

# Fra Fysikkens Verden



Marietta Blau (1894-1970)  
En pionér i partikkelfysikk  
(Se artikkel)

Nr. 4 – 2012

74. årgang

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:

Øyvind Grøn  
Marit Sandstad

Redaksjonssekretær:

Karl Måseide

## Innhold

**Leif Veseth:**

Nobelprisen i fysikk 2012 ..... 94

**Jan Olav Eeg:**

Symmetriar som brytast –  
Om kva Higgs gjer og ikkje gjer. 97

**Sven Oluf Sørensen**

Marietta Blau –  
En pionér i partikkelfysikk ..... 104

**Emil J. Samuelsen**

Metallisk hydrogen ..... 109  
Fra Redaktørene ..... 94

Hva skjer ..... 113  
Fysikkolympiaden 2012

Fremragende forskning i fysikk  
ved Universitetet i Bergen

Fra Fysikkens Historie ..... 115  
100 år for Bohr-atomet

Bokomtaler ..... 116  
Alv Egeland:

Nordlyspioneren Carl Størmer

George F.R. Ellis m.fl.:

Relativistic cosmology

Nytt fra NFS ..... 118  
Nettverk for fysikkens historie

Trim i FFV ..... 119

---

## Fra Redaktørene

---

Det er blitt sagt at det tjuende århundret var fysikkens århundre, og at det tjueførste vil bli livsvitenskapenes.

Århundret som ble avsluttet for et drøyt tiår siden innebar utvilsomt en rivende utvikling for fysikken. Kanskje er det også derfor såkalte livsvitenskaper kan se fram mot en spennende utvikling? Forskning er i tillegg til tidligere framgang innen eget felt, også ekstremt avhengig av tilgjengelig teknologi og utstyr. Det tjuende århundrets fysikk har åpnet fantastiske teknologiske muligheter som er med på å drive andre felter framover. Fra røntgenbilder til strålingsdiagnostikk, halvlederteknologi, GPS og satellittsystemer, MR/NMR-teknologi og elektronmikroskoper er moderne fysikk helt nødvendig for utvikling innen alt fra kjemi til hjernehelse og arkeologi, geografi, informatikk og biologi.

Årets nobelpris til Serge Haroche og David J. Wineland for forskning på individuelle kvantesystemer viser tydelig at denne utviklingen ikke er over med det tjuende århundret. Deres resultater er viktige steg på veien mot utvikling av en kvantedatamaskin. En slik maskin vil gjøre det mulig med en helt ny tilnærming til problemer på mange flere fagfelt enn bare fysikkens. Forskning på grunnleggende problemstillinger er den beste metoden vi har for å finne veier til den mest revolusjonerende teknologien som igjen kan bringe fundamental og mer anvendt forskning videre. Grunnforskning innenfor fysikk har vist seg å bidra til svært mye av dette. Dersom man ønsker at det tjueførste århundret skal bli livsvitenskapenes århundre, kan det være vel så lurt å satse på at det blir både fysikkens og livsvitenskapenes.

*Marit Sandstad*

∞

---

## Nobelprisen i fysikk 2012

*Leif Veseth \**

---

Serge Haroche, Collège de France og Ecole Normale Supérieure, Paris, og David J. Wineland, National Institute of Standards and Technology og University of Colorado Boulder, USA, deler årets nobelpris i fysikk. De får den for ”banebrytende eksperimentelle metoder som gjør det mulig å studere og manipulere individuelle kvantesystemer”.

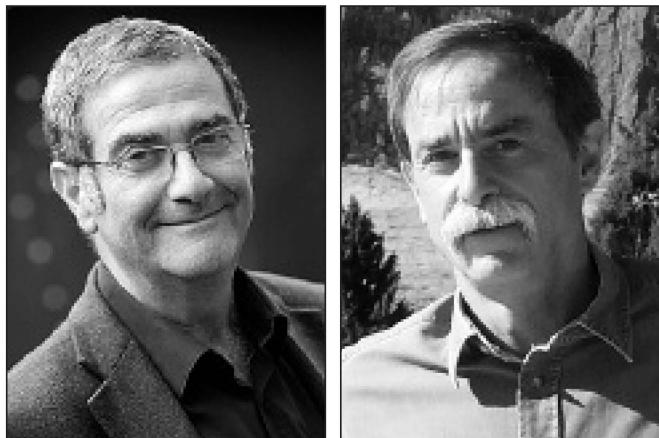
Som kjent gjelder ikke den klassiske fysikkens lover i mikrokosmos, dvs. for atomære eller subatomære systemer. Observasjoner av makroskopiske systemer avslører allikevel grunnleggende kvanteffekter, som f.eks. de skarpe emisjonslinjene fra lysende atomære eller molekylære gasser.

Teorien for varmekapasiteten for faste stoffer leder oss også via den statistiske mekanikkens lover, tilbake til kvanteteorien for atomære systemer. Helt fra kvanteteoriens barndom var det kjent at denne teorien inneholder paradokser, dvs. merkelige fenomener som ikke kan forstås ut fra klassisk sunn fornuft. Ifølge kvanteteorien kan f.eks. et atomært system være i to (eller flere) ulike tilstander på samme tid. For å studere slike grunnleggende kvantefenomener, må vi kunne studere isolerte individuelle kvantesystemer, som f.eks. enkeltatomer, ioner eller fotoner.

Årets nobelprisvinnere, som begge er 68 år gamle, har vært ledende pionerer når det gjelder å utvikle eksperimentelle metoder som har gjort det mulig å isolere, studere og manipulere individuelle kvantesystemer. De eksperimentelle utfordringene

---

\* Fysisk institutt, Universitetet i Oslo



**Figur 1.** Nobelprisvinnerne i fysikk 2012: Serge Haroche (til venstre) og David Wineland. (Ref. Nature, 11. oktober 2012.)

er mange og krevende. Først skal det produseres et system som består av bare ett atom, ion eller foton, eventuelt bare noen få, og da skal de kunne telles! Deretter skal disse enkeltpartiklene ”fanges” og holdes isolert fra omgivelsene tilstrekkelig lenge til at de kan observeres og manipuleres. Kontakt med omgivelsene må unngås for enhver pris, da det vil innvirke på partiklenes tilstand (såkalt dekoherens). Det største problemet angående dekoherens er gjerne sort varmestråling fra den omliggende apparaturen.

Haroche og Wineland har løst disse problemene på ulike, men egentlig komplementære måter. Haroche (og medarbeidere) har som utgangspunkt brukt en apparatur bestående av to motstående sfæriske speil i en avstand av 2,7 cm (se figur 2). Speilene består av superledende niob (Nb), og er avkjølt til ca. 1 K. I dette hulrommet (engelsk ”cavity”) plasseres ett, eller noen få mikrobølgefotoner som reflekteres frem og tilbake mellom de superledende speilene. Fotonene kan holdes i hulrommet i opptil 100 ms uten tap. Gjennom dette hulrommet sendes det rubidiumatomer, bare ett atom om gangen. Rubidiumatomer i den elektroniske grunntilstanden påvirkes ikke målbart av mikrobølgefeltet (fotonene) i hulrommet. Atomene i denne tilstanden er ganske enkelt for små til å påvirkes av den langbølgete mikrobølgestrålingen.

I et typisk eksperiment ble rubidiumatomene ved hjelp av en laser, eksistert til en såkalt rydbergtilstand. Dette foregår i den blå ”boksen” på figur 2. I en rydbergtilstand er et ytre elektron ”flyttet” langt ut fra kjerna og de øvrige elektronene, til en tilstand med  $n = 50$  (jf. hydrogenatoms energinivåer). I denne tilstanden har atomet en utstrekning på ca. 125 nm og fungerer som en liten

antenne for mikrobølgestrålingen.

La oss betegne denne rydbergtilstanden med  $|g\rangle$ . Denne eksitasjonsprosessen er egentlig ganske usannsynlig. Når den virker på en tynn (termisk) stråle av rubidiumatomer i grunntilstanden, blir resultatet ingen, eller ett enkelt eksistert atom innen den tiden det tar å krysse hulrommet. Derved er det i praksis produsert ett enkelt isolert atom. Mengden av atomer i grunntilstanden som også passerer gjennom hulrommet, er uten betydning. I neste skritt passerer atomene et mikrobølgefelt, et såkalt ramsey-interferometer (se figur 2), hvor atomene i tilstanden  $|g\rangle$  ender opp i en nøyaktig lik blanding av  $|g\rangle$  og rydbergtilstanden med  $n = 51$ . Denne tilstanden kalles  $|e\rangle$ .

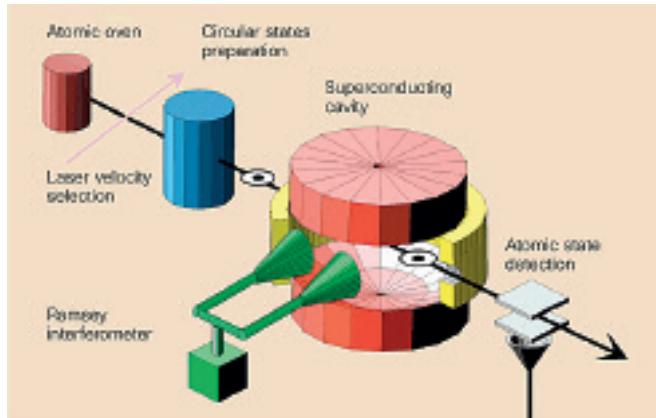
Atomet i den blandete (overlagrede) tilstanden  $\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|g\rangle + |e\rangle)$  sendes så inn mellom de superledende speilene hvor det antas å være ett enkelt foton. Hvordan nøyaktig ett (eller ikke noe) foton plasseres i hulrommet, fordrer en litt lang forklaring som utelates her. Frekvensen for mikrobølgefeltet i hulrommet (fotonet) er satt litt forskjellig fra resonansfrekvensen for overgangen  $|g\rangle \rightarrow |e\rangle$  for atomet. Fotonet i hulrommet blir dermed ikke absorbert, men det vekselvirker med atomet og forandrer fasene for  $|g\rangle$  og  $|e\rangle$  i den opprinnelige blandete tilstanden  $|\Psi\rangle$ . Atomet forlater så hulrommet i denne nye blandete tilstanden. Ved en raffinert måleprosess kan forandringen i tilstanden observeres. Denne målingen kan organiseres slik at den gir to mulige klare resultater:

1) Ingen forandring, som betyr at det ikke var noe foton i hulrommet.

2) Forandring, dvs. det var ett foton til stede.

Etter at atomet har passert, vil tilstanden for fotonet inne i hulrommet være uforandret. Konklusjonen er da at det har vært mulig å registrere ett foton i hulrommet uten at det er blitt absorbert, eller at dets tilstand er blitt forandret på noen måte. Dette er et eksempel på det som på fagspråket kalles ”*Quantum nondemolition*”-eksperiment (QND). Det strider mot vår kvantemekaniske barnelærdom som sier at vi ikke kan utføre en måling på et kvantesystem uten å påvirke det på noen måte.

Dette QND-eksperimentet som er forsøkt beskrevet kort her, ble utført i 1999,<sup>(1,2,3)</sup> og er et ganske karakteristisk eksempel på den typen kompliserte eksperimenter som Haroche og medarbeidere har utført på isolerte atomer og fotoner. Både før og etter 1999 har denne forskningsgruppen ved *Ecole Normale Supérieure* (ENS) i Paris,



**Figur 2.** Hovedelementene av apparaturen som er brukt av Haroche og medarbeidere.<sup>(1)</sup> En stråle av rubidiumatomer kommer fra en ovn til venstre. Atomenes hastighet kan typisk være ca. 300 m/s, og de bruker da ca. 1 ms på å krysse apparaturen. I den blå "boksen" skjer eksitasjonen til rydbergtilstanden  $|g\rangle$  ved hjelp av en nøyaktig avstemt laser. Ramseyinterferometeret (grønt) har to deler. I den venstre delen skapes den blandete tilstanden  $|\Psi\rangle$ . Den høyre delen utgjør en del av måleapparaturen. De superledende speilene (hulrommet) er angitt med rød farge.

utført mange lignende eksperimenter med sine superledende speil, og enkeltatomer inn og ut av hulrommet. Det vakte oppsikt da de i 1997 klarte å produsere "Einstein-Podolsky-Rosen Pairs of Atoms".<sup>(4)</sup> Dette var den første demonstrasjonen av et sammenfiltret ("entangled") par av to ("store") materielle systemer i form av to rubidiumatomer. Metodene til Haroche og hans forskningsgruppe har skapt en ny forskningsgren, "Cavity Quantum Electrodynamics" (CQED).

Wineland og medarbeidere har utført krevende eksperimenter på atomære ioner ( $\text{Be}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Al}^+$  med flere), innfanget i elektromagnetiske feller. De innfangete ionene kan manipuleres enkeltvis ved hjelp av laserstråler. Mange av disse eksperimentene har vært koncentrert om å konstruere og implementere såkalte "quantum logic gates", dvs. de basale elementene i mulige fremtidige kvantedatamaskiner. De samme eksperimentelle metodene har også ledet til nye ultrapresise optiske atomklokker. De beste er nå omrent hundre ganger mer nøyaktige enn cesiumklokken som bestemmer lengden av sekundet.

I et senere nummer av Fra Fysikkens Verden vil det bli gitt en mer utførlig beskrivelse av eksperimentene som er utført av Wineland og hans forskningsgruppe.

Til slutt kan det også bemerkes at årets nobelpris er den fjerde i rekken innen moderne atomfysikk/kvanteoptikk de siste 15 årene.

## Referanser

1. P. Grangier: *A box for a single photon*. Nature **400**, 215 (1999)
2. G. Nogues, A. Rauschenbeutel, S. Onsaghi, M. Brune, J.M. Raimond and S. Haroche: *Seeing a single photon without destroying it*. Nature **400**, 239 (1999)
3. R. Fitzgerald: *Single Microwave Photons Can Be Measured Nondestructively*. Physics Today, oktober 1999. side 22.
4. E. Hagley, X. Maitre, G. Nogues, C. Wunderlich, M. Brune, J.M. Raimond and S. Haroche: *Generation of Einstein-Podolsky-Rosen Pairs of Atoms*. Physical Review Letters **79**, 1 (1997)

∞

HUSK Å BETALE  
KONTINGENTEN!

# Symmetriar som brytast – Om kva Higgs gjer og ikkje gjer

Jan Olav Eeg \*

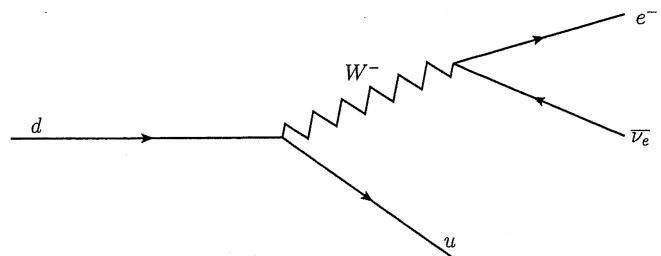
Ifylgje standardmodellen for partikkelfysikk er higgsfeltet ansvarleg for at alle elementærpartiklane har masse, og for at symmetrien mellom materie og antimaterie er broten i veik vekselverknad. Men higgsfeltet er *ikkje* ansvarleg for at du og eg er så tunge som me er. Dette skuldast eit symmetribrot innanfor sterk vekselverknad. I denne artikkelen vil eg gje eit glimt inn i standardmodellen for partikkelfysikk, higgsmekanismen medrekna. Fokus vil vera på symmetriane, korleis nokon av dei brytast og at andre er ubrotne. Det vil vera ei føremon å lesa artikkelen ”Er higgsbosonet funnet ved LHC?”<sup>(1)</sup> før ein gjev seg i kast med denne.

## Symmetriar i mikrokosmos

Dei fundamentale fysiske lovene våre er ofte *symmetriske* – me seier også *invariante* eller *uendra* – ved visse transformasjonar. Dei er på mikroskopisk nivå symmetriske ved translasjonar i tid og rom, og under *lorentztransformasjonar*, som inneheld rotasjonar som spesialtilfelle. Dette tyder til dømes at om ein gjer eit eksperiment ein dag, flyttar appaturen og gjer eksperimentet litt seinare, blir resultatet det same. Ifylgje det svært viktige teoremet til Emmy Noether om samanhengen mellom symmetriar og bevaringslover, heng dette saman med bevaring av *energi* og *driv* (rørslemengd). Om ein roterer appaturen blir også resultatet det same, og bevaring av banespinn kjem frå denne symmetriene.

Storleikane som bestemmer vekselverknadene er også symmetriske ved tre diskrete transformasjonar: ved spegling, kalla *paritetstransformasjon* ( $P$ ), ved *tidsreversjon* ( $T$ ), og ved *ladningskonjugasjon* ( $C$  for engelsk “charge”). Ved denne siste transformasjonen ( $C$ ) byter ein ut alle partiklar (eller antipartiklar) i ein prosess med dei tilsvarande antipartiklane

(partiklane). Då er dei to prosessane like sannsynlege. Det einaste kjende unnataket frå  $P$ -,  $T$ , og  $C$ -symmetri er innanfor veik vekselverknad. Det var eit sjokk i 1954 då ein først fann at speglingssymmetri ( $P$ ) var broten i veike prosessar, td. i betasundfall av eit nøytron ( $n$ ) til eit proton ( $p$ ), eit elektron ( $e^-$ ) og eit (antielektro-) nøytrino ( $\bar{\nu}_e$ ):  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ , som illustrert på kvarknivå i figur 1. Her kan nøytronet sitja inne i ei kjerne, som i den såkalla  $C_{14}$ -testen ein ofte brukar for å finne ut alderen på ymse materiale som inneheld karbon. Etter dette meinte mange at den kombinerte symmetriien  $CP$  måtte vera oppfylt. Men i 1964 fann ein at også  $CP$ -symmetriene er broten når eit  $K$ -meson går sundt og blir til to pion, dvs. i prosessar av typen  $K \rightarrow 2\pi$ . Teoretisk er kombinasjonen av alle dei tre transformasjonane  $CPT$  ein eksakt symmetri der som vekselverknadene er lokale og lorentzinvarians er gyldig.



**Figur 1.** Feynmandiagram for beta-sundfall  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$  på kvarknivå ved utveksling av eit  $W$ -boson, dvs. elementærprosessen der ein  $d$ -kvark som sit i nøytronet spaltast til ein  $u$ -kvark som sit i protonet, og eit  $W$ -boson som igjen spaltast i eit elektron  $e^-$  og eit antinøytrino  $\bar{\nu}_e$ . Nøytronet inneheld to  $d$ -kvarkar og ein  $u$ -kvark, medan protonet inneheld ein  $d$ -kvark og to  $u$ -kvarkar. Diagrammet skal lesast frå venstre mot høgre. For antipartiklar går pilen bakover.

Me skal sjå på eit enkelt døme på korleis desse transformasjonane verkar. Ved ein paritetstransformasjon vil alle *ekte vektorar* bli snudd, som td. posisjonsvektoren,  $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$ . Det same skjer

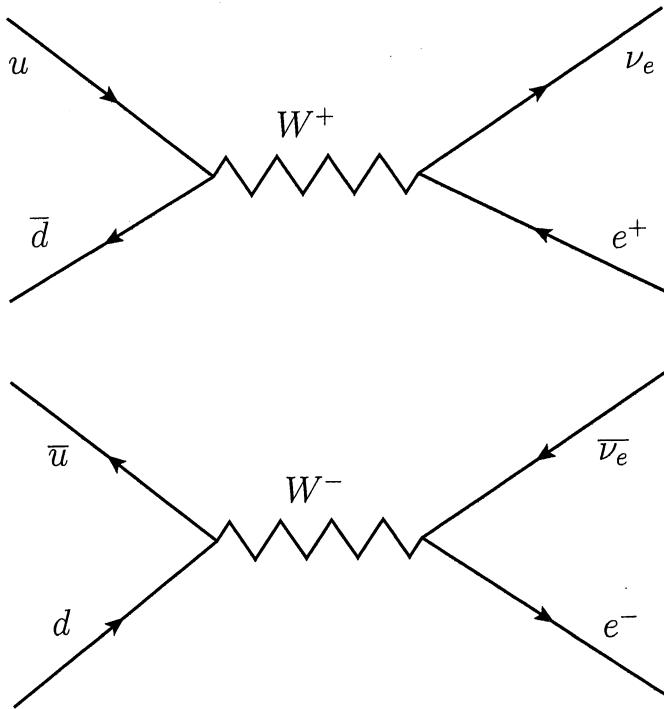
\* Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

med fartsvektoren og med drivet:  $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$ . Men banespinnnet  $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$  transformerer som  $\vec{L} \rightarrow (-\vec{r}) \times (-\vec{p}) = +\vec{L}$ . Det skiftar altså *ikkje* forteikn ved ein paritetstransformasjon. Me seier at  $\vec{L}$  er ein *pseudovektor*, eller *aksialvektor*. Det same er tilfelle med eigenspinnet  $\vec{S}$ . Den elektriske straumen  $\vec{j}_{em}$  er ein ekte vektor. Det finst også ein tilsvarande veik straum. Denne viser seg å vera ei blanding av ein ekte vektorstraum  $\vec{j}_V$  og ein aksialstraum  $\vec{j}_A$ , slik at den veike straumen  $\vec{j}_W$  er

$$\vec{j}_W = \vec{j}_V - \vec{j}_A. \quad (1)$$

Me ser at ved ein paritetstransformasjon, vil  $\vec{j}_W \rightarrow (-\vec{j}_V) - (+\vec{j}_A) = -(j_V + j_A)$  som *ikkje* er proporsjonal med  $j_W$ . Dette er grunnen til at paritets-symmetrien ( $P$ ) er broten i veik vekselverknad.

Me kan no studere den veike prosessen der eit positivt ladd pi-meson, som *ikkje* har spinn, spaltast til eit positron og eit elektro-nøytrino, dvs.  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  (sjå figur 2). Som mange veit er det langt



**Figur 2.** Feynmandiagram for sundfall av eit  $\pi^+$ -meson til eit positron  $e^+$  og eit nøytrino. Mesonet  $\pi^+$  inneheld ein  $u$ -kvark og ein antid-kvark ( $\bar{d}$ ). På kvarknivå blir difor den elementære prosessen  $u\bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  (over). Under er den tilsvarande ladningskonjugerte prosessen  $\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$ .

meir sannsynleg at det ladde  $\pi$ -mesonet går sundt til ladde myon ( $\mu^\pm$ ), men her har me valt å fokusere på sundfall til dei kjende partiklane elektron ( $e^-$ ) eller positron ( $e^+$ ) som er med i fyrste generasjon

av fermion. Her er nøytrinoet nesten masselaust samanlikna med elektronet. Ein kan vise at i grensa når massen blir liten,  $m \rightarrow 0$ , kan ein bylgjefunksjon (-eller eit *felt* i kvantefeltteori) splittast opp i ein høgredreiande (R) og ein venstredreiande (L) del:

$$\psi = \psi_L + \psi_R. \quad (2)$$

Eit fermion med spinn  $s = 1/2$ , kan ha spinnkomponentar  $+\hbar/2$  og  $-\hbar/2$  langs ein akse, t.d. langs drivet  $\vec{p}$  til partikkelen. (Vanlegvis utelet me planckkonstanten  $\hbar$  og seier berre spinn  $+1/2$  og spinn  $-1/2$ .) Ordet *spinn* brukast her som *spinnvektor*, som ein kan tenkje seg er retta langs rotasjonsaksen for partikkelen. Høgredreiing tyder då at partikkelen roterer mot høgre når me ser i retninga til drivet til partikkelen. Høgred- og venstredreiing svarar då til spinn framover og spinn bakover. Som oftast brukar ein uttrykka *høgrehendte* og *venstrehendte* partiklar. Dersom massen er null, som i mange tilfelle er ein god approksimasjon for nøytrinoet, svarar denne oppsplittinga til ein *partikkel* med spinn bakover, og ein *antipartikkel* med spinn framover. Dette er den ekstremt relativistiske grensa sidan partiklar utan masse går med lysfart.

Me kan no tenkje oss at  $\pi$ -mesonet ligg i ro i origo, at positronet  $e^+$  går langs den positive x-aksen og  $\nu_e$  langs den negative. Spinnet til nøytrinoet er då retta bakover, dvs. langs den positive x-aksen. Dersom me ladningskonjugerer prosessen  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ , får me prosessen der eit negativt ladd pi-meson spaltast til eit elektron og eit anti-elektronøytrino, dvs.  $\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$ . Ved ladningskonjugering ( $C$ ) skjer ingenting med driv og spinn. Men då har me fått eit anti-nøytrino som er venstrehendt, og som altså *ikkje* eksisterer (for  $m_{\nu_e} = 0$ ), og  $C$ -symmetriene er broten. Om me derimot i *tillegg* til ein  $C$ -transformasjon brukar ein paritetstransformasjon ( $P$ ), får me prosessen  $\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$  der antinøytrinoet er høgrehendt, som det fysisk skal vera. Denne  $CP$ -transformerte prosessen er like sannsynleg som den fyrste. Me kan seia at om  $CP$ -symmetriene er intakt, har me ein symmetri mellom *venstrehendt materie* og *høgrehendt antimaterie*.

## Justérsymmetri

I partikkelfysikk spelar omgrepene *justérsymmetri* (på engelsk, gauge symmetry) ei stor rolle. Den enklaste forma for justérsymmetri er at det ikkje

har fysiske konsekvensar kor du vel nullpunktet for eit potensial. Du kan seia at karosseriet på bilen din har potensialet null, også kalla *jord*. Eit potensial er ikkje ein tydig, berre potensial-skilnader er målbare og relevante. Meir generelt kan ein for dei elektromagnetiske potensiala  $\Phi$  og  $\vec{A}$  leggje til den derivate av ein vilkårleg justérfunksjon  $\chi(\vec{r}, t)$  av rom og tid:

$$\Phi \rightarrow \Phi' = \Phi - \frac{\partial \chi}{\partial t} ; \quad \vec{A} \rightarrow \vec{A}' = \vec{A} + \vec{\nabla} \chi . \quad (3)$$

Dei fysiske elektriske og magnetiske felta er gjevne ved

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \Phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} ; \quad \vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} , \quad (4)$$

og er invariante (uendra) ved denne transformasjonen. I relativistisk teori utgjer  $\Phi$  og  $\vec{A}$  til saman ein 4-vektor som på kvantenivå svarar til *fotonfeltet*.

I kvantemekanikk er det kjent at ein kan gange bølgjefunksjonen  $\psi$  med ein vilkårleg fasefaktor  $\exp(i\theta)$  utan at det har fysiske konsekvensar, der som  $\theta$  er ein konstant. Dette kallast ein *global justérinvarians*. Innanfor ikkje-relativistisk kvantemekanikk kan dette sjåast i samanheng med bevaring av sannsynlegheit, ifylgje Noethers teorem.

Det matematiske språket i partikkelfysikk er *relativistisk kvantefeltteori (RQFT)*, som tek omsyn til at partiklar kan forsvinne og kan oppstå. Her er det ein storleik som kallast *lagrangefunksjonen* som spelar ei sentral rolle og bestemmer dynamikken i vekselverknadene mellom elementærpartiklane. Til alle partikkeltypane svarar det eit *felt*, og lagrangefunksjonen er ein funksjon av alle desse felta. Og innanfor RQFT er td. eit elektron å oppfatte som ein eksitasjon av elektron-feltet. Alle symmetriane som finst i naturen må også vera bygd inn i lagrangefunksjonen.

Innanfor *kvante-elektrodynamikk (QED)*, dvs. i RQFT for elektron, positron og foton, blir storleiken  $\psi$  ikkje lenger tolka som bylgjefunksjon, men som eit *elektron-positron-felt*. I RQFT vil den globale invariansen ved transformasjonen  $\psi \rightarrow \psi' = \exp(i\theta) \psi$  ifylgje Noethers teorem svare til bevaring av elektrisk ladning. Men ein går også eit steg vidare og krev *lokal justérinvarians*, nemleg at teorien også skal vera uendra når fasefaktoren som gangast med  $\psi$  kan avhenge av rom (posisjonen  $\vec{r}$ ) og tid ( $t$ ):

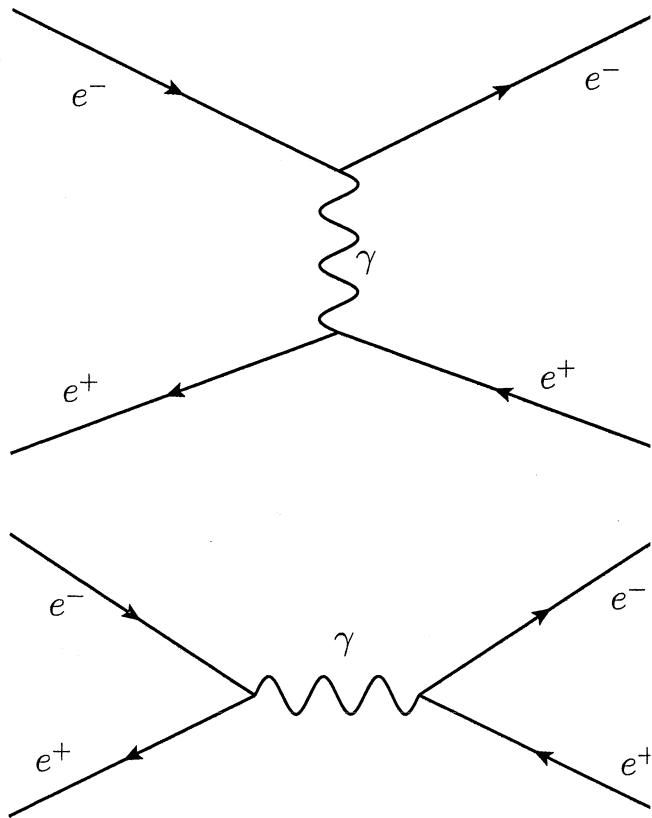
$$\psi(\vec{r}, t) \rightarrow \psi(\vec{r}, t)' = e^{i\theta(\vec{r}, t)} \psi(\vec{r}, t) . \quad (5)$$

Dette er mogleg dersom ein *kombinerer* transformasjonane (3) og (5), og *dersom ein i desse likningane* har samanhengen  $\theta = e\chi$ , der  $e$  er den elektriske elementærladninga. At justérsymmetrien er *lokal*, dvs. at ein kan justere fasen ulikt i ulike punkt i tid og rom som i likninga (5), er eit svært sterkt krav som vil avgrense kva slag vekselverknader som er (teoretisk) moglege. Ein finn at ein slik invarians er i samsvar med eksperiment. I dagens partikkelfysikk blir så justérinvarians i QED utvida til alle typar vekselverknad ved at *justértransformasjonar* vert knytt til visse matematiske gruppestrukturar. Ulike grupper har eit visst tal uavhengige justérfunksjonar, og for kvar justérfunksjon svarar det eit vektorbosonfelt (som altså har spinn  $s = 1$ ). Slike vektorboson er td. fotonet  $\gamma$ , som svarar til det elektromagnetiske feltet,  $W^\pm$  og  $Z$ -bosona, og gluona i sterkt vekselverknad. Ved slike justértransformasjonar blir fermionfelta og bosonfelta endra og stokka om etter bestemte matematiske reglar på ein slik måte at den totale lagrangefunksjonen er invariant.

Grunnen til at me vil tvihalde på justérinvariante teoriar, er at då veit me at kvantefluktuasjonar kan reknast ut på ein konsistent måte.<sup>(2)</sup> Kvantefluktuasjonar tyder at (såkalla virtuelle) partiklar kan oppstå og forsvinne over eit stutt tidsrom, jamfør Heisenbergs uskarpeheitsrelasjon. Det mest kjende eksempelet er *vakuumpolarisasjon* i QED, der eit (virtuelt) elektron-positron-par kan oppstå og forsvinne.

## Elektroveik vekselverknad

I utgangspunktet såg det ikkje greitt ut å laga ein sams teori for veik og elektromagnetisk vekselverknad. Typiske veike prosessar som  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$  og  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  nemd ovanfor (sjå figurane 1 og 2), har stutt rekkevidde, og er svært ulike elektromagnetiske prosessar, som td. den elastiske prosessen  $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$ , der dei elektromagnetiske kretene har lang rekkevidde. QED kan skildrast som vekselverknader mellom elektron ( $e^-$ ) og positron ( $e^+$ ) med fotonet ( $\gamma$ ) som kraftformidlar (sjå figur 3). Skulle ideen om ein sams teori for elektromagnetisk og veik vekselverknad ha noko for seg, måtte det veike bosonet  $W$ , som skulle vera analogt til fotonet, ha ein masse på fleire titals  $\text{GeV}/c^2$ , elles ville den veike vekselverknaden hatt lang rekkevidde slik som elektromagnetisk vekselverknad. Sjølv om energioverføringa i veike prosessar nemnd ovanfor kan vera berre nokre få MeV, kan det likevel utvek-



Figur 3. Elastisk  $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$  ved utveksling av foton. Spreiingsdiagrammet over og annihilasjonsdiagrammet under.

slast ein veldig tung partikkel over eit ekstremt lite tidsrom. Ifylgje Heisenbergs uskarpeheitsrelasjon for energi og tid,  $\Delta t \times \Delta E \sim \hbar$ , kan nemleg ein partikkel med veldig stor masse  $M_W$  leva ei ekstremt stutt tid,  $\Delta t \sim \hbar/(M_W c^2)$ , fordi me kan oppfatte  $\Delta E$  som kvileenergien ( $m_W c^2$ ) til  $W$ -bosonet. Denne stutte tida forklarer at veik vekselverknad har stutt rekkevidde. Medan rein elektromagnetisk vekselverknad ved utveksling av eit foton svarar til eit coulombpotensial  $\sim -e^2/r$ , vil utveksling av eit  $W$ -boson svare til eit såkalla yukawapotensial

$$V_W \sim -g_W^2 \frac{e^{-\mu r}}{r} ; \quad \mu \equiv \frac{M_W c}{\hbar} , \quad (6)$$

der  $g_W$  er den veike ladninga som må vera av same storleiksorden som den elektriske ladninga  $e$  i ein sams *elektroveik* vekselverknad. Frå slutten av 1950-talet visste ein også at i veik vekselverknad er det berre den venstrehendte delen av fermionfeltet som deltek. Ein kan vise at dette er ekvivalent med at den veike straumen har forma som i likning (1).

Når elektroveik vekselverknad skal formulerast som ein justérteori,<sup>(2,3)</sup> må ein ta omsyn til at den veike krafta berre verkar på dei venstrehendte delane av fermionfelta. Sagt på ein annan måte: Dei veike kraftformidlarane  $W^\pm$  koplar berre til ven-

strehendte partiklar. Vidare, ved veik vekselverknad må  $W$ -bosona ha elektrisk ladning  $\pm|e|$  fordi fermion-ladningane endrar seg med  $\pm|e|$  ved veik vekselverknad. Til dømes vil  $e^- \leftrightarrow \nu_e$  og  $d \leftrightarrow u$  som ein kan sjå i figur 1 og figur 2. I elektroveik vekselverknad ordnast dette matematisk ved at dei venstrehendte delane av  $\nu_e$  og  $e^-$  oppfattast som *to ulike tilstandar av det same abstrakte partikkelfeltet*. Ein seier at  $\nu_e$  og  $e^-$  utgjer ein venstrehendt *dublett* ( $\nu_e, e^-)_L$ . Sameleis oppfattast dei venstrehendte delane av  $u$ - og  $d$ -kvarkane som ein venstrehendt kvark-dublett ( $u, d)_L$ . Dei høgrehendte felta til alle fermionane blir ikkje sett saman i slike dublettar, og dei blir difor kalla *singlettar*. Totalt blir dei 12 materiepartiklane (6 kvarkar og 6 lepton, sjå figur 4) organiserte i 6 *dublettar* av venstrehendte felt og 12 *singlettar* av høgrehendte felt. Dei 12 partiklane (høgreh- og venstrehendte) er fordelt på tre *generasjonar* (også kalla familiar). Det er ein lepton-dublett og ein kvark-dublett i kvar av dei tre generasjonane. Denne organiseringa av høgrehendte og venstrehendte partiklar kvar for seg, inneber at alle fermionane i utgangspunktet er masselause, jamfør kommentarane under likning (2).

Three generations of matter (fermions)				
	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	U up	C charm	t top	Y photon
Quarks				
mass	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge	-1/3	-1/3	-1/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons				
mass	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.11 MeV/c <sup>2</sup>	<13.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>
charge	0	0	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	V <sub>e</sub> electron neutrino	V <sub>μ</sub> muon neutrino	V <sub>τ</sub> tau neutrino	Z <sup>0</sup> Z boson
Gauge bosons				
mass	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
charge	-1	-1	-1	+1
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	e electron	μ muon	τ tau	W <sup>±</sup> W boson

Figur 4. Partiklane i standardmodellen (SM), higgsbosonet unntake.

Den fyrste generasjonen inneheld det ein kunne kalle kvardagspartiklane, nemleg elektronet ( $e^-$ ), og  $u$ - og  $d$ -kvarkane som protonet og nøytronet er

samansette av. Med desse tre partiklane kan me byggje opp all stabil materie. Dessutan er elektro-nøytrinoet, som deltek i den kjende ” $C_{14}$ -testen” nemd ovanfor, med i den fyrste generasjonen. Dei to tyngre ladde leptona ( $\mu^-$  og  $\tau^-$ ) og dei fire kvarktypane (kalla *flavour* på engelsk) *særkvarken s*, *sjarmkvarken c*, *botnkvarken b*, og *toppkvarken t* er alle ustabile og går sund i løpet av ein liten brøkdel av eit sekund, til dømes  $10^{-6}$  s, eller endå raskare. Og så har alle dei ladde leptona kvar sitt nøytrino.

Til justérgruppa for elektroveik teori er det knytt tre boson  $W^k$ , der  $k = 1, 2, 3$ , som koplar til den venstrehendte straumen (sjå likning (1)) med elektroveik ladning  $g$ , slik som fotonet koplar med elektrisk ladning  $e$ . Ein har også eit vektorboson kalla  $B$ , som koplar til både venstre- og høgrehendte straumar med same elektroveike ladning  $g'$ . Dei fysiske ladningane  $e$  og  $g_W$  er lineærkombinasjonar av ladningane  $g$  og  $g'$ . Alle desse  $(3 + 1) = 4$  vektorbosona må også vera masselause (som td. fotonet) for at den elektroveike teorien skal vera justérsymmetrisk.

Ved justértransformasjonar skjer det ei omstokking av komponentane av dei ”matematiske”, masselause partikkelfelta, både for fermiona og for vektorbosona. Me skal seinare sjå at til slutt kan visse lineærkombinasjonar av felt (både for boson og for fermion) tolkast som representantar for fysiske partiklar. For at fermionane skal framstå som massive trengst det ”noko” til å kople dei venstre- og høgrehendte komponentane saman slik at dei ikkje lenger er uavhengige. Og ikkje minst: Det trengst ”noko” med spinn null for å gjeva vektorbosonane ein spinn null-komponent slik at dei kan bli massive. Eit masselaust vektorboson har nemleg to fridomsgradar, svarande til spinn (+1) forover og (-1) bakover, medan eit massivt vektorboson, som kan vera i ro, har tre fridomsgradar (spinn +1, 0, og -1 langs ein akse). Dette ”noko” er *higgsfeltet*.

Me går no ut ifrå at det finnst eit higgsfelt  $\phi$ , som er ein dublett av to komplekse felt  $\phi_+$  og  $\phi_0$ , dvs. higgsfeltet har fire reelle komponentar. Higgsfeltet er ulikt andre felt fordi det ikkje svarar direkte til nokon fysisk partikkel. Men higgsfeltet trengst for å kople nokon av felta saman på ein justérinvariant måte, og på ein måte som seinare kan forklare korleis partikkelmassar oppstår i elektroveik vekselverknad.

## Spontant symmetribrot

Spontant symmetribrot (SSB) tyder at grunntilstanden (vakuum) ikkje har den fulle symmetriene til dei dynamiske likningane. Eit mykje brukta døme er ein magnet der vekselverknaden er rotasjonssymmetrisk, nemleg proporsjonal med eit skalarprodukt av to vektorar for elementære magnetiske moment, men der grunntilstanden er ein magnet (gjerne ved låg temperatur) der elementærmagnetane er retta langs ei bestemt retning.

Hypotesen er at delar at higgsfeltet, *ulikt alle andre felt*, har ein verdi ulik null i vakuum; dvs. medan komponenten  $\phi_+$  har null verdi i vakuum, har realdelen av komponenten  $\phi_0$  ein verdi  $v$  som er *ulik null*. Då dei ulike delane av higgsfeltet no har ulik vakuumverdi, vil justérsymmetrien brytast. Me har eit spontant symmetribrot. Ein slik vakuumverdi har ein viss analogi med *eteren* i gamal teori for elektromagnetiske bylgjer. (I ref. (1) er det forklåra korleis vakuumverdien svarar til minimum av det såkalla higgspotensialet). Ein kan no reorganisere dei to komplekse felta  $\phi_+$  og  $\phi_0$  (nemnd på slutten av førre seksjon) til fire reelle felt som ikkje har spinn. Tre av desse kan brukast som justérfunksjonar, slik som  $\chi$  i likning (3). Det fjerde feltet kan skrivast  $(v + H)$ , der  $H$  svarar til den fysiske higgspartikkelen med masse  $m_H \neq 0$ .

Etter dette får tre lineærkombinasjonar av  $B$  og  $(W^k)$  tilførd komponentar med spinn  $s = 0$ , og gjer desse *massive*. Desse tre svarar til dei fysiske kraftformidlarane, nemleg partiklane  $W^+$  og  $W^-$  med masse  $M_W \simeq 80 \text{ GeV}/c^2$ , og  $Z$  med masse  $M_Z \simeq 92 \text{ GeV}/c^2$ . Det er dette som er kalla *higgsmekanismen*. Fotonet blir framleis masselaust. Ifylge teorien må det vera ein viss samanheng mellom massane til  $W^\pm$  og  $Z$ , nemleg

$$M_Z = \frac{M_W}{\cos\theta_W} , \quad (7)$$

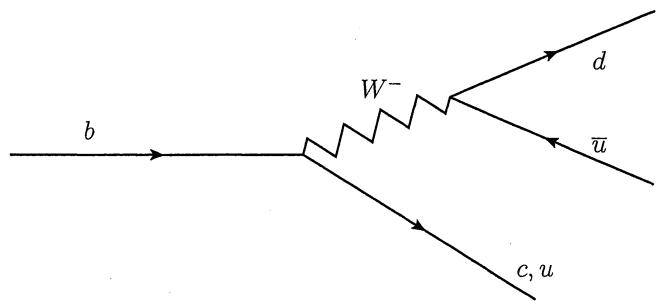
der  $\theta_W$  er ein vinkel som er gjeven ved  $\tan\theta_W = g'/g$ , som er forholdet mellom dei to elektroveike ladningane som er nemde ovanfor. Desse ladningane er av same storleiksorden som den elektriske ladninga  $e$ , fordi me har ein sameint teori for elektromagnetisk og veik vekselverknad. Eksperimentelt er  $\sin^2\theta_W \simeq 0.23$ . Relasjonen (7) må stemme eksperimentelt om den elektroveike teorien skal vera rett, og det gjer den faktisk! Typiske veike prosessar som  $\pi^- \rightarrow e^- \nu_e$  og  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$  (sjå figurane 1 og 2) har vore kjend lenge. Dersom ein samanliknar det som før er kjend med det ein får fra elektroveik vek-

selverknad, finn ein at vakuumverdien til higgsfeltet må vera  $v \simeq 246$  GeV. Alle fermionane, samt  $W$ - og  $Z$ -bosona, vil få massar proporsjonalt med  $v$ . Men for fermiona finst det ingen restriksjonar analogt med den me har for  $W$ - og  $Z$ -massane i likning (7). Ein skal merke seg at ved ekstremt høge energiar,  $E >> m_W c^2$ , dvs. når  $W$ - og  $Z$ -massane kan neglisjerast, så vil all elektroveik vekselverknad ha omlag same styrke og ha lang rekkevidde. Ein tenkjer seg også at ein gong i det tidlege universet var den elektroveike justérsymmetrien gyldig, men at symmetrien vart broten då universet vart kjølt ned.

Higgsfeltet ser ikkje skilnad på fyrste, andre og tredje-generasjons fermion. Difor vil det gje masse til ein lineærkombinasjon av kvarkar med same elektriske ladning. Ein må såleis skilje mellom kvark-kombinasjonen  $q_W$  som deltek i veik vekselverknad, og dei fysiske kvarkane  $q$  som har ein bestemt masse. Tidleg på 1960-talet visste ein at nøytronet og  $\Lambda$ -partikkelen (som inneheld ein *særvark*  $s$ ) hadde same sluttprodukt når dei gjekk sund:  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ , og sameleis  $\Lambda \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ . Den italienske fysikaren Cabibbo sette i 1963, før kvark-biletet var kjent, fram ein hypotese som svarar til at den  $d$ -kvarken som deltek i veik vekselverknad ikkje er ein "rein  $d$ -kvark", men er ei blanding av  $d$  og  $s$  (hugs at før 1974 visste ein berre om dei tre lettaste kvarkane  $u, d, s$  – i den grad folk trudde på kvarkar i det heile):

$$d_W = d \cos\theta_C + s \sin\theta_C, \quad (8)$$

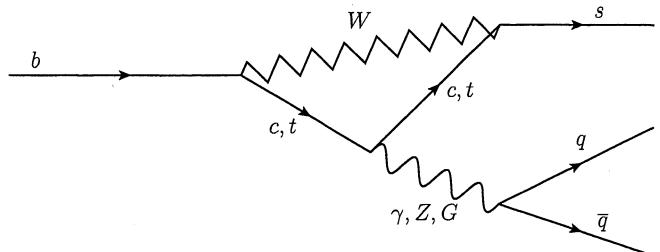
der cabibbovinkelen  $\theta_C$  er gjeven ved  $\sin\theta_C \simeq 0.22$  (Denne vinkelen må ikkje forvekslast med den veike miksevinkelen  $\theta_W$  i likninga (7).) Om  $d$ -kvarken i figur 1 bytast ut med ein  $s$ -kvark, kan dette svare til prosessen  $\Lambda \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ . Denne kvarkmiksinga (8) vart vidareførd av japanarane Kobayashi og Maskawa med 6 kvarkar, i eit arbeid som dei fekk nobelprisen for i 2008.<sup>(4)</sup> Dei "veike eigentilstandane"  $d_W, s_W, b_W$  som deltek i veik vekselverknad (altså ved utveksling av  $W$ -boson-) er blandinger (lineærkombinasjonar) av dei fysiske kvarkane  $d, s, b$ . Vanlegvis vil ein  $d$ -kvark spaltast til ein  $u$ -kvark og eit (virtuelt)  $W$ -boson som seinare spaltast til lette fermion. Men no kan ein annan del av  $d_W$ , til dømes ein  $b$ -kvark, også spaltast til ein  $u$ -kvark og eit (virtuelt)  $W$ -boson. Dette tyder at  $b$ -kvarken er ustabil! Utan kvarkmiksing ville  $b$ -kvarken ha vore stabil fordi han sit i dublett med den ekstremt tunge  $t$ -kvarken, som  $b$ -kvarken ikkje ville ha energi nok til å spaltast til. Ein  $b$ -kvark kan gå sund som i diagrammet i figur 5, eller td. på den meir komplis-



Figur 5. Feynmandiagram for sundfall av ein  $b$ -kvark til ein  $c$ -eller  $u$ -kvark, samt ein  $d$ - og ein anti- $u$ -kvark ( $\bar{u}$ ). Utan kvarkmiksing ville  $b$ -kvarken (med masse på ca.  $5 \text{ GeV}/c^2$ ) måtta spaltast til ein top-kvark  $t$ , som er energimessig forbode då top-kvarken er svært tung (ca.  $170 \text{ GeV}/c^2$ ). Her sit  $b$ -kvarken ofte i eit  $B$ -meson i lag med ein lett antikvark som ville vera gjenomgående (i diagrammet) og ikkje ta del i den veike vekselverknaden. Dei to kvarkane og dei to antikvarkane i sluttilstanden kan då gruppere seg til to meson.

erte måten som i diagrammet i figur 6.

Konsekvensen av kvark-miksinga som higgsmekanismen er ansvarleg for, er at kvantetala for dei ulike kvarktypane (kvark-flavour) ikkje er bevarte. Vidare er koeffisientane i desse lineærkombinasjonane meir kompliserte enn i likning (8) og kan vera komplekse tal. Ein ladningskonjugering, dvs. ein  $C$ -transformasjon, inneber mellom anna komplekskonjugering. Imaginærdelen av dei komplekse tala skiftar dermed forteikn, noko som fører til eit brot på  $CP$ -symmetri! Dette er observert i prosessane  $K \rightarrow 2\pi$  og ulike sundfall av  $B$ -meson, som inneholder ein  $b$ -kvark og ein lett antikvark ( $\bar{u}$  eller  $\bar{d}$ ). Hausten 2011 såg ein på LHC også teikn til brot på  $CP$ -symmetri i prosessane  $D \rightarrow K^+ K^-$  og  $D \rightarrow \pi^+ \pi^-$ . Men dei  $CP$ -brytande effektane innanfor standardmodellen er for små til å forklare assymmetriene mellom materie og antimaterie in-



Figur 6. Feynmandiagram for sundfall av ein  $b$ -kvark som skuldast kvarkmiksing og kvantefluktuasjonar der tunge partiklar (som td.  $W$ -bosonet og top-kvarken  $t$ ) oppstår og blir borte. Her kan  $q$  vera  $u, d, s, c$ -kvarkar. Dette diagrammet skildrar ein  $CP$ -brytande prosess. Slike kvantefluktuasjonar kan reknast ut konsistent fordi elektroveik teori er basert på justérsymmetri.

nanfor kosmologien for det tidlege universet. Me har ein tilsvarande miksing i nøytrino-sektoren, men det er ikkje klårt om denne berre skuldast Higgsmekanismen.

## Sterk vekselverknad

Den moderne versjonen av sterke vekselverknader handlar om ”fargekrefter” mellom kvarkar og gluon, og blir kalla kvantekromodynamikk (QCD). Kvarkane kjem i tre ”fargar”, som td. kan kallast raud, gul og blå. Dette gjeld alle 6 kvarktypane (alle ”flavours”)  $u, d, s, c, b, t$ . Justérgruppa for QCD inneholder 8 uavhengige justérfunksjonar og dermed 8 gluonfelt. Desse justértransformasjonane vil stokke om dei tre fargekomponentane av kvarkfeltet slik at td. den ”nye” raude komponenten er ei lineærkombinasjon av dei tre ”gamle” fargekomponentane. Like eins blir gluonfelta stokka om og får tillegg frå justérfunksjonane. Fordi gluona har fargeladning kan dei vekselverke med seg sjølv. På dette punktet er det stor skilnad på QCD og QED. Det er desse sjølvekselverknadene som gjer at kvarkane ikkje kan sleppe ut av protonet og nøytronet.<sup>(5)</sup>

For dei tre lettaste kvarkane  $q = (u, d, s,)$  kan grensa  $m_q \rightarrow 0$  vera ein brukbar approksimasjon, og i dette tilfellet kan ein også etter higgsmekanismen splitte kvarkfelta i ein høgre og ein venstre-hendt komponent  $q = q_R + q_L$ , slik som i likning (2). Dei høgre hendte og dei venstrehendte komponentane vil oppetre uavhengige av kvarandre i lagrange-funksjonen i grensa  $m_q \rightarrow 0$ . Ein har ein *høgre-venstresymmetri*. Om denne symmetrien var realisert i naturen skulle ein ha hatt paritetsdublettar, dvs. ein skulle td. ha sett ein partnar til protonet med nesten same masse, men med motsett paritet. Dette er *ikkje* realisert i naturen. Difor må symmetrien vera broten. Det *tome romet* har denne approksimative høgre-venstresymmetrien, men ikkje *grunntilstanden*, dvs. vakuum. Symmetribrotet skjer fordi grunntilstanden i QCD har lågare energi enn det *tome romet* har. Det finst eit såkalla *kvark-kondensat*, eit fenomen som ikkje er ulikt mekanismen for supraleiing. Dette gjer at dei venstrehendte og dei høghendte kvarkane koplast saman, og høgre-venstresymmetrien brytast. Japanaren Nambu fekk nobelprisen for å forkläre dette i 2008.<sup>(4)</sup> Han delte prisen med dei to andre japanarane nemd ovanfor. Masseskalaen for kondensatet er den same som for den effektive kvarkmassen, og er av storleiksorden 300 MeV. Higgsmekanismen gjev massar til  $u$  og  $d$ -kvarkane, men dette utgjer

berre mellom ein og to prosent den totale nukleon-massen. Ein kan seia at dei tre kvarkane i protonet og nøytronet på grunn av dette symmetribrotet, får ein effektiv kvarkmasse av same storleiksorden som masseskalaen til kvark-kondensatet. Ein kan til ein viss grad tenke på denne effektive kvarkmassen som bindingsenergi, men mekanismen er meir subtil.

## Konlusjon

Det viktigaste higgsfeltet gjer er å gje massar til  $W^\pm$  og  $Z$ , for å forkläre at veik vekselverknad faktisk er veik og har stutt rekkevidde, dernest å gje ulike massar til alle fermionane, samt kvark-miksinga som blant anna gjev ustabile kvarkar og brot på CP-symmetri. Massen til nukleonane skriv seg derimot frå symmetribrotet i sterke sektor. Justérsymmetriane i rein elektromagnetisk og i sterke vekselverknad, blir verande ubrotne.

## Referansar

1. L. Bugge m.fl.: *Er higgsbosonet funnet ved LHC?* FFV 74, Nr. 3, 64-72 (2012)
2. Hallstein Høgåsen: *Nobelprisen I fysikk -99.* FFV 61, Nr. 4, 120-121 (1999)
3. Jan Olav Eeg: *Nobelprisen i fysikk for 1979 gitt i gauge-teori.* FFV 42, Nr. 2, 27-29 (1980)
4. Bjørn H. Samset: *Nobelprisen I fysikk 2008: Brutto symmetrier og små partikler.* FFV 70, Nr. 4, 116-119 (2008)
5. Bjørn H. Samset: *Nobelprisen i fysikk 2004: Asymptotisk frihet.* FFV 66, Nr. 4, 107-110 (2004)

∞

# Marietta Blau - En pionér i partikkelfysikk

Sven Oluf Sørensen \*

I 1937 vandret to unge damer fra Wien, Marietta Blau og hennes elev, Hertha Wambacher, rundt i de østerrikske alpene og plasserte små pakker med røntgenfilm på noen fjelltopper. Efter å ha fremkalt filmene ble disse undersøkt med et mikroskop. Da oppdaget de et helt nytt atomært fenomen, "Zertrümmerungs-stjerner", som plasserer de to damene som pionerer i moderne høy-energifyskikk og partikkelfysikk.

## Wien Radiuminstitutt

Marietta Blau ble født den 27. april 1894 i Wien som datter av advokat Markus Blau og Florentine Goldenzweig, i en jødisk middelklassefamilie. – Sigmund Freud og Lise Meitner hadde vokst opp i det samme kvarteret, Leopoldstadt, i byen. – Efter i noen år å ha vært elev på en rekke private pikeskoler begynte Marietta i 1914 på Universitetet i Wien. Dette hadde først i 1891 blitt åpnet for kvinnelige studenter. Marietta Blau valgte matematikk og fysikk som sitt hovedstudium selv om hun i begynnelsen hadde ønsket å utdanne seg som barnepsykolog.

Under sitt universitetsstudium ble Marietta Blau i et semester behandlet for tuberkulose på et sanatorium. Ett semester fulgte Marietta et kursus i radioaktivitet på Wien Radiuminstitutt, en egen avdeling på universitetet. Der tok hun sin diplomoppgave i 1918: *Über die absorbtion divergenter "Gamma-Strahlung"*. – Det er ikke utenkelig at denne interessen var inspirert av Marie Curies suksess på Paris Radium Institute noen år tidligere. Wien Radiuminstitutt var på den tiden verdensberømt og hadde det største lager av radium i verden.

Etter at Marietta hadde fullført sine studier ved Universitetet i Wien, arbeidet hun i et par år blant annet i Berlin og Frankfurt am Main i kommersielle

firmaer med praktisk røntgenstråleteknikk.

Da Marietta Blaus mor ble syk høsten 1923, returnerte Marietta til Wien for å kunne pleie sin mor. Samtidig tok hun opp sine studier på Wien Radiuminstitutt. Dette arbeidet var ulønnet, og hun måtte basere seg på finansiell støtte fra sin familie.

I den første tiden på Wiens Radiuminstitutt arbeidet Blau og publiserte studier over radioaktivitet. Da var scintillatorteknikk i praksis den eneste metoden til å registrere individuelle, ladde partikler emittert fra kjernreaksjoner. Det besto i at man lot partikkelen treffe en skjerm som var påsmurt sinksulfid, ZnS. Derved oppsto det et kort lysglimt som kunne observeres visuelt eller i et mikroskop med moderat forstørrelse. Denne metoden hadde imidlertid mange svakheter og betød for eksempel at observatøren måtte arbeide i halvmørke for å kunne tilpasse seg de ofte meget lyssvake signalene. Marietta Blau var oppmerksom på disse svakheter ved scintillatormetoden, og hun var på jakt etter sikrere registreringsteknikker.

I denne tiden var Wiens Radiuminstitutt ofte besøkt av utenlandske forskere. Blant disse var en meget inspirerende svenske, Hans Pettersson fra Göteborg. Han var opptatt av å finne bedre metoder til å registrere individuelle ladde atomære partikler. Blant annet foreslo han for Marietta å undersøke metodene for en fotografisk deteksjon av partiklene.

Fotografiske metoder hadde allerede fra 1914 vært undersøkt i Wien av Wilhelm Michl. Han hadde registrert spor av alfapartikler, men eksperimentene ble avsluttet da Michl falt i den første verdenskrigen.

I perioden 1925–1932 forsøkte Marietta Blau (figur 1) på Wien Radiuminstitutt å registrere atomære partikler fotografisk. Hun koncentrerte seg særlig om å adskille spor fra protoner og alfa-partikler. I disse studier samarbeidet hun med Hans Pettersson og en rekke kvinnelige fysikere. Særlig ble hun knyttet til den ti år yngre Berta Karlik.

Fotografiske prosesser er basert på at krys-taller av sølvbromid, AgBr, dekomponeres under

\* Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.



**Figur 1.** Marietta Blau ved Institute for Radium Research i Wien, omkring år 1925.

bestråling av kortbølget lys, gammastråling eller ladde atomære partikler. Denne prosessen er benyttet i den fotografiske plateteknikken ved at man på en glass- eller plastplate har smurt på en gelatin som inneholder større eller mindre korn av AgBr. Når disse kornene dekomponeres ved bestråling dannes det et usynlig, latent bilde i emulsjonen. Dette blir synlig ved å anvende en fremkaller som fikserer bildet. Følsomheten av filmen er blant annet avhengig av størrelsen og tettheten av AgBr-kristallene.

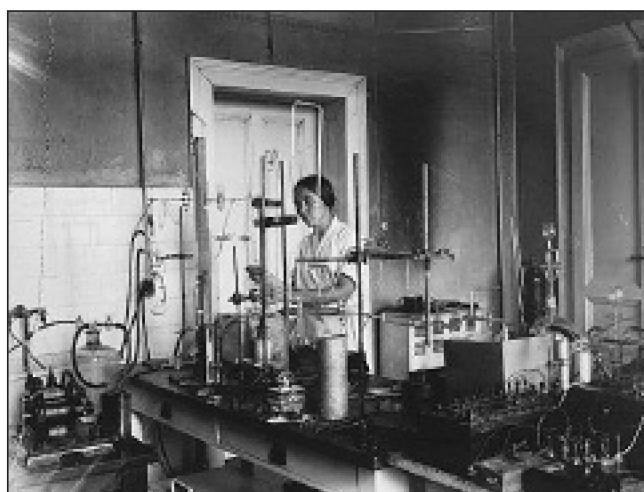
Ett av de sentrale problemer ved mikrofotografering av atomære prosesser i emulsjoner, er at bildene er befeftet med en ”tåke” som skyldes bakgrunnsstråling. Det tilslører bildene av de prosessene man er interessert i å studere. Marietta Blau forsøkte i en årekke å redusere virkningene av dette bakgrunnssløret ved å eksperimentere med flere forskjellige kjemikalier under fremkallingen. Denne metoden ble kalt *desensibilisering*.

## Hertha Wambacher

I slutten av 1920-årene møtte Marietta Blau for første gang Hertha Wambacher (1903–1950) (figur 2) som ble Blaus nærmeste samarbeidspartner.

Wambacher var født 9. mars 1903 som datter av en fabrikkeier i Wien, og begynte å studere kjemi på Universitetet i Wien i 1928, som student for Marietta Blau. Hun skiftet over til fysikk etter et par år etter påvirkning av Blau.

Hertha Wambacher var Marietta Blaus diametrale motsetning både i utseende og karakter. Ma-



**Figur 2.** Hertha Wambacher ved Institute for Radium Research i Wien, omkring år 1925.

rietta Blau var kort, mørkhåret, stille og forfinet, men allikevel målbevisst og energisk. Hertha Wambacher var høy, blond, kraftig og robust. Det sies at de to fant hverandre fordi de begge hadde gått på samme ungdomsskolen. Det ble også hevdet at de to personlighetene supplerte hverandre.

Hertha Wambacher ble sterkt engasjert i Blaus desensibiliseringsexperimenter, og de hadde til sammen 19 avhandlinger om dette emnet.

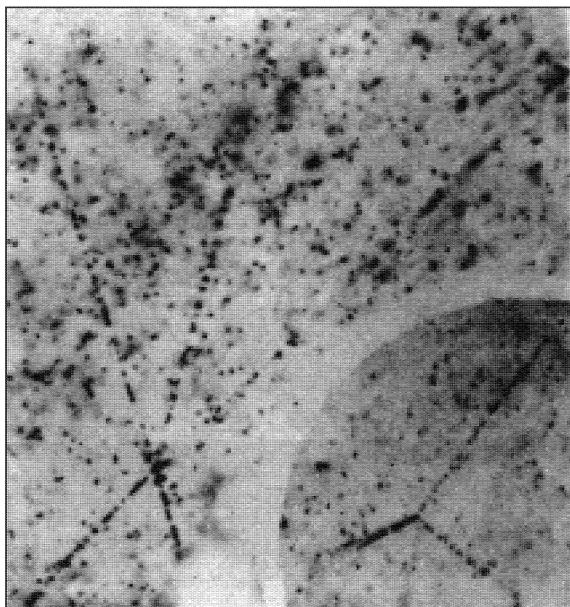
Marietta Blau og hennes medarbeidere kunne i løpet av 1930-årene produsere en rekke interessante mikrofotografier av prosesser. De kunne for eksempel skjelne mellom protoner og alfabartikler. Protonene fra disse eksperimentene ble skaffet til veie ved å bestråle hydrogenholdig materiale med nøytroner. Da kunne protoner bli slynget ut med betydelig energi. Selve den fotografiske emulsjonen inneholdt hydrogen og protoner, og disse kunne følges over betydelig rekkevidde i emulsjonen.

## Kosmisk stråling

Allerede i 1932 hadde Marietta Blau forsøkt å registrere kosmisk stråling med fotografiske filmer. Den kosmiske strålingen var oppdaget i 1912 av den østerrikske fysiker Viktor Hess. Denne var i 1930-årene professor ved Universitetet i Innsbruck, og hadde innredet et observatorium for registrering av kosmisk stråling på en 2 300 m høy fjelltopp, Hafelekars, i de østerrikske alpene. I 1937 kontaktet Blau og Wambacher Hess om tillatelse til å eksponere en rekke filmer på Hafelekars. Dette ble innvilget, og en serie fotografiske plater ble pakket inn og plassert på denne fjelltoppen.

## Partikkelspor kalt "Zertrümmerung-stjerner"

Efter noen måneders eksponering ble filmene brakt ned til Wien Radiuminstitutt, fremkalt og underlagt en mikroskopisk undersøkelse. Man fant da en gruppe av partikler som hadde gått på tvers igjennom filmene. Men så oppdaget man en spesiell prosess. Den besto i at fra tilfeldige punkter i emulsjonen gikk det ut spor i ulike retninger med varierende korntetthet av partikler med forskjellige hastigheter (figur 3). Disse resultatene ble rapportert i vitenskapelige artikler i 1937,<sup>(1,2)</sup> og fotografier av disse partikkelsporene ble sendt ut til forskjellige europeiske og amerikanske universiteter hvor de vakte en betydelig interesse, ikke minst i Werner Heisenbergs gruppe ved Universitetet i Leipzig. Der fant man ut at høyenergetiske partikler i den kosmiske strålingen hadde kollidert med en sølv- eller bromkjerne i emulsionene og derved bragt dem til å fragmentere i sine bestanddeler, det vil si protoner, alfapartikler etc. I et seminar i Leipzig ble det uttalt: *"Die zwei Damen Marietta Blau und Hertha Wambacker haben die ersten Kernzertrümmerungen in der hohen Atmosphäre beobachtet. Und zwar Zertrümmerungen von Silberatomkernen. Sie haben das zum ersten Mal entdeckt"*. – Efter dette gikk fenomenet under navnet: "Zertrümmerungs-stjerne".



**Figur 3.** Partikkelspor oppnådd av Marietta Blau og Hertha Wambacher på fotografiske plater som var utsatt for kosmisk stråling i 2300 m høyde.

## "Anschluss"

Men disse interessante og lovende eksperimenter ledet av Marietta Blau fra Wien Radiuminstitutt fikk en brutal avslutning. – I 1933 ble Adolf Hitler tysk rikskansler, og i løpet av noen måneder ble Tyskland forvandlet til en diktaturstat. Det resulterte blant annet i at alle statsansatte jøder mistet sine stillinger. Mange valgte å emigrere – blant andre Albert Einstein. Ett av nazistenes mål var å integrere Tyskland og Østerrike til et "Stortyskland". Dette "Anschluss" ble realisert ved at tyske tropper invaderte Østerrike 13. mars 1938.

Marietta Blau hadde lenge vært forberedt på at dette ville komme. Allerede omkring århundreskiftet hadde det dukket opp sterke antisemittiske tendenser i Wien. Disse ble forsterket i 1920-årene etter at Østerrike sammen med Tyskland hadde gått ut som den tapende part i den første verdenskrigen. Mange av de jødiske ansatte og studentene på Wien Radiuminstitutt, følte seg usikre overfor disse ubehagelighetene. Dette gjaldt også i høy grad Marietta Blau.<sup>(3)</sup> – En person som besøkte Wien Radiuminstitutt beskrev henne i 1926 som *"a little jewess always looking out for the next pogrom"*. – En person som opplevet trakasseringen av Marietta Blau i 1930-årene var den norske radiokjemiker og Madame Curie-elev professor Ellen Gleditsch (1897–1968) ved Universitetet i Oslo. Hun skrev i et brev til professor Friedsrich Paneth ved Imperial College i London, 15. november 1938:

*Dr. Blau is discretion itself and she does not and will not say anything against Dr. Wambacher. But I can tell you that Dr. Blau has been abominably treated by the Nazis and among them Dr. W. It was in fact the difficulties with Dr. W. that in January last year made me ask Dr. Blau to work here for some time; I had heard about them, not from Dr. Blau herself, but from other workers in the laboratory.*

Blant de mange som beundret Marietta Blaus arbeider, var det flere berømte fysikere, blant andre Albert Einstein. Den 14. februar 1938, fire uker før den tyske invasjonen av Østerrike, skrev han et brev til Universitetet i Mexico og spurte om mulighetene av en stilling for Marietta Blau. Samtidig sendte han et brev til en venn i New York og ba om det samme. I begge brevene berømmet Einstein Blau i meget sterke ordelag for å ha *"invented a successful method for studying cosmic radiation by photographic means (photographic detection of certain atomic disintegration processes). This is not*

*an ordinary case, but a really valuable person".<sup>(4)</sup>* – Disse bestrebelsene lykkes, og den 1. januar 1939 ble Marietta Blau ansatt som professor ved: Escuela superior de ingeriera mecanica y electrica, Mexico City.

## I København

Efter mange byråkratiske formaliteter som visa, utreisetillatelser etc. forlot Marietta Blau den 12. mars 1938 Wien for å reise til Mexico via Skandinavia. På jernbanestasjonen i Wien sto allerede tyske tropper. I Hamburg ble hennes bagasje ransaket, og alle hennes vitenskapelige data og protokoller ble konfiskert. I København holdt Blau en forelesning på Niels Bohr Institutet. Niels Bohr var selv til stede og var meget engasjert i Blaus resultater. Han var på den tiden engasjert i sin utarbeidelse av dråpemodellen for atomkjernreaksjoner og sammensatte kjerner, og mente at Zertrümmerungstjerner hadde relevans for denne modellen.

Blau var selv misfornøyd med sin forelesning da hun hadde vært i dårlig form siden hun dagen før hadde hatt et nervøst sammenbrudd på grunn av de vanskeligheter hun hadde hatt de siste dagene. Fremfor alt var hun redd for sin syke mor som var blitt igjen i Wien.

Fra København reiste Blau innom Göteborg og hilste på sin venn og kollega Hans Pettersson. Derefter dro hun til Oslo for å bli tatt hånd om av Ellen Gleditsch.

## Marietta Blau i Oslo

Marietta Blaus opphold i Norge skyldtes at hun var invitert av Ellen Gleditsch til Universitetet i Oslo. Ellen Gleditsch var i mellomkrigsårene en internasjonalt kjent representant for forskning og liberale holdninger. Hun var i 1926–1939 president i "International Federation for University Woman".

Blau ble i Oslo til oktober 1938. Hun var sterkt opptatt av emigrantproblemer for seg selv og sin syke mor. Det var byråkratiske saker som utreisevisa, oppholdstillatelser etc. som var overtatt av den tyske ambassaden i Oslo etter at den østerrikske ambassaden var blitt nedlagt da "Anschluss" fant sted.

Ved siden av disse problemene ble Blau engasjert i et vitenskapelig eksperiment på Kjemisk institutt ved Universitetet i Oslo. Dette gikk ut på følgende:

I 1928 hadde man på Wien Radiuminstitutt funnet spor av en gruppe alfapartikler med en rekkevidde på 2 cm i luft. Man hadde ikke lyktes i å

identifisere hvilket element som var opphavet til denne strålingen. Det var visse indikasjoner på at den hadde en forbindelse med elementet samarium. Det ble også spekulert på om strålingen kom fra en hittil ukjent gren av uran eller thorium-seriene. Blau engasjerte seg i å undersøke disse spørsmålene nærmere. Hun ville benytte den fotografiske metoden hun hadde utarbeidet i Wien, og la en rekke fotografiske plater, produsert av Ilford, i oppløsninger av samarium og uran. Filmene hadde en tykkelse av den fotografiske emulsjonen på 60 og 100  $\mu$ . Efter en tid ble filmene fremkalt og undersøkt med et mikroskop. Sporene av alfa-partiklene ble målt ut, og deres rekkevidder og energispektra registrert. Resultatene ble publisert i et norsk tidsskrift.<sup>(5)</sup> Eksperimentet førte ikke til en definitiv bestemmelse av alfapartiklenes opphav selv om det var sterke indisier på samarium.

Marietta Blau ble i Oslo til oktober 1938. Deretter fløy hun via Hamburg til London for å bli forenet med sin mor som kom dit direkte fra Wien.

## I Mexico

Fra London krysset mor og datter Atlanterhavet med båt til Mexico. Mariettas gode venninne, Bertha Karlik, var i London på den tiden og skrev i et brev av 16. mars 1939 til Ellen Gleditsch: *"I can't help feeling that there is something rather pathetic about this poor little frail figure, so utterly worn out by one blow after another, now crossing the ocean to start a new life in what still seems to me a somewhat exotic country."*

Marietta Blau ankom Mexico sammen med sin mor i begynnelsen av november 1938. Dette reddet de to fra "holocaust" som kostet ca. 70 000 østerrikske jøder livet. Men Blaus arbeidsbetingelser i Mexico var lite tilfredsstillende. Meksikanerne var vennlige og meget hjelpsomme, men hennes muligheter for å fortsette sine vitenskapelige eksperimenter var små. Hun ønsket derfor å komme til et bedre forskningsmiljø, f.eks. til USA. Men hun ville ikke uroe sin syke mor med enda flere forandringer av deres hjemsted. Moren, Florentine, døde i 1943 og ble begravet på Madeira. Efter dette søkte Marietta om visum for å reise til USA.

## I USA

Visum til USA ble innvilget, og i mai i 1944 reiste Marietta til New York City hvor hun fikk arbeide

industrielt i ”*Canadian Radium Company*”. Efter at hennes kontrakt der utløp, ble hun ansatt av ”*Atomic Energy Commission*” i Brookhaven National Laboratory på Long Island i New York. Der begynte hun i 1950, og fikk helt andre betingelser for sine vitenskapelige undersøkelser. I Brookhaven, og på andre plasser i USA, hadde man tatt i bruk gigantiske mesonproduserende akseleratorer, og høyenergi kjernefysikk og partikkelfysikk var blitt sentrale disipliner i moderne fysikk. Den fotografiske plateteknikken var blitt radikalt forandret takket være fotografiske filmer produsert av Ilford i London, og professor Cecil Powell og hans medarbeideres arbeider i Bristol i England.

I flere år arbeidet Marietta Blau med fotografisk plateteknikk i Brookhaven. Men hun begynte å finne en viss utilfredsstillelse med arbeidet, og i 1955 søkte hun om permisjon i ett år fra Brookhaven for å akseptere et tilbud som *associate professor ved University of Miami* i Florida. I februar 1956 kjørte hun i sin egen bil fra New York til Miami, hvor hun startet opp et eget laboratorium med fotografisk plateteknikk.

I Miami ble Marietta Blau kjent med en ung vitenskapelig assistent, Arnold Perlmutter. Hun overtalte ham til å arbeide med partikkelfysikk. Han hadde arbeidet som faststøff-fysiker. De to bygde sammen apparatur for automatisk måling av partiklers ionisasjon som er avgjørende for identifikasjon av partiklene. Hun ble dessuten en god venn med Perlmutters familie.

## Retur til Wien

Til slutt ble Marietta Blaus lengsel etter Europa, og spesielt Wien, så sterk at hun i 1959 besluttet etter 22 år i eksil, å returnere til Wien. Hun ankom Wien våren 1960. I de siste ti årene av sitt liv var hun engasjert i samarbeidsprosjekter i partikkelfysikk med yngre medarbeidere, foredragsvirk somhet og publisering av artikler og bøker om fotografisk plateteknikk.

## Anerkjennelse

Marietta Blau og Hertha Wambacker ble tre ganger nominert til Nobelprisen i fysikk. Forslagsstillere var blant andre relativitetsteoretikeren Hans Thirring i 1955, og selveste Erwin Schrödinger i 1950. Men de to kvinnene fikk aldri nobelprisen. De fikk derimot flere andre ærespriser,

bl.a.: *Det tyske videnskapsakademis Leibnitz-pris, 1957*, og *Det østerrikske vitenskapsakademis Erwin Schrödingers pris, 1962*.

I de siste årene av sitt liv var Marietta Blau plaget av sviktende helse. Hun avgikk ved døden den 27. januar 1970, og ble begravet på Wiens Zentralfriedhof i den samme grav som hennes far lå begravet i.

## Referanser

1. M. Blau and H. Wambacker: *Disintegration processes by cosmic rays with the simultaneous emission of several heavy particles*. Nature (London) **585**, (1937)
2. M. Blau and H. Wambacker: *II. Mitteilung über photographische Untersuchungen der schweren Teilchen in der kosmischen Strahlung. Einzelbahnen und Zertrümmerungssterne*. MIR **409**, (1937); Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien. Math. Naturwiss. Kl IIa **146**, 623-641 (1937)
3. Peter L. Galison: *Marietta Blau. Between Nazis and Nuclei*. Physics Today **50**, 42 (1997)
4. Birgitte Strohmaier and Robert Rosner: *Marietta Blau – Stars of Disintegration. Biography of a pioneer of particle physics*. Ariadne, Riverside, California (2006)
5. M. Blau: *Über das Vorkommen von Alpha-Teilchen mit Reichweiten zwischen 1,2 cm und 2 cm in einer Samariumlösung*. Archiv for Matematik og Naturvidenskap, **B 42**, Nr. 4, 1–10 (1939)

∞

**Skriv i  
Fra Fysikkens  
Verden!**

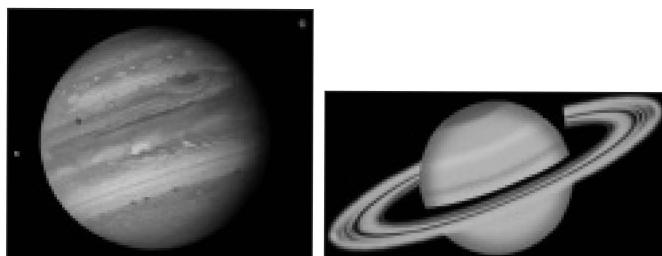
# Metallisk hydrogen

Emil J. Samuelsen \*

Ved vanleg trykk og temperatur er hydrogen ein molekylær gass,  $H_2$ , som kondenserer til flytande form ved låge temperaturar, under 20 K, og blir fast stoff under 14 K. Spørsmålet om kva som skjer med hydrogen under høge trykk har lenge interessert forskarane, mellom anna fordi hydrogen er det enklaste av alle grunnstoffa. Teoretiske berekningar peikar i retning av at under ekstreme trykk skulle ei metallisk form opptre, og planetologane vil ha det til at det indre av Jupiter og Saturn er metallisk hydrogen. Hittil har laboratorieeksperiment i diamanttrykkceller under fleire millionar jordatmosfærestrykk i liten grad vist samsvar med teoriane, og sikre indikasjonar på eksistensen av metallisk hydrogen er ikkje funne. Men kappløpet om metallisk hydrogen held fram.

## Innleiing

Dei store planetane Jupiter og Saturn (figur 1) består i hovudsak av grunnstoffa hydrogen (H) og helium (He) med små mengder vatn, metan og ammoniakk i tillegg. Prosentandelane er 90 % H og 10 % He for Jupiter, og 75 % H og 25 % He for Saturn. Dei blir kalla gassplanetar fordi den ytre delen



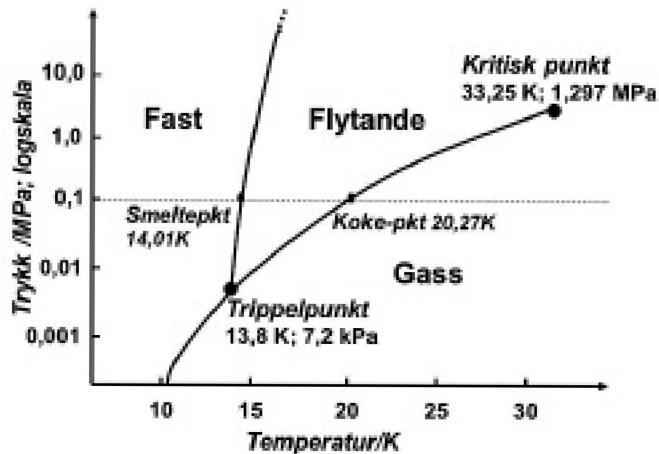
Figur 1. Gassplanetane Jupiter og Saturn. Jupiter består av 90 % og Saturn av 75 % hydrogen, kanskje i metallisk form i det indre av planetane.

er i gassform. Men trykket aukar innover på grunn av gravitasjonen. Ein reknar at i midten av Jupiter er trykket meir enn fire milliardar jordatmosfærar, eller 40 000 GPa (1 GPa (gigapascal) =  $10^9$  N/m $^2$ ). Det er ei vanleg oppfatning at under så høge trykk, og ved dei høge temperaturane ein meiner rår der inne, kanskje 20 000 K, vil hydrogen vere i metallisk form. Det er metallisk hydrogen som er opphavet til det sterke magnetfeltet som Jupiter har, seier planetologane.

Så er spørsmålet: Kan ein framstille metallisk hydrogen her på jorda under høgt trykk, og kva eigenskapar har det i så fall?

Hydrogen er det lettaste grunnstoffet, nummer 1 i det periodiske systemet, med eitt proton som kjerne og eitt elektron omkring. Også litt tungt hydrogen, deuterium (D) finst, med kjerne av eitt proton og eitt nøytron, men berre med andel 0,056 % av naturleg hydrogen.

Figur 2 viser eit temperatur-trykk-fasediagram for hydrogen i molekylær form ( $H_2$ ) slik det normalt føreligg. Ved atmosfærestrykk,  $10^5$  Pa, er  $H_2$  gass for temperaturar over 20,27 K. Det er flytande mellom 20,27 K og 14,01 K, og blir fast stoff for lågare temperaturar. Ved trippelpunktet er fast,

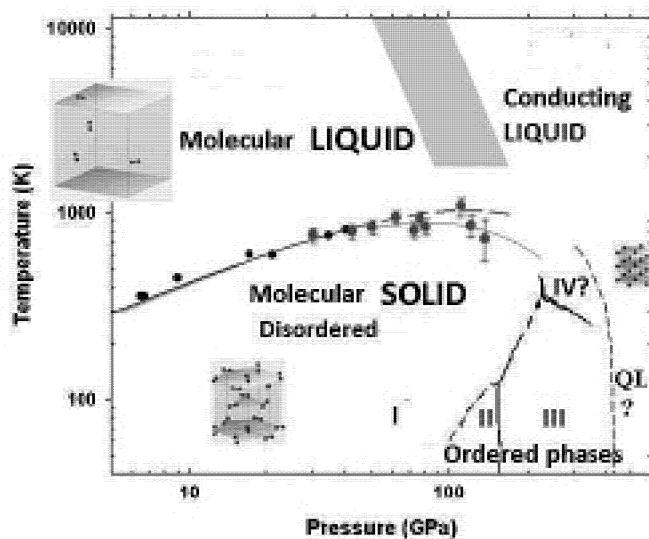


Figur 2. Fasediagram for  $H_2$  ved låge trykk og temperaturar. Atmosfærestrykk er  $10^5$  N/m $^2$  = 0,1 MPa (megapascal), med tilhørande smelte- og kokepunkt. Metallisk hydrogen krev trykk på fleire millionar atmosfærar, som er langt utanfor grensene for denne figuren; sjå figur 3.

\* Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim.

flytande og gassformig hydrogen til stades samtidig, og i likevekt. For temperaturar og trykk over det kritiske punktet er det ikkje skarp overgang mellom flytande og gassformig fase. Ordet 'flytande' er brukt i figur 3 også for denne tilstanden.

Flytande H<sub>2</sub> blei første gong framstilt av J. Dewar i 1898, og fast H<sub>2</sub> blei framstilt året etter. Flytande H<sub>2</sub> har tettleik  $71 \text{ kg m}^{-3}$ , altså berre 7,1 % av vatn. Ved trykk på 150 GPa vil tettleiken vere 10 gonger større. Det er i dette enormt høge trykkområdet, over 1,5 millionar atmosfærar, at hydrogen eventuelt skal kunne oppstre som metall, og då kanskje ikkje som H<sub>2</sub>-molekyl, men som atomært H. Dette trykkområdet er langt, langt utanfor grensene for figur 2, men vist i figur 3.



**Figur 3.** Trykk-temperatur-fasediagram for hydrogen henta frå mange ulike kjelder basert på referanse (4). Figuren kan takast som ei utviding av figur 2, men temperatur- og trykk-aksane her er bytt om. Ved låge trykk opptrer molekylært hydrogen (H<sub>2</sub>) som flytande for temperaturar over kurva, og som fast fase I for temperaturar under. Sjå teksten om dei faste fasane merka med II, III og IV?. QL? står for 'Quantum liquid', ein muleg, men ikkje påvist tilstand.

Hydrogen er eit viktig råstoff i industrien. Det blir framstilt industrielt ved elektrolyse av vatn, eller ved spalting av vatn ved reduksjon over karbon ved høge temperaturar. Det er også interesse for hydrogen som drivstoff i kjøretøy, ettersom avgass ved hydrogendrift blir berre reint vatn. Men transport og lagring av hydrogen er risikofylte. Skrekk-eksemplet er luftskipet Hindenburg som eksploderte i 1937. Det blir gjort betydeleg innsats for å finne alternative lagringsformer for hydrogen, slik som høvelege metallhydrid.

## Hydrogen under trykk

Ikkje berre på grunn av gassplanetane og magnetfeltet rundt dei, men endå meir fordi hydrogen er det lettaste og enklast oppbygde grunnstoffet, er det betydeleg interesse for eigenskapane til flytande og fast hydrogen. Den enkle atomære strukturen inspirerte tidleg teoretikarar til å gjere kvantemekaniske berekningar av struktur og eigenskapar under varierande ytre vilkår. Særleg har oppførsla til hydrogen under høge trykk vore eitt heitt tema i 75 år. Alt i 1935 utleidde E. Wigner og H.B. Huntington at hydrogen kunne bli metallisk under trykk.<sup>(1)</sup> Dei kom til at ved trykk over 25 GPa (som er 250 000 atmosfærar) ville H<sub>2</sub>-molekylet dissosiere til atomært H, som i neste omgang ville kunne avgje elektronet og oppstre som eit metall analogt med litium og natrium. Seinare berekningar har modifisert desse spådommane betydeleg. Ein har etter kvart komme til at dette "enkle" materialet tvert imot ser ut til å oppføre seg høgst komplekst ved aukande trykk og temperatur, som vi skal sjå.

I 1968 fann N.W. Ashcroft at der også kunne oppstre ein supraleiande tilstand for hydrogen under trykk ved temperaturar opp til 300 K,<sup>(2)</sup> i så fall ein retteleg romtemperatur-supraleiar; og i 2004 utleidde E. Babajev, N.W. Ashcroft og vår eigen Asle Sudbø at eit meir komplisert fasemønster kunne oppstre:<sup>(3)</sup> ikkje berre supraleiing, men også superfluiditet. Ein bråte andre teoretiske arbeid er publiserte, ikkje minst i det siste.

No har det seg slik at teoretiske førehandspådommar i faststoff-fysikken sjeldan har vist seg å halde ved eksperimentelle etterprøvingar. Det er altså store og spennande utfordringar for kløktige eksperimentatorar å etterprøve her, og mange gode eksperiment er leverte. Men jakta på metallisk hydrogen er framleis godt i gang. Per i dag er ikkje vona stor om å finne supraleiande og/eller superfluid hydrogen med det første.

## På leit etter metallisk hydrogen

Det er ikkje heilt endeframt å skape dei høge trykka på fleire hundre gigapascal som trengst, og heller ikkje så enkelt å observere det som skjer under slike trykk. Somme eksperiment har nytta trykksjokk med eksplosiv eller laserglimt. Då blir observasjons-tida kort, berre nokre millisekund, og det er ikkje muleg å kontrollere trykket og temperaturen samtidig. Ettersom tidsaspektet spelar ei rolle, vil ein helst føretrekke å studere hydrogenet under statisk

trykk. Ein nyttar då trykkceller av diamant, som er eit sterkt og hardt materiale. Diamantceller har også den fordelen at dei er gjennomsiktige for synleg og infraraudt lys, så ein kan følgje eksperimenta visuelt og spektroskopisk. Med innlagde elektrodar i cella kan ein gjere målingar av elektrisk leiingsevne.

Men studie under så høge trykk er særskrivande. Cellene vil bli deformerte undervegs og kan gi falske signal. Det kan oppstå sprekkar i cellene. Hydrogen er reaktivt og kan tenkast å angripe cellemateriala eller metall- eller epoksy-forseglinga kring prøva. Ein opererer gjerne med særsmå prøveareal, kanskje berre  $5\text{-}10 \mu\text{m}$  i kant, for å få høgt trykk, slik at eksperimenta er kjenslevare for feil av desse slaga. Det er blitt publiserte mange høgtrykkstudiar frå tidleg på 1990-talet som seinare er trekte tilbake fordi dei synte seg å vere feilaktige.

## Fasar av hydrogen

Det vil føre altfor langt her å gå gjennom dei mange ulike studia som er blitt gjorde, så eg avgrensar meg til å nemne to-tre av dei nyaste. I figur 3 gir eg att eit trykk-temperatur-fasediagram som oppsummerer det viktigaste eksperimentelle bildet vi har av hydrogen under trykk per i dag.<sup>(4)</sup>

Ved atmosfærestrykk storknar hydrogen ved 14 K til ein isolerande krystallinsk fase, der molekyla er uordna med omsyn på orientering, som om dei kan rotete fritt. Storknings-, eller smeltepunktet for den faste fasen aukar med aukande trykk, og kjem, som ein ser av figur 3, opp i 1000 K ved 100 GPa (1 million atmosfærar). Ved dette trykket synest det å vere eit flatt maksimum i fasekurva. To teoretiske berekningar (heil- og langstipla kurver på figuren) er i godt samsvar med desse observasjonane, som ein ser.

Flytande og isolerande molekylært hydrogen eksisterer for temperaturar over kurva ved trykk opp til 100 GPa. Sjokktrykkmålingar har gitt indikasjonar på at elektrisk leiande, flytande hydrogen kan eksistere ved temperaturar opp i 3000 K området ved trykk godt over 100 GPa. Men det er ikkje klarlagt om overgangen til leiande fase er gradvis eller skarp. Simuleringar peikar i retning av at den leiande fasen kan bestå av både molekylært og atomært hydrogen, mulegvis med snøgg omlagring mellom dei to formene.

Fast fase er blitt studert i fleire ulike arbeid under statiske trykk i diamantceller i heile trykkområdet opp til 360 GPa. Framtida vil vise om det er muleg å komme over denne trykkver-

dien. Eksistensen av molekylært hydrogen ( $\text{H}_2$ ) kan etterprøvast med raman- og infraraud vibrasjonspektroskopi, som også gir informasjon om H-H-avstanden i molekylet. For temperatur under 100 K skjer det endringar i spektra ved 100 og 150 GPa. Det viser at det skjer overgangar til nye fasar, I  $\Rightarrow$  II og II  $\Rightarrow$  III. For høgre temperaturar er overgangen direkte frå I til III. Mens hydrogenmolekylet i fase I roterer omtrent fritt, er rørsla avgrensa i fase II og III. Tolkinga går ut på at der er ein vaggande, snurrebassliknande rotasjon der nabomolekyl roterer i takt i fase II og i utakt i fase III. Interessant er det at H-H-avstanden først minkar, og så aukar med aukande trykk. Men eksistensen av eit vibrasjonssignal heilt opp til 360 GPa viser at full overgang frå molekylær  $\text{H}_2$ -tilstand til atomær H-tilstand ikkje har funne stad. Eitt arbeid hevdar å ha funne fase IV, ein heilt ny fast fase, sjå nedanfor.

Eit uavklart spørsmål er om den stipla vertikale linja i figur 3 ved trykk over 400 GPa eksisterer, om der er ein overgang til metallisk, kanskje flytande hydrogen her, slik enkelte teoretikarar har spådd.

## Kontroversielle funn

To forskarar frå Max Planck-instituttet i Mainz skapte stort røre då dei i november 2011 publiserte resultat som dei hevda viste metallisk hydrogen under trykk i området 240–270 GPa ved romtemperatur.<sup>(5)</sup> Alt ved 200 GPa såg dei endringar i vibrasjonsspektra som vart tolka i retning av at bindingane i  $\text{H}_2$ -molekylet var i ferd med å bli veikare. Dei observerte at prøva tok til å bli mørk ved 220 GPa, og dei registrerte straum i elektropane knytt til prøva når dei sende laserlys inn. Dette tolka dei som teikn på at materialet ikkje lenger var isolerande, men hadde fått halvleiareigenskapar. Ved 240 GPa var effekten blitt sterkare, og ved 270 GPa hevdar dei å registrere ein brå reduksjon i prøva sin elektriske motstand, som dei tolkar som hydrogen i metallisk form.

Desse resultata og konklusjonen førte til heftig motstand frå fleire hald. Spesielt grundig var kritikken frå forskarane Nellis, Ruoff og Silvera frå Cornell-universitetet.<sup>(6)</sup> Desse forskarane gjekk svært detaljert gjennom arbeidet med utgangspunkt i dei vanskane slike eksperiment kan ha. Spesielt er dei kritiske til resistivitetsverdiane Mainzforskarane finn for det dei hevdar er metallisk hydrogen.

To andre, nyare eksperimentelle arbeid frå mars<sup>(7)</sup> og frå april<sup>(8)</sup> 2012, finn spektroskopieffek-

tar i bra samsvar med Mainz-arbeidet, men dei tolkar ikkje funna som bevis for metallisk, men som halvleiane hydrogen, med avtakande bandgap når trykket stig. Låge verdiar for bandgapet betyr at materiala har ei viss leiingsevne utan at dei kan seiast å vere metalliske.

Eitt av arbeida<sup>(7)</sup> meiner å ha registrert endå ein fast, krystallinsk fase, fase IV på figur 3, for temperaturar nær og over 300 K. Dei tolkar den fasen som ein 'grafén-liknande' struktur med lag av molekylært hydrogen ( $H_2$ ) stabla alternerande med sekskantige hydrogenplan.

Det andre arbeidet<sup>(8)</sup> nyttar synkrotron-infraraudt lys og ei laserkjelde, som gir god presisjon. Dei finn liknande resultat, men ser ikkje signal som indikerer fase IV. Dei tolkar sine resultat som prov på det dei kallar for 'semimetallisk' oppførsla ved høge trykk av ein halvleiari med lågt 'indirekte' bandgap.

## Både molekylært og atomært hydrogen

Det synest å vere semje blant forskarane om at det blir danna leiande, venteleg metallisk, hydrogen under sjokktrykk, det vil seie ved høge trykk og høge temperaturar, og konfigurasjonen er truleg ei blanding av molekylært ( $H_2$ ) og atomært hydrogen ( $H$ ), med snøgg overgang mellom desse formene. Korleis stoda er under dei ekstreme tilhøva i det indre av gassplanetane veit ein sjølvsgaikt ikkje. Om metallisk hydrogen opptrer ved låge temperaturar under høge nok trykk, altså frå fast fase, er framleis usikkert. Nyare teoretiske berekningar går i retning av at trykk over 400–600 GPa må til, og så høge trykk er enno ikkje oppnåeleg i laboratoria. Dette er trykkverdiar som overstig trykket i jordsentret ( $\approx 350$  GPa).

Ein er open for at den metalliske fasen, om han eksisterer, ikkje nødvendigvis må bestå av atomært hydrogen ( $H$ ), men kan også vere molekylært ( $H_2$ ). Spekulasjonar om molekylær metallisk form har faktisk eksistert lenge,<sup>(9)</sup> og har fått ny styrke det siste året. Som vi har sett, syner alle eksperiment med trykk opptil 360 GPa eksistens av molekylært hydrogen. Det er derfor blitt nødvendig at det blir utvikla heilt nye modellar for elektrisk leiing, eventuelt supraleiing og superfluiditet. For i "metallet" vil der ikkje vere berre frie elektron ( $e^-$ ) og proton ( $H^+$ ), men også  $H_2^+$  og mulegvis andre ladde H-kompleks. Alternativt har ein å gjere med

ein 'indirekte' halvleiari med forsvinnande bandgap. Spørsmål om den eventuelle metalliske fasen er i fast eller væske-form ved låge temperaturar, er sjølvsgaikt også opent. Dette teoretisk "enkle" materialet, hydrogen, har altså vist seg å vere alt anna enn enkelt.

## Referansar

1. E. Wigner and H.B. Huntington: *On the possibility of a metallic modification of hydrogen*. Journal of Chemical Physics **3**, 12 (1935)
2. N.W. Ashcroft: *Metallic hydrogen: A high-temperature superconductor?* Physical Review Letters **21**, 1748 (1968)
3. E. Babajev, A. Sudbø og N.W. Ashcroft: *A superconductor to superfluid phase transition in liquid metallic hydrogen*. Nature **431**, 666 (2004)
4. R.J. Hemley: *Percy W. Bridgman's second century*. High Pressure Research **30**, 581 (2010)
5. M.I. Eremets og I.A. Troyan: *Conductive dense hydrogen*. Nature Materials **10**, 927–931 (2011)
6. W.J. Nellis, A.L. Ruoff og I.F. Silvera: *Has Metallic Hydrogen Been Made in a Diamond Anvil Cell?* arXiv.org/abs/1201.0407 (2012)
7. R.H. Howie, C.L. Guillaume, T. Scheler, A.F. Goncharov og E. Gregoryanz: *Mixed Molecular and Atomic Phase in Dense Hydrogen*. Physical Review Letters **108**, 125501 (2012)
8. C.-S. Zha, Z. Liu og R.J. Hemley: *Infrared Measurements of Dense Hydrogen to 360 GPa*. Physical Review Letters **108**, 146402 (2012)
9. C. Friedli og N.W. Ashcroft: *Combined representation method in band structure calculation applied to compressed hydrogen*. Physical Review B **16**, 662 (1977)

∞

HUSK Å  
MELDE  
ADRESSE-  
FORANDRING

## Hva skjer

### Fysikkolympiaden 2012

Finalen i den internasjonale fysikkolympiaden i år foregikk i Estland fra 15. til 24. juni. Selve konkurransen ble avholdt i Tartu, og det var her deltakerne var innkvartert. Tartu er byen hvor Estlands eldste universitet ligger. Kanskje derfor kalles byen for landets intellektuelle hovedstad. Estlands faktiske hovedstad er Tallinn, og det var her lederne var innkvartert.

Nytt av året var at i forkant av reisen til Estland ble deltakerne samlet i Oslo og fikk et todagers opphold med oppgaveregning og gjennomgang av teori på Blindern. Deltakerne fra Norge var i år: Håkon Taskén fra Valler vgs., Oda Lauten fra Lillestrøm vgs., Tiantian Zhang fra St. Hallvard vgs. i Drammen, Anders Strømberg fra Vestby vgs. og Marius Leiros fra Oslo Katedralskole. Sammen med dem reiste lederne Joakim Bergli fra Fysisk institutt ved UiO, og Torbjørn Mehl fra Nesodden vgs.

Selv konkurransen gikk over to dager. De andre dagene ble deltakerne guidet rundt. Det var alt fra å besøke lokale severdigheter, som gamlebyen, museumsbesøk og foredrag av Sir Harold Kroto (nobelprisvinner i kjemi 1996), til en avsluttende fotballturnering landene imellom. Vertslandet stilte med lokale guider som tok godt vare på både deltakere og ledere. De fleste var studenter fra det lokale universitetet. Det norske laget ble fulgt av en estisk jente som skulle starte studier ved NTNU i høst.

Hvert land kan ha med inntil 5 deltakere. Selv om vi reiser som et lag, er olympiaden en individuell konkurranser bestående av en teoretisk og en eksperimentell del. Den teoretiske delen består av tre oppgaver som gir maks. 30 poeng. Den eksperimentelle delen har to oppgaver og gir maks. 20 poeng.

**Teorioppgaven** startet med at man skulle finne ut hvordan man med minst mulig energi kan kaste en ball opp til toppen av en sfærisk bygning. Dette krever ikke at man kan så mye fysikk, men er slett ikke et enkelt problem å løse. Videre måtte elevene studere luftstrømmer rundt flyvinger, overflatespenning og ladning på vanndråper, og magnetiske feltlinjer fanget i superledende rør. Den siste oppgaven handlet om mekaniske og termodynamiske prosesser som skjer når en gassky trekker seg sammen i den tidlige fasen i dannelsen av en stjerne.



Figur 1. De norske deltakerne (fra venstre): Håkon Taskén, Oda Lauten, Anders Strømberg, Tiantian Zhang og Marius Leiros

Den eksperimentelle oppgaven hadde to deler. Den første handlet om å måle den magnetiske permeabiliteten til vann. Vann er svakt diamagnetisk, som betyr at det frastøtes av magneter. Deltagerne skulle plassere en sterkt magnet rett under en vannflate og observere at det dannes en liten grop på overflata fordi vannet rett over magneten presses til siden. Formen på overflata ble målt ved å sende en laserstråle mot overflata og finne ut hvor den reflekterte strålen traff en skjem. Denne oppgaven tester elevenes nøyaktighet og praktiske ferdigheter samt behandling av eksperimentelle data.

I den andre delen av oppgaven fikk elevene en boks som inneholdt et ukjent ikke-lineært kretselement i parallell med en kondensator, sammen med en strømkilde og et spesialbygget multimeter. Oppgaven var å finne egenskapene til det ikke-lineære elementet (en tunelleringsdiode). Her er det elevenes kreativitet og forståelse av hvordan det gitte utstyret kan brukes til å finne de ønskede størrelsene som blir satt på prøve.

I år var oppgavene særdeles vanskelige. Det er hevdet at årets oppgavesett var det vanskeligste på 20 år, noe den hovedansvarlige for de teoretiske oppgavene nesten var enig i: "...the conclusion is: the claim that we had the most difficult problem set for the last 20 years is slightly exaggerating: the problems in Beijing, 1994, were even more difficult, at least in relative terms ..." Jaan Kalda, Academic Committee of IPhO-2012

Vanskelige oppgaver rammer nok de norske deltagerne hardt siden det betyr at mange av spørsmålene involverer begreper som er på grensen eller utenfor pensum i norsk skole. Fysikkolympiadens

pensumliste inneholder ganske mange ting som er ukjente for norske elever. Selv med en ukes kurs i forbindelse med den norske finalen og to dagers kurs før avreise, er det vanskelig å lære seg å mestre alle de nye begrepene.

Imidlertid klarte Håkon Tasken (Valler vgs.) å finne en elegant løsning på den første teoretiske oppgaven som var en av de vanskeligste, men som ikke krever kunnskaper utover vanlig skolepensum. Han var dermed blant de deltagerne som fikk høyest poengsum på denne oppgaven. For igjen å sitere arrangørens oppsummering:

*"This is an interesting case, because in order to be able to solve this problem, only a moderate physical education is needed. This is evidenced by the fact that among the best solvers of Part 1A, there are several students whose overall results were not so good; one can only hypothesize that had they passed a full course of physics covering all the Syllabus of IPhO, they would have been able to get gold medals."*

Jaan Kalda, Academic Committee of IPhO-2012 (<http://www.ipho2012.ee/statistics/>)

**Ledernes oppgave** er ikke bare å ledsage elevene fra hjemland til finalested og tilbake. Under oppholdet er lederne med på diskusjon av oppgavesettene og oversetter disse til norsk. Etter hver prøve rettes oppgavene av både lederne og lokale sensorer, og man møtes for å bli enige om poenggivingen. Når alle oppgaver er rettet og deltagerne rangert, får de 8 % beste gullmedalje. Grensen for sølv er 25 %, bronse 50 %, mens grensen for å få hederlig omtale er 67%.

Selv om det ikke ble noen plassering for norske deltagere denne gangen, var det en veldig positiv opplevelse for deltagerne. De følte seg intellektuelt på høyde med de beste, men at de burde jobbet enda litt hardere med studering og lekselesing – en erfaring de ville ta med seg videre inn i studentlivet.

Alle oppgavene med løsninger og resultatlis- ter finnes på: <http://www.ipho2012.ee/home/> Her finnes også statutter, medlemsland og annen informasjon om den internasjonale fysikkolympiaden. Mer informasjon om fysikkolympiaden finnes på: <http://www.mn.uio.no/fysikk/forskning/grupper/skolelab/Fysikk-OL/>

Neste fysikkolympiade finner sted i København fra 7. til 15. juli 2013.

Torbjørn Mehl og Joakim Bergli

∞

## Hva skjer

### Senter for fremragende forskning i fysikk ved Universitetet i Bergen

*Birkeland Center for Space Science* ved Universitetet i Bergen, har fått status som *Senter for fremragende forskning* (SFF).

Birkeland Center for Space Science (BCSS) omfatter forskningsgrupper ved UiB, NTNU og UNIS på Svalbard, og er ledet av professor Nikolai Østgaard ved Institutt for fysikk og teknologi (IFT) ved Universitetet i Bergen, hvor hoveddelen av forskningen vil foregå. Det nye Senter for fremragende forskning har fått 16 MNOK pr. år for de neste 10 årene, men har en egenandel og andre finansieringskilder som gir et årlig budsjett på rundt 40 MNOK.

Hovedspørsmålet som senteret skal forsøke å besvare er: *"How is Earth coupled to Space?"* Dette er ikke et nytt spørsmål, men det finnes fundamentale mangler i vår forståelse av hvordan dette egentlig henger sammen. Vi har utdypet dette gjennom de fire følgende underspørsmålene.

1) *Når, og hvorfor er det asymmetri mellom nordlys og sørlys?*

Mesteparten av vår kunnskap om hvordan de to polarregionene er koplet til rommet er basert på målinger på den nordlige halvkule, og man har antatt at den sørlige er et speilbilde av den nordlige. Vi har vist i flere publikasjoner at dette ikke er tilfelle. Dette åpner helt nye spørsmål mht hvordan jorda er koplet til rommet, og dette skal BCSS nå forsøke å finne svar på.

2) *Hvordan kan vi forbedre våre nåværende grove modeller av ionosfæren?*

Når vekselvirkningen mellom solvinden, magnetosfæren og ionosfæren skal modelleres, benytter man modeller av strømsystemer i ionosfæren fra 1970-tallet. Dette gir ionosfæriske grensebetingelser som er gyldige på store skalaer og i et statisk bilde. Men slik er det ikke i virkeligheten. Strømsystemene i ionosfæren er dynamiske og opererer på mange skalaer. BCSS vil utforske dette.

3) *Hvilken effekt har partikkelnedbør på det atmosfæriske systemet?*

Energirike partikler som bombarderer jordas atmosfære avsetter sin energi dypt nede i atmosfæren

i området som kalles mesosfæren, eller "ignorosfæren" fordi så lite er kjent om denne delen av atmosfæren. Denne partikkelnedbøren påvirker både temperatur og kjemi i atmosfæren. Dette kan være viktig for forståelsen av klimautviklingen. Senteret har folk fra mange forskningsområder (magnetosfære, ionosfære og atmosfære) som også vil innlede samarbeid med klimaforskere ved Bjerknessenteret.

*4) Hvilken rolle spiller energirike partikler som blir sendt ut fra tordenvårsområder?*

For 20 år siden oppdaget man at det produseres gammastråling i tordenvårsystemer. For et par år siden ble det ved hjelp av lavbane-satellitter oppdaget at også relativistiske elektroner og positroner produseres i forbindelse med lynaktivitet. Sterke elektriske felt er åpenbart involvert, men nøyaktig hvordan gammastråling og relativistiske partikler blir produsert, hvor ofte det skjer, og hvilken betydning disse har for temperatur og kjemi i atmosfæren, er ikke kjent. BCSS vil undersøke dette.

Senteret for fremragende forskning vil bli organisert i fire grupper som skal forske på disse spørsmålene. I tillegg har senteret to instrumenteringsgrupper, en for bakkebaserte instrumenter og en for rominstrumenter. Videre vil senteret også få en egen formidlingsgruppe.

Nikolai Østgård

∞

## Fra Fysikkens Historie

### 100 år for Bohr-atomet

I juli 2013 er det 100 år siden Niels Bohr presenterte sin atommodell i det engelske tidsskriftet *Philosophical Magazine*. Det var den indtil da mest radikale anvendelse af Max Plancks energikvantebegrep, som fysikere fortsatt hadde vanskelig for å akseptere. En verdenskrig bidro ytterligere til at det tok tid før Bohrs teori å få fotfeste i fysikkmiljøer. Ikke desto mindre ble et professorat opprettet for Bohr ved Københavns Universitet midt under krigen. I 1921 fikk han sitt eget institutt der, og året etter fikk han nobelprisen. Under Bohrs ledelse skulle Københavns Universitets Institut for teoretisk Fysik (fra 1965, Niels Bohr In-

stitutet) komme til å bli samlingspunktet for unge fysikere fra hele verden og sentrum for utviklingen av den nye fysikken.

Niels Bohr Arkivet står for flere av publikasjonene og arrangementene som finner sted i København i Bohr-året. Bohrs såkalte "Trilogi" fra 1913, hvor den revolusjonerende modellen av hydrogenatomet ble fremført i den første av tre artikler, vil bli utgitt på nytt på *Oxford University Press* med lange og rikt illustrerte nye innledende artikler av undertegnede og vitenskapshistorikeren John L. Heilbron, som sto for den hittil mest detaljerte historiske fremstilling av veien til atommodellen i en artikkel i 1969. Adgang til den ellers lukkede korrespondansen mellom Bohr og hans forlovede, Margrethe Nørlund, under Bohrs opphold i England i 1911 og 1912, kaster helt nytt lys på historien.

Gjenutgivelsen av "Trilogien" ventes i mai eller juni 2013, da en bok på dansk med nye artikler om mange aspekter ved Bohrs virke, under redaksjon av Helge Kragh, Lone Bruun og undertegnede, også vil foreligge.

Fra 11. til 14. juni 2013, arrangerer Niels Bohr Arkivet videre en vitenskapshistorisk konferanse i København, hvor vitenskapshistorikere fra hele koden har meldt seg på med et bredt spektrum av foredrag om Niels Bohr. En beskrivelse av konferanseprogrammet, med mulighet for påmelding, vil snart foreligge på Niels Bohr Arkivets hjemmeside, [nba.nbi.dk](http://nba.nbi.dk)

I samarbeid med historieseksjonen ved *American Institute of Physics* har Niels Bohr Arkivet utarbeidet en veggkalender til feiring af 100-året for Bohrs atom. For de som ønsker å være med på feiringen hele året igjennom, kan kalenderen kjøpes elektronisk fra USA gjennom arkivets hjemmeside for en rimelig pris.

Det vil også være mange andre arrangementer, av andre arrangører, til minne om Bohr-atomet i København i 2013, som blir et ekstra godt år å besøke "Kongens by".

Finn Aaserud  
arkivleder, Niels Bohr Arkivet

∞

## Bokomtaler

Alv Egeland: Nordlyspioneren Carl Størmer, Andøya Raketttskytefelt, 2012, ISBN 978-82-91984-17-9.

Professor emeritus Alv Egeland ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo, har lenge vært en ivrig målbærer for å holde minnene om våre berømte nordlysforskere i hevd. Selv har han tatt initiativet til å binde bøker mellom permer om både Kristian Birkeland og Lars Vegard, og nå sist om Carl Størmer (1874–1957). Boken "Nordlyspioneren Carl Størmer" er en liten lettleset og vakker bok som "er skrevet i en populær form og krever små forkunnskaper i fysikk og matematikk", som det står i innledningen. Biografien røper stor beundring for Størmer, "den største nordlyspioneren vårt land har fostret", ifølge forordet, og er vel tiltenkt ungdom og studenter i håp om at den vil "kaste nytt lys over nordlyspioneren Størmer og stimulere interessen for nordlyset." Boken er utgitt av Andøya Raketttskytefelt som et bidrag til 50-årsjubileet der.

Boken er oversiktlig redigert med små og lettlesete kapitler som dekker Størmers oppvekst, studier og hans viktigste bidrag til nordlysforsknin- gen slik som høydemålinger av ulike nordlysfommer, beregninger av baner til elektriske partikler i magnetfelt, inkludert påvisningen av de forbudte områdene som senere er blitt identifisert med strålingsbeltene og ringstrømmen. Disse siste temaene er kanskje det av hans arbeid som har hatt størst evne til å overleve inn i romalderen. Det er et spørsmål om ikke arbeidet Størmer gjorde i forbindelse med beregninger av partikkelenbaner i magnetfelt er noe av hans betydeligste vitenskapelige innsats i og med at dette bidrog sterkt til utviklingen av de moderne metodene for numeriske beregninger.

Perlemorskyer og lysende nattskyer samt kome- ter, er det også gitt plass til. Et kapittel er viet Størmers sterke interesse for botanikk som han hadde med seg helt fra barndommen. Det er hevdet at hadde ikke hans mentor, professor Axel Blytt, dødd så tidlig som i 1898, hadde Størmer blitt botaniker og ikke nordlysforsker.

Det er viet forholdsvis mye plass til beskrivelsen av ulike nordlysfommer. Skille mellom de ulike formene som bånd og buer er ofte et perspektivpro-blem og har liten relevans i dag. En nordlyskrone

er i så måte åpenbart et perspektivfenomen. Er man så heldig at man ser nordlyset fra det punkt hvor magnetfeltlinjene gjennom nordlyset skjærer jorden ved observasjonspunktet, opplever man at nordlysstrålene konverger mot et sentralområde og former en kronefigur. Når man fra gammelt av omtalte nordlyset som dansende møyer, er det ikke så rart når de stirret opp mot de praktfullt utfoldete ballerinaskjørtene.

Høydemålingene av nordlysene, som Størmer organiserte sammen med sine assistenter gjennom mer enn 30 år, er kanskje det man kan kalte hans livsverk. Allerede i 1913 hadde Størmer bestemt høyden av 2500 punkt i nordlys over Alta. Som en besettelse fortsatte han med slike høydemålinger fra Sør-Norge. Ved hjelp av et nettverk av assistenter rakk han i perioden 1911 til 1952 å bestemme høydene av i alt 18642 punkt i nordlys. Det må vel regnes mer som rutinearbeid enn banebrytende forskning og kan vitne om at høydemålinger ble en slik lidenskap for ham at han mistet evnen til å se den begrensende vitenskapelige verdi dette arbeidet etter hvert fikk.. Det er åpenbart at noen av assistentene kunne føle det som et mas når Størmer tryglet om vakthold og ringte dem opp om natten.

Det synes som forfatteren er usikker på hvem som skal æres for det spesielle nordlyskameraet som gjorde det mulig å ta 6 bilder på en plate. I forordet heter det: "Først konstruerte han det viktigste instrumentet som ble brukt for studier av nordlys helt fram til romalderen, nemlig nordlyskameraet". Her bør man kanskje være litt forsiktig med superlativene, selv om det er en biografi hvor man ønsker å framheve de positive sider. Så skrives det et annet sted: "han var ingen praktisk teknikker", og "I dette arbeidet hadde han god hjelp av Birkeland-assistenten Ole Krogness (1886–1934)." Endelig trekkes en konklusjon: "Størmer og Krogness utviklet i 1909 verdens første brukbare nordlyskamera." Så kommer til slutt en oppklaring: "Det tekniske arbeidet og byggingen av kameraet er det Ole Krogness som har æren for. Derfor ville nok det mest korrekte navnet på det viktigste nordlysinstrument helt fram til 1950 være Krogness/Størmer-nordlyskameraet, men historien viser motsatt rekkefølge". I boken "The Polar Aurora" har Størmer gjengitt et fotografi av nordlyskameraet med underteksten "Aurora camera constructed by Krogness ..." La oss derfor kalte det Krogness-kameraet slik Størmer selv antydet. Det ville nok Krogness sin gode venn og kollega Olav Devik synes om, idet han skriver i boka "Blant fiskere

forskere og andre folk” fra 1971 (s. 112): ”Dette løste Krogness på en såre enkel, men så effektiv måte at det var lett å ta i rask rekkefølge seks bilder fordelt på samme plate, og apparatet kunne håndteres med tykke reinskinnsvotter på hendene.”

Det hevdet om amatørastronomene Olaf Hassel og Sigurd Einbu: ”De har nok tatt like mange nordlysbilder som professoren.” Men Einbu hadde store problemer med å betjene nordlyskameraene og tok heller tegneblyanten fatt når det kneip. Han var en mester i å plassere stjernebakgrunnen rundt nordlysbuene, så dermed kunne Størmer benytte seg av disse tegningene i trianguleringen.

Når Einbu først er omtalt, må det nevnes at da man for noen år siden fant ca. 3000 brev og kort etter ham på Dombås, var omlag 300 av disse fra Størmer. Ved et søk i Nasjonalbiblioteket etter Carl Størmers arkivmateriale, fikk Gunnar Bentdal og jeg utlevert 20 store pappkartonger fulle med ringpermer. De fleste av disse var i svært dårlig forfatning etter en skandaløs lagring ved Universitetet i Oslo. For den som har interesse av å skrive en fullstendig biografi over Størmer, finnes det et betydelig kildemateriale med korrespondanse med berømte internasjonale forskere og framstående norske samfunnsborgere ved Nasjonalbiblioteket.

Det er vanskelig å slutte seg til påstanden: ”Det er ingen andre områder innen naturvitenskap hvor norske forskere har gjort en så grunnleggende og banebrytende innsats som innen utforskning av nordlyset.” For meg vil nok Vilhelm Bjerknes (1862–1951) og sonnen Jacob Bjerknes (1897–1975), som dannet grunnlaget for Bergensskolen i meteorologi, rage over det meste i norsk naturvitenskap. Deres innsats har jo store deler av menneskeheten daglig nytte av. Man skal selvsagt kunne bruke superlativer i en biografi, men når det nærmer seg det panegyriske som i omtalen av Størmers hovedverk *”The Polar Aurora”* fra 1955: ”Praktisk talt alle i hele verden som tar hovedoppgave eller doktorgradeksamen innen nordlys, har hatt stor nytte av denne avhandlingen,” tillater jeg meg å tvile på grunnlag av egne erfaringer. En stor del av boken er viet detaljerte baneberegninger for ladete partikler i magnetfelt, gjennomført med en noe gammelmodig framstilling som jeg er redd de fleste studenter i den senere tid har skygget unna. Da har jeg et større håp om at denne lille biografien vil inspirere unge studenter til å ta fatt på et nordlysstudium.

Asgeir Brekke

∞

George F.R. Ellis, Roy Maartens and Malcolm A.H. MacCallum: *Relativistic Cosmology*, Cambridge University Press, 2012, ISBN 978-0-521-38115-4, (622 sider), \$ 130.

## Bok for viderekomne

Einstiens fundamentale feltlikninger for gravitasjonseffekt ble lagt fram for vitenskapsakademiet i Berlin 25. november 1915. Med disse likningene hadde Einstein fullført konstruksjonen av sin relativistiske teori for tid, rom og gravitasjon – den generelle relativitetsteorien. Med denne teorien forelå det redskap som var nødvendig for å undersøke universet som helhet på vitenskapelig konsistent vis. Einstein våget seg på kosmologien som forskningstema allerede i 1917. Men helt fram til midten av 1960-årene var dette et område nær sagt forbeholdt forskere med stor sans for komplisert matematikk.

Men alt forandret seg da utrolig fin-elektronikk la grunnlaget for presise observasjoner av et meget dynamisk univers. Nå er kosmologien et særdeles aktivt forskningsfelt, og fysikkstudenter møter gjerne dette emnet nokså tidlig i sitt studium. Derfor er det behov og marked for gode og oppdaterte lærebøker i generell relativitetsteori og kosmologi. Det rår da heller ingen mangel på tekster der en kan få grundig kunnskap og solid forståelse av Einsteins lære og hva den forteller om vårt altomfattende univers.

Nå foreligger nok et verk for dem som er interesserte i matematisk fysikk. ”*Relativistic cosmology*” er skrevet av de eminente forskerne George F.R. Ellis, Roy Maartens og Malcolm A.H. MacCallum. Jeg iler med å meddele at dette ikke er boka for noviser. Leseren bør ha et skikkelig introduksjonskurs som ballast for å kunne nytte denne teksten. Jeg tror denne boka helst vil tjene som et uslitelig leksikon for den kosmologiske vitenskap og forskning. Dette er verket en kan og bør oppsøke om en føler seg på usikker og vaklende grunn og har vanskter med lese forskningslitteraturen. Her er det robuste fundament som kunnskapen kan tuftes på.

Boka er lagt opp slik at den overalt starter mest mulig generelt og finner sammenhenger og regler som favner vidt og bredt. Deretter snevres gjerne perspektivet inn for å belyse og studere spesielle situasjoner. Leseren har faktisk vært gjennom en forberedelse på hele 120 sider om kosmologiske modeller før han endelig møter de enkle Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-modellene. Det er

disse meget spesielle modellene som går igjen i alle lærebøker. De tar for gitt at ingen posisjoner eller retninger utmerker seg i kosmos. Men disse modellene baserer seg på et filosofisk prinsipp og representerer så langt fra noen naturlov. Matematisk skjønnhet er ikke uten videre sannhet.

Det kan jo tenkes at den verden som i siste omgang består av den konkrete materie og stråling, er så forvridd og inhomogen at det er umulig å finne en meningsfull prosedyre som gir oss et utjevnet kontinuum å drøfte matematisk. Denne avskrekende muligheten blir behørig drøftet i denne boka. Den grovkornete verden er neppe så vennlig og imøtekommende at den tar hensyn til at våre matematiske modeller så gjerne bør være enkle. I alt sitt detaljerte mangfold er jo kosmos ganske uoverkomelig å behandle. I alle fall er foreliggende pertentlige tekst sterkt preget av matematikkens presise språk. Det speiler seg i at det knapt finnes lettfattelige skisser eller figurer til intuitiv forståelse av de matematiske begreper og betraktninger. Forfatterne nøyer seg med den abstrakte matematikken når de drøfter de kinematiske tensor-størrelsene ekspansjon, virvel og skjær. Materiens mangfold av fysiske egenskaper blir nøyne forklart. Det gjelder både stråling, væsker og gasser med forskjellige tilstandslikninger eller elektromagnetiske felter eller skalarfelter. Denne framstillingen er nødvendig for å forstå de dynamiske prosesser.

Boka nevner to meget forskjellige framgangsmåter for å undersøke den geometriske strukturen til universet. En kan starte med de veletablerte fundamentallikningene og utarbeide modeller for kosmos. Modellene må selvfølgelig konfronteres med naturens egen nådeløse fasit. Observasjonene får avgjøre hvilken (om noen) modell som best beskriver virkeligheten. Den andre metoden vil være å la observasjonene være grunnlag og start. Deretter finnes den metrikken (en kombinasjon av avstander i tid og rom) som egner seg best.

Det er meget illustrerende og avslørende at den første metoden har tvunget kosmologene til å innføre ukjente former for materie. Mørk materie observeres ikke direkte. Men denne ukjente formen for materie trengs om Newtons gravitasjons-teori skal forklare stjerner og galakser sin bevegelse. Mørk energi er heller ikke et skalarfelt som en kan ”se”. Det en faktisk iakttar, er lyset fra fjerne super-

novaeksplosjoner. Men en må ty til denne mystiske energien (= Einsteins kosmologiske konstant) om enkle FLRW-modeller skal være saliggjørende for universet.

Her finnes rene godbiter. Vi finner en krystallklar og klargjørende framstilling av ekvivalensprinsippet. Vi får vite hva konservering innebærer i Einsteins teori. Her diskuteres den mystiske kosmologiske konstanten som virker på alt, men selv forblir upåvirket. Her omtales linseeffekten for gravitasjon og galaksedannelse. Forfatterne påpeker at det tidlige univers uten tvil var dominert av fysikklover vi ikke kjenner. For vi kan ikke bygge akseleratorer som er så kraftige at de kan gjenskape disse forholdene.

Dette mesterverket gir utsyn og oversikt over nært sagt all aktuell kosmologi. Leseren får vite hvilken overveldende kunnskap som allerede er etablert på trygg grunn når det gjelder vårt mangfoldige univers. Denne boka bør bli standardverket for forskere må oppsøke for å finne forskningsfronten før de tar fatt på egne ideer til undersøkelse i kosmologi.

*Henning Knutsen*

∞

## Nytt fra NFS

### Nettverk for fysikkens historie og filosofi

Vi inviterer interesserte fysikere til å delta i et nettverk for fysikkens historie og filosofi i Norsk Fysisk Selskap. Vi ønsker å gi disse fagområdene en større plass i det norske fysikkmiljøet. Fysikerenes kunnskap om fysikkens historie er ofte basert på anekdotisk stoff, og vi vil gjennom nettverket arbeide for at vitenskapelig basert kunnskap om fysikkens historie blir kjent og formidlet av fysikerne. Vi vil også inspirere til økt refleksjon over fysikkens virkelighetsoppfatning og dens rolle i samfunnet. Hvis du vil være med i nettverket, ber vi deg sende en e-post til en av oss med navn, institusjons-tilknytning og noen få ord om hvilken interesse du har i ett eller begge disse feltene. Disse opplysnogene vil bli gjort tilgjengelige for alle i nettverket.

*Reidun Renstrøm (reidun.renstrom@uia.no)  
Hans Herlof Grelland (hans.grelland@uia.no)*

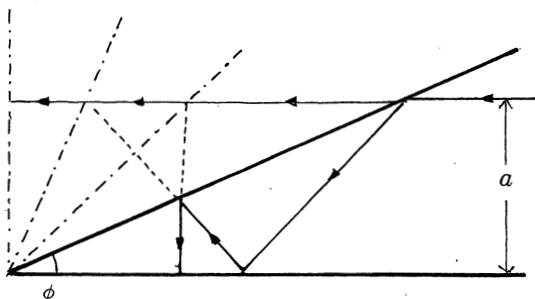
∞

## Trim i FFV

### Løsning på FFVT 3/12

#### Speilinger

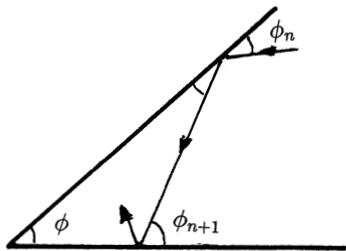
I oppgaven dannet to speil en vinkel  $\phi$ , og en lysstråle kom inn i avstand  $a$  med det ene speilet, ble reflektert flere ganger og gikk ut samme veg, men i motsatt retning. Det skulle vises at minste avstand mellom lysstrålen og speilenes felles linje var  $a$ .



Det enkleste er å forestille seg gjentatte kopier av speilkilen, som vist på figuren, og tenke seg at bildet av strålen går uhindret rett fram i strålens opprinnelige retning. I kopiene av speilkilen ses speilbilder av de virkelige refleksjonene. Den siste refleksjonen før tilbaketurten vil måtte foregå med et loddrett innfall. Siden bildet av strålen hele tiden holder avstanden  $a$  fra det ene speilet, vil minste avstand mellom lysstrålen og speilenes felles linje være  $a$ , som skulle vises.

Et loddrett innfall ved siste refleksjon kan bare skje hvis et helt multiplum av åpningsvinkelen  $\phi$  er en rett vinkel:  $\phi = 90^\circ/n$ . Heltallet  $n$  er antall refleksjoner før rettureisen. I figuren er  $n = 4$ .

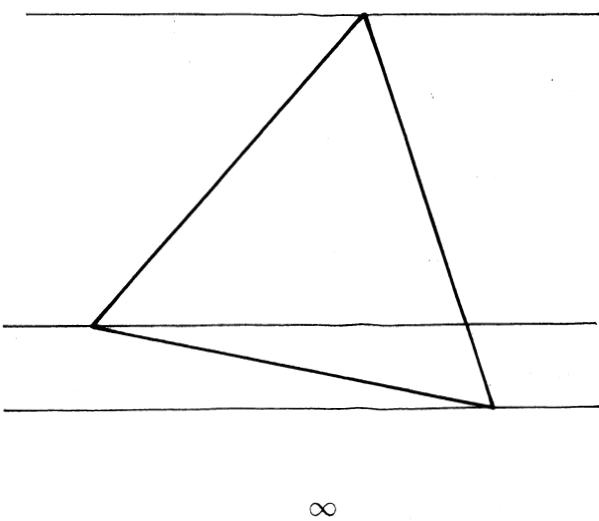
En kan naturligvis også regne på problemet. La  $\phi_n$  være vinkelen mellom strålen og et speil ved den  $n$ -te refleksjonen. Vi ser av nedenforstående skisse at vinkelen øker med beløpet  $\phi$  ved hver refleksjon.



Altså er  $\phi_{n+1} = \phi_n + \phi$ . Ved første refleksjon er  $\phi_1 = \phi$ , som gir  $\phi_n = n\phi$ . Den siste vinkelen må være rett,  $\phi_n = 90^\circ$ , og det medfører som ovenfor, at  $\phi = 90^\circ/n$ .

### FFVT 4/12

Gitt tre parallele linjer. Konstruer en likesidet trekant med et hjørne på hver linje!



Avsender:  
Fra Fysikkens Verden  
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo  
Boks 1048 Blindern  
0316 Oslo



## Retningslinjer for forfattere

FRA FYSIKKENS VERDEN utgis av Norsk Fysisk Selskap og sendes til alle medlemmer. Disse er vanligvis utdannet fra universiteter og høgskoler med fysikk i sine fagkretser. Andre kan også abonnere på bladet. Blant disse er elever og bibliotekar ved videregående skoler. Bladet gis ut fire ganger i året, i mars, juni, oktober og desember. Tidsfristene for stoff er 1. februar, 1. mai, 1. september og 1. november. Opplaget er f.t. 1900.

FORMÅLET MED FFV er å gi informasjon om aktuelle tema og hendinger innen fysikk, og å bygge bro mellom forskere, fysikklærere, studenter og andre interesserte. Ikke minst ønsker FFV å være til hjelp for elever og lærere i videregående skoler og andre undervisningsinstitusjoner. Dette krever at artikler og annet stoff er skrevet på norsk og på en lett forståelig måte. Faguttrykk må defineres. En verbal form er oftest å foretrekke fremfor matematikk. Men det må brukes standard begreper og enheter. Matematikken må være forståelig for vanlige fysikkstudenter. Artiklene i FFV skal primært gi informasjon til dem som er utenfor det aktuelle fagfeltet. Artikler som bare forstas av en liten faggruppe har ingen plass i bladet. Alt stoff blir vurdert redaksjonelt, og redaksjonen forbeholder seg rett til å foreta mindre endringer.

MANUSKRIPTER leveres i en form som forfatteren mener er direkte publiseringbar. De skal leveres elektronisk, helst som e-post. Dersom formatet ikke er ren tekst (helst LATEX) eller i Microsoft Word, må det merkes med hvilket tekstbehandlingsprogram som er brukt. Under alle omstendigheter må redaksjonen kunne forandre teksten direkte.

ARTIKLER bør ikke være lengre enn 6 sider med trykt tekst og figurer. Større avsnitt i teksten bør markeres med undertitler. Unngå fotnoter. Referanser kreves ikke, men det er ønskelig med en liste over lett tilgjengelig tilleggststoff.

SMÅSTYKKER: Gratulasjoner, nekrologer, bokomtaler, skolestoff, møtereferater etc. mottas gjerne, men de må ikke være lengre enn 1–2 sider. Bokkronikker kan være noe lengre. Doktoromtaler begrenses til en halv side inkludert bilde.

ILLUSTRASJONER er en viktig del av en artikkel. Legg derfor mye omtanke i figurene. All tekst skal være på norsk. Figurene vil som regel bli trykt i svart/hvitt med en spaltebredde på 8,6 cm. Av økonomiske grunner vil bilder bare i spesielle tilfeller trykkes i farger. Figurene bør være på elektronisk form i et standard grafisk format og med god oppløsning. Vi kan unntakvis motta figurer eller bilder som urastrerte kopier. Figurer og tabeller skal være referert i den løpende teksten, og ønsket plassering må markeres. Hvis forfatterne selv ikke har laget figurene, skal opprinnelsen oppgis. Forfatterne må selv innhente tillatelse til bruk av slike illustrasjoner.

FORSIDEBILDER velges som regel i tilknytning til en av artikklene. De må være teknisk gode og kan trykkes i farger.

KORREKTUR: Forfatterne får tilsendt korrektur som må returneres snarest. Det må ikke gjøres unødige endringer i korrekturene.

## Norsk Fysisk Selskap

### STYRE

#### President:

Professor Per Osland  
Inst. for fysikk og teknologi, UiB  
e-post: per.osland@ift.uib.no

#### Visepresident:

Professor Åshild Fredriksen  
Inst. for fysikk og teknologi, UiT  
e-post: ashild.fredriksen@uit.no

#### Styremedlemmer:

Professor Jon Otto Fossum  
Institutt for fysikk, NTNU  
Professor Håvard Helstrup  
Høgskolen i Bergen  
Professor Ulf R. Kristiansen  
Inst. for elektronikk og telekom., NTNU  
Postdoktor Eirik Malinen  
Radiumhospitalet, Oslo  
Forsteaman. Kjartan Olafsson  
Inst. for fysikk og teknologi, UiB  
Professor Jon Samseth  
Høgskolen i Akershus, Lillestrøm  
Lektor Morten Trudeng  
Asker videregående skole

#### Selskapets sekretær:

Cand.scient. Trine Wiborg Hagen  
Fysisk institutt, UiO,  
Pb. 1048 Blindern, 0316 Oslo.  
e-post: nfs@fys.uio.no  
Bankgiro: 7878.06.03258

## Fra Fysikkens Verden

### Redaktører:

Professor Øyvind Grøn  
Høgskolen i Oslo og Akershus, og  
Fysisk institutt UiO  
Stipendiat Marit Sandstad  
Inst. for teoretisk astrofysikk, UiO

### Redaksjonssekretær:

Karl Måseide  
Fysisk institutt, UiO

### Redaksjonskomité:

Professor Odd-Erik Garcia  
Institutt for fysikk, UiT  
Professor Per Chr. Hemmer  
Institutt for fysikk, NTNU  
Forstelektor Ellen K. Henriksen,  
Fysisk institutt, UiO  
Professor Bjarne Stugu  
Inst. for fysikk og teknologi, UiB

### Ekspedisjonens adresse:

Fra Fysikkens Verden  
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo,  
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo.  
Tlf.: 22 85 64 28 / 22 85 56 68  
Fax.: 22 85 64 22 / 22 85 56 71  
e-post: oyvind.gron@hioa.no  
e-post: marit.sandstad@astro.uio.no  
e-post: k.a.maseide@fys.uio.no

Fra Fysikkens Verden kommer ut 4 g. årlig.  
Abonnement tegnes hos selskapets sekretær.  
Årsabonnement 120 kr. (Studenter 60 kr.)  
Løssalg 40 kr. pr. nummer.