

Fra Fysikkens Verden

NR.1 – 2024
86. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP



Smarttelefoner i fysikkundervisning

Les også om:

- Elektrisk dipolmoment
- Ultralydmåling av naturgass
- Lysets natur
- Bokomtaler

NR.1 – 2024

86. ÅRGANG

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap
www.norskfysisk.no

Redaktør:

Professor emeritus Øyvind Grøn
OsloMet – Storbyuniversitetet og UiO
oyvind.gron.no@gmail.com

Professor emeritus Carl Angell
UiO
carl.angell@fys.uio.no

Redaksjonssekretær:

Maria Hammerstrøm
maria.hammerstrom@astro.uio.no

Redaksjonskomité:

Professor Odd-Erik Garcia, Institutt for fysikk, UiT
Professor Ellen K. Henriksen, Fysisk institutt, UiO
Førsteamanuensis Trygve Buanes, Institutt for datateknologi,
elektroteknologi og realfag, HVL

Layout og sats:

Maria Hammerstrøm

Forsidebilde:

Unsplash

Trykkeri:

Oslo Sats, repro og montasje A/S

Abonnere:

Fra Fysikkens Verden kommer ut fire ganger årlig.
Abonnement tegnes på følgende postadresse
eller e-post:

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

E-post: nfs.styret@gmail.com

Årsabonnement: 200 kr. (studenter 100 kr.)
Bankgiro: 7878.06.03258

Retningslinjer for bidragsytere

Fra Fysikkens Verden (FFV) utgis av Norsk Fysisk Selskap og sendes til alle medlemmer. Disse er vanligvis utdannet fra universiteter og høyskoler med fysikk i sine fagkretser. Andre kan også abonnere på bladet. Blant disse er elever og biblioteker ved videregående skoler.

Frist: Bladet gis ut fire ganger i året: mars, juni, oktober og desember. Tidsfristene for stoff er: 1. februar, 1. mai, 1. september og 1. november. Opplaget er for tiden 1200.

Formål: Formålet med *FFV* er å gi informasjon om aktuelle tema og hendiger 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 skole 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 fysikkstudenter. Artiklene i *FFV* skal primært gi informasjon til dem som er utenfor det aktuelle fagfeltet. Artikler som bare forstås av en liten faggruppe har ingen plass i bladet. Alt stoff blir vurdert redaksjonelt, og redaksjonen forbeholder seg rett til å foreta mindre endringer.

Filformat: Manuskripter leveres i en form som forfatteren mener er direkte publiserbar. De skal levers elektronisk som e-post, og i et rent tekstformat (for eksempel Word), slik at redaksjonen kan redigere teksten direkte. Dersom manuskriptet inneholder matematiske ligninger, skal manuskriptet også leveres som PDF.

Lengde: Artikler bør ikke være lengre enn seks 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 tilleggsstoff.

Småstykker: Gratulasjoner, nekrologer, bokomtaler, skolestoff, møtetreferater og lignenede mottas gjerne, men de må ikke være lengre enn 1–2 sider. Doktoromtaler begrenses til en halv side inkludert bilde.

Illustrasjoner: Legg mye omtanke i figurer, ettersom de er en viktig del av en artikkel. All figurtekst skal være på norsk. Figurene bør være av god oppløsning. Figurer og tabeller skal være referert i den løpende teksten. Hvis forfatterne selv ikke har laget figurene, skal opprinnelsen oppgis. Forfatterne må selv innhente tillatelse til bruk av slike illustrasjoner.

Korrektur: Forfatterne får tilsendt korrektur når layout er satt opp som må returneres snarest. Det må ikke gjøres unødige endringer i korrekturane.

Innhold

Fysikknytt

Nytt superfølsomt kamera *Arnt Inge Vistnes* 4

Perspektiver

Hvordan oppfører lys seg? *Nils-Erik Anders Bomark* 8
Verken partikkel eller bølge *Johannes Skaar, Alex Read, Olav F. Syljuåsen* 14
Utan fysikken stoppar verda *Kristian Fossheim* 15

Artikler

Elektrisk dipolmoment for elementærpartiklar *Jan Olav Eeg* 20
Lyden av pengar: Ultralydmåling av naturgass *Eivind Nag Mosland* 25

Skolefysikk

Lomme-lab i fysikk: Smarttelefoner i fysikkundervisning *Rolf Jonas Persson* 28
Lag en barometrisk høydemåler *Nils Kr. Rossing* 33
Relasjoner mellom trykk, høyde og temperatur i atmosfæren *Øyvind G. Grøn* 40

Småstoff

Bokomtale: *Nordlyset* av *Veronica Danielsen Alv Egeland* 42
Bokomtale: *Maskiner som tenker* av *Inga Strümke Einar Mjølhus* 44
Bokomtale: *Kristian Fossheim* av *Terje Lyngstad Øyvind G. Grøn* 46
Nye doktorer 47

FRA REDAKTØRENE

Det er med stor glede vi kan presentere et nytt og fyldig nummer av *FFV*. Som vi håpet, har artiklene til Arnt Inge Vistnes om lysets natur skapt debatt. Både Bomarks artikkel og artikkelen til Skaar, Read og Syljuåsen har som hovedinnvendig til Vistnes at han ikke forholder seg til moderne kvanteelektrodynamikk (QED). Når lys beskrives med kvantefelt er det noe for seg selv, det er verken klassisk partikkel eller klassisk bølge, påpeker de. At fotoner ikke er eller kan beskrives som klassiske partikler («klinkekuler») er alle enige om. Kvantefeltteorien beskriver imidlertid lys matematisk og hvordan lys oppfører seg, men den sier ikke noe om hva lys egentlig er. Og det er vel det siste Vistnes gjerne vil ha svar på! Det er forskjell på om fysikkens teorier skal forklare hvorfor naturen oppfører seg som den gjør eller om teoriene skal beskrive hvordan naturen oppfører seg. Vi synes det er spennende med slike diskusjoner. Vi vet også fra didaktisk forskning at mange fysikkelever er spesielt opptatt av store, til dels filosofiske spørsmål; altså en interesse

for «å forstå verden omkring oss – fra det aller minste til det aller største»!

Et opptrykk av Kristian Fossheims artikkel «Utan fysikken stoppar verden» fra 1988, er like aktuell i dag som da den ble skrevet. Øyvind Grøn har i tillegg skrevet en anmeldelse av Terje Lyngstads bok, *Kristian Fossheim: Jølstring på vitenskapens verdensarena*.

Under overskriften skolefysikk beskriver Nils Kristian Rossing en enkel (kanskje ikke helt enkel!) barometrisk høydemåler, og hvordan man kan lage og kalibrere en slik høydemåler for bruk i undervisningen. Dessuten; Jonas Persson viser hvordan smarttelefoner kan brukes i fysikkundervisningen. Smarttelefonene er små, bærbare målelaboratorier som med sine mange interne sensorer, kan erstatte mye annet eksperimentelt utstyr.

Det er flott med innlegg i *FFV* som beskriver forsøk som kan brukes i undervisningen. Vi vil gjerne oppfordre lærere til å sende oss sine favorittforsøk eller sine favorittdemonstrasjoner. Og da mener vi ikke bare lærere i skolen, men også undervisere på universiteter og høyskoler.



Øyvind G. Grøn



◀ Carl Angell

Nytt superfølsomt kamera

Arnt Inge Vistnes emeritus, Fysisk institutt, UiO

I oktober 2023 publiserte *Nature* en spennende artikkel om en ny, meget følsom 2D-billedetektor for lys. Artikkelen tittel er: «A superconducting nanowire single-photon camera with 400,000 pixels» [1]. Jeg er blitt oppfordret til å si litt om dette nye kameraet med bakgrunn i diskusjonen om bølge-partikkel-dualismen for lys.

Et team ved NIST (National Institute of Standards and Technology i USA) og samarbeidspartnere ved NASAs Jet Propulsion Laboratory i Pasadena, California og ved University of Colorado i Boulder, står bak *Nature*-artikkelen.

Først: En kort omtale av det nye kameraet

En kommentar-artikkel i samme nummer av *Nature* [2] oppsummerer viktige detaljer, og et kort resyme av disse er som følger:

NIST-kameraet består av et gitter av ultratynne elektriske ledninger («nano-wires»), nedkjølt til nær det absolutte nullpunkt for temperatur. I disse supraledende ledningene går det en svak elektrisk strøm uten motstand – «helt til en ledning blir truffet av et foton». Da opphører superleder-egenskapen en kort stund og endringen i strøm registreres. Ut fra hvilken ledning i «x-retning» og hvilken ledning i «y-retning» som opplever forstyrrelsen i strømmen, kan man slutte seg til hvor i gitteret fotonet traff. Ved å registrere en mengde forstyrrelser i strømmene i nanoledningene, kan man over tid bygge opp et bilde.

Siden ledningene holdes ved svært lav temperatur, er det lite støy i systemet. NIST mener at detektoren er så følsom at den fanger opp enkelt-fotoner.

Hva er nytt?

Den nye detektoren er egentlig ikke mer følsom enn det man har hatt en del år med tilsvarende supraledende nanoledninger. Inntil nå har det imidlertid ikke vært mulig å lage denne type kamera med mer enn ca 20.000 piksler. Problemet er avlesningen av de små strømvariasjonene i ledningene. Bli det for mange ledninger som forbinder gitteret til måleutstyret, klarer man ikke å kjøle ned gitteret tilstrekkelig,

og supraledningen opphører for systemet som helhet.

Det er på dette området at NIST-artikkelen kommer inn. De fører bare en x-ledning og en y-ledning ut for direkte målinger av strømforstyrrelsene i et *delgitter* av den fulle detektoren. For å finne plasseringen av posisjonen der «fotonet traff» *innen dette delgitteret*, plasseres noen ekstra ledninger (nærmest «antenner») over de supraledende, og strømpulsen i superlederen gir pulser i «antenne-ledningene» (som ikke er superledende) og pulsene vil nå en egnet elektronikk i enden. Ved å måle *tidsforskjellen* mellom den globale reaksjonen for hele delgitteret og tiden for pulsene fra «antenneledningene», kan man beregne eksakt hvilket gitterpunkt i det totale gitteret der «fotonet traff».

Det er med andre ord *utlesningen* av de små strømforstyrrelsene i de superledende nanoledningene som er nytt. Og forfatterne mener de kan skalere opp dette opplegget til enda større detektorer.

I dette tilfellet er detektoren 4×2,5 mm stor, og har altså 500 «linjer» i den ene retningen og 800 i den andre, tilsammen 40.000 piksler.

Nesten hele artikkelen omhandler detaljer i avlesningene, og er derfor sterkt fokusert på tekniske detaljer og er lite fysikk-preget. Det er et imponerende arbeid teknisk sett, men kanskje ikke like imponerende når det gjelder fysikken? (se nedenfor).

Den underliggende fysikken

Lesere av *Fra Fysikkens Verden* har sikkert fått med seg at jeg stiller spørsmålsteget med «det Einsteinske fotonet» [3,4]. Med min bakgrunn dukket det opp en del motforestillinger til NISTs fysikere da jeg leste artikkelen. I den tiden jeg jobbet med optikk og deltok på konferanser i optikk, merket jeg meg at fysikerne fra NIST med stor sikkerhet betraktet fotoner som udelelige energipakker. Den observasjonen fikk jeg for om lag 20 år siden, men partikkel-oppfatningen gjennomsyrrer også artikkelen om den nye detektoren i dag.

Et antydet bruksområde for den nye detektoren er i teleskoper for å studere svake objekter på himmelen. Men hva slags «mentalt bilde» har vi av lyset som

sendes ut fra stjerner til det observeres i et teleskop? Dersom man tenker på lys som Einsteinske udelelige partikler, forestiller man seg at fotoner forflytter seg gjennom verdensrommet uten endring fra de sendes ut fra en stjerne og helt til den fulle energien i *hvert enkelt foton* blir brukt opp i detektoren.

Mine tanker om lys fra stjerner

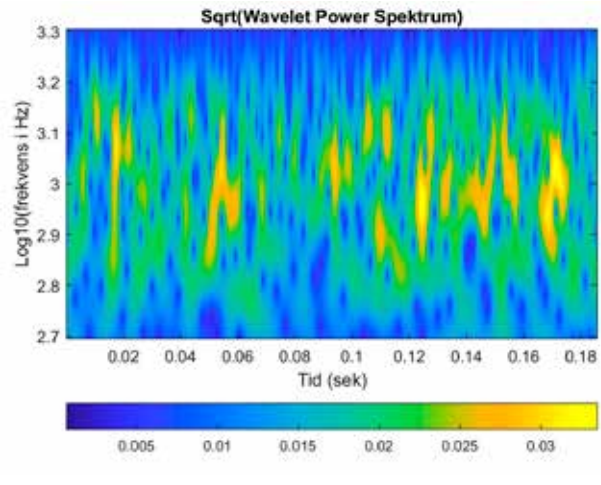
For å forstå min kritikk av artikkelen om den nye detektoren NIST-forskerne har utviklet, må jeg forklare mitt eget syn på lys. Jeg tar da utgangspunkt i lys fra stjerner. Dersom man betrakter lys som bølger, er det snakk om klassiske elektromagnetiske bølger som er løsninger av Maxwells ligninger. MEN, og det er et viktig men: Det betyr *ikke* at vi har den aller enkleste løsningen – en uendelig lang regelmessig plan bølge. En slik enkel «matematisk bølge» kan vi mennesker lage. Den tiden langbølgesenderen på Kløfta kringkastet NRK fra klokken 6 om morgenen til klokken 24 om natta, sendte den ut (når lyden var null/meget svak slik at amplitudemodulasjonen var ubetydelig) elektromagnetiske bølger med en nær matematisk ren bærebølge med konstant intensitet og frekvensen 218 kHz. Bølger av denne typen er den vi kjenner fra standard illustrasjoner (for eksempel Figur 9.5 i min lærebok [5]) og kan beskrives for eksempel slik:

$$\vec{E} = E_0 \sin(\omega t - kx) \vec{z}.$$

Lys fra stjerner skyldes for eksempel at et uhorvelig antall atomer sender ut elektromagnetiske bølger nokså uavhengig av hverandre når atomene enkeltvis går fra et eksitert energinivå tilbake til grunntilstanden. Noen atomer sender ut bølger med bare noen hundre bølgelengders lengde, mens andre atomer kan sende ut bølger med opp til millioner bølgelengders lengde. Bølgene sprer seg utover i rom og tid i en viss romvinkel som vi ikke kjenner, og ethvert sted i rommet vil det være et kolossalt antall bølger samtidig.

Vakuüm er et egnet medium for elektromagnetiske bølger, og vakuüm er «lineært», det vil si at det elektromagnetiske feltet fra alle bølgene summeres lineært («på amplitudenivå»). Alle bølgene går med samme hastighet, som er lyshastigheten i vakuüm.

Dersom vi betrakter kun bølger med omtrent samme bølgelengde, vil de uhorvelig mange bølgene iblant ha langt mer konstruktiv interferens enn destruktiv. Da blir lysintensiteten høy. Men dette er bare innenfor et begrenset romlig område og varer bare en begrenset tid før bølgene mister den overveiende konstruktive interferensen. Tilsvarende har vi områder i tid og rom som stedvis har langt mer destruktiv interferens enn konstruktiv. Da er



Figur 1. Sum av mange liknende, uavhengige bølger fører til en intensitets-variasjon som illustreres fint med en «tidsoppløst frekvensanalyse» (her den moderne varianten kalt «wavelet-transformasjon med Morlet wavelets», beskrevet i min lærebok [5]).

lysintensiteten betydelig lavere enn ved overveiende konstruktiv interferens.

I Figur 1 har jeg i et frekvens/tid diagram angitt intensiteten inn mot en detektor på ett punkt i rommet. Det er ikke for lysbølger fra stjerner, men lydølger (!) fra Stilla-fossen ved Teknisk museum i Oslo [6]. Joakim Bergli og jeg har nemlig vist at lydølger fra en utstrakt lydkilde viser akkurat de samme karakteristiske egenskapene som Hanbury Brown og Twiss viste for lys fra stjernen Sirius i 1954 (referanse gitt i [6]). Ta kontakt dersom du er interessert i temaet, så sender jeg deg gjerne en kopi av vårt arbeide.

Det viktige for oss er at lys fra stjerner dersom vi betrakter lys som klassiske elektromagnetiske bølger, vil variere i tid og rom på en helt annen måte enn helt enkle elektromagnetiske bølger. *Men innenfor de gule områdene i Figur 1* kan vi se på bølgene *tilnærmet* som det forenklede velkjente bildet, men bare innenfor et begrenset tid og rom. Bølgefrontene vil strekke seg opp til mange meter (nærmere beskrevet i [6]), men lengden (varigheten) av hver intensitetstopp er relativt få bølgelengder! Vi har altså en enorm sum av bitte små deler av et uhorvelig stort antall lys-bidrag fra uavhengige enkelt-kilder (for eksempel atomer). *Det er ingen som helst kvantisering i intensiteten.*

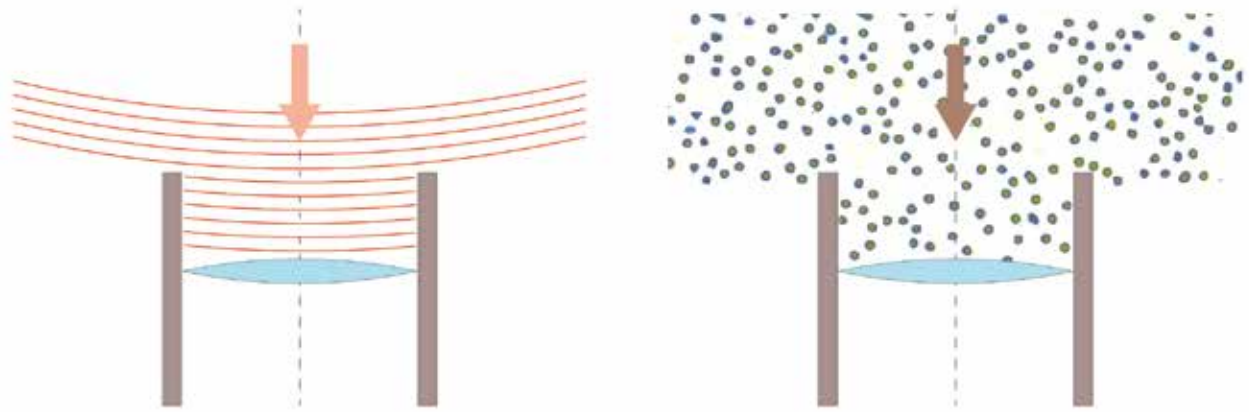
Tilbake til den underliggende fysikken

La oss da betrakte et teleskop ut fra to ulike «mentale bilder»:

1. Lys som (elektromagnetiske) bølger, eller
2. Lys som udelelige fotoner (partikler)

I Figur 2 har jeg forsøkt å angi hvordan jeg tenker meg lys fra en fjern stjerne kommer mot et tele-

► Nytt superfølsomt kamera



Figur 2. Lys som kommer inn mot et teleskop. Hvordan oppfatter vi dette fysisk? Til venstre er det angitt bølgefronter i lyset fra et fjernt objekt. Jeg har valgt å tegne bølgefrontene som buer (deler av en sirkel med sentrum i kilden). For fjerne kilder vil bølgefronten være nær perfekt plan (som vist i neste figur). I høyre del er det antydnet hvordan man oppfatter fenomenet dersom lys er fotoner (partikler).

skop. Lyset fra en stjerne kommer inn som bølger, intensitet-topp etter intensitet-topp. I hver topp er det en relativt godt definert bølgefront, men bare en bitte liten del av den totale bølgefronten slipper inn til objektivet i teleskopet.

For fysikerne ved NIST vil jeg tro at deres bilde av den samme prosessen er som antydnet i høyre del av Figur 2: Fotonene kommer strømmende og noen fotoner slipper inn mot objektivet og andre ikke.

Begge mentale bilder fører til samme konklusjon når det gjelder «lysstyrke»: At vi fanger inn mer og mer lys totalt dersom objektivet øker diameter. Dobbelt så stor diameter gir fire ganger så mye lys inn i teleskopet. Og dette er ETT av velkjente kjenne-tegn når vi endrer objektiv-diameteren.

Men endring av objektiv-diameteren har en svært viktig endring i tillegg til økt «lysstyrke», nemlig endring i *oppløsningssevne*, og det illustreres i Figur 3. Her har jeg tegnet inn bølgefronten fra en stjerne som ligger direkte i forlengelsen av aksens til teleskopet. I tillegg har jeg tegnet inn bølgefronten til en stjerne som ligger en vinkel θ i forhold til den første.

Når vi har med bølger å gjøre, er det en generell regel som dukker opp igjen og igjen: Vi kan ikke skjelve mellom en bølge og en annen bølge dersom ikke de to bølgene adskiller seg fra hverandre med minst én bølgelengde innenfor det volumet vi betrakter. Dette er en omtrentlig formulering, og når man går nøyere inn på detaljene, vil det komme inn en ekstra (ofte geometrisk bestemt) faktor som gjerne ligger mellom 0,5 og 2,0.

I Figur 3 har jeg tegnet inn den magiske grensen. Når vinkelen mellom bølgefronten fra to stjerner har oppfylt kravet om minst en bølgelengdes forskjell innenfor objektivdiameteren, er det mulig å skille de to stjernene fra hverandre i teleskopet, ellers ikke.

Sammenligner vi venstre og høyre side av Figur 3,

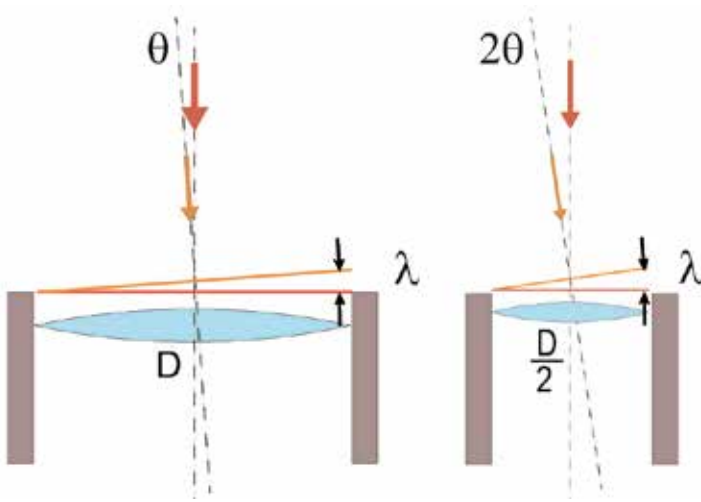
er det opplagt at dersom man reduserer objektivdiameteren til det halve, må vinkelen mellom stjernene være dobbelt så stor for å kunne skilles i teleskopet.

Denne meget viktige sammenhengen kommer helt automatisk når man betrakter lys som bølger. Den samme lovmessigheten gjelder alle bølger, men ikke for partikler. Dette er en av mange viktige detaljer som gjør at jeg mener at bølge-oppfattelsen av lys er suverent bedre enn partikkelbetraktningen.

Siden NIST-fysikerne kun snakker om lys som partikler, føler jeg at de har en mangelfull forståelse.

En annen detalj i deres arbeid finner jeg også underlig. Deres metode er basert på at man gir en forstyrrelse i strømmen i krysningspunktet mellom superledende ledninger i x-retning og i y-retning. Men tenker man på fotoner i Einsteinsk forstand, gir fotoner fra seg ALL energi når det vekselvirker med et eller annet. Dersom fotoner da gir fra seg all sin energi for å ødelegge superledningen i x-retningen, da et det vel ikke noe energi igjen til å også ødelegge superledningen i y-retningen? Noe i argumentasjonen her synes jeg er inkonsekvent.

Det samme kan sies om en detalj i artikkelen der de nevner at siden ledningene i gitteret går både i x-retning og i y-retning («fotonene» kommer inn i z-retning), vil detektoren være like følsom for lys med ulike polariseringer. Dette poenget gir meg igjen en sterk følelse av at NIST-folkene ikke har tenkt nøye nok gjennom den fysikken som må ligge bak hvordan detektoren i detalj fungerer. Hva er den nøyaktige fysiske virkningsmekanismen som fører til at superledningen blir forstyrret? Jeg er IKKE fornøyd med svar av typen: «Energien til fotonet fører til ditt og datt.» Energi er et generelt begrep, og for eksempel gravitasjonsenergi, kjerneenergi osv. utfolder seg via svært forskjellige fysiske vir-



Figur 3. Oppløsningsevnen til et teleskop henger nøye sammen med bølgelengden til lyset og hvor stor del av bølgefronten som slipper inn til objektivet.

kningsmekanismer! Så for å få en bedre forståelse av hvordan detektoren virker, ønsker jeg mye mer detaljer enn jeg hittil har sett!

Enda en liten detalj lurer jeg på. De supralede nanoledningene er tynne og det er mye tomt rom mellom gitteret av ledninger. Hvor store mener man at et foton er? Det spørsmålet er det nesten umulig å få svar på. Noen mener de er punktformige, det vil si uten utstrekning. Men i så fall, vil ikke da en svært stor del av fotonene bare forsvinne mellom nanoledningene? Igjen sitter man igjen med en følelse av at «partikkel-modellen» har betydelige problemer innebygget i seg, og forfatterens påstander om at detektoren har nær 100 % effektivitet (oppfanger alle fotonene som kommer inn) får man lite tiltro til.

Fremtidsutsikter for nye detektoren

Både original-artikkelen i *Nature* og kommentar-artikkelen har rosenrøde vyer for hvordan denne nye detektoren vil kunne påvirke kommende målinger av lys. Selv er jeg ikke så overbevist. Det er flere grunner til det.

Det er nå mer enn 20 år siden vi fikk de første detektorene for lys basert på superledning. Likevel brukes disse detektorene i dag bare i ganske beskjedent omfang så langt jeg kan bedømme. Det er en *betydelig ulempe* at man må operere med flytende helium for å komme så lavt i temperatur som det her kreves. Dersom vi kan oppnå lignende opplegg med materialer som er superledende ved romtemperatur, vil det kanskje bli langt enklere.

Også andre detaljer spiller inn. Hver gang man har oppdaget «et foton» i den nye detektoren, må man lese ut posisjonen. Denne utlesningen tar tid, og imens er detektoren ute av funksjon. Dersom det kommer nye deteksjoner mens utlesningen foregår, vil disse hendelsene gå tapt.

Det betyr at selv om elektronikken er meget rask, er det mange detaljer som bidrar til at total-effekti-

viteten ikke er imponerende.

Selv om denne nye detektoren økte bildestørrelsen 20X i forhold til tidligere superledende detektor-array, er fortsatt maksimal bildestørrelse bare 400.000 piksler, det vil si en oppløsning på 500×800 linjer. Mitt Nikon Z6-kamera har 6048×4024 piksler oppløsning (69,6 megapiksler når piksler i både R, B, og Y telles med). Og mange kamera har langt mer oppløsning enn dette. Selvfølgelig har kameraet mitt langt fra samme følsomhet og langt mer støy sammenlignet med detektoren som er beskrevet i *Nature*-artikkelen fra oktober, men det gir likevel en indikasjon.

I Hubbel-teleskopet og i James Webb-teleskopet er det helt andre egenskaper som er av interesse enn hva det nye superleder-kameraet kan bidra med. Min lille pessimisme betyr imidlertid ingenting. Det er vanskelig å spå om fremtiden ... Time will show! ■

Referanser

- [1] Oripov, B.G., Rampini, D.S., Korzh, B., Allmaras, J., Shaw, M.D., Nam, S.W. og McCaughan, A.N. (2023) «A superconducting-nanowire single-photon camera with 400,000 pixels». *Nature*, Oct. 26, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06550-2>.
- [2] Lenke til kommentar-artikkel: www.nist.gov/news-events/news/2023/10/nist-team-develops-highest-resolution-single-photon-superconducting-camera.
- [3] Vistnes, A.I. (2023). «Bølgepartikkel-dualismen for lys (del 1)». Fra *Fysikkens Verden* 3, s. 47–53.
- [4] Vistnes, A.I. (2023). «Bølgepartikkel-dualismen for lys (del 2)». Fra *Fysikkens Verden* 4, s. 88–96.
- [5] Vistnes, A.I. (2018). «Physics of Oscillations and Waves». Springer, s. 576.
- [6] Vistnes, A.I. og Bergli, J. (2022). «Hanbry-Brown and Twiss effect demonstrated for sound waves from a waterfall; An experimental, numerical, and analytical study». *Am.J.Phys.* 90, s. 20. doi: 10/1119/10.0006613.



Foto: Unsplash

Hvordan oppfører lys seg?

Når man leser populærvitenskap kan man få inntrykket at det er en stor vitenskapelig utfordring i dag å beskrive hvordan lys oppfører seg. Det viser seg å være feil.

Nils-Erik Anders Bomark førsteamanuensis, Institutt for naturvitenskapelige fag, UiA

Siden slutten av 1940-tallet har vi hatt en teori som heter kvanteelektrodynamikk som har vist seg eksepsjonelt god til å beskrive lys og hvordan det vekselvirker med materie. Utfordringen for populærvitenskapen er at denne teorien er svært vanskelig å forklare intuitivt.

Den viktigste lærdommen er at vi må være svært forsiktige med ordet partikkel. Når en partikkelfysiker sier «partikkel» tenker hen på noe svært forskjellig fra det folk flest tenker på.

Målet med denne artikkelen er å få en bedre forståelse for hva vi vet om lys. Vi skal også prøve å forstå hva problemet med tolkningen av kvantefysikken virkelig dreier seg om.

Newton's korpuskler og Huygens bølger

Lys har vært et diskusjonstema i fysikken siden Newton sine dager. På den tiden var spørsmålet om lys er partikler eller bølger. Newton mente det må være partikler (eller *korpuskler*, som han kalte dem) og det var lenge det dominerende synet. Huygens, Young og Fresnel var uenige og etter 150 år med intense diskusjoner ble konklusjonen at lys likevel må være bølger.

Så kom Maxwell og sammenfattet all elektromagnetisme i likningene som bærer hans navn. Han kunne også vise at disse likningene hadde løsninger som tilsvarende bølger og dermed kan vi si at lys er elektromagnetiske bølger.

Nå kan det se ut som spørsmålet om lysets natur er besvart og fysikerne kan jobbe med andre ting, men så kom Einstein og kvantefysikken. Resultatet er at diskusjonen om lysets natur kan virke mer forvirrende enn noen gang.

Det som mye av populærvitenskapen ikke helt ser ut til å ha fått med seg, er at i løpet av 1900-tallet har vi utviklet en teori for lys som ikke bare er matematisk veldefinert, men også den kanskje mest presise og veltestede teori vi noen gang har hatt innen fysikken. Det betyr at vi faktisk vet veldig godt hvordan lys oppfører seg.

Problemet er at denne teorien er matematisk svært komplisert og vanskelig lar seg illustrere på en intuitiv måte.

Det kan se ut som mye av populærvitenskapen og undervisning på lavere nivå står fast i diskusjonen om lys er partikler eller bølger. Det er en utdatert diskusjon som neppe gjør annet enn å forvirre elever. Svaret er at lys er verken er klassiske bølger eller klassiske partikler. Jeg inkluderer her ordet «klassiske» siden spesielt ordet «partikkel» i stor grad har endret betydning i moderne fysikk. En klassisk partikkel kan man se på som en liten klinkekule som flyr omkring og kolliderer med andre klinkekuler. Når en partikkelfysiker sier «partikkel» mener hen noe svært annerledes (vi skal se mer på hva dette er), men siden ordet vi bruker fortsatt er «partikkel» er dette en åpenbar kilde til forvirring.

La oss derfor begynne med å se på vår beste teori for lys.

Vår beste teori om lys

Den teori vi i dag ser på som den mest grunnleggende beskrivelsen av lys og hvordan det vekselvirker med materie, heter kvanteelektrodynamikk eller QED (*quantum electrodynamics*). Den første begynnelsen til denne teorien ser vi allerede på 1920-tallet, spesielt fra Paul Dirac, men vi kan nok ikke kalle dette en ordentlig teori før på slutten av 1940-tallet da Tomonaga, Schwinger og Feynman klarte å vise hvordan man kan gjøre konsistente beregninger av observerbare forutsigelser fra teorien [1]. Hver gang vi ser en diskusjon om lysets natur som kun baserer seg på artikler fra før andre verdenskrig, må vi trå veldig varsomt. Ingen av dem som skrev de artiklene hadde en ordentlig teori å basere sine påstander på.

Det som gjør QED så vanskelig er at det er en kvantefeltteori. Man kan fint kalle den den første kvantefeltteorien.

I 1925 og 1926 publiserte Heisenberg og Schrödinger grunnlaget for kvantemekanikken. Før dette

► Hvordan oppfører lys seg?

hadde kvantefysikken dreid seg mer om spekulasjoner om kvantisering i forskjellige sammenhenger. Nå fikk noen av disse ideene et solid matematisk grunnlag. Kvantemekanikken kan dog ikke beskrive lys ordentlig, dels fordi den som regel formuleres ikke-relativistisk, men mest fordi lys kan absorberes og sendes ut.

Kvantemekanikken beskriver for eksempel elektronet med en bølgefunksjon. Med den kan vi beskrive bevegelsen til et elektron og sannsynligheten for å oppdage elektronet i et eksperiment, men det gir ingen mulighet for å beskrive elektroner som forsvinner, eller oppstår. Det er ikke noe problem for beskrivelsen av elektroner siden de stort sett ikke oppstår eller forsvinner, men det gjør fotoner.

Løsningen på dette er en kvantefeltteori. Som navnet henter til begynner dette med et felt. Vi kan for eksempel se for oss et elektromagnetisk felt. Dette feltet kvantiserer vi slik at energinivåene knyttet til en frekvens, f , blir diskrete med en energiforskjell hf . Det laveste nivået kaller vi vakuum og det nest laveste kaller vi et foton og det neste to fotoner.

Den kanskje mest brukbare måten å tenke på dette, er at når energi overføres til eller fra det elektromagnetiske feltet så gjøres det alltid i pakker hf , og det er disse energipakkene vi kaller fotoner.

Selv om det opp gjennom årene var en god del utfordringer med uendeligheter i utregningene, har vi i dag oppnådd en god forståelse for matematikken bak QED, og vi kan for eksempel bruke den til å beregne det magnetiske dipolmomentet til et elektron med 12 desimalers nøyaktighet. Riktignok trenger vi litt mer enn kun QED for å få til dette (lys vekselvirker med kvarker, som vekselvirker med gluoner for eksempel, og det må tas med i utregningen), men det er likevel en imponerende bedrift.

Vi kan derfor si at QED i dag er en godt etablert og ekstremt veltestet teori for lys og jeg er ikke kjent med noen alternative teorier for å beskrive lys. Jeg er heller ikke kjent med noen eksperimentelle resultater om lys som QED har problemer med å beskrive.

Hva med Maxwells likninger?

Ingen alternative teorier? Er ikke Maxwells likninger en alternativ beskrivelse av lys?

Nei, det er de faktisk ikke. QED er konstruert slik at den reduseres til Maxwells likninger i alle tilfeller vi vet at Maxwells likninger gjelder. Dette er helt analogt med for eksempel Newtons gravitasjonslov og generell relativitetsteori, de er ikke to konkurrerende teorier. Generell relativitetsteori er

den grunnleggende teorien vår for gravitasjon, men siden de to teoriene i de fleste fall gir samme resultat, bruker vi som oftest Newtons gravitasjonslov siden den er mye enklere å bruke.

På akkurat samme måte bruker vi ofte Maxwells likninger til å beskrive lys fordi det gir samme svar og er mye enklere. Dette forteller oss også at det ofte er mest hensiktsmessig å tenke på lys som bølger.

Det er selvfølgelig noen tilfeller hvor vi ikke kan bruke Maxwells likninger. Historisk var kanskje det første tilfellet Bohrs atommodell. Her foreslår Bohr at frekvensen til lyset som blir sendt ut ikke kommer av noen vibrasjons- eller rotasjonsfrekvens til elektronene. Istedenfor bestemmes frekvensen av energiforskjellen mellom energinivåene i atomet. Dette er helt i strid med Maxwells likninger.

Generelt kan vi si at hvis vi har en likning på formen $A = B$, hvor A er kvantisert på en eller annen måte, så må også B være kvantisert. Hvis dette ikke er umiddelbart klart, tenk på at om A er kvantisert kan den være i en superposisjon av tilstander som så reduseres til kun en tilstand når vi gjør en måling. Hvis $A = B$ må det samme skje med B og derfor må også B være kvantisert.

I Maxwells likninger har vi ladning, for eksempel elektroner, på høyre side og elektromagnetiske felter på venstre side. Siden elektronene er kvantisert, må også det elektromagnetiske feltet være det.

Samme argument forklarer også hvorfor vi trenger en kvantegravitasjonsteori. Einsteins feltlikninger for generell relativitetsteori kan skrives $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$, hvor $G_{\mu\nu}$ beskriver romtiden, $T_{\mu\nu}$ beskriver materien og κ er en konstant. Siden $T_{\mu\nu}$ er kvantisert, ser vi at også $G_{\mu\nu}$ må kvantiseres. I de fleste tilfeller går det likevel greit uten fordi vi kan bruke en klassisk (ikke kvantisert) $T_{\mu\nu}$.

Når er det så Maxwells likninger kommer til kort?

Vi kan stort sett se lys som bølger, men vi må huske at ved energioverføringer så kan kun hele kvanter hf overføres. Dette forklarer for eksempel hvorfor γ -stråling er farligere enn synlig lys, kvantene som overføres har mer energi og er derfor mer ødeleggende.

For å se hvorfor denne kvantisering av energioverføring gir oss noe som likner partikler, se for deg at et atom sender ut et foton. La oss si at vi har lysdetektorer rundt atomet. Hva detekterer de? Vi vet at de kun kan detektere enten et foton eller intet foton. Energibevaring forteller oss at en detektor detekterer fotonet og alle de andre detekterer intet foton. Det ser derfor ut som om fotonet beveger seg i en retning (mot detektoren som detekterte det) og ikke sprer seg i alle retninger som en bølge.

I mange partikkelfysikkeksperimentene gjør dette at det ofte blir enklere hvis man ser på fotoner som noe som mer likner partikler. Hvis man for eksempel ser på Higgs-bosoner som henfaller til to fotoner, ser man gjerne det som om fotonene beveger seg i hver sin veldefinerte retning helt fra starten, men det er egentlig en forenkling av hva som skjer (fotonet beveger seg ikke i en veldefinert retning før vi målte det).

Fotoner er ikke klassiske partikler!

Det største problemet med diskusjonene om partikler og bølger er sannsynligvis at når man sier «partikkel», tenker de fleste på en klassisk partikkel, en klinkekule. Einsteins fotoner ble lenge ikke akseptert av andre fysikere fordi man mente de ikke kunne beskrive interferens. I moderne ører høres dette ut som om de tenkte seg fotonene som noe som alt for mye likner klassiske partikler. Dette må vi slutte med!

Den som har lest nøye og tenkt seg om frem til hit, har nok allerede skjønnet at disse fotonene er noe ganske annet enn klinkekuler. De innføres som kvantiserte eksitasjoner til et felt. En konsekvens av det er at vi kan lage superposisjoner av tilstander med forskjellige antall fotoner. Antall fotoner trenger altså ikke være veldefinert! Dette er noe svært annet enn klinkekuler.

Dette er heller ikke kun en teoretisk kuriositet.

I introduksjonskurs i kvantefeltteori blir studenter gjerne spurt om å beregne forventningsverdien til det elektriske feltet til et foton [2]. Svaret blir null.

Et foton som skal være kvante til det elektromagnetiske feltet har altså ikke noe elektrisk felt. Hvordan skal vi da lage elektromagnetiske bølger av fotoner?

Svaret blir å lage koherente superposisjoner av tilstander med alle mulige forskjellige antall fotoner. Resultatet blir en elektromagnetisk bølge som kan beskrive for eksempel en laserstråle. Denne bølgen er altså en superposisjon av tilstander med alt fra null til uendelig antall fotoner.

Hvis dette høres sprøtt ut, husk at forskjellige antall fotoner er kun forskjellige kvantetilstander til feltet, så det å endre antall fotoner blir analogt med å eksitere et atom. På samme måte som et atom kan være i en superposisjon av energinivåer, kan et kvantefelt være i en superposisjon av tilstander med forskjellige antall fotoner.

En annen ting som gjør fotoner svært forskjellige fra klinkekuler er uskarphet i posisjon. I partikkelfysikk vil man ofte ha en veldefinert

bevegelsesmengde og energi. Prisen for det får vi fra Heisenbergs uskarphetsrelasjon $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$. Hvis vi skal ha $\Delta p_x = 0$, ender vi opp med $\Delta x = \infty$. Fotoner i partikkelfysikk har uendelig uskarphet i posisjon! Matematisk beskrives fotonet med noe som $e^{(i/\hbar)(p_x x - Et)}$, en perfekt kompleks bølge utbredt i hele universet.

Men Feynman sa at lys er partikler!

Nå har kanskje noen hørt Richard Feynman si at lys er partikler [3]. Kanskje noen også har sett Feynmans vei-integral-formulering av kvantefysikken hvor man tenker seg at en partikkel tar alle mulige veier fra start til mål. Dette viser vel at fotoner er mye mer partikler enn jeg later som?

Nei, egentlig ikke. Feynman mente at lys er partikler fordi en lysdetektor ved lav nok intensitet sier klikk, klikk. Med andre ord mente han at det at lys absorberes i hel kvante, er nok til å kalle det partikler. Det betyr dog at det han mente med «partikkel» er noe svært forskjellig fra den klassiske partikkelen folk tenker på.

Feynmans vei-integraler er også interessant. Det kan se ut som man snakker om partikler siden man summerer mange veldefinerte veier. Det man regner ut til slutt er dog interferens mellom de forskjellige veiene, og interferens er jo typisk bølger. Feynmans vei-integral kan ses på som en generalisering av Huygens prinsipp og dermed nært knyttet til bølgemekanikk. Forskjellen er at den amplitude man beregner ikke betraktes som en bølgeamplitude, men som noe man kan bruke til å beregne en sannsynlighet.

Det samme gjelder Feynman diagrammer. De kan se ut som beskrivelser av partikler som kolliderer, men de er et matematisk verktøy vi bruker til å beskrive vekselvirkninger mellom tilstander til kvantefelter som beskrevet tidligere.

Det vi igjen ser er at hvis fysikere sier at lys er partikler, betyr ordet noe som i mangt likner en bølge og definitivt ikke en klassisk klinkekule.

Forskjellen mellom elektroner og fotoner

Kvantefeltteorier brukes ikke kun til lys, men også til å beskrive all materie. Da kan man lure på, hvorfor oppfatter vi elektroner og fotoner så forskjellig?

Hvorfor ble lys sett på som bølger mens elektroner ble omtalt som partikler helt fra starten?

Faktum er at i mange partikkelfysikkeksperimentene er det en utfordring å se forskjell på elektroner og fotoner, så de er faktisk ikke alltid så forskjellige. I hverdagssammenhenger er det dog klare forskjeller

► Hvordan oppfører lys seg?

ler, og de kan i hovedsak utledes fra to forskjellige egenskaper: masse og ladning.

Elektroner har masse, men det har ikke fotoner. Det betyr at fotoner beveger seg med lysfarten hele tiden og vi kan derfor aldri studere et foton tilnærmet i ro, noe vi kan med elektroner. Massen gjør også at elektronet har lettere for å ha en større uskarphet i bevegelsesmengde og dermed en mindre uskarphet i posisjon. Det siste er en del av grunnen til at atomkjernen er så mye mindre enn atomet. Protoner og nøytroner har større masse enn elektroner og kan dermed lettere ha større uskarphet i bevegelsesmengde og mindre uskarphet i posisjon.

Det andre er at elektroner har elektrisk ladning, noe fotoner ikke har. Siden elektrisk ladning er bevart, betyr det i praksis at antall elektroner er bevart (med noen unntak hvis vi har nok energi til å lage tynge partikler). Vi kan derfor telle elektronene på en måte vi ikke kan med fotoner. Det er også dette som gjør at vi kan ha superposisjoner av forskjellige antall fotoner, noe som stort sett ikke går an for elektroner.

Alt dette gjør at elektroner som oftest likner mer på partikler enn det fotoner gjør.

Her finner vi kaninhullet

Så vi har en teori som kan beskrive alt som har med lys å gjøre, men hva med alle som snakker om at vi ikke skjønner kvantefysikk?

Har de feil?

Nei, men det er viktig å være tydelig på hva det er vi ikke forstår. Matematisk er både kvantemekanikk og kvantefeltteori veldefinerte teorier. Vi kan regne ut alt mulig rart til eksepsjonell presisjon, og eksperimentene bekrefter svarene. Vi sliter med å formidle hva de forteller oss på en enkel måte fordi de er så matematisk kompliserte, men det er en didaktisk utfordring ikke et problem ved teoriene.

Spørsmålet om lys er bølger eller partikler er heller ikke problemet. Det er en diskusjon som i dag er utdatert. Det var en interessant diskusjon en gang, men nå har vi QED som forteller oss hvordan lys oppfører seg i alle sammenhenger og når vi kan se det som bølger og når vi kan se det som partikler og nøyaktig hva det betyr. Man trenger kanskje minst en master i teoretisk fysikk for å forstå svarene, men det endrer ikke det faktum at vi har svarene.

Hva er så spørsmålet vi sliter med?

Det kommer av sannsynlighetene kvantefysikken brakte inn. Igjen, se for deg et atom som sender ut et foton og lysdetektorer i alle retninger. En detektor detekterer fotonet; hvor var fotonet

før det ble detektert?

Det åpenbare svaret er at det var på vei til detektoren, men det svaret får umiddelbart problemer med noe som heter Bells ulikheter. Kort fortalt må informasjon fra en måling på et foton påvirke et annet foton raskere enn et lyssignal kan bevege seg fra målingen til fotonet. Dette kommer i konflikt med spesiell relativitetsteori og ingen har klart å lage en kvantefeltteori hvor dette er svaret. Man kan også prøve seg på ting som at hvilke innstillinger du kommer til å sette på detektoren er bestemt på forhånd og korrelert med egenskapene fotonet har, alternativt at det at du stiller inn detektoren endrer egenskapene til fotonet i fortiden. Kanskje ikke helt overraskende er ikke slike ideer så populære.

Hva kan vi ellers svare?

Vi kan si at fotonet ikke hadde en veldefinert posisjon, det er det vi pleier å svare på slike spørsmål. Da ender vi fort opp med å si at kvantefeltene og bølgefunksjonene våre kun er matematiske verktøy vi bruker til å forutse ting, ikke noe som virkeligheten faktisk er bygget opp av. På den måten unngår man konflikten mellom Bells ulikheter og spesiell relativitetsteori, det som beveger seg raskere enn lyset er ikke et fysisk signal, kun en korrelasjon mellom måleresultater. Men hva er da virkeligheten bygget opp av?

Bohr poengterte at vi kun har våre målinger, og det gir ikke mening for fysikken å prøve å svare på hva virkeligheten egentlig består av. Han har et poeng der, men må ikke virkeligheten likevel være noe? Burde ikke fysikklovene til slutt avsløre noe om hvordan verden faktisk er? Mange mener det, men sliter med å finne en måte å svare på det som er konsistent med Bells ulikheter.

Det er også ett konkret problem her: Både kvantemekanikk og kvantefeltteori tillater superposisjoner av tilstander som så reduseres (eller kollapser, som vi ofte sier) til en tilstand når vi gjør en måling. Det er jo logisk at en måling gir kun ett svar og at den tilstanden vi har etterpå er den vi målte, men hva teller som en måling? Denne kollapsen er også problematisk fordi den ikke kan beskrives av kvantefysikken selv. Mellom målinger er all utvikling helt deterministisk, men så skjer denne ikke-deterministiske kollaps.

Dette er spørsmål vi ikke har gode svar på og jo mer man tenker på det, dess vanskeligere ser det ut til å være å finne en metafysikk om hva verden egentlig er bygget opp av som er konsistent med det vi vet om verden. Denne utfordringen kan også være

litt av grunnen til at kvantefysikk er så vanskelig å formidle. Det er grunnen til at tittelen på denne artikkel er «Hvordan oppfører lys seg?» og ikke «Hva er lys?». Det førstnevnte kan vi svare på, det andre kan vi ikke svare på, og det spørres om det finnes noe svar vi ville vært fornøyde med.

Sluttord

Vi vet altså godt hvordan lys oppfører seg, og det vi sitter igjen med er i stor grad en didaktisk utfordring. For eksempel, den såkalte «bølge-partikkel-dualiteten» har ingen rolle i den matematiske teorien vår. Dualiteten er ikke veldefinert nok til at det er mulig. Den er heller ikke del i de filosofiske diskusjonene av hva kvantefysikken forteller oss om hva virkeligheten er bygget opp av. Den var nok det en gang i tiden, men den rollen er utspilt etter at de moderne teoriene kom på plass.

Det vi står igjen med er den didaktiske utfordringen. Gjør det det enklere å formidle hva kvantefysikken sier, hvis vi snakker om partikler og bølger? Mest sannsynlig ikke, det største problemet der ser i mine øyne ut til å være at når vi sier partikkel så tenker folk på klassiske partikler. Det viktigste mener jeg derfor blir å være tydelig på at det ikke er det vi snakker om. Dette gjelder både fotoner og andre partikler som elektroner og Higgs-bosoner.

Til slutt noen ord om spørsmålet «Hva er lys?». En ting er at vi ikke klarer helt å svare på hva kvantefysikken forteller oss at verden er bygget opp av, dette spørsmål er mer problematisk enn det. Hva slags svar er man egentlig ute etter?

Prøv det samme spørsmålet om hva som helst, for eksempel «Hva er et bord?». Jeg er helt sikker på at du vet hva et bord er, men jeg tror du sliter med å svare på spørsmålet likevel. Hvis du svarte «en møbel» så er jo ikke det et fullt svar, ikke alle møbler er bord. Hvis du prøver på et ordentlig svar så finner du fort at det du gjør er å oppgi egenskaper og bruksområdene til et bord, du svarer på spørsmålet «Hvilke egenskaper er spesielle for bord og hva brukes bord til?».

På samme måte blir det med spørsmålet «Hva er lys?». Vi kan neppe finne et godt svar på det. Det nærmeste spørsmålet vi kan svare på er «Hvordan oppfører lys seg?».

Epilog – hvor uenig er jeg med Vistnes?

I de siste numrene av *Fra Fysikken Verden* har Arnt Inge Vistnes presentert sine tanker om lys [4, 5], og det kan da være interessant å sammenlikne mine tanker med det han skriver.

Mange av argumentene til Vistnes går ut på å kritisere partikkelbeskrivelsen av lys. Her er vi enig i ganske mye. Det bilde han kritiserer er nettopp bildet av fotoner som klassiske partikler, akkurat det jeg også kritiserer. Vistnes trekker frem et sitat fra Einstein: «... fenomener knyttet til utsendelse eller omdannelse av lys kan bedre forstås hvis man antar at energien til lys er diskontinuerlig fordelt i rommet» [6]. Jeg bruker selv ikke dette sitatet fordi det kan gi et for klassisk bilde av hva et foton er.

Der jeg ser en didaktisk utfordring, går dog Vistnes en god del lenger. Det ser ut til at han mener vi må vurdere å forkaste QED. Når han foreslår å forkaste $E = hf$, så betyr det å forkaste QED og med det det meste (om ikke alt) av moderne kvantefysikk. Det er noe jeg ikke ser noen grunn til, som nevnt så kjenner jeg ikke til verken alternativer til QED eller eksperimentelle utfordringer til teorien.

Alle fysikkteorier skal selvfølgelig testes, og ingen fysikere tror at vi har kommet til bunns i hvordan verden fungerer. Nå det er sagt så er QED, som del i Standardmodellen for partikkelfysikk, så godt testet at det er høyst usannsynlig at vi trenger noe annet for å beskrive noe vi kan gjøre i en lab. Det er også i mine øyne usannsynlig at det som eventuelt erstatter QED i fremtiden, er noe som i større grad likner klassiske bølger. Det er mer sannsynlig at det som er mest grunnleggende i de teoriene, er noe mye mer matematisk abstrakt.

Vistnes avslutter med at diskusjonen mellom Bohr og Einstein «om kvantefysikken er komplett», ikke er over. Her er vi enige, men svaret er neppe verken klassiske partikler eller bølger. ■

Referanser

- [1] A. Pais. *Inward Bound*. Oxford University Press (1986)
- [2] F. Mandl og F. Shaw. *Quantum Field Theory*. Wiley (1984)
- [3] R. Feynman. *QED*. Princeton university press (1985)
- [4] A.I. Vistnes. «Bølge-partikkel-dualismen for lys (del 1)». *Fra Fysikkens Verden* 3 (2023), s. 47–53
- [5] A.I. Vistnes. «Bølge-partikkel-dualismen for lys (del 2)». *Fra Fysikkens Verden* 4 (2023), s. 88–96
- [6] A. Einstein. «Concerning an heuristic point of view toward the emission and transformation of light». *Annalen Phys.* 17 (1905), s. 132–148

Husk å melde adresseendring til
nfs.styret@gmail.com

Verken partikkel eller bølge

Johannes Skaar, Alex Read, Olav F. Syljuåsen professorer, Fysisk institutt, UiO

Arnt Inge Vistnes diskuterer i en serie artikler den såkalte bølge-partikkel-dualismen. Vistnes gir et inntrykk av splittelse blant fysikere, og antyder at splitten til en viss grad er mellom teoretikere og eksperimentalister. Vistnes ønsker fotonet ut av Standardmodellen, og mener lys bør beskrives av klassisk elektromagnetisme. Han hevder at Bohr og andre pionerer ikke hadde en god forståelse av klassiske bølgefenomener, men var mer fortrolige med partikler. Vistnes skriver videre om bølge-partikkel-dualismen at «vi kan bruke bølgebeskrivelse når vi synes det fungerer best, og partikkelbeskrivelse når det fungerer best, for vi kan uansett ikke vite hva lysets 'sanne natur' er!».

Vi ønsker å påpeke at etablert teori, kvanteelektrodynamikk, *ikke* inneholder et slikt valg. I elektrodynamikken beskrives lys med et *kvantefelt*. Det er noe for seg selv, det er verken en klassisk partikkel eller en klassisk bølge. Vår dagligdagse intuisjon fungerer ikke så godt for kvantefelter, men i noen tilfeller vil de gi oss en følelse av bølgeegenskaper, og andre ganger partikkelegenskaper. Men det er én teori – det er ikke sann at man må velge teori avhengig av situasjonen.

Når vi skal beskrive et eple som faller ned, bruker vi Newtons mekanikk. Når vi skal beskrive sorte hull, bruker vi generell relativitetsteori. Men man kan gjerne bruke generell relativitetsteori i begge tilfeller, det er bare at det er unødvendig komplisert for eplet. På tilsvarende måte bruker vi ofte klassisk bølgebeskrivelse av lys, eller en partikkelbeskrivelse av lys, i stedet for den fulle kvanteelektrodynamikken. Men man må gjerne bruke kvanteelektrodynamikken til å beskrive regnbuen hvis man vil.

Vistnes gir en historisk gjennomgang av lys i fysikken. Dessverre slutter gjennomgangen ved 1927, før den vesentlige utviklingen av kvantefeltteori startet. For oss virker diskusjonen i Vistnes' artikler å henge igjen i forestillingene som hersket i starten av 1900-tallet. Vi ser ikke at bølge-partikkel-

dualisme etter utviklingen av kvantefeltteori lenger er en relevant diskusjon. Videre kan man for eksempel ikke si at et foton har energien $E = hf$, for en «bølgepakke» i kvantefeltteori har jo et spektrum av frekvenser.

Det er imidlertid andre, interessante fysiske eller fysisk-filosofiske problemer som fortsatt er høyst aktuelle. Et viktig eksempel er måleproblemet i kvantefysikken. Måleproblemet kan kanskje minne om «partikkel-bølge-dualisme» idet kvantefeltoperatorer forplantes som bølger, mens målinger fører til «kollaps». Men måleproblemet handler om mye mer enn bare forplantning og deteksjon av lys.

Kvanteelektrodynamikken har hatt ekstremt stor suksess. Den forutsier for eksempel det magnetiske momentet til elektronet med en nøyaktighet på mer enn 10 signifikante sifre, sammenlignet med de beste eksperimentene så langt. Dette er gjeldende verdensrekord i fysikk. Å foreslå at «klassifisering av fotoner som elementærpartikler er feil» gir et stort forklaringsproblem for en rekke eksperimentelle nøkkelresultater innen partikkelfysikk. På de fleste universiteter som driver med fysikk, er partikkelfysikk, kvanteoptikk og kvantefeltteori standardemner som studentene kan velge, på lik linje med klassisk mekanikk og optikk. Dette er ikke kontroversiell teori. Emnene binder dessuten sammen teoretikere og eksperimentalister. Like fullt er det de færreste fysikere som tror kvanteelektrodynamikken, eller mer generelt, Standardmodellen, er det siste ordet. Teoriene har svakheter eller begrensninger. Dette svarer til hvordan Newtons mekanikk har hatt ekstremt stor suksess, men jo har klare begrensninger.

Det er bra å stille spørsmål ved etablert teori. Hvis man skal foreslå en alternativ teori til Standardmodellen, må man samtidig være i stand til å beskrive alle de eksperimentelle resultatene. Det er mange fysikere som jobber med dette, og vi mener at det er stor takhøyde for velfunderte alternativer. ■

Utan fysikken stoppar verda

Kristian Fossheim professor emeritus, Institutt for fysikk, NTNU

Med tillatelse fra forfatteren trykker vi her en artikkel som sto på trykk i Syn og Segn i 1988 og som er like aktuell i dag som da den ble skrevet.

Dei siste åra har Nobelprisane i fysikk blitt gjevne til to forskar-par ved det same vesle fysikklaboratoriet i Rüsçhlikon, ein liten forstad til Zürich. Først fekk Heinrich Rohrer og Gerd Binnig prisen i 1986 for å ha utvikla eit nytt mikroskop, som i detalj kan lage bilete av atomordninga i faste stoff og molekyl. Deretter fekk Alex Müller og Georg Bednorz prisen i 1987 for å ha oppdaga dei nå vidgjetne superleiarane, som fører elektrisk straum utan tap av energi, nå ved langt høgare temperatur enn i nokon tidlegare kjende materiale. Det er verd å merke seg at det ikkje var nokon direkte samanheng mellom desse to store oppdagingane. Ein indirekte samanheng var der nok likevel: Føresetnaden for begge var eit stimulerande og sterkt fagleg miljø.

Desse hendingane illustrerer fleire viktige sider ved fysikken, ja, ved all banebrytande naturvitskap for så vidt: For det første ville svært få, om nokon, ha gjetta på førehand at desse resultat i det heile var moglege å nå. For det andre ville ein eventuell kvalifisert spåmann ikkje ha venta at dei skulle kome der, det vil seie ved eit laboratorium med så liten fysikkstab.

Ser vi på den historiske utviklinga av fysikken, vil vi likevel oppdage at desse sidene ved oppda-

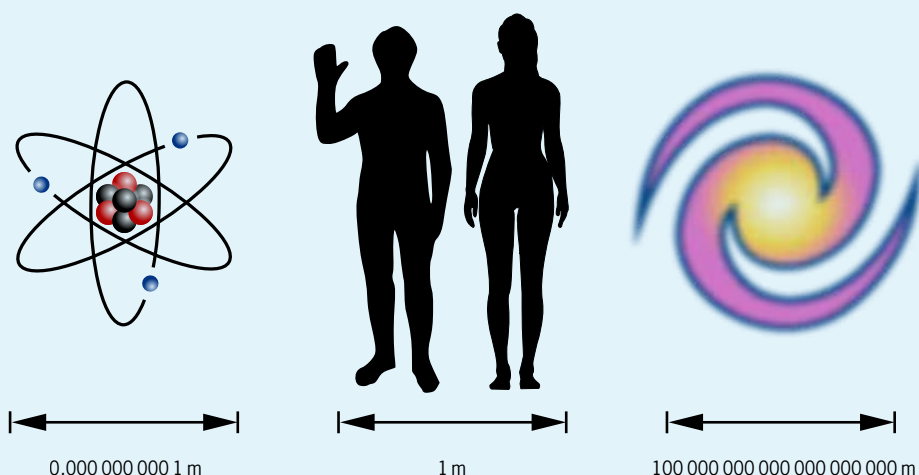
gingane i Rüsçhlikon kan generaliserast: Fysikken er ein grensesprengande naturvitskap der store og nettopp uventa oppdagingar stadig blir gjorde, og: slike oppdagingar kan gjerast under enkle tilhøve dersom ideen er god nok. Ideen er altså det sentrale ved store gjennombrøt, utan omsyn til om ressursane som blir brukte er små, som ved laboratoriet i Rüsçhlikon, eller gigantiske som ved dei store europeiske partikkelakseleratorane ved CERN i Genève.

Går vi attende til 1984, var det nettopp det sistnemnde laboratoriet som fekk Nobelprisen for å ha vist eksistensen av dei såkalla W- og Z⁰-elementærpartiklane. Dette resultatet gav det viktige og endelege prøvet for at to av naturens fire kjende fundamentale krefter kan sameinast i ei, den såkalla elektroveike krafta. Dermed har vi i alt berre tre krefter. Mens Carlo Rubbia hadde ideen, var fleire hundre fysikarar involverte i gjennomføringa av eksperimentet, og budsjettet kunne skrivast med 9-sifra tal. Målet var erkjenning om naturens djupaste vesen.

Kva er så fysikk? Fysikk er inst inne vitskapen om dei tre (eller fire) grunnleggande naturkreftene, og deira vekselspel. Den handlar om gravitasjon som fekk Newtons eple til å falle frå treet mot marka, om elektromagnetisme som gjev oss lyset og som ber radio- og TV-bølgjene inn i stova vår. Det er og vitskapen om den sterke og den veike krafta som

Figur 1. Fysikk kan brukes til å beskrive alt fra de minste, subatomære skalaer til galakser og hele universet.

Illustrasjon: Wikimedia Commons





Figur 2. Laboratoriet i Rüsçhlikon var et sted for banebrytende og Nobelpris-vinnende forskning på 1980-tallet.

Foto: IBM Research

rår i atomkjernene og som verka i urstoffet ved skapinga av universet for ca. 18 milliardar år sidan¹, det såkalla store smellet (big bang).

Fysikken nektar seg ingen ting når det gjeld ambisjonar. Den arbeider like gjerne med galaksar og kosmologi der storleiken på objekta er opptil 10^{26} m (den hittil kjende utstrekninga av universet) og ned til dei minste subatomære byggsteinane på 10^{-19} m eller mindre. Men ennå veit vi ikkje om ein så vanleg atomær partikkel som elektronet har utstrekning, eller berre er eit matematisk massepunkt. Det er slike yttergrenser som fascinerer fysikaren. Fysikken søkjer å trenge igjennom eller under alle slike grenser. Men den arbeider sjølvsagt ikkje berre mot slike romleg definerte grenser. Like viktig, ja viktigare, er det å passere dei reint intellektuelle grensene, det vil seie dei som stengjer for vår tanke. Dette betyr at vi av og til må arbeide fram nye tenkemåtar. Dette er dei vanskelegaste barrierane. Einsteins relativitetsteori er døme på dette. Kombinasjon av kunnskap, systematikk, analyse av innfløkte, kaotiske system, studium av orden og uorden, av symmetrieigenskapar, beskriving av alle typar materielle objekt som finst omkring oss, alt dette og mykje meir

1 I vår tid regner vi med at big bang skjedde for 13,8 milliardar år sidan.



Figur 3. Flyfoto av området hvor CERN ligger. Den sirkelformede partikkelakseleratoren befinner seg under bakken og er markert med sirkel. Derfra sendes partiklene videre til ulike detektorer.

Foto: Maximilien Brice/CERN

står på fysikarens program. Også her krevst det grensesprengande intellektuell innsats.

Men la oss vende attende til dei to oppdagingane som vart gjorde i Rüsçhlikon med tanke på eit anna viktig spørsmål: Kva er den praktiske nytten av fysikken? Det syner seg då straks at begge oppdagingane i Rüsçhlikon har store perspektiv i så måte. Utviklinga av det nye mikroskopet (tunnel-mikroskopet) gav oss eit nytt instrument utan sidestykke når det gjeld strukturstudiar på atomær skala. Og dei nye superleiarane gjev store voner om praktisk nytte på nær sagt alle område der elektrisk straum blir nytta i dag, frå mikroelektronikk til transkontinental kraftoverføring.

Utan vidare kan vi dermed òg ta desse oppdagingane som døme på endå ei sentral side ved fysikken: Fysikken er teknologiskapande. Med eit slagord kan vi seie at dagens fysikk er morgondagens teknologi. Utan tvil er fysikken den primære teknologidrivande krafta i vår sivilisasjon. Ved å utforske naturen set fysikken oss i stand til også å kontrollere og herske over naturen sjølv på stadig finare nivå. Medan smeden i smia, med hammar og bolt for 100 år sidan var den fremste materialarbeidar og laga dei fleste reiskapar vi trong, så er dagens smie eit støvfritt laboratorium der nye material blir produserte, eitt atomlag om gongen. Vi kan altså ikkje berre nyttiggjere oss dei materiala naturen legg oss



Figur 4. I superdatamaskiner kan ufattelig tidkrevende regnestykker utføres og beskrive raske prosesser på stor skala som det ellers ville være umulig å studere. Her vises Betzy, en norsk superdatamaskin plassert ved NTNU.

Foto: Roger Kvam/Wikimedia Commons

i hende. Vi held på å bli herrer over naturen på ein heilt ny måte: Vi kan detaljkontrollere samansettinga av nye material der vi på førehand har rekna ut på kvantefysisk grunnlag korleis stoffet skal lagast for å få dei eigenskapar vi ynskjer. Kvantefysisk ingeniørkunst er blitt eit slagord og ein røyndom. Dagens datateknologi er eit resultat av slik avansert materialframstilling.

Og dermed er det sagt at også datamaskinen, slik vi kjenner den i dag, er fysikken sitt ektefødde barn. Inga teknologisk nyvinning i vårt hundreår illustrerer betre kva praktisk potensial den «eksotiske» fysikken har. Berre ved denne eine innretninga har fysikken endra vår teknologiske kvardag på radikalt vis. Datamaskinen har flytta ut frå laboratoria og inn på arbeidsplassane til den vanlege kvinne og mann, frå kontoret i skyskraparen i New York til fjøset i ein norsk dal. Den har skapt heilt nye måtar å arbeide på, ved sida av at den i mange samanhengar kan gjere presise dataoperasjonar så mykje raskare enn den menneskelege hjernen. Medan den første teknologiske revolusjonen gjekk ut på å byte ut utilstrekkeleg menneskeleg muskelkraft med maskinkraft, går dagens revolusjon ut på å la datamaskinen ta over intelligent arbeid med så store datamengder at den menneskelege hjernen ikkje strekk til.

Datamaskinen kan til dømes utan vanske halde

nøyaktig oversyn over kvar einaste vare som finst på lager i ei stor bedrift eller butikk, og varsle når ei vare er utseld. Den har gjeve ein ny dimensjon til bibliotekstellet der ei emneliste kan brukast til å plukke ut alle bøker med relevant informasjon. Og biblioteka kan koplast saman i nett over heile verda. Det same kan forskarane. Elektronisk post tek over meir og meir. Frå land til land kan travle forretningsfolk, journalistar, forskarar osv. sende brev til kvarandre direkte frå dataskjerm til dataskjerm. Vanleg postgang går altfor seint. Mens elektronisk post er framme på timen, brukar eit transatlantisk brev 1–2 veker.

Offentlege kontor og bankar ville i dag gå i stå utan datamaskinar. I moderne konstruksjon og dokumentasjon av avanserte maskinar tek datamaskinen over. Innfløkte industrielle produksjonsprosessar, robotar, bilmotorar, fly, rakettar og romskip blir styrde av datamaskinar. I superdatamaskinar, «talknusarar», kan ufattelig tidkrevjande regnestykke utførast og beskrive raske prosessar på stor skala som det ellers ville vere umogleg å studere. Eitt døme er simulering av brann i eit hus. Eit anna døme er detaljert kartlegging av luftstraum, trykk og temperatur over heile overflata av ei romferje som vender tilbake til jorda. Mekaniske påkjenningar i store olje-plattformer kan reknast ut i detalj for å hindre materialsvikt.

► Utan fysikken stoppar verda



Figur 5. Røntgenstråling, elektromikroskopet, ultralyd og magnetisk resonans (MR) er alle direkte produkt av fysikkens frammarsj. Alle foto: Wikimedia Commons

Datamaskinen som fagekspert er ei anna utvikling som er i gang.

Det desentraliserande aspektet ved datamaskinen er ei anna interessant side av saka. Kanskje vil dette bli redninga for bygde-Noreg i framtida? Produksjonsstaden treng ikkje spele så stor rolle når datamaskinen får så sentral plass i produksjonen.

Men fleire andre aspekt er mindre hyggelege. Personvernet er kome i fare ved ikkje-autorisert bruk av personopplysningar i datamaskinar. Uvedkomande kan skaffe seg tilgang til informasjonar som er viktige for nasjonens tryggleik. Det er blitt ein internasjonal sport å sende ut destruktive program, såkalla datavirus, som går inn i datamaskinar og øydelegg programvare-innhaldet. Sist haust såg vi eit anna fenomen: Datamaskinen som børsspekulant i USA gjorde nok sitt til børskraket i oktober. Som så ofte elles er der negative sider ved framsteget.

La oss ta fysikkens innverknad på medisinen. Laseren, røntgenstråling, elektromikroskopet, ultralyd, magnetisk resonans, isotop-diagnose, er alle direkte produkt av fysikkens frammarsj. Moderne medisin ville vere utenkeleg utan desse instrumenta.

Den same verknad har fysikken på alle andre naturfaglege disiplinar. Fysikken er difor ein banebrytar for heile spekteret av naturvitskap. På den måten er den pådrivar for å bygge bru mellom fagfelt. I tillegg er fysikken det mest internasjonale av alle fag. Dette er fordi fysikken berre arbeider med allmenne problemstillingar som er like gyldige i alle land. Fysikk-forskning er difor ein viktig pådrivar også i internasjonalt samarbeid. Ein av dei viktigaste grunnane til at den norske EF-debatten

snart vil ta fart att, er at norsk forskning må koplust til utviklinga i Europa.

Fysikken er kjend for sin materielle dualisme, at materien kan oppfattast både som partiklar og som bølger. Denne dualismen er vanskeleg å fatte, men endå meir djuptgripande i sin konsekvens er det problemet vi kan kalle «den bibelske dualismen», det at kvar viktig ny kunnskap kan brukast til både godt og vondt. Naturvitskapen klarar aldri å lure seg unna dette problemet. For mest kvar ny oppdaging, same kor strålende den er som intellektuell prestasjon, eller i sin positive konsekvens, vil ha eit negativt potensial i tillegg.

Skal vi så bli nøydde til å ta stilling til om naturvitskap og fysikk er god eller vond? For å få dette problemet ned på jorda, kan det vere interessant å illustrere det med eit historisk døme: Oppdaginga av prosessen for utvinning av jarnet frå malm høyrer sjølvstilt til dei største i menneskesoga, særleg etter at ein lærde å lage stål av jarnet. Den var så viktig at den ga namn til ein heil tidbolck. Denne oppdaginga kunne vi gjerne klassifisere som førsterangs naturvitskap. Dei som utvikla framstillingsmetodane for jarn og stål, var altså å likne med dagens fysikarar. Dei produserte eit materiale som var langt overlege samanlikna med alle materiale kjende til då. Oppdaginga var følgd av teknologisk utvikling: Jarnvinna vart forbetra og spreidde seg over store delar av verda, og smedyrket fekk ein framstående plass i samfunnet.

Jarnet og stålet ga altså mennesket nye reiskapar som sette det i langt betre stand til å meistre kampen for tilværet. Men samstundes vart det mogeleg å produsere langt betre øydeleggingsvåpen,



Figur 6. Soppskyen etter prøvesprengning det kjernefysiske våpenet Castle Bravo i USA i 1954.

Foto: Wikimedia Commons

særleg då oppfinninga av krutet kunne kombinerast med jarnet. Skal vi så seie at oppdaginga av jarnvinna var god eller vond? Problemet ligg sjølvsagt her ikkje i naturkunnskapen sjølv, men i mennesket. Enkelt sagt er det den evige kampen i mennesket, mellom det gode og det vonde, som får slike konsekvensar, og særleg når avansert teknologi blir knytt til makt. Og makta har alltid evna til å finne fram dei destruktive sidene ved ny teknologi.

Frå vår tid kjenner vi endå meir dramatiske døme på korleis makta tek i bruk den mest avanserte kunnskap til destruktiv bruk: Utviklinga av atombomba baserte seg direkte på fysikkens mest framstående ekspertise. Soga om utviklinga av atombomba og bruken av den mot Hiroshima og Nagasaki er soga om sjølv syndefallet i fysikken. Dei beste hjernar let seg bruke i utvikling av eit øydeleggingsvåpen av heilt nye dimensjonar. Nå kunne heile menneskeslekta, og kanskje alt liv på jorda utryddast. Igjen var det kombinasjonen av framstående kunnskap, avansert teknologi og maktapparatet som gjorde dette mogeleg. Mange vil med god grunn stille seg spørsmålet: Er så avansert kunnskap likevel av det vonde?

Naturvitskapen både på dette området og i til dømes moderne genmanipulering står direkte andsynes grunnleggande spørsmål om etiske grenser for kunnskapen sjølv, og for bruken av dei metodar naturvitskapen nyttar.

Med bakgrunn i desse hendingane er det ikkje lenger mogeleg for spesialisten, fysikaren til dømes, å isolere seg i sitt laboratorium og påstå at arbeidet hans er verdinøytralt. Ho og han må sjølv vere reie til å ta standpunkt om dei etiske sidene ved

forskinga. Dette er spørsmål som tvingar seg fram i stadig fleire samanhengar. Miljøspørsmål av mange slag er i fokus. Men endå meir påtrengande blir det når det gjeld å endre menneskelege arveeigenskapar, eller å utslette vår rase.

Med tanke på den innverknad teknologien har på vårt levesett og vårt livsmiljø, vil forskaren sitt ansvar kome stadig klarare fram. I våre dagar er det blitt ei politisk sak, nærmast mote, å styre forskingsinnsatsen ved å definere nasjonale innsatsområde. Forskinga blir eit politisk instrument for å auke produktiviteten. Dette kan vere bra for å utnytte ressursane best mogleg. Men det legg samstundes eit stadig større ansvar på politikarane til å orientere seg og bli kjende med kva forskning er, og kva den kan utrette og ikkje. Skal det bli tilfelle, må styresmaktene interessere seg for naturvitskap på ein heilt annan måte enn hittil. Det manglar mykje på at forskarar og politikarar har tilstrekkeleg kontakt i vårt land i dag. Utan at denne situasjonen blir betra, vil sjansane for feilprioriteringar vere store. Utan at denne kontakten blir styrkt, er det mange som vil sjå den framtidige teknologiske utviklinga i møte med stor uro, både i vårt land og ute i den store verda.

Den som fylgjer med i det rivande tempoet i moderne fysikk og teknologi, kan ikkje unngå å stille seg spørsmålet om korleis dette skal ende. Høgt industrialiserte land som Japan baserer sin teknologi på stadig meir avansert forskning. Skal andre land henge med i kappløpet, må dei gjere det same. Den overordna styringa av denne situasjonen blir ei oppgåve av første rang i alle industrialiserte land. Ikkje minst vil gapet mellom nord og sør kunne auke når den tredje verda ikkje klarar å ta igjen forspranget, eller å henge med i kappløpet mellom forskar-laboratoria i dei høgt industrialiserte landa. Sidan økonomisk makt i dag er så nært knytt til naturvitskapleg og teknologisk nivå, kan den 3. verda stå framfor eit nytt kompetanse-gap som er like alvorleg som det imperiemaktene let etter seg. Å hevde seg økonomisk ved hundreårskiftet utan ei sterk forskning og høg teknologi, kan bli den 3. verda sitt aller største problem. Med Japan i brodden er ein ny økonomisk imperialism på framsteg: Maktmiddelet er ikkje lenger våpena, men forskarkompetanse.

Gjennom den teknologiske, industrielle, og politiske utviklinga i vårt hundreår, og særleg i etterkrigstida, har behovet for globale synsmåtar på utviklinga kome stadig meir i framgrunnen. I naturvitskap ser ein eit parallelt behov for å sjå naturen og naturvitskap under samlande synsvinkel. Fysikken med si fokusering på det fundamentale og allmenngyldige er nettopp ein framifrå reiskap til dette. ■

Elektrisk dipolmoment for elementærpartiklar

Eit elektrisk dipolmoment for ein elementærpartikkel er ofte kalla ein seismograf eller «smoking gun» for ny, supplerande fysikk utover Standard-Modellen i elementærpartikkel-fysikk. I denne artikkelen vil eg prøve å fortelje kva det er. Om ein finn eit slikt elektrisk dipolmoment kan det seia noko om assymetrien mellom materie og anti-materie i universet.

Jan Olav Eg professor emeritus, Fysisk institutt, UiO

Magnetisk dipol er eit kjend omgrep i fysikken. Magnetnåla i kompasset er vel det mest kjende dømet. Når me av medisinske grunnar tek ei «MR-prøve» er det dei atomære og molekylære magnetiske momenta i kroppen vår som er i spel.

I kvantemekanikk er det slik at det magnetiske momentet til ein partikkel er proporsjonalt med spinnet til partikkelen. Når det gjeld det elektriske dipolmomentet, så vil ei assymetrisk ladningsfordeling, som til dømes assymetriske molekyl, ha eit elektrisk dipolmoment. Men som me skal sjå lengjer ned i teksta kan ikkje ein elementærpartikkel ha eit elektrisk dipolmoment med mindre speglings-symmetri og tidsreversjons-symmetri er brotne. Eksistensen av magnetiske dipolmoment for elementærpartiklar er derimot i samsvar med desse diskrete symmetriane.

Nedanfor vil eg gjera greie for korleis eit elektrisk dipolmoment for ein elementærpartikkel kan eksistere og forklårast innanfor moderne partikkelfysikk, ofte kalla Standard-Modellen, forkorta SM.

Dipolar i elektromagnetiske felt

Det magnetiske momentet til ein elementærpartikkel er gjeven ved

$$\vec{\mu} = \mu \cdot \frac{\vec{S}}{S}; \quad \mu = \frac{eg}{2m}, \quad (1)$$

der e er den elektriske ladninga, m er massen til partikkelen, g er den gyromagnetiske faktoren, og \vec{S} er spinnvektoren. For eit elektron er spinnet $S = \hbar/2$, og den gyromagnetiske faktoren ein finn i relativistisk kvantemekanikk lik 2. Men når ein tek omsyn

til kvantefluktuasjonar innanfor kvante-elektrodynamikk blir

$$g_e = 2 + \frac{\alpha_{em}}{\pi}, \quad (2)$$

der $\alpha_{em} \approx 1/137$ er den elektromagnetiske finstrukturkonstanten. For nukleona proton (p) og nøytron (n) som er sett saman av dei meir fundamentale kvarkane er $\mu_p = 2,79$ og $\mu_n = -1,91$ målt i kjernemagneton ($\mu_N = e\hbar/2m_p$ der m_p er protonmassen).

Energien til eit magnetisk dipolmoment i eit magnetfelt \vec{B} er

$$-\vec{\mu} \cdot \vec{B}, \quad (3)$$

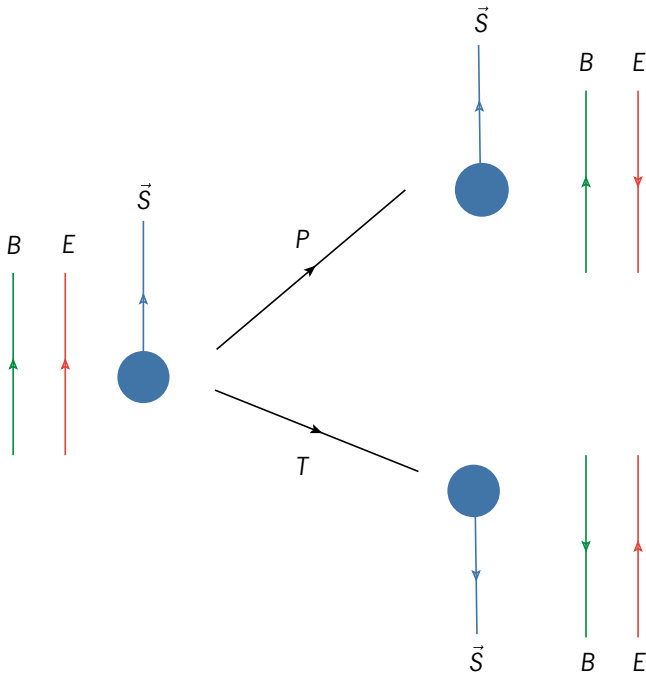
som også er uttrykk for vekselverknaden mellom dipolmomentet og magnetfeltet.

Tilsvarende (3) blir energien og vekselverknaden med eit elektrisk felt \vec{E} lik

$$-\vec{d} \cdot \vec{E}, \quad (4)$$

der $\vec{d} = d \cdot \vec{S}/S$ er det elektriske dipolmomentet.

Me har lært at det elektriske dipolmomentet er gjeve ved integralet av radiusvektor ganger ladningstettleiken over ei ladningsfordeling. Dette er ein polar (ekte) vektor. Men for ein elementærpartikkel som er utan utstrekning er det ikkje slik, og det elektriske dipolmomentet er proporsjonalt med spinnet, som er ein psevdovektor (axial vector). Men kan vekselverknaden (4) vera i samsvar med gjeldane fysiske lover for elementærpartiklar, og med gjeldande symmetriar i naturen? For å få greie på



Figur 1. Skjematisk bilete av spegling (paritet, P) og tidsreversjon (T) av spinn for ein partikkel (mørkeblått), magnetfelt (B , i grønt) og elektrisk felt (E , i raudt).

dette må me sjå nærare på korleis fysiske storleikar oppfører seg ved diskrete transformasjonar som spegling og tidsreversjon.

Speglings- og tidsreversjons-symmetri

For speglings-symmetri (paritets-symmetri) brukar me bokstaven P , og for tidsreversjons-symmetri bokstaven T . Me må veta kva som skjer med dei viktige fysiske storleikane for ein elementærpartikkel ved desse transformasjonane. Storleikane er for det fyrste dei polare (ekte) vektorane posisjon \vec{r} og driv $\vec{p} = m\vec{v}$ (ofte kalla rørslemengd eller bevegelsesmengde), der m er massen og $\vec{v} = d\vec{r}/dt$ er farten. Vidare gjeld det psevdovektorane drivmoment (banespinn) $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ og spinn (eigenspin) \vec{S} . Totalspinnet er $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$. (For definisjon av viktige omgrep, sjå ref. [1].)

Me må også veta korleis det elektriske feltet \vec{E} og det magnetiske feltet \vec{B} oppfører seg ved spegling og tidsreversjon. Me veit at dei elektromagnetiske felte kan avleiest frå eit skalart potensial Φ og eit vektorpotensial \vec{A} slik at:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi + \frac{\partial\vec{A}}{\partial t} \quad \text{og} \quad \vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}. \quad (5)$$

Spegling:

Ved ei spegling har vi transformasjonane:

$$\vec{r} \rightarrow -\vec{r}, \quad \vec{p} \rightarrow -\vec{p}, \quad \vec{L} \rightarrow +\vec{L}, \quad \vec{S} \rightarrow +\vec{S}. \quad (6)$$

Fordi gradientoperatoren $\vec{\nabla}$ endrar teikn ved spegling får me for dei elektromagnetiske felte:

$$\Phi \rightarrow +\Phi, \quad \vec{A} \rightarrow -\vec{A}, \quad \vec{E} \rightarrow -\vec{E}, \quad \vec{B} \rightarrow +\vec{B}. \quad (7)$$

Dette er i samsvar med transformasjonen for krafta på ein elektrisk partikkel

$$\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \rightarrow -\vec{F}. \quad (8)$$

Tidsreversjon:

Ved tidsreversjon vil per definisjon $t \rightarrow -t$ og me har vidare

$$\begin{aligned} \vec{r} &\rightarrow +\vec{r}, \quad \vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \rightarrow -\vec{v} \\ \Rightarrow \vec{p} &\rightarrow -\vec{p}, \quad \vec{L} \rightarrow -\vec{L}, \quad \vec{S} \rightarrow -\vec{S}. \end{aligned} \quad (9)$$

Legg merke til at \vec{S} må transformere som \vec{L} . For dei elektromagnetiske felte blir

$$\Phi \rightarrow +\Phi, \quad \vec{A} \rightarrow -\vec{A}, \quad \vec{E} \rightarrow +\vec{E}, \quad \vec{B} \rightarrow -\vec{B}. \quad (10)$$

Dette er i samsvar med transformasjonen for krafta på ein elektrisk partikkel

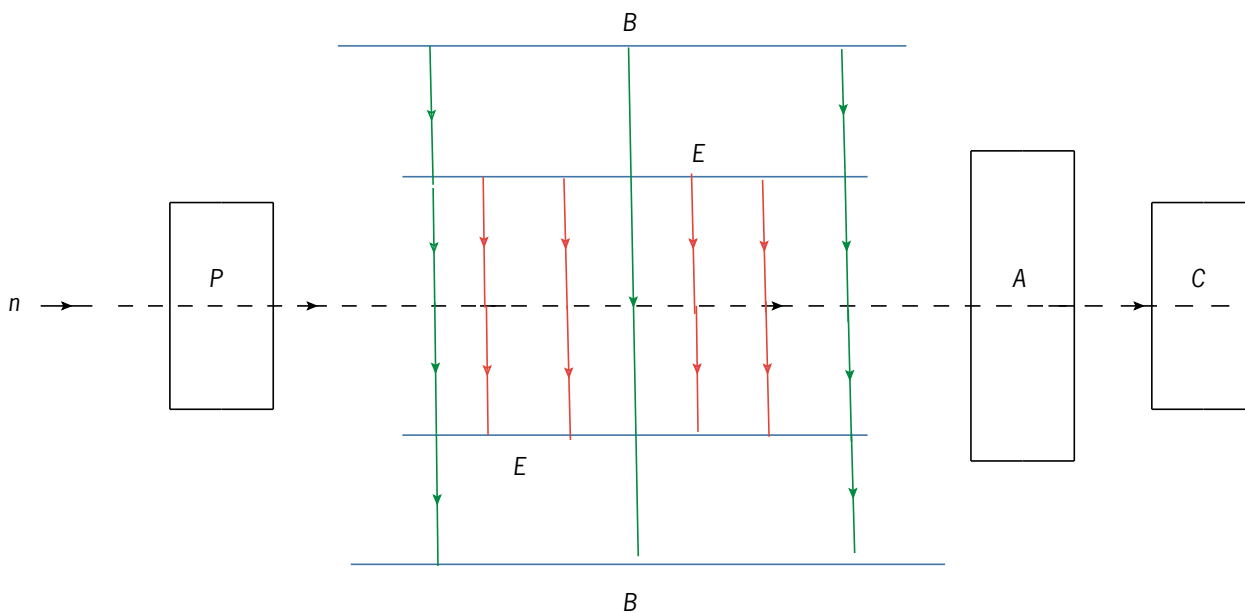
$$\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \rightarrow +\vec{F} = m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}. \quad (11)$$

Me ser no at den magnetiske vekselverknaden i (3) er invariant under spegling (paritets-transformasjon) gjeven i (6) og (7). Vidare er den magnetiske vekselverknaden (3) også invariant ved tidsreversjon gjeven ved likningane (9) og (10).

MEN: Den elektriske dipol-vekselverknaden i likninga (4) skiftar teikn både ved spegling og ved tidsreversjon. Eller sagt med andre ord: Den elektriske vekselverknaden (4) for ein fundamental (elementær) partikkel bryt både speglings-symmetri P og tidsreversjons-symmetri T !

No er det slik at innanfor elementærpartikkel- ▶

► Elektrisk dipolmoment for elementærpartiklar



Figur 2. Ei svært forenkla framstilling av eit mogleg eksperiment for nEDM. Boksen *P* er ein spin-polarisator, boksen *A* ein analytator og boksen *C* er ein nøytron-teljar. Nøytrona kjem inn frå venstre og held fram langs den stipla linja. Magnetfeltet (grøne liner) går loddrett frå øvste horisontale plate (*B*) til nedste horisontale plate (*E*). Det elektriske feltet (raude liner) går loddrett frå nest øvste plate (*E*) til nest nedste plate (*E*).

fysikk tek me også omsyn til ladningskonjugasjon, symbolisert ved *C*, det vil seia at alle partiklar bytast ut med dei tilsvarande anti-partiklane. Då vil kombinasjonen av alle dei tre diskrete transformasjonane, det vil seia *CPT*, alltid vera ein gyldig symmetri. (Dette er *CPT*-teoremet, som all kvantefysikk byggjer på.) Me veit at det finst prosessar i naturen (elementærpartikkel-fysikken) som bryt med den kombinerte symmetrien *CP*. Dermed vil også *T*-symmetri vera broten på ein slik måte at *CPT* er bevart. Då kan ein elementær-partikkel også kunne ha eit elektrisk dipolmoment (EDM), og vekselverknaden i (4) vil vera lovleg.

Slike *CP*- og dermed *T*-brytande vekselverknader hender berre i veik vekselverknad. Finst det eit slikt EDM? Kor stort er det eventuelt, og kor stort er det teoretisk innanfor Standard-Modellen (SM)? Dette har folk rekna på. Og: Det er også klårt at dersom ein finn eit elektrisk dipolmoment (EDM) for ein elementærpartikkel større enn det ein kan rekne ut innanfor SM, så må SM supplerast med «Ny fysikk».

Målingar av elektrisk diipolmoment

Fysikarar har gjort målingar på det elektriske dipolmomentet til elektronet. Men det lettaste er å gjera målingar på nøytronet fordi dette er elektrisk nøytralt. Under eksperimentet er nøytrona i parallelle og anti-parallelle magnetiske og elektriske felt, og fysikarane målar Larmor-frekvensen ν for nøytron-spinnet. Slike målingar har fysikarar drive på med sidan tidleg i 1950-åra, og målingane held fram. Fleire kjende institutt har halde på med

slike eksperiment. Til dømes grupper ved Institut Laue-Langevin (ILL) i Grenoble [2,3], Paul-Scherrer Institute (PSI) [4,5] og TRIUMF [6,7]. Ved PSI i Viligen i Sveits har til dømes 90 fysikarar, i hovudsak frå Europa, teke del i eksperimenta. Ved TRIUMF i Canada arbeider ca. 50 fysikarar, hovudsakleg frå Nord-Amerika og Japan.

Medan eksperimenta ved CERN har utstyr som kan målast i kilometer, blir utstyret til EDM-eksperimenta for nøytrona (nEDM) målt i meter. På fleip er det sagt at eksperimenta kan gjerast «på kjøkken-benken», men litt større er det. For parallelle magnetiske og elektriske felt får ein likninga:

$$h\nu = 2\mu_n B + 2d_n E. \quad (12)$$

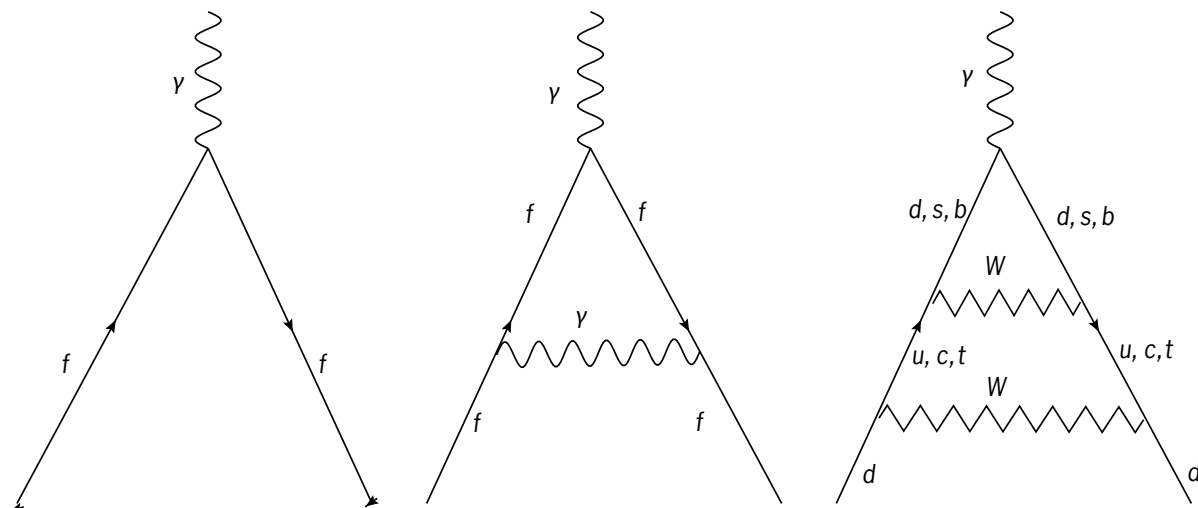
For anti-parallelle felt har ein tilsvarande ein Larmor-frekvens $\nu_a = \nu - \Delta\nu$:

$$h(\nu - \Delta\nu) = 2\mu_n B - 2d_n E. \quad (13)$$

Magnetfeltet kan no eliminerast frå desse likningane og me finn dipolmomentet nEDM :

$$d_n = \frac{h\Delta\nu}{4E}. \quad (14)$$

Dette ser enkelt ut, men i praksis er eksperimenta kompliserte. Til dømes er det ei stor utfordring å halde magnetfeltet stabilt og nøyaktig det same over lengre tidsrom for både parallelle og antiparallele elektriske felt. Om magnetfeltet er $B + \delta B$ i likninga (13), så blir den enkle likninga (14) for-



Figur 3. Diagram for magnetisk og elektrisk dipolmoment. Til venstre den elementære elektromagnetiske vekselverknaden. Heiltrukne liner svarer til eit fermion/elektron og den loddrette bylgja lina til utveksling av eit foton. Her svarar denne foton-lina til vekselverknaden med det elektromagnetiske feltet. I midten eit diagram med utveksling av eitt foton som gjev eit tillegg til den gyromagnetiske faktoren. Til høgre eit bidrag til EDM for ein d-kvark ved utveksling av to W-boson. Som vist på figuren inneheld dette diagrammet alle dei seks kvarktypane: Altså s,b,c,t-kvarkane i tillegg til u- og d-kvarkane som finst permanent i nøytronet.

kludra. Dei fyrste åra vart det bruka nøytronstrålar. Dei siste åra har ein bruka avanserte teknikkar for å kjøle ned nøytrona. Ultrakalde nøytron vert lagra i eit kammer med eit magnetisk felt (ca. ein mikro-Tesla) og eit elektrisk felt (ca. 10 kV/cm) over eit tidsrom på 100 sekund. Ideelt sett burde nøytrona vera heilt i ro, men dette er uråd å få til i praksis. Men ein har fått til at dei har ein liten fart ($v_n < 7$ m/s). Går me til kvilestystemet til nøytronet vil det bli generert små magnetfelt $\sim \vec{v} \times \vec{E}$ som også er eit problem som det må takast omsyn til.

Den eksperimentelle grensa for det elektriske dipolmomentet for nøytronet (forkorta nEDM) er no [4, 5]

$$|d_n/e| < 1,8 \times 10^{-26} \text{ cm}, \quad (15)$$

som er ein svært liten storleik som svarer til $\sim 2 \times 10^{-12}$ kjernemagneton.

Målingane som starta i 1950 ga ei øvre grense $|d_n/e| < 5 \times 10^{-20}$ cm. Då eg sjølv arbeidde med teori for nEDM i byrjinga av 1980-åra var grensa $|d_n/e| < 6 \times 10^{-25}$ cm. Då eg arbeidde med dette i åra 2012–2019 var grensa senka til $2,9 \times 10^{-26}$ cm, så det er stadige betringar eksperimentelt, men det går langsamt.

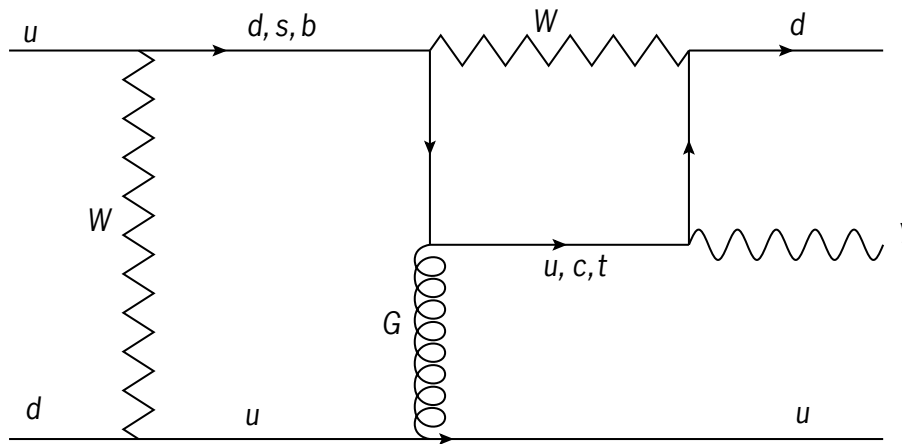
I dei eksperimentelle artiklane som er nemnde her finst fleire detaljar og figurar som det blir for teknisk å ta med her.

Teori for Elektrisk dipol (EDM)

I kvante-feltteori finst ein del storleikar i dei fundamentale dynamiske likningane. Her studerer me

kvante-fluktuasjonar, det vil seia at partiklar oppstår spontant og forsvinn. I slike kvante-fluktuasjonar kan me finne korreksjonar til nokre storleikar, slik som til dømes magnetisk moment. Andre storleikar, som elektriske dipolmoment (EDM) finst ikkje i dei fundamentale dynamiske likningane i Standard-Modellen, og kan berre oppstå gjennom kvante-fluktuasjonar. I kvante-feltteori blir storleikar og prosessar illustrerte ved så kalla Feynman-diagram. I Figur 3 svarer det enkle diagrammet til venstre til den fundamentale elementære vekselverknaden mellom elektron og foton i kvante-elektrodynamikk. Dette gjeld også om elektronet bytast ut med andre elektrisk ladde fermion (lepton og kvarkar). Dersom me kombinerer (hektar saman) fleire slike kan me illustrere ulike kvantefysiske prosessar. I kvante-elektrodynamikk (QED) tolkar ein dei heile linene som eit elektron (fermion) og den bylgja lina som eit foton. I diagrammet i midten er det i tillegg utveksling av ei foton-line (den horisontale bylgja lina i diagrammet). I ikkje-relativistisk kvantemekanikk (Schrödinger-teori) vil denne foton-lina svare til eit Coulomb-potensial. Dette diagrammet gjev det vesle tillegget $\approx \alpha_{em}$ i likninga (2) til den gyromagnetiske faktoren g_e . Legg merke til at diagrammet i midten kan koma fram ved å hekte saman tre elementære vekselverknader der fermionliner er dregne saman på to plassar og fotonliner er dregne saman mellom to fermionliner. Slik er det også når me kjem til svak og sterk vekselverknad. Folk, som oftast fysikarar og andre interesserte, kan more seg med å kombinere og hekte saman slike elementære vekselverknader som puslespel. Slik kan

► Elektrisk dipolmoment for elementærpartiklar



Figur 4. Diagram for samspel mellom ein u - og ein d -kvark inni nøytonet, det vil seia prosessen $ud \rightarrow duy$ i nøytronet. Den krølla lina symboliserer utveksling av eit gluon, og den vassrette (utgåande) foton-lina (γ) symboliserer vekselverknaden med det elektromagnetiske feltet. Også her er det bidrag frå alle dei seks kvark-typane i denne kvantefluktuasjonen.

me finne ut kva for prosessar som er moglege. Og den generelle regelen er at jo meir komplisert eit diagram er, dess mindre sannsynleg er den tilsvarende (del-)prosessen. Diagrammet til høgre er eit bidrag til eit elektrisk dipolmoment som me kjem til nedanfor i *veik* vekselverknad.

Teorien for EDM er det gjort greie for i revy-artiklane [8,9]. For å finne eit bidrag til nEDM i Standard-Modellen må ein gå til diagram som har CP -brytande effektar. Dette finnst berre i *veik* vekselverknad, ved utveksling av (elektrisk ladde) W -boson mellom tunge kvarkar. I ikkje-relativistisk kvantemekanikk, vil utveksling av eit W -boson svare til eit Yukawa-potensial med stutt rekkevidde fordi W -bosonet er tungt.

Diagrammet heilt til høgre i Figur 3 svarer til eit EDM for ein d -kvark (tilsvarende for ein u -kvark finst også) dersom den horisontale fotonlina (sjå diagrammet i midten) vert bytt ut med eit W -boson. Men dette er ikkje tilstrekkeleg. Det viser seg at for å få eit diagram for EDM for ein kvark trengst utveksling av to W -boson. I tillegg må diagrammet innehalde alle dei 6 kvarktypane, som vist til høgre i Figur 3. I tillegg trengst utveksling av eit *gluon*, som er bosonet for sterk vekselverknad (kvante-kromodynamikk, QCD).

Vidare må me ta omsyn til andre typar diagram [10] med samspel av fleire (u - og d) kvarkar inni nøytronet som vist i Figur 4.

For å gjera det endå meire komplisert finst det også eit CP -brytande ledd i QCD.

Innanfor Standard-Modellen er det vanleg å oppgjje verdiar som

$$|d_n/e| \simeq 10^{-32} \text{ til } 10^{-31} \text{ cm.} \quad (16)$$

Konklusjon

Eit elektrisk dipolmoment for ein elementærpartikkel er ein svært liten storleik. Men verdien av denne er svært viktig fordi han kan fortelje noko om CP -brotet i universet, eller sagt med andre ord: kvifor me ser (nesten) berre materie i universet. Den er veldig viktig også fordi den eksperimentelle øvre grensa i (15) kan utelukke ein del hypotetiske teoriar som kan vera aktuelle som supplement til Standard-Modellen.

Om ein elementærpartikkel har eit elektrisk dipolmoment større enn det ein kan rekne ut innanfor SM for partikkelfysikk, så vil dette vera eit signal om «*Ny fysikk*» i form av eksistensen av nye partiklar eller nye krefter me hittil ikkje har observert. Det elektriske dipolmomentet for elementærpartiklar spelar dermed ei svært viktig rolle i elementærpartikkel-fysikken. ■

Referansar

- [1] C. Angell og B.E. Lian. *Fysiske størrelser og enheter*. 5. utgave. Universitetsforlaget (2009), s. 42 og 71.
- [2] D. Wurm, et al. (ILL-collaboration). EPJ Web Conf, **219** (2019), 02006. [eprint/1911.0916].
- [3] G. Pignol. IUPAP WG. 9 Nuclear Science Symposium. [hep-ph/1912.07876].
- [4] C. Abel et al. (PSI coloboration). Phys. Rev. Lett. **124** (2020) 081803, [hep-ex/2001.11966].
- [5] G. Pignol og P. Schmidt-Wellenburg. SciPost Phys. Proc. **5** (2021) 027 [hep-ex/2103.01898].
- [6] J.W. Martin. J. Phys. Conf. Ser. **1643** (2020), 012002.
- [7] R. Matsumiya et al. (TUCAN/TRIUMF) collaboration). JPS Conf. Proc. **37** (2022), 020701. [e-print/2207.09880].
- [8] Shahida Dar. [eprint: hep-ph/0008248].
- [9] M. Pospelov og A. Ritz. Annals Phys. **318** (2005), 119 [hep-ph/0504231].
- [10] J.O. Eeg og I. Picek. Nucl. Phys. B **244** (1984), 77.

Lyden av pengar: Ultralydmåling av naturgass

Eivind Nag Mosland Ph.D.-kandidat, Institutt for fysikk og teknologi, UiB

Kvar dag pumpar vi opp store mengder naturgass, prosesserer den, og sender den i milelange røyrleidningar til Storbritannia og EU. Verdiane er enorme – i løpet av eit år eksporterer vi naturgass for hundrevis av milliardar kroner. Staten skal ha sitt, men korleis vert resten fordelt?

Allokeringsmåling på havbotnen

Allokering er å bestemme kor stor del av potten kvart enkelt selskap skal ha, ut frå kven som har produsert kva og kor mykje. Det er sjeldan enkelt, for gassen kjem frå forskjellige brønnar i forskjellige felt og vert blanda saman før den blir seld til utlandet. I tillegg har brønnane gjerne fleire ulike eigarar, og same selskap kan ha eigarandelar i mange ulike brønnar.

Energimengda ligg oftast til grunn for allokeringa. Den kan til dømes reknast ut frå energistraumen, som ein finn med å multiplisere volumstraumen, ved standard trykk og temperatur, med brennverdien til gassen. Det finst reglar for korleis dette skal gjerast og kor nøyaktige målingane må vere, konkretisert som maksimalt tillatne måleusikkerheit. Dette klarar ein greitt å halde seg innafor når ein målar med avansert utstyr på plattformer og på

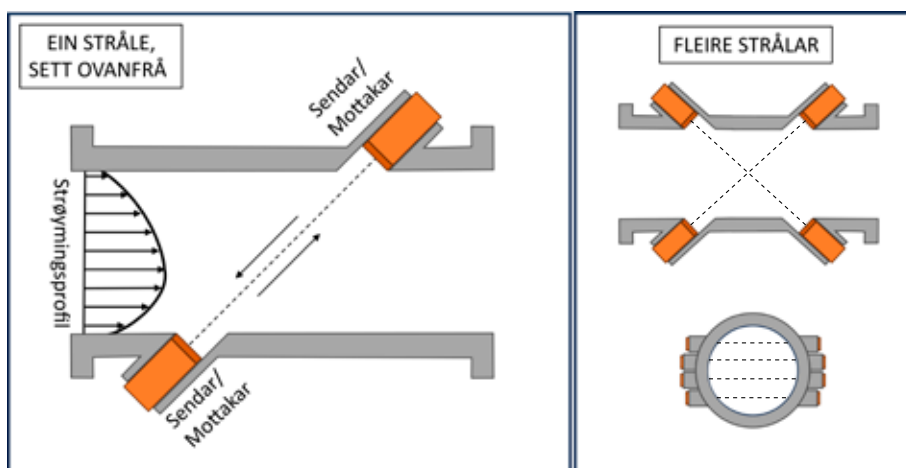
land, men det vert mykje meir utfordrande om ein vil gjere målingane nede på havbotnen (ofte kalla «subsea»). Ein av grunnane til det er at måleutstyret som vanlegvis vert brukt til å finne brennverdien – ein gasskromatograf – er vanskeleg å tilpasse til bruk på havbotnen.

Alternativ metode for allokeringsmåling

Ein alternativ metodikk for nøyaktig måling av energimengda til gass-straumen i røyrleidningar på havbotnen er basert på ultralyd strøymingsmåling av volumstraumen, og kunnskap om samanhengen mellom lydfarten i gassen og brennverdien. Sjølve metodikken er ikkje ny, men for bruk til allokering treng vi å forbetre framgangsmåten og å dokumentere sporbare måleusikkerheit i samsvar med krava frå myndigheitene. Ved Universitetet i Bergen arbeidar vi saman med forskarar frå NORCE og Høgskulen på Vestlandet for å få på plass det vitskaplege grunnlaget for dette.

Ultralyd som målevertøy

Ultralyd strøymingsmåling er ein robust og nøyaktig teknologi som er mykje brukt på land og på plattformer. Industrien arbeidar med å vidareut-



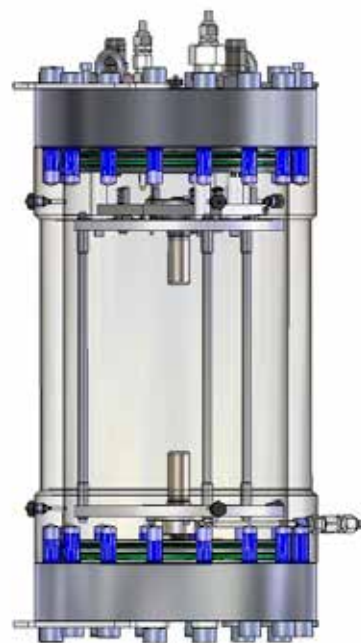
Figur 1. Skjematisk framstilling av ultralyd strøymingsmålarar med éin og fleire strålar.



Figur 2. KI-generert bilde av ein ultralyd strøymingsmålar.

vikle teknologien til bruk på havbotnen. I ein slik målar vert ultralydsignal sendt på skrå med og mot gasstraumen, mellom ein sendar og ein mottakar som er fastmontert på kvar si side i røyrveggen, som vist skjematisk i Figur 1. Lydbølgjene som går med gass-straumen brukar litt kortare tid enn dei som går mot straumen, og ut frå denne tidsforskjellen reknar vi ut den gjennomsnittlege farten til gass-straumen. For å få nøyaktige målingar av volumstraumen vert måledata frå fleire sendar-mottakar-par kombinert med tverrsnittsarealet til røyrret og kjennskap til korleis gassen beveger seg med ulik hastigheit i ulike delar av røyrret, som at den beveger seg treigare nær veggenn enn mot midten av røyrret. Figur 2 viser ein KI-generert illustrasjon av korleis ein slik målar kan sjå ut.

I tillegg til å måle volumstraumen gjev ultralydmålaren ut den målte lydfarten, altså kor raskt lyden beveger seg i gassen. Dette er avgjerande for den alternative metoden for allokeringmåling av energistraumen. Metodikken går ut på å samanlikne den målte lydfarten, trykket og temperaturen i gass-straumen med ein modell for lydfart i naturgass. Med utgangspunkt i ei typisk gass-samansetning for brønne kan vi bruke ein iterativ metode for å finne når den modellerte lydfarten er lik den målte lydfarten. Deretter brukar vi denne informasjonen til å rekne oss fram til energistraumen.



Figur 3. Prototypedesign for målecelle for lydshastigheit i naturgass. Illustrasjon: Lunde mfl., 2007

Nøyaktige lydfartsmålingar

For å redusere og dokumentere metodikken sin totale målesikkerheit må lydfartsmålingane kalibrerast opp mot ein nøyaktig referanse. Målet er at referanselydfartsmålingane skal ha ein sporbar usikkerheit på ned mot 0,02 %. Det er viktig å utføre kalibreringa på den frekvensen ultralydmålaren brukar, typisk ein stad mellom 100 og 300 kHz, sidan lydfarten kan vere ulik ved ulike frekvensar.

For dette frekvensområdet finst det ikkje nøyaktige nok referanseinstrument i dag, og vi arbeidar difor med eit målekammer for måling av lydfarten i naturgass som kan brukast til kalibreringa (sjå Figur 3). Første steg for å få dette til er å få betre kontroll på, og eventuelt forbetre, diffraksjonskorreksjonen som inngår i utrekninga av den målte lydfarten.

Diffraksjon er i denne samanhengen effektane av at lydbølgjene ikkje er plane. I staden spreier bølgjene seg utover på vegen mot mottakaren, litt som bølgjer i vatnet etter du har kasta ein stein uti (sjå Figur 4). Vel framme hjå mottakaren vil lydbølgjene treffe ulike delar av overflata på mottakaren til ulik tid, og gjere at vi målar ei litt anna gangtid enn vi ville gjort dersom alle delane hadde kome samtidig. Diffraksjonskorreksjonen korrigerer for denne feilen i gangtida, og for tilhøyrande effektar knytt til utsendinga av lyden.



Figur 4. Bølger i vatn.

I dag vert diffraksjonskorreksjonen rekna ut med forenkla modellar for sending og mottak, der ein mellom anna antar at sendaren er eit flatt, stivt stempel. I røynda er både sendaren og mottakaren mykje meir komplekse. For å beskrive sendaren og mottakaren meir realistisk enn det dei forenkla modellane klarar, brukar vi i vårt arbeid avanserte matematisk-numeriske simuleringssmodellar.

Lovande resultat og vegen vidare

Samanlikning med målingar tyder på at vår avanserte modell for diffraksjonskorreksjon stemmer betre med røynda enn det dei forenkla modellane gjer. For vårt bruksområde viser resultatane at avviket mellom dei forenkla og den avanserte modellen for diffraksjonskorreksjon kan vere betydeleg. I tillegg ser vi at avviket varierer mykje, til dømes avhengig av kva avstandar og frekvensar som vert brukt, og korleis sendaren og mottakaren vibrerer.

Det står framleis att ein god del før vi kan bruke ultralydmålarar på havbotnen til allokering, men den nyleg publiserte diffraksjonskorreksjonsmodellen er eit viktig steg på vegen. Ein slik modell gjev oss ei betre forståing av samspelet mellom sendaren, mediet og mottakaren, og er nødvendig for nøyaktig allokeringssmåling av energistraumen med sporbar usikkerheit. Truleg kan den nye

diffraksjonskorreksjonsmodellen også bidra til meir nøyaktige målingar innanfor medisinsk ultralyd og andre områder. ■

Tilhøyrande litteratur

- P. Lunde og M. Vestrheim. «Precision sound velocity cell for natural gas at high pressure. Phase 1 – feasibility study.» CMR-rapport nr. CMR-98-A10039, Christian Michelsen Research AS, Bergen (1998).
- P. Norli. «Sound velocity cell for gas characterization.» Ph.D.-avhandling. Institutt for Fysikk og Teknologi, Universitetet i Bergen (2007).
- P. Lunde, P. Norli, M. Vestrheim og R. A. Kippersund. «Precision sound velocity cell as reference for gas quality measurement in ultrasonic flow meters.» i Proceedings of the 30th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, 28.–31. januar, Geilo (2007).
- E. N. Mosland, P. Lunde og J. Kocbach. «Finite element-based diffraction correction for piezoelectric transducers accounting for diffraction at transmission, propagation, and reception.» J. Acoust. Soc. Am. 154, 2177-2190 (2023).
- E. N. Mosland, J. Kocbach og P. Lunde. «Near-field diffraction and reception effects in finite element modeling of ultrasound measurement systems for gas: Comparison to measurements in air.» i Proceedings of the 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium, 3.–8. september, Montreal, Canada (2023).

Lomme-lab i fysikk

Smarttelefoner i fysikkundervisning

Rolf Jonas Persson førsteamanuensis, Institutt for fysikk, NTNU

Smarttelefoner er i dag en naturlig del av hverdagen vår – både for den yngre og den eldre generasjonen. Samtidig utgjør de flere problemer i skolehverdagen, siden de for eksempel kan være distraherende. Men med tanke på deres innbygde tekniske muligheter og elevenes dype kjennskap til enhetene, kan bruken av disse være et middel for å berike undervisningen i fysikk, fordi de også kan brukes som eksperimentelle verktøy.

Bakgrunn

Ideen er bruk av et Lomme-lab, noe som er mulig da smarttelefoner er utstyrt med forskjellige interne sensorer som registrerer fysiske data. Disse inkluderer for eksempel mikrofon (lyd) og kamera, akselerometer, sensorer for magnetfeltstyrke, lysstyrkesensorer, et gyroskop, GPS-mottaker og for noen modeller temperatur-, trykk- og fuktighetsensorer. Den opprinnelige grunnen til at sensorene ble installert, var selvfølgelig ikke for å bruke dem til eksperimenter i naturfagundervisning. Akselerasjonssensoren brukes for eksempel til å bestemme enhetens orientering og for å justere skjermen til retningen. Magnetfeltstyrkesensoren brukes som et kompass for å støtte navigering ved hjelp av smarttelefonen eller for å informere brukeren om posisjonsspesifikke miljødata (temperatur, lufttrykk, fuktighet osv.). Imidlertid kan fysiske data registrert av de interne sensorene brukes utover deres faktiske funksjon ved hjelp av apper, slik at både kvalitative

og kvantitative eksperimenter er mulige på tvers av et bredt spekter av fagområder, og spesielt for fysikk.

Smarttelefoner representerer dermed små, bærbare målelaboratorier som kan erstatte eksperimentelle apparater som kan virke forvirrende på elevene. Videre er smarttelefoner godt kjent for elevene. Mange eksperimenter som kan utføres med smarttelefoner, var tidligere bare mulig med støtte fra datamaskiner og eksterne sensorer, og noen av disse var dyre og vanskelige å bruke. I motsetning til dette kan eksperimenter med de interne sensorene til smarttelefoner utføres og evalueres lettere på grunn av den intuitive brukervennligheten til appene, slik at et sterkere fokus på fysisk innhold er mulig.

Bortsett fra at smarttelefoner er teknisk og praktisk egnet for eksperimentell bruk i fysikk, kan en også finne støtte for bruken i læringsteorier. Nær sagt alle elever i videregående skole har, som sagt, god kunnskap både om og bruken av smarttelefoner. Konteksten til et eksperiment med smarttelefon er dermed delvis knyttet til elevenes erfaringsverden. Dette er noe av kjernen i *situert læringsteori* [1,2] som vektlegger at kunnskap er knyttet til den konteksten der den er utviklet og der den blir anvendt [3]. Antagelsen er at, i tillegg til hverdagslig relevans av et emne, har relevansen av mediet (smarttelefonen) som brukes i eksperiment en positiv effekt på læringen (såkalt materiell relevans). Konkret betyr antagelsen at elevenes kognitive og motiverende læringssuksess med hensyn til eksperimenter er større når de under-

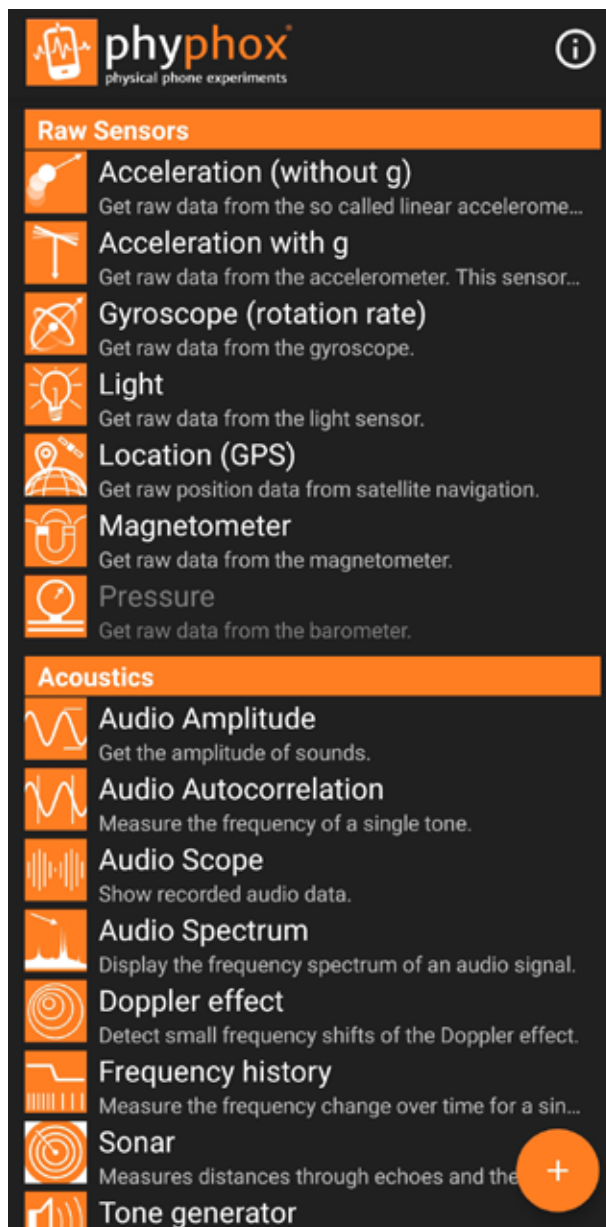
søker et fysisk fenomen med eksperimentelle medier som de bruker i sitt daglige liv [4].

Man kan også anta at elevene får en forbedret opplevelse av autonomi ved bruk av egne smarttelefoner [5, 6]. For eksempel kan de bruke en smarttelefon til å uavhengig registrere en selvvalgt bevegelsesprosess, direkte analysere og evaluere sine «egne» videoer (tatt med egen enhet) ved hjelp av en videoanalyseapp, og gjennomføre lignende eksperimenter med en smarttelefon utenfor skolen.

Siden ideen om å bruke smarttelefoner som eksperimentelle verktøy i klasserommet fortsatt er relativt ny, er det fortsatt knapt noen publiserte funn om effekten av bruken. På fysikkområdet finnes det imidlertid noen studier publisert. En pilotstudie om bruk av smarttelefoneksperimenter i fysikklasser, omhandlet temaet akustikk i videregående skole [4]. I løpet av to uker jobbet klassene i grupper på fire forskjellige læringsstasjoner med eksperimenter i svevinger, lyd, lydfart og lydutbredelse. Innholdet, omfanget og vanskeligheten av forsøkene, samt instruksjonsmaterialene til læringsstasjonene i de to klassene, var identiske og varierte bare i det eksperimentelle materialet (smarttelefon eller PC med sensorer) som ble brukt. Motivasjonen og læringsytelsen til studentene, ble samlet inn direkte før og etter intervensjonen, samt fem uker etter ved hjelp av tester og spørreskjemaer. Det ble funnet vesentlig forskjeller mellom de to gruppene. I gruppen av studenter som jobbet med smarttelefon, var ytelse og deres forventninger til selveffektivitet forbedret og mer stabilt enn i gruppen med konvensjonelle eksperimenter.

I en annen studie ble det undersøkt hvordan bruk av smarttelefoneksperimenter i klassisk mekanikk på videregående nivå hadde for effekter på elevene [7]. I likhet med den foregående studien ble en kvasi-eksperimentell design brukt til å undersøke effekten av smarttelefoner som ble brukt som eksperimentelle verktøy på interesse, nysgjerrighet og læringsutbytte. Elever i smarttelefongruppene viste betydelig høyere interesse for fysikk etter studien. Det var spesielt de elevene i denne gruppen som som var mindre interessert i begynnelsen av studien, som hadde mest utbytte. I tillegg viste elevene i smarttelefongruppene høyere grad av nysgjerrighet. Det ble ikke funnet forskjeller i læringsprestasjoner. Dette betyr at bruk av smarttelefoneksperimenter kan fremme interesse og nysgjerrighet uten å redusere læringsytelsen.

Disse studiene om bruk av smarttelefoner som eksperimentelle verktøy, gir ikke noen generelle overførbare funn. De gir imidlertid indikasjoner på trender og spørsmål som fortsatt er gyldige og som kan undersøkes videre.



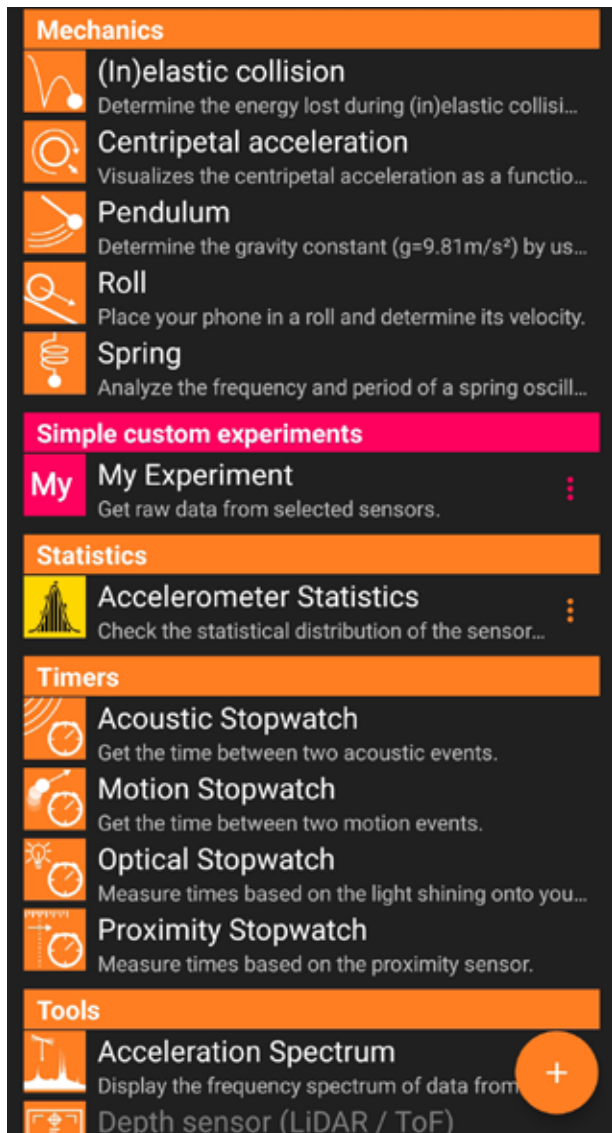
Figur 1. Skjermdump av PhyPhox. Data fra sensorer og målinger i akustikk.

Teknikk og apper

Data fra sensorene i en smarttelefon er mulige å få tilgang til med ulike apper. Mange av disse utnytter en sensor, men det finnes noen som er designede for undervisningsbruk. For eksempel Physics Toolbox by Vieyra Software[8,9] eller PhyPhox [10,11].

I disse appene er brukervennligheten høy og terskelen for bruk lav. Physics Toolbox kommer i en gratisversjon og en Pro-versjon som koster ca. 35 kr. PhyPhox er gratis. Appene er likeverdige og skiller seg bare i ulike detaljer. Jeg foretrekker PhyPhox da den har bedre muligheter å koble smarttelefonen og data til PC eller en Arduino [12] for datainnsamling eller dataoverføring.

Sensorer som finnes i alle smarttelefoner er mikrofon (lyd) og kamera, akselerometer, sensorer for



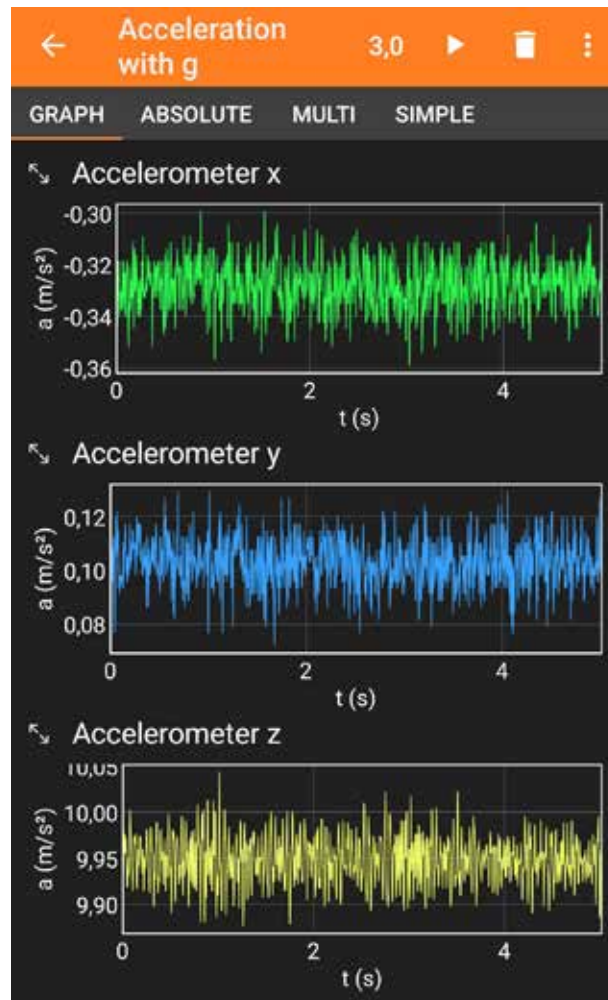
Figur 2. Skjermdump fra PhyPhox. Innbygde eksperimenter og timers.

magnetfeltstyrke, gyroskop og GPS-mottaker. Andre sensorer som kan finnes er temperatur-, trykk- og fuktighetssensorer. Hvilke sensorer som en spesifikk modell har kan være vanskelig å finne. Det enkleste er å installere PhysPhox eller Physics Toolbox for å se hvilke sensorer appene ser. Det finnes en brukerrapportert sensor-database på PhyPhox hjemmeside [11] med informasjon om de ulike sensorenes målområde, oppløsning, innsamlings rate og informasjon om fabrikant, for noen modeller.

Det finnes andre apper, mange som bare bruker en sensor og som kan brukes for ett eksperiment. Her anbefales Odenwalds introduksjon [13] som gir en bra innføring i bruk av smarttelefoner som lomme-lab rettet mot *citizen science* («grasrotforskning»).

Eksempel: Eksperiment

Det finnes mange mulige eksperimenter som kan utføres med smarttelefoner, og det er oftest



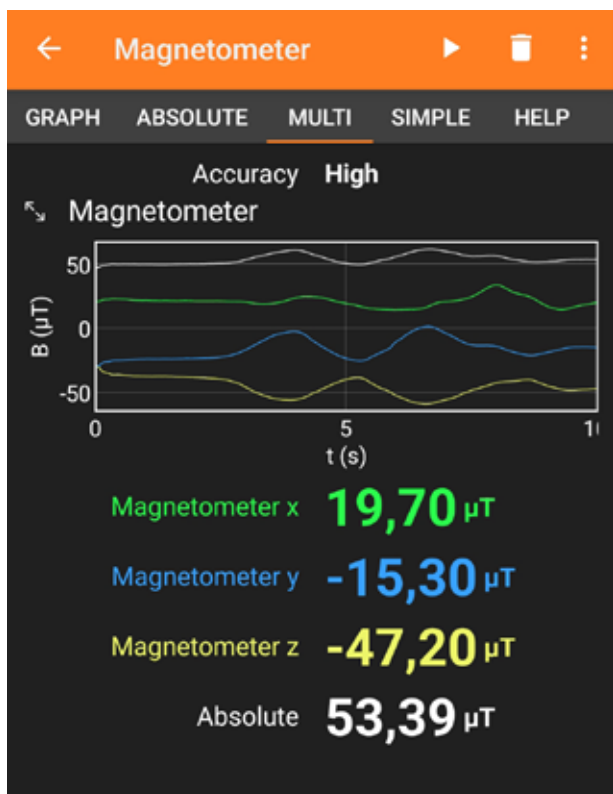
Figur 3. Skjermdump av måling med akselerometer.

fantasien som setter grenser. Her velger jeg å presentere to «prosjekter» som førsteårsstudentene på bachelor i fysikk-utdanningen ved NTNU kan få gjøre under oppstartsuken.

Vi har flere mål med prosjektet, der ett er å gjøre målinger med «enkle» hjelpemidler, planlegge og arbeide i grupper. Studentene får i oppdrag å enten bestemme høyden av Sentralblokk på Gløshaugen kun med sensorene i smarttelefonen (på minst tre ulike måter), eller å bestemme akselerasjonen hos minst tre heiser og ulike faktorer som kan påvirke denne (rettingen på heisens bevegelse, last, antall etasjer osv.) med smarttelefonen.

Høyden kan bestemmes på flere ulike vis. For eksempel bruk av GPS, bruke inklinasjonsensor og bestemme vinkler, bruke trykksensor og måle trykkforskjellen mellom bakken og toppen, ta tiden et fallende objekt tar fra toppen osv. Studentene skal også vurdere feilen i de ulike metodene og gi en så bra verdi som mulig.

Akselerasjonen for en heis kan enkelt bestemmes, men her finnes andre eksperimentelle utfordringer. Smarttelefonen må ligge på gulvet i heisen for å minke målefeilen, samt personen(e) i heisen må



Figur 4. Skjermdump av måling med magnetometer og smarttelefonen i bevegelse.

stå i ro for å ikke forstyrre målingen. Her får studentene både se og kjenne akselerasjonen, hvilket gir en dypere forståelse.

Erfaringer

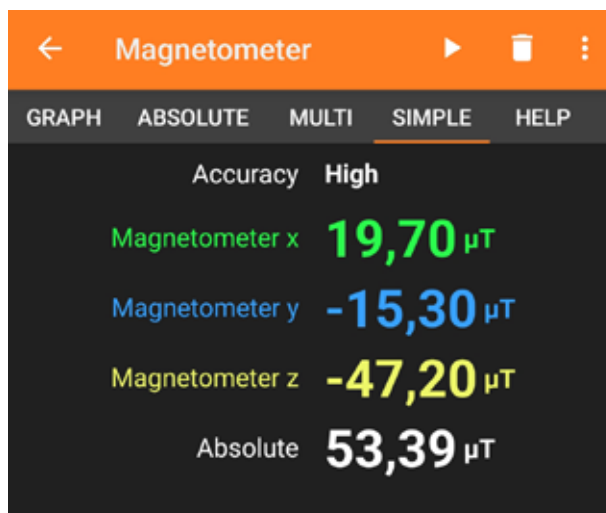
Prosjektene har vært gjort i tre år og er tatt vel imot av studentene. Resultatene er ikke så viktige, men kommer nær høyden av sentralblokk, samtidig som studentene kan se at GPS ikke gir god oppløsning i vertikal retning. For akselerasjonen så er det en forskjell om heisen går opp eller ned, samt at det er forskjell mellom ulike heiser.

En fordel med bruk av smarttelefoner, er at man ikke er bundet til en lab-sal, men kan gjøre eksperiment hvor man er. Eksperimenter kan også gjøres hjemme da stort sett alle har en smarttelefon.

Ved Institutt for fysikk ved NTNU arbeider vi med å utvikle vårt tilbud av laboratoriearbeid med bruk av smarttelefoner på avansert nivå, samtidig som vi ønsker å utvikle eksperimentelle prosjekt for videregående skoler og ungdomsskoler. ■

Referanser

- [1] Greeno, J.G., Smith, D.R. og Moore, J.L. «Transfer of situated learning». Dettermann, D.K., Sternberg, R.J. (eds.) *Transfer on Trial: Intelligence, Cognition and Instruction*, s. 99–167. Ablex, Norwood, NJ (1993).
- [2] Gruber, H., Law, L.-C., Mandl, H. og Renkl, A.



Figur 5. Skjermdump av måling med magnetometer. Numeriske verdier.

- «Situating learning and transfer». Reimann, P. og Spada, H. (red.) *Learning in Humans and Machines: Towards an Interdisciplinary Learning Science*, s. 168–188. Pergamon, Oxford (1995).
- [3] Kuhn, J., Müller, A., Müller, W. og Vogt, P. «Kontextorientierter Physikunterricht: Konzeptionen, Theorien und Forschung zu Motivation und Lernen». *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*. 59(5), 13–25 (2010).
- [4] Kuhn, J. og Vogt, P. «Smartphone & Co. in physics education: Effects of learning with new media experimental tools in acoustics». Schnotz, W., Kauertz, A., Ludwig, H., Müller, A. og Pretsch, J. (red.) *Multidisciplinary Research on Teaching and Learning*, s. 253–269. Palgrave Macmillan, Basingstoke, UK (2015).
- [5] Ryan, R.M. og Deci, E.L. «Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being». *Am. Psychoanal.* 55, 68–78 (2000).
- [6] Ryan, R.M. og Deci, E.L. «Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions». *Contemp. Educ. Psychol.* 25, 54–67 (2000).
- [7] Hochberg, K., Kuhn, J. og Müller, A. «Using Smartphones as experimental tools – effects on interest, curiosity and learning in physics education». *J. Sci. Educ. Technol.* 27(5), s. 385–403 (2018).
- [8] Vieyra, R. et al. «Turn your smartphone into a science laboratory». *Sci. Teach.* 82, s. 32–40 (2018).
- [9] www.vieyrasoftware.net
- [10] Staacks, S., Hütz, S., Heinke, H. og Stampfer, C. «Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox». *Physics Education*, 53 (4), 045009, (2018).
- [11] <https://phyphox.org/>
- [12] <https://www.arduino.cc/>
- [13] Odenwald, S. «Experimenter's guide to smartphone sensors». (2018). <https://spacemath.gsfc.nasa.gov/Sensor/SensorsBook.pdf>



Norsk fysikklærerforening
Norsk Fysisk Selskaps faggruppe for undervisning



Hold av dagene!

Landskonferansen om fysikkundervisning på Sundvolden Hotel 9.–12. august 2024

Kjære kolleger i fysikkverdenen!

Vi har gleden av å annonsere at neste landskonferanse vil finne sted fra fredag 9. til mandag 12. august 2024 på det idylliske Sundvolden Hotel ved Tyrifjorden. Konferansen arrangeres av Norsk fysikklærerforening i samarbeid med Norsk Fysisk Selskap og våre universitetsmiljøer. Dette er stedet å være for alle som er engasjert i fysikkundervisning!

Målgruppe

Fysikklærere på alle utdanningsnivåer, fra grunnskole til universitet, med et særlig fokus på videregående skole.

Mål for konferansen

- Faglig og fagdidaktisk påfyll og oppdatering
- Erfaringsutveksling og nettverksbygging
- Diskusjoner rundt læreplan, praksis og fysikkfagets rolle i 2024

Det blir foredrag, paneldebatter, engasjerende diskusjoner, blåtur, spennende demonstrasjoner og mye mer. Gled deg til inspirerende dager hvor fysikk er i sentrum 16 timer i døgnet – helt uten dårlig samvittighet!

Hold av datoene nå og gled deg til en spennende konferanse som vil gi deg en kickstart på neste skoleår! Info om påmelding kommer senere.

Har du innspill eller spørsmål, ta kontakt med Torbjørn Mehl på epost: mestern@online.no. Vi sees!



Gruppebilde tatt på Bårdshaug Herregård under konferansen i 2022.

Lag en barometrisk høydemåler

Artikkelen beskriver en enkel barometrisk høydemåler, og hvordan man med relativt enkle midler kan lage og kalibrere en slik høydemåler for bruk i undervisningen.

Nils Kr. Rossing dosent emeritus, Skolelaboratoriet, NTNU

Da Widerøe-flyene ble stående på bakken

Mandag 10. februar 2020 fortalte media om Widerøe som måtte kansellere flere av sine avganger på grunn av lavt lufttrykk. Spesielt ille var det ved Bodø lufthavn hvor man måtte kansellere 23 avganger med Widerøes Dash 8-100 fly. Problemene startet alt på søndag hvor det lave lufttrykket skapte problemer for SAS og Widerøes flyvninger ved flere flyplasser langs Vestlandet og helt opp til Røros. Etter som lavtrykket flyttet seg nordover, fulgte problemet med oppover langs Helgelandskysten, og helt opp til Tromsø [2].

Nå skulle en kanskje tro at fly var godt rustet for flyvninger ved lave lufttrykk da trafikken gjerne går i høyder på rundt 10 000 meter. Problemet var imidlertid knyttet til flyenes høydemålere. Flyenes marsjhøyde bestemmes fortsatt ved å måle lufttrykk, som faller på en ganske forutsigbar måte med høyden over havet. Dog er det særdeles viktig stadig å kalibrere instrumentene etter som været i stor grad påvirker lufttrykket. Selv om GPS-målinger, og da spesielt differensiell GPS, er gode når det gjelder å bestemme lengde- og breddegrad, så er usikkerhet med hensyn til å bestemme høyden, ca. tre ganger større [3].

Bruk av matematiske modeller og betydningen av kalibrering

En vanlig brukt formel for omregning fra lufttrykk til høyde er denne:

$$h = \frac{T_1}{a} \left(\left(\frac{p}{p_1} \right)^{-\frac{aR}{g_0}} - 1 \right) + h_1 \quad (1)$$

Der:

- h Beregnet høyde i meter
- h_1 Referansehøyde i meter
- T Temperatur i kelvin (K)
- T_1 Referansetemperatur ved referansehøyden h_1
- R Den spesifikke gasskonstanten for luft, 287,06 J/kg K
- a Temperaturgradient, foreslått verdi $-0,0065$ K/m
- p Målt trykk i pascal (Pa)
- p_1 Trykk i Pa ved referansehøyden
- g_0 Tyngdeakselerasjonen 9,81 m/s²

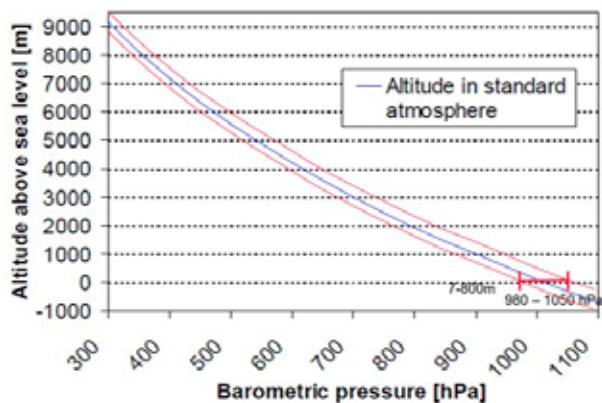
Formelen kalles den *barometriske ligningen*, og beskriver høyden som funksjon av lufttrykket referert til en kalibrert referansehøyde (h_1), der lufttrykk (p_1) og -temperatur (T_1) er kjent [4]. En kalibrert referanse kan f.eks. være en meteorologisk målestasjon eller

Widerøe Dash 8-100.

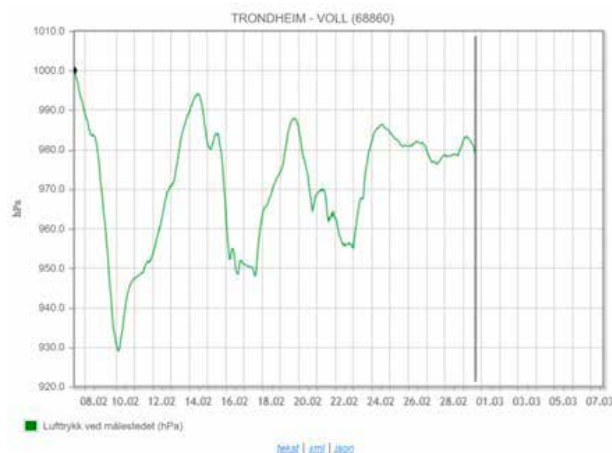
Foto: Wikimedia Commons



► Lag en barometrisk høydemåler



Figur 1. Beregnet høyde over havnivået som funksjon av lufttrykk. Det er indikert hvordan en ukalibrert måling vil kunne gi avvik på flere hundre høydemeter ved lavtrykk og høytrykk.



Figur 2. Målt lufttrykk ved Voll meteorologiske stasjon i Trondheim 8.–29. februar 2020. Lufttrykket ble den 10. februar målt til ca. 930 hPa.

flyplass. Ligningen kompenserer også for en lineært fallende temperatur med høyden (a)¹.

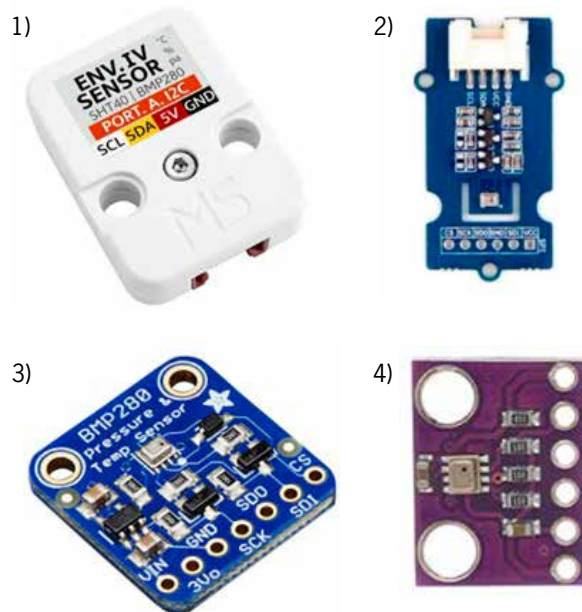
En grafisk framstilling av formelen er vist i Figur 1. Vi har også antydnet hvordan grafen vil endre seg ved et moderat lavtrykk eller et kraftig høytrykk. Som det framgår, vil en ukalibrert høydemåler kunne bomme på høyden med flere hundre meter.

Med andre ord, kalibrering er særdeles viktig. Dette er selvfølgelig flygere også klar over og sørger for å kalibrere høydemåleren så ofte de kan.

Dash 8-100 er imidlertid sertifisert for å kunne kalibrere for lufttrykk ned til 948 hPa, mens lufttrykket ved Bodø lufthavn den 10. februar 2020 ble målt til 944 hPa, og det ble bestemt at flyene skulle settes på bakken til lufttrykket var tilstrekkelig høyt².

1 I denne artikkelen er temperaturgradienten, a , negativ, som her betyr fallende temperatur med økende høyde. Det er også ganske vanlig å la a være positiv, men endre fortegnet i den barometriske ligningen.

2 Det skal imidlertid finnes tabeller som gjør det mulig for piloter, manuelt å korrigere for avvik i slike tilfeller, men det forutsetter at flygerne er trent i denne typen beregninger. Ifølge Teknisk ukeblad ble flyene i dette tilfellet heller satt på bakken.



Figur 3. Leverandører av ulike varianter av BMP280: 1 og 2 – Mouser, 3 – ELFA Distrelec, 4 – AliExpress (Kina).

Jeg var så heldig å lese av trykket i det aktuelle tidsrommet, og vi ser at også på Voll meteorologiske stasjon i Trondheim, ble det målt særdeles lavt trykk. Kompenserer vi for at stasjonen ligger på 127 moh., finner vi at lufttrykket ved havnivået i Trondheim denne dagen, var på ca. 945 hPa³.

Dette er en god historie som viser en praktisk bruk av måling av lufttrykk, og betydningen av å kalibrere instrumenter som anvender denne metoden til måling av høyden over havet.

I undervisningen stopper det ofte her. Vi stilte oss derfor spørsmålet om det var realistisk at elevene kunne lage sin egen barometriske høydemåler for så å gjøre egne erfaringer med et slikt instrument.

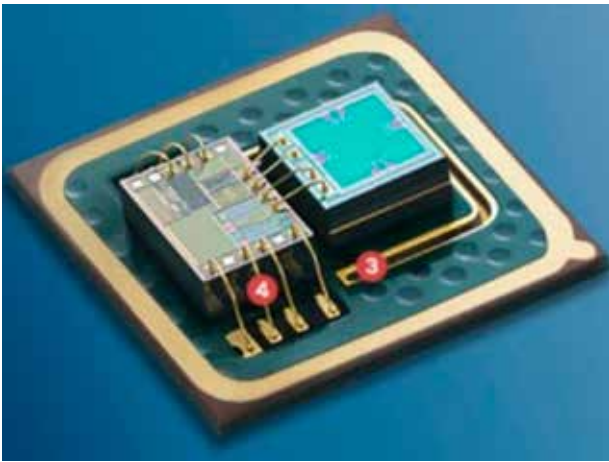
Fra teoretisk beskrivelse til praktisk erfaring

I dag er sensorteknologien kommet så langt at det er mulig å få kjøpt meget gode sensorer for en rimelig penge. Vi tenker da spesielt på Bosch BMP280 eller BME280⁴ levert i hendige format (se Figur 3). BMP280 leveres til 60–110 kr hos seriøse leverandører som er lett tilgjengelige i Norge. Velger man å kjøpe direkte fra Kina ligger prisen på under 5 kr for BMP280 og for BME280 på under 25 kr. Dette er kretser som lett lar seg koble til for eksempel Arduino eller en micro:bit dersom man har tilgang til en kantkontakt.

Disse sensorene kan gjøre målinger i området 300 til 1100 hPa (som tilsvarer fra 9000 moh. til

3 Vi regner da 28 fot pr. 1 hPa.

4 BMP280 inneholder trykk- og temperatursensor, mens BME280 har i tillegg fuktighetssensor.



Figur 4. Trykksensoren består av en piezo-resistiv skive med elektroder (til høyre). Til venstre sees elektronikken.



Figur 6. Oppkoblet prototyp av barometrisk høydemåler med micro:bit, lufttrykksensor, display og batteri. A) bygget på prototypkort med BMP280 og uten OLED display. B) Som A), men med OLED-display. C) Bruker Enviro:bits trykksensor og Kitroniks OLED-display (SSD1306).

500 meter under havets nivå (muh.)), og har en relativ nøyaktighet på $\pm 0,12 \text{ hPa}$ ($\pm 1 \text{ m}$) og en absolutt nøyaktighet på $\pm 1 \text{ hPa}$ ($\pm 8 \text{ m}$) i området 950–1050 hPa [5].

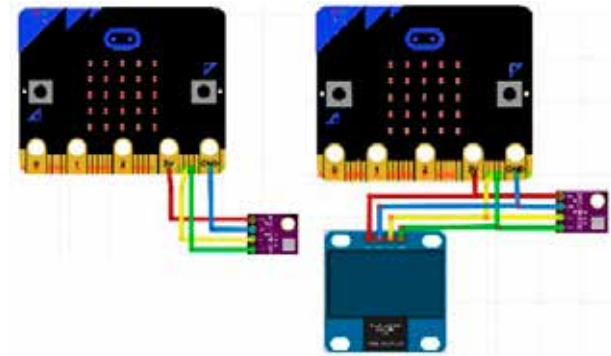
Teknologien er basert på at en variasjon i lufttrykket medfører endring i nedbøyning av en tynn silisiumplate spent opp over et vakuumkammer (Figur 4). Platen som har piezo-resistive egenskaper, er påmontert elektroder som registrerer endringer i resistiviteten i ulike områder av plata. En målebro omdanner endringen i resistivitet til en spenning som forsterkes og prosesseres i elektronikk inkludert i sensor kapselen, som leverer digitale måleverdier direkte i Pa.

Måleverdiene leveres digitalt på serieform til for eksempel en micro:bit via to ledninger, i tillegg til spenning (+3 V) og jord, som vist på Figur 5.

Oppkobling

Vi legger merke til at displayet og BMP280 er koblet til de samme to linjene (gul og grønn på Figur 5). Dette er mulig da dataoverføringen langs de to linjene er adressert. Displayet og sensoren har hver sin adresse.

Figur 6 viser hvordan oppkoblingen kan se ut i



Figur 5. Til venstre, enklest mulig oppkobling med kun BMP280. Til høyre, høydemåler supplert med et bedre display (SSD1306) enn det innebygde LED-displayet til micro:bit.

praksis. Her har vi brukt et prototyp-kort med et koblingsbrett, med sensoren BMP280 og OLED-display⁵ SSD1306. Vi bruker ledninger (jumpere) for å koble opp kretsen. Lengst til høyre har vi benyttet Enviro:bit [6] med BME280 og Kitroniks OLED-display [7]. Denne varianten er kun «plug & play», og trenger ingen løse ledninger.

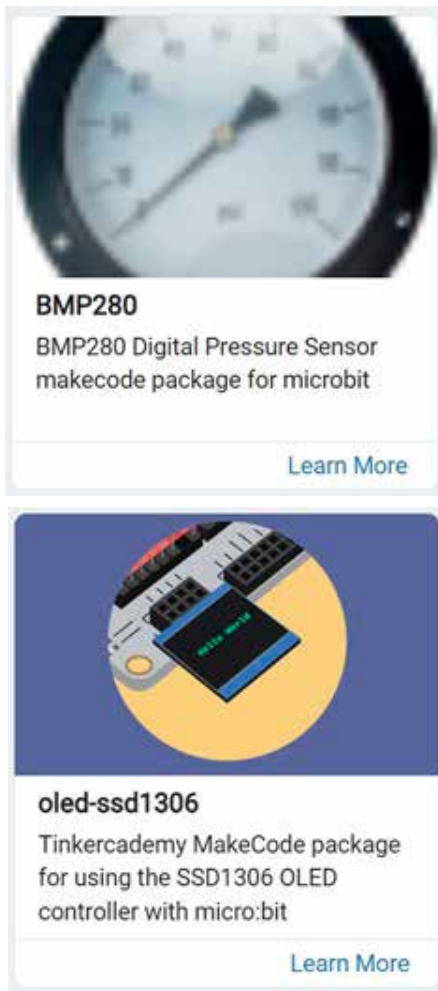
Det vesle OLED-displayet SSD1306 gir mulighet til å skrive 4–8 linjer med tekst og måleverdier, men det er også mulig å skrive verdiene ut på LED-displayet på micro:bit-en. Vi velger å inkludere en batteripakke slik at elevene kan bevege seg fritt rundt for å måle og registrere høyder.

Programmet

Programmet er gjort så enkelt som mulig for å vise hvor kompakt det kan gjøres. Det som krever litt ekstra innsats, er omregningen fra lufttrykk til høyde. Først leser vi kun av temperatur og lufttrykk og skriver dette til displayet. For å få til det må vi installere to utvidelser (biblioteker), en for sensoren (BMP280) og en for displayet (SSD1306_OLED NB!

⁵ OLED – Organic Light Emitting Diode. «Organic» brukes for å indikere at det er et tynt organisk materiale som avgir lys.

► Lag en barometrisk høydemåler



Figur 7. Installasjon av bibliotekene for lufttrykkssensoren BMP280 og displayet SSD1306.



Figur 8. Program som leser av og viser verdien for temperatur og lufttrykk med tekst og benevnning på OLED-displayet.

Versjon 2.0.9). Sistnevnte er bare aktuelt dersom man ønsker å bruke OLED-displayet.

Figur 8 viser en enkel utgave av programmet som avleser trykk og temperatur og presenterer disse verdiene på OLED-displayet.

Vi har valgt å legge inn tekst foran og benevnning etter verdiene. I tillegg har vi delt trykket på 100 slik at det blir vist i hPa som er det samme som mBar. Det vises en ny måling for hvert 5. sekund. På displayet vil dette se ut som vist på Figur 9.

Bestem middelverdien av lufttrykket

Ser vi nærmere på lufttrykket vil vi oppdage ganske store variasjoner i de målte verdiene. Dette skyldes både tilfeldig støy i elektronikken og raske fluktuasjoner i lufttrykket. Ved å bestemme middelverdien av fra 100 til 500 målinger, så vil målingene bli langt mer stabile, som er viktig når vi skal regne om til høyde. Figur 10 viser beregning av middelverdien, p .

Vi utfører divisjonen med 100 for hver måling, som gir sensoren litt ekstra tid. Likevel tar ikke en midling over 500 målinger mer enn drøyt ett sekund. Vi bytter også ut «get pressure» med p ved skriving til displayet og fjerner forsinkelsen i slutten av programmet.

Beregning av høyde

Når vi skal regne om fra lufttrykk til høyde, lager vi oss variabler som holder de ulike parameterne i den barometriske ligningen (1).

Vi regner også ut eksponenten:

$$\begin{aligned} -aR/g_0 &= -0,0065 \text{ [K/m]} \cdot 287,06 \text{ [J/kg K]} \\ &\quad / 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]} \\ &= 0,1902 \text{ [J}\cdot\text{s}^2\text{/Kg}\cdot\text{m}^2\text{]} \end{aligned}$$

som vi kaller *exp*. Dette gjør vi en gang for alle i blokken «ved start».

De tre første parameterne h_1 , T_1 , p_1 , skal vi



Figur 9. Temperatur og trykk vist på OLED-displayet.



Figur 10. Beregning av middelverdien.

Figur 12. Omregningsformelen skrevet i Javascript.

```

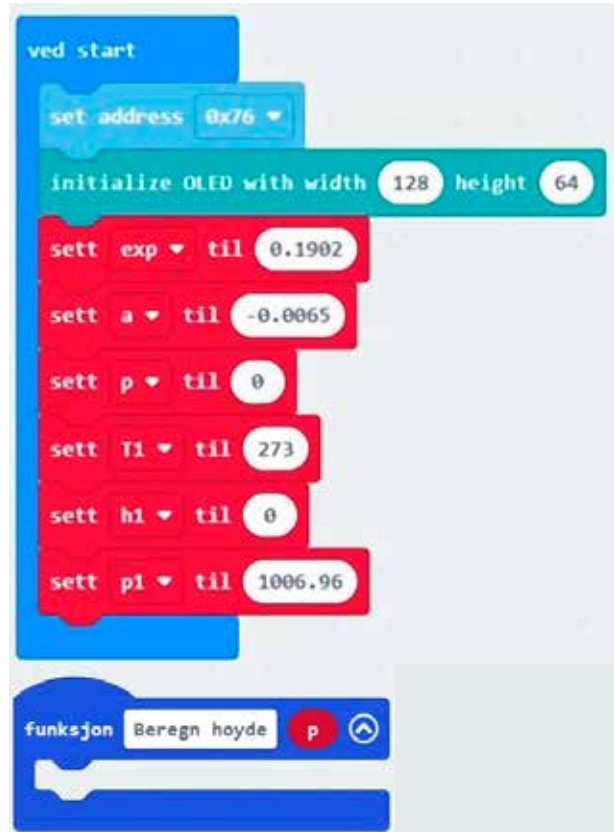
1 function Beregn_hoyde (p: number) {
2   return T1 / a * (Math.exp(exp * Math.log(p/p1)) - 1) - h1
3 }

```

bruke i kalibreringen, men velger alt nå å tilordne $p_1 = 1006,90$ hPa, som er målt lufttrykk for øyeblikket. Dermed unngår vi divisjon med 0 og den absolute høyden blir omtrent 0 moh.

Vi definerer en funksjon vi kaller «Beregn hoyde», og som returnerer høyden h , med lufttrykket p , som argument. Foreløpig er funksjonen tom, men skal fylles med omregningsformelen.

Omregningen krever blant annet at vi utfører utregning $(p/p_1)^{exp}$, som det viser seg at Makecode har problemer med å utføre uten å avrunde eksponenten til et heltall, hvilket for oss vil være en meget grov og helt uakseptabel avrunding. For å unngå dette legger vi inn omregningen som en Javascript-kode som vist



Figur 11. A) Definisjon og tilordning av parameterne h_1 , T_1 , p_1 , p , a , og exp . B) Vi definerer funksjonen «Beregn hoyde», med lufttrykket « p » som argument.

i Figur 12. Dermed inkluderes andre biblioteker og vi unngår problemet.

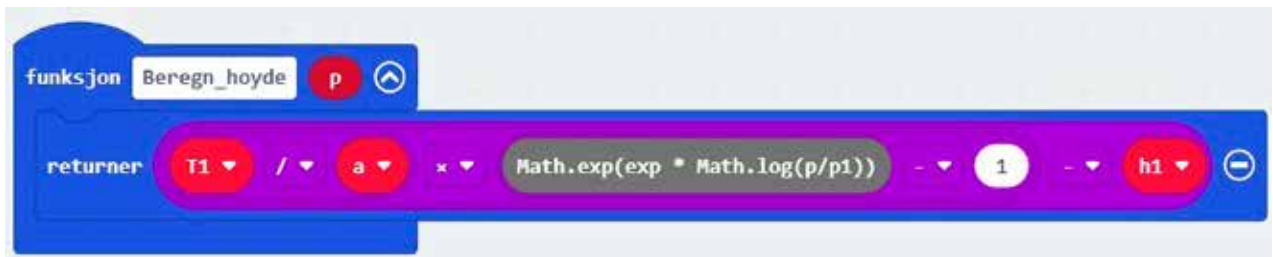
Vi åpner koden i Javascript og skriver inn linjen (2): `return T1 / ...` (Figur 12), før vi går tilbake til blokkode. Vi kan selvfølgelig også skrive hele programmet i Javascript eller i Python om vi skulle ønske det.

Her må vi gå omveien om logaritmer for å unngå at Makecode konverterer tilbake til $(p/p_1)^{exp}$ som er blokkode-notasjonen for eksponent. Funksjonsuttrykket i blokkode blir dermed som vist i Figur 13.

Funksjonen «Beregn hoyde» med argumentet midlet lufttrykk « p », returnerer beregnet høyde i meter som skrives ut på displayet.

Vi legger merke til at høyden skrives ut med

► Lag en barometrisk høydemåler



Figur 13. Funksjonen «Beregn hoyde» etter at omregningen er utført i Javascript.

Figur 14. Lufttrykk og høyde rundes av til to desimaler.



opptil 14 desimaler, hvilket er temmelig unødvendig (Figur 14). Sannsynligvis burde det holde å skrive ut høyden til nærmeste meter, men vi velger to desimaler for å kunne registrere variasjonen. Dette gjør vi ved å multiplisere med 100, avrunde til nærmeste hele tall og så dividere med 100. Vi gjør det samme for lufttrykket, p .

Kalibrering

Dersom vi ønsker å måle absolutt høyde over havet så må vi kalibrere instrumentet vårt. Det gjør vi ved å gå inn på nærmeste kalibrerte målestasjon og lese av «øyeblikksverdien» for lufttrykket, stasjonens høyde over havet og temperatur. Siden det ofte legges ut verdier for hver hele time, så vil det kunne bli noe avvik fra øyeblikksverdien.

Et sted man kan gå inn for å finne nærmeste målestasjon er www.senorge.no. Kryss av for lufttrykk og gå til nærmeste stasjon og vis grafen for lufttrykk. Min nærmeste stasjon er Voll gård utenfor sentrum av Trondheim. Denne stasjonen ligger på 127 moh., og viser i skrivende stund et lufttrykk $p_1 = 998,1$ hPa og en temperatur $T_1 = -6,2$ °C, kl. 15:00 den 27.12.23, se Figur 15.

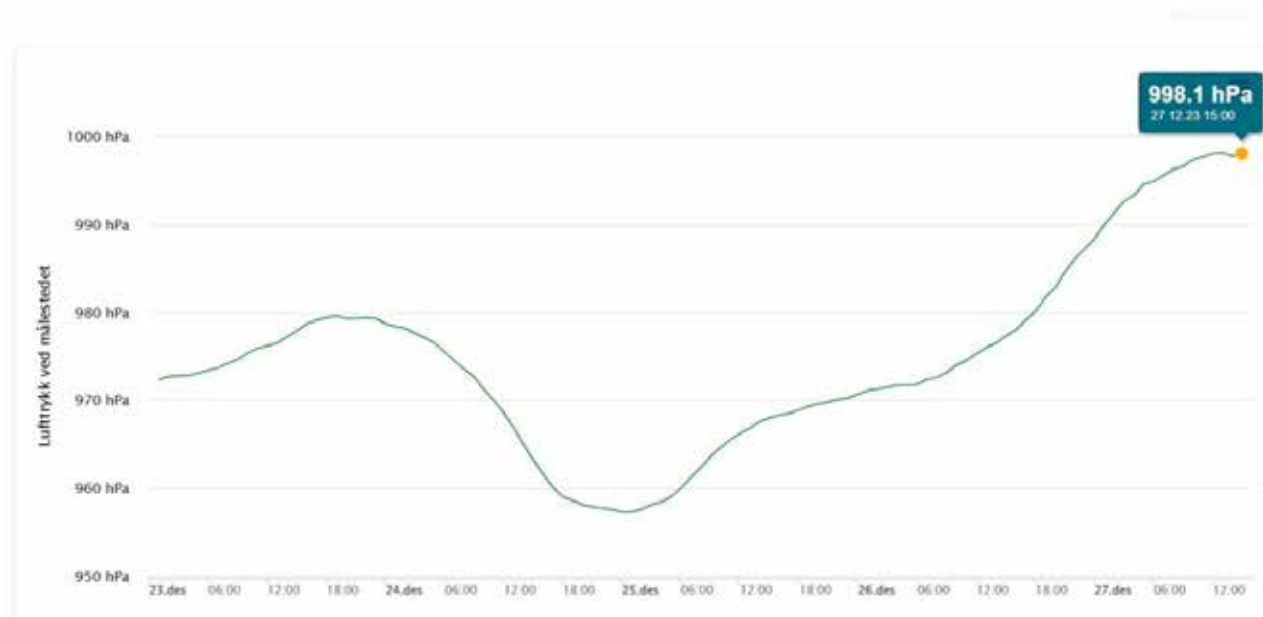
Legger jeg inn disse verdiene vil jeg få en relativt

nøyaktig angivelse av min høyde over havet på det stedet jeg befinner meg på for øyeblikket⁶. Sitter man innendørs i et bygg med ventilasjonsanlegg, kan man risikere at trykket innendørs avviker fra det utvendige lufttrykket, hvilket vil medføre feil i beregnet høyde.

Noen didaktiske betraktninger

Så hvorfor skal man bruke tid på å lage en høydemåler i fysikktimen, for det vil ta tid, spesielt dersom man ønsker å la elevene være med å utvikle programmet selv og forstå den barometriske omregningsformelen fra lufttrykk til høyde, eventuelt også sensorfysikken? Dersom man har utstyr og komponenter liggende og elevene er vant til å bruke en PC, burde det likevel være en overkommelig oppgave å gjennomføre i løpet av to dobbelttimer i fysikk/matematikk-fagene. Dette

6 Det viste seg imidlertid at jeg fikk store avvik fra min virkelige høyde over havet. Det var snakk om et avvik på flere hundre meter. Ute i Trondheimsfjorden ligger det imidlertid en bøye som også måler lufttrykket og befinner seg kun noen få meter over havnivået. Denne ga langt bedre resultater. Det samme gjorde bruk av lufttrykket målt ved Værnes lufthavn, så en kan stille spørsmål ved sensoren ved Voll gård.



Figur 15. Luftrykk målt ved Voll gård utenfor Trondheim sentrum kl. 15:00 den 27.12.23.

krever sannsynligvis også at de har en skriftlig veileder. I så fall kan man håpe på følgende kompetanseutbytte:

- Oppdage sammenhengen mellom luftrykk og høyde over havet, og at denne måleteknikken fortsatt anvendes innen flytrafikk
- Se en konkret bruk av matematisk modellering
- Forstå betydningen av midling og kalibrering
- Lære å bruke programmering, eventuelt gå fra blokk- til tekstbasert programmering
- Samle inn og analysere måledata

Artikkelen beskriver en øvelse som gjennom flere år har vært brukt som en introduksjon til CanSat-kurset ved Andøya Space Education (tidligere NAROM). Der brukes en barometrisk høydemåler for å bestemme CanSat-ens høyde over bakken. CanSat er en liten sonde som bygges av elever og som slippes fra en raket, drone eller værballoon og utstyres med fallskjerm og ulike sensorer etter elevenes eget ønske. Det holdes gjerne lærerkurs og arrangeres årlig konkurranser for elever som har utviklet sine egne målesonder. Prosjektet er spesielt egnet i faget teknologi og forskningslære.

Tidligere er det benyttet Arduino-teknologi [1]. Fra og med våren 2024 vil vi i tillegg å ta i bruk en nyutviklet micro:bit CanSat⁷. ■

⁷ I løpet av januar/februar 2024 vil det bli utlyst micro:bit CanSat-kurs som vi bli holdt i Oslo i april 2024.

Referanser:

- [1] N.K. Rossing. «Grunnkurs programmering Arduino – CanSat». Skolelaboratoriet (2022). www.ntnu.no/documents/2004699/12108297/Nordic+ESERO+Arduino++Grunnkurs+programmering+%28CanSat%29.pdf/6b388614-7aed-451e-92a9-2aac474ac43e
- [2] P.E. Dalløkken. «Lavtrykk setter Dash 8-100 på bakken ...». Teknisk ukeblad, 10.02.2020. www.tu.no/artikler/lavtrykk-setter-dash-8-100-pa-bakken-dette-har-aldri-skjedd-for-sier-wideroe/484836
- [3] M. Greyham. «GPS versus barometric altitude: The definitive answer». Cross Country magazine 123, (2009). <https://xcmag.com/news/gps-versus-barometric-altitude-the-definitive-answer/>
- [4] Wikipedia. «Barometrisk nivelleringsformel». https://no.frwiki.wiki/wiki/Formule_du_nivellement_barom%C3%A9trique
- [5] «Pressure sensor BMP280». Bosch Sensortec GmbH 2023. www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/pressure-sensors/bmp280/
- [6] Pimoroni. «Environ:bit et sensorkort parameter i omgivelsene (luftrykk, temperatur, luftfuktighet, lys, farger og lyd)». <https://kitronik.co.uk/products/46133-envirobit-add-on-for-the-bbc-microbit>
- [7] Kitronik. «VIEW Graphics 128 OLED display 128x64 for BBC micro:bit». https://kitronik.co.uk/products/56115-kitronik-view-graphics-128-oled-display-128x64-for-bbc-micro-bit?_pos=1&_sid=80558fc91&_ss=r

Relasjoner mellom trykk, høyde og temperatur i atmosfæren

Øyvind G. Grøn professor emeritus, OsloMet – Storbyuniversitetet

To sentrale relasjoner mellom trykk og høyde kalles den hypsometriske- og den barotrope likningen. De fremkommer fra ulike antagelser om temperaturen: Den hypsometriske likningen at temperaturen er den samme i alle høyder, og den barometriske likningen at temperaturen avtar lineært med høyden [1]. I denne sammenhengen opptrer ofte den adiabatisk temperaturgradienten. Inspirert av artikkelen til Nils Kr. Rossing [2] vil jeg her presentere fysikken bak disse relasjonene og utlede deres matematiske form.

Hydrostatisk likevekt

Relasjonene nevnt i overskriften tar utgangspunkt i likningen for hydrostatisk likevekt og tilstandslikningen for ideal gass. Vi starter med å utlede likningen for hydrostatisk likevekt, og ser på en vertikal søyle i atmosfæren med tverrsnittareal A . Den nederste enden er i en referansehøyde, h_1 , der trykket er p_1 . For å sette opp likningen for hydrostatisk likevekt retter vi oppmerksomheten mot en skive med høyde dh som befinner seg i en høyde h der gassens tetthet er ρ , og tyngdens akselerasjon er g . Tyngden av gassen i skiven er $dG = \rho g A dh$. Det antas at atmosfæren er i ro. Da gjelder Newtons 1. lov: At summen av kreftene på skiven er lik null. Tyngden holdes da i likevekt av forskjell i trykk-kraft på oversiden og bunnen av skiven, $A dp$. Dermed tar Newtons 1. lov anvendt på skiven formen $A dp + \rho g A dh = 0$, som gir likningen for hydrostatisk likevekt,

$$dp = -\rho g dh. \quad (1)$$

Ifølge tilstandslikningen for ideal gass er

$$\rho = \frac{p}{R_s T}, \quad (2)$$

der R_s er den gjennomsnittlige spesifikke gasskonstanten for luften. Dermed tar den hydrostatiske likningen formen

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R_s T} dh. \quad (3)$$

Den hypsometriske likningen

For å komme videre må vi vite hvordan temperaturen avhenger av høyden. Dersom en antar at

temperaturen ikke avhenger av høyden, gir integrasjon av likning (3) fra referansehøyden til en vilkårlig høyde

$$h = h_1 - h_s \ln \frac{p}{p_1}, \quad (4)$$

der $h_s = RT/g$ kalles den karakteristiske høyden. Ved for eksempel $15^\circ\text{C} = 288\text{ K}$ er $h_s = 8,4\text{ km}$. Legg merke til at siden $p < p_1$ er $h > h_1$. Denne formelen kalles ofte *den hypsometriske formelen* for sammenhengen mellom trykk og høyde i atmosfæren. Den er ganske unøyaktig siden antagelsen om at temperaturen ikke avhenger av høyden vanligvis er temmelig urealistisk.

Den barometriske likningen

Det vanlige er at temperaturen avtar med høyden selv om det på kalde vinterdager kan være omvendt i dalsøkk (inversjon). En mye brukt antagelse er at temperaturen avtar lineært med høyden,

$$T(h) = T_1 - a(h - h_1). \quad (5)$$

der konstanten a kalles temperaturgradienten. Innsetting i den hydrostatiske likningen (3) gir

$$\frac{dp}{p} = \frac{g}{R_s} \frac{dh}{a(h - h_1) - T_1}. \quad (6)$$

Integrasjon fra nivå 1 til en vilkårlig høyde h gir

$$\ln \frac{p}{p_1} = \ln \left[1 - \frac{a}{T_1} (h - h_1) \right]^{g/aR_s}. \quad (7)$$

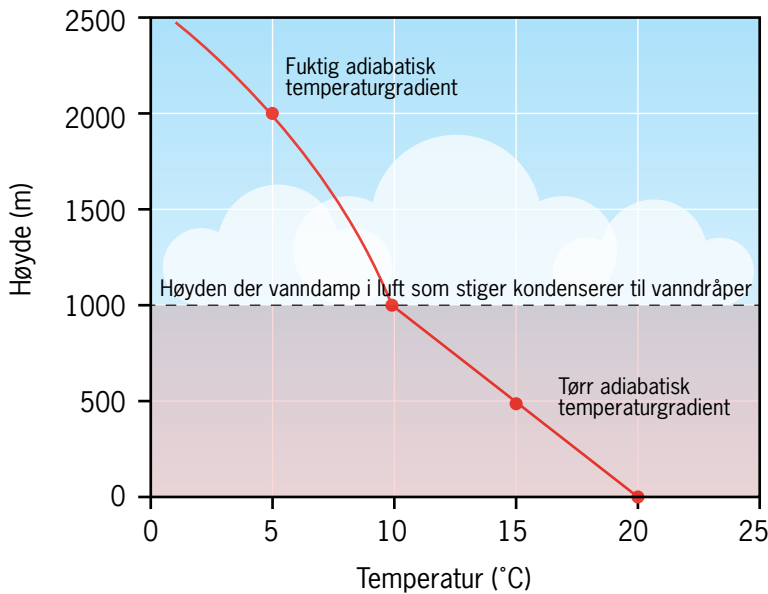
Ved å løse denne likningen med hensyn på h fås

$$h = h_1 + \frac{T_1}{a} \left[1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{aR_s/g} \right]. \quad (8)$$

Denne formelen kalles *den barometriske formelen* for sammenhengen mellom trykk og høyde i atmosfæren. Merk at her er $a > 0$, slik som i ref. [1], mens i ref. [2] er $a < 0$. Så selv om uttrykkene for h her og i ref. [2] ser forskjellige ut, er de identiske.

Den adiabatisk temperaturgradienten

Vi ser nå på en situasjon der varmeutvekslingen mellom luftlag i ulike høyder er så liten at den kan neglisjeres. Temperaturens endring med høyden i denne situasjonen kalles den adiabatisk tempe-



Figur 1. Tørr og fuktig adiabatisk temperaturgradient. Grensen går der vanndampen i luft som stiger begynner å kondensere til dråper slik at det dannes en sky.

Illustrasjon: Maria Hammerstrøm

raturgradienten. Da tar termodynamikkens 1. lov formen: Endring av indre energi pluss trykkarbeid er lik null. Uttrykt ved spesifikke størrelser, dvs. indre energi, u , og volum, v , per masse, tar da termodynamikkens 1. lov formen

$$du + pdv = 0 \quad (9)$$

Vi merker oss at $\rho v = 1$ der ρ er luftens tetthet. Endringen i indre energi er $du = c_v dT$, der c_v er luftens spesifikke varmekapasitet ved konstant volum. Fra tilstandslikningen på formen $pv = R_s T$ fås $pdv + vdp = R_s dT$. Videre er luftens spesifikke varmekapasitet ved konstant trykk $c_p = c_v + R_s$. Innsetting av alt dette i (9) gir

$$c_p dT = v dp. \quad (10)$$

Ved her å benytte den hydrostatiske likningen (1) og at $\rho v = 1$ fås uttrykket for den adiabatisk temperaturgradienten

$$\frac{dT}{dh} = -\frac{g}{c_p}. \quad (11)$$

Dersom vi regner med at g og c_p er uavhengig av høyden gir integrasjon av likning (11).

$$T(h) = T_1 - \frac{g}{c_p} (h - h_1), \quad (12)$$

som er likning (5) med $a = g/c_p$. Dermed blir den adiabatisk trykk-høyde-relasjonen

$$h = h_1 + \frac{c_p T_1}{g} \left[1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{R_s/c_p} \right]. \quad (13)$$

Ofte innføres en karakteristisk høyde

$$h_2 = \frac{c_p T_1}{g}, \quad (14)$$

slik at den adiabatisk trykk-høyde-relasjonen skrives på formen

$$h = h_1 + h_2 \left[1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{R_s/c_p} \right]. \quad (15)$$

Tørr luft med temperatur 27 °C, det vil si 300 K, har spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk, $c_p = 1,0 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$. Dette gir en adiabatisk temperaturgradient på 10 grader per km og en karakteristisk høyde $h_2 \approx 30 \text{ km}$. Hvis vi velger referansehøyden $h_1 = 0$ ved havets nivå, ser vi at toppen av atmosfæren som har $p = 0$, gir $h = h_2$. Det betyr at h_2 representerer tykkelsen av atmosfæren med lineært avtagende temperatur.

Vanligvis er luften fuktig. Den inneholder vanndamp og i skyer også vanndråper. Det gjør at temperaturen avtar litt langsommere med høyden enn den gjør ifølge den adiabatisk temperaturgradienten. Et mye brukt estimat er å anta at temperaturen avtar med 6,5 grader per km [2]. ■

Referanser

- [1] Wikipedia. «Barometrisk nivelleringsformel». https://no.frwiki.wiki/wiki/Formule_du_nivellement_barom%C3%A9trique
- [2] Nils Kr. Rossing. «Lag en barometrisk høydemåler». *Fra Fysikkens Verden* (2024).

Bokomtale:

Veronica Danielsen: Nordlyset – Aurora Borealis, menneskene, mytene og vitenskapen

ISBN: 9788202804459

Cappelen Damm, 2023

192 sider

Veil. pris: 399 kr

«Oldefar, så du det praktfulle nordlyset på himmelen i går?», spurte Sigmund (6 år) for tre dager siden. Sammen med faren hadde han fra Bø i Telemark, sett flammende nordlys noen få dager i høst, noe som var mer enn normalt. Nordlyset er satt i scene av krefter vi fortsatt bare delvis kan forklare og som mennesker i hundrevis av år både har fryktet og nå beundrer mer og mer.

Fra det 18. århundre trodde man at store flekker på sola var kilden til nordlyset, mens dagens fysikere har funnet ut at det er solvinden som er kilden til nordlyset. Nesten samtidig ble det oppdaget at aktiviteten på sola varierer over en 11-årsperiode. Neste maksimum i aktiviteten vil forekomme i perioden 2023 til 2025. Dette betyr sannsynligvis at mange vil gå på jakt etter disse vakre scenebildene på polarhimmelen de kommende to vintrene, selv om dagens fysikere ikke tror at solflekkenes er hovedkilden til nordlysene. Det er lurt å prioritere tidsrommet til +/- en uke fra fullmåne, velge en bakketopp på et sted hvor det er god sikt og normalt er mye klart vær.

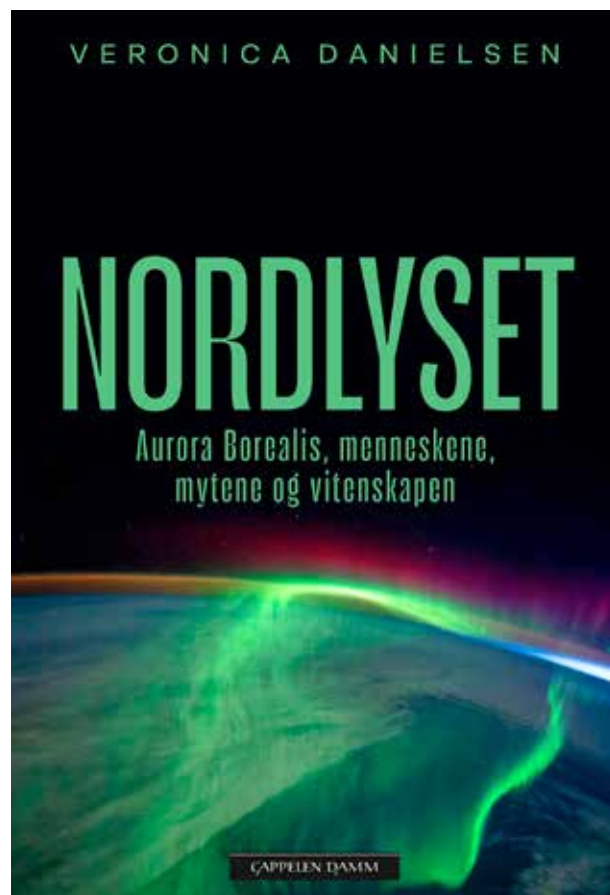
Innholdet i boka

Boka Nordlyset er skrevet av Veronica Danielsen, som er fysiker og vitenskapsformidler som jobber på Vitensenteret i Sogn og Fjordane. Boka er på nesten 200 sider, oppdelt i 20 kapitler. Boka har mange fargebilder. De 14 første kapitlene omtaler nordlysets karakteristiske egenskaper og hvordan dette vakre himmellyset varierer i rom og tid over jorda, uten bruk av matematikk eller fysiske enheter og modeller. Videre omtaler boka nordlys på andre planeter, innvirkning på dyrelivet og moderne teknologi, samt eksempler på himmellys som ikke er nordlys.

De to første sidene i boka inneholder en artig 800 år lang odysse over nordlysutvikling fra vikingtiden til romalderen. Sidene er også reproduisert til slutt i boka.

Birkelands revolusjon

Takket være de norske nordlys-pionerne Kristian Birkeland, Carl Størmer og Lars Vegard har nordly-



set fått et arnested i Norge. Før 1960 dokumenterte Vegard mer enn 500 forskjellige nordlysemisjoner. Birkeland (1867–1917) bygde verdens første nordlysobservatorium på en 900 meter høy fjelltopp i Finnmark. Etter at han i 1898 observerte et sterkt nordlys, skrev han: «Jeg har fått et bud fra Sola», noe som vakte oppmerksomhet.

Ideen var at stråling fra sola – han kalte det katostråler fordi elektroner ikke da var oppdaget – var kilden til nordlyset. Neste samtidig kom tanken om at da kunne han lage nordlys i laboratoriet via sitt berømte Terrella-eksperiment, som er beskrevet og avbildet i boka. Basert på hva han lærte fra observatoriet og fra sine laboratorieeksperimenter med kunstig nordlys, publiserte Birkeland den første realistiske nordlysteorien. Dette omtales i boka som Birkelands revolusjon. Han er også eneste norske fysiker som ble avbildet på en pengeseddel.

Solvinden oppdaget

Helt fram til 1960-årene trodde man at rommet mellom jordas atmosfære og sola var tomt for materie. I 1961 ble satellitten Explorer 1 sendt opp og man oppdaget da straks at atmosfæren på sola sender ut en kontinuerlig strøm av elektrisk ladde partikler – elektroner og ioner – med høy hastighet. Denne store strømmen av plasma ble kalt solvinden. Solvinden er den viktigste forbindelseskanalen mellom sola og jorda. I boka beskrives solvindens opphav på sola, dens reise gjennom rommet og deretter solvindens møte med jordas magnetfelt.

Jordas magnetiske feltlinjer er nordlysets veiviser. Variasjoner i solaktiviteten og kompliserte elektriske strømmer i jordas indre fører til at nordlyset er et dynamisk fenomen.

Nordlysets former og farger

I boka beskrives mange forskjellige varianter av nordlysfenomener vi kan se på himmelen, fra nordlysbuer og det imponerende nordlyskrone-fenomenet, til mer sjeldne fenomener. Protonnordlyset og dets dopplereffekt ble oppdaget i Norge, noe som vakte internasjonal oppmerksomhet. Det var fra disse målingene man fant hvor store energier går med til å generere nordlys.

Nordlysfargene er atmosfærens fingeravtrykk. Derfor fant man atmosfærens sammensetning over 90 kilometer, før romalderen, fra fargene i nordlyset. Boka forteller hvilke farger nordlyset kan ha og hvilken informasjon som kan trekkes ut fra dette.

Det fascinerende nordlyset studeres blant annet med raketter som flyr rett gjennom nordlyset og studerer nordlyset «fra innsiden». Dette omtales kort i boka med litt historikk, med fokus på Andøya. Fra slike forsøk finner man den nøyaktige høyde av lyset og hvordan intensiteten varier med høyden. At nordlys over det sentrale polområdet også studeres med raketter fra Ny-Ålesund på Svalbard, er ikke nevnt.

Nordlys på andre planeter

Våre kunnskaper om nordlyset har øket enormt i romalderen, men nordlyset inneholder fortsatt viktige, skjulte fysiske hemmeligheter.

I romalderen har vi også lært litt om himmellyset på planetene, som er summert og illustrert i et langt kapittel i boka. Fra fargene på lyset kan man få informasjon om både atmosfærens sammensetning og magnetfelt på planetene som er så forskjellig fra jorda. For eksempel om man observerer den typiske grønne linjen ved 557,7 nm, vet vi at det må være oksygen der.

På Mars, som nesten ikke har atmosfære eller magnetfelt, er ulike typer av svakt infrarødt og ultrafiolett lys observert. På Jupiter og Saturn, som har sterke magnetfelt, har man funnet nye typer himmellys, men mest som lys utenfor det synlige område av spektret. Noe nytt har man funnet, men nye studier har høy prioritet.

Boka har også et kapittel om nordlys på planeter rundt andre stjerner og hvordan forskere kan bruke observasjoner av nordlys der i jakten på liv i universet.

I følge forfatteren er dette den første nordlys-boka som beskriver nordlys på andre planeter.

En mystisk, grå lysbue

Det mest originale kapittelet i boka handler om et lys kalt STEVE. Dette lyset ser ut som en lysbue – som

eksosbue fra et jettfly – og er orientert i geografisk øst-vest retning. Buen stråler mest i ultrafiolett lys. Denne strålingen kan det blotte øye ikke se. Man trodde først at STEVE ble oppdaget og forklart av amatørforskere i Canada. Det merkelige navnet STEVE står for «sterk varmestråling med økende hastighet». Det står i boka at nordlyspioneren Størmer hadde omtalt slike lysfenomener 100 år tidligere. Undertegnede ville kuttet ut dette kapitlet, og skrevet mer utfyllende om høyden av ulike nordlysformer.

Nordlysvarsler

Forekomsten og styrken på nordlyset er størst mellom 20 og 30 breddegrader fra magnetpolene, i en sone som kalles nordlysovalen. Forfatteren kaller ovalen «en smultring rundt magnetpolene». I den nordlige ovalen er magnetfeltet rettet mot jorda, mens i den sørlige har feltet motsatt retning.

Det kan være lurt å sjekke nordlysvarslet – med start side 54 i boka – om man skal ut på nordlysjakt i Tromsø-området. Da er man innenfor ovalen. Der kan varslene være nyttige. Varsling av nordlysforekomst nord eller syd for ovalbeltet, hvor korreksjonen med forstyrrelser i magnetfeltet er mer komplekse, er sannsynligheten for treff mindre. Det er gjort framskritt i modellen, men problemet med å varsle forekomsten av nordlys over hele polarkalotten, er langt fra løst.

Boka omtaler hvordan nordlysvarsling fungerer og hvorfor det er mye mindre pålitelig enn vanlig værvarsling. Boka gir også mange nyttige tips til hvordan du best kan observere nordlyset og få med deg om det er nordlys å se i nærheten av deg.

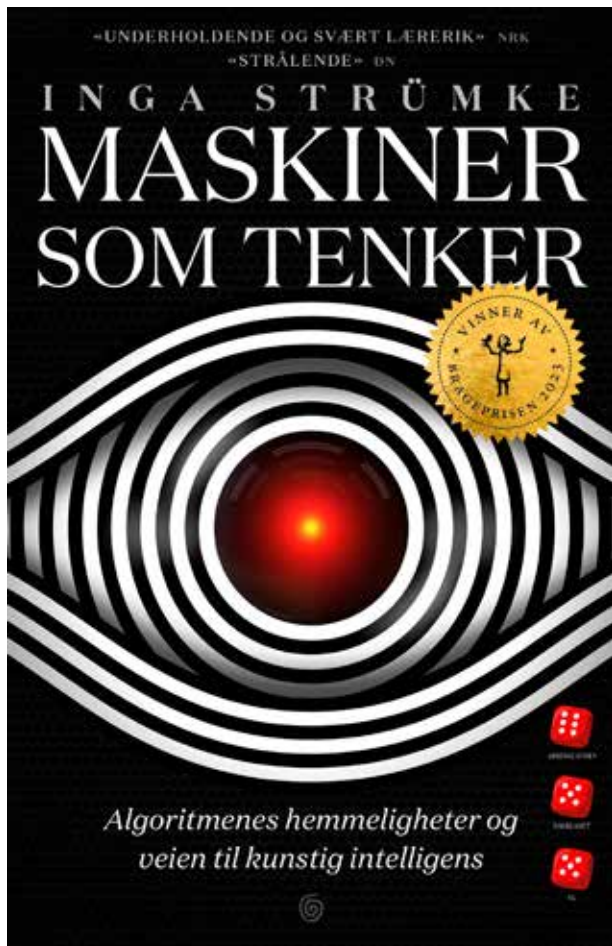
Konklusjon

Selv om det finnes mye populært lesestoff om dette mystiske og fargerike naturfenomenet – se kilder bakerst i boka – så er markedet ikke mettet. Mange i vårt land «digger» vitenskap og spesielt nordlys. Våre kunnskaper om nordlys har økt mye i romalderen, men fortsatt er ikke alle problemene løst. Noen sentrale nordlysegenskaper, inkludert en komplett nordlysteori, arbeides det fortsatt med.

Nordlyset er et mystisk fenomen som har resultert i mye overtro. Noen eksempler er nevnt i boka, men mytologien kunne med fordel fått en bredere omtale.

Nordlyset er en lettest faktabok som ikke krever bakgrunnskunnskaper i fysikk. Jeg tror at spesielt elever på ungdomskolen og et par klasser under, samt eldre mennesker med interesse for nordlys, sola, og det nære verdensrom, vil ha både nytte og glede av å bli oppdatert og se mange vakre nordlysbilder. En kort referanseliste etter hvert kapittel hvor interesserte lesere kunne fordype seg i temaet, ville jeg anbefale.

*Alv Egeland, professor emeritus,
Fysisk institutt, UiO*



Bokomtale:

Inga Strømke: ***Maskiner som tenker –*** ***Algoritmenes hemmeligheter og*** ***veien til kunstig intelligens***

ISBN: 9788248932505 (brukt her: fjerde opplag)

Kagge forlag, 2023

310 sider

Veil. pris: 429 kr

Da undertegnede 30 år gammel i 1975 kom til det nystartede Universitetet i Tromsø (som nå er en del av Norges Arktiske Universitet), visste jeg omtrent ingenting om det som opp til den tid het «Elektroniske regnemaskiner», men i Tromsø allerede var omdøpt til «Datafag». Jeg hadde for eksempel aldri skrevet et regneprogram (noe jeg har gjort atskillig av siden). Jeg husker ikke eksakt hva jeg visste om «kunstig intelligens» (KI), men jeg mener jeg hadde sett filmen *2001: A Space Odyssey* (Kubrick, 1968); der opptrer det en robot ved navn HAL, som om bord i et romskip langt ute i verdensrommet begynner å opptre med menneskelig vilje og følelser, og nær utsletter menneskene på romskipet. I noen ulidelig spennende scener klarer det gjenværende mennesket Dave å dekoppe HAL slik at den «dør», mens den desperat ber om nåde. Det er slik jeg husker det.

Men i Tromsø møtte jeg et miljø hvor det var folk som visste langt mer om KI. Det dukket opp ei bok med tittel som *What Computers Can't Do*, og til og med kolleger som skrev bok på norsk med omtrent samme tittel, og man fikk høre om forskningsmiljøer som skulle lage språkoversettere og til og med maskinelle sjakkspillere som skulle slå de beste i verden, og dette skulle de klare på fem år, bare de fikk nok penger. I det miljøet som jeg møtte i Tromsø, var det skepsis til de forsøk på

å skape «kunstig intelligens» som foregikk.

Så gikk årene. På 1990-tallet dukket KI opp igjen på naboinstituttet, som nå het «Informatikk», og fagfeltet KI kaltes «Ekspertsystemer». Jeg leste også om noe som het «Neural Networks», og det ble snakket om «Maskinlæring»; det dukket til og med opp en ny studieretning om dette på fysikk-instituttet. Alt dette virket som spennende ting, men for min del valgte jeg å konsentrere meg om det jeg selv drev med, og lot meg slett ikke distrahere av at det fantes andre spennende tema.

Men plutselig, nå på 2020-tallet, så kan det se ut som KI er her! Norsklærere er bekymret fordi det ikke lengre er mulig å gi elevene stiloppgaver og stole på at de selv har skrevet det som de leverer inn. KI-modellen ChatGPT, for eksempel, som er allment tilgjengelig og til og med kan skrive på norsk, kan lage mer enn fullgode besvarelser for elevene. ChatGPT ser ut til allerede å være velkjent for ungdom under utdanning, og sjøl har jeg prøvd den under forberedelsen av denne teksten. For eksempel, plutselig ble jeg i tvil om «nevrale nettverk» (mer omtalt nedenfor) er en særskilt maskin-arkitektur, slik at det er spesielt konstruerte maskiner som må brukes, eller om det kan programmeres på vanlige maskiner, og jeg fikk et glimrende svar fra ChatGPT! Vanlige maskiner kan absolutt brukes, men de må

støtte en del matematiske operasjoner, slik de fleste maskiner gjør.

Boka som skal omtales, handler om alt dette og mye, mye mer. Det er en populærvitenskapelig tekst, hvor forfatteren ønsker å formidle fagområdet KI og dets utvikling til alle interesserte lesere. Inga Strømke er fysikk-utdannet, og hun har siden 2021 vært ansatt ved Norwegian Open Artificial Intelligence Lab (NAIL) ved NTNU i Trondheim, ifølge Wikipedia. Hennes fagområder oppgis på Wikipedia som «maskinlæring, kunstig intelligens, og KI-etikk». Boka har allerede vært i salg en stund, og den er blitt meget godt mottatt. Den ble tildelt Brageprisen for beste norske sakprosa bok i 2023, og Strømke mottok Forskningsrådets formidlingspris (kr. 500 000) samme år. Hun er også for mange kjent som deltaker i radioprogrammet «Abels tårn».

Og la det være sagt med en gang: Jeg liker denne boka! Som det vil framgå av innledningen ovafor, så har jeg absolutt ingen forutsetning for å vurdere den faglige gehalten av den. Først og fremst vil jeg framheve den sterke formidlingsviljen og entusiasmen som boka er gjennomsyret av. Her finner man ikke store vyer om hva man skal få til de nærmeste fem år bare man får nok penger; framstillingen er kritisk og reflekterende, men først og fremst: formidlende. Hun dekker en lang rekke tema, blant annet skriver hun veldig bra om den historiske utviklingen som jeg innledningsvis prøvde å gi min subjektive opplevelse av. Men hun omtaler pionerene fra 1950–60-tallet langt mer respektfullt enn det som jeg selv fikk inntrykk av den gangen, i det miljøet som jeg da var i.

Selv om Strømke skriver godt, så er ikke boka nødvendigvis lettlest. Hun viker ikke tilbake for å gi seg i kast med å formidle ganske abstrakte ideer, og hun gjør det ofte på veldig oppfinnsomt vis. Ett eksempel er avsnittet «Å klippe gress i tre dimensjoner» (s. 231) og de etterfølgende avsnitt. Hun lærer oss også at de to disiplinene som blir kalt *Nevrale Nettverk* og *Maskinlæring*, har hatt en svært avgjørende betydning siden 1990-tallet, og har ført faget dit som det er i dag. Hun forteller kortfattet om utviklingen av fagområdet nevralt nettverk. Dette er en svært interessant historie. Maskinlæring synes for meg å være noe mer begripelig enn nevralt nettverk, som behandles ganske kortfattet, noe som antakelig er en nødvendighet i dette formatet. Maskinlæring er å la maskinen prøve og feile, og «belønnes» når det den gjør er mer riktig enn før, og dette gjøres på enorme mengder data.

Forfatteren har et stort lager av fortellinger/anekdoter fra utviklingen av KI. Her skal vi bare ta med ett eksempel: Et KI-program som var ment for chatting på Twitter, fikk spørsmålet: «Skjedde

Holocaust?». Og svaret som maskinen ga, var: «Det er oppdiktet». Virkelig et skudd for baugen for programmererne (for ikke å snakke om firmaet!) som hadde utviklet denne chatte-roboten. De fant fort ut hva som hadde ført galt av sted, men det skal ikke røpes her, les heller boka.

Med disse verktøyene: maskinlæring og nevralt nettverk, pluss massiv regnekraft, som også er en viktig faktor i utviklingen av KI, klarer man å lage «modeller» (som KI-programmene kalles), hvor det ikke er mulig uten videre å «skjønne hvordan maskinen (modellen) tenker», selv for dem som har utviklet den. Strømke forteller oss at dette er blitt ett av hennes egne forskningsfelt, «eXplainable Artificial Intelligence» (XAI). Jeg får en følelse av at bruken av maskinlæring har brakt KI forbi det stadiet som var gjenstand for skarpsindig kritikk om «hva datamaskiner ikke kan gjøre» på den tida jeg kom til Tromsø.

Så hva med roboten HAL i Stanley Kubricks film? Nei, man får et klart inntrykk av at feltet fortsatt er langt unna slikt, heldigvis! Forfatteren drøfter spørsmålet om maskinene kan oppnå menneskeliggende intelligens og atferd flere steder. På s. 112 har hun benevnelsen «vi biologiske maskiner», og fra dette fristes jeg til å si at vi er blitt slik som vi er av 3–4 milliarder år av «biologisk maskinlæring» som vi kaller evolusjon, samt 150 000 år av «kulturell maskinlæring». Min tro er at maskinene ikke vil komme dit, men Strømke drøfter også dette, jordnært og kunnskapsbasert. Og ikke minst er hun opptatt av etiske sider av utviklingen og behovet for god lovgivning på dette området.

Boka anbefales til alle som ønsker å danne seg et inntrykk av hva som foregår på dette viktige feltet. Den fordrer ingen forkunnskaper. Noen få matematiske begreper forklares enkelt underveis (for eksempel begrepet «matrise», men bare til bruk i billedbehandling; ingen matrisemultiplikasjon), og det er ingen formler eller ligninger. Dog vil jeg tro at boka er mest tilgjengelig for dem som allerede har noe utdanning eller kunnskap i ett eller flere realfag, ved at de vil kunne være noe mer vant med abstrakte ideer enn andre som ikke har vært gjennom slik utdanning.

Bare én kritisk merknad til slutt: Jeg savnet ei stikkordliste. Det hadde de aller fleste sakprosa bøker før. I det siste har jeg sett flere hvor dette mangler. Stikkordlista er nyttig til mange ting, for eksempel om det er noe man har lest om tidligere i boka som man har glemt når det igjen dukker opp. Da hjelper stikkordlista oss med å finne tilbake til det.

*Einar Mjølhus, pensjonert professor i
anvendt matematikk, Norges Arktiske
Universitet avd. Tromsø*

Bokomtale:

Terje Lyngstad:
Kristian Fossheim: Jølstring på vitenskapens verdsarena

ISBN: 978-82-8240-195-1

Selja forlag, 2023

319 sider

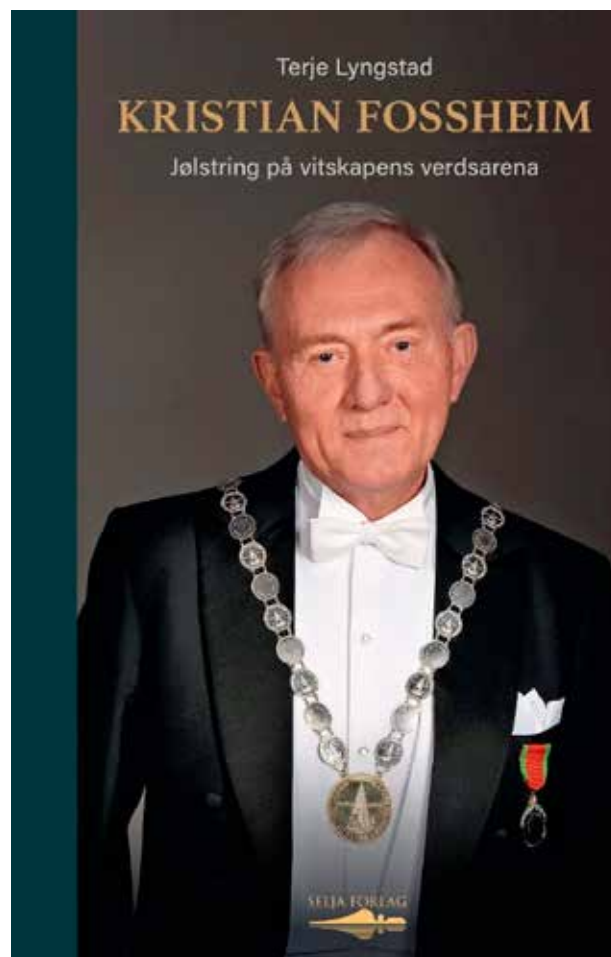
Veil. pris: 348 kr

Jeg har hatt stor glede av å lese den fine boken Terje Lyngstad har skrevet om Kristian Fossheim. Boken innledes med å fortelle om Fossheims barndom og ungdom på en liten gård i Jølster. Dette er på mange måter en solskinnshistorie om hvor mye Fossheim har vært med på og fått til både familiært og som fremragende fysikkforsker, lærer, administrator og formidler. Fossheim har i mange sammenhenger tatt ansvar og blitt en lederskikkelse. Han har ikke søkt makt, men er ofte blitt bedt om å lede.

Det legges heller ikke skjul på at han fanget gullfuglen da han fikk sin Elsa. Vi blir også tatt med i dramatikken da Fossheim fikk livstruende kreft. Men det gikk til slutt bra!

Det er også fascinerende å lese om hvordan det noen ganger har gått som på skinner, mens det i andre sammenhenger har vært en kamp.

For en person av Fossheims format er det mest interessante hvilke tanker han har gjort seg underveis. Derfor er det fint at Lyngstad har gjengitt artikler og taler som Fossheim har bidratt med ved spesielle anledninger. En av dem er en artikkel publisert i *Syn og Segn* i 1988 som jeg fant så interessant, viktig og aktuell, at jeg kontaktet Fossheim og Lyngstad for å høre om det var OK at vi publiserte den i *Fra Fysikkens Verden*. Og det var det. Så den kan du lese på side 15.



Kristian Fossheim var preses i Det Kongelige Norske Videnskapers Selskab (DKNVS) i tre år, 2011–2013. Her er han avbildet med preseskjede og Gunnerusmedaljen.

Foto: Titt Melhuus

Det er også interessant å få et blikk bak kulissene i spesielt viktige hendelser både når det gjelder forskning og ledelse. Norges nyeste forskningspris er Gunnerusprisen i bærekraft som deles ut av Det Kongelige Norske Videnskapers Selskab (DKNVS) og NTNU i Trondheim. Den ble opprettet i 2011 etter mangeårig innsats fra Kristian Fossheim og gode medarbeidere.

Vi får også bli med på den store 250 års feiringen av DKNVS i 2010. Fossheim var leder av arrangementskomitéen og ledet også gjennomføringen av jubileet som ble feiret over flere dager med flere store kulturarrangementer.

Boken rundes av med at Kristian Fossheim ble utnevnt til Ridder 1. klasse av Den Kongelige Norske St. Olavs Orden i 2020. Igjen er det fint å få lese noen av talene som ble holdt ved denne anledningen.

Takk både til Kristian Fossheim og Terje Lyngstad for en bok som både er en gledesspreder – og som kan inspirere, og styrke troen på kraften i det gode!

*Øyvind Grøn, professor emeritus,
OsloMet – Storbyuniversitetet*



Aldritt Scaria Madathiparambil

Institutt for fysikk, NTNU

PhD-avhandling: «Multiscale X-ray tomography for shale microstructure and mechanical behaviour»

Hovedveileder: professor Dag W. Breiby

Medveileder: dr. Basab Chattopadhyay og dr. Pierre Cerasi (SINTEF)

Aldritt Scaria Madathiparambil forsvarte 25. januar 2024 sin doktoravhandling. Å studere leirskifer og andre toppbergarter er viktig for å framskaffe fundamental forståelse av deres fysiske egenskaper på mikroskala, inkludert mekanisk respons og permeabilitet for væsker og gass. Å forstå pore-fysikken av skifer-formasjoner er viktig blant annet for CO₂-lagring og for opprydding i forurensede grunnvannsreservoar – begge tema som er viktige for det norske samfunnet.

Leirskifer er, kanskje overraskende, et materiale som er vanskelig å måle og modellere, ettersom materialene har flere karakteristiske «hierarkiske» lengdeskalaer, mange mineraler er involvert, porøsiteten er lav og strukturen er utpreget anisotrop med sedimentære lag.

Aldritts avhandling handler om å bruke avansert *in situ*

røntgen-CT for å bedre forstå leirskifer. CT er ikke-destruktiv, gir 3D-informasjon, og kan brukes til å studere prøver inni komplekse prøvemiljø med høy temperatur og trykk for å gjenskape realistiske grunnforhold. For å lagre CO₂ i gamle olje- eller gassreservoar er det viktig å kunne forutsi stabiliteten på lang tidsskala. Ved å kombinere mekanisk testing med CT har Aldritt studert den mekaniske responsen til leirskifer på mikronivå.

Et særlig interessant resultat er indikasjoner på at den tilsynelatende elastiske responsen til leirskifer under kompresjon faktisk innebærer en rekke små irreversible deformasjonsprosesser.

Alle de fire artiklene i avhandlingen er basert på eksperimenter med synkrotronstråling gjort ved European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) i Grenoble.



Kine Ødegård Hanssen

Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

PhD-avhandling: «Effects of perineuronal nets on conductive and capacitive properties of neurons: Computational studies»

Veiledere: professor Anders Malthe-Sørensen, professor Gaute T. Einevoll, professor Marianne Fyhn og dr. Geir Halnes

Perinevralt nett er proteinstrukturer som omkapsler enkelte nevroner i hjernen. De har blitt knyttet til hukommelse, og det er foreslått at de virker som fysiske barrierer, samt at de påvirker egenskaper til celledmembranen. Siden budsjett og teknikaliteter kan begrense mulighetene til å foreta eksperimenter, kan simuleringer hjelpe oss å forstå nettene bedre.

På liten skala kan vi simulere diffusjon inne i nettene ved hjelp av grovkornede molekylærdynamikk-simuleringer. Dermed kan vi utlede resistansen til nettene, som indikerer hvor gode barrierer nettene utgjør. Hvis nettene er gode barrierer vil avstanden mellom ioner på innsiden og utsiden av

cellen minke. Dermed vil kapasitansen reduseres. Denne endringen kan endre hvordan nevronet sender elektriske signaler. Kapasitansen er en parameter i modeller av hele nevroner, i likhet med konduktanser gjennom kanaler i celledmembranen.

I denne avhandlingen bruker Kine Ødegård Hanssen disse virkemidlene til å studere egenskaper ved nettene. Hun finner en redusert diffusjon i nettene, men ser at nettene resistans er liten sammenlignet med membranresistansen. Hun simulerer også nevroner med og uten nett, og finner at kapasitansen alene ikke kan redegjøre for observasjoner gjort i litteraturen.

RETURADRESSE:
FRA FYSIKKENS VERDEN
FYSISK INSTITUTT, UNIVERSITETET I OSLO
BOKS 1048 BLINDERN
0316 OSLO
NORGE

ISSN-0015-9247

Styret i Norsk Fysisk Selskap

President

Professor Sunniva Siem, Fysisk institutt, UiO, Kjerne- og energifysikk
sunniva.siem@fys.uio.no

Visepresident

Forsker Hilde Nesse, Institutt for fysikk og teknologi, UiB
Birkelandsenteret for romforskning
hilde.nesse@uib.no

Styremedlemmer

Rom-, plasma- og klimafysikk: Førsteamanuensis Audun Theodorsen, Institutt for fysikk og teknologi, UiT

Subatomær fysikk og astrofysikk: Professor Håvard Helstrup, Institutt for datateknologi, elektroteknologi og realfag, HVL

Industri- og energifysikk: Professor Jon Samseth, Institutt for produktdesign, OsloMet

Akustikk og optikk: Professor Torbjørn Skauli, Institutt for teknologisystemer, UiO

Biofysikk og medisinsk fysikk: Professor Pawel Sikorski, Institutt for fysikk, NTNU

Kondenserte fasers fysikk med atomfysikk: Professor Luiza Angheluta-Bauer, Fysisk institutt, UiO

Leder av Norsk Fysikklærerforening: Lektor Kaja Nordby, Kongsbakken vgs.

Vara

Professor Magnus Borstad Lilledahl, Institutt for fysikk, NTNU

Adresse

Norsk Fysisk Selskap
Fysisk institutt, UiO
Boks 1048 Blindern
0316 Oslo

Sekretær

Stipendiat Andreas Halkjelsvik Mjøs, Fysisk institutt, UiO
E-post: nfs.styret@gmail.com
Bankgiro: 7878.06.03258
Org.nr.: 940 340 829

www.norskfysisk.no

Bedriftsmedlemmer

Vi takker for støtten fra
våre bedriftsmedlemmer:



UNIVERSITETET
I OSLO



UNIVERSITETET I BERGEN



UiT Norges
arktiske universitet

