Fra Fysikkens Verden

Nr. 2 – 1992
54. årgang

Utgiver:
Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:
Øivin Holter
Finn Ingebretsen

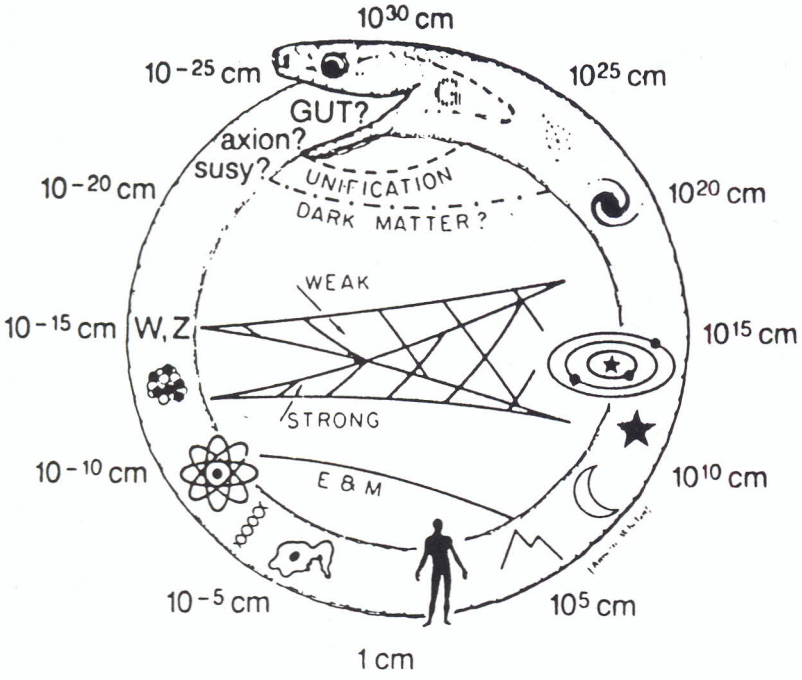
Innhold

Abdus Salam:
Naturens krefter 36

Carl Angell og Anders Isnes:
Læringsmiljøet i fysikk 48

Olav Steinsvoll:
Rondablikk 1991, del 2 51

Fra Redaktørene 34
FFV Gratulerer 34
Trim i FFV 35
Bokomtaler 56
Nye Doktorander 58
Dr.philos. Eli Olaug Hole
Dr.scient. Viggo Hansteen
Nytt fra NFS 59
Nye medlemmer



Glashows slange (Se Salams artikkel)

ISSN-0015-9247

Fra Redaktørene

Sommeren er over oss, flere uker tidligere enn vanlig. En landsomfattende og stabil varmebølge har nok en gang hvirvlet opp en serie med klimateorier i presse og på folkemunne. Studentenes oppmerksomhet er rettet mot de siste eksamener, lærernes oppmerksomhet er rettet både hit og dit, og vårsemesteret synger på siste verset. Og som alltid – sommerens møte- og konferansesesong tar til. For mange av våre leseres vedkommende åpnes den med årets fysikermøte i Stavanger, dersom budsjettet holder....

Den store miljøkomferansen i Rio har imidlertid greid å ta oppmerksomheten bort fra vårt hjemmlige arrangement. I Rio stiller hele miljø-Norge og vel så det. Med ca. ett hundre offisielle deltakere, pluss pluss, skulle vi og våre mange organisasjoner med miljøtilsnitt være godt representert. Riktignok registrerer vi en del misnøye fra noen som av en eller annen grunn ikke er tildelt billett, og noen flere blir det vel å lese om i tiden som kommer, men tallmessig har nasjonen all grunn til å være fornøyd med seg selv. Vi er bare glad for at kineserne ikke er like reiselystne; etter vår mening kan et sekssifret deltakertall bli noe upraktisk, selv på denne type konferanser. Det kan være ille nok med hundre deltakere, spesielt når det skal fattes vedtak. Vi husker hvor lang tid vi brukte på å veie "formann", "leder", "president" osv. mot hverandre, før vi fant den riktige etiketten på vårt selskaps øverste hode. Deretter ombestemte vi oss året etter...

Vi tror det er viktig at Norge deltar med vel kvalifiserte representanter – og det kan godt være mange – også på konferanser som i Rio, for dermed å bidra til å minske ressurs-bruken i den industrialiserte verden – og fortelle den tredje verden hvordan de bør innrette seg. Riktignok er vi litt forbauset over at enkelte i vår bekjentskapskrets, som vi vet er internasjonale kapasiteter på miljøspørsmål, ikke er invitert – men et sted må vel grensen gå. At det går grenser, gjorde også en Ghanesisk representant på den store solenergikonferanse i Denver i fjor oss oppmerksomme på, da han i en rundbordskonferanse ba de industrialiserte land om "please, don't force upon us systems or technical solutions that doesn't work in your own countries".

God sommer!

∞

FFV Gratulerer

Robert R. Wilson Prize for Achievement in the Physics of Particle Accelerators 1992 winner – Rolf Widerøe

Foto: Michèle Guenin

"For his many contributions to accelerator physics and technology beginning in the 1920s, including the development of betatrons, radio frequency acceleration in linacs and later in synchrotrons, injection and extraction from circular accelerators and the colliding beam concept. His development of radio frequency acceleration was a fundamental step towards modern accelerators from linacs and syncrotrons to storage rings."

Slik beskrives prisvinneren som holdt sitt prisforedrag under april-møtet i Washington D.C. for The American Physical Society. Vi vil som fag-kolleger ønske vår landsmann til lykke, også med 90-årsdagen som han kan feire dette året. Uten å bli for nasjonale, minner vi om at Kjell Johnsen fikk denne høye prisutmerkelsen i 1990.

Som Peer Gynt, har også Rolf Widerøe latt seg inspirere av skyenes bevegelser; det førte i hans til-

felle til ideen om kolliderende partikkelstråler. Men der stopper også mye av likheten, spesielt når det gjelder seriøsitet i holdningen til arbeid, selv om også Widerøes liv har vært fullt av omskiftninger.

Rolf Widerøe må utvilsomt karakteriseres som en individualist. Hans mangel på fast tilknytning til bestemte naturvitenskapelige eller andre faglige disipliner gjør dessuten at han best kan betegnes som "oppfinner" i en vid forstand. Befatning både med grunnvitenskap og industri har vært naturlige og forenelige elementer i Widerøs karriere, og M. Stanley Livingstons betegnelse av Widerøe som "den første akselerator-designer", er et dekkende uttrykk. Han kom til å påvirke en hel utvikling. Widerøes doktorarbeid fra Den tekniske høyskolen i Aachen (1927), påvirket Lawrence i USA til hans syklotronidé, og også andre pionerer som E.T. Walton i England og Jean Thibaud i Frankrike.

Widerøe har selv påpekt at han mer enn én gang er blitt beskrevet som en "obscure person", men han ble faktisk født i Oslo 11. juli 1902, hvor han vokste opp som bror av Viggo Widerøe, han som senere etablerte "Flyveselskap" mellom Oslo og Haugesund. Interesserte vil kunne finne mer om Rolf Widerøes liv og levnet i Naturen nr.5-6 1983, i en intervju-basert artikkel av Finn Aaserud og Jan S. Vaagen.

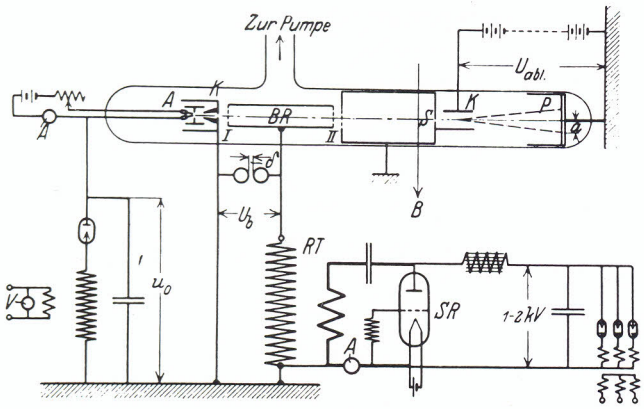


Fig.1. Apparaturskisse og koblingsskjema for Widerøes første akselerator.

Vi vil uttrykke vår glede over at Widerøe har fått den internasjonale oppmerksomheten han fortjener, og vi minner leserne om forholdet mellom idéer og de første apparater til å prøve dem ut, ved å ta med apparaturskissen for Widerøes første lineære akselerator. Den virket. Det gjorde også den betatronen han bygget for Radiumhospitalet i Oslo i begynnelsen av 50-årene; den kunne brukes i mange år i kreftterapiens tjeneste.

Jan S. Vaagen

∞

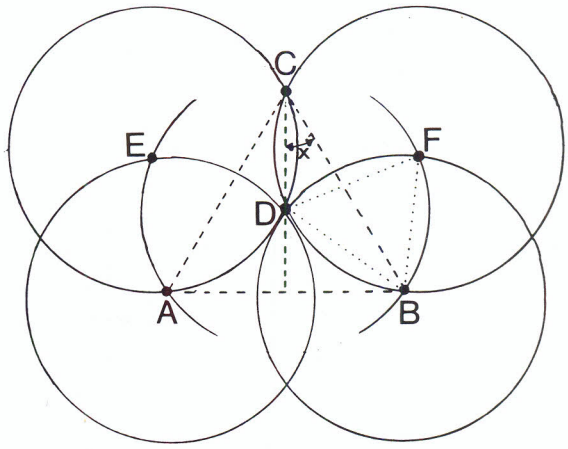
Trim i FFV

FFVT 2/92

"Smart og Snedig A/S" utsatte en håpefull stillingssøker for følgende test: I et rom befinner det seg 3 av/på-brytere A, B og C. Hver bryter er via et skjult anlegg tilknyttet én av 3 lamper i naborommet. Døren er lystett. Søkeren fikk lov til å besøke rommet med bryterne en eneste gang, og skulle så gå inn i naborommet og være i stand til å identifisere hvilken lampe som er knyttet til hver av bryterne. Ville leseren bestått testen?

Løsning FFVT 1/92

a) Oppgaven gikk ut på å konstruere ved hjelp av en rusten passer det tredje hjørnet C i en likesidet trekant når de to hjørnene A og B var gitt.



Konstruksjonen er vist i figuren: Sirkler om A og B gir skjæringspunkt D, sirkel om D gir skjæringspunktene E og F, og skjæring mellom sirklene om E og F gir det tredje hjørnet C.

Det enkleste bevis benytter at trekanten DFB er likesidet, og at $x = \angle DCB = \frac{1}{2}\angle DFB = 30°$ (fordi de to vinkler omslutter samme bue av sirkelen om F, den ene med vinkeltoppunkt (C) på omkretsen, den andre med vinkeltoppunkt i sentrum F. Og med vinkel $x = 30°$ følger det at trekanten ABC er likesidet.

b) Det tilsynelatende paradokset oppstår fordi figuren er bedragerisk. Riktig konstruert faller *ikke* midtnormalenes skjæringspunkt A *mellom* de vertikale linjene, men utafor, slik at en av vinklene er $u - v$, og ikke $u + v$.

∞

NATURENS KREFTER – Kan de forenes?

Abdus Salam *

I forbindelse med fjorårets 90-årsjubiléum for Nobelprisen, fikk Fysisk institutt, UiO, bl.a. besøk av professor Abdus Salam. Han holdt en forelesning over ett av de mest grunnleggende problemer innen fysikken; hvilke krefter styrer universets utvikling og kan disse krefter eventuelt uttrykkes ved én eneste universell kraft? For sitt bidrag til å finne svaret på disse spørsmål fikk Salam i 1979, sammen med Glashow og Weinberg, Nobelprisen i fysikk. FFV har gleden av å gjengi en noe utvidet versjon av Salams foredrag.

I vår tid kan man enten overveie foreningen (unification) av naturens fundamentale krefter, eller foreningen av den materie som disse krefter virker på. Foreningen av masse synes imidlertid ikke å gi mening fordi vi om igjen og om igjen har sett at materiens forening har gått gjennom forskjellige faser; først var det atomet, så kjernen og deretter partikkelfysikk generelt, og nå kvark- og lepton-modellen innen dagens Standard-modell.

Med hensyn til enheten av naturens krefter, har jeg gleden av å vise dere Glashows fundamentale skisse (Fig.1), som illustrerer gravitasjonskraften som den

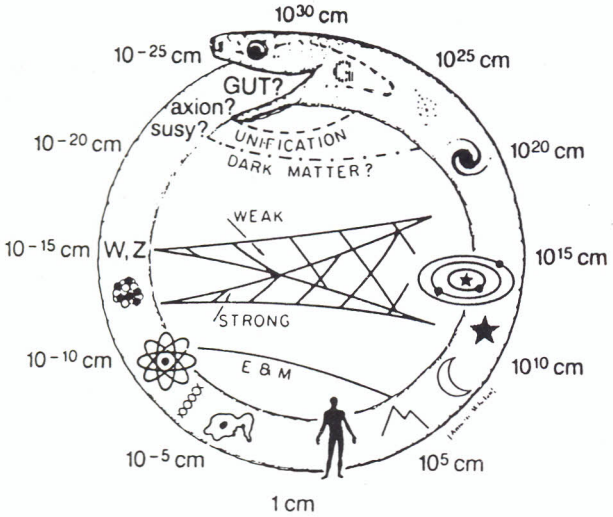


Fig.1. Glashows slange som spiser sin egen hale.

*International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italia.

Foredraget er oversatt og tilpasset FFV av Øivin Holter.

samme kraft som forener de fundamentale partiklene. Dette anser jeg som den endelige enhetlige forening. Om enhetlig tenkning har F. Dyson uttalt følgende:

> *"Det er generelt slik at de største vitenskapsmenn innen de forskjellige fag er enhetstenkere. Dette gjelder spesielt for fysikk. Newton og Einstein var overlegne enhetstenkere. Fysikkens store triumfer har vært baset på forening. Vi tar det nesten for gitt at framgang i fysikk vil gå mot en mer og mer omfattende enhetlig teori som bringer flere og flere fenomener innenfor rammen av noen få fundamentale prinsipper. Einstein var så sikker på at veien mot enhet var den rette, at han på slutten av sitt liv nesten ikke var interessert i de eksperimentelle oppdagelser som da var i ferd med å gjøre fysikkens verden mere komplisert. Blant fysikere er det vanskelig å finne noen som for alvor er motstandere av enhets-idéen."*

Da jeg begynte mitt arbeid, var forening – på tross av Dysons påminnelse – i høy grad et minoritetsområde. Svært få trodde at vår generasjon ville være istand til å forene noen av de fundamentale kreftene. Gjennom hele mitt liv har jeg vært omgitt av et massesyndrom. Personlig har jeg trodd at vekselvirkning – og ikke masse – var det fundamentale begrep man måtte rette oppmerksomheten mot.

Tidligere forening innen fysikk

Jeg vil begynne med å gi dere en idé om de forskjellige forenende begrep som fra begynnelsen av er blitt benyttet innen fysikk. Figur 2 viser historikken bak forsøkene på å forene de forskjellige fysiske teorier i én enhetlig teori. På slutten av forelesningen skal jeg ha kommet fram til "Teorien for alt" (TOE – Theory of Everything) på bunnen av figuren. For øyeblikket er det der alt det morsomme foregår. Det meste av foredraget vil bestå i å beskrive dagens "Standard-modell

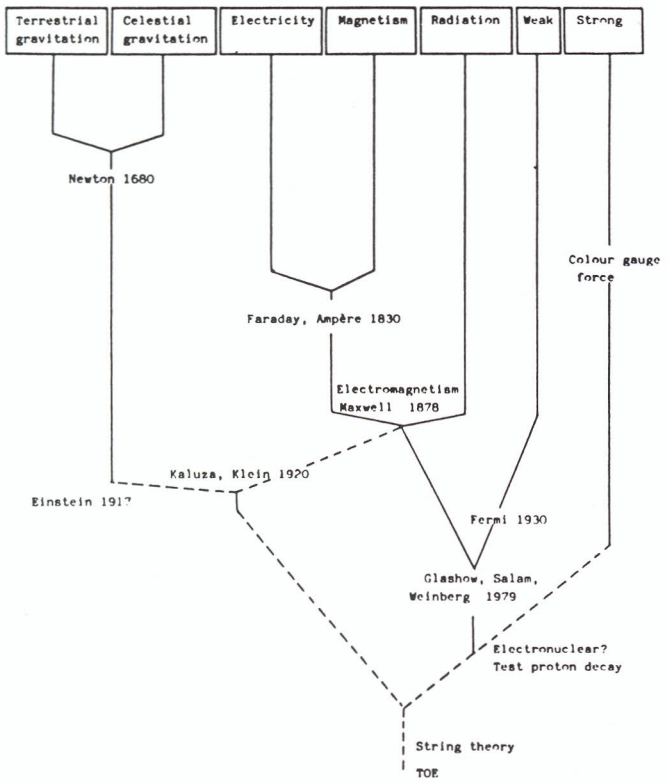


Fig.2. Diagram som viser historikken bak foreningen av fysikkens teorier.

" innen partikkelfysikk. Den er framkommet som et resultat av vår generasjons forsøk på å fastlegge hvilke partikler som er de elementære og på å forene de krefter som virker mellom disse partikler.

Det galileiske prinsipp

Det første navn jeg vil nevne i denne sammenheng er Al-Biruni som levde i Afganistan for ett tusen år siden. Man tenker kanskje ikke på dagens Afganistan som et sannsynlig sted for å drive førsteklasses fysikk. Al-Biruni var, såvidt jeg vet, den første fysiker som eksplisitt ga uttrykk for at de fysiske fenomener på Sola, Jorda og Månen fulgte de samme lover.

Denne meget enkle idé danner grunnlaget for all vitenskap slik vi kjenner den. Uavhengig av dette ble prinsippet 600 år senere postulert og demonstrert av Galilei. Galilei brukte sitt teleskop til å observere skygger som fjell kastet på månens overflate. Ved å korrelere skyggenes retning med sollysets retning, var han istand til å fastslå at *lovene for skyggedannelse på månen var de samme som på jorda*. Dette var den første demonstrasjon av det fundamentale prinsippp – som nå kalles 'Galileisk symmetri' – som sikrer de fysiske lovers universelle gyldighet.

Paulis to teori-kriterier

Under en forelesning i Trieste i 1986, beskrev Dirac hvordan han fikk sine idéer, og understreket forskjellen på to undersøkelsesmetoder innen teoretisk fysikk.

Ifølge Dirac må man først forsøke å oppnå framgang ved å lete etter en matematisk metode som fjerner de inkonsistenser som kan være tilstede i en fysisk teori som ved elektronets elektrodynamikk. De inkonsistenser Dirac tenkte på, var det såkalte uendelighetsproblem. Problemet var at alle høyere ordens beregninger innen kvantefelt-teori gir opphav til resultatet logaritmen til uendelig ($log\infty$). Dirac hadde foreslått at alle disse inkonsistenser skulle samles i en ikke-observerbar "renormalisering" av elektronets hvilemasse. Selv om Dirac hadde foreslått idéen, mislikte han disse såkalte renormaliserbare teorier. Han fortsatte å håpe på at denne siste rest av inkonsistens til slutt skulle forsvinne, og at den endelige teori skulle framstå ren som snø. I den versjon av streng-teorien hvor gravitasjon er forent med gauge-krefter, tror vi at Diracs mål er innen synsvidde.

For det andre må man forsøke å forene teorier som tidligere var adskilte. Dirac sa at denne andre metoden ikke hadde vært noen særlig suksess. Han uttalte seg kanskje på bakgrunn av den oppgitthet som mange av hans generasjon følte, spesielt Einstein, over den manglende suksess i forsøkene på å forene fundamentale teorier.

Vår generasjon har imidlertid i første rekke vært opptatt av den andre metode, og jeg vil i hovedsak snakke om den.

Isaac Newton – foreningen av jordas og himmellegemenes gravitasjon

Den neste som bør nevnes i denne sammenheng er Isaac Newton. Omkring år 1680 hevdet han at "jordas" gravitasjonskraft (som etter Newtons oppfatning var en universell kraft) var den samme som "himmelens" gravitasjon. En slik kraft er langtrekkende. Dens effekt kan registreres i en hvilken som helst avstand, bare dempet med kvadratet av avstanden mellom de to "graviterende" legemer.

Newton innførte en ny fundamental naturkonstant, G ($= 6.670 \cdot 10^{-11} Nm^2kg^{-2}$), som karakteriserer gravitasjonskraftens styrke. I motsetning til andre naturkrefter som både kan være frastøtende og tiltrekkende, virker gravitasjonskrafen alltid tiltrekkende. Dette gir gravitasjonen et fortrinn idet kreftene alltid kan adderes.

Faraday og Ampère – foreningen av elektrisitet og magnetisme (ca. 1820-1830)

Den neste forening av fundamentale krefter ble postulert ca. 150 år senere. I forbindelse med *elektro-*

magnetismen – den såkalte 'livets kraft' (alle kjemiske bindinger er av elektromagnetisk opprinnelse på samme måte som nerveimpulsene) – vil jeg nevne Faraday og Ampère.

Før 1820 ble elektrisitet og magnetisme betraktet som to forskjellige krefter. I den mest betydningsfulle forening i moderne tid var Faraday og Ampère de første til å vise at elektrisitet og magnetisme i realiteten var to aspekter av én enkelt kraft – *elektromagnetismen*. Hvis man betrakter et elektrisk ladet legeme, f.eks. et elektron, og plasserer det i ro på et bord, vil man (ved å plassere et annet elektron i nærheten) kunne detektere en frastøtende elektrisk kraft. Men så snart det første elektronet blir satt i bevegelse, vil man også oppleve en magnetisk kraft som ikke var der på forhånd. Denne kraft kan detekteres ved dens virkning på en kompassnål som plasseres nær elektronet som er i bevegelse.

Det er følgelig en *omgivelsesfaktor* som skiller mellom elektrisitet og magnetisme – *nemlig hvorvidt den elektriske ladning er i bevegelse eller ikke. Dette er essensen i foreningen av elektrisitet og magnetisme.* (Senere skal vi, i forbindelse med en annen forening, elektromagnetismen med den svake vekselvirkningskraft, se betydningen av en tilsvarende omgivelsesfaktor, temperaturen, for det tidlige univers.)

Denne forening av de to uavhengige fundamentale krefter, elektrisitet og magnetisme, dannet grunnlaget for det 19. århundres elektriske strøm-teknologi som avhenger av at elektrisk strøm genereres ved at ledninger beveges mellom de to polene på en magnet. Dette er grunnlaget for elektriske motorer og elektriske dynamoer som deretter førte til elektriske kraftstasjoner. Dette fulgte av den bemerkelsesverdige forening av to av naturens forskjellige krefter. Jeg tror ikke at enkel flikking alene, kunne frambragt det kvantitative grunnlaget for denne utvikling.

Maxwell og foreningen av elektromagnetisme med optikk

Den klassiske elektromagnetisme kulminerte 50 år senere med Maxwells arbeider, som viste at hvis en elektrisk ladning *akselereres*, vil den sende ut energi i form av elektromagnetisk stråling (radiobølger, varmebølger, lys, røntgen-stråler og gamma-stråler, som bare adskiller seg mht. deres bølgelengde). Denne mirakuløse forening av krefter har dannet grunnlaget for det tjuende århundres teknologi hvor radio, TV og røntgen-stråler preger våre liv.

Maxwell forente optikk med elektromagnetisme. Det mest bemerkelsesverdige ved denne foreningen er at han bare hadde ett eneste tall som rettesnor. Ved hjelp av meget enkel apparatur klarte han å verifisere at lysets hastighet kunne uttrykkes ved hjelp av to kjente naturkonstanter (som beskrev *vakuumets elektriske og magnetiske egenskaper*), som forutsagt av hans teori. Dette var en "indirekte" bekreftelse på hans idéer. Uheldigvis døde han bare 48 år gammel og fikk ikke oppleve at elektromagnetisk stråling ble skapt av akselererte elektriske ladninger – slik det ble demonstert av Hertz i Tyskland ti år etter Maxwells død.

Einsteins forening av rom og tid og generalisering av gravitasjonen

Dette leder oss endelig til Einstein som var ansvarlig for en rekke vidtrekkende enhetlige idéer innen fysikken. Hans spesielle relativitetsteori (1905) plasserte rom og tid på lik linje. En konsekvens av dette arbeidet var tidsforsinkelses-formelen, som sier at dess hurtigere et legeme beveger seg, dess lenger er dets levetid – når det observeres fra en stasjonær observatør. Dette spesielle fenomen kan observeres daglig med den største nøyaktighet ved CERNs laboratorier i Geneve, hvor en partikkel som myonet med en gitt levetid (målt av en observatør som følger med partikkelen) for oss, de stasjonære observatører, synes å eksistere lenger og lenger etterhvert som partikkelens hastighet nærmer seg lyshastigheten. Hemmeligheten ved et langt liv er altså å holde seg i bevegelse!

En annen konsekvens av Einsteins spesielle relativitetsteori er det velkjente *forhold mellom masse og energi* uttrykt ved den berømte likning $E = mc^2$, hvor c er lysets hastighet, m er massen til partikkelen i bevegelse og E er dens energi. (I det følgende brukes masse og energi om hverandre; dvs. i formelen $E = mc^2$ velges enhet for masse og energi slik at $c = 1$).

Einstein og gravitasjonsteorien

I sin generelle relativitetsteori (1915) gikk Einstein videre. Han geometriserte fysikken i den forstand at gravitasjonen ble bestemt av krumningen for rom og tid. Krumning er en geometrisk egenskap mens gravitasjon er en av de fundamentale krefter i naturen. Ved en genistrek maktet Einstein å likestille disse to og lyktes derved i *geometriseringen* av fysikken.

Denne idéen for de fleste ny, men Einstein var ikke helt uten presedens i sin tenkning. Hundre år tidligere hadde Gauss hatt den idé at rummet kunne være krumt, og han gjennomførte faktisk eksperimenter for å teste denne mulighet. Gauss opprettet observasjonsposter på tre forskjellige fjelltopper noen kilometer fra hverandre. Han målte vinklene i en trekant som ble dannet av lysstråler som ble reflektert fra den ene stasjon til den neste. Hvis summen av trekantens vinkler hadde vært mindre (eller mer) enn 180°, ville han vist at rommet

var krumt. Han fant et null-resultat – de målte vinkler adderte seg til 180°. Vi vet nå at dette var fordi han arbeidet med avstander på noen få kilometer i stedet for stellare avstander hvor tid-rommets krumning er markant.

Friedmann og Hubble: Penzias og Wilsons stråling og "The Big Bang"

Einsteins gravitasjonsteori gjenopplivet idéen om at tid og rom var krumt. Det neste skritt ble tatt av den russiske fysiker Friedmann som ut fra betraktninger over universets generelle struktur fant at et ekspanderende univers kunne være en løsning av Einsteins likninger. Dette ble eksperimentelt bekreftet av Hubble som oppdaget at fjerne galakser beveger seg vekk fra oss i fullstendig overenstemmelse med disse idéer.

Ved en ren tilfeldighet oppdaget Penzias og Wilson i 1965 en bakgrunns-stråling med en temperatur på 3 K som åpenbart fylte hele rommet. Dette ble tolket som stråling som hadde oppstått $2 \cdot 10^5$ år etter at universet ble dannet. Universets ekspansjon hadde i tiden fra dens dannelse til den ble registrert i våre dager (10^{10} år etter at "tiden" begynte), kjølt strålingen.

Ved å ekstrapolere bakover i tiden fra $2 \cdot 10^5$ år, ville vi (spekulativt) komme til det øyeblikk universet hadde sin begynnelse, øyeblikket for det såkalte "Hot Bang".

Foreningen av gravitasjon og elektromagnetisme

Etter suksessen med den generelle relativitetsteori, og dens forklaring av gravitasjon ved hjelp av rommets og tidens krumning, begynte Einstein å overveie muligheten for at det kunne være en sammenheng mellom gravitasjon og elektromagnetisme – spesielt om elektromagnetismen også kunne betraktes som en geometrisk egenskap ved tid-rommet, slik at de to naturkreftene kunne forenes. Begge disse kreftene følger den samme inverse kvadrat-lov selv om deres styrke ved sammenlignbare avstander er meget forskjellige.

Mange år tidligere hadde Faraday, som illustrert i Fig. 3, utført eksperimenter for å finne en størrelse som kunne forbinde elektrisitet og (Newtons) gravitasjon. Ved å benytte det han mente ville være tilstrekkelig store masser i fritt fall, håpet han å kunne påvise en elektrisk strøm i et nærtstående galvanometer.

Faraday fant ingen effekt. I våre dager tror man at den effekt Faraday søkte burde eksistere, og at den kan ha vært sett, men at den klarest vil vise seg i kosmologiske eksperimenter hvor de masser som "faller" vil være av stellar størrelse.

En slik forening av den generelle relativitetsteori og elektromagnetismen var en drøm Einstein levet og arbeidet med i mesteparten av sitt senere liv. Han brukte

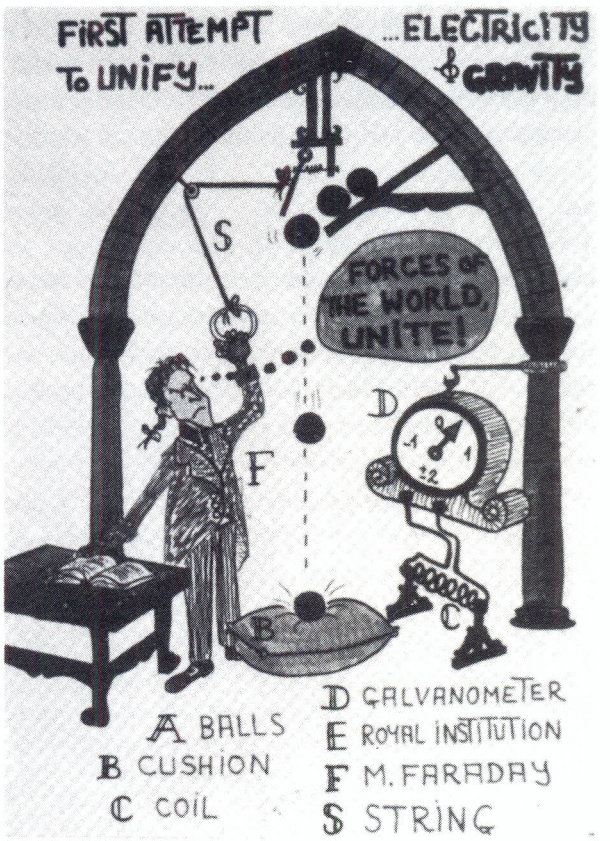


Fig.3. Faradays forsøk på å forene elektrisitet og gravitasjon (de Rújula).

Planck-lengden

Planck-lengden representerer en meget viktig størrelse i bestrebelsen på å forene alle de fire kjente fundamentale krefter. Planck-"lengden" svarer til den lengdeskala hvor gravitasjon må behandles kvantemekanisk, eller med andre ord den skala hvor den endelige forening av den sterke-, den svake-, den elektromagnetiske- og gravitasjons-kraften skulle finne sted. For å utføre eksperimenter på en så liten skala kreves det stor energi. "Planck"-energien som trengs for å undersøke disse små avstandene er av størrelsesorden 10^{20} protonmasser. Planck-lengden er den avstand hvor gravitasjonskraften mellom to protoner er lik den elektriske kraft mellom dem; 10^{-33} cm.

35 år på dette problemet og, såvidt vi vet, lyktes han aldri.

Kaluza – Klein og ekstra tid-rom dimensjoner

Ett forsøk i denne retning fortjener imidlertid å bli nevnt. Det er Kaluzas forsøk, som senere ble utviklet videre av Klein. Kaluza sendte en artikkel til Einstein – jeg tror det var i 1919 – hvor han foretok det dristige skritt å foreslå at et fem-dimensjonalt tid-rom burde vurderes med tanke på en (geometrisk) forening av elektromagnetisme og gravitasjon.

Han viste at krumningen som svarte til den ekstra (femte) dimensjon gir den elektromagnetiske kraft, på samme måte som krumningen i de tre velkjente romdimensjoner pluss tiden gir opphav til gravitasjon.

Hva er fem dimensjoner? Tenk på hvordan en blyant ser ut på lang avstand. Den ser da ut som en tynn linje – én-dimensjonal – og man legger ikke merke til at den i virkeligheten er en sylinder med en to-dimensjonal overflate. På samme måte kan fem dimensjoner se fire-dimensjonal ut hvis den ekstra femte dimensjon er liten nok. (Klein postulerte faktisk at den ekstra dimensjon skulle være "krøllet" sammen til en avstand på ca. 10^{-33} cm (Planck-lengden) for at krumningen som svarte til den femte dimensjon skulle svare til den "korrekte" størrelse for den elektriske ladning, dvs. protonets ladning.) Kaluza sendte sitt arbeid til Einstein for videre forsendelse til publisering. Einstein (selv om han til å begynne med likte idéen med en ekstra dimensjon) hadde sine tvil. Resultatet var at han ble ansvarlig for at publiseringen ble forsinket i to år. Kaluza ble så ille til mote at han oppga å arbeide med grunnleggende fysikk, og øyensynlig begynte å arbeide med teorien for svømming. For meg er moralen at hvis du har en god idé, send den ikke til en stor mann; publiser den selv.

Begrepet elementaritet og kjernekrefter

Så langt har jeg i hovedsak snakket om gravitasjon og elektromagnetisme som var de eneste kjente fysiske krefter inntil den første del av dette århundre. Jeg skal nå ta for meg to andre krefter, kjernekreftene – som ble oppdaget i dette århundre, og som Einstein (og Dirac for den saks skyld) konsekvent neglisjerte.

Det er to typer kjernekrefter, de såkalte "svake" og "sterke". Før jeg diskuterer dem, er det imidlertid nødvendig med kunnskap om de størrelser som vekselvirker via disse krefter.

Begrepet materiens elementaritet er noe som har utviklet seg i tidens løp. Av de fire greske "elementære" størrelser, kunne tre (jord, vann og luft) kalles "elementære" *materie*-størrelser, mens den fjerde (ild) representerte en *kraft*. Hvis man f.eks. hadde arbeidet i 1891, ville man tenkt på atomer som de fundamentale elementære partikler og kjemi som vitenskapen om "elementær-partiklene".

Proton- og nøytron-dubletten, kvarkene og den sterke kjernekraft

Rutherfords eksperimenter (som ble utført omkring 1910) viste at atomene ikke var elementære; i virkeligheten besto de av en liten tett kjerne, (med radius omkring 10^{-12} cm) omgitt av elektroner i sine baner. Det Rutherford gjorde, var å sende positivt ladede heliumkjerner med høy energi mot vanlig materie. Han oppdaget til sin forbløffelse at noen av heliumkjernene kom rett tilbake. Det var så overraskende, fortalte han, at det var som om han hadde skutt med kuler mot et stykke papir og noen av kulene var blitt reflektert og kommet tilbake mot ham. Dette kunne bare forklares ved å postulere at det var en hard, tett, sentral kjerne inne i atomet som inneholdt nesten hele atomets masse. Beregninger viste at denne kjernen var omkring 1/10000 av atomet selv.

Senere, i 1932, viste Chadwick og Joliot-Curies undersøkelser at kjernen selv er bygget opp av enda mindre partikler: protoner (p) og nøytroner (n), hver med en radius på 10^{-13} cm. Det er naturlig å betrakte disse som et par – en *dublett* av objekter, *med nesten like masser*. Protonet adskiller seg fra nøytronet ved å være elektrisk ladet:

$$\begin{pmatrix} p^+ \\ n^0 \end{pmatrix}$$

Selv om protonet er elektrisk ladet (noe nøytronet ikke er), er det visse symmetrier mellom deres "sterke" vekselvirkninger. For eksempel,

$$pp\text{-kraften} = pn\text{-kraften} = np\text{-kraften} = nn\text{-kraften},$$

når elektromagnetismen *ikke tas i betraktning*. (Dette er en god begynnelsesantagelse idet pn-kraften, ved avstander av størrelsesorden 10^{-33} cm, er omkring 1000 ganger sterkere enn den *elektromagnetiske* kraft mellom to protoner.)

En avgjørende egenskap ved disse sterke kjernekrefter er deres korte rekkevidde. Hvis protoner og nøytroner er i en avstand større enn 10^{-13} cm, er den sterke kraft praktisk talt null. Alt som gjenstår ved større avstander er den elektromagnetiske kraft (mellom protonene) og, naturligvis, den universelle gravitasjonskraft.

Kvarker som elementære enheter for protoner og nøytroner

Senere forskning (av Hofstadter omkring 1956) har gjort det sannsynlig at protoner og nøytroner i seg selv ikke er elementære punktpartikler, men at de har en endelig størrelse og derfor er sammensatte partikler. I dag tror vi, på bakgrunn av resultater fra SLAC (Stanford Linear Accelerator Center), at de er bygget opp av enda mindre partikler som kalles kvarker, som selv kan være elementære og punktlignende – en idé som ble introdusert (i 1963) av Gell-Mann og Zweig. Det er seks typer kvarker, og de skiller seg fra hverandre

med en egenskap som kalles "smak" (flavour). Denne "smaks"-egenskapen har pussige navn som opp (u), ned (d), sjarm (c), sær (s), topp (t) og bunn (b).

De seks kvarkene er åpenbart delt i tre dubletter (u,d), (c,s) og (t,b), dvs. tre *nesten like "generasjoner"* av kvark-"*familien*". Hvorfor er det tre generasjoner? Betyr det at kvarkene i virkeligheten ikke er elementære enheter, men at den andre og tredje generasjon på en eller annen enkel måte er knyttet til den første generasjonen?

Et proton er bygget opp av to opp-kvarker og en ned-kvark: $p = (u,d,u)$. Et nøytron er bygget opp av to ned-kvarker og en opp-kvark: $n = (d,u,d)$.

Leptoner og den svake kjernekraft

Tilsvarende de seks kvarkene finnes det også seks lettere partikler – de såkalte leptoner, som også kan inndeles i tre dubletter; (ν_e, e^-), (ν_μ, μ^-) og (ν_τ, τ^-). Her er ν_e, ν_μ og ν_τ de tre nøytrinoene, mens de ladede partiklene e^-, μ^- og τ^- hver er bærere av en elektrisk ladning som i størrelse er lik protonets, men har motsatt fortegn. Eksistensen av ν_e ble postulert av Pauli i 1930, og den ble oppdaget av Reines og Cowan i 1955. (Nøytrinoets masse er meget liten og kan være lik null; den nøyaktige verdi er ennå ikke bestemt.) I deres gjensidige vekselvirkning framviser disse dublettene den såkalte "svake kjernekraft" – en kraft som har en rekkevidde mindre enn 10^{-16} cm. Vi skal komme tilbake til den "svake" kjernekraft senere.

Diracs likning for elementære størrelser; indre spinn og dreieretning

Dette bringer oss til Diracs berømte likning fra 1927, som først ble skrevet ned for elektroner. Denne likning kan både beskrive elementære størrelser som frie elektroner eller frie kvarker, eller til og med frie sammensatte størrelser som protoner og nøytroner (partiklene er frie når de ikke vekselvirker med andre objekter).

Det første viktige poeng med likningen er at på tross av at den kun var basert på Einsteins spesielle relativitetsteori og kvantemekanikken, var den i stand til å gi en korrekt beskrivelse både av elektronets "indre spinn" og "dreieretning" (handedness).

I kvantemekanikken er "indre spinn" et meget viktig begrep. Det innebærer at enhver del av materien (eller energien) oppfører seg som en snurrebass, og derfor er i besittelse av indre spinn.

Videre er *helisiteten eller "rotasjonsretningen"* definert i forhold til en partikkels bevegelsesretning som komponenten av det indre spinn langs eller motsatt bevegelsesretningen. De eneste mulige verdier for helisiteten er 0, 1/2, 1, 3/2, 2.. (i enheter av $\hbar$, Plancks konstant). De tilsvarende indre spinn er $0, \hbar/2, \hbar, 3\hbar/2, 2\hbar....$

Hvor kommer det indre spinn fra? Diracs svar var: Fra foreningen av Einsteins spesielle relativitetsteori med kvantemekanikken!

Diracs likning beskriver partikler med spinn $\hbar/2$ (med bare to helisiteter $1/2\hbar$ og $-1/2\hbar$). Man kan tenke seg at disse roterende snurrebasser – enten roterer i urviserens retning sett langs bevegelsesretningen (høyre-dreiende) eller mot urviserens retning (venstre-dreiende). Denne "spinnende" bevegelse med både korrekt størrelse – og korrekt "dreining" – er noe som kommer ut av likningen på en naturlig måte – det ble ikke puttet inn for hånd – og er en av likningens store triumfer.

Det andre poeng med Diracs likning er at den forutsier at enhver partikkel har en antipartikkel – med samme masse og indre spinn, men med motsatt elektrisk ladning (hvis den er ladet). Videre kan en partikkel og dens antipartikkel annihilere hverandre, og overskuddsenergien går med til å produsere fotoner (γ).

Som jeg allerede har nevnt, kom Dirac fram til sin likning i et forsøk på å forene kvantemekanikken og den spesielle relativitetsteori. Han fant at likningen foruten å beskrive partikler med positiv energi også beskrev partikler med "negativ" energi.

Ingen hadde sett disse objektene med negativ energi. De ville opptre på kjent eselvis; hvis man forsøkte å dra dem forover, ville de bevege seg bakover. Innen kvantemekanikken fant man ingen måte å kvitte seg med disse objektene med negativ energi på. Man måtte finne en ny fortolkning av dem.

Nytolkning av Diracs likning og antipartiklene

Hvordan er Diracs nytolkning som er slik at de negative energiløsninger gir mening? Diracs avgjørende skritt var å la den lavest mulige energitilstand – den med *alle negative* energitilstander fylt med elektroner – være den tilstand hvor ingen partikler kan observeres (den såkalte "vakuum"-tilstand). Han kunne derved tolke ethvert ikke fylt *hull* i en negativ energitilstand som positiv – dette kalte han anti-elektroner.

Alt ved denne tolkning stemmer – inklusive det tilfelle hvor ytre elektriske krefter er tilstede. Det er ikke vanskelig å se at ved denne nytolkningen ville anti-elektronet (dvs. et negativt ladet hull med negativ energi) beskrive et "positron" med positiv elektrisk ladning og positiv energi.

Derved var Dirac i stand til å forutsi eksistensen av en ny partikkel, positronet – elektronets antipartikkel. Den ble da også oppdaget noen få år etter at Dirac hadde postulert dets eksistens. Dette var en triumf, men en enda større eksperimentell triumf var Segré og Chamberlains produksjon av antiprotoner i 1956 og

den senere produksjon av (sammensatte) antideutroner av Zichichi o.a. i 1965.

Diracs likning og vellykkede nytolkning av den, er en av de største triumfer i det 20. århundres fysikk. Dette er altså ett av Diracs store bidrag til teorien for elementærpartikler: hans berømte likning som kan beskrive spinn og helisitet for elementære størrelser som elektroner, kvarker og deres antipartikler, samt det frie proton og det frie nøytron (og *deres* antipartikler).

Kjernekreftene (fortsatt)

For vårt formål er de viktigste krefter (foruten elektromagnetisme og gravitasjon) de to kjernekrefter – den "sterke" og den "svake". For å beskrive noen av deres grunnleggende egenskaper, skal jeg konsentrere meg om fire objekter: protonet p^+, nøytronet n^0, elektronet e^- og nøytrinoet ν_e^0. De øvre indekser (+, –, 0) angir den elektriske ladning.

Den sterke og den svake kjernekraft

Som tidligere bemerket, virker den "sterke" kjernekraft mellom medlemmer av (p^+, n^0)-dubletten. Den "sterke" kraften har en rekkevidde på omkring 10^{-13} cm. Dette er den kraft som er ansvarlig for kjernefisjon og kjerne-fusjon (stjernenes energikilde).

Den svake kjernekraft

I motsetning til den "sterke", er den "svake" kjernekraft nesten universell. Den virker mellom medlemmer av lepton-dubletten

$$(\nu_e^0, e^-) \leftrightarrow (\nu_e^0, e^-)$$

eller mellom

$$(p^+, n^0) \leftrightarrow (\nu_e^0, e^-)$$

eller mellom

$$(p^+, n^0) \leftrightarrow (p^+, n^0)$$

Den svake kjernekraft ble først oppdaget av Madame Curie, og er den kraft som er ansvarlig for den såkalte β-radioaktivitet. Den spiller en avgjørende rolle ved energiproduksjonen på sola. *Den svake kjernekraft er universell, men den er ikke så universell som gravitasjonen.* I 1957 oppdaget man at den "svake" kjernekraft, såvidt vi vet, bare virker mellom partikler med venstre-dreiende spinn. *Det er ingen "svak" kraft mellom høyredreiende elektroner, protoner eller nøytroner, mens høyredreiende nøytrinoer kanskje ikke engang eksisterer.*

Denne forutsigelse for venstre-dreiende kraft-lover bryter symmetrien ved speil-refleksjon. (Et speil reflekterer en høyre hånd til en venstre hånd). Når et (venstre-dreiende) nøytrino reflekteres i et "speil", er det mulig at man ikke vil se noe overhodet.

Den "svake" kjernekraft kalles svak fordi den (ved sammenlignbare avstander) har en styrke som bare er 10^{-5} ganger styrken av den elektromagnetiske kraft. Rekkevidden for den svake kraft er bare 10^{-16} cm (som er en faktor 1000 kortere enn rekkevidden for den sterke kjernekraft).

Foreningen av den svake kjernekraft med elektromagnetismen

Krefter frambrakt ved utveksling av "kraftbærere"

Den grunnleggende idé som tillot vår generasjon å forene elektromagnetismen og den svake kjernekraft (snarere enn elektromagnetisme og gravitasjon, som Faraday og Einstein ønsket) var at begge disse krefter har kraftbærere med spinn én og er "gauge"-krefter ("gauge"-krefter skal defineres om et øyeblikk).

I kvanteteorien er alle krefter – enten de er av gauge eller ikke-gauge typen – frambragt av en utveksling av partikler som jeg kaller "*kraftbærere*". Disse "kraftbærere" må alltid ha heltallig indre spinn $(0, \hbar, 2\hbar,$ osv.), i motstning til materiens "kilde"-partikler som elektroner, nøytrinoer, eller protoner og nøytroner som er beskrevet ved Diracs likning og som hver har spinn $\hbar/2$.

Den grunnleggende egenskap som karakteriserer *gauge-kreftene* (i motsetning til ikke-gauge krefter) er at de oppstår ved en utveksling av "kraftbærere" med *spinn-én.*

Gauge-kreftene og spinn-én "kraftbærere"

Prototypen for alle *gauge-krefter* er elektromagnetismen. Her er "kraftbæreren" – med spinn-én – fotonet, γ – lyskvantet. For å danne seg et bilde av kraften mellom "kilde"-partikler som et proton (p^+) og et elektron (e^-), som hver er bærere av en elektrisk enhetsladning (men med motsatt fortegn), kan vi forestille oss at et proton som beveger seg bortover, etter at det er retardert (forandret retning) sender ut et foton i overensstemmelse med Maxwells idéer. Fotonet absorberes deretter av elektronet, som blir akselerert, igjen i overenstemmelse med Maxwells idéer (se Fig. 4a). Selv om fotonet i realiteten ikke blir sett, er, for en observatør, nettoeffekten av denne utvekslingsprosessen en utveksling av *impuls* mellom protonet og elektronet. Dette er det vi kaller *den elektromagnetiske kraft* i aksjon (se Fig. 4b).

Man kan generalisere disse idéene til *multipler* av "gauge kraftbærere", og finner da at *"gauge kraftbærere" med samme masse* bare forekommer grup-

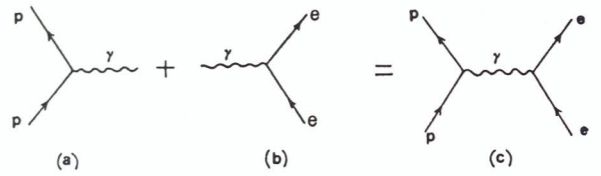


Fig.4. Den elektromagnetiske kraft mellom et proton (p) og et elektron (e^-).

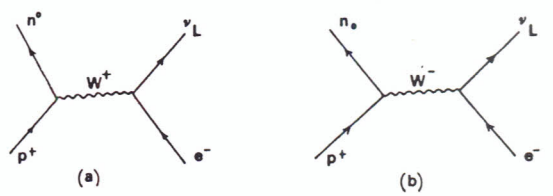


Fig.5. To prosesser som er ekvivalente med protonets β-nedbrytning: (a) Formidlet av W^+, (b) Formidlet av W^-.

pert i multipletter av en bestemt størrelse. For eksempel vil gauge multiplettene bestå av singletter (1), tripletter (3), eller oktetter (8), osv..., men ikke med noe tall inne imellom disse. *Spesielt er det blant gauge kraftbærernes mulige multipletter ingen dubletter. Det er viktig å merke seg dette (det er ikke riktig for ikke-gauge kraftbærere), fordi det spilte en avgjørende rolle ved gauge foreningen og foreningen av den svake og den elektromagnetiske kraft.*

Den forenede elektrosvake kraft

Da John Ward og jeg begynte å studere problemet med å forene kreftene i 1950-årene, var det konvensjonelle synet på de fire fundamentale krefter i naturen som følger:

(a) Vi hadde elektromagnetismen, en gauge-kraft med fotonet som den eneste spinn-én kraftbærer. Den ble oppfattet som *gauge-kraften* par excellence.

(b) På bakgrunn av Hideki Yukawas arbeider trodde man at den sterke kraften mellom protoner og nøytroner hadde tre kraftbærere med *spinn null* (pionene). *Dette var ikke en gauge-kraft. En gauge-kraft må formidles av spinn-én partikler.*

(c) Kraftbæreren for den svake kraft var på den tid ukjent. Det var ikke klart om de hadde spinn-*null* eller spinn-*én* enheter, hvis de i det hele tatt *eksisterte.*

(d) Endelig trodde man at gravitasjon krevde en kraftbærer med spinn *to enheter.*

Med hensyn til kraftbærerne og deres indre spinn, syntes det ikke å være mye felles for de fire kreftene. Situasjonen forandret seg imidlertid som et resultat av de speil-symmetri eksperimenter som ble foreslått av de kinesiske fysikere Lee og Yang. Disse eksperimentene fastslo, i 1957, at de *svake "kraftbærere" (hvis de eksisterte)* måtte ha spinn-én.

Nå kunne den mulige eksistens av *to* av disse kraftbærere, W^+ og W^-, *med samme masse* brukes til å forstå alle de da kjente svake vekselvirkninger – og spesielt, Madame Curies β-decay av nøytronet, dvs.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad \text{(se Fig. 5).}$$

Hvis W^+ og W^- virkelig var spinn-én objekter, ville det gi grunn til å tro at den svake kraft var en gauge-kraft. I så fall ville det være noe besynderlig med W^+ og W^-. Det er fordi W^+ og W^- (bare to av dem) sammen bare danner en dublett (med samme masse). Det skulle imidlertid ikke finnes noen multiplett med bare *to gauge kraftbærere.* Det måtte i det minste være en kraftbærer i tillegg til W^+ og W^-; sammen ville de tre da utgjøre en gauge-triplett.

For oss – John Ward og meg selv – syntes det naturlig (i overenstemmelse med Swinger) at denne ekstra kraftbærer kunne være fotonet, γ, noe som førte til den spennende mulighet at man kunne forene den *svake kraft* og *elektromagnetismen* i en eneste generalisert gauge teori. Den samme idé ble uavhengig framsatt av Glashow og Weinberg.

Vårt første forsøk på å lage en troverdig teori av denne idé viste seg ikke å være korrekt: den var beheftet med en rekke problemer. Ett hovedproblem var at den svake kraft bare var venstre-hendig, mens den elektromagnetiske kraft både var venstre- og høyre-hendig. Hvordan kunne man få noe fornuftig ut av dette for en enhetlig teori? Det andre problemet hadde sammenheng med gauge-partiklenes masser. Hvis fotonet og W^+, W^- utgjorde en gauge-triplett, måtte alle tre ha null masse. Vi visste at fotonet hadde null masse, men vi visste også at W^+ og W^- hadde store masser – store fordi den svake kraft hadde meget kort rekkevidde av størrelsesorden 10^{-16} cm. (Dette innebar en masse som minst var av størrelsesorden 87 proton-masser).

For å løse det første problemet var utgangspunktet den sikre regel Marshak har angitt for teoretisk partikkelfysikk: Når man er i tvil, har erfaring vist at man bør doble det antall partikler man opererer med. Vi fortsatte med å gjøre akkurat det. Vi doblet antallet nøytrale kraftbærere ved å postulere en ny partikkel, et "tungt foton" (kalt Z^0), som da sammen med W^+, W^- og Z^0 ville utgjøre den ønskede triplet av kraftbærere. Den nye "kraftbærer" Z^0 ville frambringe en ny type av *svak* kraft mellom kun venstre-hendige objekter: for eksempel

$$(p + e^-)_L \rightarrow (p + e^-)_L$$

eller

$$(p + \nu)_L \rightarrow (p + \nu)_L,$$

eller

$$(\bar{\nu} + p)_L \rightarrow (\bar{\nu} + p)_L,$$

eller

$$(n + e^-)_L \rightarrow (n + e^-)_L$$

osv.

Dette var vel og bra, men når Z^0 ble behandlet på denne måten, hadde man mistet alle spor av enhet mellom elektromagnetismen og den svake kraft. For å beholde enheten, sammen med gauge karakteren av tripletten, måtte vi benytte alle fire kraftbærerne, W^+, W^-, Z^0 og γ.

Hvorfor var vi så opptatt av å "forene"? Det var på grunn av Diracs første krav om at den endelige teori skulle være fri for inkonsistenser og uendeligheter (infinities). For å få dette til – i en renormaliserbar versjon av teorien – trengte man å blande både Z^0 og γ^0 uløselig sammen.

Det neste problem vi sto overfor, var gaugepartiklenes masser. Fotonet (γ) som gir opphav til elektromagnetismens langtrekkende karakter, må være en partikkel med hvilemasse null. I motsetning til dette måtte W^+, W^- og Z^0 være tunge for å kunne frambringe svake krefter med kort rekkevidde av størrelsesorden 10^{-16} cm. Hvor kom denne massen fra?

Weinberg og jeg foreslo at svaret lå i å forstå de omgivelsesfaktorer som spontant bryter symmetrien. Z- og W-partiklenes store masse måtte oppstå ved en faseovergang (tilsvarende den overgang som inntrer mellom is og vann ved den kritiske temperatur på $0°C$). For eksempel framviser et vannlag en rekke symmetrier som ikke finnes i iskrystaller. Under den kritiske temperatur på $0°C$, er *symmetrien brutt* – over denne temperaturen gjenopprettes symmetrien. *Dess høyere temperatur, dess større symmetri.*

Ett av de mest kjente eksempler på (spontant) symmetribrudd er teorien for ferromagnetisme, som i 1928 ble utarbeidet av Werner Heisenberg. Magneter har nord- og sydpol, noe som betyr at de har en foretrukket retning i rommet; de er ikke symmetriske. Hvis en stavmagnet blir varmet opp (den mister da sine magnetiske egenskaper) blir den symmetrisk – det er ikke lenger noen mulighet for å skille den ene ende fra den andre. Når magneten igjen kjøles, vil den imidlertid gjenvinne sin magnetisering spontant og igjen få tilbake en nord- og sydpol. Vi sier at symmetrien brytes spontant eller er skjult; den manifesterer seg når magneten er rødglødende, den er skjult når magneten er kald. Rent teknisk betegner man en tilstand hvor magnetismen er tilstede som en ordnet tilstand eller en tilstand med spontant brutt symmetri. Vi partikkelfysikere måtte lære betydningen av orden i forhold til symmetri i den utstrekning det gjelder gauge-foreningen av kortrekkende og langt-rekkende krefter.

I partikkelfysikken kan man få til en slik faseovergang ved å postulere nye partikler – de såkalte (ikke-gauge) "Higgs-bosoner" med spinn null. Vi foreslo at W- og Z- partiklene og fotonet alle ville være *masseløse* før faseovergangen inntraff. I tillegg skulle det være en Higgs-dublett (H^+, H^0) og dens antidublett $(H^-, \bar{H}^0)$, hvor alle fire partikler hadde null helisitet. Etter faseovergangen, hvor symmetrien er brutt spontant, vil fotonet fortsatt være masseløst, men $W^\pm$-partiklene vil få masse ved å innkorporere i seg de ladede Higgs $H^\pm$-partiklene, mens Z^0 får masse ved å innkorporere en del av den nøytrale Higgs $(H^0 + \bar{H}^0)$ – mens den resterende del $(H^0 - \bar{H}^0)$ av Higgs-partiklen etterlates som et "*levende*" objekt som må oppdages eksperimentelt. Det er dette som gir de presise verdier på 87 protonmasser for massen til $W^\pm$, og 97 protonmasser for Z^0. Framkomsten av ikke-null verdier for massene av W og Z er det essensielle ved det *spontane* symmetribrudd.

Det totale antall helisitets-tilstander i W, Z og Higgs-systemet forblir det samme før og etter faseovergangen. Før faseovergangen er $W^\pm$ og Z^0 masseløse med bare to helisiteter $(\pm h/2\pi)$, mens de fire Higgsobjektene tilsvarer fire null-helisitetstilstander, slik at det totale antall er: 6 + 4 = 10. Etter faseovergangen (ved en lavere temperatur) er det tre helisiteter for hver av de massive objektene $W^\pm$ og Z $(h, -h, 0)$, pluss en helisitet for den ene gjenværende levende Higgspartikkel (dvs. $3 \times 3 + 1 = 10$, nok en gang).

Når det gjelder den kritiske temperatur, finner man at denne elektrosvake faseovergang må ha skjedd da universet hadde en temperatur omkring 300 protonmasser (For temperaturer målt i protonmasser har man: 1 protonmasse = $10^{13}\,K$; 300 protonmasser svarer dermed til en temperatur på $3 \cdot 10^{15}\,K$). Denne temperaturen på omkring 300 protonmasser var en konsekvens av foreningen av elektromagnetismen med svake krefter. Ifølge Friedmanns arbeid var dette faktisk universets temperatur omkring 10^{-12} sekunder etter Det varme smellet (Hot Bang).

Før faseovergangen fant sted (dvs. mens temperaturen var høyere enn 300 protonmasser), var det bare en *enkelt elektrosvak kraft.* Umiddelbart etter ble den

splittet i to atskilte krefter, *elektromagnetismen* og den *svake kjernekraft* – samtidig med at W^+, W^- og Z^0 fikk masser.

La meg oppsummere. Den sekvens av idéer vi hadde foreslått var omtrent som følger: Man starter med kraftbærerne W^+ og W^- som, ifølge de paritets-eksperimenter som Yang og Lee hadde foreslått, måtte ha spinn én. Hvis disse var gauge kraft bærere, måtte man postulere en tredje fotonliknende kraftbærer Z^0. Z^0 produserer en ny type av svake krefter.

For å redde teorien fra divergenser og inkonsistenser à la Dirac, måtte det gamle foton γ blandes med den nye foton-liknende Z^0. På dette stadiet ville alle de fire partiklene W^+, W^- og Z^0 samt fotonet, ha hvilemasse null.

Massene for de tunge objektene (W^+, W^- og Z^0) framkom på grunn av faseovergangen som, i det tidlige univers, inntraff ved en temperatur på rundt 300 protonmasser. For å få til denne faseovergangen, trenger vi å starte med en dublett og en anti-dublett av (ikke-gauge) Higgs-partikler med spinn null.

Jeg skal gå raskt over den påfølgende eksperimentelle historie innen dette felt.

(a) Vi hadde forutsagt en ny type kraftbærende partikkel, den uladede Z^0, som skulle frambringe en ny type svak kraft. På grunn av den elektriske nøytralitet for den utvekslede Z^0-partikkelen, måtte slutt- og begynnelses-partiklene være de samme. Eksempler er vist i Fig. 6. Slike hendelser ble første gang oppdaget

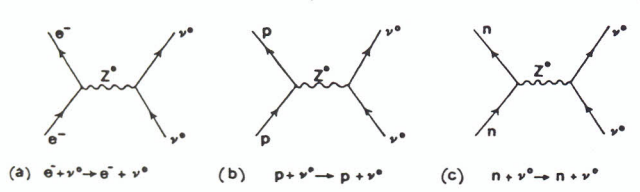


Fig.6. Eksempler på "nøytral strøm" - prosesser formidlet av Z^0-bosonet.

i CERN i 1973 med boblekammeret Gargamelle.

(b) Tilstedeværelsen av denne nye kraft (som skyldes utvekslingen av Z^0) kunne også sees i interferensen mellom foton-(γ^0)-formidlet og Z^0- formidlet vekselvirkning av ett elektron og ett deutron (d^+), som vist i Fig. 7(a) og Fig. 7(b). Med utveksling av bare γ^0, ville den kraft som oppsto normalt kunne betraktes som elektromagnetisk, hvor både venstre- og høyre-hendige elektroner ble spredt i et 50:50 forhold. Men, med innblandingen av Z^0 (med nye venstre-hendige svake krefter, $(p + e^-)_L \rightarrow (p + e^-)_L$ *og* $(n + e^-)_L \rightarrow (n + e^-)_L$), ville 50:50 balansen bli endret. Ved Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)

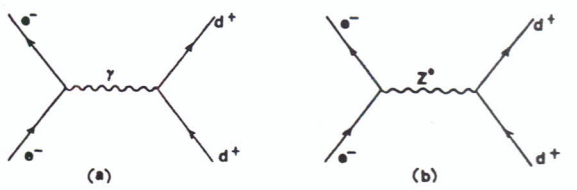


Fig.7. Reaksjonen mellom et elektron (e^-) og et døytron (d^+) kan formidles enten av et foton eller av et Z^0-boson. Interferens mellom de to prosessene, i overenstemmelse med den nye elektrosvake teori, ga indirekte resultater til støtte for teoriens gyldighet.

lette man etter, og fant, asymmetri mellom venstre- og høyre-spredte elektroner nøyaktig i overenstemmelse med det forutsagte.

Begge disse eksperimentelle testene ved CERN og SLAC var imidlertid "indirekte" tester. Man kunne ikke produsere Z^0 i friluft. (Det var ikke nok energi til å produsere frie Z^0-partikler).

Det som trengtes var direkte tester hvor frie Z^0-partikler kunne produseres. Som tidligere nevnt, var massene for Z^0 og $W^\pm$ forutsagt å være av størrelses-orden hhv. 97 og 87 protonmasser, mens det indre spinn måtte være én. I eksperimenter ledet av Simon van der Meer og Carlo Rubbia ble disse partikler, med den forutsagte masse (med 1% nøyaktighet), produsert ved CERN-laboratoriet i løpet av 1983. Spinnene for W^+, W^- og Z^0 ble også funnet å være lik én.

Ved CERNs LEP-eksperiment er man nå igang med å bestemme massen for Z^0 til en tjuedels prosent. Hvis noe avvik fra den elektrosvake teori blir funnet (og av hensyn til feltets framtid håper man at slike avvik vil bli funnet), vil teorien måtte *utvides* – en videreføring som er sterkt ønsket.

Hvorfor må teorien utvides? Grunnen er i all hovedsak at teorien på det nåværende tidspunkt inneholder tjueen parametre som svarer til massene for kvarker og leptoner. Alle disse parametrene er essensielt "frie" parametre som må spesifiseres på bakgrunn av eksperimentell informasjon. Dette er ikke tilfredsstillende for en *fundamental* teori som, ad naturlig vei, burde fastlegge alle disse tall ved hjelp av bare én fundamental masse (f.eks. Planckmassen), – den eneste frie parameter som fastlegger størrelsen på vårt univers og alt det inneholder.

Den sterke kjernekraft som gauge-kraft og Standard-modellen

Den sterke kjernekraft og gluonene som gauge-partikler

Sammen med den "elektrosvake" kraft, som omfatter

den svake kjernekraft og elektromagnetismen, har det vært en parallell utvikling for å identifisere *gauge* aspektene for den sterke kjernekraft. Også denne kraft formidles av kraftbærere med spinn én – de såkalte gluoner (man har altså mer og mer kommet til at gluonidéene er gyldige). Denne utvikling startet tidlig i 1970-årene og kulminerte med at man "indirekte" fant gluonene ved DESY-laboratoriet i Hamburg i 1979.

Denne historien starter med tre dubletter med kvark-smak (u, d), (c, s) og (t, b). Det viser seg imidlertid at det ikke bare er seks, men atten forskjellige kvarker som er atskilt fra hverandre med FARGE. Hver kvark opptrer i tre forskjellige farger som igjen har fått navn som Rød (R), Gul (Y) og Blå (B). Postulering av symmetri mellom disse tre fargene ville gi opphav til *åtte* gauge-partikler – de såkalte gluoner. Det er ingen Higgs-partikkel for gluoner, idet symmetrien forblir ubrutt, og de kraftbærende partikler, gluonene, forblir masseløse. Detaljerte undersøkelser gir støtte til idéen om at sterke kjernekrefter produseres av slike kraft-bærende gluoner.

Standard-modellen

På det nåværende tidspunkt kan vi beskrive alle bestanddeler og alle naturens krefter (unntatt gravitasjon) slik som vist i Tabell 1 og 2.

Tabell 1. *Materiens elementære bestanddeler*

Kvarker

To smaker, tre generasjoner, to helisiteter (venstre og høyre-dreiende: L, R).

Tre farger: rød (R), gul (Y) og blå (B).

u_R, d_R		c_R, s_R		t_R, b_R	
u_Y, d_Y		c_Y, s_Y		t_Y, b_Y	
u_B, d_B	L, R	c_B, s_B	L, R	t_B, b_B	L, R

Leptoner

(ν^0_{eL}, e^-_L)	$(\nu^0_{\mu L}, \mu^-_L)$	$(\nu^0_{\tau L}, \tau^-_L)$
(e^-_R)	(μ^-_R)	(τ^-_R)

Tabell 2. *Fundamentale kraftbærere og Higgs-partikkelen*

Elektrosvake gauge kraftbærere: W^+, W^-, Z^0, γ^0.

W^+, W^- og Z^0 er massive; hver har tre helisiteter $\pm\hbar, 0$

γ^0 har hvilemasse null og to helisiteter $\pm\hbar$.

Gauge kraftbærere for sterke kjernekrefter

Åtte nøytrale masseløse gluoner med helisitet $\pm\hbar$.

Her er det ikke noe spontant symmetribrudd.

Higgs-partikkelen

En gjenværende Higgs-partikkel (med helisitet null) som et resultat av det (spontane) elektrosvake symmetribrudd.

De objekter som er vist i Tabell 1 og 2 utgjør "Standard-modellen" for elementærpartikler pr. 1991. Standard-modellens Higgs-partikkel er enda ikke funnet i laboratoriet (det er heller ikke topp-kvarkene), men resten av partiklene vet man eksisterer.

Videreføring av Standard-modellen

Hvilke idéer utover Standard-modellen er det som kan utvide den? Hovedidéen er knyttet til det som kalles super-symmetri. Dette er symmetri som postuleres å eksistere mellom spin-0 og spinn-1/2, eller spinn-1 og spinn-1/2, eller spinn-2 og spinn-3/2.

Som allerede bemerket kalles partikler med heltallig indre spinn $(0, 1\hbar)$ for *bosoner*, mens partikler med halv-tallig indre spinn $(\hbar/2, 3\hbar/2$ osv.) kalles *fermioner*. Bosoner og fermioner antas å være meget forskjellige partikler – fermionene er "individualister", mens bosonene er "kollektivister" – men supersymmetri kan forbinde dem på en presis måte. *I en hånvending ville supersymmetri doble antallet partikler når det gjelder Standard-modellen.* I tillegg til W^+, W^-, Z^0 og γ, ville også deres partnere med halvtallig spinn (som kalles Winos, Zinos og fotinos) eksistere, samt spinn-null "venner" av kvarker og leptoner, de såkalte skvarker og sleptoner.

Supersymmetri er en vakker tanke. Det ville i betraktelig grad redusere Diracs uendeligheter og inkonsistenser, selv om de ikke ville bli eliminert fullstendig. Dette er imidlertid en symmetri som ennå ikke har noe eksperimentell støtte (vi tror at dette skyldes den lave energi som er tilgjengelig med dagens akseleratorer).

Andre idéer utover Standard-modellen er knyttet til:

(a) Kvarkene og leptonenes elementære natur. Er det et neste lag av elementære størrelser i stedet for disse? Dette ligger i kortene fordi tre liknende familier er to for mange.

(b) Høyre-hendige svake krefter kan eksistere og vil kunne vise seg ved høyere energier (dette vil gjøre det nødvendig at en ny $Z^{0\prime}$ eksisterer og gjenoppretter venstre- høyresymmetrien ved meget høye temperaturer, høyere enn massene for Z^0 og $Z^{0\prime}$).

Den store forening av elektrosvak- og sterk kraft

I det stadiet av forening som ligger etter den enhet som Standard-modellen representerer, forsøker vi å forene den sterke kjernekraft med den "elektrosvake" kraft. Idéene følger direkte fra den elektrosvake forening – med nye gauge kraftbærere og nye ikke-gauge Higgspartikler. Denne teori er kjent som *Den store enhetlige teori – Grand Unified Theory.*

En forutsigelse som følger av slike teorier er at

protonet til slutt nedbrytes. Dette er for den tidlige kosmologis vedkommende ønskelig. Hvis protonnedbrytning finner sted (riktignok meget langsomt, med en antatt levetid på 10^{32} år) sammen med brudd på tidssymmetrien, vil man kunne forstå hvorfor det er så *få antiprotoner* i universet.

Fra de eksperimentene som pågår i dype fjell-huler er det ikke noen avgjørende resultater som tyder på at protonet brytes ned. Framtidige eksperimenter må kanskje utføres på månen for å unngå jordas bakgrunn av nøytronstråling.

Tidlig kosmologi

Et annet felt hvor partikkelfysikken har gitt viktige bidrag er forståelsen av universets tidlige utvikling, og det i en slik grad at tidlig kosmologi er blitt synonymt med partikkelfysikk. Dette er fordi faseoverganger som skiller den ene kosmologiske tidsperiode fra den andre, også er den mekanismen som konverterer den endelige enhetlige kraft til to (gravitasjon pluss elektronukleær), til tre (elektrosvak pluss sterk kjernekraft pluss gravitasjon) og endelig til fire (elektromagnetisk pluss svak kjernekraft pluss sterk kjernekraft pluss gravitasjon) etterhvert som universets temperatur avtar. Det faktum at disse overgangene skjer ved høye temperaturer (fra 300 protonmasser til 10^{20} protonmasser) samt det faktum at temperaturer høyere enn 10^6 protonmasser neppe vil bli realisert på jorda med akseleratorer, gjør det tidlige univers og kosmologi til et attraktivt felt for partikkelfysikere. Det er det eneste laboratorium som – i det minste indirekte – er egnet til å teste våre teorier (ved eventuelle oppdagelser av rester av tidlige områder med høy temperatur som fortsatt kan eksistere).

Man kan skille mellom tre kosmologiske tidsperioder:

(a) Den siste tidsperiode startet med Penzias-Wilsons stråling omkring 10^{12} sekunder (10^5 år) etter Det varme smellet, og fortsetter til vår tid – 10^{18} sekunder etter Det varme smellet. Dette er *tidsperioden for masse i stor skala* da galakser og supergalakser utviklet seg. Vi kjenner fysikken i denne tidsperiode, men astrofysikken er fortsatt uklar.

(b) Den andre, den såkalte *Elektrosvake tidsperiode*, startet med faseovergangen som tilsvarer det spontane brudd i den elektrosvake symmetri ved en temperatur omkring 300 protonmasser – som, ifølge Friedmanns beregninger, fant sted etter omkring 10^{-12} sekunder – og fortsatte fram til utsendelsen av Penzias-Wilson strålingen.

(c) Den tredje og tidligste tidsperiode er den *spekulative tidsperiode*, som kan ha vart fra 10^{-43} sekunder etter Det varme smellet og fram til 10^{-12} sekunder. Under denne lange perioden kan to-dimensjonale streng-teorier ha gitt opphav til det fire dimensjonale tid-rom slik vi kjenner det idag.

Blant de problemer som er forbundet med denne tidsperiode er problemer forårsaket av den kosmologiske konstant og problemet med at man ikke observerer magnetiske monopoler.

Einstein introduserte den kosmologiske konstant i den generelle relativitetsteorien for å skaffe en frastøtende kraft (i tillegg til den tiltrekkende gravitasjonskraft) slik at universet ble statisk. Men da Hubble oppdaget at universet faktisk utvidet seg, var det ikke lenger noe behov for den kosmologiske konstant. (Einstein kalte innføringen av den kosmologiske konstant sitt livs største blunder.)

Vi tror at det er gode grunner til å sette denne konstant lik null i enhver *naturlig* teori for mikroskopisk fysikk. En slik grunn har i det siste blitt framhevet i teorien for "markhull" (wormholes), som kan forbinde vårt Univers med et annet (baby) Univers. Dette kunne være en del av den spekulative tidsperiode 10^{-43} sekunder etter Smellet.

I denne tidsperiode ville også den spekulative inflatoriske fase i universets ekspansjon være inkludert. Den hurtige utvidelse som denne inflasjon innebærer, ville garantere at tettheten av magnetiske monopoler ville bli uttynnet til dagens grense for observasjoner. (Dirac hadde tidligere innført slike monopoler for å sikre symmetri mellom elektrisitet og magnetisme. De er nå en del av enhver "Grand Unified Theory" med respekt for seg selv.)

Ikke-akselerator eksperimenter og kosmologi

Det er mange dilemma innen partikkelfysikk og kosmologi hvor ikke-akselerator eksperimenter er nødvendige, som f.eks. ved nøytrino-oscillasjoner. Kan f.eks. ν_e, ν_μ, ν_τ gå over i hverandre, og eventuelt over hvilke avstander? Kan mørk materie (Dark Matter), – som er elektromagnetisk usynlig, og bare viser sitt nærvær via svake krefter eller gravitasjon, og som, ifølge moderne kosmologi, kan utgjøre så mye som 90% av vårt univers – i det hele tatt eksistere? Kan de allestedsnærværende nøytrinoer, tross alt, være den mørke materie?

Forening av gravitasjon med elektrokjernekrefter

Vi kommer nå til det siste stadiet i forsøket på å forene naturens krefter. Kan gravitasjon også forenes med de øvrige kreftene, og dermed realisere Faradays og Einsteins drøm? Her kommer jeg tilbake til Diracs første kriterium. Det som hittil hadde stoppet denne teorien fra i det hele tatt å bli overveiet, var bekymringen over de uendeligheter som gravitasjonsteorien avstedkom-

mer så snart den benyttes til høyere ordens beregninger. (Noen, men uheldigvis ikke alle uendeligheter forsvant ved å benytte supergravitasjons-idéer.)

Dette Dirac-problemet har i det siste blitt løst ved å postulere at de fundamentale størrelser ikke er partikler, men "strenger" som danner sløyfer av *endelig* størrelse med dimensjon Planck-lengden. Disse strengene vibrerer med moder som en fiolinstreng, og gir opphav til spinn null, $1\hbar$, $21\hbar$, $3\hbar$, $4\hbar$.... og, i tillegg, i den supersymmetriske versjon, til spinn $\hbar/2$, $3\hbar/2$, $5\hbar/2$ ....

Hvis de fundamentale størrelser ikke lenger ville være punkt-partikler, men bittesmå strenger, ville fysikken nok en gang skifte paradigme. Den matematikk som trengs, er matematikken for 2-dimensjonale Riemannflater; det fire-dimensjonale tid-rom framkommer som sekundære begreper.

Det er en rekke fysiske krav som må tilfredsstilles av en streng-teori:

(a) Alle kilde-partikler (kvarker og leptoner) pluss kraftbærere (som gluoner, fotoner, $W^{\pm}$, Z^0) pluss Standard-modellens Higgs-partikkel, må falle innenfor teoriens ramme.

(b) Det må være en geometrisk teori idet den må inneholde Einsteins gravitasjonsteori.

(c) Den må beskrive gravitasjon uten uendeligheter.

Det å oppfylle disse tre betingelsene ville være et mirakel, men dette mirakel ser ut til å finne sted, ihvertfall i 10-dimensjonal rom-tid hvor en *entydig* superstreng-teori etter høsten 1984 er blitt utviklet av Green og Schwartz. Det viktige poeng ved denne teori er at Einsteins gravitasjonsteori framkommer som en spesiell undergruppe av strengteorien. Dette rettferdiggjør bildet av Glashows slange (Fig. 1) som spiser sin egen hale, dvs. mikrofysikken på Planck-skalaen ($10^{-33}cm$) forenes med den makrofysikk (på universets størrelse $10^{28}cm$) som beskrives av Einsteins gravitasjonsteori. Dette er etter mitt skjønn den endelige enhetlige teori.

Den rom-tid som framkommer fra denne unike streng-teori var, som jeg sa, 10-dimensjonal. En overgang til det fire-dimensjonale virkelige tid-rom, vil kreve en Kaluza-Klein-liknende kompaktifisering av seks *rom-dimensjoner*. Vi må også kunne gå ned fra Planck-massem på 10^{20} protonmasser til de 100 protonmasser som karakteriserer W og Z partiklene.

Uheldigvis ser det ut til at den entydighet i ti dimensjoner som gjorde streng-teoriene så attraktive, ikke gjelder når man går over til fire dimensjoner: en million eller flere teorier (etter kompaktifiseringen) synes like gyldige. Dette er ett av de teoretiske dilemma som strengteoriene konfronteres med for tiden – i tillegg til det grunnleggende eksperimentelle dilemma: å bygge en akselerator med Planck-energi (10 lysår lang). Kan strenger representere "Teorien for alt", og kombinere alle kjente kildepartikler, kvarkene og leptonene, pluss de kraftbærere vi kjenner til, og Higgsen, pluss deres vekselvirkninger? I så fall ville det representere kulminasjonen av alle forsøk hittil på å forene de grunnleggende krefter i naturen.

∞

Læringsmiljøet ved Fysisk institutt, UiO

Carl Angell og Anders Isnes *

Høyere utdanning har gjennom offentlige diskusjoner og utredninger vært gjenstand for stor oppmerksomhet de siste årene. Spesielt har læringsmiljøet for studentene vært i fokus.

Utfordringen

Ved forskjellige anledninger har ansatte ved Fysisk institutt deltatt i diskusjoner om begynnerundervisningen i fysikk ved Universitetet og de problemene som studentene har ved overgangen fra videregående skole til universitet. Kritikken fra eksterne kilder har vært at overgangen fra skolens fysikk til fysikken på Universitetet (spesielt i mekanikk) er for vanskelig. Særlig volder den matematiske behandlingen store problemer, selv for mange gode studenter, og de skremmes bort fra videre fysikkstudier.

Fra internt hold blir studentenes studieinnsats kritisert. De arbeider kanskje ikke godt nok fra starten

*Skolelaboratoriet for naturfagene, fysikk, Universitetet i Oslo.

av semesteret. Fysikkfaget er på mange måter et modningsfag som krever aktiv deltakelse fra første stund. Studentene burde delta mer aktivt på kollokviene og ikke i så stor grad være passive tilskuere.

Fysisk institutt har gjennom flere år arbeidet med å organisere undervisningen slik at studentene skulle få gode studiemuligheter. Det har foregått en bevisst utvikling av undervisningstilbudet de siste årene. Forelesere har tatt initiativ til evaluering av undervisningsopplegget. I tillegg gjennomfører Fysisk Fagutvalg en evaluering av fysikkursene hvert semester.

Høsten 1990 fikk vi utfordringen om å komme med forslag som kunne videreutvikle læringsmiljøet ved begynnerkursene ved instituttet.

Organisering av undervisningen

På kurset FYS 111 Mekanikk, som er gjenstand for den første undersøkelsen i prosjektet "Videreutvikling av læringsmiljøet ved Fysisk institutt", bestod undervisningstilbudet av 4 timer forelesning og 4 timer kollokvier før 1990. Fra 1990 ble undervisningen organisert slik:

- 4 timer forelesning,
- 2 timer kollokvier,
- 2 timer regneverksted ledet av hovedfagsstudenter,
- fast treffetid for foreleser og kollokvieledere,
- 4 obligatoriske innleveringer av regneoppgaver,
- 1-2 frivillige prøveregninger.

Foreleser utarbeider ukeplaner som viser hvilket teoristoff som vil bli gjennomgått og hvilke oppgaver som skal brukes på kollokvier og regneverksteder. Med denne planleggingen får studentene gode muligheter for forberedelser.

Tiltak våren 1991

FYS 111 er det første fysikkurset som studentene følger. De er vanligvis helt i starten av studiet ved Universitetet, og de fleste er ukjente for hverandre. Den økte graden av selvstudier er en stor utfordring for studentene.

For å øke egenaktiviteten og forberedelsene til studentene, og for å øke mulighetene for sosial kontakt dem imellom, opprettet vi såkalte arbeidsgrupper på 4-5 studenter innenfor kollokviegruppene. Disse arbeidsgruppene skulle utgjøre et arbeidsfellesskap både i forhold til forberedelser og i forhold til arbeidsoppgaver på kollokviene. Ansvaret for framlegging av oppgaver blir på denne måten flyttet fra individplan til gruppeplan. Erfaringene viser at studentene ofte er vanskelige å få i tale på kollokviene.

Mål og metoder

Hovedmålet med undersøkelsen var å finne ut om studentene og vi har grunn til å være fornøyd med dagens organisering av undervisningstilbudet, eller om vi eventuelt bør endre på noe av det organisatoriske og kanskje også måten vi lar fysikkfaget framstå for studentene på.

Vi har brukt følgende metoder i dette arbeidet:

- Studentene har svart på et spørreskjema.
- Noen av studentene er intervjuet.
- Vi har vært tilstede på noen forelesninger, kollokvier og regneverksteder for å ha en bakgrunn for å tolke studentenes reaksjoner.

Spørreskjemaet inneholdt spørsmål om bakgrunnen til studenter som velger å studere fysikk, hvor mye de deltar i de undervisningstilbudene som instituttet har tilrettelagt, hvordan de selv vurderer utbyttet av de forskjellige undervisningstilbudene, og hvordan de ser på sin egen læring og de metodene som brukes.

Resultater

Vi fikk svar fra 122 studenter. Av disse var det 101 som gikk opp til eksamen; 81 bestod og 20 strøk. I vårt materiale har vi en gjennomsnittskarakter på 2,82 blant de som bestod eksamen og en strykprosent på 20. I følge studieadministrasjonen var det 129 som møtte til eksamen. Gjennomsnittskarakteren var 2,87 og strykprosenten var 23.

Bakgrunnsvariable

Studentenes gjennomsnittsalder var 21.7 år. Det deltok 26 % kvinner og 74 % menn. Gjennomsnittskarakterene fra videregående skole i matematikk og fysikk (3FY og 3MN) var 4.6 for begge fag. Det er høyt i forhold til landsgjennomsnittet som ligger på omtrent 3.0. 42 % svarte at de hadde planer om hovedfag i fysikk!

Studentenes vurdering av undervisningen

Generelt kan vi si at studentene er godt fornøyd med den måten Fysisk institutt har tilrettelagt undervisningen på. Intervjuene forsterket dette inntrykket. Studentene gir uttrykk for at instituttet "legger seg litt i selen" for å gi gode studiemuligheter.

Studentene har svart på spørsmål om deres utbytte av forelesninger, kollokvier, regneverksteder og arbeidsgrupper. På hvert spørsmål skulle de krysse av på en skala fra 1 (lite) til 4 (mye).

Som vi tidligere har bemerket, mener studentene at de har bra utbytte av undervisningstilbudet. Kollokviene skårer høyest. Av tabellen ser vi at utbyttet av regneverkstedene kommer dårligst ut. I de intervjuene vi har gjort med et utvalg av studenter, har vi

Tabell 1
Studentenes utbytte av undervisningen.
(F: forelesninger; K: kollokvier;
R: regneverksteder; A: arbeidsgrupper)

	1(lite)	2	3	4(mye)	gj.snitt	antall
F:	5,1%	33,3%	48,7%	12,8%	2,7	117
K:	6,8%	12,0%	41,9%	39,3%	3,1	117
R:	28,4%	19,3%	34,1%	18,2%	2,4	88
A:	19,8%	16,8%	45,5%	17,8%	2,6	101

fått et temmelig entydig inntrykk av at de som følger regneverkstedene har stort utbytte av dem. Flere mener at det er lettere å spørre på regneverkstedene og legge fram det de ikke skjønner.

Omtrent halvparten av studentene har benyttet regneverkstedene. Vi tror at flere ville ha utbytte av dette tilbudet og vil oppfordre til en sterkere anbefaling av regneverkstedene. Blant annet bør studentene gjøres oppmerksom på at de kan arbeide med de obligatoriske regneoppgavene på disse verkstedene.

FYS 111 framstår som et nokså arbeidskrevende og vanskelig kurs for mange. Gjennom intervjuene har vi prøvd å finne ut noe mer om hvorfor studentene mener dette. De fleste gir klart uttrykk for at forelesningene er godt strukturert og gjennomarbeidet, og vi ser av tabell 1 at de fleste mener å ha utbytte av dem. Men vi har festet oss ved noen trekk som kom fram i samtalene:

- Tempoet er høyt. Det er mye stoff de skal gjennom. Det gjelder å henge med og notere. Det blir liten tid til bearbeiding og refleksjon.
- Matematiseringen faller vanskelig for mange. Dette er et kjent problem, nemlig å anvende den matematikken som de har lært til å formulere seg presist i fysikken om lover og sammenhenger. Noen hevder at det de oppfatter som fysikk, drukner i denne presise og stringente matematiske behandlingen. Det blir etterlyst at stoffet blir belyst mer med praktiske eksempler og anskueliggjort ved demonstrasjoner.

Når vi skal vurdere studentenes reaksjoner, er det viktig å huske at de hører til de beste realistelevene fra videregående skole. Vår tolkning av studentenes svar er at vi i forelesningene kanskje legger for liten vekt på den grunnleggende og kvalitative begrepsdannelsen. I en læringsprosess mener vi det er viktig med en mer kvalitativ tilnærming til et begrep før en mer presis matematisk behandling finner sted. I den forbindelse er det også viktig med gode demonstrasjoner.

Vi vet fra andre undersøkelser som er foretatt ved instituttet, at mekanikk på mange måter er et problemfylt område av fysikken. Disse og andre undersøkelser peker på hvor viktig det er å arbeide med den grunnleggende, kvalitative forståelsen. Dersom studentene for eksempel ikke er i stand til å identifisere kreftene som virker på et legeme, blir det å regne på problemene ganske verdiløst, selv om svaret kan bli riktig.

Tidspresset er påtakelig i forelesningene. Det er ikke bare studentene som nevner dette. Foreleser selv synes tiden er meget knapp for å få behandlet temaene på en forsvarlig måte. Hvordan skal det da bli mulig å få inn noe mer kvalitativ behandling og demonstrasjons-undervisning?

Er pensum for stort? Kanskje ikke alt stoffet skal behandles i forelesningene? Hva kan vi overlate til studentene? Vi er klar over at dette er og har alltid vært viktige spørsmål for forelesere og for de som planlegger kurs. Men det er likevel grunn til å stille spørsmålene spesielt for startkurset i fysikk. For målet er vel også å motivere for videre fysikkstudier?

Arbeidsgruppene, som er et nytt tiltak, ser ut til å ha fungert etter hensikten for de som har deltatt. Ordningen har fungert positivt både i forhold til faglig utbytte og til sosial kontakt mellom studentene. Kollokvielederne har i følge dem selv og studentene gjort aktiv bruk av gruppene. Et flertall av studentene anbefaler ordningen for seinere kurs.

Vi har sett på om det er noen sammenheng mellom det faglige utbytte av arbeidsgruppene som studentene oppgir og karakterer. Det viser seg at gjennomsnittskarakteren er praktisk talt lik for alle kategorier fra "lite" til "mye" utbytte. Det er med andre ord ikke

noen forskjell på flinke og svake studenter med hensyn til deres faglige utbytte av arbeidsgruppene ut fra disse dataene.

Vi har også sett på utbyttet av forelesningene, kollokviene og regneverkstedene i forhold til karakterer. Det ser ikke ut som grupper av studenter med gode eller dårlige karakterer skiller seg ut på noen måte. Derimot viser det seg at studentene med de beste karakterer fra videregående skole gjør det klart best i FYS 111 også.

Hva fremmer læringen best?

I undersøkelsen har vi også spurt studentene om hva de mener fremmer læringen best i kollokviene. Grovt sett kan vi slå fast at de fleste ønsker en veksling mellom kollokvieleder og arbeidsgruppene når det gjelder ansvaret for gjennomgåelse av oppgaver.

Forslag til nye tiltak

Vi mener at kurs av et slikt omfang som fysikkursene i 20-gruppa, trenger et faglig-pedagogisk forum som kan være med på å skape en teamholdning hos de som er involvert i undervisningen. I faglig-pedagogisk forum kan man kontinuerlig ta opp til drøfting hvordan kurset forløper, studentenes frammøte, innlevering av obligatoriske regneoppgaver, problemer i undervisningen, metodiske utfordringer etc.

Kombinasjonen forelesninger/ kollokvier/ regneverksteder gir gode muligheter for innlæring i flere trinn. Kollokviene og regneøvelsene skal utdype og innøve ved hjelp av eksempler og oppgaver, begreper som er gjennomgått i forelesningene. Dette mener vi kan utvikles videre slik at sammenhengen mellom forelesninger og kollokvier blir enda bedre. Eksempler og noe teori kan følges opp i kollokviene. Men det forutsetter at kollokvielederne er godt orientert om hvilke eksempler som blir gjennomgått i forelesningene, og om eksempler og teori som ønskes fulgt opp i kollokviene. Det foreslåtte forumet kan være et egnet sted for drøftinger av disse utfordringene. Et slikt tiltak vil også kunne lette noe på presset i forelesningene.

Det er et tankekors at vårt institutt ikke holder vedlike demonstrasjonslaboratoriet langt bedre enn nå. Forholdene bør legges bedre til rette for foreleserne for en skikkelig demonstrasjonsundervisning. Da er det ikke bare snakk om å vedlikeholde samlingen med godt utstyr, men også å holde seg à jour med utviklingen av nytt utstyr på området.

Tanken bak dette prosjektet er at et bedre læringsmiljø vil gi økt læringsutbytte for studentene. Vi kan ikke vente at alle gjør bruk av de tilbudene som intituttet legger til rette, men det er et mål at så mange som mulig gjør bruk av dem. Vi ønsker at studentene skal komme raskt inn i studiene etter semesterstart og arbeide aktivt med stoffet.

Det er vårt håp at rapporten "Videreutvikling av læringsmiljøet ved Fysisk institutt" kan være med på å gi et bidrag til denne utviklingen.

∞

Rondablikk-seminar i kondenserte fasers fysikk og kjemi, 1991, del 2

Olav Steinsvoll *

Vi fortsetter omtalen av noen av oversiktsforedragene på Rondablikk-møtet siste høst. Den første delen står i FFV nr. 4, 1991. Til slutt gir vi et sammendrag av noen av innleggene innafor sesjonen om nanometerfysikk.

*Institutt for energiteknikk, Kjeller.

Høytemperatur superledere (HTSL) etter 5 års forskning

I 1986 fant sveitserne *Bednorz og Muller* ved IBM i Zürich superledning (SL) i et oksid med sammensetning $(La, Ba)_2CuO_4$ med en overgangstemperatur T_c på rundt $30K$. De fikk Nobelprisen for dette i 1987, sannsynligvis den "raskeste" Nobelprisen noensinne. Oppdagelsen startet en vitenskaplig konkurranse mel-

lom de store forskingsgruppene ute i verden som også er uten sidestykke i vitenskapens historie. Nye stoff med stadig høyere overgangstemperaturer ble oppdaget, og forventningene om fantastiske anvendelsesmuligheter ble skyhøye. Nå, 5 år og over 20 000 publikasjoner etter, er tilstanden blitt mer normal, og de store avisoverskriftene er blitt sjeldnere. En er kommet ned til et møysommelig detaljforskingsarbeid som kanskje kan synes kjedelig for verdenspressen.

Professor *Kristian Fossheim*, NTH, fortalte om hovedlinjene i utviklinga på feltet i disse 5 åra som er gått. De første forbindelsene med formelen ovenfor kalles nå "214". Så kom forbindelser av typen $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ eller "$YBCO123$" med $T_c = 92K$. Disse er altså SL ved flytende nitrogen-temperatur ($77K$). De sist funne forbindelsene med $T_c = 125K$, er av typen $Tl_2Ba_2Ca_nCu_{1+n}O_{6+2n}(n = 0, 1, 2)$, der "$Tl2223$" er rekordholderen. De siste nye stoffene er de såkalte "fullerider" med sammensetninga X_3C_{60}, der C_{60} er "fotballmolekylet" fulleren, og der X er alkalimetall-atomer (Rb, Cs). Den høyeste T_c er rundt $30K$. Dette er naturligvis materialer fra en helt annen stoffklasse. De blir ofte kalt organiske superledere p.g.a. at de tar utgangspunkt i C_{60}.

Alle disse stoffene (unntatt de sistnevnte) har felles kjennetegn ved at krystallstrukturen gir opphav til lag eller sjikt av CuO_2-typen. Ved økende grad av doping går stoffene gjennom flere faser: antiferromagnetisk, halvleder, metall med sterkt korrelert elektronsystem (med SL-fase) og paramagnetisk metall.

Superledningen

SL skjer i CuO_2-sjiktene. Siden stoffene er svært anisotrope, blir de ofte å oppfatte som nær todimensjonale. Forbindelsen $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ er best studert. Den har såkalt perovskitt-struktur. Enhetscella har egentlig plass til 9 oksygen-atomer, mens formelen foran antyder i underkant av 7 oksygenatomer, $0 < x < 1$. Det er derfor et betydelig antall manglende oksygen-atomer, "vakanser" eller oksygen-"hull" tilstede. SL-egenskapene, slik som størrelsen på T_c, avhenger sterkt av vakansenes konsentrasjon og ordningsmønster. Stoffet har en høytemperatur tetragonal fase, men allerede langt over romtemperaturen ordner vakansene seg, og stoffet blir svakt ortorombisk deformert. En kan se på den lagvise strukturen som bestående av vekselvise ladnings-reservoarer (en-dimensjonale CuO-kjeder og andre elementer) og ledningsområder (to-dimensjonale CuO_2-plan), se figur 1. Ved netto overføring av elektroner fra CuO_2-lagene til reservoarene får CuO_2-lagene hull som ladningsbærere. En har for tiden in-

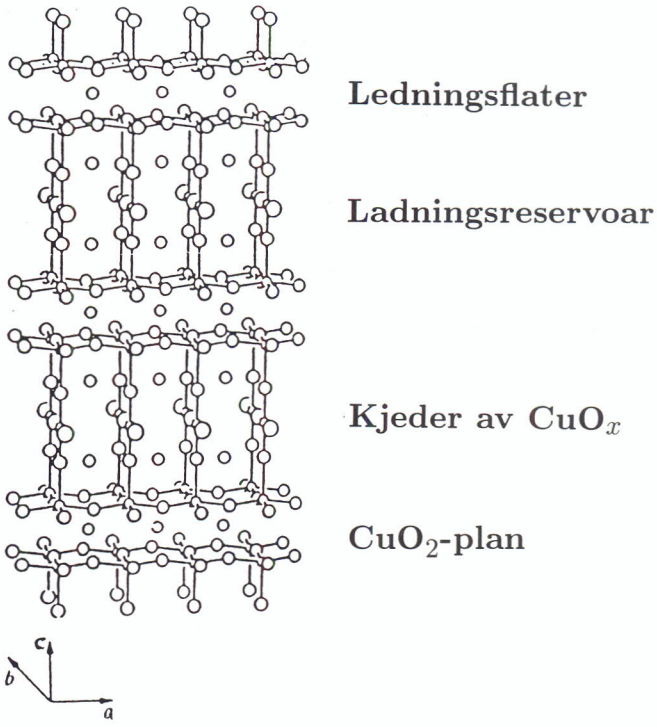


Fig.1. 1,2,3 superlederen $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ har sjikt av CuO_2 som virker som ledningsplan, mens kjeder av CuO virker som ladningsreservoar.

gen bestemt mikroskopisk teori, og dermed heller ingen helhetlig forklaring på alle effektene en har funnet. Imidlertid rekker den makroskopiske formulerte *Ginzburg-Landau teorien* langt for mange formål, særlig i beskrivelsen av magnetiske egenskaper.

Materialtilvirkning

Store framskritt innen HTSL er skjedd innafor materialpreparering og karakterisering der en har lykkes i å renframstille én-krystallinske SL-materialer eller keramer med bare én fase tilstede. Nå kan en derfor gjennomføre virkelige sammenlikninger av ulike målinger utført ved forskjellige laboratorier på veldefinerte systemer.

Men en strøm i en leder setter opp et magnetfelt i stoffet som leder den. I SL-tilfellet er magnetfeltet kvantisert i flukslinjer som igjen danner fluksbunter som kan "skli" eller "hoppe" og derved forårsake energitap og varmgang, temperaturen øker, og plutselig er en SL blitt en NL! For å unngå dette, har en prøvd å bygge inn små partikler som kan danne forankring for flukslinjene. På denne måten har en klart å øke strømtettheten i bestemte SL-stoffer til 10^7 A/cm^2 i tynne filmer og 10^5 A/cm^2 i bulk.

Hva vil framtida bringe?

Studiet av de nye SL-materialene har gitt faststoffysikken en kraftig innsprøyting av nye idéer og ukonvensjonelle tenkemåter. Alle slags tenkelige faststoff-

fenomener er nemlig tilstede i disse stoffene og må forklares av en altomfattende teori. Våre tanker om faststoff-fysikk trenger en radikal overhaling ("radical rethinking"), ifølge Nobelprisvinneren *Phil. W. Anderson.* Problemet kan kanskje best beskrives ved at vi ikke engang kan forklare normal-tilstanden i de nye materialene. Desto verre blir det da å beskrive den superledende tilstand. Kanskje må Fermi-væske teori erstattes av Luttinger-væske teori, eller noe liknende. En større utfordring har trolig faststoff-fysikken aldri stått overfor.

Fysikk på grensen til metallurgi

Norsk metallurgisk industri er viktig for landets økonomi, og innen noen produkter, slik som ferrosilisium og magnesium, er Norge storprodusent på verdensmarkedet. For å holde på markedsandeler og bevare en tilfreds kundekrets, er det nødvendig å levere varer med høy kvalitet. Dessuten bør en etterhvert foredle en større del av råvarene i Norge eller i norskeid industri. Dette krever inngående kunnskap om fysisk metallurgi eller om hvordan atom-arrangementer og mikrostruktur i metaller og deres legeringer virker inn på de fysiske egenskapene i sluttproduktene, slik som plater, stenger, bjelker, rør osv. En må kunne utføre bearbeiding som støping, valsing, ekstrudering, varmebehandling osv. under kontrollerte forhold.

Metallurgen, professor *Otto Lohne*, SINTEF/NTH, fortalte om hvordan enkle fysiske modeller kunne brukes til å forklare metallurgiske problemer. Dette er svært viktig med sikte på å optimalisere metallprodukter for ulike bruksområder.

Materialteknologi strekker seg over mange lengdeskalaer: bruer (1 km), maskiner (1 m), finmekanikk (1 mm), metallkorn (1 μm) og utfellinger (1 nm) med tilsvarende bearbeidingsteknikker og undersøkelsesmetoder. En har i samme glidende skala ingeniørteknikk, metallforming og varmebearbeiding der en kan nytte mekanisk utprøving, lysmikroskop, sveip-elektronmikroskop (SEM) eller transmisjons-elektronmikroskop (TEM) osv.

Modellering

Etterhvert har en bygd opp mye kunnskap om metallurgiske reaksjoner og mekanismer. Med økende datakraft tilgjengelig, går utviklingen nå i retning av å modellere de enkelte prosesstrinn i en industriell produksjonsprosess. Slike numeriske modeller er nyttige ved opplæring av personell som skal styre den industrielle produksjonen og til videre perfeksjonering av de forskjellige prosessene. Disse modellene kan bygge på enkle fysiske prinsipper.

Hva vil skje når en forbinder to oppblåste såpebobler med forskjellig radius med et rør slik at lufta inne i dem kommuniserer? Svaret er at den minste bobla vil begynne å minke i størrelse, og den store vil øke! Forbausende, men likevel fysisk forklarlig da overtrykket inne i boblene er omvendt proporsjonalt med deres radius, se figur 2. Denne effekten kan nå brukes som en modell for å forklare det som skjer inne i et stykke metall.

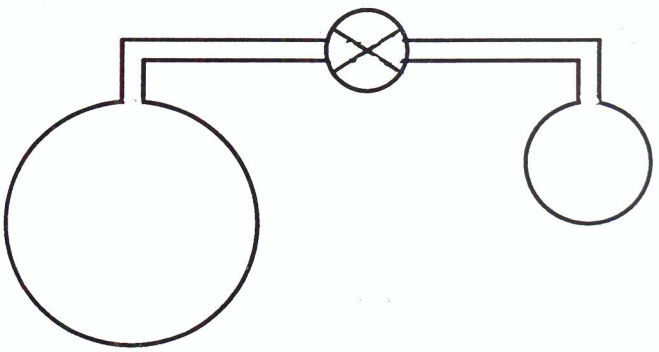


Fig.2. To oppblåste såpebobler med forskjellig radius er forbundet med et rør med en lukket ventil. For å holde seg utspent, må boblene ha et overtrykk, ΔP, i forhold til atmosfæretrykk. Overtrykket er omvendt proporsjonalt med boblenes radius, $\Delta P \sim 1/R$, og innholdet i den minste bobla vil bli trykt over i den største når ventilen åpnes mellom dem.

Metallegeringer består bl.a. av korn, egentlig små én-krystaller som er "limt" sammen i korngrenser. Ved høy temperatur vil de store korna vokse på bekostning av de små, analogt med såpeboblene. Dette er ofte ingen ønskelig situasjon fordi metallet da får dårligere mekaniske egenskaper ved senere bruk ved lavere temperatur. Ofte varmebehandles legeringer i temperaturområder slik at en får utfelt små partikler i stor tetthet. Disse bremser dislokasjonenes bevegelse og vil derfor virke herdende på materialet.

Her gjelder det altså å vite ved hvilke temperaturintervaller bestemte prosesser foregår og hvor lang tid en skal bruke før en avbryter behandlingen. Dette er forsåvidt greitt når en har en smelte som størkner og en kan varmebehandle metallstykket etterpå under kontrollerte forhold. Men hva skjer i metall som bearbeides kraftig etterpå slik som ved ekstrudering og sveising?

Ekstrudering og sveising

Ved ekstrudering varmer en opp en bolt av f.eks en *Al*-legering og presser den gjennom ei slags ståldyse med en bestemt profil. En får da ut et langt aluminiumsstykke som kan ha en ganske intrikat utforming "innvendig" gitt av stålprofilen. I denne pressemetoden blir metallet uunngåelig varmet opp ytterligere innvendig,

og en kan få uønskede grove korn som gjør at metallstykket får dårlige mekaniske egenskaper. Metallet blir varmet opp og deformert forskjellig over tverrsnittet. De mekaniske egenskapene vil da endre seg utover i stykket. Her kan metallurgisk kunnskap hjelpe en til å bestemme riktig verdi på bearbeidings-parameterene i prosessen.

Ved sveising tilføres varme som brer seg innover i materialet før den avgis til omgivelsene igjen. På samme måten som med såpeboblene vil utfelte partikler kunne forgroves. Dermed kan en få som sluttprodukt et materiale der styrken endrer seg når en går vekk fra sveiseområdet. Med den rette type av sveising, kontroll over varmetilførslen (temperaturen) og hastighet av sveiseflammen langs skjøten, kan en redusere skaden i materialet eller legge sveisen der en beregningsmessig kan tåle en svekkelse.

Styring av fabrikasjonsprosesser

En er nå kommet så langt at en er i stand til å lage matematisk-fysiske modeller av kornstrukturer i materialer. Resultatene av slike beregninger kan etterprøves ved fysiske eksperimenter der en nytter SEM-teknikk til å studere overflaten av slip av prøver som er gått gjennom forskjellig varmebehandling. En har altså i utgangspunktet enkle fysiske modeller og kan bruke disse som hjelpemidler ved styring av fabrikasjons- og bearbeidings-prosesser. Sammen med moderne kvantitativ metallografi, som i stor grad bygger på bruk av elektron-optiske metoder og informasjonsteknologi, peker denne forskingen på nye spennende utfordringer for metallurger og fysikere.

Nanometer-strukturer og mesoskopisk fysikk

Vi lever i dataalderen med stor tilgang på regnekraft i "personal computers", eller PC-er, på skrivebordet. Regneevnen ligger i mikroskopiske elektroniske kretser, "chips", på noen mm i kvadrat. De har inntil nå vært laget med utgangspunkt i halvlederen silisium. For noen år sida fylte tilsvarende regneanlegg hele rom med elektronikk. Dette viser hvor vellykket miniatyriseringa har vært så langt. Integrerte kretser som er etset inn i tynne skiver av én-krystallinsk silisium styrer livet vårt. Digital-armbåndsuret inneholder kanskje noen tusen enheter på en chip. Det er likevel grenser for hvor små og hvor raske silisium-kretser en kan lage, og grensen er nå nesten nådd. Fysikerne har derfor de 10 siste åra hatt arbeid i gang med andre halvleder-materialer enn silisium.

De spesielle egenskapene som karakteriserer slike systemer har fått en til å benevne dem som "mesoskopiske systemer". De har stor utstrekning i forhold til et atom, men liten utstrekning i forhold til en vanlig makroskopisk lengdeskala. (Meso betyr mellom eller halvveis.) Mesoskopisk er et uttrykk som allerede er brukt lenge innen omtalen av flytende krystaller og mi celler, altså fenomener i systemer et sted mellom mikro og makro.

Gallium arsenid

De mest interessante materialene for tida er forbindelser av stoffet gallium, Ga, med arsen, As, eller aluminium, Al. De kalles III – V materialer etter de grunnstoff-gruppene de tilhører. På samme måten som ved silisium-teknikken er det elektroner og hull som danner utgangspunktet for ledningseffektene, men i forhold til silisium skjer transporten av ladning mye raskere. Dette skyldes kvantemekaniske effekter som gjør at elektronene inne i disse halvlederne har en effektiv masse som er mye mindre enn når elektronene er frie. De er altså lettere å akselerere.

De "gamle" halvleder-egenskapene og kretsene kan forklares ved en blanding av kvantemekanikk og klassisk transportteori, men ved de nye materialene blir de kvantemekaniske effektene mer påtrengende. Dette kommer av at en i høyere grad nytter tynne filmer deponert lagvis slik at avstandene blir svært små mellom de aktive delene av transistoren.

I dette tilfellet kan elektronenes bølgelengde lett bli av samme størrelsesorden som komponentenes utstrekning. En snakker da om "nanometer-strukturer" ($10^{-9}m$) der "nano" betyr dverg på gresk. Et annet karakteristisk trekk er at en ikke lenger har 3-dimensjonale fenomener, men strukturer der en har 2-dimensjonale eller 1-dimensjonale fenomener. Det siste er faktisk 0-dimensjonal eller punktformig oppførsel! Dette kan sammenfattes i begrepet lavdimensjonale systemer (sml. med HTSL foran).

Heteroforbindelser

Det er videre mulig å gå lenger enn ved silisium-teknikken. En kan nemlig legge stoff av forskjellig kjemisk sammensetning oppå hverandre. De ulike forbindelsene har samme fysiske struktur og atomavstander slik at de danner en ubrutt krystall tvers over skjøten. Dette kalles "hetero junctions". Når et lag av n-dopet $AlGaAs$ ligger ved siden av udopet $GaAs$, lekker elektroner inn i $GaAs$ og det dannes et tynt grensesjikt med overskudd av elektroner hvis transportegenskaper har 2-dimensjonal karakter, en 2-dimensjonal elektrongass, 2DEG. Elektronene kan ikke bevege seg over skjøten pga. energiforholdene, men bare langs den. Med de "nye" materialene kan en lage forbedrete utgaver av de vanlige silisium-

komponentene, slik som de bipolare enhetene der både elektroner og hull "jobber" i komponenten, f.eks. en diode. En annen kjent komponent er felt-effekt transistoren, FET, der det bare er elektroner som jobber. Silisium MOSFETS er dominerende i integrerte digitale kretser der ledende/ikke-ledende tilstand symboliserer 0/1 i binærsystemet. De nye tilsvarende komponenter av gallium-arsenid typen kalles MESFETS. I alle disse enhetene styres en strøm av elektroner i et spesielt lag der strømmen går parallelt med grenseflaten. De kan derfor kalles "parallelle" enheter.

MBE teknikk

En hel ettermiddagssesjon på møtet var viet slike fenomener. Vi fikk først høre om hvordan tynne filmer kan lages ved hjelp av "Molecular Beam Epitaxy" eller MBE-teknikk. En bruker pådampingsenheter der en samtidig kan holde øye med tykkelsen, kvaliteten og krystall-strukturen av lagene etterhvert som de bygges opp. Heterostruktur materialer fra disse apparatene blir brukt til å bygge elektro-optiske komponenter slik som bølgeledere, modulatorer og diode-lasere. I det hele tatt er framtida størst for disse nye materialene i fiberoptisk kommunikasjonsteknikk siden de kan operere ved høyere frekvenser enn silisium. Gallium arsenidfamilien har nemlig den store fordel framfor silisium at den både kan lage og detektere lys. På lengre sikt kan en derfor tenke seg optiske datamaskiner.

Kvantemekaniske beregninger for GaAs-heterostrukturer, kvantebrønner

Foruten de "parallelle" enhetene nevnt ovenfor, kan en også lage "ortogonale" enheter der den styrte strømmen går på tvers av grenseflatene og de tynne filmene. I slike kretser dominerer kvante-effekter fullstendig, og en har nesten gått over til en slags ren "kvante-elektronikk" der elektronenes bølgenatur fører til resonans- og tunnel-fenomener, jfr. kvantebrønner. Elektroner kan krysse gjennom et isolerende lag av $AlGaAs$ mellom to lag av $GaAs$ pga. tunnel-effekt. Omvendt vil elektroner bli fanget i en brønn bestående av et lag $GaAs$ mellom to lag $AlGaAs$. Når det midterste laget er tynt nok, vil elektron-energinivåene i denne brønnen bli diskrete eller godt atskilte. En kan da bruke tilsvarende beregninger som blir brukt i elementær kvantemekanikk, "partikkel i boks". Hvis de isolerende lagene på begge sider er tynne, vil de fangne elektronene unnslippe etter en tid. Det viser seg videre at dersom vi akselererer elektroner med en påtrygt spenning som tilsvarer et av de laveste energinivåene i brønnen, vil alle elektronene gå gjennom. Vi har altså laget oss en strøm-bryter med energi-filter egenskaper, en resonans tunnel-diode, se figur 3.

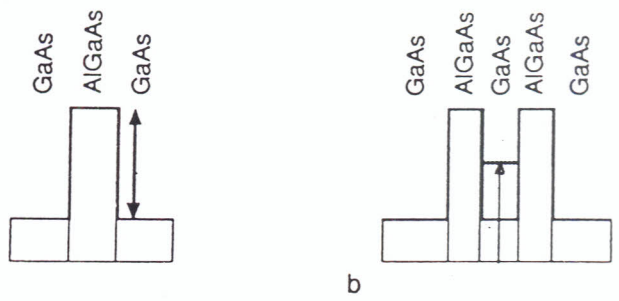


Fig.3. a) Et sjikt med $AlGaAs$ virker som en elektron sperre mellom to sjikt av $GaAs$. b) Her er det sperresjikt på begge sider av et sjikt $GaAs$. Et elektron kan da bli sperret inne i kvantebrønnen i midten. Elektroner i brønnen vil ha diskrete energinivåer i brønnen, der energien avhenger av "veggenes" tykkelse og høyde. "Løfter" vi derfor elektroner opp til f.eks. det første energinivået ved hjelp av en spenning, vil en strøm gå gjennom enheten. Vi har laget oss en resonans tunneldiode.

Ved å kople flere slike kvantebrønner til hverandre, vil ledningsegenskapene få en knekk som funksjon av spenninga over enheten. I et område vil den få negativ differensiell motstand, noe som fører til en ustabilitet og oscillasjoner med høg frekvens. Flere foredrag på møtet (professor *K.A. Chao* og hans studenter) omhandlet både eksperimentelle og teoretiske studier av doble kvantebrønner. Det var brukt både foto-luminescens (PL) og foto-luminescens eksitasjonsspektroskopi (PLE) til å studere energinivåer. En fant tilfredsstillende samsvar mellom teori og målinger. Settes en serie slike kvantebrønner etter hverandre, kan en få fram innretninger som vil oppvise bølgeleder-egenskaper overfor elektroner. Faststoff-elektronikken har sannelig gjort stor framgang de siste åra.

Et nytt forskingsprogram ved NTH

Det er i det siste satt i gang et større forskingsprogram der flere institutter ved NTH vil samarbeide både om teori og eksperimenter på disse fascinerende og lovende elektronikk-komponentene. Institutt for fysikalsk elektronikk vil stå for produksjon av tynnfilm-materialer ved MBE-teknikk. Så vil Anvendt optikk avdelinga innafor fysikk karakterisere prøvene og måle spektre. Teorigruppa vil beregne energinivåer, transportfenomener og hvordan forskjellige fonon-tilstander kan influere resonanskurvene. Utviklinga går raskt på dette området ute i verden, og det gjelder å følge med. Det viser seg f.eks. at dersom en blander inn indium, In, vil en få enda lettere elektroner og dermed enheter som reagerer enda raskere enn de rene $GaAs$-komponentene. Først og fremst vil en kunne lage diodelasere etc. for optiske frekvenser. De er svært attraktive i fiberkommunikasjons-øyemed.

∞

Bokomtaler

R.O. Dendy: Plasma Dynamics, Clarendon Press, Oxford, 1990.

I motsetning til de fleste lærebøker i plasmafysikk som har sett dagens lys i den senere tid, er denne på bare 158 sider. Det sier seg selv at forfatteren har måttet gjøre et utvalg, og det er ikke alltid like lett, spesielt ikke innen et felt hvor mengden av kunnskap øker så raskt.

Forfatteren har valgt å legge vekt på fundamental plasmafysikk og berører anvendelser kun i liten grad. Er man interessert i hva som foregår i fusjonsforskning eller innen andre anvendelsesområder, finner en det ikke her. Boken er velegnet for fysikere som ønsker en kort innføring i plasmafysikk. Den er også brukbar som lærebok i begynnerkurs for studenter. Dog må det bemerkes at for sistnevnte kategori burde en nok ha en bedre dekning av en del emner. For å kunne lese denne boken må en ha kjennskap til Maxwells ligninger, samt den matematikk som manipulering av disse ligninger krever. Leseren får til og med et lite repetisjonskurs i innledningen.

Boken er inndelt i seks kapitler, og de relativt få temaer som tas opp behandles forholdsvis grundig. I kapittel 1, tar forfatteren for seg de mest fundamentale plasma-parametre så som Debye-lengde, Debye-kule og plasma-oscillasjoner, samt parametre som er relevante for binære Coulomb-kollisjoner. De nødvendige kriterier for at en ionisert gass skal kalles et plasma er også tatt med her. En bør også fremheve figurene som benyttes i fremstillingen; de er meget tydelige og supplerer teksten på en ypperlig måte.

I kapittel 2, tar så forfatteren for seg den såkalte partikkel-beskrivelse av et plasma. De ulike driftshastigheter utledes, og behandlingen av speileffekten er mer utførlig enn hva en kunne forvente i en så liten bok. Forfatteren klarer nemlig å si noe fornuftig om speileffekten i toroidal geometri, og dette avsnitt har derfor en viss relevans for fusjonsforskning. Imidlertid er behandlingen av adiabatiske invarianter mangelfull. Kun den første adiabatiske invariant (magnetisk moment) er tatt med.

I kapittel 3, beskriver forfatteren hvordan man kan behandle et plasma som et dielektrikum og tar deretter for seg ulike bølgetyper i et kaldt plasma. Størsteparten av kapitlet er viet høyfrekvente bølgemoder der ionene betraktes som værende i ro. To-væske modellen kommer derfor ikke tydelig frem. Senere i kapitlet behandles lavfrekvente bølger, men fortsatt i kaldt plasma. Effekten av endelig temperatur kommer først i den kinetiske beskrivelse av plasmaet.

I neste kapittel, får vi den magnetohydrodynamiske beskrivelse av plasmafenomen. Med tanke på hvor mye fysikk som er utviklet i magneto-hydro-dynamikk (MHD), er dette kapittel noe tynt. De temaer som behandles er innefrosne feltlinjer, MHD-bølger (bl.a. Alfvén-bølger) og energiprinsippet. Disse siste to temaer er ikke tilfeldig valgt. De har begge hatt en enorm innflytelse på utviklingen av plasmafysikk. Alfvén fikk Nobel-prisen bl.a. for sin oppdagelse av Alfvén-bølger.

Kapittel 5, som tar for seg den kinetiske beskrivelse av et plasma, er det største av de seks kapitlene i boken. Først utledes Vlasovs ligning i analogi med kontinuitets-ligningen for masse i hydrodynamikk. Sammenhengen mellom partikkel-beskrivelse, hydromagnetisk beskrivelse og kinetisk beskrivelse kommer godt frem. Forfatteren formulerer og viser Jeans teorem. Han diskuterer deretter plasma-oscillasjoner og Landau-dempning, men omgår, rimelig nok, det matematiske problem knyttet til løsning av dispersjonsligningen der et singulært integral inngår. Den fysikalske tolkning av Landau-dempning behandles på en skikkelig måte. Temaet er særdeles interessant etter som Vlasovs ligning er reversibel og en følgelig ikke burde forvente noen dempning. Fokker-Planck ligningen og binære kollisjoner får også en tilfredsstillende behandling. Kapitlet avsluttes med et avsnitt om to-strøm-ustabiliteten og negative energi-bølger.

Det siste kapitlet tar for seg en del ikke-lineære fenomen og er nok det som er vanskeligst å trenge inn i. Et plasma er et utmerket "laboratorium" for studiet av ulineære problemer fordi mange fenomen blir ikke-lineære selv for relativt små amplituder. Først behandles vekselvirkning mellom en høyfrekvent Langmuir-bølge og en lavfrekvent ione-akustisk bølge. De to Zakharov-ligningene utledes og diskuteres. Deretter stiller forfatteren spørsmålet: Hvor stor må amplituden til en bølge være for at den i vesentlig grad skal modifisere den lineære dispersjonsligning for bølgen? Forfatteren diskuterer så dette spørsmål og tar for seg modulasjons-ustabiliteten og soliton løsninger av Zakharov-ligningene. Ved å kombinere de to Zakharov-ligningene får en den såkalte "ikke-lineære Schrødinger ligningen", som også dukker opp i andre fysikk-disipliner. Dette siste kapitlet om ikke-lineære bølger er meget nyttig. Uten å kreve store forkunnskaper i matematikk eller plasmafysikk, klarer forfatteren å formidle helt sentral innsikt i ikke-lineære problemer.

Det styrker også bokens verdi at der etter hvert

kapittel er oppgaver som leseren kan teste sin nye erkjennelse på, og helt i slutten av boken er der løsninger til oppgavene. Så gå i gang - les boken, den anbefales av undertegnede.

Asbjørn Kildal

∞

Michael Riordan & David N. Schramm: The Shadows of Creation. Dark Matter and the Structure of the Universe. W.H. Freeman and Company, 1991 (278 sider), $ 18,95.

Tiåret da kosmologien eksploderte

Steven Weinbergs bok "De første tre minutter" ble publisert på norsk i 1977. Den er nok fremdeles den beste og mest moderne innføring i kosmologi som finnes på vårt språk. Men Weinberg våget seg ikke nærmere det fantastiske skapelsesøyeblikket enn 1/100 sekund. I dag mener fysikerne å ha pålitelige teorier slik at en kan beskrive hva som skjedde like fra 10^{-14} sekunder etter selve "big bang".

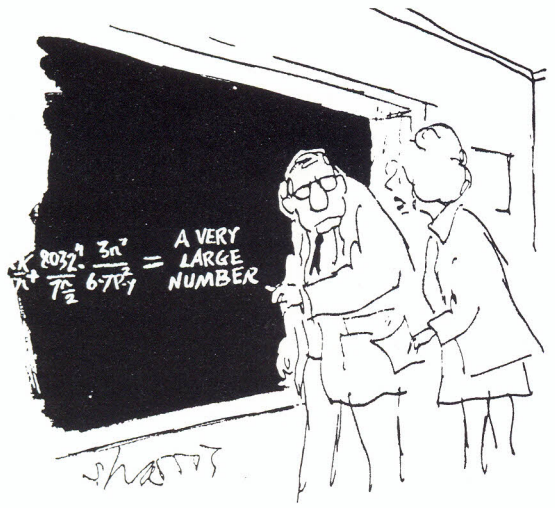


Fig.1. "I'm afraid that's not the way to bridge the communications gap between scientists and nonscientists."

For den som behersker engelsk, (norske gymnasiaster?) finnes det en hel flora av populærvitenskapelige bøker som prøver å forklare moderne partikkelfysikk og kosmologi. Dessverre er det slett ikke slik at alle disse bøkene er gode. Men jeg har nå lest ei slik bok som i alle fall holder mål. "The Shadows of Creation" er skrevet av Michael Riordan og David N. Schramm. Sistnevnte tør være kjent for dem som har Physics Today og Scientific American på menyen.

Riordan og Schramm får klart fram at beskrivelsen av partikkelfysikk basert på elementære kvarker og leptoner med vekselvirkninger beskrevet av kvantekromodynamikk og elektrosvak teori (standardmodellen), nå står nærmest urokkelig fast. Til gjengjeld legger de ikke skjul på at de store enhetlige feltteoriene (GUT) som prøver å forene disse to teoriene, er usikre og i stadig revisjon.

Men nå er det slik at foreningen av disse vekselvirkningene først vil gjøre seg gjeldende ved uhyggelig store energier. Det vil da aldri komme på tale å gjenskape disse forholdene i en jordisk atomknuser. Da måtte nemlig akseleratoren være på størrelse med hele Melkevei-galaksen. Men en kan muligens se om teoriene har noe for seg ved å undersøke om protonet er stabilt. En annen metode er å benytte "den fattiges laboratorium"; dvs. en undersøker kosmologiske konsekvenser av disse teoriene. Hvis teorien da forutsier at universet må ha en helt annen struktur enn den kosmos vitterlig har, ja, da må teorien forkastes.

Boka er smekkfull av fascinerende informasjon. Her forklares i detalj hvordan kosmologien forutsier at det bare kan eksistere 3 forskjellige slag nøytrinoer. I dag er denne spådommen triumferende bekreftet av fysikerne ved CERN.

Den svenske nobelprisvinneren Alfvén skrev i sin tid en spennende bok, "Verdener og antiverdener", der kosmolgien var basert på fullstendig symmetri mellom materie og antimaterie. Men Riordan og Schramm forteller både hvorfor dette ikke passer med den informasjon vi mottar fra verdensrommet, og hvordan GUT-teoriene kan gi svar på hvorfor verden bare er bygd opp av materie alene.

Her får vi også svar på hvordan små tidlige variasjoner i materietettheten kan gi opphav til galakser. Disse variasjonene oppstår når GUT-kreftene kommer ut av likevekt. Men da vil materien og den elektromagnetiske strålingen være knyttet intimt sammen, og de varierer på samme måte. Altså må det finnes små variasjoner også i bakgrunnstrålingen vi mottar fra det iskalde verdensrommet. Allerede nå viser målinger fra COBE-satellitten at variasjonene i denne strålingen er mindre enn 1/100 000 i forskjellige retninger. Teoretikerne har sannelig grunn til å være urolige. Disse presisjonsmålingene bør snart bekrefte en liten variasjon i strålingen.

Men siden tetthetsvariasjonene er så ørsmå, rekker heller ikke den svake gravitasjonskraften å kollapsere dem og skape galakser i den tiden gravitasjonen har til rådighet fra fødselsøyeblikket til i dag. Derfor mener da kosmologene at det må finnes en annen mørk materie som galaksene skal spire fra. Denne mørke materien blir da ikke påvirket av strålingen og klumper seg uavhengig av denne. Kosmologene har da også andre indisier som bekrefter at mørk materie

eksisterer. Gravitasjonsvirkningen fra slik materie forklarer bevegelsen til stjernene i de ytterste områdene av Melkeveien, og den forklarer også bevegelsen av de enkelte galakser der galaksene samler seg i store hoper.

Boka har også et eget kapittel som forteller at strukturen i fordelingen av galakser nærmest minner om såpeskum. Dessuten er et helt kapittel viet den geniale inflasjonshypotesen som er en naturlig følge av GUT-teoriene.

Jeg nærer et inderlig ønske om at et forlag tok jobben som kulturformidler på alvor. Da ville denne boka i norsk språkdrakt være en verdig gave til det norske folk. I dag har lekfolk knapt mulighet til å følge den totale revolusjon moderne kosmologi er inne i. Et sådant folk er neppe verdt å kalles en kulturnasjon.

Henning Knutsen

∞

Nye Doktorander

Eli Olaug Hole

Eli Olaug Hole forsvarte 19. mai 1991 sin avhandling *Model Studies of Radiation Induced Oxidation and Reduction Processes in DNA* for Den filosofiske doktorgrad ved Universitetet i Oslo.

I forskningen som pågår for å kartlegge de biologiske effektene av ioniserende stråling er et av hovedmålene å kunne beskrive rekken av fysikalsk kjemiske, kjemiske, og biokjemiske reaksjoner som følger fra det øyeblikk bestrålingen finner sted og fram til en eventuell biologisk skade kommer til uttrykk. Endringer i arvemolekylet DNA antas å være en av de viktigste årsakene til biologiske skader som kreft, celledød, og mutasjoner.

I avhandlingen er deler av DNA blitt studert med henblikk på å kartlegge de aller første molekylære stråleproduktene som dannes, samt å verifisere hvilke sekundære reaksjoner disse produktene inngår i. Videre er de molekylære omgivelsene variert for å kunne bestemme i hvilken grad små endringer i miljøet vil virke inn på dannelsen av ulike stråleprodukter, samt på deres sekundære reaksjoner. DNA-komponentene er blitt preparert i form av molekylære én-krystaller og er studert ved bruk av magnetisk resonans spektroskopi. Ved bruk av denne metoden kan den mikroskopiske molekylære strukturen til de ulike produktene beskrives i mer detalj enn ved de fleste andre eksperimentelle teknikker. En slik detaljert beskrivelse er ikke bare viktig for å kunne identifisere de ulike produktene som dannes, og deres mekanismer, men er også helt fundamental for å kunne utnytte en rekke andre metoder for å studere primære strålingsprodukter dannet direkte i DNA. For å stabilisere de primære stråleproduktene, som normalt har meget korte levetider (av størrelsesorden en milliondels sekund ved romtemperatur), er prøvene bestrålt og studert ved svært lave temperaturer (ca. $-265°C$).

Av spesiell betydning for forståelsen av strålerespons til DNA er at det vises at de primært dannede *ladde* produktene er høyst ustabile og reagerer spontant slik at overskuddsladningen fjernes.

Molekylstrukturen til en lang rekke strålingsprodukter som dannes i DNA-komponenter er blitt identifisert, og typiske trekk ved en del mekanismer er karakterisert. På bakgrunn av disse resultatene settes det en rekke spørsmålstegn ved de til nå rådende modeller for dannelsen av primære stråleskader i DNA, og det vises at vesentlige trekk ved disse trolig ikke er korrekte.

Det foreliggende arbeidet er en del av et større forskningssamarbeid mellom biofysikk-gruppen ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo, og to amerikanske universitet. Foruten de impliserte universitet har arbeidet i vesentlig grad vært støttet av Norges allmennvitenskapelige forskningsråd (NAVF) og USA's National Institute of Health (NIH).

Eli Olaug Hole har hatt NAVF dr.-stipend, samt stipendiatstilling ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

∞

Viggo Hansteen

Viggo Hansteen har forsvart sin avhandling med tittel "*Non-Equlibrium Effects in Transition Region Physics*" for Dr.scient.-graden ved Institutt for teoretisk astrofysikk, Universitetet i Oslo. Avhandlingen omhandler fenomener knyttet til de ytre lag av solatmosfæren. I disse lagene, som undersøkes ved bruk av raketter og satellitter, er gasstettheten liten, men temperaturen er forbausende høy, opp til 2 millioner grader. Materien i disse lagene befinner seg i tilstander langt fra likevekt. I avhandlingen er konsekvensene av dette utredet som et ledd i en større undersøkelse av hvordan de ytre sollag er varmet opp og hvorledes solvinden kan oppstå.

Sola er langt borte. Kunnskap om, og dermed mulighet til forståelse av, dens egenskaper kan bare hentes fra de signaler den sender ut: sollyset og solvinden. Men tolkning av signalene krever forståelse av de fenomenene som forårsaker dem. For å løse dette dilemmaet benyttes modeller: matematiske beskrivelser av sola basert på de fysiske lover man antar gjelder der. I avhandlingen er modeller av de ytre sollag konstruert med henblikk på å finne metoder for å skille forskjellige forklaringer av oppvarming og akselerasjon av solvinden fra hverandre.

Lyset fra de ytre lag av sola består hovedsakelig av ultrafiolett og røntgen stråling. Analyse av det ultrafiolette lyset indikerer at gassen strømmer nedover, til tross for at solvinden viser at gass gjennomsnittlig strømmer ut fra sola. I avhandlingen forklares dette paradokset som en konsekvens av at de ytre lag er varmet opp i korte blaff. Blaffene genererer lydbølger som i sin tur påvirker dannelsen av det ultrafiolette lyset slik at det tilsynelatende viser nedstrømmende gass.

Mengden av helium-gass i de ytre sollag kan påvirke egenskapene til solvinden. I avhandlingen er det gjort en undersøkelse av hva som bestemmer denne mengden og om de prosessene som endrer mengden er raske nok til å påvirke strømningen av gass fra sola.

Disputasen ble holdt 25. januar 1992.

∞

Nytt fra NFS

Nye medlemmer tatt opp på styremøtet 11. mai 1992:

Forsker Rolf Ajer Halvorsen
Forsvarets forskningsinstitutt, Avd. E
Boks 25
2007 Kjeller

Forsker Arne Petter Bartholsen
Forsvarets forskningsinstitutt, Avd. E
Boks 25
2007 Kjeller

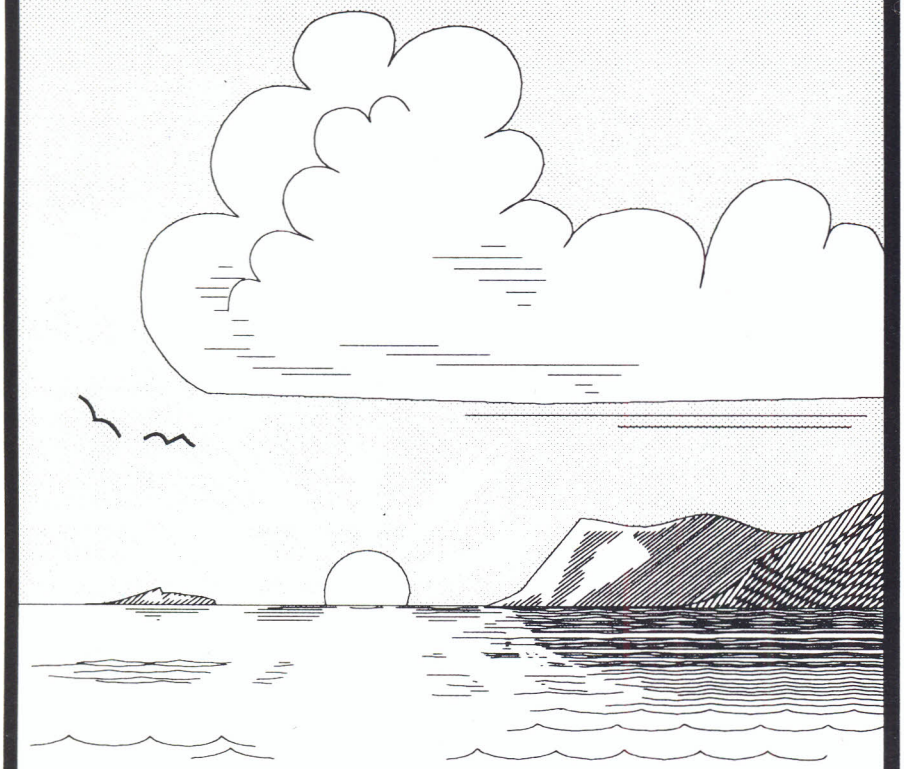
Siv.ing. Jan Langhammer
IKU
7034 Trondheim

Overing. Thor Myklebust
Direktoratet for måleteknikk
Boks 6832 St. Olavs plass
0130 Oslo

Student Anne Hærdig
Fysisk institutt
Universitetet i Oslo
Boks 1048 Blindern
0316 Oslo

∞

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

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.:(06) 80 60 75 Fax.:(06) 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.:(02) 85 64 28
Fax.:(02) 85 56 71 / 85 64 22
Email:
oivin.holter@fys.uio.no
finn.ingebretsen@fys.uio.no
karl.maseide@fys.uio.no

Fra Fysikkens Verden utkommer fire gange årlig. Abonnement kan tegnes direkte fra ekspedisjonen. Årsabonnement kr. 90,-. Studenter og skoleelever kr.45,-. Løssalg kr. 30.- pr. nummer.

Postgirokonto: 0807 5 10 47 24
Bankgirokonto: 6094.05.40227