. Den lineær-kvadratiske dose-responskurven er ifølge ICRP's antagelser reint lineær og uavhengig av doseraten i det laveste doseområdet. For høye doser vil responsen være lineær hvis doseraten er lav, og kvadratisk dersom doseraten er høy.

Bakgrunnen for å innføre dose- og doserate-avhengighet kommer av en rekke studier, i første rekke celle- og dyrestudier, som tyder på at effektiviteten av reparasjonsmekanismene avhenger av doseraten og at skadene pr. doseenhet reduseres når dosene blir mindre. Det er imidlertid store variasjoner i de observerte reduksjonsfaktorene. Ifølge Japan-dataene er strålingsrisikoen pr. doseenhet ved 200 mSv bare halvparten av den som observeres pr. doseenhet ved 1 Sv. Andre studier tyder på at effekten pr. doseenhet ved lave doser/doserater er mindre enn tiendeparten av den som observeres ved høye doser/doserater (1). UNSCEAR foreslår at en bør bruke en reduksjonsfaktor mellom 2 og 10. ICRP, som kjører en konsekvent "ikke-underestimer"-linje, holder seg til en faktor på 2. Denne reduksjonsfaktoren benyttes kun for lav-LET stråling. For høy-LET stråling antas det at effekten pr. doseenhet er den samme uansett dose og doserate. ICRP angir følgelig risikoverdiene for dødelig kreft ved lave doser (<200 mSv) og lav-LET stråling til halvparten av risikoverdien beregnet på grunnlag av høye doser og høye doserater, dvs. til 0.05 pr. Sv for befolkningen generelt.

Kollektiv dose – et misvisende begrep?

Den kollektive dosen for en gruppe mennesker er, som tidligere nevnt, definert som summen av de individuelle dosene. Dette dosebegrepet benyttes ofte til å beregne skadeomfanget av en liten dose gitt til et stort antall mennesker. Det vil si at 1 million enkelt-doser på 1 mSv i risikoberegninger antas å ha samme konsekvens som 1000 doser på 1 Sv. For at begrepet kollektiv dose skal ha biologisk mening, må ICRP's antakelse om at dose-responskurven er lineær uten terskel i lavdoseområdet være korrekt.

Dersom reparasjonsapparatet i virkeligheten er 100% effektivt for "naturlige" dosestørrelser og doserater, vil den korrekte formen på dose-responskurven i lavdoseområdet ha en terskelverdi. Det vil si at doser lavere enn terskelverdien vil være helt uten effekt og

risikofaktoren vil følgelig være lik null. I et slikt tilfelle vil bruken av kollektiv dose til beregning av eventuelle skader gi et helt galt bilde av virkeligheten.

Hormesis, eller hormetisk effekt, er et begrep som brukes om faktorer som i store mengder har en giftig effekt, men som i små mengder viser en positiv effekt. Kjente eksempler er vitaminer, en rekke sporstoffer og UV-stråler fra sollyset. Små doser UV-stråler gir oss nødvendige mengder av D-vitamin, mens for mye sol vil kunne gi hudkreft.

Da amerikanerne slapp atombombene over Hiroshima og Nagasaki, ble verden med ett gjort oppmerksom på den voldsomme negative effekten høye stråledoser kan ha på biologisk materiale. Men, det må ikke glemmes at små stråledoser er, og alltid har vært, en naturlig del av vårt miljø. Det er ikke usannsynlig at både mennesker og dyr i løpet av millioner av års utvikling har lært seg til å utnytte, kanskje til og med blitt avhengig av, små mengder ioniserende stråling. Dersom menneskekroppen på en positiv måte utnytter små stråledoser, blir igjen bruken av kollektiv dose totalt meningsløs ettersom summen av mange små positive doser vil bli sammenliknet med en stor - utvilsomt farlig - stråledose.

Undersøkelser ved lave doser

Til tross for at ICRP bygger sine risikoberegninger for lave doser på data fra høye doser og høye doserater, finnes det en lang rekke epidemiologiske undersøkelser av lavdosebestråling (1,2,5,6). Variasjonene i resultatene er store og antyder både lineære dose-responskurver uten terskel, dose-responskurver med terskel, og hormetisk effekt. Alle disse lavdosestudiene er imidlertid belastet med store usikkerheter på grunn av for lite statistisk materiale. For å observere små effekter, må antall personer i epidemiologiske undersøkelser være meget høyt for at endringer utover den normale variasjonen skal kunne sies å være signifikante. På grunn av disse usikkerhetene har de enkelte epidemiologiske undersøkelsene for lave doser relativt begrenset verdi, men sammen kan de være viktige, ikke minst når det gjelder å antyde øvre risikogrenser. Uvisst av hvilken grunn, har både ICRP og UNSCEAR i sine risikoberegninger foreløpig valgt å utelate den lange rekken av undersøkelser som ikke samsvarer med den lineære ikke-terskel modellen som ICRP benytter. Det bør imidlertid bemerkes at UNSCEAR ikke vil uttale seg om biologiske effekter av doser lavere enn 200 mSv ettersom det ikke foreligger signifikante data for effekten (positiv, ingen, eller negativ) av doser under 200 mSv.

Resultatene fra undersøkelsen av atombombeofrene i Japan gir på ingen måte noe entydig bilde av effekten av ioniserende stråling. Risikofaktorene som ICRP har beregnet bygger på gruppen av mennesker som mottok doser omkring 1 Sv. I denne gruppen observeres en økning i kreftforekomst i forhold til den ubestrålte delen av befolkningen. I gruppen av mennesker som ble eksponert for doser mellom 5 og 50 mSv, observeres det imidlertid mindre kreft enn det gjøres blant de ubestrålte (7,8). Det bør også nevnes at bombeofrene i gjennomsnitt lever lenger enn resten av befolkningen i Japan, til tross for en høyere kreftfrekvens i deler av den bestrålte gruppen. Det er innlysende at det kan finnes mange forklaringer på en forlenget levetid som ikke har noe med stråling å gjøre, f.eks. kontinuerlig oppfølging av helsetilstand. Det er likevel ikke grunnlag for å avvise muligheten for at små stråledoser kan være effektløse, eller eventuelt ha en positiv effekt.

Som nevnt innledningsvis, finnes det store geografiske variasjoner i bakgrunnstrålingen som følge av varierende radoninnhold i bakken. Fra studier av arbeidere i gruver med svært høyt radoninnhold, synes det å være en klar sammenheng mellom store radon-doser og økt risiko for lungekreft. Når det gjelder lavere doser derimot, observeres det ingen klar sammenheng (1,2,5).

En manglende økning i kreftforekomst i områder med høy bakgrunnstråling observeres i en rekke land, også i de skandinaviske hvor bakgrunnstrålingen (på grunn av mye radon) ligger på verdenstoppen. Slike resultater er i klar motsetning til ICRP's ikke-terskel modell, og bringer fram muligheten for at dose-responskurven har en terskel, eller at det kan være en hormetisk effekt av ioniserende stråling.

I en relativt fersk undersøkelse fra Frankrike (9), ble lungekrefttilfellene i to franske områder forsøkt korrelert med radonkonsentrasjonen i de to områdene. Befolkningene var på henholdsvis 750 000 og 1.5 millioner, og det totale dosenivået pr. år ble målt til å være mellom 30 og 75 mSv høyere i den første gruppen. Ifølge ICRP's risikofaktorer, skulle en forskjell på 30 mSv tilsi ca. 640 flere krefttilfeller i gruppen med høyest bakgrunnsstråling. Resultatene viste det stikk motsatte: Lungekreftforekomsten var minst i området med høyest bakgrunnstråling.

En tilsvarende reduksjon i den generelle kreftforekomsten med økende bakgrunnstråling er observert i en rekke andre land (1,2,5). En undersøkelse i USA omfatter 411 kommuner med spesielt høy radonbakgrunn og med inntil 1/2 million mennesker i hver kommune. Kreftforekomsten ble sammenholdt med innendørs radonmengder, og igjen ble det observert minst

kreft der radonmengden var høyest. Forskerne mente også å registrerte en reduksjon i kreftforekomst ved økende bakgrunnsstråling.

Strålingsrisikoen forbundet med kjernekraft er et meget følelsesladet tema, og det finnes da også flere undersøkelser som antyder en økning i kreftfrekvens i nærheten av enkelte kraftverk (1,2). Hvorvidt dette skyldes stråling, er imidlertid ikke klarlagt ettersom tilsvarende økning i kreftforekomst også er blitt observert nær kjernekraftverk som enda ikke er i drift, og som derfor ikke har noen strålingskilde.

En rekke studier av kjernekraftarbeidere som i løpet av en del år har mottatt ekstradoser fra 1 til 500 mSv gjennom sitt arbeid, viser at dødeligheten har vært enten lik eller lavere enn landsgjennomsnittet. Dette behøver ikke bety at stråledosene har hatt en livsforlengende virkning, men antyder at eventuelle negative effekter knyttet til disse dosene er så små at de ikke kan observeres.

Ungarn er et foregangsland når det gjelder fødselsregistre. I en relativt fersk rapport vises en oversikt over en lang rekke fødselsdefekter for periodene før og etter ulykken i Tsjernobyl (10). Tabell 3 viser antall barn født med Down's syndrom (mongoloide), samt samlet forekomst av 15 andre fødselsdefekter.

Tabell 3. Fødselsdefekter hos ungarske barn i perioder før og etter Tsjernobyl-ulykken (1980-1985 og 1986-1988).

	1980-1985 (807 939 barn)		1986-1988 (252 222 barn)	
	Antall tilfeller	Tilfeller pr. 10^4	Antall tilfeller	Tilfeller pr. 10^4
Down's syndom	682	**8,44**	177	**7,02**
15 ulike fødselsdefekter.	246	**3,04**	76	**3,01**

Det antydes en svak nedgang i frekvensen av de 15 medfødte defektene. Det observeres imidlertid en sterk nedgang i antall barn født med Down's syndrom etter Tsjernobyl ulykken, idet antallet pr. 10 000 fødte er redusert med 17%! Slike tall når sjelden fram i massemediene. Hadde imidlertid observasjonene vist en økning på 17%, er det dessverre liten tvil om hvordan massemediene ville reagert.

En innarbeidet overbevisning om at all ioniserende stråling er farlig gjenspeiles ikke bare i massemediene, men også i forskningen. En manglende negativ effekt blir som regel forklart ved for lite statistisk materiale, eller ved at det skyldes en uforklarlig feil; og slike data blir ofte fjernet fra det totale datamaterialet. Selv i de tilfellene hvor det aktuelle datamaterialet faktisk tyder på positiv effekt, er det sjelden at dette nevnes.

På grunn av usikkerhetene knyttet til epidemiologiske undersøkelser, er mye av kunnskapen om effekten av ioniserende stråling hentet fra eksperiment med dyr og cellekulturer hvor forsøksbetingelsene er langt mer kontrollerbare. På samme måte som de epidemiologiske undersøkelsene, antyder også dyre- og celleforsøkene at formen på dose-responskurven vil variere med en rekke faktorer, og det observeres mange tilfeller av null-effekt eller positiv-effekt (hormesis) ved lave doser (5,11).

Til tross for ulike konklusjoner, har alle lavdoseundersøkelsene et felles budskap: Det finnes ingen universal dose-responskurve, og når dosene krabber ned under noen hundre mSv, er effekten så liten at den ikke med sikkerhet kan observeres. Dette gjelder enten stråledosen representerer noe negativt, om den er ufarlig, eller om den skulle ha en helsebringende effekt.

For å være på den sikre siden, har strålevernet postulert at små doser kan være farlige, og at de statistisk sett kan resultere i strålingsinduserte skader. Det er ingen grunn til å kritisere strålevernet for å overestimere risikoen forbundet med lave stråledoser så lenge dette ikke går ut over de totale samfunnskostnadene. Det er imidlertid viktig å huske at de risikofaktorene som brukes kun er et redskap for å lette strålevernets arbeid med planlagt bruk av stråling. De har aldri vært ment brukt til å forutsi reell risiko og antall stråleskadde i en befolkning (3). Allikevel er det disse verdiene som er grunnlaget for at aviser og enkelte "forskere" med jamne mellomrom går ut med tallfestede dødsprognoser i forbindelse med lave doser ioniserende stråling, ikke minst slik vi så det etter Tsjernobyl ulykken (12). Et hederlig forsøk på estimere virkelige riska vil måtte ta hensyn til det faktum at det alltid er en inhomogen gruppe mennesker som eksponeres. Effekten av strålingen vil derfor ikke bare avhenge av dose, doserate, stråletype og bestrålt organ, men vil også avhenge av en rekke andre faktorer. Disse omfatter bl.a. kjønn, alder ved eksponering, tid etter eksponering, etnisk gruppe, nasjonalitet, livsstil, boforhold, kosthold, allmenn helsetilstand, genetiske forskjeller, og ikke minst røykevaner. Og selv om det skulle være mulig å ta hensyn til alle disse faktorene, kommer en ikke utenom antagelsen om at dose-responskurven er lineær-kvadratisk uten terskel. Det understrekes at dette er en antagelse som ikke har fundament i vitenskapelige data.

Troen på at effekten av lave doser er kjent, har ført til en manglende dømmekraft (12), ikke minst ved sammenlikning med andre risika i samfunnet. Det burde være nok å nevne at omlag tredjeparten av alle krefttilfeller i Europa og Nord-Amerika antas å være relatert

til carcinogener som finnes i sigarettrøyk, og at aktiv og passiv røyking årlig krever mange tusen menneskeliv bare i Norge.

Tsjernobyl-ulykken

Tsjernobyl-ulykken i april 1986 førte for alvor begrepet stråling inn i de norske hjem. Og til tross for (eller på grunn av?) en enorm mediedekning resulterte ulykken i mye feilinformasjon, frykt og uro omkring konsekvensene av lave doser ioniserende stråling.

Tabell 1 viser det naturlige strålemiljøet i Norge, samt bidraget som skyldes nedfallet fra Tsjernobyl. I Norge har den årlige bakgrunnstrålingen en middelverdi på omlag 5 mSv, men i enkelte områder med høy radonkonsentrasjon kommer den opp i over 200 mSv pr. år. Det er altså en naturlig variasjon i bakgrunnstrålingsdosen på flere tusen prosent. Strålevernsmyndighetene beregnet at folk i Norge i ca. 50 år framover vil motta et tillegg til denne bakgrunnstrålingen p.g.a. Tsjernobyl, på 0.04 mSv pr. år i middel, altså en økning i den midlere bakgrunnstrålingen på langt under 1% (12). For de mest utsatte befolkningsgruppene, spesielt samer, ble tillegget beregnet til inntil 2 mSv pr. år.

Oppslagene i enkelte aviser om at 400 nordmenn vil dø i en periode på 50 år på grunn av radioaktivt nedfall fra Tsjernobyl, kommer fra en triviell beregning:

$$(\textit{Kollektiv dose/år}) \cdot (\textit{år}) \cdot (\textit{risikofaktor}) = (\textit{antall døde})$$

som gir

$$(0.04\ \textit{mSv/år} \cdot 4 \cdot 10^{6}\ \textit{nordmenn}) \cdot (50\ \textit{år}) \cdot (5 \cdot 10^{-2}\ \textit{døde/Sv}) = 400\ \textit{døde i løpet av}\ 50\ \textit{år}.$$

Disse beregningene er imidlertid grovt misbruk av ICRP's risikofaktorer beregnet for planlagt bruk av stråling (12). Da det ikke er vist noen signifikant negativ effekt av doser under 200 mSv, er det å forutsi antall døde ut fra små individdoser (0.04 - 2 mSv) både meningsløst og etisk forkastelig. Det tjener kun til å spre en ubegrunnet frykt i befolkningen.

Myndighetenes kostbare satsing for å redusere et ekstrabidrag på langt under 1% av den naturlige variasjonen i bakgrunnstrålingen må skyldes troen på at doser langt lavere enn den naturlige bakgrunnstrålingen er farlige selv om negative effekter ikke kan observeres. Det bør vurderes om slike økonomiske virkemidler heller bør skyves i retning av tiltak med påviselige effekter.

Referanser

1. *Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation.* United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly. United Nations Publications, New York (1988)

2. *Sources and Effects of Ionizing Radiation.* United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with annexes. United Nations Publications, New York (1982)

3. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* ICRP publication 60. Pergamon Press, Oxford (1991)

4. C.E. Land: *Estimating cancer risks from low doses of ionizing radiation.* Science, **Vol. 209,** 1197-1203 (1980)

5. *Radiation Hormesis.* Special issue of Health Physics, **Vol. 52, Nr. 5** (1987)

6. T.D. Luckey: *Physiological benefits from low levels of ionizing radiation.* Health Physics, **Vol. 43, No. 6,** 771-789 (1982)

7. Y. Shimizu, H. Kato, and W.J. Schull: *Life Span Study report 11, part II: cancer mortality in the years 1950-1985 based on the recently revised dose. (DS 86).* RERF TR/5-88 (1988)

8. H. Kato, W.J. Schull, A. Awa, M. Akiyama, and M. Otake: *Dose-response analyses among atomic bomb survivors exposed to low-lewel radiation.* Health Physics, **Vol. 52, Nr. 5,** 645-652 (1987).

9. M. Dousset: *Lung cancer deaths in two French regions with very different mean Radon-222 concentration in dwellings.* Health Physics (1990).

10. A. Czeizel: *Hungarian survaillance of germinal mutations. Lack of detectable increase in indicator conditions caused by germinal mutations following the Tsjernobyl accident.* Hum. Genet. **Vol. 82,** 359-366 (1989)

11. H.F. Henry: *Is all nuclear radiation harmful?* Health Physics, **Vol. 43, No. 6,** 767-769 (1982).

12. *Helsemessige konsekvenser av Tsjernobyl-ulykken.* Rapport fra Statens institutt for strålehygiene, oktober (1991)

∞

Nobelprisen i fysikk 1992

Nobelprisen i fysikk for 1992 ble gitt til Georges Charpak, Frankrike, for hans oppfinnelser og utvikling av detektorer for høgenergifysikk. Charpak har arbeidet ved CERN siden 1959, og der oppfant han Multitråd proporsjonalitetskammeret. Dette pionerarbeidet ble publisert i 1968[1]. Multitråd proporsjonalitetskammeret har også anvendelser utenfor høgenergifysikk, men er lite kjent utenfor.

Bakgrunn

For å forstå betydningen av Charpaks arbeider, er det nyttig å se på utviklingen av eksperimentell partikkelfysikk i tiden etter at 30-GeV protonsynkrotronene i Brookhaven og CERN ble startet ved overgangen til 1960-årene.

Boblekammeret var en uunværlig detektor i høgenergifysikk de første 10–15 årene, og fremskaffet et vell av ny informasjon. En nesten industriell aktivitet vokste fram ved CERN og ved universitetene i Europa med registrering og utmåling av bilder av reaksjoner mellom partikler i strålen inn på boblekammeret og nukleonene i kammeret. Det ble behov for store regnemaskiner til behandling av data, men det meste av arbeidet med utmålingene av reaksjonene på bildene ble foretatt av unge kvinner i mørkerom. Mannlige fysikere strømmet til eksperimentell partikkelfysikk.

Teknikken nådde i begynnelsen av 70-tallet sin begrensning. Det skyldtes kammerets lave repetisjonshastighet (ett bilde pr. sekund), at intensiteten på strålen måtte være lav (ti-talls partikler), og utvelgelsen av reaksjonene på bildene var en omstendelig prosess. Med noen hundre tusen bilder måltes tverrsnitt i mikrobarn-området.

På slutten av 60-tallet begynte elektronisk registrering av partikkelreaksjoner å konkurrere med boblekammer-teknikken. Med hurtige scintillatorer og elektronikk kunne intensiteten på partikkelstrålen økes (10^6 partikler/s) og utvalgte reaksjoner kunne selekteres i sann tid. Spesielle tverrsnitt kunne måles ned til nanobarn – en forbedring på en faktor tusen i forhold til boblekammerteknikken.

Den eksperimentelle oppstillingen kunne bestå av en strålelinje inn på et mål av hydrogen. Partikler i strålen som rammet protonene i målet, produserte nye partikler som passerte en spektrometermagnet og en serie av gassfylte trådkamre (gnistkamre) til elektronisk registrering av sekundærpartiklenes baner.

Partikler som passerer kamrene ioniserer gassen, og de frie ladningene fører til en gnistutladning på den nærmeste anodetråden. Ladningen fra gnisten genererer en strømpuls på flere hundre mA. Et stort problem med gnistkamrene er at høgspenningspulsen og den påfølgende gnistutladningen genererer mye støy pga. pulsert høgspenning over elektrodeplanene. På begynnelsen av 70-tallet var gnistkammerteknikken blitt "uttømt" og begrenset progresjonen innen partikkelfysikken.

Multitråd proporsjonalitetskamrene opererer med en likespenning over katode–anodeplanet på ca. 100 V (Fig. 2a). Ved passasje av en ioniserende partikkel, observeres en liten negativ spenningspuls, ca. 0,5 mV, på den nærmeste anodetråden. Spenningen over elektrodene opprettholdes, og kammeret forblir følsomt så ingen dødtid oppstår i detektoren.

I et eksperiment jeg deltok i ved CERNs Super Proton Synkrotron fra 1976 til 1980, ble banene til sekundærpartiklene utelukkende beregnet på grunnlag av informasjon fra multitråd proporsjonalitetskamre. De største kamrene dekket en flate på ca. 4 m^2. Sjeldne reaksjoner med tverrsnitt ned til picobarn ble målt – en faktor 1000 bedre enn med tidligere teknikker. Dette hadde ikke vært mulig uten multitråd proporsjonalitetskamre.

Oppfinnelsen og den videre utvikling

Figur 1 illustrerer prosessene i en gassfylt teller for forskjellige spenninger over anoden og katoden når en ioniserende partikkel passerer. Ved de laveste spenningene er effektiviteten lav fordi de frigjorte ladning-

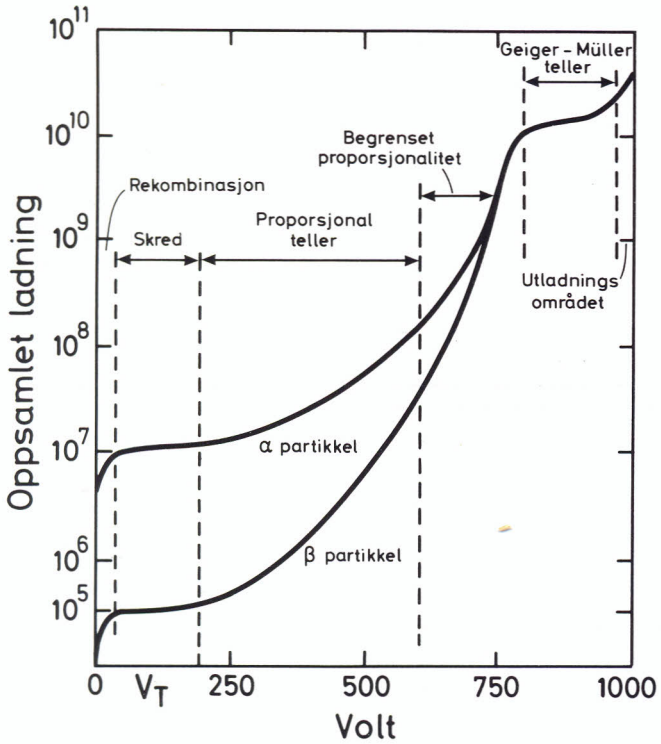


Fig.1. Prosessene i en proporsjonalitetsteller for forskjellige spenninger mellom anoden og katoden.

ene blir innfanget og nøytralisert før de når elektrodene. Etter hvert som spenningen økes, når telleren proporsjonalitetsområdet hvor den frigjorte ladningen er proporsjonal med kvadratet av ladningen til den ioniserende partikkelen. Økes spenningen ytterligere, nåes geiger-området og gnist-området.

Charpaks oppfinnelse er en ukonvensjonell sammenstilling av proporsjonalitetstellere. Anoden er et plan av tråder med avstander fra 0,5 til 2 mm, avhengig av flatestørrelsen som kammeret dekker. Et katodeplan er lagt på hver side av anodeplanet i en avstand på ca. 0,5 cm. (Fig. 2a).

Kammeret er fylt med 80% edelgass, oftest argon, og to polyatomiske gasser. Over katodene og anoden legges et felt på ca. 100 V. I denne sammenstillingen vil hver anodetråd oppføre seg som en proporsjonalitetsteller. Hver anodetråd har en forsterker i utlesningskjeden. Figur 2b viser det elektrostatiske feltet i kammeret ved 100 V mellom anoden og katodene.

Feltet kan oppdeles i 3 områder. A-området er driftfeltet hvor de frigjorte elektronene etter passasjen av den ionisernde partikkelen drives imot anodetråden. Mellom anodetrådene, C, er feltet svakere. I nærheten av anodetrådene, B, øker feltstyrken og blir konsentrisk om anodetrådene. Den maksimale feltstyrken inne ved tråden er ca. 10^5 V/cm.

Elektronene som driver i området A mot anoden,

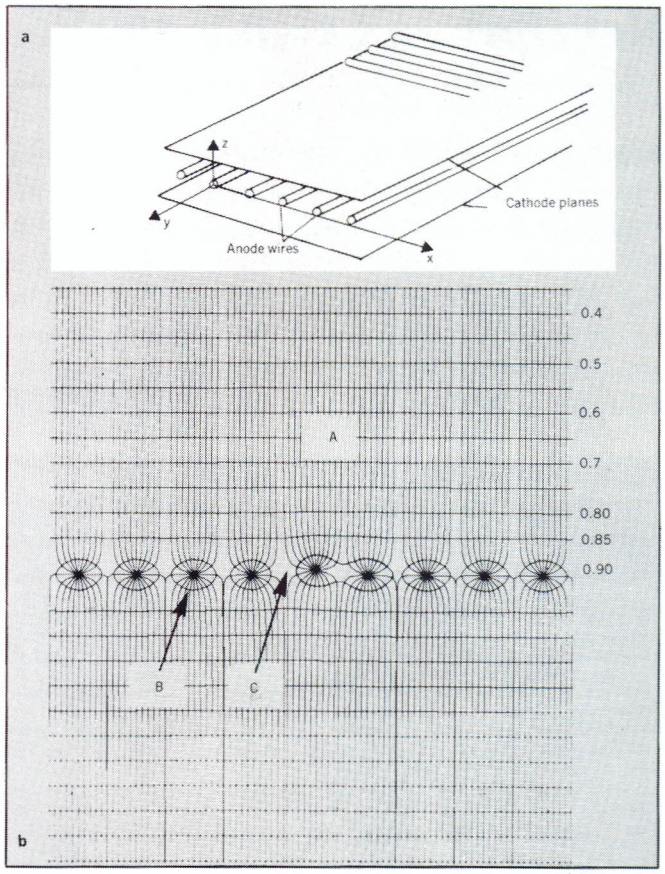


Fig.2. Skisse av et multitråd proporsjonalitetskammer.
a) Katodeplan og anodetråder.
b) Elektriske feltlinjer i planet loddrett på anodetrådene.

har en kinetisk energi på noen tidels elektronvolt. Når elektronene er ca. 50 til 100 μm fra anodetråden, akselereres de og oppnår høge nok energier til å lage en kjedereaksjon, og det oppstår dermed en skurutvikling. Det er denne forsterkningen, 10^5 til 10^6 ganger, som gjør det mulig å registrere de frie ladningene som ligger igjen etter at en ladet partikkel har passert.

Multiplikasjonsprosessen skjer innen en avstand på en tråddiameter og er over i løpet av 1 ns. Spenningspulsen fra elektronene er for svak til å kunne benyttes. Mobiliteten til ionene er mye lavere enn elektronenes. Ettersom ionene driver vekk fra anoden, induserer de et negativt signal på anoden, og positive signaler på katoden og de andre anodetrådene. De positive signalene på anodetrådene kompenseres av den kapasitive koplingen til signaltråden.

Deles katodeplanet opp i striper med retninger vinkelrett på anodetrådene, vil de negative signalene på anodetrådene sammen med de positive signalene på katodestripene gi en todimensjonal posisjon for hvor partikkelen passerte. En presisjon på ca. 50 μm kan oppnås i katodeplanet ved å ta et veid middel av pulshøydene. De eksiterte og ioniserte atomene som ligger igjen i sporet etter partikkelen, faller tilbake

til grunntilstanden ved strålingsprosesser. Argon er forholdsvis 'gjennomsiktig' for denne strålingen, og fotonene kan skape ionisasjonssentre i gassen langt unna den aktuelle anodetråden, eller de kan slå ut elektroner fra elektrodene som starter nye kaskader ved anoden. Dette ville ødelegge posisjonsbestemmelsen. For å unngå dette, tilsettes sterkt bundne polyatomiske gasser og elektronegative gasser som absorberer fotonene og elektronene ved rotasjons- og vibrasjons-eksitasjoner. Den absorberte energien avsettes ved elastiske kollisjoner eller ved dissosiasjoner.

I Charpaks publikasjon fra 1968, diskuterer han muligheten av å måle drifttiden av elektronene, dvs. tidsdifferensen mellom passeringen av den ioniserende partikkelen og observasjonen av pulsen på en anodetråd. En gassblanding av argon og metan gir høg mobilitet for elektroner med kinetisk energi på ca. 1/3 eV. Dette forklares som et kvantemekanisk interferensfenomen (Ramsauer–Townsend effekten). I et elektrostatisk felt vil elektronene drive med en konstant hastighet på flere cm/s. Ved å måle drifttiden, kan en romoppløsning på 100 μm og bedre, oppnås over avstander på flere meter.

De store eksperimentene ved LEP (Large Electron Positron) akselleratoren ved CERN, benytter i stor utstrekning detektorer som er konstruert etter prinsipper som bygger på Charpaks oppfinnelser. Grupper fra universitetene i Bergen og Oslo har siden 1989 deltatt i ett av disse prosjektene, DELPHI.

Detektorene er konstruert rundt kollisjonsområdet for elektronene og positronene som sirkulerer i hver sin retning i akseleratorringen. En av detektorene, som fyller noe over 10 m^3, er et tidsprojeksjonskammer, TPC. Figur 3 viser prinsippet. Kammeret er delt i to

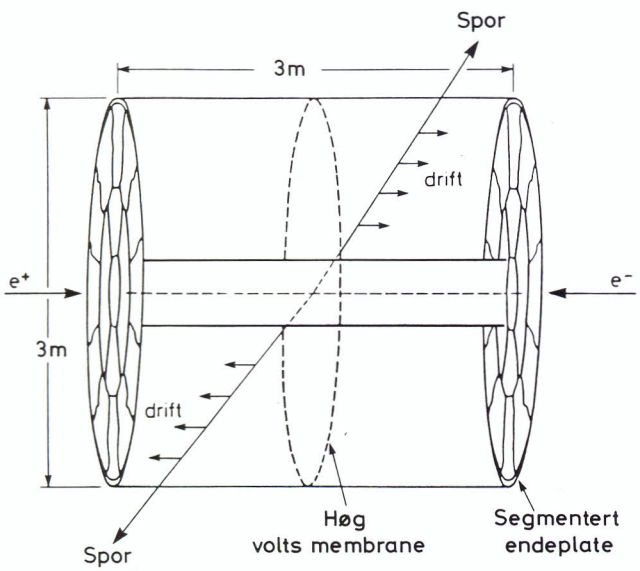


Fig.3. Prinsippskisse av et 10 m^3 tidsprojeksjonskammer.

med et høgvolts katodeplan. Anodeplanene befinner seg i hver ende i en avstand av 150 cm fra katodeplanet. Driftfeltet er ca. 150 V/cm. Aksialt ligger et homogent magnetfelt på 1,2 Tesla. Anodeplanene er delt opp i multitråd proporsjonalitetskammer med anodetrådplan og segmentert katode. De frie elektronene etter en ioniserende partikkel driver i det elektrostatiske feltet mot et av anodeplanene. Ved å måle drifttiden og to dimensjoner i anodeplanet, fåes en tredimensjonal informasjon om partikkelbanen. På grunn av magnetfeltet, er banen en heliks hvor radien gir partikkelens impuls.

I partikkelfysikken er det viktig å få identifisert partiklene som produseres i vekselvirkningen mellom primærpartiklene. I DELPHI gjøres dette bl.a. ved å måle pulshøyden på signalene fra anodetrådene i TPC-detektoren. Imupulsmålingen og ionisasjonsmålingene gir informasjon om partiklenes identitet.

Kommentarer

Med Charpaks oppfinnelser og utviklingen som fulgte, gjorde elektronisk detektering av elementærpartiklene for alvor sitt inntog og økte hastigheten på observasjonene med en faktor 1000 sammenlignet med tidligere metoder. Detektorene ble direkte forbundet med regnemaskiner. Med reaksjonshastigheter i MHz-området, ble det også mulig å inkludere informasjon om de produserte partiklenes baner i eksperimentets elektroniske logikk for å redusere bakgrunnen til eventuelle signaler. Charpaks oppfinnelser føyer seg inn i rekken av viktige instrument- og detektoroppfinnelser og utviklingen av teknikker.

Oppfinnelsen av tåkekammeret ga C.T.R. Wilson Nobelprisen i 1927. Oppdagelsen av den første antipartikkelen, positronet, ble gjort av C.D. Anderson i et tåkekammer. Andersen fikk Nobelprisen i 1936 for oppdagelsen. Nobelprisen i 1948 ble gitt til P.M.S. Blackett for utviklingen av tåkekammerteknikken for å studere atomkjerner og kosmisk stråling. C.F. Powell ble tildelt Nobelprisen i 1950 for utviklingen av emulsjonsteknikken og oppdagelsen av pimesonet. I 1960 ble Nobelprisen gitt til D.A. Glaser for oppfinnelsen av boblekammeret, og L.W. Alvarez fikk Nobelprisen i 1968 for utviklingen av boblekammerteknikken og oppdagelser innen partikkelfysikken med denne teknikken.

Multitråd proporsjonalitetskamre ble benyttet i oppdagelsen av charm-kvarken som B. Richter og S.C.C. Ting ble tildelt Nobelprisen for i 1976. I eksperimentet hvor det intermediære vektor-bosonet ble oppdaget i 1983 ved CERN, ble proporsjonalitetsdetektorer benyttet. Oppdagelsen ga C. Rubbia og S. Van der Meer Nobelprisen i 1984.

Men Charpaks oppfinnelser er ikke bare blitt utnyttet innen kjernefysikk og elementærpartikkelfysikk. Han har også utviklet teknikken for anvendelser innen biologi til avbildning av kompliserte molekyler, og multitråd proporsjonalitetskammer er benyttet til medisinske røntgenundersøkelser. Med proporsjonalitetskammer kan stråledosen reduseres betydelig fordi kamrene er mer følsomme enn fotografisk film.

Før introduksjonen av multitråd proporsjonalitetskammeret i 1968, arbeidet Charpak i mange år med gnistkammeroppfinnelser til erstatning av den langsomme boblekammerteknikken. Det var etter en grundig forståelse av prosessene ved gnistdannelsen at idéene med multitråd proporsjonalitetskammeret ble til.

Charpak ble født i Polen i 1924, men fikk sin utdannelse i Frankrike. Under siste verdenskrig deltok han i den franske motstandsbevegelsen og ble tildelt det franske krigskorset for sin innsats. Huskes vil Charpak også for sitt engasjement for Yuri Orlov, en russisk akselerator-fysiker som ble fengslet for sitt menneskerettighets-engasjement. Han ble satt fri i 1986.

Referanse

1. G. Charpak et al.: Nuclear Instruments and Methods **62**, 262 (1968)

Torleiv Buran

∞

Tvillingparadokset

Relativitetsteori interesserer mange. Her er to kommentarer til Øyvind Grøns artikkel i nr. 4, 1992, om Relativistisk tid, med Grøns svar.

Tvillingparadokset – supplementum

Øyvind Grøns artikkel om "Relativistisk tid" i Fra Fysikkens Verden nr. 4, 1992, synes å gi inntrykk av at det er nødvendig å trekke inn den generelle relativitetsteorien for å oppklare det såkalte "Tvillingparadokset". Det er ikke tilfelle. For ordens skyld skal vises at den spesielle relativitetsteorien er tilstrekkelig.

Problemet ble i artikkelen belyst med følgende eksempel: En tvilling holder seg i ro på jorden, mens den andre reiser med hastighet $v = 0,8c$ til Alfa Centauri, som er 4 lysår borte, og tilbake igjen. Ved tilbakekomsten er "hjemme-tvillingen" blitt 10 år eldre, og "reise-tvillingen" bare 6 år eldre. Det er bare hjemme-tvillingen som under hele reisen kan tenkes å være i ro i ett og samme inertialsystem. Paradokset oppstår som kjent hvis vi feilaktig tror at vi har en symmetrisk problemstilling, dvs. at vi like gjerne kunne si at astronauten var i ro, og at den sedate hjemme-tvillingen isteden beveger seg med de gitte relativhastigheter.

Ettersom reise-tvillingen i alle fall ikke vil overleve de akselerasjoner som er nødvendige for å oppnå reisehastigheten i talleksemplet, kan vi i tankeeksperimentet like gjerne gå drastisk til verks og forutsette at reise-tvillingen ved avreisen hopper ombord i et romskip som allerede har hastigheten $v = 0,8c$. Vel fremme ved Alfa Centauri skifter han inertialsystem ved dristig å hoppe over i et annet romskip med like stor, men motsatt rettet hastighet. Han registrerer på sin klokke en total reisetid T_0, summen av to like store egentidintervaller $T_0/2$ ved fremreise og tilbakereise.

Ifølge den spesielle relativitetsteorien vil hjemme-tvillingen på sin klokke registrere reisetiden:

$$T = \gamma\,(T_0/2 + T_0/2) = \gamma\; T_0$$

hvor γ i talleksemplet med reisehastighet $v = 0,8c$, blir:

$$\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2} = 1/\;0,6$$

Det forutsettes at tvillingene har samme hjerteslagsfrekvens ν i sitt eget inertialsystem, dvs. når de tar pulsen på seg selv. For hvert hjerteslag sender de ut en lyspuls som kan registreres av den andre.

Antall egne hjerteslag i reisetiden, registrert av henholdsvis hjemme- og reise-tvillingen, blir:

$$N_h = \nu\; T$$

$$N_r = \nu\; T_0 = N_h/\gamma = 0,6\; N_h$$

Lyspulsene som de mottar fra hverandre vil ha forskjellige Doppler-forskjøvne hjerteslagsfrekvenser ved utreise og tilbakereise:

$$\nu_1' = \nu\,\sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}}$$

$$\nu_2' = \nu\,\sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}}$$

som av hjemme-tvillingen mottas i to ulike store tidsintervaller:

$$\Delta T_1 = \frac{T}{2}\left(1+\frac{v}{c}\right)$$

$$\Delta T_2 = T - \Delta T_1 = \frac{T}{2}\left(1-\frac{v}{c}\right)$$

og av reise-tvillingen i to like store tidsintervaller $T_0/2$.

Totalt antall hjerteslag som hjemme-tvillingen vil registrere for reise-tvillingen blir derfor:

$$\nu_1' \, \Delta T_1 + \nu_2' \, \Delta T_2 = \nu \, T_0 = N_r$$

altså i overensstemmelse med reise-tvillingens egen registrering.

Reise-tvillingens registrering av hjemme-tvillingens hjerteslag blir tilsvarende:

$$\nu_1' \, \frac{T_0}{2} + \nu_2' \, \frac{T_0}{2} = \frac{T}{2\gamma}\,(\nu_1' + \nu_2') = \nu \, T = N_h$$

som overensstemmer med hjemme-tvillingens egen registrering.

Konklusjonen blir altså at det heller ikke ut fra den spesielle relativitetsteorien foreligger noe grunnlag for uenighet mellom tvillingene om hvem som er eldst etter den spektakulære romreisen.

Magne Kringlebotn

∞

Spesiell relativitetsteori og tvillingparadokset

Til tross for at spesiell relativitetsteori i essens dreier seg om rom-tidens *geometri*, er de fleste lærebok-framstillinger av den algebraisk orientert. (Ø. Grøns artikkel i FFV 4-92 er i så måte intet unntak). Dette er beklagelig, da noen enkle rom-tids diagrammer betyr mye for forståelsen av effektene i teorien. Det er sannsynligvis riktig å hevde at mange fysikk-studenter går gjennom studiet med en dårligere forståelse av spesiell relativitetsteori enn de ville gjort med en mer geometrisk presentasjon.

Vi vil her vise at rom-tids diagrammer gir økt innsikt i Lorentz-kontraksjonen og tidsdilatasjonen, og framfor alt illustrere at de på en enkel måte kan forklare tvilling-paradokset ut fra *spesiell* relativitetsteori, stikk i strid med den alt for utbredte misforståelse at generell relativitetsteori er nødvendig.

Framstillingen vil bli forholdsvis knapp, og vil kun konsentreres om rom-tidens geometri. Vi viser til referansene for dem som ønsker mer detaljer og utbroderi-ng, f.eks. om synkronisering av klokker og konsekvenser av endelig kommunikasjonshastighet.

Det er velkjent at Euklidsk geometri i planet har sin eksistens uavhengig av koordinatsystemer. De er kun hjelpemidler, en tilordning av et tallpar til hvert punkt i planet som kan velges mer eller mindre hensiktsmessig. I en spesiell stilling står de ortonormale kartesiske systemer som finnes ved rotasjon av et opprinnelig system.

Helt tilsvarende har 2-dimensjonal rom-tid sin eksistens uavhengig av koordinatsystemer. De 'roterte' ortonormale koordinatsystemene er her Lorentz-systemene svarende til inertial-systemer. I Figur 1

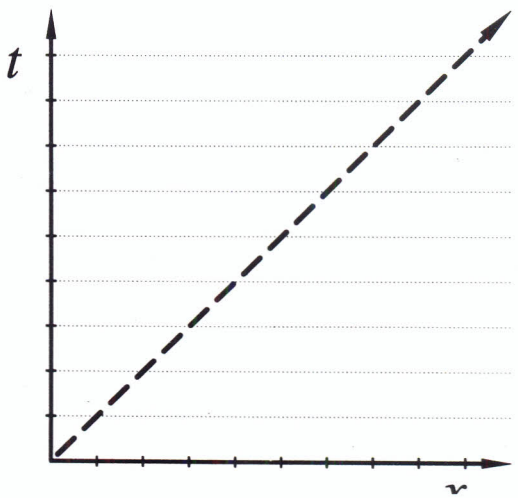


Fig.1. Todimensjonal rom-tid. Enhetene er valgt slik at lysets hastighet er 1.

viser vi et Lorentz-system med tiden som ordinat og rom-aksen som abscisse. Vi viser også en lysstråle fra $(x = 0, t = 0)$, og linjer parallelle med x-aksen som angir *samtidighet* i dette koordinatsystemet.

Vi tenker oss nå en observatør som beveger seg fra $(x = 0, t = 0)$ med hastighet v, og ønsker å finne koordinatsystemet hvor vedkommende er i ro. Hans tidsakse må nødvendigvis være langs linjen $x = vt$ i det opprinnelige koordinatsystemet, mens hans x-akse må være denne linjen speilet om lysstrålen. Det betyr at vi får den situasjonen som er vist i Figur 2.

Merk at x' og t'-aksene virkelig er ortogonale selv om det ikke ser slik ut fra Euklidske begreper. Den underliggende geometrien er Lorentzisk! Samtidighetslinjene i det nye systemet er naturligvis parallelle med x', noe som klart viser samtidighetens relativitet.

Før vi går videre, er det essensielt å merke seg at lengden på enhetene er ulike langs t og t'-aksene, og tilsvarende for x og x'-aksene. Det må være slik siden relativitetsprinsippet sier at det skal være full symmetri mellom de to systemene: Samtidighetslinjen fra $t = 1$ må skjære t'-aksen i et punkt med samme tallverdi som samtidighetslinjen fra $t' = 1$ skjærer t-aksen. Når dette

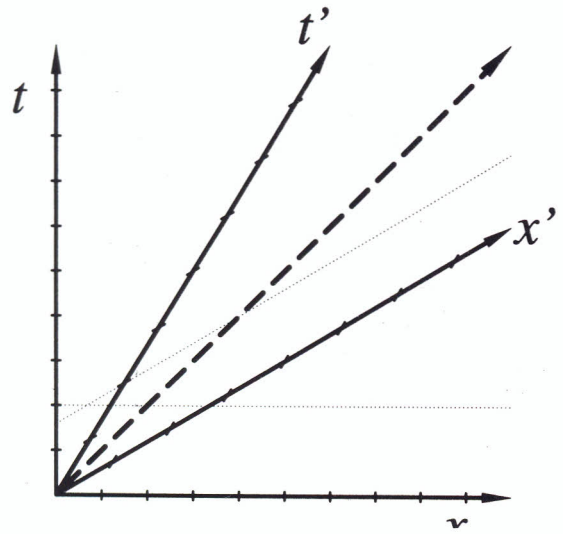


Fig.2. Som Figur 1, men med koordinatsystemet for en observatør som beveger seg med farten 0,6c tegnet inn. De to prikkede linjene er samtidighetslinjer i de to koordinatsystemene. Konstruksjonen brukes for å finne lengden på akseenheten i det merkede koordinatsystemet.

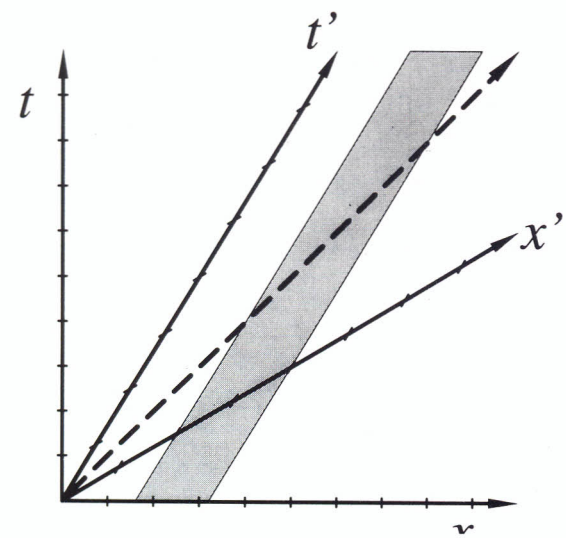


Fig.3. Som Figur 2, men med samtidighetslinjer for hver akseenhet tegnet inn. Tidsdilatasjonen, og spesielt dens symmetri mellom de to koordinatsystemene kommer klart fram.

er tatt vare på, kan en lese Lorentz-transformasjonen direkte ut fra Figur 2. (Se ramme.)

Figur 3 viser sluttdiagrammet med samtidighetslinjer i begge koordinatsystemene. Figuren illustrerer tidsdilatasjonen, og spesielt dens symmetri i forhold til de to systemene. Figurene klargjør også hvor tett tidsdilatasjonen er knyttet til samtidighetens relativitet.

I Figur 4 viser vi 'verdenslinjen' til en stav som beveger seg med hastighet v relativt (x,t)-systemet, og er i ro i (x',t')-systemet. Lorentz-kontraksjonen kan leses rett ut fra figuren. Men figuren viser noe mer: Observatøren i (x',t')-systemet vil hevde at observatøren i (x,t)-systemet bestemmer x-koordinatene

Lorentz-transformasjonene

Siden Figur 2 (eller 3) inneholder grunnlaget for spesiell relativitetsteori, gir den grunnlag for en meget 'fotgjengervennlig' utledning av Lorentz-transformasjonene. Alt som kreves er litt kjennskap til vektorer i planet.

Først må vi etablere enhetslengden. Ved å analysere Figur 2, finner vi at lengden på enheten i det merkede systemet er

$$\sqrt{\frac{1+v^2}{1-v^2}} \tag{1}$$

Vi ønsker nå å finne sammenhengen mellom koordinatene til et punkt i rommet uttrykt i (x,t) og (x',t')-systemene. Dette kan uttrykkes ved vektor-likningen

$$[x,t] = x'\mathbf{e}_{\mathbf{x}'} + t'\mathbf{e}_{\mathbf{t}'} \tag{2}$$

hvor for eksempel

$$\mathbf{e}_{\mathbf{t}'} = \frac{[v,1]}{\sqrt{v^2+1}}\sqrt{\frac{1+v^2}{1-v^2}} = \frac{[v,1]}{\sqrt{1-v^2}} \tag{3}$$

Ved bruk av tilsvarende for $\mathbf{e}_{\mathbf{x}'}$, betyr dette

$$[x,t] = x'\frac{[1,v]}{\sqrt{1-v^2}} + t'\frac{[v,1]}{\sqrt{1-v^2}} \tag{4}$$

Denne likningen løses lett. Vi går til tradisjonelle enheter ved å la $v \to v/c$ og $x \to xc$, og finner de velkjente Lorentz-transformasjonene

$$x = \frac{x'+vt'}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} \tag{5}$$

$$t = \frac{t'+\frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} \tag{6}$$

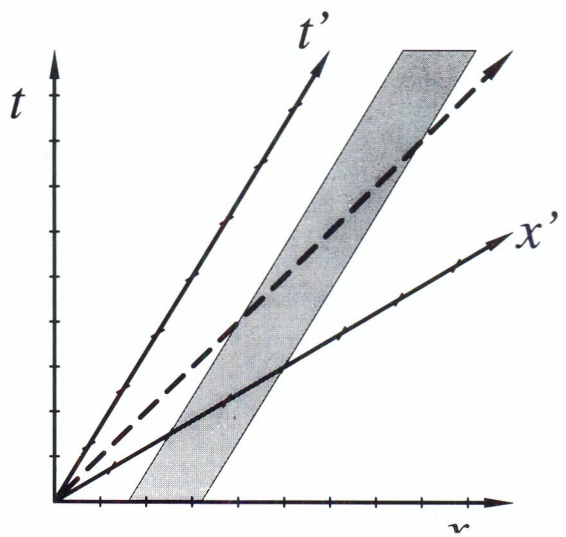


Fig.4. Illustrasjon av Lorentz-kontraksjonen. Lorentz-kontraksjonens sterke sammenheng med samtidighetens relativitet er åpenbar.

til stavens to ender på to ulike tidspunkter, og han finner det sannsynligvis rimelig at (x,t)-observatøren ser en kortere stav. Igjen viser det enkle diagrammet noe viktig: Lorentz-kontraksjonen er sterkt knyttet til samtidighetens relativitet!

Vi er nå klare til å se på tvilling-paradokset. Vi trenger da ytterligere ett koordinatsystem, hvor den reisende tvilling er i ro under sin retur. Vi får da situasjonen som vist i Figur 5.

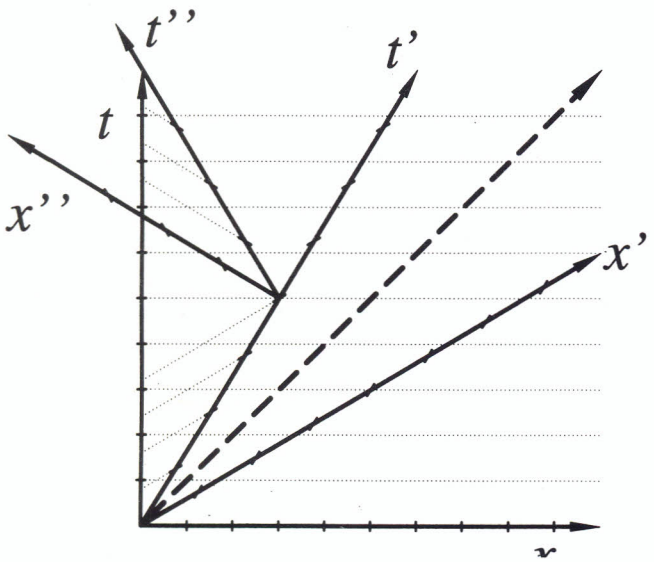


Fig.5. Tvillingparadokset forklart ved spesiell relativitetsteori. Figuren illusterer fellen en går i ved rene algebraiske framstillinger: Koordinatsystemene til den 'reisende' tvilling ved inn og utreise er prinsipielt forskjellige, selv om formelen for tidsdilatasjonen er lik i de to tilfellene. Feilen som for ofte gjøres, og som medfører at generell relativitetsteori påkalles for å oppklare tvillingparadokset, består i at den delen av den 'stasjonæres' tidsakse som ikke skjæres av den 'reisendes' samtidighetslinjer, oversees ved en presentasjon av problemet som kun baserer seg på formelen for tidsdilatasjonen.

Figur 5 innebærer naturligvis at den reisende tvilling hopper instantant fra et inertialsystem til et annet, men argumentet blir ikke vesentlig endret om en runder av hjørnet litt pga. endelig akselerasjon.

Essensen i Figur 5 er følgende: Mens samtidighetslinjene for den 'stasjonære' tvilling skjærer alle punkter på den 'reisendes' verdenslinje, er ikke det motsatte tilfelle. Idet den 'reisende' hopper fra det ene koordinatsystemet til det andre, endrer hans samtidighets-linjer seg, og det er en del av den 'stasjonæres' verdenslinje han ikke ser.

Asymmetrien mellom de to kommer klart fram, og er naturligvis knyttet til at den ene har gjennomgått en akselerasjon. Men dette lar seg, som vi ser, fullt ut analysere i spesiell relativitetsteori: Spesiell relativitetsteori kan analysere *flatt* tid-rom fullstendig, akselererte systemer inkludert. Generell relativitetsteori er nødvendig når tid-rommet er *krumt*, dvs. når gravitasjonseffekter knyttet til masse er til stede.

Det er i denne sammenheng fristende å trekke fram et argument av en type som fysikere liker å bruke, selv om beviskraften kanskje er kan diskuteres: Det er velkjent at Dirac-likningen og kvante-elektrodynamikken kun er kompatible med spesiell relativitetsteori, ikke med generell. Likevel beskrives hydrogen-atomet svært godt, og i det 'sveiver' det jo nokså fort rundt.

Jeg vil få rette en takk til Bjørn Johan Slagsvold, som introduserte meg til rom-tids diagrammer og Taylor og Wheelers "Spacetime Physics".

Referanser

1. Ø. Grøn: *Relativistisk tid.* Fra Fysikkens Verden **54,** 93 (1992)

2. L. P. Staunton and H. van Dam: *Graphical introduction to the special theory of relativity.* American Journal of Physics **48,** 807 (1980)

3. E. F. Taylor and J. A. Wheeler: *Spacetime Physics.* Freeman, San Francisco, (1966)

Arne Marius Raaen

∞

Kommentar fra Øyvind Grøn

W. Pauli[1] formulerer tvillingparadokset på følgende måte: *"Consider two synchronized clocks C_1 and C_2 at a point P. If one of them, say C_2, is now set in motion at time $t = 0$ and made to move with constant speed v along an arbitrary curve, reaching point P' after time t, then it will no longer be synchronous with C_1 afterwards. On arrival at P' it will show the time $t(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ instead of t. The same will hold, in particular, when P and P' coincide, i.e. when C_2 returns to its initial position. We can neglect the effect of acceleration on the clock, so long as we are dealing with an inertial reference system... The paradox now lies in the following statement: Let us describe the process in terms of a reference system K^*, always at rest with respect to C_2. Clock C_1 will then move relative to K^* in the same way as C_2 moves relative to K. Yet, at the end of the motion, clock C_2 will have lost compared with C_1, i.e. C_1 will have gained compared with C_2."*

Pauli skriver videre: *"The paradox is resolved by observing that the coordinate system K^* is not an inertial reference system and that in such a system the effect of acceleration cannot be neglected, since the ac-*

celeration is not produced by an external force, but, in the terminology of Newtonian mechanics, by an inertial force. Of course, a complete explanation of the problem can only be given within the framework of the general theory of relativity."

Som Kringlebotn har gitt en utmerket demonstrasjon av, kan man gi en fyldestgjørende beskrivelse av tvillingenes registreringer av hverandres hjerteslag uten å gjøre bruk av den generelle relativitetsteorien. Men *denne* beskrivelsen er basert på det syn at den ene tvillingen reiser og den gjenværende er hele tiden i ro. Allerede i utgangspunktet forutsettes det at $N_r = N_h(1 - v^2/c^2)^{1/2} < N_h$, der N_h og N_r er antall egne hjerteslag i reisetiden, registrert av henholdsvis hjemme- og reise-tvillingen.

Raaen har gitt en fin geometrisk beskrivelse av tvillingparadoks-situasjonen, med bruk av Minkowski-diagram. Men noe tvillingparadoks har heller ikke han formulert. Han går ikke inn på den mulighet at den 'reisende' tvilling oppfatter seg selv som i ro under hele reisen, også i 'akselerasjonsperioden'. Fra dette synspunkt er det den gjenværende tvilling som endrer hastighet.

Den spesiell-relativistiske løsningen, som Kringlebotn og Raaen har gitt hver sin variant av, består i å anta at det kun er den hjemmeværende tvillingen som *hele tiden* kan oppfatte seg selv som i ro. Dermed mister man muligheten til å gi en paradoksal formulering av situasjonen. Man kan si at ifølge den spesielle relativitetsteorien, så eksisterer ikke noe tvillingparadoks. Det er først når den spesielle relativitetsteorien suppleres av det generelle relativitetsprinsippet at tvilling*paradokset* kan formuleres.

Kjernen i tvillingparadokset er den motsigelse som oppstår når hver av tvillingene hele tiden betrakter seg selv som i ro, og så bruker den hastighetsavhengige tidforlengelsen fra den spesielle relativitetsteorien til å forutsi at den andre tvillingen må være yngre enn ham selv etter reisen. For å kunne løse *dette* paradokset, trenger man den generelle relativitetsteorien. Dette betyr ikke at den spesielle relativitetsteorien inneholder en inkonsistens. Paradokset oppstår når man ikke tar i betraktning at dets formulering er basert på det *generelle* relativitetsprinsippet som omfatter akselerert bevegelse, og som ikke er inneholdt i den spesielle relativitetsteorien.

Raaen nevner den oppfatning at spesiell relativitetsteori kan håndtere 'flatt' tid-rom fullstendig, akselererte systemer inkludert. Dette er en oppfatning som er blitt allminnelig de siste 20-30 årene. Men det er heller ikke noe i veien for å begrense spesiell relativitetsteori til å beskrive fenomener fra inertialsystemer. Dette er kun en definisjonssak, og noen fysikalsk forskjell kommer ikke inn i bildet.

Det vesentlige for *løsningen* av tvillingparadokset er at man tar den gravitasjonelle tidforlengelsen i betraktning. Dette krever ikke at man innfører 'krumt' tid-rom i beskrivelsen. Formlene i min artikkel[2] er basert på uttrykk som gjelder eksakt i 'flatt' tid-rom (hyperbolsk akselerert referansesystem). Om man ønsker det, kunne man derfor si at jeg har gitt en spesiell relativistisk *beskrivelse*, selv om jeg trekker inn den gravitasjonelle tidforlengelsen. Einsteins heuristiske utleding av den gravitasjonelle tidforlengelsen ble gitt allerede i 1911, fire år før den generelle relativitetsteorien med 'krumt' tid-rom, ble publisert. I 1915 viste Einstein at den gravitasjonelle tidforlengelsen er en konsekvens av den generelle relativitetsteorien. Denne betraktes nå som en generell-relativistisk effekt.

Som nevnt ovenfor, er det vesentlige ved *formuleringen* av tvillingparadokset at den er basert på det generelle relativitetsprinsippet. Dette er nødvendig for å kunne oppfatte den 'reisende' tvilling som i ro *hele* tiden. Gyldigheten av det generelle relativitetsprinsippet avhenger av en effekt som kalles Lense-Thirring effekten eller *"inertial dragging"* effekten. Den innebærer at en masse som roterer eller akselererer, drar med seg inertialsystemene. Utenfor et roterende sort hull, f.eks., roterer inertialsystemene i samme retning som det sorte hullet. Denne effekten avhenger bl.a. av feltlikningene i den generelle relativitetsteorien, så man går faktisk dypt inn i den generelle relativitetsteorien når tvillingparadokset skal formuleres.

Referanser

1. W. Pauli: *Theory of Relativity.* Pergamon Press, London (1958)

2. Ø. Grøn: *Relativistisk tid.* Fra Fysikkens Verden **54**, 93 (1992)

Øyvind Grøn

∞

Tsjernobyl igjen

Kommentar til en artikkel av Tormod Riste

I FFV nr. 4, 1991, sto en artikkel med overskrift "Den Internasjonale Tsjernobyl-rapporten", skrevet av Tormod Riste. I året som har gått har jeg forgjeves sett etter svar eller kommentar til denne artikkelen.

Det som springer meg i øynene er misforholdet mellom navn og innhold. Noe som kaller seg *"The International Chernobyl Project, assessment of radiological consequences..."* som så kaldt og rolig unnlater å rapportere noe om de 100 000 evakuerte fra nærsonen og de 650 000 såkalte likvidatorer – de som var utkommandert for å rense opp og støpe "sarkofag" – vitner i det minste om en sær bruk av ord. I første hånd hos Det internasjonale atomenergibyrået, IAEA, som bortdefinerte dette problemet fra prosjektets mandat. Hvorfor?

Kan hende har, som Riste sier, IAEA gjort seg stor fortjeneste ved dette prosjektet. Men noen beundrer av byrået blir jeg ikke før de også forteller meg, eller iallfall setter i gang med å undersøke hvordan det har gått med disse 750 000. Jeg er neppe den eneste som venter på den undersøkelsen. Og så lenge ingenting later til å skje, dukker en ubehagelig bukkhavresekk-assosiasjon opp i bakhodet. Hvordan kan samme organisasjon både fremme atomenergi og være kontroll-instans? Slik sammenblanding har sjelden, om noensinne, vært en god løsning.

Riste krydrer sin artikkel med et bilde fra de første oppslag i dagspressen om et stort antall døde og stråleskadde i ulykken. Han glemmer å si at dette ble dementert umiddelbart etterpå. Han glemmer også å svare på sitt eget spørsmål: "Kor mykje av dette er sant?" - eller er blitt sant i ettertid? Noen av dem som ble mest stråle-utsatt var innkalte vernepliktige (mange fra de baltiske land) som i september -86 ble sendt ut – i ett minutt per mann – for å spa radioaktivt avfall ned av taket på de reaktorene man hadde vedtatt å sette i drift igjen. De robotene man hadde tiltenkt jobben ble nemlig så 'strålesyke' at de sluttet å fungere. Soldatene fikk et militært håndtrykk og hvert sitt æresdiplom til takk. Undres på hva mer det har vist seg at de fikk?

Svar på disse spørsmålene vil bli mottatt med takknemlighet.

Ingerid Hiis Helstrup

∞

Tormod Riste svarer:

Ingerid Hiis Helstrup uttrykker i innlegget sitt skepsis både til prosjektet eg omtalar og til min artikkel. Eg hadde venta at ho då ville ha teke seg bry med å lese rapportane frå *"The International Chernobyl Project"*. Der ville ho fått svar på dei to første punkta ho reiser tvil om.

1. Mandatet. IAEA har ikkje "bortdefinert problem fra prosjektets mandat". Mandatet vart gjeve av dei sentrale sovjetiske organ som ville ha svar på spørsmål som galdt evakueringsplanane utanfor nærsona.

2. Namn og innhald er i høgste grad dekkjande. IAEA innsåg sjølvsagt at dei ville bli utsette for kritikk om dei åleine utførte oppdraget, og gikk inn i eit internasjonalt samarbeid med seks andre FN-organ. Det heile vart underlagt ei styringsgruppe av frittståande, internasjonale vitskapsmenn.

3. Presseoppslaget om 2100 døde. Dette stod i Dagbladet 29. april, før hjelpearbeidet kom i gang. Eg kjenner ikkje til at meldinga nokon gong vart eksplisitt dementert; og om så er tilfelle, sikkert ikkje på første side. Eit dementi er sjeldan godt stoff og har mindre effekt enn sensasjonsoppslaget.

4. Kva skjedde med dei 100 000 frå nærsona og dei 650 000 hjelpearbeidarane? Dei førstnemnde, som altså budde i 30-km sona rundt reaktoren, vart evakuerte straks etter ulukka. På grunnlag av målingane av nedfallet i området, har den sovjetiske regjeringskomitéen sagt at dei ikkje ventar målbare helseverknader for dei evakuerte, men eit institutt for kreftforsking i Kiev følgjer nøye med i utviklinga. Ei epidemiologisk undersøking blant dei som bur inntil nærsona, viser ingen auke i krefttilfelle i åra 1980–1989. Dette går fram av eit arbeid av forskarar frå Kiev og Oxford som nyleg vart publisert i tidsskriftet Lancet.

I april 1991 opplyste den ukrainske fysikaren Tsjernosenko at 7–10 000 av dei 650 000 som hadde stått for oppryddinga i nærsona var døde av stråling. Dette er ikkje bekrefta på offisielt hald. Offisielle tal for femårs-mortaliteten blant menn i 30-års alderen i Sovjet er 1,3%. Tsjernosenkos tal er difor ikkje urimelige, og treng ikkje ha samanheng med stråling.

Etter offisielle sovjetiske oppgåver har 165 vore behandla for akutte stråleskader, og 28 av dei er døde. Dei andre er "friske", men tilstanden deira blir kontrollert nøye. Det er neppe grunn til å tvile på desse tala då legar frå vest har vore med i behandlinga.

5. Sluttkommentarar. Den internasjonale Tsjernobyl-rapporten er ein statusrapport for eit arbeid som ikkje er avslutta. Dei fleste kreftformene har så lang latenstid

at dei eventuelt kan vise seg seinare. Denne rapporten seier altså, på grunnlag av dei låge stråledosane, at ein neppe vil finne statistiske utslag i talet på krefttilfelle i framtida. Medieoppslaga om følgjene av Tsjernobyl-ulukka har ført til at hundretusentals barn og ungdomar ser framtida si knytt til sjukdom og død, og eg synest det er viktig at den optimistiske vurderinga frå det internasjonale prosjektet når fram til publikum. Vi som har ein fagleg bakgrunn bør spreie opplysningar frå autoritative kjelder i den grad media vil gje plass til det.

Tormod Riste

∞

Bokomtaler

N.G. Chetaev: Theoretical Mechanics. Mir Publishers 1987. Oversatt fra russisk og utgitt på Springer-Verlag, 1989 (400 sider).

Nikolai G. Chetaev var en nestor innen russisk mekanikk. Mest kjent er han nok for sine forskningsarbeider, især for essayet "The Stability of Dynamic Motion". Gjennom mange år som professor ved universitetene i Kazan og Moskva satte han dessuten spor etter seg som en god lærer innenfor forskjellige emner, i teoretisk mekanikk i særdeleshet, og hans forelesninger sies å ha dannet skole for senere generasjoner innen fagområdet, i Russland iallfall. I de senere år av sitt liv arbeidet han på en lærebok i teoretisk mekanikk for studenter i matematikk og fysikk. Han rakk ikke å gjøre arbeidet helt ferdig, men hans medarbeidere har siden sørget for å avslutte det hele, såvidt mulig i Chetaevs ånd, og få boka utgitt. Og her er den.

Boka er i hendig format (den har ikke "mursteinspreg"), og trykkingen er utmerket. Inndelingen i kapitler er ganske standard: Vector theory, kinematics, statics, dynamics of a particle, dynamics of a system, dynamics of a rigid body, analytical dynamics, theory of attraction. Dessuten appendier om analogien optikk/mekanikk, Poincarés likninger og spesiell relativitetsteori.

Dette er ikke noe hastverksarbeid. Boka bærer preg av å være resultat av en erfaren lærers mangeårige engasjement i stoffet. For lesere i Vesten, oppflasket med standardverker slike som Goldsteins "Classical Mechanics", tror jeg imidlertid at boka kan virke fremmedartet. Vi finner ikke henvisninger til Goldstein her, faktisk heller ikke til den velkjente "Mechanics" av forfatterens landsmenn Landau og Lifshitz. Derimot er linjene sterke og klare til klassikerne: Lagrange, Euler, Hamilton, Poincot, Poincaré, og selvfølgelig Newton. Innflytelsen fra Zhukovsky og Lyapunov er også betydelig.

Uortodoks er framstillingen, for eksempel i behandlingen av vilkårene for integrerbarhet av føringsbetingelsene når disse er gitt på differensiell form, og også når det gjelder presentasjonen av relativitetsteorien. Oppsettet i boka kan virke noe gammeldags, med inndeling i paragrafer omtrent på den måten vi finner det i Lambs "Hydrodynamics".

Noen egnet lærebok for studenter ved norske universiteter kan vel dette neppe være. Det inntrykket jeg sitter med er at boka er interessant for "feinschmeckere" i mekanikken, det vil si erfarne forskere og lærere som ønsker framstillinger med originalitet og personlig stil. For slike brukere kan nok boka være ganske verdifull.

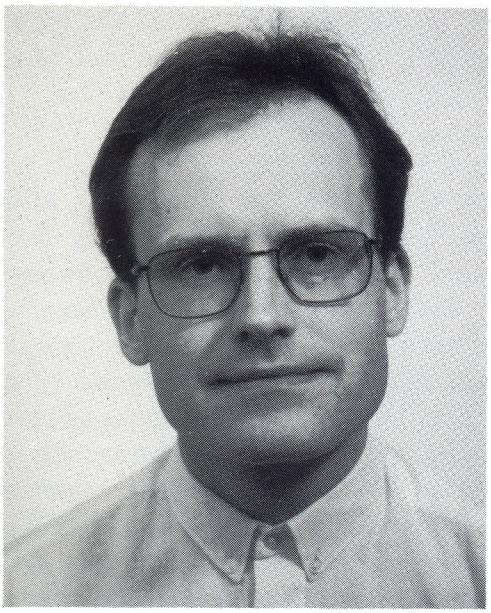
Iver Brevik

∞

Annonser i FFV

Nye Doktorer

Bård Johan Arnt Bjørkvik



Sivilingeniør Bård J. A. Bjørkvik fra Råkvåg i i Sør-Trøndelag forsvarte avhandlingen *A versatile interface light-scattering spectrometer. Design, construction, and performance test*, for dr.ing.-graden ved NTH, 4. februar 1993.

Doktorarbeidet omfatter i hovedsak utvikling og uttesting av apparatur og måleteknikk for deteksjon av laserlys spredt fra termisk eksiterte kapillærbølger på gass/væske- eller væske/væske-grenseflater. Metoden, kalt grenseflatelysspredningsspektroskopi, er basert på at fluktuasjoner av intensiteten til det spredte lyset gjenspeiler grenseflatens dynamikk, og derfor kan gi informasjon om aktuelle systemparametre så som grenseflatespenning og viskositet.

Apparaturen er bygd med tanke på praktisk anvendbarhet og fleksibilitet, og muliggjør pålitelige målinger over et stort kapillærbølgelengde-område selv under ikke-optimale optiske forhold. Apparaturen er unik ved at den i tillegg kan nyttes til komplementære bulklysspredningsmålinger som innebærer deteksjon av lys spredt fra optiske inhomogeniteter i det indre av gass- eller væskefaser.

Bjørkviks arbeid har vist at det med den utviklede apparatur og måleteknikk er mulig å oppnå et vesentlig større måleområde enn det som hittil har vært vanlig innen grenseflatelysspredningsspektroskopi. Dette har blant annet til følge at metoden blir mer robust: Man kan lettere kontrollere visse instrumentelle effekter og derfor også lettere kontrollere påliteligheten av måleresultatene.

Doktoranden har gjennomført grundig utprøving av apparaturen ved målinger på systemer som eksemplisifiserer ulike kapillærbølge-regimer. Som et eksempel på en anvendelse av praktisk interesse ble grenseflatelysspredningsmålinger foretatt på et gasskondensatorsystem under høyt trykk, hvorigjennom grenseflatespenningen og summen av gass- og væskeviskositeter lot seg bestemme. I denne forbindelse ble for første gang en sylindrisk høytrykkscelle brukt til grenseflatelysspredningsmålinger.

Arbeidet med avhandlingen er utført ved Institutt for fysikk, NTH, med førsteamanuensis Knut Arne Strand som faglig veileder. Apparaturen er bygd opp med finansiell støtte fra Statoil og NAVF.

Gunnar Taraldsen

Sivilingeniør Gunnar Taraldsen fra Oslo har tatt graden doktor ingeniør ved Norges tekniske høgskole med avhandlingen *Spectral Theory and Random Operators. The Energy Spectrum of the Quantum Electron in a Disordered Solid.*

Prosjektet er innenfor fagområdet matematisk fysikk, og omhandler spektral teori og stokastiske operatorer. En god forståelse av elektronfysikk i faste stoffer har gjort konstruksjon av nyttige elektroniske komponenter mulig. F. Bloch innførte i 1928 en kvanteteori for et elektron i en perfekt krystallstruktur. Teorien forklarer bl.a. forskjellen på metaller, isolatorer og halvledere. I 1977 fikk P.W. Anderson, J.H. van Vleck og N.F. Mott Nobelprisen i fysikk for grunnleggende bidrag til teorien for elektronstruktur i mag-

netiske og uordnede systemer. I Anderson-modellen er avvik fra en perfekt krystallstruktur modellert ved en sannsynlighetsfordeling. Det viser seg at et slikt avvik gir interessante effekter knyttet til elektronets energispektrum. Dette har stor betydning for f.eks. ledningsevnen.

I doktoravhandlingen har Taraldsen først innført en Bloch-teori for et elektron som beveger seg på gitterpunkter. Han har spesielt påpekt at denne teorien kan gi lokaliserte elektrontilstander, selv med en perfekt krystallstruktur. Hovedtyngden av arbeidet er utvikling av matematisk teori for generaliseringer av Anderson-modellen. Det gis et meget generelt bevis for at energispekteret til elektronet i Anderson-modellen er uavhengig av sannsynlighetsfordeling. Teorien konkretiseres ved anvendelse på to modeller.

Arbeidet har betydning for vår innsikt i en matematisk modell som generaliserer Blochs én-elektron-modell.

Avhandlingen er utført ved Institutt for matematiske fag med professor Helge Holden som hovedfaglærer og faglig veileder.

Gunnar Taraldsen er nå ansatt som stipendiat ved Institutt for matematiske fag, NTH.

∞

Erik Wold

Sivilingeniør Erik Wold fra Oslo, har tatt graden doktor ingeniør ved Norges tekniske høgskole med en avhandling om ellipsometri, en målemetode som brukes til å bestemme materialers optiske egenskaper, dvs. deres brytningsindeks og absorpsjonsspektrum.

Absorbsjonsspekteret inneholder viktig informasjon om elektronstruktur, gittervibrasjoner og andre eksitasjoner i prøven. Målemetoden er svært følsom, siden endring i både amplitude og fase for lys som reflekteres fra overflaten bestemmes. Det har i praksis vært vanskelig å utføre ellipsometri med infrarødt lys pga. mangel på gode optiske komponenter.

Gjennom en grundig analyse har Wold etablert målemetoder som eliminerer instrumentelle feilkilder, og dette gjør infrarød ellipsometri til en pålitelig eksperimentell metode. Han har målt og diskutert de elektroniske egenskapene til høytemperatur superledere i lys av den kompliserte materialstrukturen; spesielle optiske moder i supergitterstrukturer er også studert.

Det er ventet at infrarød ellipsometri vil spille en stadig større rolle innen grunnforskning og innen materialteknologi; spesielt gjelder dette materialer som skal brukes innen solenergiteknologi og energisparing.

Avhandlingen har tittelen *Spektroskopisk infrarød ellipsometri*, og er utført ved Institutt for fysikk med professor Ola Hunderi som hovedfaglærer og førsteamanuensis Johannes Bremer som faglig veileder.

Erik Wold ble utdannet ved Fakultet for fysikk og matematikk i 1987, og har diplomeksamen fra Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, Tyskland, i 1987. Han er for tiden tilknyttet Institutt for fysikk ved NTH.

∞

Trim i FFV

FFVT 2/93

N nonchalante fysikere, deriblant du, går på teater (med $N + M$ seter), og setter seg på tilfeldige plasser uten hensyn til hva som står på billettene.

Deretter fylles salen med M rigorøse matematikere som forlanger å få sitte på sine riktige plasser. En fysiker som må flytte seg tar sin riktige plass for å unngå å måtte flytte seg nok en gang.

Hva er sannsynligheten for at du blir sittende i ro?

Løsning FFVT 1/93

Spørsmålet var: Hva er siste siffer i

$$(...((7^7)^7)^7.....)^7,$$

der det er opphøyd i sjuende potens 1000 ganger?

Ved hjelp av at $7^4 = 49^2$ slutter på 1, ser en straks at 7^7 slutter på 3. Videre ser en at 3^7 slutter på 7 (vha at 3^4 slutter på 1). Så en får en veksling mellom 3 og 7 som siste siffer ved de suksessive opphøyingene i sjuende potens. Da antall slike potenseringer er et like tall (1000), slutter tallet på 7.

Kommentar: Den mer ambisiøse problemløser vil kunne vise at tallets *to* siste siffer er 07.

∞

Nytt fra NFS

Plasma- og gassutladningssymposiet 1993

Møtet fant sted som planlagt ved Wadahl hotell, Golå ved Vinstra, i tiden 8. til 10. februar.

Bidragene var spredt over et vidt felt i samsvar med at innholdet i dette fagområdet blir stadig større. Allikevel introduserte vi konseptet av et tema for symposiet som i denne omgang var *prober i plasma.*

Vi hadde 41 deltakere (inklusive sekretæren), hvorav 25 fra Norge, 11 fra Sverige, 2 fra Estland, 1 fra Danmark og 2 inviterte foredragsholdere fra U.K. Antall bidrag var 39, og både innhold og presentasjon var jevnt over av høy standard.

De inviterte foredragsholderne var Dr. Guy Matthews (2) fra JET, og Dr. Philippa Browning fra UMIST, Manchester. Titlene på deres foredrag var: "Advanced Probe Diagnostics for Tokamak Edge Plasmas" (GM), "The Significance of Langmuir Probe Mesurements for the Study of Divertor Physics at JET" (GM), og "Magnetic Relaxation and Helicity Injection in the Sphex Spheromak" (PB).

Blant mye annet var det innlegg om støvplasma (Tromsø), gassutladning i forbindelse med metallutvinning og restgass-analyse (Trondheim), og virvler i plasma (Uppsala og Risø) som er spesielt nevneverdige.

I lys av at planleggingsarbeidet for radaren på Svalbard er i gang, var det nyttig å få høre et foredrag fra van Eyken, EISCAT, om prosjektets vitenskapelige mål.

Det ble gitt en á jourføring av de forandringer som har funnet sted ved Extrap-maskinen ved KTH, som nå fungerer som en 'Reversed Field Pinch' (RFP). En orientering ble gitt om de fremtidige planer for Blåmann-maskinen, særlig med hensyn til et mulig samarbeid angående strømdrift forårsaket av mikrobølger. Arbeider av C. Forest og medarbeidere ved Princeton har ført til fornyet interesse for dette feltet.

Det var oppmuntrende å notere at rom-plasma igjen var et tema på møtet, og det ble antydet at det kan bli mer aktuelt i årene framover.

Professor Øivin Holter, Universitetet i Oslo, ble valgt som formann for plasmafysikkgruppen for perioden 1993–94.

R.J. Armstrong

∞

Nye medlemmer tatt opp 3. mai 1993:

Dr.scient. Erling Andersen
Egedes gate 14
5035 Bergen-Sandviken

Student Gunnar Andersson
Fysisk institutt
Universitetet i Bergen
Allégt. 55
5007 Bergen

Forsker Rolf Einar Grini
Institutt for energiteknikk
Boks 173
1751 Halden

Student Frode Grini
Fysisk institutt
Universitetet i Oslo
Boks 1048 Blindern
0316 Oslo

Student Mario Kiriakov
Institutt for teoretisk astrofysikk
Universitetet i Oslo
Boks 1039
0315 Oslo

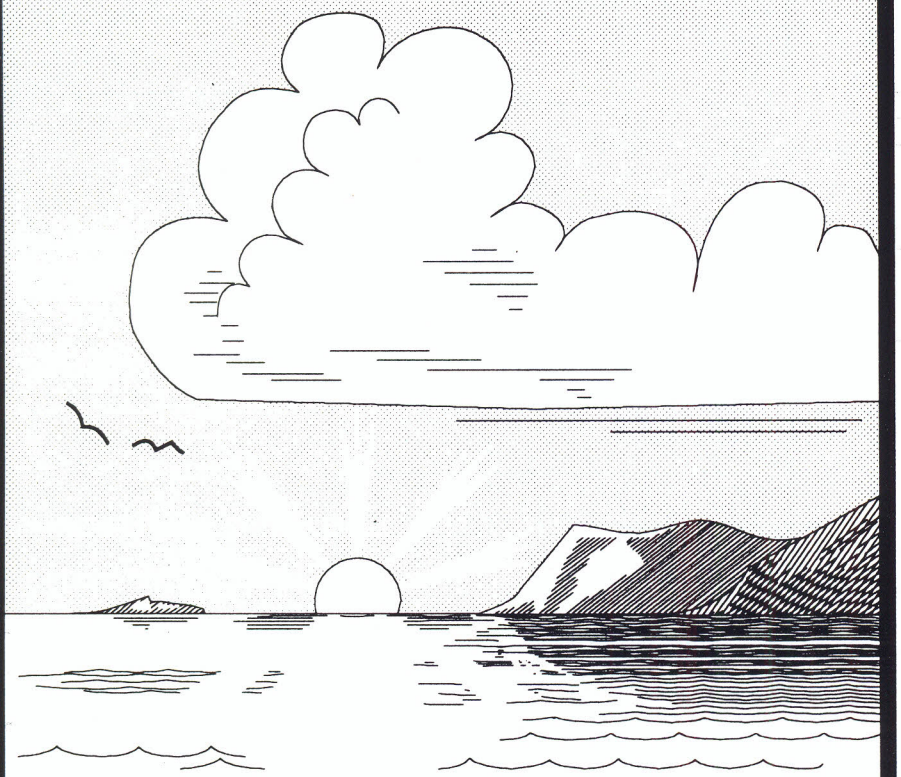
Cand.scient. Torbjørn Rogde
Granbakken 21
5037 Solheimsviken

Student Lill-Tove Wetjen
IMR- Nordlysobservatoriet
9037 Tromsø

Cand.scient. Egil Ølberg
Skibmannsvn. 32
4056 Tananger

∞

VÆR – KLIMA – MILJØ



Vi utvikler instrumenter for oseanografi og meteorologi fra scratch til avanserte produkter for et internasjonalt marked. Vi krever allsidige ingeniører.

AANDERAA INSTRUMENTS

FANAVEIEN 13B,
5051 BERGEN, NORWAY.
TEL. 05 132500, TLX 40049
TELEFAX + 05 137950

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

Norsk Fysisk Selskap

STYRE

President:
Professor Thormod Henriksen,
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

Visepresident:
Professor Egil Leer,
Institutt for teoretisk astrofysikk,
Universitetet i Oslo.

Styremedlemmer:
Amanuensis Marianne Foss,
Institutt for matematiske realfag,
Universitetet i Tromsø.
Professor Anne Grete Frodesen,
Fysisk institutt, Universitetet i Bergen.
Professor Haakon A. Olsen,
Fysisk institutt, AVH,
Universitetet i Trondheim.

Selskapets sekretær:
Gerd Jarrett,
Fysikkavdelingen, Institutt for energiteknikk, Boks 40, 2007 Kjeller.
Tlf.: 63 80 60 75 Fax.: 63 81 09 20
Postgirokonto: 5 88 38 89.
Bankgirokonto: 5102.09.58344.

Fra Fysikkens Verden

Redaktører:
Professor Øivin Holter,
Professor Finn Ingebretsen,
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.
Redaksjonssekretær:
Avd.ing. Karl Måseide,
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

Redaksjonskomité:
Professor Noralv Bjørnå,
Institutt for matematiske realfag,
Universitetet i Tromsø.
Professor Anne Grete Frodesen,
Fysisk institutt, Universitetet i Bergen.
Lektor Ingerid Hiis Helstrup,
Langhaugen skole, Bergen.
Professor Per Chr. Hemmer,
Fysisk institutt, NTH,
Universitetet i Trondheim.
Professor Egil Leer,
Institutt for teoretisk astrofysikk,
Universitetet i Oslo.

Ekspedisjonens adresse:
Fra Fysikkens Verden,
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo,
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo.
Tlf.: 22 85 64 28
Fax.: 22 85 56 71 / 22 85 64 22
Email:
oivin.holter@fys.uio.no
finn.ingebretsen@fys.uio.no
karl.maseide@fys.uio.no

Fra Fysikkens Verden utkommer fire ganger årlig. Abonnement kan tegnes direkte fra ekspedisjonen. Årsabonnement kr. 100,–. Studenter og skoleelever kr. 50,–. Løssalg kr. 30.– pr. nummer.

Postgirokonto: 0807 5 10 47 24
Bankgirokonto: 6094.05.40227