

Fra Fysikkens Verden

NR.3 – 2023
85. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP

An abstract, colorful visualization of light waves and particles. The image features a central bright yellow-orange point from which concentric, glowing rings of light emanate. These rings are composed of various colors, including green, blue, and red, creating a complex, swirling pattern. The overall effect is reminiscent of a particle collision or a complex wave phenomenon.

Lysets natur:
**Partikler
eller bølger?**

Les også om:

■ Manhattan-prosjektet

■ Programmering i skolefysikken

■ Elektromagnetisk spektrum

■ Krise for fysikk 2

NR.3 – 2023

85. 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:

Pixabay/The Digital Artist

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 lignende 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

Referat fra Fysikermøtet 2023 <i>Trygve Buanes</i>	28
Reisebrev fra Den internasjonale fysikkolympiaden <i>Thomas Frågåt</i>	32
Artikler	
Fysikken bak Manhattan-prosjektet <i>Øyvind G. Grøn</i>	34
Er $E = mc^2$ og partikkelmodellen for lys allment gyldige? <i>Asle Rein og Øyvind G. Grøn</i>	42
Bølge-partikkel-dualismen for lys <i>Arnt Inge Vistnes</i>	47
Skolefysikk	
Demo av elektromagnetisk spektrum <i>Tor Hjalmar Johannessen</i>	54
Programmering i skolefysikken: Hva kan vi lære av masteroppgaver i fysikkdidaktikk? <i>Ellen K. Henriksen og Berit Bungum</i>	56
Krise for fysikkfaget i skolen <i>Fredrik Gade</i>	62
Personomtaler	
Nye doktorer	64
Minneord: Tore Amundsen <i>Jann A. Holtet, Truls Norby, Eivind Osnes</i>	67

FRA REDAKTØRENE

Først må jeg få si tusen takk for at jeg har fått det ærefulle verv å være medredaktør i *FFV* sammen med Øyvind Grøn. Dette er det andre nummeret jeg er med på, og det har så langt vært en fornøyelse!

Gjennom en lang karriere som fysikklektor i skolen og senere professor i fysikkdidaktikk, har jeg vært opptatt av fysikkfaget generelt, og spesielt som undervisningsfag både i skolen og på universitetet. Mitt håp er derfor at jeg kan inspirere til mer undervisningsrettet og fysikkdidaktisk stoff i *FFV*. Norsk fysikklærerforening er den største faggruppen i Norsk Fysisk Selskap, så det skulle jo bare mangle.

I dette nummeret er det mye stoff for interesserte fysikklærere, og selvsagt for alle andre fysikere også. Ellen K. Henriksen og Berit Bungum skriver om programmering i skolefysikken. De skriver at masteroppgaver i fysikkdidaktikk kan bidra til å utvikle praksis i skolen, og oppgavene om programmering som de omtaler, presenterer både teoretiske perspektiver og gjennomarbeidede undervisningsopplegg til bruk i klasserommet.

Er det krise i fysikkfaget i skolen? Tall viser at det blir færre som tar fysikk 2 i videregående skole, og det er det grunn til å være

bekymret for, skriver Fredrik Gade.

Hva er *egentlig* lys? I dette nummeret presenterer vi første del av en to-delt artikkel der Arnt Inge Vistnes drøfter bølge-partikkel-dualismen for lys. Vistnes poengterer at det ikke er konsensus blant fysikere i dag verken om tolkning av bølge-partikkel-dualismen eller tolkning av kvantefysikken. Han mener dette er et alvorlig problem for fysikken. Selv er han av den oppfatning at lys best kan beskrives som bølger, og at klassifiseringen av fotoner som elementærpartikkel er feil. Asle Rein og Øyvind Grøn stiller spørsmålet: Er $E = mc^2$ og partikkelmodellen for lys allment gyldige? Vi håper disse artiklene vil inspirere til debatt i *FFV*.

Inspirert av filmen om *Oppenheimer*, skriver Øyvind Grøn om hovedpunktene i Manhattan-prosjektets historie og forhistorie, og den grunnleggende fysikken bak prosjektet.

Vi har også en rapport fra den internasjonale finalen i fysikk-OL. Det er Norsk Fysisk Selskap/Fysikklærerforeningen som er ansvarlig for Fysikkolympiaden. De siste omtrent 25 årene har Skolelaboratoriet ved Fysisk institutt ved UiO hatt ansvar for den praktiske gjennomføringen. Nå går stafettpinnen til Universitetet i Stavanger. Vi ønsker lykke til!



Øyvind G. Grøn



Carl Angell

Fysikermøtet 2023

Etter at Fysikermøtet i 2021 måtte holdes på nett, var det heldigvis klart for et ekte møte i år. Institutt for Fysikk og Teknologi med førsteamanuensis Hilde Nesse i spissen arrangerte årets Fysikermøtet i lokalene til VilVite på Marineholmen i Bergen. Denne lokasjonen ga muligheten til en spesiell sosial samling på slutten av første dag som vi kommer tilbake til senere.

Møtet gikk av stabelen 9.–11. august. Programmet var spekket med spennende innlegg om blant nye funn med James Webb-teleskopet, vår mulig feilaktige beskrivelse av bølge/partikkel-dualitet, fysikk som sensorisk opplevelse, energi, protonterapi og den spennende nye posten om formidling, hvor deltakerne på fysikermøtet fikk stemme frem en vinner. Nytt av året var også en egen parallellsesjon for fysikkdidaktikk, som hadde mange spennende poster.

Åpningsforedraget ble holdt av Torkild Jemterud – kjent som programleder i Abels tårn som sendes på NRK Radio. Jemterud fortalte at han hadde forventet å bli bedt om å snakke om hvordan man formidler fysikk på en god måte, men hadde fått vite at han kunne få velge selv hva han ville snakke om. Det vi fikk høre om da var engasjerende og personlige historier fra hans møte med to Nobelprisvinnere – Roger Penrose og Anton Zeilinger. Men selvfølgelig handlet foredraget hans også mye om formidling, det var tross alt i det øyemed han traff de to Nobelprisvinnerne. Jemterud pekte på at som journalist sto han fri til å stille naive spørsmål og dermed komme inn på mer spekulative ideer enn det fysikere oftest diskuterer. Spesielt fattet han interesse for tolkningen av kvantemekanikk, og veien til en eventuell forening av kvantemekanikk og generell relativitet. Vi i publikum ble spurt om hva vi tror er svaret på et av kvantefysikkens store spørsmål, og et rungende flertall mente at det måtte en helt ny fysisk teori til før vi kan finne ut av dette.

Et relevant tema for innlegget var sorte hull, og i en bisetning snappet jeg opp uttrykket «hundeanus-teoremet», som jeg naturligvis måtte google. Det viser seg å være en kreativ tolkning av det mer kjente «Hairy dog»-teoremet som enkelte lesere kanskje kjenner til. Jemterud kastet også lys over andre filosofiske tema: Er matematikken «funnet» eller «oppfunnet»? Matematikere og platonikere vil kanskje aldri enes her?

På spørsmål fra publikum snakket Jemterud avslutningsvis om følelsen av å snakke med store

tenkere, som forstår så mye mer enn en selv, når en selv ikke har en doktorgrad og 50 års fartstid i gamet. På klokt vis reflekterte han over hvordan glede for faget, kreativiteten og utfordringen som kan ligge i å formulere seg enkelt, og ikke minst er det å dele nysgjerrighet bringer folk av ulike bakgrunner sammen i slike møter. Tankene mine vandret til den gamle, jødiske fortellingen om at det er spørsmålene som forener oss. Stemningen for møtet var satt!

Som seg hør og bør på et møte for, av og med fysikere vekket åpningsinnlegget noe harme hos en av tilhørerne, som tok høylytt til orde for at Jemteruds innlegg var galt på mange måter. Litt temperatur hører med, og resten av møtet gikk deretter for seg uten de største dispuettene (forfatterene av denne saken bekjent i alle fall), og masse interessante ideer, tanker og innlegg fikk florere i trygge rammer.

Protonterapi

Både i Bergen og Oslo er senter for strålebehandling av kreft med protoner under bygging, og til å snakke om dette hadde arrangørene fått tak i Camilla Hanquist Stokkevåg fra Haukeland universitetssykehus og UiB. Protonterapi er ikke en ny idé – Stokkevåg tok oss gjennom historien som går tilbake til 1946 da denne formen ble foreslått, via kliniske tester på 1950-tallet og endelig behandling av pasienter fra 1990-tallet. Og nå er det Norge sin tur. Selv om protonterapi er en relativt etablert form for strålebehandling allerede er det fremdeles mye spennende for fysikere å jobbe med rundt dette. Som eksempler på dette fortalte Stokkevåg om noen av forskningsprosjektene gruppen i Bergen er involvert i. Fordelen med protonstråling fremfor fotonstråling, som er det som brukes i Norge nå, er muligheten for større strålingsdose levert til kreftsvulsten sammenlignet med det som treffer omkringliggende vev.

Men her ligger også utfordringen – når dosen som leveres er så stor er det viktig å treffe riktig. Derfor jobbes det mye med å finne gode metoder for rekkeviddeverifisering. En annen, og relatert problemstilling, er at det har vist seg at den relative biologiske effekten av protonstråling ikke er konstant, men varierer avhengig av blant annet vevstype. For å kunne planlegge dosering riktig og unngå for mye bestråling av omkringliggende vev, må denne variasjonen kartlegges bedre.



Møteleder Nesse og NFS-president Siem.



Jemterud samtale med store tenkere.

Energi

Torsdag var energi et gjennomgående tema. Dagen startet med Dhayalan Veluthapiallai fra Høgskulen på Vestlandet som snakket om betydningen av solenergi i fremtidens energisystem, og arbeidet med solceller som forskningsgruppen hans gjør. Solceller utgjør i dag bare en liten del av verdens energiforsyning, men innstrålt energi er så stor at potensialet er enormt. Veluthapiallai gjorde et poeng av at også i land som Norge som ligger langt fra ekvator er potensialet stort. Vi har til og med den fordelen at den fotoelektriske konverteringen er mer effektiv ved lavere temperaturer, slik at solceller i Norge kan brukes med høyere virkningsgrad enn i varmere land.

Forskningsgruppen til Veluthapiallai arbeider med å få frem nye typer solceller som kan være et nyttig komplement til silisiumsolcellene som er mest brukt, enten ved å kunne lages billigere, ha høyere virkningsgrad eller ved å kunne brukes til anvendelsesområder der konvensjonelle solceller ikke er egnet. Et eksempel han viste til var solceller basert på perovskitt. Slike solceller kan potensielt males på overflater og på den måten plasseres der vanlige solceller ikke kan brukes. Perovskitt-solceller kan også kombineres med vanlige silisium-solceller ved å legges på som et ekstra lag som absorberer bølgelengder som silisium ikke kan utnytte.

I ettermiddagssesjonen sto kjerneenergi i fokus. Ole Christen Reistad, avdelingsleder for strålevern og sikkerhet i Agilera Pharma og tidligere leder for JEEP II-reaktoren ved Institutt for energiteknikk, startet med å ta oss gjennom den historiske utviklingen av kjerneenergi og Norges rolle som et av de landene som tidlig fikk etablert en forskningsreaktor. Videre snakket han om muligheter og utfordringer ved bruk og utbygging av ny kjerneenergi. Eksisterende kjerneenergi er dominert av reaktorer som er 30 år og eldre, og som bruker en brenselcyklus uten gjenvinning. Dette gir både en dårligere ressursutnyttning og et større avfallspro-



Veluthapiallai demonstrasjon av nye solceller.

blem enn det som burde være nødvendig. Det er forsøk på å få til en brenselcyklus med gjenvinning, men dette er utfordrende i kommersiell skala.

Neste taler var Esben Klinkby fra det danske firmaet Seaborg Technologies. De har satt som mål å produsere små kjerneenergi-reaktorer basert på saltreaktorer. I slike reaktorer brukes smeltet salt i stedet for vann i den primære kjølekretsen. Denne teknologien har integrerte sikkerhetsmekanismer som gjør det enklere, og dermed potensielt billigere, å lage kraftverk som tilfredsstillere sikkerhetskravene man må stille. Det er likevel en del tekniske utfordringer som må løses før slike saltreaktorer er klar for kommersiell bruk.

Ettermiddagen ble avsluttet med en paneldebatt ledet av Arne Kristoffersen (UiB), der panelet besto av Reistad og Klinkby, samt Dieter Röhrich (professor i kjernefysikk, UiB) og Johnny Hesthammer (leder for Norsk Kjerneenergi AS). Om det ikke ble enighet om hvorvidt Norge bør satse på utbygging av kjerneenergi, fikk vi i hvert fall godt belyst både



Curtis-Lake James Webb teleskopet

muligheter og utfordringer. Interessant nok ga diskusjonen inntrykk av at for de som ønsker å få til kjernekraftutbygging, så er de politiske utfordringene vel så store som de teknologiske.

James Webb-teleskopet og spektroskopi

I tillegg til innleggene med energifokus, ga Emma Curtis-Lake fra University of Hertfordshire en introduksjon til mulighetene – og de første resultatene – NASAs nye romteleskop James Webb Space Telescope (JWST) har gitt oss i utforskningen av universet. JWST ligger forholdsvis stabilt i Lagrange-punktet utenfor jorden, og lar oss observere galakser og strukturer fra helt tilbake til universets tidligste barndom ved å observere i den infrarøde delen av spekteret. Dette gjør blant annet at det kan brukes til å studere galakser lenger tilbake i tid enn noe tidligere teleskop har kunnet gjøre, fordi lyset fra så gamle galakser har blitt rødforskjøvet til å ligge utenfor det synlige spekteret før det når frem til oss. Nettopp dette med å studere de eldste galaksene har skapt en del overskrifter siden det kunne se ut til at store galakser ble dannet for tidlig til å passe sammen med vår modell av universets utvikling. Curtis-Lake viste hvor utfordrende analysen av dataene kan være, og at en bedre analyse enn de som lå til grunn for de sensasjonelle overskriftene viste at galaksene ikke var like gamle som først antatt.

JWST har også kapasitet til å studere objekter som ligger nærmere på oss – blant annet er det store forventninger til hva vi kan lære om atmosfærekjemien på eksoplaneter, og om dannelsen av stjerner og solsystemer. Ved hjelp av 100 mikrolukkere som kan styres individuelt kan teleskopet også brukes til å observere eksoplaneter direkte ved å blokkere lyset fra moderstjernen. Prosjektet inviterer også publikum til å utforske og analysere bildene på egen-



Kersting om fysikk og sanser.

hånd, og kan finnes blant annet ved å følge denne linken: <https://jades-survey.github.io/viewer/>

Kropp og sanser for økt forståelse

Møtets siste dag startet med møtets hovedinnleggsholder Magdalena Kersting. Hun er fysikkdiraktiker med hjerte for den kroppslige dimensjonen i læring og tenking.

Kersting argumenterer for at kroppslig situert (plassbasert) tenking beriker en god fysikkforståelse, og gir oss mulighet til å forstå fysikk på ulike måter. Hun peker på at kognitive prosesser ikke er begrenset til hjernen, og at kropp og sanser er aktive deltakere i livene våre – også den delen av livene vi lever inne i klasserom og fysikksaler. Et eksempel er høyrehandsregelen, hvem har ikke vridd og vendt på høyrehånden for å bli enig med seg selv om hvilken vei magnetfeltet nå peker?

I våre første leveår utvikler vi en intuitiv forståelse for fysiske fenomener fra kroppslige erfaringer. Gravitasjon og akselerasjon; ulike former for krefter; lyd, lys og temperatur – alle eksempler på fysiske fenomener vi sanser og erfarer og kan bygge en forståelse fra. Også senere i livet spiller kroppen en rolle, og Kersting viser til Richard Feynmans gestikulering av «jiggling of atoms» og syn på det å skrive som å tenke på papiret, og hvordan vi med enkle grep som for eksempel tautrekking kan få en meningsfylt forståelse for Newtons lover. Ulike former for samspill mellom sansene og omgivelsene kan altså styrke vår forståelse, og vi gleder oss til å høre mer fra Kersting om dette temaet.

Konkurransen på VilVite

Første møtedag ble rundet av med et besøk i utstillingen på VilVite. For å gjøre besøket mer engasjerende var deltakerne delt inn i lag som skulle konkurrere mot hverandre i oppgaver knyttet til ulike elementer i utstillingen. Hvem er best til å løse ulike pusleoppgaver? Hvem er flinkest til å sykle opp ned? Vinnerne ble tatt frem og fikk stor applaus under første fellesesjon på dag to.



Vinnere av Martin Landrøs pris.

Parallellsesjoner

Alle tre dagene møtet varte var satt av tid til parallellsesjoner for de ulike faggruppene i Norsk fysisk selskap. I parallellsesjonene er det ofte yngre krefter, både mastergradsstudenter og doktorgradsstudenter, som slipper til. Begge forfatterne tilbrakte mest tid på undervisningsseksjonen – noe som interessant nok var tilfellet også for svært mange andre av møtedeltakerne – og fanget opp mye spennende her. Nils-Erik Bomark argumenterte for at bølge-partikkel-dualitet kanskje ikke er den beste måten å introdusere elever for teorier om lysets natur, mens fysikklærere i publikum trakk inn den historiske tilnærmingen som et motiverende aspekt for elevene, selv om konseptet i seg selv kanskje kan skape litt forvirring. Senere delte Reidun Renstrøm historiske drypp fra nettopp den spennende historien om Einsteins lyskvantteori, og hvordan denne møtte motstand i fysikkmiljøet. Særlig Niels Bohr var uttalt kritisk, og da hypotesen ble bekreftet av Compton noen år senere kom det en kort og slunken beklagelse fra Bohr.

Den ene undertegnede holdt også et innlegg om bruk av poesi som arbeidsmåte i fysikkundervisningen, som til tross for lite søvn natten før så ut til å falle i god jord hos publikum.

Prisutdeling

Siste punkt på programmet før møtet ble avsluttet og stafettspinnen ble sendt videre til NTNU som skal arrangere Fysikermøtet i 2025, var utdeling av priser. Undervisningsprisen ble tildelt Jo Seim fra Ås videregående skole som dessverre ikke var til stede og derfor ikke kunne motta prisen personlig. Martin Landrøs pris for beste mastergradsoppgave ble tildelt Thorvald Molthe Ballestad (NTNU) og Håvard Kjellmo Arnestad (NTNU). Ballestad har gjort et teoretisk arbeid med effektive Dirac-ligninger i topologisk faststoffysikk der han gjorde beregninger på en transversal termoelektrisk effekt i en klasse av semimetaller. Arnestad har gjort en simuleringsstudie for ultralydtesting som



Formidlingsprisen.

kan brukes ved gjennomrørs brønnlogging. Studien viste at en overflate kan sende ut lydølger også i det subsoniske domenet, noe som er i konflikt med den klassiske modellen som brukes på området. Denne oppdagelsen fikk en egen post på programmet i fysikermøtet, der Arnestad sin veileder, Erlend Magnus Vigen, viste at den klassiske modellen gjør en tilnærming som ikke alltid er gyldig. Ved å ta bort denne tilnærmingen oppnås resultater som er i overensstemmelse med resultatene fra simuleringsstudien.

Nytt av i år var utdelingen av en formidlingspris. Juryen hadde plukket ut to nominerte – Ida Torkjellsdatter Storehaug, doktorgradsstudent i kjernefysikk ved UiO, og Josephine Alessandra Salice, doktorgradsstudent i romfysikk ved UiB – og vinneren ble kåret gjennom en avstemning blant deltakerne på Fysikermøtet. På første dag av Fysikermøtet fikk kandidatene presentere seg selv og sitt formidlingsarbeid. Storehaug driver en podcast kalt «God fysikk» der målgruppen er de som allerede kan litt fysikk, men ønsker å forstå mer. Hun fortalte hvordan denne podcasten har blitt et springbrett til formidling gjennom andre kanaler, blant annet radioprogrammet Abels Tårn på NRK. Salice deltok – og kom til finalen i Forsker Grand Prix som arrangeres som en del av Forskningsdagene. Også hun opplevde at en form for formidling ble et springbrett til mer formidling, og har siden vært aktiv med blant annet skolebesøk på alle nivåer fra barneskole til videregående. Hun arbeider også med Språkrådet om å få laget en ordliste for fysikkord på norsk. Begge to var opplagt verdige kandidater til formidlingsprisen, og det var Ida Torkjellsdatter Storehaug som ble stemt frem som vinner.

Alt i alt var årets fysikermøte en spennende og innholdsrik affære i fine og inspirerende omgivelser på Marineholmen i Bergen.

*Trygve Buanes og Hanne Starfish Henningsen,
Høgskulen på Vestlandet*

Reisebrev fra

Den internasjonale fysikkolympiaden



Delegasjonen. På bildet fra venstre: Torbjørn, Jonas, Adrian, Anders, Heine, Zejia og Thomas. Øyvind var ikke til stede da bildet ble tatt.

År gikk Den internasjonale fysikkolympiaden (IPhO) av stabelen i Tokyo, Japan, 10.–17. juli. Norge var representert med fem deltakere, to lagledere og en observatør under olympiaden. Selv om de norske deltakerne alle gjorde en god innsats holdt det ikke til noen medaljer eller hederlige omtaler i år. Likevel satte ikke dette en stopper for det gode humøret.

Zejia He – Oslo International School, Adrian Dobbe Flemmen – Bergen katedralskole, Anders Skaret Johansen – Sandefjord vgs., Heine Hoff Brendstuen – Nord-Gudbrandsdal vgs. og Jonas Jørgensen Telle – Oslo katedralskole – hadde alle forberedt seg godt før den internasjonale finalen og leverte alle gode prestasjoner. I tillegg til at de øvde hjemme på egenhånd var de like før avreise samlet i to dager ved skolelaboratoriet ved Fysisk institutt ved Universitet i Oslo for å øve på oppgaver gitt ved tidligere internasjonale finaler. Spesielt viktig her var det å øve på eksperimenter for å kunne gjøre seg kjente med måleutstyr og hva som kreves av deltakerne under finalen.

De norske laglederne var Thomas Frågåt og Torbjørn Mehl. I tillegg hadde vi i år også med oss Øyvind Saanum Eithun som observatør. Observatørens rolle er å hjelpe laglederne med å oversette alle oppgavene fra engelsk til norsk, da dette ofte er en tidkrevende jobb.

De norske deltakerne syntes det var spennende å kunne delta. De merket med en gang at dette var en høytydelig konkurranse med mye kamerafolk, og hvor mange av deltakerne pyntet seg med kjole, dress eller nasjonaldrakt under åpningsseremonien. Likevel fant de masse tid til lek og moro i tillegg til alle utfluktene hvor de fikk oppleve Tokyo og den japanske kulturen. Deltakere fra forskjellige deler av verden møtte hverandre med smil og godt humør gjennom hele konkurransen. Som Anders Skaret

Johansen så fint uttrykte det: «Selv om det lå en konkurranse i bunnen, var det samholdet og kulturen som gjorde størst inntrykk».

Årets teoretiske oppgaver testet deltakerne i tre forskjellige temaer. Det første temaet handlet om partikler i jordsmonnet og her var deltakerne blant annet innom brownske bevegelser. I den andre oppgaven skulle deltakerne estimere massen til nøytronstjerner teoretisk ved å betrakte nøytronstjernene som store atomkjerner. Den tredje oppgaven handlet om fenomener forårsaket av overflatespenninger mellom vann og forskjellige objekter. De eksperimentelle oppgavene bestod av to oppgaver hvor deltakerne først skulle måle masse ved hjelp av resonanskarakteristikken for en harmonisk oscillator. I den andre oppgaven skulle deltakerne måle tykkelsen til en krystall ved å bruke dobbeltbrytning (*birefringence*). Alle oppgavene med løsninger finnes på den offisielle siden til IPhO 2023: <https://ipho2023.jp/en/contest/>.

I 2022 deltok Norge ikke i IPhO. Dette var første gang siden vi ble med i 1984 at Norge ikke har deltatt i den internasjonale finalen. Årsaken til dette var at IPhO opprinnelig skulle arrangeres av Belarus, men i siste liten ble IPhO omgjort til en online-konkurranse arrangert av Sveits i samarbeid med det internasjonale styret for IPhO. Det var da allerede bestemt at Norge skulle delta på den Europeiske fysikkolympiaden isteden. Denne konkurransen fant sted i Ljubljana i Slovenia. Det var derfor knyttet stor spenning til årets konkurranse.

Neste års internasjonale fysikkolympiade vil arrangeres av Iran i juli 2024.

Thomas Frågåt



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.



Figur 1. Bombingen av Hiroshima.

Fysikken bak Manhattan-prosjektet

Her presenteres hovedpunktene i Manhattan-prosjektets historie og forhistorie, og den grunnleggende fysikken bak prosjektet, som gikk ut på å produsere verdens første atombombe.

Øyvind G. Grøn OsloMet – Storbyuniversitetet

Omkring år 1900 hadde man en «plum pudding-modell» (også kalt Thomsons atommodell) av atomet der atomet ble beskrevet som en kuleformet pudding med rosiner, hvor positiv ladning var jevnt fordelt med elektroner lokalisert i det indre av puddingen.

I 1909 var den New Zealandske fysikeren Ernest Rutherford i England ved University of Manchester. Rutherford hadde en masterstudent Ernest Marsden som han ga i oppgave å studere hva som skjedde når han beskjøt en gullfolie med alfapartikler – den gang kjent som den positivt ladde og tyngste typen radioaktiv stråling.

Det var ventet at alle alfapartiklene skulle passere gjennom gullfolien, men Rutherford var åpen for alle muligheter og ba Marsden om å sette opp detektorer både på baksiden og forsiden av folien. Til deres store overraskelse ble det registrert at noen alfapartikler ble reflektert fra folien og traff detek-

torene på forsiden av folien.

Rutherford lette etter årsaken i to år før han i 1911 fant at forklaringen måtte være at «plum pudding-modellen» av atomet ikke kunne være korrekt. Atomets masse måtte være konsentrert i en positivt ladd kjerne, og når en alfapartikkel traff en slik atomkjerne ble den reflektert. De to atommodellene er illustrert i Figur 2.

Massedefekt og bindingsenergi

Partiklene – protoner og nøytroner – i en atomkjerne, *nucleus* på engelsk, kalles *nukleoner*. Massen til en atomkjerne er mindre enn den samlede massen til protonene og nøytronene som den består av. Differansen delt på antall partikler i atomkjernen kalles *massedefekten per nukleon*, Δm . Den tilsvarende energien, $E = \Delta mc^2$, kalles *bindingsenergien per nukleon*. Det er energien som må tilføres en atomkjerne for å frigjøre et nukleon fra kjernen.

Rutherford's atommodell var opprinnelig svært overraskende. Hvordan kunne en klump av protoner eksistere? Man visste jo at like ladninger frastøter hverandre. Dette problemet nevnte Rutherford i boken *Radioactive Substances and their Radiations* som han publiserte i 1913. Her skrev han: «Den positivt ladde kjernen i sentrum av et atom er et komplisert system i bevegelse som delvis består av kjernene til helium- og hydrogenatomer. Det ser ut til at de positivt ladde partiklene atomkjernene består av, tiltrekker hverandre for veldig små avstander (under 10^{-12} cm).»

Rutherford foreslo med andre ord at det eksisterer en *sterk kjernekraft med kort rekkevidde* som holder atomkjernene sammen.

Protonet ble oppdaget omkring 1920 av Rutherford og nøytronet i 1932 av James Chadwick. Kjernefysikk oppsto som en egen gren av fysikken i begynnelsen av 1930-årene, og egenskapene til forskjellige atomkjerner ble undersøkt i en rekke eksperimenter.

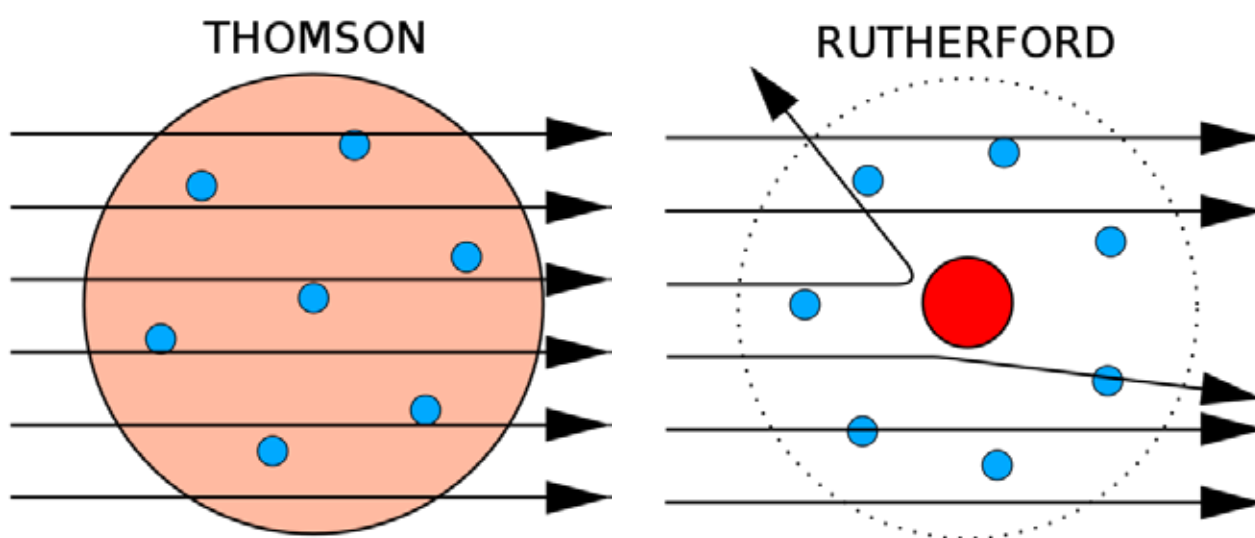
Da oppdaget man at bindingsenergien per nukleon varierte fra grunnstoff til grunnstoff. Dette er vist i Figur 4. Forklaringen på denne variasjonen er at i kjernene med størst bindingsenergi per nukleon er nukleonene pakket litt tettere sammen enn i de med mindre bindingsenergi. Dette kan forstås ved å tenke på et legeme i jordas gravitasjonsfelt. Jo lavere nede et legeme er i jordens

tyngdefelt, desto mer energi må det tilføres for å få det ut av tyngdefeltet og frigjøre det fra jorda. På tilsvarende måte er nukleonene i de kjernene som har størst bindingsenergi, litt lengre nede i kjernekraftfeltet, og det skal større energi til for å frigjøre dem fra kjernen.

Vi ser fra Figur 2 at bindingsenergien per nukleon øker opp til jern og avtar for tyngre atomkjerner. Dette betyr at ved å fusjonere (smelte sammen) lette grunnstoffer eller fisjonere (spalte) tunge grunnstoffer vil nukleonene være litt mer sammenpakket i de nydannede kjernene enn i de opprinnelige. De har tapt stillingsenergi i kjernekraftfeltet. Dette tapet av atomkjerne-energi, eller som det er vanligere å si – atomenergi, kan frigis og har vært utnyttet både til å lage bomber, atomkraftverk og atomdrevne båter.

La oss se på et eksempel: Forskjellen i massen til en heliumkjerne og partiklene den består av.

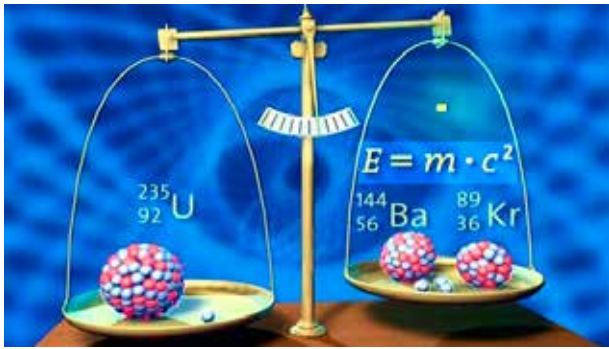
Massedefekten til helium er $4,0330u - 4,0026u = 0,0304u$, der $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg er den atomære masseenheden. Ved å bruke at $E = mc^2$ finner vi at energien i massen én u er 931,5 MeV (millioner elektronvolt). Dette betyr at bindingsenergien til heliumatomkjernen er 28,3 MeV. Bindingsenergien per nukleon er $28,3 \text{ MeV}/4 = 7,1 \text{ MeV}$. Siden $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ er bindingsenergien per nukleon uttrykt i Joule $1,14 \cdot 10^{-12} \text{ J}$. En heliumkjerne inneholder fire nukleoner. Bindingsenergien til en heliumkjerne er derfor $4,5 \cdot 10^{-12} \text{ J}$. En mol



Figur 2. Venstre: Thomsons plommepudding-modell av atomet. Høyre: Rutherford's atommodell med en positivt ladd kjerne omgitt av negativt ladde elektroner.

Grafikk: Wikimedia Commons

► Fysikken bak Manhattan-prosjektet



Figur 3. Urankjernen pluss et nøytron som brukes til å spalte den, har større masse enn massen av barium- og kryptonkjernene samt tre nøytroner som blir igjen etter oppspaltingen. Differansen kalles massedefekten. Frigitt atomenergi ved fisjonen er lik massedefekten ganger c^2 .

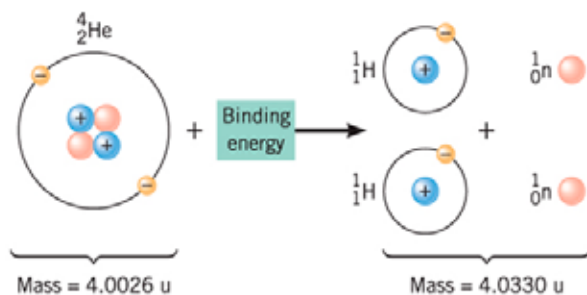
Grafikk: BR

helium inneholder $6,0 \cdot 10^{23}$ heliumatomer, og utgjør omtrent fire gram helium. Bindingsenergien i fire kg helium er følgelig $6,0 \cdot 10^{23} \cdot 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ J} = 2,7 \cdot 10^{15} \text{ J}$ – eller $7,5 \cdot 10^8$ kilowatt-timer. Det svarer til den samlede energiproduksjonen i et stort norsk vannkraftverk i løpet av et år.

Oppdagelsen av fisjon

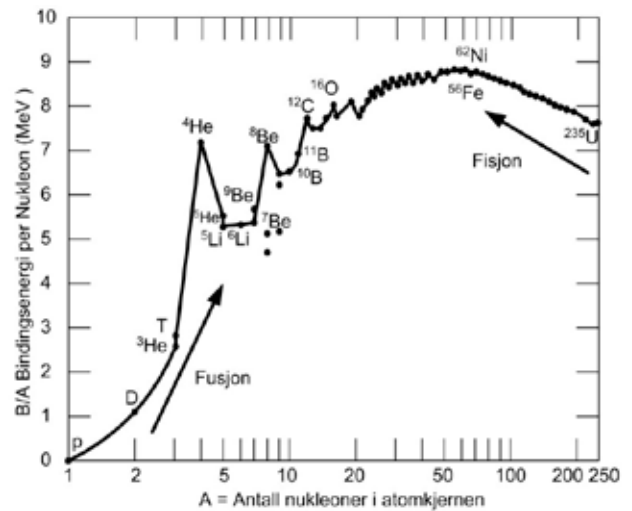
Den jødiske fysikeren Lise Meitner fra Østerrike arbeidet i Berlin sammen med den tyske kjemikeren Otto Hahn i omtrent 30 år. I andre halvpart av 1930-årene begynte de å undersøke hva som skjedde når de skjøt nøytroner mot tunge atomkjerne, spesielt uran. Siden hun var jøde, måtte Meitner forlate Tyskland i juli 1938, før eksperimentene var fullført. Hun bosatte seg i Stockholm der hun ble i 20 år. Like etter at Meitner måtte forlate dem oppdaget Hahn og Fritz Strassmann at barium dukket opp i nøytronbombardert uran.

Dette var et merkelig resultat som de ikke var i stand til å forstå. Hahn skrev til Meitner i begynnelsen av desember 1938 og fortalte om det underlige



Figur 5. En heliumkjerne har litt mindre masse enn den totale massen av partiklene den består av.

Grafikk: Online Notes Nepal



Figur 4. Bindingsenergi per nukleon for ulike grunnstoffer og isotoper.

Grafikk: Wikimedia Commons

resultatet. Hun forsto det heller ikke. Lille julaften 1938 kom Meitners nevø Otto Frisch på besøk til henne i Kungälv, nord for Göteborg. Han var fysiker og forsket ved Bohr-instituttet i København. De begynte umiddelbart å diskutere hva Hahn og Strassmanns resultat kunne bety.

Det løsnat på en tur i snøen på julaften, der Frisch gikk på ski og Meitner til fots. Med utgangspunkt i Niels Bohrs dråpemodell for atomkjernene så de etter hvert for seg hva som hadde skjedd. Et nøytron ble skutt mot en prøve med uran og traff en atomkjerne. Da oppsto en vibrerende kjerne som spaltet seg i en bariumkjerne, en kryptonkjerne og tre frie nøytroner (Figur 3). De kalte prosessen for fisjon og forsto at atomenergi ble frigjort ved en slik prosess.

Frisch ble hos sin tante i juleferien, og de ble enige om å skrive en vitenskapelig artikkel om oppdagelsen. Første nyttårsdag 1939 reiste Frisch tilbake til København. To dager senere fant han Niels Bohr i gang med å pakke tingene sine for å reise til Amerika på et fire måneders forskningsopphold. Han fikk Bohr for seg selv, fortalte om oppdagelsen av fisjon og ga ham et notat. Han hadde ikke snakket mer enn et halvt minutt før Bohr slo hånden mot hodet og utbrøt: «Åh! For noen idioter vi har vært som ikke har sett dette før!»

Bohr reiste til Amerika med båt sammen med fysikeren Leon Rosenfeld. Rosenfeld har fortalt at da han møtte Bohr på båten, sa Bohr. «Jeg har et manuskript som jeg har fått av Otto Frisch. Det inneholder en stor oppdagelse. Vi må se nærmere på det.» Manuskriptet ble publisert i Nature 11. februar 1939.

Otto Hahn (alene) fikk Nobelprisen i kjemi i 1944 for oppdagelsen av fisjon – en trist forbigåelse av Lise Meitner.



Figur 6. Otto Hahn (1879–1968) og Lise Meitner (1878–1968) fotografert i 1912.



Figur 7. Niels Bohr (1885–1962).
Foto: Nobel Prize

Uran eksisterer i form av to isotoper U-235 og U-238. I 1939 fant Niels Bohr ut at det er uran-isotopen U-235 som er fisjonerbar, mens U-238 ikke er fisjonerbar.

Et nøytron som treffer en uran-235-kjerne med en passende, ikke for stor fart, absorberes, og det oppstår en ustabil uran-236-kjerne. Uran-236-kjernen spaltes raskt til en krypton-92-kjerne og en barium-141-kjerne samtidig med at det frigjøres tre nøytroner (Figur 3). I en klump av uran-235 treffer disse nye atomkjerne som spaltes og frigjør fler nøytroner, som treffer nye atomkjerne som spaltes ... Det blir en kjedereaksjon. Hvis uranklumpen har større masse enn en såkalt kritisk masse vil kjedereaksjonen løpe løpsk, og man kan få en eksplosiv frigjøring av atomenergi (Figur 8).

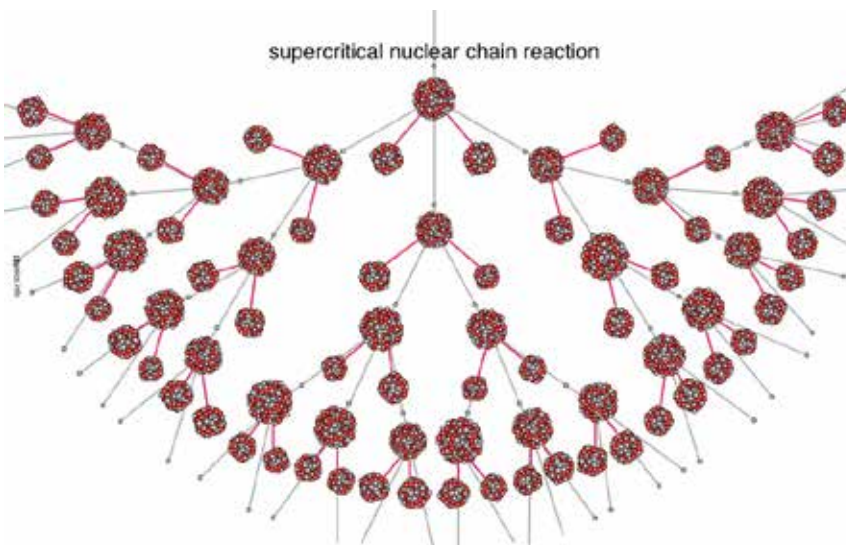
Beslutningen om å lage en atombombe

Sommeren 1939 skrev to fremtredende fysikere, Leo Szilard og Eugene Wigner, et utkast til det såkalte

Einstein-Szilard-brevet, som advarte om den mulige utviklingen av «ekstremt kraftige bomber av en ny type». I brevet oppfordret de USA til å ta skrittet med å anskaffe et lager av uranmalm og sette i gang forskning på kjedereaksjoner med spalting av atomkjernene til uran. De fikk Albert Einstein til å signere brevet 2. august 1939 og avleverte det til president Franklin D. Roosevelt. Roosevelt mottok brevet 11. oktober 1939. Etter å ha lest brevet opprettet Roosevelt en komité for å organisere studiet av atomære kjernereaksjoner. Komitéen svarte tilbake til Roosevelt at uran «ville være en mulig kilde til bomber som ville være langt mer destruktive enn noen kjente hittil».

Tyskland angrep Polen 1. september 1939. Den 3. september erklærte Storbritannia og Frankrike krig mot Tyskland. Andre verdenskrig var i gang.

Isotopen U-235 utgjør bare 0,7 % av uranet i naturen, og er så vanskelig å separere fra resten av uranet, at Bohr til å begynne med mente at en atom-

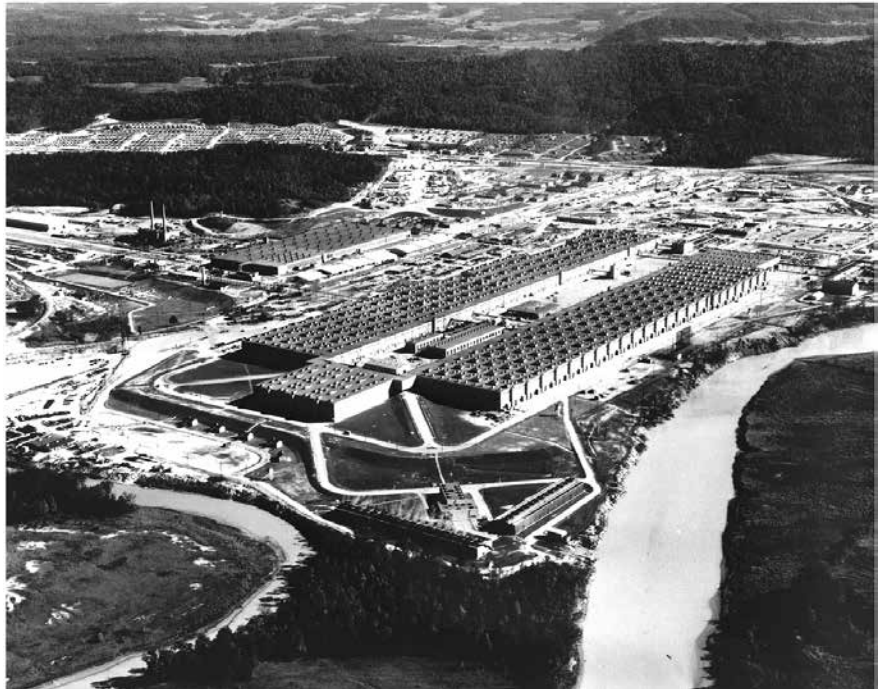


Figur 8. Hvis en U-235-klump har større masse enn en såkalt *kritisk masse* vil kjedereaksjonen løpe løpsk, og man kan få en eksplosiv frigjøring av atomenergi.

► Fysikken bak Manhattan-prosjektet



Figur 9. Robert Oppenheimer (1904–1967).



Figur 10. Gassdiffusjonsanlegget K25 i Oak Ridge for å produsere U-235-anriket uran.
Foto: James E. Westcott, official US Army Manhattan Project photographer

bombe ikke kunne lages i nær fremtid. «Det krever en samlet anstrengelse fra et stort land å lage en bombe», sa Bohr i 1939.

På denne tiden forsto forskerne at også plutonium var fisjonerbart og kunne ha betydning i konstruksjonen av atombomber. Plutonium ble isolert og fremstilt første gang 14. desember 1940 av Glenn Seaborg og medarbeidere. Pu-239 kan produseres fra U-238 og er fisjonerbart.

I juni 1939 kom Otto Frisch og den jødiske tysk-britiske fysikeren Rudolf Peierls som nå var ved University of Birmingham, frem til et gjennombrudd i undersøkelsen av den kritiske massen til uran-235. Deres beregninger antydte at den kritiske massen lå i en størrelsesorden på 1 til 10 kg, noe som var tilstrekkelig lite til at en uranbombe kunne brukes fra et av datidens bombefly. Et hemmelig Frisch-Peierls-memorandum fra mars 1940 beskrev for første gang hvordan en atombombe kunne lages.

Dette satte gang i det britiske atombombeprojektet. Komitéen MAUD (Military Application of Uranium Detonation) ble etablert 10. april 1940 for å undersøke om britene ville være i stand til å konstruere en atombombe.

President Roosevelt undertegnet 19. januar 1942 beslutningen om USA skulle lage en atombombe basert på U-235 og plutonium.

Manhattan-prosjektet

Manhattan-prosjektet var et forsknings- og

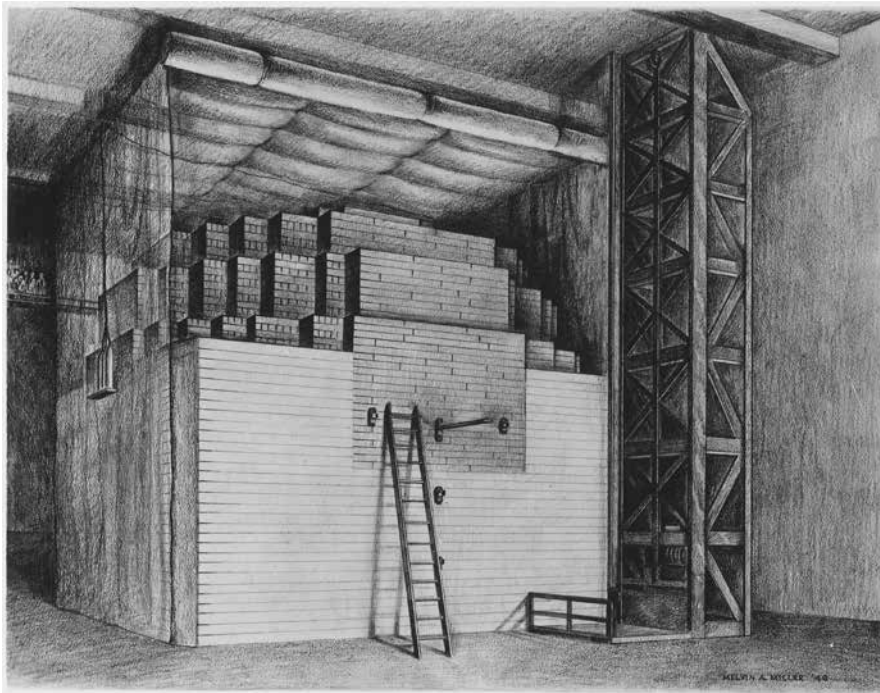
utviklingsprogram i Amerika som førte til fremstillingen av de første atombombene under andre verdenskrig. Hærens del av prosjektet fikk betegnelsen *Manhattan District* fordi hovedkvarteret var i Broadway 270 på Manhattan da prosjektet ble etablert i august 1942. Senere ble hele prosjektet vanligvis omtalt som *The Manhattan Project*. Over 5000 personer arbeidet i prosjektet på Manhattan dette året. Hovedkvarteret ble flyttet til Oak Ridge i Los Alamos høsten 1943.

13. august 1942 ble Manhattan-prosjektet etablert med general Leslie Groves som militær leder. Prosjektet hadde et samlet budsjett på 22 milliarder i 2012-dollar, tilsvarende 220 milliarder norske kroner. Totalt arbeidet ca. 560 000 personer i Manhattan-prosjektet.

Robert Oppenheimer ble vitenskapelig leder av Manhattan-prosjektet. Spesielt ledet han forskningssenteret i Los Alamos der målet var å konstruere en atombombe. Han ble senere kalt «Atombombens far».

Produksjon av uranisotopen U-235

Det ble tidlig klart at den største flaskehalsen i prosjektet med å produsere en atombombe var å få produsert tilstrekkelige mengder med de fisjonerbare uran- og plutonium-isotopene U-235 og Pu-239. Nitti prosent av budsjettet gikk med til å gjennomføre dette, og det ble bygget tre hemmelige byer med enorme produksjonsanlegg og to atomreaktorer for å få det til.



Figur 11. Verdens første atomreaktor bygget i 1942 under ledelse av Enrico Fermi under tribuneanlegget til University of Chicago sitt stadion.

Foto: Melvin A. Miller of the Argonne National Laboratory

Det amerikanske atombombeprogrammet kom i gang for alvor høsten 1942. Det ble arbeidet med tre forskjellige metoder for å anrike det naturlig forekommende U-238 med den fisjonerbare U-235-isotopen. Den amerikanske nobelprisvinneren i fysikk Ernest Lawrence og hans gruppe ved Berkeley undersøkte muligheten for *elektromagnetisk separasjon*. Et team undersøkte *termisk diffusjon* ved Columbia University, og Philip Abelson ledet en undersøkelse av *gassdiffusjon*. Man hadde også et mislykket prosjekt med forsøk på separasjon ved hjelp av sentrifuger.

I alle metodene ble det utnyttet at U-235-atomkjernene har tre færre nøytroner enn U-238-kjernene og derfor er litt lettere.

Elektromagnetisk separering av isotoper ble utviklet ved University of California Radiation Laboratory. Denne metoden involverte bruken av utstyr som ble kalt *calutroner*, en hybrid mellom et alminnelig massespektrometer og en syklotron. Navnet var avledet fra ordene *California university cyclotron*. Ved den elektromagnetiske prosessen avbøyer et magnetfelt banene til ladde partikler mer eller mindre avhengig av massen til partiklene. Banene til de litt lettere partiklene med U-235 blir litt mer avbøyd enn banene til partikler med U-238. Forskjellen er svært liten, og metoden var ikke særlig effektiv. Anlegget besto av fem produksjonsheter kalt *Alpha-racerbaner*. Det elektromagnetiske separasjonsanlegget ble kalt «Y-12». Det ble produsert noe U-235-anrikt uran med denne metoden, og det

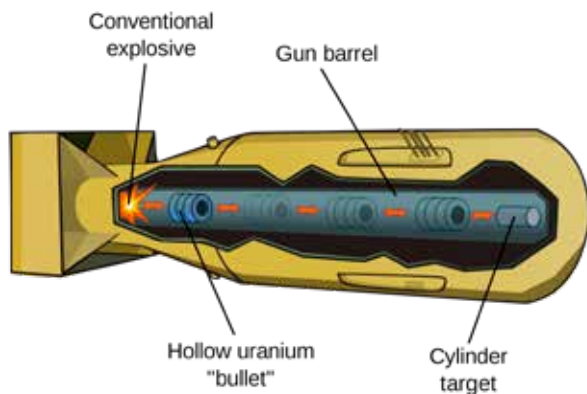
ble anrikt videre med gassdiffusjon.

Den mest lovende metoden for separasjon av isotoper var gassdiffusjon som i prinsippet var enkel, men vanskelig å få til å fungere i stor skala. Prinsippet er at lette isotoper lettere passerer gjennom et porøst filter enn tyngre. Men det er svært liten forskjell i vekten til U-235 og U-238. Prosessen er derfor svært langsom og måtte gjentas hundrevis av ganger med svære mengder av gass og store membraner for å oppfylle produksjonsmålene. Produksjonsanlegget kalt K-25 bestod av en fire-etasjes 800 meter lang U-formet struktur, med 54 sammenhengende bygninger (Figur 10).

Prosessen med termisk diffusjon utnyttet at i en blanding av gasser utsatt for ulike temperaturer på ulike steder, vil det bli et overskudd av den tyngste gassen der det er kaldt og et overskudd av den letteste gassen der det er varmt. Siden varm gass har en tendens til å stige mens den kalde synker, kan dette utnyttes som en metode for separering av isotoper. Anlegget for termisk diffusjon ble betegnet S-50.

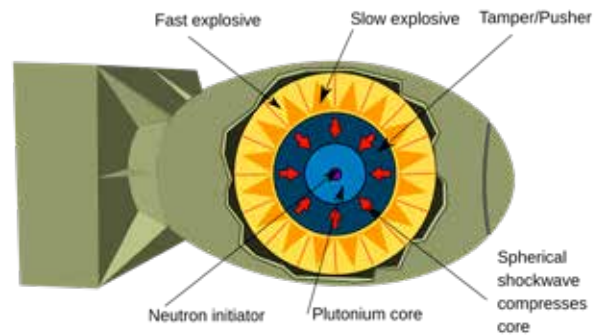
I dette anlegget ble en væske med uran fylt i mellomrommet mellom to sylindriske rør med forskjellige diametere. Den innerste veggen ble varmet opp og den ytterste avkjølt. Den letteste isotopen U-235 samlet seg da nær den varme veggen og U-238-isotopene nær den kalde veggen. Så fløt U-235 isotopene opp og U-238 isotopene sank. Dermed kunne den U-235-anrikede væsken samles opp fra den øverste enden av røret. Også denne metoden var svært ineffektiv, men førte likevel til

► Fysikken bak Manhattan-prosjektet



Figur 12. Prinsippskisse av den første atombomben med geværmekanismen.

Grafikk: Wikimedia Commons



Figur 13. Prinsippskisse av den første atombomben med implosjonsmekanismen.

Grafikk: Wikimedia Commons

produksjon av en del U-235-anriket uran.

Vi har foreløpig omtalt behovet for å produsere tilstrekkelig store mengder av den fisjonerbare U-235-isotopen av uran for å kunne lage en atombombe. Men Manhattan-prosjektet fulgte også en annen strategi basert på det fisjonerbare grunnstoffet plutonium.

Plutonium og atomreaktoren

Den andre utviklingslinjen i Manhattan-prosjektet brukte det spaltbare grunnstoffet plutonium. Mengdene av plutonium i naturen er så små at den enkleste måten å få tilstrekkelige mengder av stoffet, er å bruke en atomreaktor hvor naturlig forekommende uran bombarderes med nøytroner. I en slik prosess produseres plutonium.

Man måtte altså først konstruere en atomreaktor. Det ble forsket på to typer reaktorteknologi: En basert på fisjon av uran-235 med tungtvann som nøytronmoderator, og en basert på fisjon av plutonium-239 med grafitt som nøytronmoderator.

Den italienske fysikeren Enrico Fermi var i USA og ledet arbeidet med å konstruere den første atomreaktoren (Figur 11). Den ble bygget under tribunen i et stadion i Chicago. Reaktoren besto av grafittklosser med innlagte uranklumper og åpninger som man kunne skyve kontrollstaver inn i. De besto av kadmium, indium og sølv og sørget for at kjernereaksjonene ikke løp løpsk. Arbeidet ble fullført 2. desember 1942. Grafittklossene bremsset ned nøytroner som ble frigitt i fisjonsprosessen til passende hastigheter, slik at de kunne absorberes i uranatomenes kjerner og fisjonere dem.

Det ble snakket i koder: Compton rapporterte til Conant, «the Italian navigator has just landed

in the new world». Til Conants spørsmål, «Were the natives friendly?», svarte Compton, «Everyone landed safe and happy».

Basert på suksessen til Fermis CP-1-pile i Chicago, godkjente general Leslie Groves i januar 1943 at det skulle bygges en reaktor i industriell skala, kalt Hanford-B-reaktoren, i Washington for å produsere plutonium. Også den benyttet grafitt til å bremse nøytronene. Reaktoren ble bygget i perioden fra oktober 1943 til september 1944.

Atombomben

Ingrediensene til atombomben var klare ved utgangen av 1944. I den hemmelige forskerbyen i ørkenen i Los Alamos hadde man nå arbeidet i to år under ledelse av Robert Oppenheimer med å konstruere en atombombe. Det meste var klarlagt, men ett spørsmål gjensto. Hvordan skulle man få til en eksplosjon, og ikke bare et slags bål fra en løpsk kjedereaksjon?

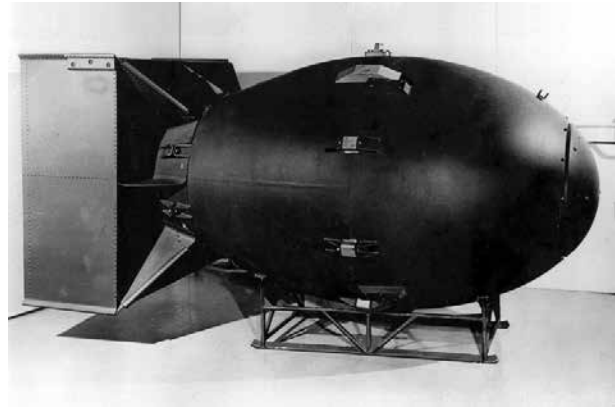
Her kom størrelsen *kritisk masse* inn i bildet – den massen med fisjonerbart materiale som akkurat er stor nok til at en kjedereaksjon av fisjoner løper løpsk. Forskerne forsto at for å få til en eksplosjon, måtte de føre to klumper med underkritisk masse av fisjonerbart materiale hurtig mot hverandre, slik at det plutselig oppsto en fisjonerbar klump med overkritisk masse.

Det ble gjort omfattende beregninger for å finne ut hvordan dette skulle gjøres for å sikre et eksplosivt resultat. Man endte opp med to forskjellige metoder: 1. Å skyte to klumper med underkritisk masse mot hverandre (Figur 12). Dette ble kalt «geværmekanismen». 2. Å la et skall med underkritisk masse skrumpe inn slik at det traff en klump med underkritisk masse i sentrum (Figur 13). Dette



Figur 14. En kopi av bomben «Little Boy».

Foto: US government DOD and/or DOE photograph



Figur 15. En kopi av bomben «Fat Man».

Foto: U.S. Department of Defense

ble kalt «implosjonsmekanismen».

Begge metodene ble fulgt opp. Men tidsskjemet var knapt. Det ble presset på for å få bombene raskest mulig ferdig, så det kunne ikke bli snakk om å bygge et stort antall bomber. Det ble besluttet å bygge to bomber til bruk i krigen – én med hver metode for å oppnå overkritisk masse. Geværmekanismen ble ansett som så sikker at man ikke behøvde å teste den. Det var nok å bygge én bombe med denne mekanismen.

Men implosjonsmekanismen var vanskeligere å få til, så denne metoden måtte testes. Man bygget derfor to bomber med denne mekanismen der den ene skulle være en testbombe, og endte derfor med å bygge tre bomber.

Den ene bomben med implosjonsmekanismen og 6,4 kg plutonium-239 som eksploderer ble testet 16. juli 1945. Den fungerte etter planen.

Bomben med geværmekanismen og 64 kg anriket uran som eksploderer ble kalt «Little Boy» (Figur 14) og sluppet over byen Hiroshima i Japan 6. august 1945.

Den andre bomben av samme type som testbomben ble kalt «Fat Man» (Figur 15) og sluppet over byen Nagasaki i Japan 9. august 1945. Begge var fryktelig ødeleggende for byene de ble sluppet over.

Epilog

Fysikeren Edward Teller ønsket å gå videre å konstruere en hydrogenbombe basert på fusjon av hydrogen til helium. En slik bombe kunne lages slik at den frigjorde over tusen ganger mer energi enn fisjonsbombene.

Oppenheimer gikk i mot dette. Men Tellers linje vant frem hos politikerne av frykt for hva russerne

kunne gjøre. Det var mange tekniske vanskeligheter som måtte overvinnes. Men vinteren 1951 kom Stanislaw Ulam og Edward Teller frem til en konstruksjon som omfattende beregninger viste at ville fungere. Den første fullskala hydrogenbomba ble testet av USA 1. november 1952. Resultatet var en eksplosjon som svarte til å fyre av ti millioner tonn TNT. Den var 700 ganger sterkere enn bomben som ble sluppet over Hiroshima.

Russland hadde på samme tid sitt atombombeprogram, godt hjulpet av detaljert informasjon om hvordan bomben Fat Man var konstruert. Dette ble formidlet av spionen Klaus Fuchs som jobbet i Los Alamos med beregninger som bidro til designen av denne bomben. De testet sin første bombe, konstruert på samme måte som Fat Man, i august 1953. I november 1955 testet Russland sin første hydrogenbombe.

Atomvåpenkappløpet var i gang. Flere land fikk atomvåpen. Situasjonen utviklet seg på en bekymringsfull måte. Politikerne skjønnte at noe måtte gjøres for å stoppe dette. Den første september 1968 ble Ikkespredningsavtalen vedtatt og trådte i kraft 5. mars 1970.

Umiddelbart etter Trinity-testen 16. juli 1945 følte Oppenheimer en enorm lettelse. De hadde greid det. De hadde lyktes i å gjennomføre det største teknologiprojektet i amerikansk historie på en vellykket måte. Men etter at amerikanerne hadde bombet Hiroshima og Nagasaki, var følelsene totalt annerledes. Oppenheimer ble beskrevet som nervøs og ute av seg etter bombingene av Nagasaki 9. august 1945. Den 17. august overleverte han et brev til krigssekretæren i USA der han argumenterte for at atomvåpen måtte forbys. Forbudet kom 25 år senere. ■

Er $E = mc^2$ og partikkelmodellen for lys allment gyldige?

Einsteins berømte likning $E = mc^2$ synes å være i konflikt med hvor liten andel av «masse-energien» vi greier å utnytte. Vi utdyper her dette temaet. Videre påpeker vi at forestillingen om lyspartikler er problematisk, og vi vurderer om det er mulig å forklare den fotoelektriske effekten ved å oppfatte lys som elektromagnetiske bølger.

Asle Rein Fritenker
Øyvind G. Grøn OsloMet – Storbyuniversitetet

The diagram shows the equation $E = mc^2$ in large black font on a light green background. Three white boxes with black text are connected to the equation by thin black lines. The first box, labeled 'energi (J)', points to the 'E'. The second box, labeled 'masse (kg)', points to the 'm'. The third box, labeled 'lysets hastighet (299 792 458 m/s)', points to the 'c'.

ingen formel er så kjent som $E = mc^2$. Den såkalte massenergiloven er gjengitt i lærebøker, er Hollywood sin favorittlikning og oppfattes som like genial som den er enkel. Energi er lik masse multiplisert med lyshastigheten i annen. Loven ble utledet av Albert Einstein som en konsekvens av energiens og bevegelsesmengdens bevarelse slik disse formuleres i den spesielle relativitetsteorien som Einstein hadde presentert et halvt år tidligere – våren 1905. Senere i 1905 forklarte Einstein den fotoelektriske effekten ved å anta at lys – som på denne tiden var anerkjent som elektromagnetiske bølger – også kunne oppføre seg som partikler i vekselvirkning med materie. At lys kan være både bølge og partikkel kan virke selvmotsigende, men likevel sier fysikerne at slik er det.

Problemer med $E = mc^2$?

Formelen $E = mc^2$ sier at energien E til et legeme med masse m er proporsjonal med dets masse, og

at proporsjonalitetskonstanten er lyshastigheten i annen. Man kan undres: Er det like mye energi i ett kilogram i potetskrell som i ett kilogram i ett kilogram hydrogen? Er det like mye energi i jern som i anriket uran? Intuitivt virker det som om dette ikke kan være riktig, og at det er noe som ikke stemmer i Einstein sin formel.

Einstein publiserte i 1905 en utledning [1] av $E = mc^2$ ved å betrakte utsendelse av to plane lysbølger i motsatt retning fra et legeme og bruke loven om energiens bevarelse slik de er formulert i den spesielle relativitetsteorien. Han beskrev situasjonen fra to forskjellige referansesystemer og viste at det er en konsekvens av relativitetsteorien og loven om energibevarelse at et legeme med masse må ha et energiinnhold $E = mc^2$. I 1987 modifiserte Øyvind Grøn Einsteins utledning ved å betrakte isotrop utstråling fra et legeme i stedet for kun to plane lysbølger [2]. Einstein påpekte på slutten av sin artikkel at det gjensto å teste formelen i ekspe-

«At lys kan være både bølge og partikkel kan virke selvmotsigende, men likevel sier fysikerne at slik er det.»

rimer, og foreslo at studier av radioaktive stoffer, for eksempel radium, ville kunne brukes til å teste denne masse-energi-sammenhengen. Det er nå kjent at isotoper av radium går ved en serie av α - og β -desintegrasjoner over i forskjellige blyisotoper som stabile endeisotoper.

I 1905 fantes ingen empiri som underbygget påstanden om at enhver masse kan omdannes til energi i form av elektromagnetisk stråling. Har vi slik empiri i dag? La oss se på noen eksempler.

Ifølge World Nuclear Association gir ett kilogram råolje, under optimal forbrenning, 43 megajoule (MJ) varmeenergi, mens ett kilogram naturlig forekommende uran gir 500 gigajoule (GJ), altså 11 000 ganger høyere varmeenergi. Det er relevant å regne i varmeenergi fordi varme er sluttformen for all energi og fordi temperaturendringer er målbare. Om vi skulle benyttet Einsteins formel skulle energien være lik for alle stoffer; og ett kilogram, uavhengig av stoff, gir ifølge Einstein $9 \cdot 10^{16}$ J, 180 000 ganger mer enn hva World Nuclear Association oppgir for uran. Fusjonsprosesser er mer effektive, men også i for eksempel fusjon av hydro-



Figur 1. Det atomkraftdrevne hangarskipet Enterprise sammen med skipene Long Beach og Bainbridge fotografert i Middelhavet 18. juni 1964.

Foto: U.S. Navy National Naval Aviation Museum photo NNAM.1996.488.125.00

gen til helium slik som på sola, frigjøres bare 0,7 % av masse-energien.

La oss se nærmere på dette. Det fortoner seg merkelig, ja, nesten urimelig, å hevde at det er like mye energi i ett kilogram potetskrell som i ett kilogram hydrogen. Eller å påstå at det er like mye energi i jern som i anriket uran. Det er nærliggende å tenke at dette kan jo ikke være tilfelle, for det gir jo langt mindre energigevinst for eksempel i form av varme å brenne ett kilogram potetskrell enn å forbrenne ett kilogram hydrogen, eller ved å forbrenne ett kilogram anriket uran i et atomkraftverk. Dette ser ut til å passe dårlig med at masse og energi er to sider av samme fysiske størrelse, og at ett kilogram av hva som helst inneholder like mye energi, slik som Einstein hevder.

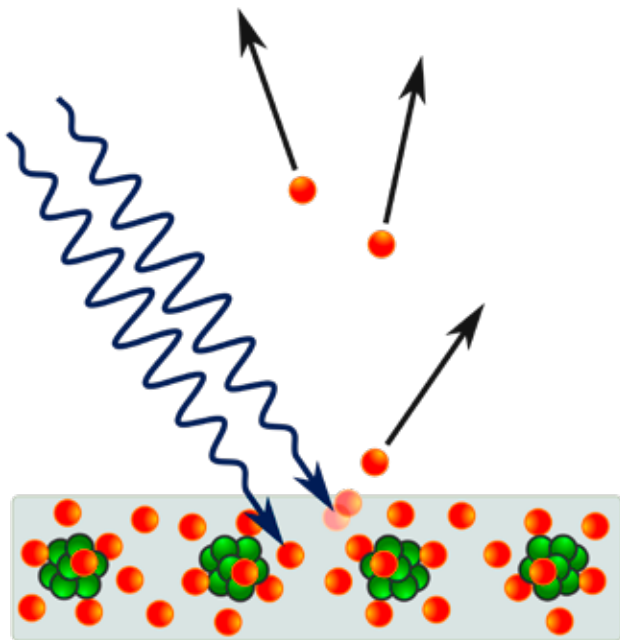
Det en intuitiv tilnærming til formelen $E = mc^2$ kanskje ikke får med seg her, er forskjellen på å inneholde energi og å kunne omdanne energi i form av masse til for eksempel varme, stråling eller elektrisk energi.

Å frigjøre energi ved å forbrenne noe er en kjemisk prosess som er lite effektiv. Som nevnt ovenfor frigjøres bare $4,3 \cdot 10^7 / 9 \cdot 10^{16} = 4,8 \cdot 10^{-10}$ av masse-energien i råolje ved å forbrenne den – en forsvinnende liten del. Radioaktive prosesser er mer effektive, men frigjør likevel bare én 180-tusendel av masse-energien i eksempelet ovenfor.

Den moderne, relativistiske teorien om antimaterie kom i 1928 da Dirac presenterte sin relativistiske versjon av Schrödinger-likningen. Også i denne likningen er $E = mc^2$ sentral.

Produksjon av små mengder antimaterie er rapportert ved flere laboratorier [3], og forskerne rapporterer også å ha identifisert antimaterie i små mengder i naturlige prosesser, for eksempel i kosmisk stråling [4] og i radioaktive prosesser. I henhold til teorien kan partikkel og antipartikkel kun oppstå og gå til grunne parvis. Det er likevel et overveldende overskudd av materie i universet. Hvordan dette henger sammen i praksis er ennå ikke klarlagt [5].

► Er $E = mc^2$ og partikkelmodellen for lys allment gyldige?



Figur 2. Skjematisk illustrasjon av den fotoelektriske effekten.

Grafikk: Ponor/Wikimedia Commons

Formelen $E = mc^2$ er blitt utledet teoretisk på flere måter. En eksperimentell test ble publisert [6] i *Nature* i 2005. Her konkluderte forskerne med at formelen $E = mc^2$ ble bekreftet gjennom målinger og beregninger atommasseforskjell og av bølgelengder til gammastråling for å bestemme den nukleære bindingsenergien for isotoper av silisium og svovel. Dette er ansett for å være den mest nøyaktige empiriske bekræftelsen av masse-energilovens gyldighet.

Masseenergiloven har fundamental betydning som en del av grunnlaget for kvantemekanikken. De Broglie brukte loven i 1924 for å vise at partikler også har bølgeegenskaper [7], noe som ga opphav til begrepet *materiebølger*.

Ettersom det empiriske grunnlaget for sammenhengen $E = mc^2$ har en indirekte karakter – man har i de fleste situasjoner bare observert en liten del av energien inneholdt i massen – er det legitimt å stille spørsmålsteget ved masseenergilovens gyldighet som en allmenn lov, samt å vurdere hvilke konsekvenser en falsifisering ville kunne ha. Det må imidlertid sies at innenfor dagens etablerte fysikk oppfattes loven som allment gyldig.

Hva så med lysets partikkelnatur? Står forestillingen om at lyset har både en bølgenatur og en partikkelnatur like sterkt? I neste avsnitt skal vi diskutere dette spørsmålet.

Et problem for oppfattelsen av lys som en gass av fotoner

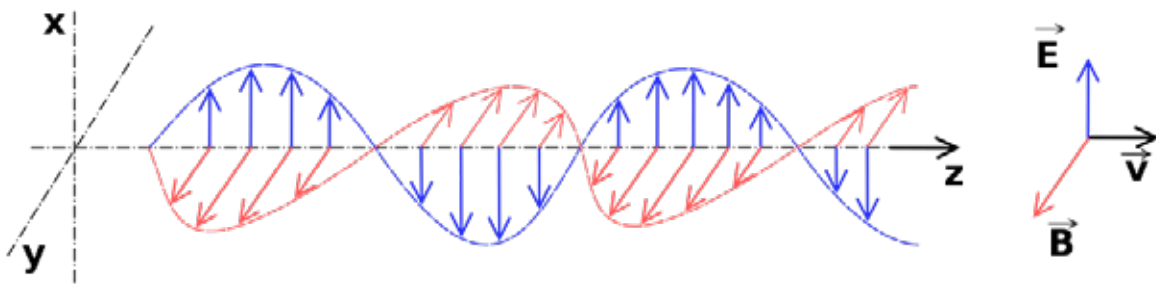
Max Planck fremsatte allerede i 1900 sin strålingslov for elektromagnetiske (heretter EM) bølger, basert på at et legeme stråler ut EM-energi i form av kvanter med energi $E = hf$, der E er energi, h er

Plancks konstant og f er frekvens. Jo høyere frekvens EM-bølgen har, jo større er energien.

I et passende frekvensområde er dette varmestråling som vi opplever for eksempel når det kommer stråling fra en vedovn. Planck mente at den elektromagnetiske energien forplanter seg i rommet som bølger. Kvantiseringen var knyttet til vekselvirkningen mellom materie og stråling. For dette arbeidet fikk Planck nobelprisen i 1918.

I 1921 fikk Einstein nobelprisen for sin forklaring av den fotoelektriske effekten. Den fotoelektriske effekt forekommer når et metall gir fra seg elektron under påvirkning av lys. Einstein forklarte i 1905 at metallet ga fra seg elektroner fordi lyset består av partikler (lyspartikler, senere kalt fotoner) som slår løs elektroner i metallet. Dette var et brudd med den tidligere oppfatningen om EM-bølger og Einstein var dermed med å legge grunnlaget for kvantefysikken (teorier og modeller som beskriver grunnleggende partiklers oppbygning, virkemåte og samvirkning mellom disse). Til tross for at bølge/partikkeldualiteten nå synes etablert som en sannhet, må vi vurdere om Einsteins forklaring av den fotoelektriske effekten er en rimelig antakelse:

Om lyspartikkelteorien stemmer, så er vi til enhver tid omgitt og bombardert av utallige partikler i form av synlig lys, varme, radiobølger og bakgrunnsstråling. Vi vet at EM-bølger kan sendes over avstander, for eksempel lys, VHF, radio- og TV-signaler, men er partikler en forutsetning for dette? Fjernsyns- og radiosendere må i så fall sende ut et enormt antall partikler som brer seg utover eteren, og mobiltelefonen er mottaker av partikler som gir bilder på skjermen. Er det partikler som varmer vannet i en



Figur 3. Lys som elektromagnetiske bølger.

mikrobølgeovn? Er det partikler som sendes ut fra lyspæren? Fra kokeplata? Ville da en gammel, velbrukt senderantenne eller kokeplate ha mistet masse over tid ettersom de gir fra seg partikler?

Det synes å være noe som ikke stemmer i lyspartikkelteorien, i hvert fall hvis den tolkes slik at lys består av en sverm av lyspartikler som kan registreres av en observatør uansett hvordan observatøren beveger seg. Et problem med denne forestillingen dukker opp som en konsekvens av relativitetsprinsippet i kombinasjon med Larmors formel som sier at elektromagnetisk stråling sendes ut fra akselererte ladde partikler med en utstrålt effekt som er proporsjonal med ladningens akselerasjon.

Ifølge den generelle relativitetsteorien er både akselerert og ikke-akselerert bevegelse relativ. En observatør med samme bevegelse som ladningen, vil observere at ladningen er i ro. En ladning i ro sender ikke ut elektromagnetisk stråling. Vi har da følgende resultat: En detektor i ro i et laboratorium der ladningen har en akselerasjon, registrerer elektromagnetisk stråling fra ladningen, mens en detektor som har samme bevegelse som ladningen, ikke registrerer elektromagnetisk stråling fra den. Eksistensen av elektromagnetisk stråling fra en akselerert ladning er med andre ord ikke invariant overfor en transformasjon fra laboratoriesystemet til et akselerert referansesystem som beveger seg sammen med ladningen.

Dette er i konflikt med at strålingen består av en sverm av lyspartikler med en observert eksistens som er uavhengig av observatørens bevegelse. Det vil da være mer realistisk å akseptere en oppfatning om at elektromagnetisk stråling har karakter

av bølger når den beveger seg gjennom rommet og oppfører seg som partikler i vekselvirkning med materie. En slik oppfatning passer både med Einsteins forklaring av den fotoelektriske effekten og med Huygens interferenseksperiment der lyset opptrer som bølger når det passerer gjennom en skjerm med to spalter og beveger seg videre til en skjerm der det registreres et bølgemønster.

Hvorvidt denne oppfatningen er korrekt, er et spørsmål fysikerne ennå ikke har kommet til bunns i. I 1865 utledet den skotske fysikeren James Clerk Maxwell fra sine likninger for elektriske og magnetiske felter at det eksisterer elektromagnetiske bølger, og at de beveger seg med lysets hastighet. Han forsto da at lys er elektromagnetiske bølger.

Max Planck holdt en forelesning [8] omkring 1920 i det Prøyssiske Vitenskaps-akademi med tittel: *Lysets natur*. La oss sitere et par av hans setninger (oversatt til norsk): «Det eneste som kan sies med sikkerhet, er at kvanta, allerede referert til, spiller en sentral rolle i sammenheng med lysets natur.» Planck avsluttet sin forelesning på følgende måte: «Spørsmålet om lysstrålene selv består av kvanta, eller om kvanta bare eksisterer i materien, er det viktigste og vanskeligste dilemma som kvanteteorien står overfor, og svaret på dette spørsmålet vil bli et første steg mot en videre utvikling.»

Niels Bohr påpekte at lysets partikkel- og bølgenatur ikke kan registreres i samme type eksperiment. Han innførte begrepet *komplementaritet* for bedre å kunne snakke om dette, og sa at egenskaper som ikke kan observeres i samme type eksperiment, er komplementære. Ifølge Niels Bohr er lysets partikkel- og bølgenatur komplementære.

«Han innførte begrepet komplementaritet for bedre å kunne snakke om dette, og sa at egenskaper som ikke kan observeres i samme type eksperiment, er komplementære.»

Det er fristende å gå et skritt videre å spørre: Er det nødvendig å innføre en partikkelnatur for lys for å kunne forklare for eksempel den fotoelektriske effekten? Dette spørsmålet er tema for neste avsnitt.

Kan elektromagnetisk stråling oppfattet som bølger forklare den fotoelektriske effekten?

Er det mulig å forklare den fotoelektriske effekten uten lyspartikler? Vi vet at mikrobølger skaper bevegelse av molekyler i en mikrobølgeovn og at spesielle lydfrekvenser fra en fiolin kan knuse glass. I sakte film ser vi at lyden får glasset vibrerer mer og mer og til slutt knuser ved en terskelverdi av frekvensen.

Kanskje den fotoelektriske effekt kan forklares på tilsvarende måte ved at elektroner i metallet kommer i resonans med lysbølgene, vibrerer mer og mer og til slutt bryter løs?

Det synes som om det er liten interesse blant dagens teoretiske fysikere for å designe og gjennomføre nye eksperimenter med den hensikt å teste og falsifisere grunnlaget for Einsteins lyspartikkel. Det er metodisk krevende å registrere én og én EM-bølge, samt å identifisere registreringer fra eventuelle «pre-eksiterte» tilstander i apparatur og bakgrunnsstråling

Spørsmålet om det er mulig å forklare den fotoelektriske effekten ved å beskrive elektromagnetisk stråling som bølger, og mer generelt om gyldigheten av partikkelmodellen for lys, er mer utførlig behandlet i Borys Jagielskis masteravhandling [9]. Temaet følges videre opp i etterfølgende artikkel av Jagielskis mastergradsveileder Arnt Inge Vistnes. ■

Referanser

- [1] A. Einstein. «Ist de Trägheit enes Körpers von seinem Energiegehalt Abhängig?» *Annalen der Physik* 18 (1905).

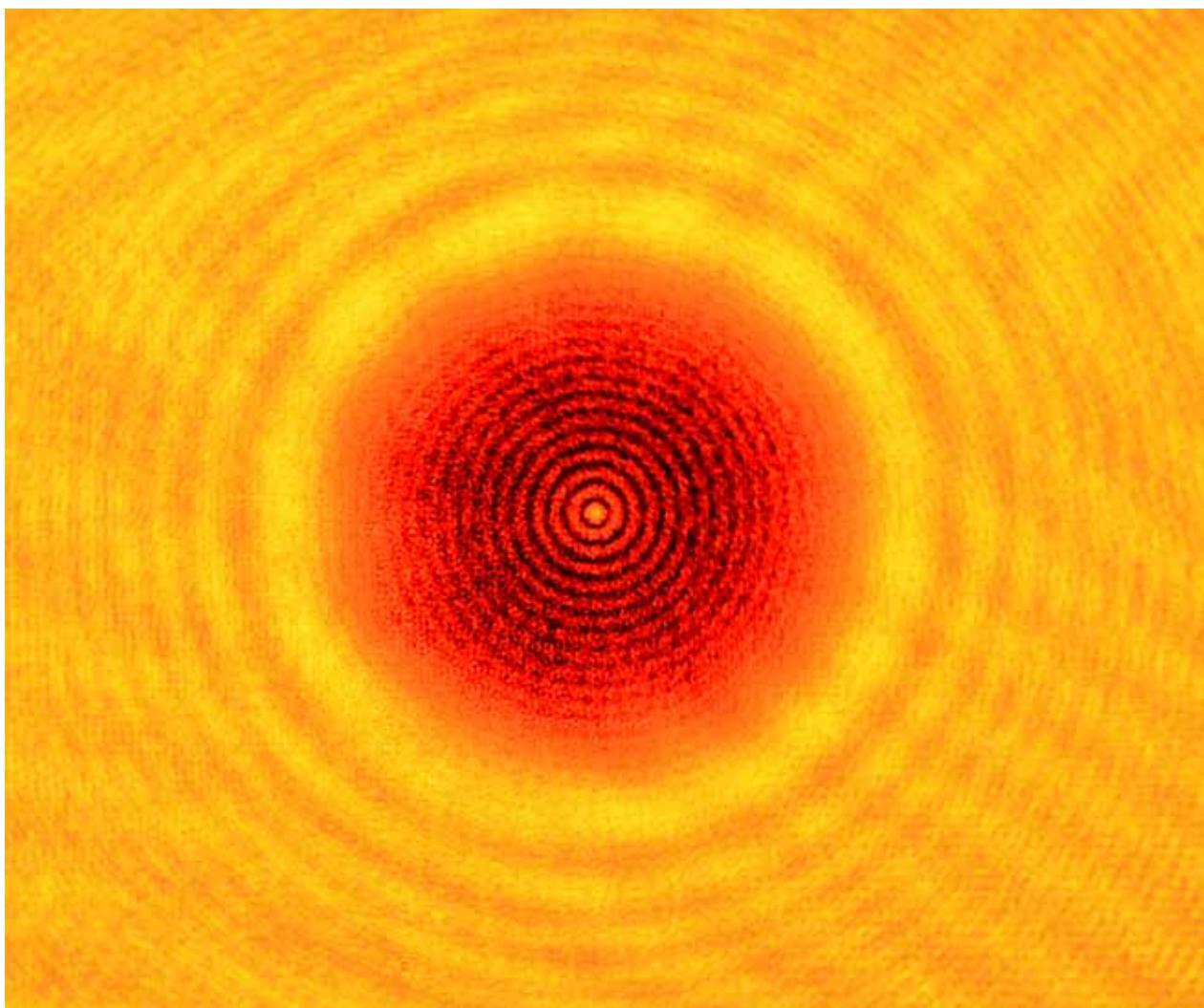
Engelsk oversettelse: [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/232514/Einstein%20E=mc%20\(pp172-174\).pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/232514/Einstein%20E=mc%20(pp172-174).pdf)

- [2] Ø. Grøn. «A modification of Einstein's first deduction of the inertia-energy relationship.» *Eur. J. Phys.* 8, 24 (1987). Doi: 10.1088/0143-0807/8/1/006.
- [3] Bec Crew. «Physicists have observed the light spectrum of Antimatter For First Time.» *Science Alert* 20. desember 2016. Lenke: www.sciencealert.com/physicists-have-observed-the-light-spectrum-of-antimatter-for-first-time
- [4] G. Aurieremma. «Antimatter in the primary cosmic rays.» *Conference Proceedings* 19 (1989). Lenke: <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1989foap.conf..371A>
- [5] L. Bugge, Ø. Grøn og G. Skjevling. «Hvordan oppsto materien?» *Fra Fysikkens Verden*, 70. årgang s. 128 (2008). Lenke: www.norskfysikk.no/nfs/ffv_old/2008/FFV_2008-4.pdf
- [6] S. Rainville. «A direct test of $E = mc^2$.» *Nature* 238. Doi: <https://doi.org/10.1038/4381096a> (2005).
- [7] Wikipedia. «Matter wave.» Lenke: https://en.wikipedia.org/wiki/Matter_wave#:~:text=All%20matter%20exhibits%20wave%2Dlike,known%20as%20de%20Broglie%20waves
- [8] Max Planck. https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Extras/Planck_on_light/
- [9] Borys Jagielskis. «Elements of the wave-particle duality of light.» Masteroppgave ved Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo (2009). Lenke: www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/11232/jagielski.pdf?sequence=1&isAllowed=y

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

Bølge-partikkel-dualismen for lys

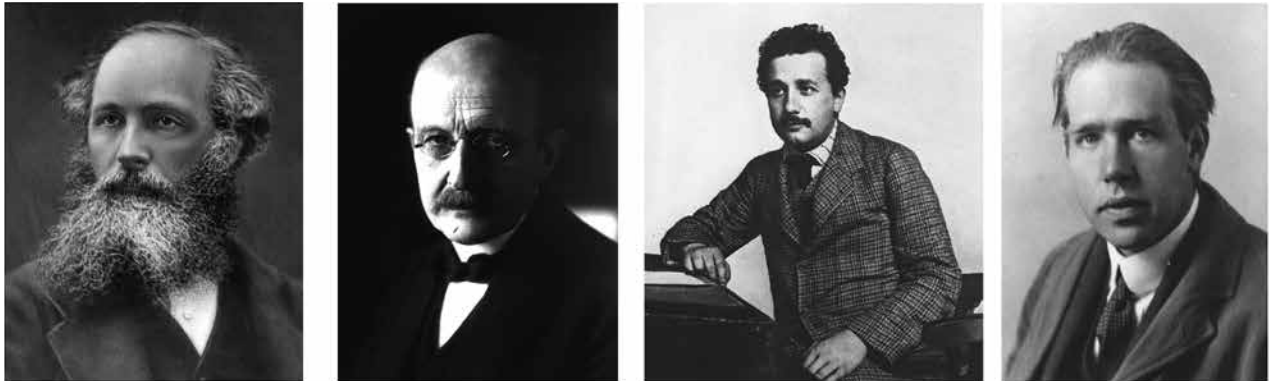
Arnt Inge Vistnes Fysisk institutt, UiO



Figur 1. Et av mine mange bilder av Aragos flekk. Den er relativt enkelt å demonstrere dersom du har en He-Ne-laser tilgjengelig, pluss litt til. Jeg gir gjerne instruksjon om oppsettet. Grunnen til alle ringene både innenfor og utenfor skyggen til kula er at laserlys har stor regelmessighet i bølgene over mange bølgelengder (lang koherenslengde).

Bølge-partikkel-dualismen for lys snek seg inn i fysikken ved innføringen av kvantefysikk, og oppfattes av mange som nærmest uløselig knyttet til denne. Det er imidlertid ingen konsensus blant fysikere, verken når det gjelder bølge-partikkel-dualismen eller tolkninger av kvantefysikken, noe Anton Zeilinger med andre betegnet som «a peculiar situation» i en artikkel for få år siden [1]. Det

gjøres nå en del forsøk på å finne en mer felles forståelse, og det er neppe mulig uten at vi forkaster en del av tankegodset fysikkpionerene på begynnelsen av 1900-tallet stod for. De hadde tross alt tilgang på langt mindre kunnskap om fysiske prosesser enn vi har i dag, så det er ikke rart om det snek seg inn tanker og vurderinger den gang som er modne for nye vurderinger.



Figur 2. Noen av de mest sentrale personene i utviklingen av dagens oppfatning(er) av lys. Fra venstre: Maxwell, Planck, Einstein og Bohr.

I to etterfølgende artikler vil jeg trekke fram argumenter jeg synes er viktige i dagens drøfting om veien videre i fysikk. I del 1 (denne) er fokus først og fremst på historien. I del 2 vil jeg konsentrere meg mer om erfaringer fra det siste halve århundret som bør tas på alvor når vi skal tenke nytt.

Kortfattet historikk 1: ca. 1670–1830

Fysikere har undret seg over lysets natur i lang, lang tid. På 1600-tallet mente Isaac Newton at lys best kunne beskrives som partikler. «Hvordan kan bølger ha farger? Men partikler kan ha farger!» var visstnok en del av argumentasjonen hans for lys (men hvor god dekning det er for en slik oppfatning vet jeg ikke).

Christiaan Huygens så at en rekke fenomener var helt tilsvarende for overflatebølger på vann som for lys. Han mente lys best kunne beskrives som bølger. Men Newton var så suksessrik (i sin behandling av mekanikken) at fysikere på den tiden hadde mest tillit til hans syn på lys.

Litt før 1807 sendte Thomas Young lys gjennom en dobbeltspalt og så stripemønsteret på en skjerm bakenfor spaltene. Resultatet passet dårlig med partikkelbildet til Newton, men Newton hadde så stor respekt innen fysikkmiljøet at få endret mening. En ung fysiker, Augustin-Jean Fresnel, tok derimot opp igjen Huygens bølge-teori da han deltok i en konkurranse utlyst av det franske vitenskapsakademi i 1818. Dette likte ikke en av medlemmene i evalueringskomiteen, matematikeren Siméon Denis Poisson. Han nærmest utformet en test som kunne vise at bølgehypotesen var feil. Han mente at dersom vi setter en kule inn i en lysbunt, vil vi få en lys flekk (på grunn av interferens) i midten av skyggen til kula dersom lys er bølger, men det vil ikke bli noe flekk dersom lys er partikler.

Lederen av evalueringskomiteen, Dominique-François-Jean Arago, bestemte seg for å teste hvordan lys oppførte seg i det oppsettet Poisson hadde foreslått. Jeg selv er eksperimentalfysiker,

og er imponert over det arbeidet Arago gjorde, og resultatet gikk i Fresnels favør: Det ble en lys flekk i midten av skyggebildet til kula! Ut fra Poissons argumentasjon viste resultatet at bølgehypotesen dugde, men ikke partikkelhypotesen. Denne flekken har siden blitt kalt Aragos flekk (*Arago's dot* på engelsk). På grunn av forhistorien blir den også iblant betegnet som Poissons flekk eller Fresnels flekk. Jeg anbefaler en flott artikkel om Aragos eksperiment publisert i mars i år [2].

Lysets bølgenatur vant raskt fram etter at Aragos flekk ble demonstrert, og ble ytterligere sementert da Maxwell viste at hans generelle ligninger for elektromagnetisme ledet til en bølge-ligning for det elektromagnetiske feltet. Maxwell kunne også vise at hastigheten til disse bølgene kan beregnes direkte fra konstanter allerede bestemt ut fra lovmessigheter for statiske elektriske og magnetiske felt. Såvidt jeg vet er det per dags dato ingen andre som kan beregne lyshastigheten så elegant.

Kortfattet historikk 2: ca. 1900–1930

Kvantefysikken ble utformet i et forsøk på å beskrive/finne lovmessigheter i atomenes verden, for klassisk fysikk ble utviklet før man kjente til atomer. Lys vekselvirker med atomer, og havner på sett og vis midt mellom klassisk fysikk og kvantefysikk. I atomenes verden ble elektroner og atomkjerner påvist som bitte små lokaliserte objekter. Kunne det hende at også lys hadde en slik karakter?

Einstein ga i 1905 en forklaring på «fotoelektrisk effekt» [3] der han skriver (norsk oversettelse): «Fenomener som har med utsendelse eller omdannelse av lys å gjøre, kan bedre forstås ved å anta at lyse-energien er fordelt diskontinuerlig i rommet. Når en lysstråle utsendes fra et punkt vil energien, ifølge den antakelsen som her legges frem, ikke være kontinuerlig fordelt over et stadig større volum, men bestå av et endelig antall lyskvanter som er lokalisert i rommet, og som beveger seg uten å bli delt, og som kun kan

«For meg er det en fysisk forskjell mellom en bølge i klassisk forstand og Einsteins 'lyskvanter som er lokalisert i rommet'.»

absorberes eller sendes ut som hele.»

Einstein mente at disse lyskvantene hadde en energi $E = hf$, der h er Plancks konstant og f frekvensen til lysbølgene. Lyskvantene ble senere kalt *fotoner*.

Max Planck var sterkt imot Einsteins oppfatning. Riktignok hadde Planck innført kvantiserte energitilstander i et fast stoff i sin beskrivelse av såkalt «sort stråling». Forskjellen i energi mellom energinivåene ble der gitt med formelen ovenfor. Han mente imidlertid at når lys først sendes ut, vil det oppføre seg som bølger etter Maxwells lover.

Einsteins ide var kontroversiell og ble i starten ikke akseptert av fysikerne. Etter hvert vant ideen mer fram og han fikk Nobelprisen for sitt arbeid 16 år senere. Men selv da var tanken om «lys som lokalisert i rommet uten å bli delt» i sterk strid med interferens-fenomener. Eksperimenter på 1800–1823 hadde jo gitt meget klare indisier på at lysbølger kunne summeres slik at intensiteten øker eller reduseres (helt til null) alt etter bølgenes innbyrdes fase.

Situasjonen endret seg etter at Arthur Holly Compton gjorde et eksperiment i 1923 der røntgenstråling ble sendt mot et stykke grafitt. (Compton fikk Nobelprisen for dette arbeidet i 1927.) De spredte røntgenstrålene hadde en annen bølglengde og retning sammenlignet med de innkomne. Fysikerne på den tiden tolket resultatene i retning av at lys (i røntgen-området) ikke kunne beskrives som bølger. En partikkelbeskrivelse med betydelige likheter til kollisjon mellom klinkekuler i mekanikken fungerte imidlertid bra.

Vi hadde da rundt 1925 klare indisier på at lys hadde både bølgeegenskaper og partikkelegenskaper. Denne problematiske spagat-lignende situasjonen innen fysikk ble på en måte skjøvet under teppet gjennom en særegen argumentasjon. I første halvpart av 1900-tallet var mange fysikere inspirert av filosofen Ernst Mach og hans «logisk positivisme». Niels Bohrs tolkning av denne filosofien beskrives gjerne slik: «*Det er ikke fysikkens oppgave å fremstille den 'sanne' naturen til et fenomen. Fysikken kan bare gi oss et verktøy til å forutsi og presist uttrykke resultatet av et eksperiment eller en prosess vi kan observere.*» (Sitatet er hentet fra et senere arbeid (1961), men

hans logisk positivistiske grunnholdning kommer til uttrykk så tidlig som 1927.)

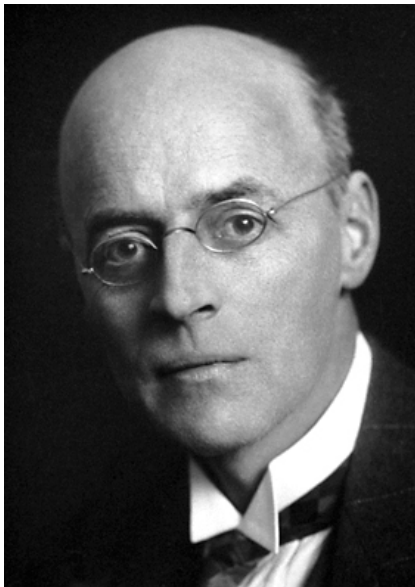
Med en slik oppfatning avledet han hele diskusjonen om lysets «sanne natur», og bølge-partikkel-dualismen ble født. Vi kan bruke bølgebeskrivelse når vi synes det fungerer best, og partikkelbeskrivelse når det fungerer best, for vi kan uansett ikke vite hva lysets «sanne natur» er!

Bohr betraktet bølge og partikkel-beskrivelsene av lys som *komplementære*. Med det mente han at i et eksperiment kan lys aldri vise både bølge- og partikkel-egenskaper samtidig. Han benyttet dernest komplementaritetsprinsippet også til å lansere erkjennelsesteoretiske synspunkter, så bølge-partikkel-dualismen synes å ha vært en svært viktig del i hans virke.

Mine refleksjoner

Jeg selv er innpodet i Bohrs tanker, i likhet med svært mange andre fysikere. Men jeg (og mange med meg) klarer ikke å akseptere filosofien som logisk positivisme står for. For meg er det virkelig en fysisk forskjell mellom et sted i rommet som har et elektrisk felt og et sted som ikke har et slikt felt. For meg er det en fysisk forskjell mellom en bølge i klassisk forstand og Einsteins «lyskvanter som er lokalisert i rommet». Jeg har det vi i filosofien kaller en realisme-tolkning av naturen. Jeg anser det derfor som en ulykke for fysikken at konflikten mellom Maxwells og Einsteins beskrivelser bare ble skjøvet under teppet i så mange år.

Skjønt, har den det? Jeg synes å se at det i dag er langt flere enn meg som ikke omfavner logisk anti-realisme-holdninger innen filosofien (så som logisk positivisme og instrumentalisme). Vi etterstreber en forståelse av hvordan lys faktisk er. Uheldigvis, sett med mine øyne, ser det ut til at mange har havnet på motsatt konklusjon enn meg, nemlig at de ser på fotoner mest som partikler. Det diskuteres for eksempel om fotonet går gjennom en eller begge spaltene i en dobbeltspalt. En slik diskusjon bortfaller dersom man ser på lys som bølger. I stedet for en bølge-partikkel-dualisme har det for mange blitt en «bølge-partikkel-dualisme» der mange oppfatter et



Figur 3. Owen Richardson ga en alternativ beskrivelse av fotoelektrisk effekt. Han fikk Nobelprisen i fysikk i 1928 for sitt arbeid med termionisk emisjon.
Foto: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1928/richardson-bio.html

«foton» først og fremst som en elementærpartikkel i likhet med elektroner, protoner, myoner osv.

I lærebøker i fysikk nevnes Einsteins forklaring på fotoelektrisk effekt og Compton-effekten på en slik måte at leseren sitter igjen med et inntrykk av lys består av fotoner med kvantisert energi. Det nevnes ikke at det hersker en viss uenighet om denne konklusjonen. Selv om Store norske leksikon og alle tilsvarende kilder setter opp fotonet i tabeller over familiene av elementærpartikler, er det vanskelig for folk flest å fange opp at ikke alle deler et slik syn. Jeg er blant dem som mener at klassifiseringen av fotoner som elementærpartikkel er feil.

Jeg synes det er interessant å dvele litt til med enda noen historiske faktorer. I klassisk fysikk klarte James Clerk Maxwell (1831–1887) ca. 1864 å samle «all» kunnskap om elektriske og magnetiske felt i sine berømte Maxwells ligninger. Hans teori forutsa at det ville være mulig å danne en elektromagnetisk bølge siden tidsvariable elektrisk og magnetisk felt er koblet til hverandre, og denne bølgen ville i så fall gå med lyshastigheten. Maxwell fant at vi til og med kan regne ut lyshastigheten ut fra kjente relasjoner mellom klassiske elektriske og magnetiske felt for stasjonære spenninger og strømmer. Maxwell blir oftest nevnt som «den største fysikeren som hittil har levd», og han slår gjerne ut både Newton og Einstein i omdømme.

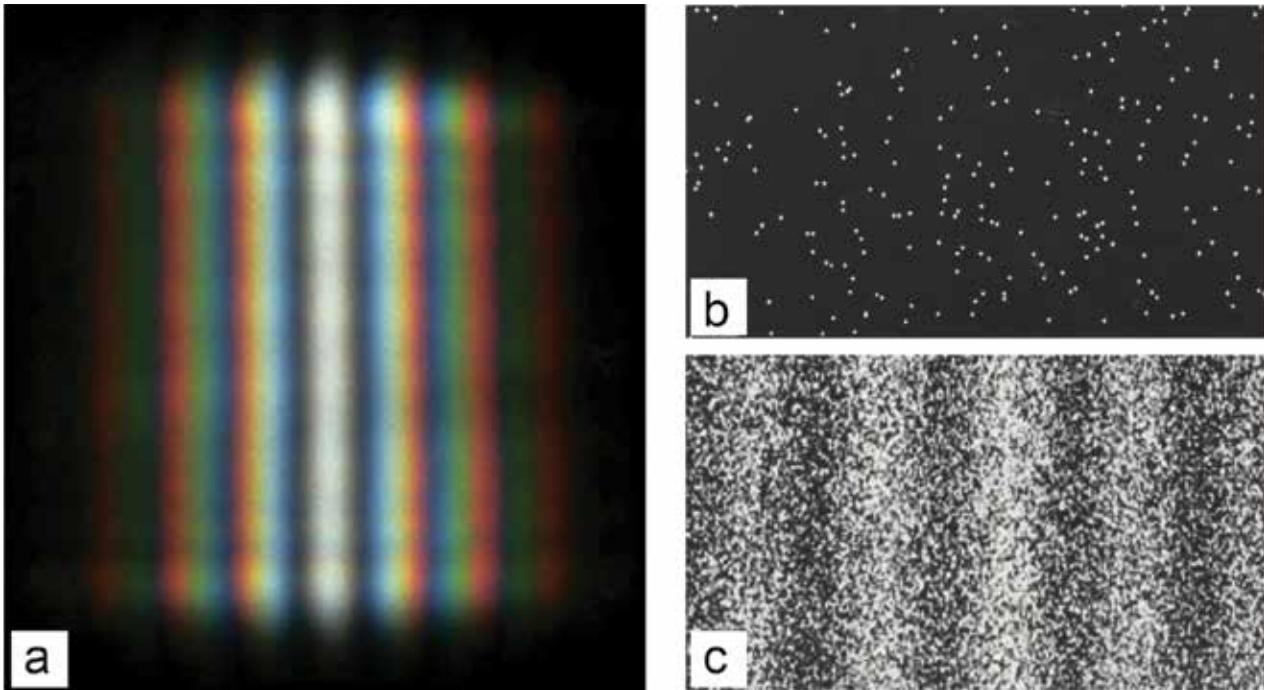
Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894) viste gjennom eksperimenter i årene 1886–1889 at det faktisk var mulig å produsere elektromagnetiske bølger med de karaktertrekkene som Maxwell hadde beskrevet. Han var eksperimentalfysiker og hadde blant annet erfaringer med antennens betydning for å generere elektromagnetiske bølger og han jobbet i et annet frekvensområde enn lys. Han hadde nok en helt annen praktisk forståelse av slike bølger enn

teoretikerne Einstein og Bohr.

Hvorfor bidro ikke disse personene i debatten etter Einsteins arbeid i 1905? Faktum er at Maxwell ble bare 48 år gammel og Hertz 36. De var begge døde før Einstein kom med sin ide. Jeg føler meg overbevist om at historien om fotonet ville sett ganske annerledes ut dersom de to hadde levd og deltatt i de kritiske årene.

Det var likevel andre som protesterte. Det startet med Planck selv som nevnt ovenfor. I 1912 forklarte Owen Richardson fotoelektrisk effekt uten å ty til kvantisert energi for det elektromagnetiske feltet. Richardson viste at frekvensen på feltet var avgjørende, ikke energiinnholdet [4]. Hans modell var basert på statistiske og termodynamiske prinsipper, på en lignende måte som Max Planck hadde brukt i sin utledning av «sort stråling». Han syntes, i likhet med mange andre, at det virker lite troverdig at et foton skal gi all sin energi til ett elektron siden elektronene i materialet vekselvirker jo med en hel mengde andre elektroner. En bølgelengde for lysbølger er jo på om lag 500 nm, og det er mye større enn gjennomsnittsavstanden til elektroner i et fast stoff. Energibevaring kan man få til uten å kreve at bevaringen skjer som om fotonet og det ut-sparkede elektronet fantes alene i verden. Detaljer kan leses i masteroppgaven til Borys Jagielski [5].

Det er også vist at Compton-effekten kan forklares uten å ty til kvantisert energi i fotoner. Her er det flere alternative forklaringer, en av dem går på at det elektromagnetiske feltet i røntgenområdet klarer å få til en form for oscillasjon i selve elektronet (elektronet er *ikke* punktformig) (eller i elektronskyen rundt atomkjernene). Også deBroglie-bølgelengden til elektronet trekkes inn i en av forklaringene. Det brukes relativistiske beskrivelser. For detaljer viser jeg igjen til Jagielskis masteroppgave.



Figur 4. a: Solllys sendt gjennom en dobbeltspalt. b og c: elektroner sendt gjennom en dobbeltspalt.

Foto: a) Aleksandr Berdnikov, b) Tonomura

Et tredje eksperiment nevnes også ofte som et bevis for at lys må betraktes som partikler, nemlig et arbeide som Alain Aspect gjorde sammen med sine medarbeidere i 1986 [6]. De mente å vise at et foton ikke deles når det sendes til en stråledeler. Men også dette eksperimentet er det reist en del tvil om. Blant annet vises det til at selv om en stråledeler gir lik intensitet i begge utgangene over tid, er det ikke nødvendigvis slik for hvert eneste foton. Også de innvendingene til dette eksperimentet har Jagielski diskutert. Jeg vil legge til at vi i vår egen lab for få år siden gjorde et eksperiment som støtter fullt ut kritikken til konklusjonen i Aspects arbeid. Slik sett er det litt underlig at dette arbeidet bidro til at Aspect fikk Nobelprisen i 2022 (sammen med Clauser og Zeilinger).

Samlet sett er det ingen helt overbevisende eksperimenter som viser at lys *må* betraktes som udelelige partikler i stedet for elektromagnetiske bølger – bølger i et felt som er utstrakt i tid og rom.

Jeg kan nevne at Hanbury Brown og Twiss (HBT) på 1950-tallet også var klare motstandere av tanken om lys som partikler. Det samme var Willis Eugene Lamb Jr. (fikk Nobelprisen i fysikk i 1955 «for oppdagelsen av fin-strukturen i hydrogen-spekteret»). Apropos Hanbury Brown, Joakim Bergli og jeg publiserte i fjor et arbeid som støttet Hanbury Brown i hans syn på elektromagnetiske bølger som bølger. Vi viste at den såkalte HBT-effekten kan påvises med lydbølger på samme måte som HBT viste for synlig lys – til tross for at det er to vidt

forskjellige typer bølger og frekvensene er en faktor 10^{12} forskjellige [6].

For noen år siden spurte jeg Serge Haroch på en konferanse om hvordan han betraktet og beskrev lys (Haroch delte Nobelprisen i fysikk med David Weinman i 2012 «for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems.») Interessant nok svarte Haroch at han selv brukte omtrent like ofte Maxwells ligninger som kvantefelt-beskrivelse av lys, og han presiserte uoppfordret at han betraktet lys som elektromagnetiske felt, ikke som partikler!

Jeg har også møtt en del fysikere som i samtale en til en sier at de betrakter lys som bølger, men at de ikke orker å diskutere dette med fysikere som har motsatt syn. For meg synes det som om flere av dem som holder på bølge-forståelsen er eksperimentalfysikere eller fysikere som må spesifisere hvilket optisk utstyr de skal bruke og skjønner fysikken som ligger bak (for eksempel betydningen av tykkelsene på flere lag med tynne filmer etter hverandre for å få stråledelere til å fungere som de skal). Beregninger av praktiske detaljer er basert på fysiske virkningsmekanismer, ikke av overordnet teori. «Energi» er aldri en fysisk virkningsmekanisme i seg selv!

Dobbeltspalten og kornete bilder

Jeg hører ofte oppfatningen: «Lys er bølger mens det er underveis fra kilden til detektoren, men viser



Figur 5. Et løvtre mister blader enkeltvis når svak vind blåser på treet. Responsen er «digital» (bladet løsner eller løsner ikke), men skyldes neppe enkelt-luftmolekyler som treffer bladet. Kvantisert respons skyldes ikke nødvendigvis kvantisert påvirkning.

partikkelnaturen når de detekteres.»

Jeg synes et slikt utsagn er ganske problematisk, fordi det ikke spesifiseres hva personen mener med «bølge underveis». Er det en reell bølge som har en utstrekning minst en bølgelengde i alle tre retninger i rommet? Det vil si en bølge som i praksis må være i størrelsesordenen en mikrometer eller mer i alle retninger (når vi er i fritt rom)? Det er en enorm størrelse i forhold til atomære avstander i et fast stoff og også i forhold til molekyl-avstander i for eksempel luft. Og er det en bølge som kan adderes til andre bølger slik at vi siden ikke kan skille de ulike bidragene, og er det en bølge som kan deles i hvilke som helst fraksjon? Eller er det en bølge som har et gitt energiinnhold $E = hf$ og som har en mindre utstrekning enn det en reell bølge vil ha?

Hvis man ikke har tenkt gjennom disse detaljene, kan det lett hende at man snakker om «bølge», men at «bølgen» man tenker seg faktisk ikke har typiske bølgeegenskaper når alt kommer til alt. I så fall er betegnelsen «bølge» misvisende, og betegnelsen «partikkel» ville passet bedre.

«Standard-beviset» for at lys oppfører seg som partikler i vekselvirkning med materie er bilder av stripemønsteret på en skjerm etter at fotoner eller elektroner er sendt gjennom en dobbeltspalt. Noen eksempler er vist i Figur 4.

Stripemønsteret når sollys sendes gjennom en dobbeltspalt er tydelig (Figur 4a), men vi ser også fargene som skyldes at det er mange bølgelengder i sollys. Det skyldes at avstanden mellom stripene er

avhengig av bølgelengden til lyset. I Figur 4b og 4c ser vi at interferens-striper bygges opp over tid når vi sender elektroner gjennom en dobbeltspalt. Det er ca. 200 prikker i bildet 4b og 140 000 i 4c.

I del 2 av denne artikkelen drøfter jeg sammenligningen av fotoner og elektroner. Er de egentlig så like som mange vil ha det til?

I denne artikkelen fokuserer jeg på en litt annen side av argumentasjonen. Vi ser ingen tydelige prikkstrukturer i det optiske interferens-bildet i Figur 4a, men vi ville sett antydninger til prikker om vi gikk ned til lav nok lysintensitet, om enn ikke i den grad vi ser for elektroner. Spørsmålet er da: Er eventuelle prikker et bevis på at lys er fotoner? Jeg mener at svaret er nei, og jeg vil begrunne dette med Figur 5.

Her er et løvtre om høsten. Når det kommer en svak vind, vil noen få blader løsne fra greinene sine. Vi kan ikke påstå at hvert blad som løsnet skyldtes at ett luftmolekyl traff bladet. På tilsvarende måte er det ingen bevis for at en piksel på en fotografisk skjerm skyldes ett foton. Vi kan jo ikke se selve fotonet treffe skjermen. Vi ser bare et resultat av noe som påvirket den fotografiske platen, og detektoren kan bare respondere «digitalt» (enten ser vi en virkning i et «punkt» eller så ser vi det ikke). Så lenge sannsynligheten for at noe skal skje er lav, vil det bare være enkeltprikker på en skjerm uansett om det var kvantiserte fotoner inn eller ikke.

Enkeltprikkene henger sammen med kjensgjerningen fysikerne måtte ta inn over seg rundt

«Det er ikke konsensus blant fysikere i dag verken om tolkning av bølge-partikkel-dualismen eller tolkning av kvantefysikk.»

år 1900: At fast stoff ikke kan deles i vilkårlig små enheter. Vi kan ikke dele elektroner i vilkårlig små deler, og elektronene er bundet til stoffet i diskrete energinivåer (eller energibånd) slik Planck beskrev. For å få en respons i en detektor, må minst ett elektron skifte energinivå (eller energibånd).

Dersom vi teller opp antall blader som løsner fra treet – eller antall elektroner som har skiftet energi i en detektor – som funksjon av tid, vil vi ikke få en glatt kurve. Antall blader eller antall elektroner er alltid et heltall. Avviket fra en rett linje er kjent som «shot noise» og denne type støy finner vi i all elektronikk, blant annet i digitale kameraer og alle former for detektorer for lys.

Merk at selv om antall blader som løsner kan angis som heltall, er det slett ikke gitt at antall luftmolekyler som ga fra seg sin energi til bladene er et heltall og i forholdet 1:1 mellom molekyler og blader. På samme måte er det ikke noe bevis for at antall elektroner som skifter energinivå i en detektor er korrelert med antall fotoner som hver har en gitt energi $E = hf$. Det kan like gjerne være elektromagnetiske felt med en vilkårlig (kontinuerlig fordelt) energitetthet som ligger bak. Kvantiseringen skyldes kvantisert respons i detektoren, og det er umulig derfra å trekke slutninger om at det var kvantisert påvirkning som lå bak.

Skulle vi påvise at elektromagnetiske bølger har kvantisert energi, måtte vi hatt en detektor som er fri for «shot noise» – det vil si en lokalisert detektor der responsen øker hundre prosent lineært dersom energitettheten i en innkommende elektromagnetiske bølge varierer lineært (også for lave intensiteter). Såvidt jeg kjenner til finnes ingen slik detektor.

Sluttbemerkning

Jeg har i denne første delen av min artikkel konsentrert meg om historikk knyttet til dagens oppfatninger av lys. I andre del (neste nummer av FFV) er fokus fysiske fenomener som har formet mitt syn på bølge-partikkel-dualismen. Jeg er eksperimentalfysiker og har dessuten gjennomført mange ulike numeriske modelleringer av fysikkfenomener. Det har gitt meg en rekke aha-opplevelser. Mine

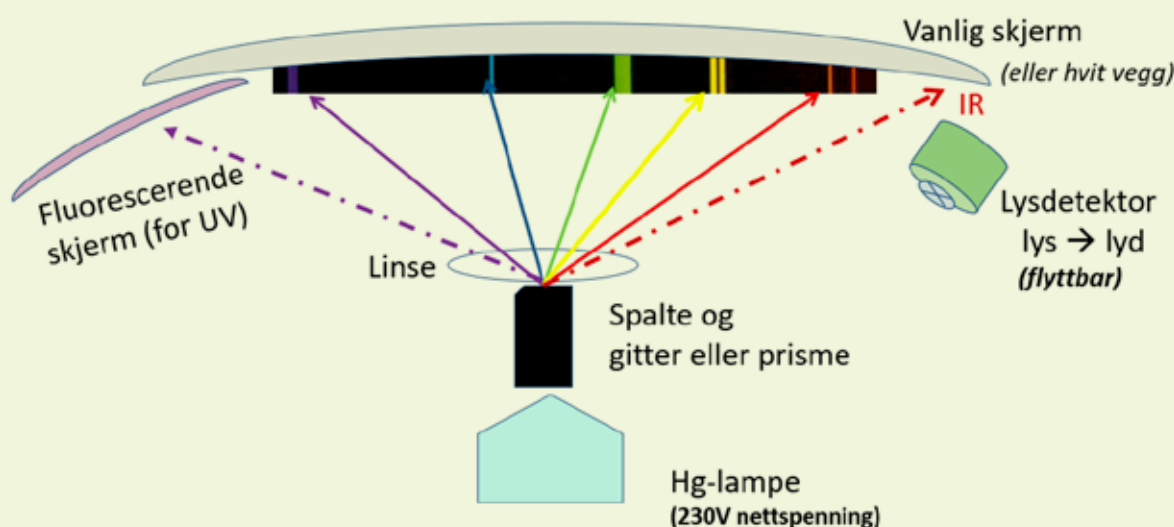
oppfatninger og argumentasjon preges av dette og er ofte ganske forskjellig fra det jeg hører fra mine kollegaer som ikke har en tilsvarende bakgrunn. Som nevnt innledningsvis er det ikke konsensus blant fysikere i dag verken om tolkning av bølge-partikkel-dualismen eller tolkning av kvantefysikk. For å få mer enighet må vi antakelig forkaste en del av tankegodset fysikkpionerene på begynnelsen av 1900-tallet stod for. Jeg har mine synspunkter i denne prosessen, og det planlegges at andre vil komme med sine i oppfølgende artikler i FFV, så følg med! ■

Referanser

- [1] Schlosshauer, M., Kofler, J. og Zeilinger, A. (2013) «A Snapshot of Foundational Attitudes Toward Quantum Mechanics». arXiv:1301.1069v1 [quant-ph] 6. januar 2013, 17 sider.
- [2] Nolte, D.D. (2023) «Francois Arago and the Birth of Interferometry». *Optics & Photonics News*, 1. mars 2023.
- [3] Einstein, A. (1905) «On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light» (Engelsk oversettelse av tysk tittel). *Annalen der Physik* 17, s. 132–148.
- [4] Richardson, O.W. (1912) «Some Applications of the Electron Theory of Matter». *Philosophical Magazine* 23, s. 594–627. Se også referanse 6 og 7 på Wikipedias omtale av Owen Richardson (https://en.wikipedia.org/wiki/Owen_Willans_Richardson, lastet ned 1. juli 2023).
- [5] Jagielski, B. (2009) «Elements of the wave-particle duality of light». Masteroppgave i fysikk, Universitetet i Oslo. www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/11232/jagielski.pdf. 211 sider.
- [6] Grangier, P., Roger, G. og Aspect, A. (1986) «Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: A new light on single-photon interference.» *Europhysics Letters* 1, s. 173–179.
- [7] Vistnes, A.I. og Bergli, J. (2022) «Hanbury 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.

Demo av elektromagnetisk spektrum

IR – Synlig – UV - i ett og samme forsøk



Figur 1. Oppstilling for projeksjon av UV-IR og synlig spektrum.

Tor Hjalmar Johannessen tidligere lektor i realfag

Strømforsyningen i Norge er typisk 230 V vekselstrøm med en frekvens på 50 Hz. Det gir 100 spenningsstopper i sekundet. Omgjort til lyd vil dette høres som brumming.

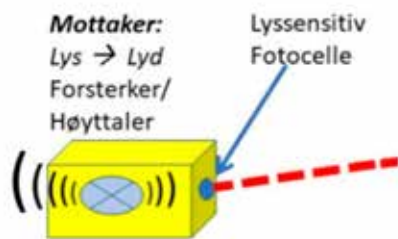
Vanlige glødelamper reagerer dårlig på raske spenningsforandringer. Derimot vil lysstoffrør og LED-pærer pulsere, riktignok raskere enn øyet kan se.

Mange fysikklaboratorier på videregående skole har vekselstrømsbaserte kvikksølvlamper som vil pulsere tilsvarende. Slike lamper vil emitte mange lysfrekvenser i form av linjespektre, også i infrarødt og ultrafiolett. Styrken til alle spektrallinjene blir modulert med driftsspenningen.

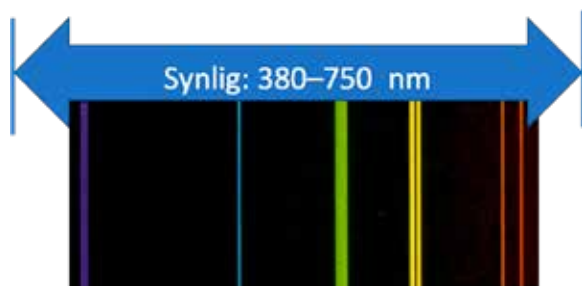
Jeg vil her beskrive hvordan man kan påvise

spektrallinjer i UV og IR fra en kvikksølvlampe ved å omforme det modulerte lyset til lyd. De fleste transistorer er lysømfintlige. Det er årsaken til at de er innkapslet i svart plast. Uten plasten ville transistoren endre strømmen i takt med lysintensiteten. I prinsippet er en transistor derfor alltid en lysdetektor – eller fotocelle.

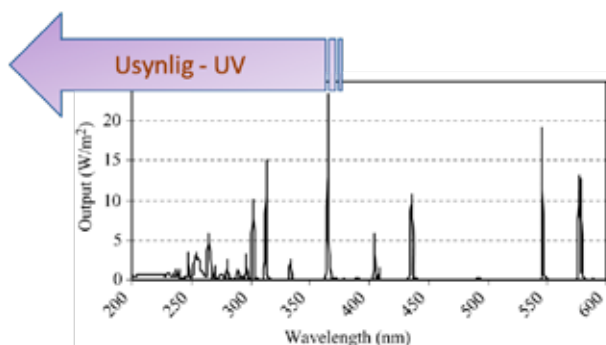
Det finnes relativt billig utstyr tilgjengelig i dag i form av lys/lyd-bokser som består av en fotocelle som er koblet til en forsterker og en høyttaler. Se Figur 2. Ved å slå den på i et rom opplyst med lysstoffrør eller lysdioder hører man straks brummingen på 100 Hz. Fotocellene er også følsomme for IR- og UV-lys, så man kan høre brumming fra



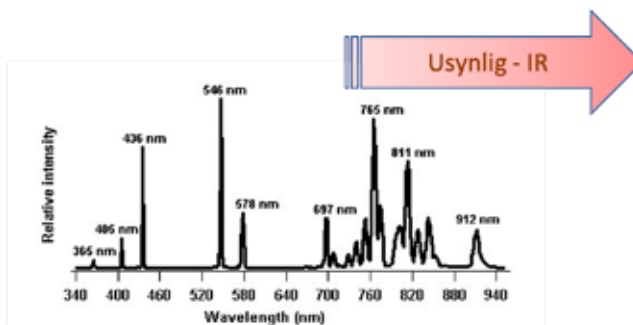
Figur 2. En lys/lyd-boks som består av en fotocelle som er koblet til en forsterker og en høyttaler.



Figur 3. Den synlige delen av Hg-spekteret ser slik ut.



Figur 4. Spektralfordelingen for kvikksølvldamp.



usynlige linjer hvis man fører sensoren forbi et linjespekter i et mørklagt rom.

Forsøksoppstilling

Se Figur 1. Linjene i det synlige spektralområdet er lett synlige på skjermen når rommet er mørklagt.

Ved å plassere den fluorescerende skjermen på utsiden av den fiolette delen av spekteret kan man se noen linjer som lyser (typisk grønt) der UV-lyset treffer. Ved å føre fotocellen med høyttaler forbi linjene hører man brumming på de samme stedene, også der UV-linjene er.

Men hva med IR? Hg sender også stråling i det infrarøde området. Her er lyssensoren til god

Utstyr til forsøket

- Et rom som kan mørklegges.
- En sterk Hg-kilde og passende strømforsyning.
- Lys/lyd-detektor med høyttaler.
- Gitter som kan splitte opp lyset til et linjespekter.
- Linser/stativ som muliggjør projeksjon av linjespekteret, og tilpasse disse mht. fokusering.
- En projeksjonsskjermer, der man kan se linjene som er fokusert på forhånd, f.eks. 3–4 m fra lyskilden.
- En fluorescerende skjerm eller duk som lyser ved UV-bestråling.

hjelp. Ved å føre mottakeren på utsiden av de røde spektralområdet, hører man kraftig brumming, også på steder som ikke kan ses med øyet, eller fanges opp med den fluorescerende duken; dette er infrarøde linjer.

Studier av spektre fra ulike grunnstoffer, der gasser gir linjespektre, er grunnleggende for deler av den kunnskapen vi har i atomfysikk og astronomi.

Linjene er karakteristiske for hvert grunnstoff og brukes til kjemisk analyse, som også betyr at vi kan fastslå hva en stjerne består av – millioner av lysår borte. Men spekteret her er typisk for kvikksølv i gassform. ■



Programmering i skolefysikken:

Hva kan vi lære av masteroppgaver i fysikkdidaktikk?

Ellen K. Henriksen Fysisk institutt, UiO
Berit Bungum Institutt for fysikk, NTNU

Med Kunnskapsløftet LK20 har programmering blitt del av fysikkfaget i videregående skole. I denne artikkelen viser vi hva noen masteroppgaver skrevet av lektorstudenter ved UiO og NTNU i perioden 2019–2023 kan bidra med på feltet. Dette er i form av gjennomarbeidede undervisningsopplegg, empiriske resultater og teoretiske perspektiver for hvordan programmering kan inngå i fysikkundervisning på konstruktive måter.

Programmering i fysikkfaget i videregående skole

I 2021 trådte en ny læreplan i kraft for fysikkfaget i videregående skole (Utdanningsdirektoratet, 2021), som gav noen endringer i innhold og vinkling (se Henriksen, 2021). En av endringene som ble innført, var at programmering nå inngår i fysikkfaget så vel som i matematikk- og naturfaget. Tabell 1 viser hvordan programmering omtales i læreplanen for fysikk 1 og fysikk 2.

Programmering har vært en del av grunnutdanningen i fysikk i høyere utdanning i noen år (Malthe-Sørenssen og medarbeidere, 2015). Haraldsrud og Tellefsen (2018a, 2018b) argumen-

terte i FFV for hvordan programmering kan støtte læring i skolens fysikkfag og ga noen eksempler på hvordan enkle programmeringsaktiviteter kan inngå. Det finnes også en del ressurser i form av bøker (f.eks. Haraldsrud og medarbeidere, 2020) og nettbaserte kurs. Figur 1 (se side 58) viser en aktivitet fra disse ressursene, hvor et fysisk fenomen representeres ved programkode. Programmering i skolefysikken er imidlertid såpass nytt at vi fortsatt har begrenset kunnskap om hvordan dette kan håndteres konstruktivt i klasserommet og hvilket utbytte elever får av ulike oppgaver og arbeidsmåter som inkluderer programmering.

Masteroppgaver om programmering fra fysikklektorutdanningene ved UiO og NTNU

Ved landets lektorutdanninger i realfag er det utført flere masteroppgaver i de siste årene (også før den nye læreplanen hadde trådt i kraft) som kan gi konkrete ideer til bruk av programmering i skolefysikken og som peker på læringspotensial, muligheter og utfordringer. Flere av masteroppgavene konkluderer med å presentere et revidert undervisningsopplegg

Tabell 1. Omtale av programmering i fysikklæreplanen (<https://www.udir.no/lk20/fys01-02>)

Del av læreplanen	Omtale av programmering
Kjerneelementet «Praksiser og tenkemåter i fysikk»	Kjerneelementet handler også om å bruke programmering, eksperimenter, teorier og modeller for å forstå fysiske sammenhenger og fenomener
Grunnleggende ferdigheter: «Å kunne lese»	Å kunne lese i fysikk innebærer å trekke ut, tolke og reflektere over informasjon i tekster som inneholder fysikkfaglige begreper, symboler, matematiske uttrykk, figurer, grafer og programmeringskoder
Grunnleggende ferdigheter: «Digitale ferdigheter»	... å bruke programmering og dynamiske verktøy til å utforske fysiske problemstillinger
Kompetansemål etter fysikk 1	[Eleven skal kunne] bruke numeriske metoder og programmering til å modellere og utforske bevegelse i situasjoner der akselerasjonen ikke er konstant
Kompetansemål etter fysikk 2	[Eleven skal kunne] bruke numeriske metoder og programmering til å utforske og modellere fysiske fenomener

der funnene fra utprøving og analyse var brukt til å forbedre det opprinnelige opplegget. Nedenfor presenterer vi noen hovedfunn fra masteroppgaver levert ved UiO og NTNU i perioden 2019–2023.

Programmering og algoritmisk tenkning som fagområde

I forkant av innføringen av LK20 gjorde *Sigurd Torp Nordby* (2019) i sin masteroppgave en gjennomgang av internasjonal forskningslitteratur om programmering og algoritmisk tenkning i fysikkopplæringen. Gjennomgangen viser ulike formuleringer av kunnskapsgrunnlaget for algoritmisk tenkning (Utdanningsdirektoratet, 2019), eller *computational thinking* (Wing, 2006; Shute et al., 2017) som et noe bredere engelsk begrep. Her inngår ikke bare programmering som ferdighet, men også datahåndtering, modellering og simulering, digital problemløsning og systemtenkning. Med tanke på fysikkfagets innhold kan programmering spille ulike roller, det kan brukes for å fremme læring i fysikk, fungere som «fysikkens språk» slik algebra gjør i mer tradisjonell fysikkundervisning, eller programmering kan fungere som et verktøy for utvikling av modeller i fysikk. Nordby gjennomførte også en intervjuundersøkelse blant fysikklærere for å undersøke hvilke muligheter og utfordringer de ser i å ta i bruk programmering i fysikkundervisning. Resultatene viser at lærerne er positive til at elever skal lære om programmering, men er usikre på om det fremmer læring i fysikk. Nordby peker imidlertid på en fare ved at lærerne kan forstå begrepet algoritmisk tenkning for snevert, og at lærere kan tolke det som algoritmeutvikling snarere enn den mer generelle tenkemåten som ligger i begrepet.

Som del av masteroppgaven sin har Nordby også utviklet tre undervisningsaktiviteter, om

henholdsvis analyse av rettlinjert bevegelse, numerisk beregning av bevegelse i inhomogent felt og programmering av en «fotonkalkulator», som gir frekvens, fotonenergi og farge som respons på en gitt bølgelengde for lys. Aktivitetene er prøvd ut i tre fysikklasser med justering av opplegget mellom hver utprøving, og elevene har blitt intervjuet og svart på spørreskjema om sine erfaringer med aktivitetene med programmering i fysikk. Resultatene viser at elevene tolker aktivitetene hovedsakelig som å inneholde programmering, i mindre grad fysikk. Basert på resultatene peker Nordby på at det er fare for kognitiv overbelastning når elevene skal lære både fysikk og programmering samtidig.

Hvordan tolkes læreplanen?

Fridtjof Gjengset (2022) brukte intervjudata til å studere hvordan fysikklektorer og fysikklektorstudenter så på programmering i skolefysikken og hvordan de tolket læreplanen på dette punktet. Som teoretiske forståelsesrammer brukte han begrepene *computational literacy* (Odden og Caballero, 2023) i tillegg til *computational thinking*. Han fant at både lærernes tolkning av læreplanen og formen og omfanget av programmeringsaktivitetene som de brukte i fysikkundervisningen varierte mye. Lærerne rapporterte også at det først og fremst var de flinke elevene som hadde nytte av programmeringsaktivitetene, mens de svakere elevene slet med denne nye representasjonsformen. Lærerne opplevde det som utfordrende at elever trengte å lære seg grunnleggende programmeringsferdigheter, mens læreplanen i stor grad legger opp til at eleven skal bruke programmering til å forstå fysiske fenomener. Gjengset bemerket også (til forskjell fra Nordby) at lærernes beskrivelser av algoritmisk tenkning var for generelle; de var mer fokusert på problemløsning enn

```

1 From pylab import *
2 import pygame
3
4 # Variabler
5 g = 10 # Tyngdeakselerasjon i m/s^2
6 l = 0.5 # Lengden av snora i m
7 m = 1 # Massen av pendelen i kg
8 slippvinkel = 60 # Slippvinkel i grader
9
10 # Slippvinkel og vinkelfart
11 theta0 = radians(slippvinkel) # Startslippvinkel i radianer/
12 w0 = 0 # Startvinkelfart
13
14 w = w0 # Vinkelfart i radianer/s
15 theta = theta0 # Slippvinkel i radianer
16
17 # Startposisjon
18 x = l*sin(theta)
19 y = -l*cos(theta)
20
21 # Visualisering 1: Setter opp Pygame (dette kan du se bort f
22 pygame.init()
23 vindux = 640
24 vinduy = 640
25 vindu = pygame.display.set_mode((vindux,vinduy))
26 pygame.display.set_caption("Pendellaboratorium")
27 HVIIT = (255,255,255) # RGB-koden for hvit
28 SVART = (0,0,0) # RGB-koden for svart
29 vindu.fill(HVIIT)
30
31 # Visualisering 2: Tegner pendel (dette kan du se bort fra)
32 vx2 = int(vindux/2) # x-posisjon til pendelen i vind
33 vy2 = int(vinduy/2) # y-posisjon til pendelen i vinduet
34 pygame.draw.line(vindu,SVART,(vx2,1),(int(round(vx2*x+vx2)),
35 pygame.draw.circle(vindu,SVART,(int(round(vx2*x+vx2)),-int(r
36 pygame.display.update()
37

```

Figur 1. Simulering av pendelbevegelse. Skjermbilde fra Universitetet i Oslo sitt kurs «Profag», fagmodulen «Naturvitenskap VGS», <https://realprog.no/docs/fagmoduler/pendelbevegelse.html>

på å bruke programmering. Et av de tydeligste innspillene fra denne masteroppgaven er av teoretisk art: Gjengset hevder at *computational literacy* er det mest velegnede rammeverket for å vurdere og kommunisere presist og nyansert om ulike aspekter ved programmering i skolefysikken. *Computational literacy*-rammeverket (CL) skiller mellom *materiell CL*, som dreier seg om selve datamaskinen, programmeringsspråket og hvordan man skriver kode; *kognitiv CL*, som handler om å bruke programmering til å løse problemer og forstå verden, og *sosial CL*, som viser til ferdigheter i å dokumentere, kommunisere og samarbeide når man bruker programmering (Odden og Caballero, 2023).

Ulike faglige kontekster og vinklinger for fysikkundervisning med programmering

Flere av masteroppgavene om programmering i fysikk har utviklet undervisningsopplegg som studenten har prøvd ut med fysikkelever i skoler. Dette er gjort i ulike faglige kontekster og med ulike vinklinger.

Jonathan B. Waters (2020) tok i sin masteroppgave utgangspunkt i læreplanmålet om at elevene skal kunne «bruke numeriske metoder og programmering til å modellere og utforske bevegelse i situasjoner der akselerasjonen ikke er konstant». Han utviklet et undervisningsopplegg for fysikk 1 der elevene brukte programmering til å

simulere et vertikalt kast med og uten luftmotstand. Programmeringen ble gjort i programmeringsmiljøet Trinket.io og ble gjennomført i to klasser. Waters samlet data fra elevene i form av skjerm- og lydopptak, skriftlige oppgavesvar og fokusgruppediskusjoner og analyserte dataene med hensyn på sin hovedproblemstilling: «Hvordan kan en programmeringsaktivitet i fysikk 1 bidra til dybdelæring for elevene?» Waters fant at programmeringsaktiviteten hjalp elevene med å se sammenhenger mellom ulike størrelser i formlene de brukte. Analysene tydet på at elevene lærte noe om både programmering, fysikkfaglige begreper og fysikkens egenart som forskningsdisiplin. Men for at programmeringsaktivitetene skulle føre til dybdelæring hos elevene, var det viktig å holde utfordringer knyttet til programmeringssyntaks på et håndterbart nivå. Elevene trengte også god støtte i å se sammenhengen mellom det fysiske fenomenet representert gjennom programkode og gjennom andre av fysikkens representasjonsformer, f.eks. formler, grafer, tekstlige beskrivelser osv.

Johanna X. Skøien (2023) tok utgangspunkt i samme læreplanmål som Waters og utviklet et undervisningsopplegg med bruk av Eulers metode i Python, hvor metoden utgjør selve faginnholdet. For å bli kjent med metoden skal elevene også bruke den med penn og papir før de programme-

«Elevene trengte også god støtte i å se sammenhengen mellom det fysiske fenomenet representert gjennom programkode og gjennom andre av fysikkens representasjonsformer, f.eks. formler, grafer, tekstlige beskrivelser osv.»

rer. Et vesentlig trekk ved opplegget er bruken av minioppgaver underveis, som gjør at elevene får en overkommelig progresjon. De arbeider også med animasjoner med programvaren Blender, for å inkludere en visuell representasjonsform. I opplegget introduserer Skøien elevene til NumPys system for arrays, og elevene bruker arrays og preallokering framfor lister. Hun argumenterer for at dette gir et mer autentisk bilde av hvordan fysikere arbeider, selv om metoden ble utfordrende for elevene. Basert på gjennomføringen med opptak av elevenes arbeid i timene og intervjuer med elevene identifiseres en rekke dilemmaer for realiseringen av kompetansemålet om numeriske metoder i norske klasserom. Disse angår hvordan kompetansemålet skal tolkes når det står at elevene skal kunne *bruke* numeriske metoder – skal de da også selv gjøre programmeringen? Hvilke og hvor mange løsningsmetoder skal elevene lære? Et annet dilemma er hvordan læreplanen vektlegger dybdelæring, men hvor tilgjengelig timetall er begrenset og elevtall per lærer ofte er stort. Videre viser resultatene at elevene har problemer med å ta i bruk det de har lært i nye sammenhenger. Dette har betydning for hvordan vi kan anta at elevene skal kunne bruke programmeringsferdigheter på tvers av faglige sammenhenger.

En tredje masteroppgave med utgangspunkt i samme kompetansemål kom fra *Elias Odden Slettevoll* (2023), som utviklet et undervisningsopplegg hvor elevene skal simulere et fallskjermhopp i Python der de dels får ferdig kode og dels skal programmere selv. I lys av teori om algoritmisk tenkning diskuterer han hvordan programmering kan fungere som et verktøy for å lære fysikk snarere enn at undervisningen vektlegger læring av verktøyet i seg selv. Resultatene, basert på en spørreundersøkelse, intervjuer og observasjon i klasserommet, tyder på at opplegget har lyktes i å integrere fysikk og programmering på en god måte. Elevene finner oppgaven krevende, men opplever programmeringsaktivitetene som relevante – med litt ulike begrunnelser: Noen elever synes programmering hjelper dem til å forstå fysikken, mens andre vektlegger hvordan det bidrar til å forstå hvordan digitale verktøy fungerer. De uttaler at arbeidet med å utvikle en modell er mer givende enn å løse tradisjonelle fysikkoppgaver på papir. Elevene verdsetter

også hvordan programmeringsaktiviteter legger til rette for samarbeid og diskusjon. Imidlertid viser resultatene, som også viser seg i flere andre masteroppgaver, at det er behov for mer veiledning i klasserommet enn en enkelt lærer har kapasitet til når elevene arbeider med programmering.

Johan Fredrik B. Herberg (2021) har i sin masteroppgave tatt for seg et komplekst og svært aktuelt faglig tema, nemlig jordas strålingsbalanse. Temaet er framhevet i læreplanen gjennom kompetansemålet som sier at elevene skal kunne «bruke modeller av strålingsbalansen til jorda til å gjøre beregninger, og vurdere hvordan endringer på jordoverflaten og i atmosfæren påvirker denne balansen». I opplegget han har laget, starter elevene med å programmere en relativt enkel modell med Stefan-Boltzmanns strålingslov for å anslå en overflatetemperatur for jorda. I neste trinn tar de hensyn til albedo, og i siste omgang også drivhuseffekten. På denne måten lærer elevene om hvordan vitenskapelige modeller kan bygges ut til å ta stadig flere forhold i betraktning, og de lærer å vurdere resultatene modellen gir opp mot empiriske resultater. Herberg fant at det fysikkfaglige innholdet i oppgaven her ble mer utfordrende for elevene enn programmeringen, siden de hadde fått halvferdige koder i Python. På denne måten hadde undervisningsopplegget mer fokus på fysikken, og man kunne unngå for stor kognitiv belastning. Likevel falt innholdet i opplegget ganske vanskelig for elevene, og Herberg diskuterer om kanskje læreplanen er for omfangsrik og ambisiøs om man skal ta intensjonen om dybdelæring på alvor.

Oskar Andreas Olsen (2022) sin masteroppgave har tatt for seg bruk av programmering innen termisk fysikk, med fokus på modellering. Læreplanen sier at elevene etter fysikk 1 skal kunne «forstå begrepet temperatur og forklare hvordan tilført varme til et system fører til temperaturendring i dette systemet». Læreplanen i seg selv peker altså ikke i retning av å bruke programmering for dette temaet, men Olsen har brukt temaet til et opplegg hvor elevene selv programmerer en modell og lager grafiske plot. Opplegget har for øvrig ganske brede målsettinger: elevene skal utvikle modelleringskompetanse og gjør bruk av programmering, de skal arbeide utforskende og de skal kunne skille mellom faglig og dagligdags språkbruk. Det siste er spesi-

«Flere oppgaver peker på en spenning mellom å lære programmering som en ferdighet og å bruke programmering som verktøy til å forstå fysikk.»

elt relevant innen termisk fysikk hvor vi også har mange hverdagsbegreper som ikke er i samsvar med vitenskapelig begrepsbruk, eksempelvis «varme». I opplegget gjør elevene et forsøk med avkjøling av oppkokt vann, og representerer denne prosessen grafisk som en matematisk modell, og verbalt ved å beskrive hva dette viser. Basert på første utprøving er oppgaven til elevene justert før ytterligere en utprøving. Resultater fra utprøvingene og datainnsamling viste at elevene her fant programmeringen mest interessant og at det å gjøre arbeidet med programmet i detalj hjalp dem til å forstå faginnholdet bedre. Spesielt framhever de kombinasjonen av grafisk framstilling og det fysiske fenomenet, hvor det å se hva som skjer når de endrer parametere for grafen gir dem en bedre forståelse for fysikken.

Nye oppgavetyper som involverer programmering

Eirik Jerstad (2023) tok utgangspunkt i en oppgavetype som har vært brukt i høyere utdanning i fysikk (Odden og medarbeidere, 2022), men som hittil, så vidt vi vet, ikke hadde vært brukt i skolen, nemlig *programmeringssessay*. Et slikt essay er en ny type vitenskapelig tekst som kombinerer narrativ tekst med kjørbar programmeringskode. Essayet har likhetstrekk med en labrapport, men i stedet for å analysere empiriske data brukes programmering til å modellere et fysisk fenomen. Leseren kan selv kjøre og endre på koden, som er bygget inn i essayet (Jerstad gir i oppgaven diverse eksempler på hvordan denne kan implementeres og hvordan det tar seg ut). Formålet til Jerstad var å prøve ut og videreutvikle programmeringssessay som oppgaveform i skolefysikken, knyttet til at fysikk 2-elever skal «utforske og analysere en selvvalgt teoretisk eller praktisk problemstilling i fysikk». Gjennom programmeringssessayet kan elever utvikle alle de tre dimensjonene av «computational literacy». En stor del av Jerstads arbeid gikk ut på å lage eksempler, oppgaveformuleringer og rammer som kunne støtte elever i å skrive egne programmeringssessays. I likhet med Waters brukte Jerstad Trinket.io som programmeringsmiljø. Han samlet inn 12 programmeringssessays fra i alt 23 elever i to fysikkklasser (noen elever skrev essay sammen). I tillegg gjennomførte Jerstad intervjuer med fem elever. Basert på utprøvingen konkluderte Jerstad med at programmeringssessay kan være et nyttig verktøy i skolefysikk og

gi elevene stor grad av eierskap til egen læringsprosess. Elevene trenger imidlertid gode støttestrukturer i form av eksempler på essays, hjelpesider om bruk av Trinket.io, og oppfølging fra læreren.

Oppsummering og diskusjon

Ved både UiO og NTNU har «programmering i fysikk» vært et utbredt tema for masteroppgaver fra lektorstudenter de siste årene. Dette vitner om at fysikklærerne som er på vei ut i skolen kan tilføre viktig kompetanse. Arbeidene til våre nye lektorer viser at programmering, tross mange utfordringer, har et godt potensial for å gjøre fysikkfaget i skolen mer variert og mer autentisk slik Malthé-Sørensen et al. (2015) argumenterer for når det gjelder undervisning på universitetsnivå. Programmering og numeriske metoder gir mulighet for å ta for seg mer komplekse og mer realistiske problemstillinger, selv på begynnernivå. Imidlertid er det klart at lærere behøver støtte for å få til dette.

Noen tendenser kan identifiseres i oppgavene som er presentert over. For det første illustrerer masteroppgavene at det finnes mange ulike fortolkninger og ulike undervisningspraksiser og innfallsvinkler til programmering i fysikkfaget. Dette er i tråd med en læreplan som er svært åpent formulert. Masteroppgavene som eksemplifiserer programmering innen ulike temaer i skolefysikken, bidrar til at man kan unngå at det utvikler seg en form for «standardøvelser» innen programmering som det forventes at alle lærere gjennomfører i sin undervisning.

For det andre peker flere av oppgavene på en spenning mellom å lære programmering som en ferdighet (på lignende måte som vi forventer at fysikkelever skal ha ferdigheter i å bruke multimeter eller dataloggere) og å bruke programmering som verktøy til å forstå fysikk. Både masteroppgavene og læreplanen fokuserer på programmering som verktøy til å forstå fysiske fenomener bedre, men i dagens situasjon der programmering i skolefagene er ganske nytt, er det en fare for at fysikkforståelsen drukner i utfordringer med programmeringssyntaks. For å unngå kognitiv overbelastning og bidra til dybdelæring av fysikk må programmeringsoppgavene til elevene ha tilstrekkelige støttestrukturer. Flere av masteroppgavene peker på viktigheten av støtte som hjelper elevene å se sammenhengen mellom programkoden (for eksempel et uttrykk for akselerasjonen til ei kule i Python-kode) og

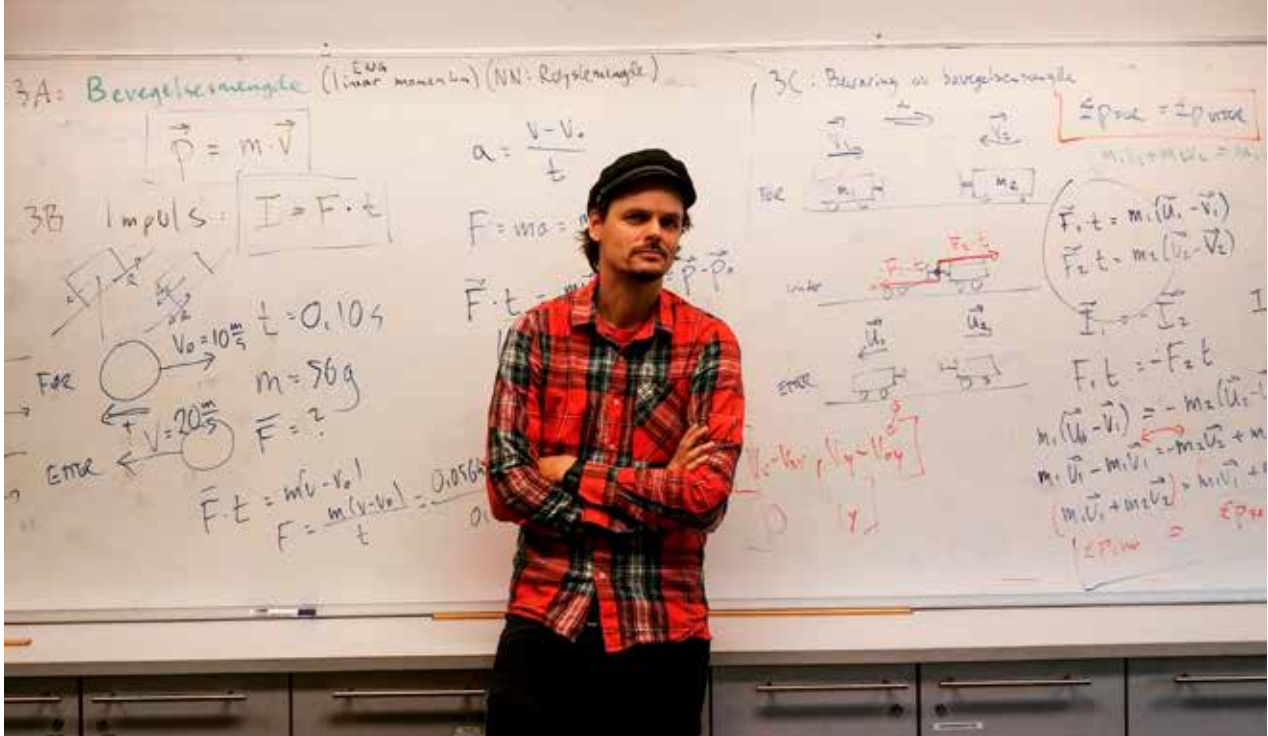
andre representasjonsformer av fenomenet som studeres (for eksempel en figur med kreftene på kula, som videre gir informasjon om akselerasjonen). Her er lærerens rolle sentral, og i tillegg trengs det kodeeksempler, hjelpespørsmål og hint, kommandooversikter osv. Flere av masteroppgavene presenterer prinsipper for programmeringsaktiviteter med elever, så som at de skal ha lav inngangsterskel og stor takhøyde (Skøien, 2023) eller at de kan bruke «use-modify-create»-prinsippet der elever først *braker* en ferdig kode, deretter *gjør endringer* i denne, før de etter hvert bli i stand til å *skape* sin egen kode (Jerstad, 2023).

Blant de mange teoretiske forståelsesrammene innen forskning på programmering i fysikkutdanning vil vi peke på «computational literacy» (CL). Dette rammeverket omfatter både selve kommunikasjonen med datamaskinen gjennom et programmeringsspråk (materieLL CL), forståelsen av hvordan datamodeller kan gi innsikt i prosesser og fenomener i naturen (kognitiv CL), og ferdigheter i å diskutere og kommunisere fysikkfaglig ved bruk av datamodeller og programmeringskode (sosial CL). Programmeringssessayene som er beskrevet i oppgaven til Jerstad (2023) samler disse tre perspektivene på en tydelig måte.

Som vi har sett av eksemplene i denne artikkelen, kan masteroppgaver i fysikkdidaktikk bidra til å utvikle praksis i skolen. Oppgavene presenterer både teoretiske perspektiver, gjennomarbeidede undervisningsopplegg til bruk i klasserommet, empiriske forskningsresultater om elevers læring og motivasjon, og anbefalinger for programmeringsaktiviteter i skolefysikk. Gjennom denne artikkelen håper vi å bidra til at fysikkklærere blir oppmerksomme på masteroppgaver som en kilde de kan bruke for å utvikle fysikkundervisningen. Vi tror at det fortsatt er rom for både forskning og utvikling innen dette området, og ønsker velkommen både gode innspill til forskning og utvikling og framtidige masterstudenter på området! ■

Referanser

- Gjengset, F.R. (2022). *Shaping programming in physics education: A study on how teachers' conceptualization of computation in high school physics influences what is taught*. Masteroppgave, Lektorprogrammet, UiO. www.duo.uio.no/handle/10852/100288.
- Haraldsrud, A., Sveinsson, H.A. og Løvold, H.H. (2020). *Programmering i skolen*. Universitetsforlaget.
- Haraldsrud, A.D. & Tellefsen, C.W. (2018a). «Debatt: Programmering og fagfornyelsen i skolen». *Fra Fysikkens Verden* 80(3), s. 76–77.
- Haraldsrud, A.D. & Tellefsen, C.W. (2018b). «Programmering – for fysikkens skyld». *Fra Fysikkens Verden* 80(3), s. 70–75.
- Henriksen, E.K. (2021). «Hvor går fysikkfaget i skolen? Refleksjoner i høringsprosessen på utkast til ny læreplan». *Fra Fysikkens Verden* 83(1), s. 14–19.
- Herberg, J.F.B. (2021). *Programmering og modeller for strålingsbalanse*. Masteroppgave, Lektorutdanning i realfag, NTNU. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2978561>.
- Jerstad, E. (2023). *Programmeringssessay i fysikk – En kvalitativ studie av elevers arbeid med sjangeren programmeringssessay, i fysikk 2*. Masteroppgave, Lektorprogrammet, UiO.
- Malthe-Sørenssen, A., Hjorth-Jensen, M., Langtangen, H.P. & Mørken, K. (2015). «Integrasjon av beregninger i fysikkundervisningen». *Uniped* 38(4), s. 303–310.
- Nordby, S.T. (2019). *Programmering og algoritmisk tenkning i fysikkundervisning*. Masteroppgave, Lektorutdanning i realfag, NTNU. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2610766>.
- Odden, T.O.B., Silvia, D.W. & Malthe-Sørenssen, A. (2022). «Using computational essays to foster disciplinary epistemic agency in undergraduate science». *Journal of Research in Science Teaching* 60(5), s. 937–977.
- Odden, T.O.B. og Caballero, M.D. (2023). Physics Computational Literacy: What, Why, and How? I Taşar, MF og Heron, PRL (red.): *International Handbook of Physics Education Research: Learning Physics*. AIP Publishing, s. 19-1–19-28.
- Slettevoll, E.O. (2023). *Programmering i fysikkundervisning. Et verktøy for læring eller læring av et verktøy?* Masteroppgave, Lektorutdanning i realfag, NTNU.
- Olsen, O.A. (2022). *Modellering i termisk fysikk - en kvalitativ studie om hvordan programmering kan kombineres med modellering i termisk fysikk i fysikk 1*. Masteroppgave, Lektorutdanning i realfag, NTNU. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3047588>.
- Shute, V.J., Sun, C., & Asbell-Clarke, J. (2017). «Demythifying computational thinking». *Educational Research Review* 22, s. 142–158.
- Skøien, J.X. (2023). *Numeriske metoder og programmering i fysikk 1*. Masteroppgave, Lektorutdanning i realfag, NTNU. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3081373>.
- Utdanningsdirektoratet (2019). «Algoritmisk tenkning». www.udir.no/kvalitet-og-kompetanse/digitalisering/algoritmisk-tenkning/.
- Utdanningsdirektoratet (2021). «Læreplan i fysikk (FYS01-02)». Fastsett som forskrift. *Læreplanverket for Kunnskapsløftet 2020*. www.udir.no/lk20/fys01-02
- Waters, J.B. (2020). *Programmering og dybdelæring i fysikk – en kvalitativ studie av elevers arbeid med programmering i fysikk 1*. Masteroppgave, Lektorprogrammet, UiO. www.duo.uio.no/handle/10852/78902
- Wing, J. M. (2006). «Computational Thinking». *Communications of the ACM* 49(3), s. 33–35.



Krise for fysikkfaget i skolen

Fredrik Gade lektor i fysikk, Sandvika vgs.

Et innlegg på Facebook-siden til Norsk fysikklærerforening 13.april fra en frustrert lærer beskriver en virkelighet som mange fysikklærere kjenner seg igjen i: Skolen tilbyr ikke full fordypning i fysikk 2 neste skoleår på grunn av få elever og dårlig økonomi.

Mange lærere har bekreftet samme situasjon på sin skole, mens lærere på større skoler alle opplever den samme trenden: at det har blitt vanskeligere og vanskeligere å rekruttere elever til fysikk i Vg3. Grupper blir lagt ned, og de flinkeste realfagselevne velger bort fysikkfordypning av taktiske årsaker.

Fysikkfaget som helhet er i ferd med å forsvinne fra skolene, da fysikk 2 blir marginalisert. Denne bekymringen bør ikke isoleres til fysikklærere og fysikere. Forslaget om fjerning av realfagspoeng vil gjøre situasjonen enda verre (foreslått av Opptaksutvalget, <https://opptaksutvalget.no>). Her må alle

fysikere og andre realfagsinteresserte følge med i tiden som kommer, så vi unngår å ende opp med en skole der elever velger vekk «vanskelige» fag av taktiske eller bekvemmelige årsaker. Den hjerneflukten har ikke Norge råd til

Vi har lenge sett med bekymring på denne utviklingen, både i Norsk fysikklærerforening og i Tekna realfaglærerne (et fagnettverk i Tekna som jobber med fagtilbud og politiske forhold knyttet til realfagslærere og realfagenes plass i skolen). Vi vil løfte denne problemstillingen opp til nasjonalt nivå, belyse hva vi mener er problemet, hva som kan være løsningen og ikke minst; hvorfor det er viktig med god rekruttering til fysikkfaget på videregående skole. En liten gjeng satt seg ned og skrev en kronikk, som kom på trykk i Dagsavisen mandag 5.juni 2023. Kronikken er gjengitt her med tillatelse fra Dagsavisen.



Kilde: www.facebook.com/groups/1460408644217415/permalink/3398759077049019/

Krise for fysikkfaget i skolen

Fysikkfaget som helhet er i ferd med å forsvinne fra skolene. Det er kritisk i en tid der vi er helt avhengig av at flere studerer og forstår fysikk om vi skal klare det grønne skiftet.

Norge står i en realfagskrise, og særlig er fysikkfaget i krise. Over hele landet rapporterer fysikklærere om en nedgang i antall elever som velger full fordypning i fysikk, og på mange skoler sliter de nå med å opprettholde et godt tilbud til elever i faget. Mange steder er fysikkfaget erstattet av et regionalt nettkurs eller selvstudium. Dette får store konsekvenser for oss alle fordi sviktende fysikkkunnskaper i befolkningen påvirker sjansene våre til å gjennomføre det grønne skiftet og energiomstillingen som skal til.

Dette er grunnen: det grønne skiftet står og faller på at vi har tilgang på energi og rett teknologi til å utnytte denne tilgangen. Fysikk er et basisfag for alle som skal videreutvikle eksisterende teknologi og utvikle ny teknologi, særlig innen fornybar energi. For å få gjennomført det grønne skiftet trenger vi kunnskap innen solceller, vindkraft og elektrisitet – fysikk ligger til grunn for alt dette.

Hvis rekrutteringen til skolefaget fysikk svekkes ytterligere, for eksempel ved at realfagspoengene i videregående skole fjernes slik som Opptaksutvalget foreslår, vil rekrutteringen til studier som bygger på fysikk svekkes enda mer. Det gjelder for eksempel IT- og sivilingeniørstudier, bransjer der vi vet at det allerede er stor mangel på kompetanse og behovet bare kommer til å øke framover.

Rekrutteringssvikten til fysikk i skolen vil i neste omgang føre til at hele teknologiutviklingen som det grønne skiftet bygger på, som solceller, havvind, elbiler, effektivisering av lyskilder osv., stopper opp i Norge. Da vil vi bli redusert til brukere av teknologi og vil ikke ta del i den teknologiske verdiskapningen det grønne skifte vil være, kort sagt «det vi skal leve av etter oljen».

I en tid hvor realfaglig kunnskap er mangelvare, og hvor flere og flere av fremtidsutfordringene skal løses teknologisk burde fysikkfaget solgt seg selv, i stedet opplever fysikklærere i hele landet å bruke mye tid på å få kompetente elever til å velge fordypning i fysikk.

«Det er ingen studier som krever det» eller «det er vanskelig å få god karakter» sier elevene når fysikklæreren spør om de skal fortsette med fysikk det avsluttende året på videregående skole. Faget er av de mer arbeidskrevende og hadde det ikke vært for at man kan lokke med et helt realfagspoeng hadde tilstrømningen til faget stupe dramatisk, og fysikk som skolefag hadde langt på vei blitt marginalisert.

Dersom vi ønsker at elever skal ta denne nødvendige fordypningen for teknisk og naturvitenskapelig utdanning, må de se seg tjent med det. Vi har to forslag til hvordan dette kan gjøres:

1. For å unngå at elevene velger bort krevende fag må realfagspoengene beholdes og trolig økes i de tøffeste og mest arbeidskrevende realfagene.
2. De spesielle opptakskravene til sivilingeniørstudier bør skjerpes til også å inkludere fysikk 2 som er fordypning i fysikk det siste året på videregående. Ofte er det dette nivået foreleserne forventer. Med de kunstig høye karaktergrensene de mest populære sivilingeniørstudiene har i dag, bør det være mulig å kreve en skjerping av det faglige innholdet fra videregående for disse søkerne.

Nå står vi fast i en ond spiral: studier som burde krevd full fordypning i fysikk tør ikke kreve dette fordi så få elever velger det, mens elevene velger faget vekk, fordi ingen studier krever det.

Vi etterlyser drahjelp fra myndighetene i rekrutteringen til fysikkfaget. Det kan ikke være fysikklærerens samvittighet som skal sikre fremtidig kompetanse til det grønne skiftet i Norge.

*Anne Berit Bjønnum, leder i Tekna
realfagslærerne og lektor i fysikk
Fredrik Gade,
nestleder i Tekna realfagslærerne
og lektor i fysikk*



Susanne Flø Spinnangr

Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen

PhD-avhandling: «Investigation of the Effect of Transient and Temporal Variations on Magnetic Reconnection»

Veiledere: Dr. Cecilia Norgren, dr. Paul Tenfjord og dr. Michael Hesse

Universet består for det meste av forskjellige plasmamiljø, der materien er i en fjerde aggregattilstand kalt plasma. Et plasma består av frie, elektrisk ladede partikler, kalt ioner. Disse plasmaene er gjennomsyret av elektromagnetiske felt, generert av ionenes ladning og bevegelser. Ionenes dynamikk er hovedsakelig styrt av interaksjonen mellom dem og de kollektive elektromagnetiske feltene. En av de viktigste interaksjonene mellom plasma og magnetiske felt kalles magnetisk omkobling. Dette er en eksplosiv prosess hvor energi lagret i magnetfeltene konverteres til varme og bevegelse av ionene gjennom endringer i den magnetiske forbindelsen, og kan på mange måter kategoriseres som en magnetisk eksplosjon. Magnetisk omkobling skjer i alt fra stjerner, magnetosfærer og laboratorier på Jorden, og over svært forskjellige størrelsesordener. Det er drivkraften bak flere storslagne fenomener i vårt nære verdensrom, som for eksempel solutbrudd, nordlys, og romvær, som kan ha stor påvirkning på vårt elektrifiserte samfunn.

I dette doktorgradstudiet presenterer Spinnangr resultatet av fire års forskning på magnetisk omkobling gjennom numeriske simuleringer. For å oppnå en fullstendig forståelse av magnetisk omkobling må vi kunne forklare hvor, når, hvorfor og hvordan det finner sted, og hva som stopper det. Spinnangr har bidratt til å svare på disse spørsmålene ved å undersøke hvordan magnetisk omkobling blir påvirket av endringer i innstrømningsregionene, både i partikkelsammensetningen og i konfigurasjonen til magnetfeltet. Spinnangr viser at disse endringene påvirker hele omkoblingsprosessen på både store og små skalaer, i alt fra partikkeldynamikken innerst i omkoblingsområdet til hastigheten på hele omkoblingen. Spinnangr har også undersøkt hvordan magnetisk omkobling kan starte i et stabilt system, hvor to karakteristiske signaturer på at det holder på å starte ble identifisert. Doktorgradsarbeidet er med på å bidra til målet om å danne en full forståelse av magnetisk omkobling.



Øyvind Lunde Rørtveit

Haukeland Universitetssykehus, Universitetet i Bergen

PhD-avhandling: «Bayesian modellering of organ deformations in radiotherapy»

Veiledere: Sara Pilskog og Liv Bolstad Hysing ved Haukeland Universitetssykehus og Andreas Størksen Stordal ved Norge

Moderne strålebehandling mot kreft blir levert i daglige «fraksjoner» over noen uker. Å dele den totale stråledosen opp på denne måten har store fordeler for mulighetene det friske vevet rundt svulsten har til å repareres, og gir derfor mindre bivirkninger. Strålefeltet er basert på en nøye kvalitetssikret «stråleplan» som lages basert på en 3D-scan (CT) tatt før behandlingen begynte. Men interne organer er i konstant bevegelse, som følge av fylling og tømning av mage, tarm og blære, pust, og ekstern påvirkning. Siden strålefeltet er det samme for alle fraksjonene, må man ta hensyn til denne bevegelsen under planleggingen av strålebehandlingen.

I dette prosjektet har Øyvind Lunde Rørtveit utviklet statistiske modeller for hvordan organer beveger seg og deformeres. Ved hjelp av disse modellene kan man til en viss grad forutse hvordan organene vil bevege seg underveis i

forløpet av stråleterapien. Dermed kan man bruke modellen til å bli sikrere på å treffe svulsten, samt å redusere stråledosen til friskt vev, og dermed redusere bivirkninger.

Modellene Øyvind Lunde Rørtveit har utviklet baserer seg i utgangspunktet på CT-data fra tidligere pasienter, som brukes som «treningsdata». For en ny pasient kan algoritmene tilpasse modellen fra tidligere pasienter til den nye pasienten basert på en eller flere CT-skanner av den nye pasienten.

Den nye metoden ble evaluert ved å bruke den til å forutsi deformasjon av endetarmen for prostatakreftpasienter. Metoden viste seg å gi signifikant mer nøyaktige forutsigelser enn tidligere modeller. Avhandlingen gir nye og bedre prosedyrer for den sentrale utfordringen med å redusere konsekvenser av organbevegelse i strålebehandling.



Johannes Hamre Isaksen

Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen
 PhD-avhandling: «Novel theoretical tools in jet quenching»
 Veiledere: Førsteamanuensis Konrad Tywoniuk

Partikkelfysikk handler om naturens mest grunnleggende byggesteiner. Vi lærer på skolen at all materie er sammensatt av atomer, som har en kjerne med protoner og nøytroner, og elektroner som beveger seg rundt kjernen. Protoner og nøytroner er igjen bygget opp av enda mindre partikler kalt kvarker og gluoner, og det er disse partiklene jeg har forsket på.

På CERN i Sveits akselererer de atomkjerner til ekstremt høye energinivåer og lar dem kolliderer. Ved disse kollisjonene dannes det et stort antall partikler, og vi kan lære mye om grunnleggende partikkelfysikk ved å måle og analysere disse partiklene. De fleste eksperimentene på CERN involverer kollisjoner mellom protoner, men det er også mulig å kolliderer andre typer partikler. Jeg har spesifikt forsket

på kollisjoner med tunge ioner, som for eksempel gull eller bly, som er atomkjerner med mange protoner og nøytroner.

I disse kollisjonene kan de tunge atomkjernene smelte sammen og danne en slags væske som kalles kvark-gluon-plasma. Man tror at rett etter big bang var hele universets materie i form av kvark-gluon-plasma, så det er viktig å forstå egenskapene til denne fasen av materie. En måte å studere dette plasmaet på er å måle hvordan partikler som beveger seg gjennom det, samhandler med det. Dette måles og analyseres gjennom eksperimenter på CERN. Som teoretisk fysiker er det vår oppgave å forklare hvorfor de eksperimentelle dataene ser ut som de gjør. Mitt forskningsarbeid har vært å utvikle metoder for å forbedre den teoretiske beskrivelsen av disse prosessene.



Shihao Wei

Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen
 PhD-avhandling: «Experiments and Models of Carbon Black-based Nanofluids for Photothermal and Electrical Applications»
 Veiledere: Professorene Pawel Kosinski og Boris Balakin

Nanofluid er suspensjoner bestående av nanopartikler jevnt fordelt i et basisfluid. Tilstedeværelsen av nanopartikler i fluidet fører til forbedring av termiske og elektriske egenskaper. Denne unike kombinasjonen av egenskaper gjør nanofluid svært lovende for en rekke anvendelser, spesielt innenfor fototermisk og elektrisk teknologi. I denne studien ble karbonbaserte (CB) nanofluid syntetisert og brukt som arbeidsfluid i en rektangulær direkte absorberende solfanger (DASC). Den termiske ytelsen til DASC ble undersøkt både eksperimentelt og numerisk. Resultatene viste at

bruken av nanofluid førte til en betydelig økning i termisk effektivitet sammenlignet med konvensjonelle arbeidsfluid.

Basert på CB-nanofluid ble det oppnådd ytterligere fremskritt ved å syntetisere CB elektrolytt-nanofluid (ENF-er) som inneholdt natriumsulfat eller natriumhydroksid. Disse ENF-ene ble brukt som elektrolytter i vannelektrolyseprosesser. Funnene i studien viste at den forbedrede elektriske og termiske ledningsevnen til ENF-ene resulterte i økt effektivitet i hydrogenproduksjon og redusert energiforbruk under elektrolyseprosessen.



Maxim Melnik Storetvedt

Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap, Høgskulen på Vestlandet

PhD-avhandling: «A new Grid workflow for data analysis within the ALICE project using containers and modern Cloud technologies»

Veiledere: Professor Håvard Helstrup og førsteamanuensis Bjarte Kileng

Grid Computing er en teknikk for automatisk kjøring av større partier med distribuerte maskinoppgaver på et globalt nettverk bestående av heterogene datasentre. ALICE (A Large Ion Collider Experiment) – et av de fire store eksperimentene ved LHC på CERN, bruker Grid-ressurser til å behandle store mengder av sine samlede data.

Selv om det ofte blir sammenlignet med det mer sentraliserte, og ofte kommersielle, Cloud Computing («nettsky») paradigmet, pleier Grid-ressurser å være geografisk spredt på flere datasentre bestående av klustere av forskjellige karakteristikk. Til tross for å være løst koblet, og med få avhengigheter, går disse klusterne sammen for å danne et distribuert system fordelt over flere administrative domener.

Heterogene klustere, slik som de finnes innad i Grid Computing, kan skape utfordringer ved å måtte tilrettelegge seg for flere forskjellige system-, konfigurasjons- og distribusjonskrav.

For å redusere utfordringene som kan oppstå, har konsept og teknologier fra Cloud Computing i nyere tid blitt tatt i bruk for å gjøre Grid databehandling mer lik skytjenester. Ved å bruke teknologier slik som virtualisering, kan ønskede maskin- og programvaremiljøer bli simulert på et bredt utvalg av oppsett og konfigurasjoner.

Dette åpner opp for å kunne skape homogene miljøer av oppsett innad i et ellers heterogent Grid-miljø – en tilnær-

ming som i dag brukes av en rekke Grid datasentre. Mens virtualisering har økt i bruk og popularitet innad i Grid-miljøer, har imidlertid nye metoder, praksiser og teknologier begynt å dukke opp. Nærmere bestemt har både konteinere og elastisk lastbalansering økt raskt i både popularitet og bruk, og er i dag vanlig i sammenheng med skytjenester. Til tross for å ofte bli sammenlignet med vanlig virtualisering, gir konteinere muligheten til å opprette flere isolerte miljøer på toppen av samme systemkjerne, og unngår slik å påvirke ytelsen i særlig grad.

ALICE eksperimentet utforsker nå bruken av nyere konsept og teknologier fra Cloud Computing innad i sin Grid infrastruktur. Dette skjer som et ledd i utviklingen av et nytt Grid rammeverk (JAliEn – Java ALICE Environment), noe som skaper en mulighet for å kunne integrere disse konseptene og teknologiene direkte i selve kjernen av rammeverket.

Denne muligheten danner grunnlaget for det underliggende forskningsspørsmålet og påfølgende bidraget i Maxim Storetvedt sitt ph.d.-prosjekt: Å undersøke måter for hvordan databehandling innad i ALICE kan gjøres mer fleksibelt samt enklere å administrere, gjennom bruken av konsept og teknologier fra Cloud Computing. Resultatet er en ny og optimert arbeidsflyt for Grid databehandling som ikke bare bedrer på nåværende utfordringer, men som også kan brukes til å tilfredsstillere behovene til ALICE kollaborasjonen i Run 3 av LHC.



Tore Amundsen

(1934–2023)

Vår gode kollega, professor Tore Amundsen, døde 17. juni 2023 etter kort tids sykdom, tre dager før han ville fylt 89 år. Han var født i Drammen, hvor han også hadde sin skolegang. Deretter fulgte realfagsstudier ved Universitetet i Oslo (UiO), der han markerte seg som en av de aller fremste studentene. Han ble cand.real. i 1962 og dr.philos. i 1969. Samme år ble han førsteamanuensis ved Fysisk institutt. I perioden 1991–2002 var han professor ved instituttet.

Tore Amundsens forskningsområde var faste stoffers fysikk. Han fikk sin innføring i dette fagområdet som hovedfagsstudent under Tore Olsens veiledning. Hans forskningsarbeid var knyttet til lavtemperaturlaboratoriet ved Fysisk institutt, UiO der han studerte metallers egenskaper, særlig aluminium og indium, ved temperaturer ned mot kokepunktet for helium ved 4,2 kelvin. Her dro han nytte av laboratoriets særlige fortrinn på 1960- og 1970-tallet, som var infrastruktur for produksjon av flytende helium og fremstilling av ultrarent aluminium (99,9999 % renhetsgrad). Han knyttet seg til internasjonale forskningsmiljøer bl.a. gjennom opphold ved ledende utenlandske lavtemperaturlaboratorier som Bristol (1964–1965) og Leiden (1975–1976).

Av kolleger ble Tore Amundsen sett på som en «fysikkens gentleman» og dette var nok medvirkende til at han ble betrodd en rekke lederverv ved UiO, først som bestyrer ved Fysisk institutt (1980–1984), dernest som dekanus ved Det mate-

matisk-naturvitenskapelige fakultet (1984–1990) og medlem av Det akademiske kollegium.

Deretter påtok han seg en rekke nye oppgaver for forskersamfunnet, både nasjonalt og internasjonalt. Han var i en årrekke knyttet til EU-programmene COMETT og COST i roller som både komitémedlem og komitéleder. I perioden 1995–1999 var han norsk representant i NATO Science Committee.

Blant nasjonale oppgaver nevnes spesielt hans innsats som styreleder og siden daglig leder for det tverrfaglige Senter for Materialvitenskap i Forskningsparken (1990–2002) – en forløper for Senter for Materialvitenskap og Nanoteknologi (SMN) hvor han hadde en rådgiverrolle i noen år etter oppnådd pensjonsalder. Han var styreleder for Norsk Synkrotronforskning AS 1998–2006. Videre ledet han Forskningsrådets Storutstyrsutvalg som avga sin rapport i 2005. De siste 15–20 år av sitt liv var han sterkt engasjert i arbeidet med å synliggjøre Kristian Birkelands rolle som forsker, entreprenør og industribygger gjennom de årlige Birkelandsdagene og -forelesningene.

Tore Amundsen holdt kontakten med kolleger ved UiO helt til det siste. Han var en god og vennlig samtalepartner som kombinerte bred kunnskap med en lyttende holdning. Vi hedrer hans gode minne og lar våre tanker gå til hans Inger og den nærmeste familie.

Jann A. Holtet, Truls Norby, Eivind Osnes

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 Astrid Aksnes, Institutt for elektroniske systemer, NTNU

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

Kondenserte fasers fysikk med atomfysikk: Forsker Kristian Stølevik Olsen, Nordita

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



THORLABS