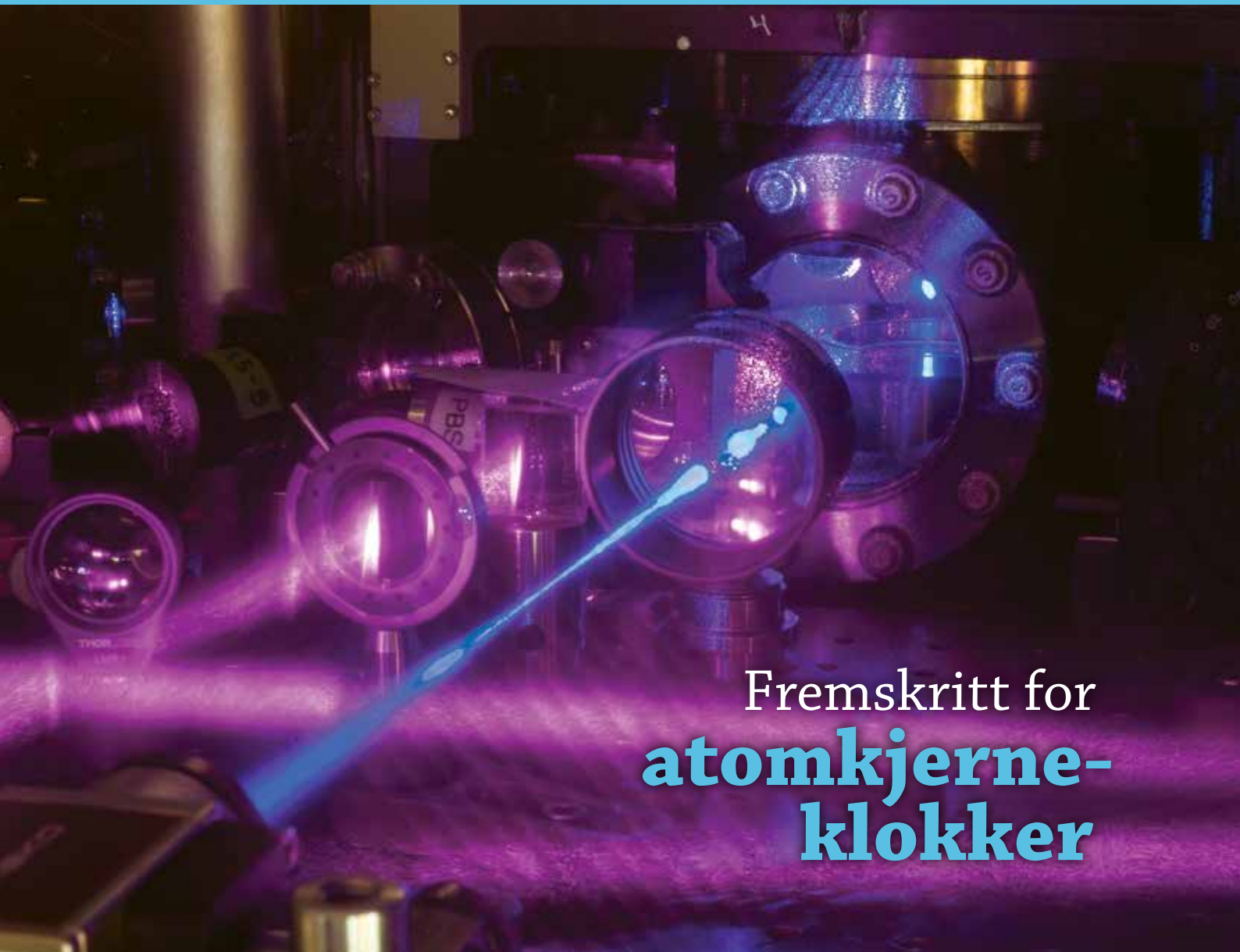


Fra Fysikkens Verden

NR. 2 – 2024
86. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP



Fremskritt for **atomkjerne- klokker**

Les også om:

- Heisenbergs matriser
- Opptak til høyere utdanning

- Kosmisk tidsforlengelse
- Fysikk med språkmodeller

NR. 2 – 2024

86. ÅRGANG

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap
www.norskfysisk.no

Redaktør:

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

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

Redaksjonssekretær:

Maria Hammerstrøm
maria.hammerstrom@astro.uio.no

Redaksjonskomité:

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

Layout og sats:

Maria Hammerstrøm

Forsidebilde:

G.E. Marti/JILA

Trykkeri:

Oslo Sats, repro og montasje A/S

Abonnere:

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

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

E-post: nfs.styret@gmail.com

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

Retningslinjer for bidragsytere

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

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

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

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

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

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

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

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

Innhold

Fra redaktørene Øyvind G. Grøn	51
Fysikknytt	
Svart-hull-massegapet tettes igjen Øyvind G. Grøn	52
Perspektiver	
Nye regler for opptak til høyere utdanning Kaja Nordby	54
Lys, bølge, partikkel, kvantefelt Arnt Inge Vistnes	56
Artikler	
Atomkjernekløkker Øyvind G. Grøn	60
Kosmisk tidsforlengelse Øyvind G. Grøn	65
Heisenbergs matriser Dag-Morten Sjøstrøm	68
Skolefysikk	
Lære fysikk med språkmodeller Vidar Skogvoll og Tor Ole Odden	74
Lomme-lab i fysikk: Eksempler på eksperimenter Martin Steinholt Bygdås og Sami Laubo	81
Personomtaler	
Gratulerer: Øyvind G. Grøn Iver Brevik og Sigbjørn Hervik	86
In memoriam: Torgeir Engeland Morten Hjorth-Jensen og Eivind Osnes	87

FRA REDAKTØRENE

I dette nummeret av *Fra Fysikkens Verden* tar Kaja Nordby opp et viktig spørsmål: Hvordan bør reglene for opptak til høyere utdanning utformes? Hun skriver som leder av Norsk fysikklærerforening på vegne av lektorer som underviser fysikk i videregående skole, om uheldige forslag fra et regjeringsoppnevnt utvalg. Utvalget foreslår å fjerne mulighetene til å forbedre karakterene i videregående skole ved å ta et kurs mer enn en gang, og de foreslår å fjerne 'realfagstilleggs-poeng'. Kaja Nordbys argumenter og konklusjoner er basert på en høringsuttalelse fra Fysikklærerforeningen. De er viktige og representerer en betydelig erfaring fra undervisning i videregående skole. Høringsuttalelsen og disse argumentene kan ikke ignoreres av de som skal bestemme reglene for opptak til høyere utdanning.

Vi har nok en gang gitt spalteplass til Arnt Inge Vistnes til en avsluttende

artikkel fra hans side om fysikernes beskrivelse av lys. Vi er likevel åpne for flere innlegg om dette temaet, ikke minst siden hans innlegg oppfattes som kontroversielle av mange fysikere.

For øvrig har vi nyhetsartikler blant annet om atomkjernekløkker, og en dyptpløyende artikkel av Dag-Morten Sjøstrøm om Heisenbergs matriser. Den bør nok leses langsomt.

Vi er ved starten av en revolusjon: Bruk av kunstig intelligens. Jeg har testet ChatGPT ved å be programmet om å utlede pendellikningen. Besvarelsen jeg fikk sto til beste karakter. Grensen for hva programmet greide kom ved utregning av inverse Laplace-transformasjoner, og det varer nok ikke lenge før den greier det også. Hva betyr dette for skole og universitet? Artikler om dette er aktuelle, og i dette nummeret har Vidar Skogvoll og Tor Ole Odden en interessant artikkel om temaet.



Øyvind G. Grøn



Carl Angell

Bidragstyperne til denne utgaven

Iver Brevik

Professor emeritus i mekanikk, NTNU

Hans forskningsområder er hydromekanikk, Casimir-effekt, elektromagnetisme og kosmologi, der han særlig har studert universmodeller med viskøse væsker.

Martin Steinholt Bygdås

Masterstudent i fysikk og matematikk på NTNU i Trondheim

Spesialisering innen teknisk fysikk med hovedinteresser innen kondenserte mediers og numerisk fysikk. I masteroppgaven utforskes topologiske materialer med ab initio-metoder.

Øyvind G. Grøn

Professor emeritus i fysikk ved Oslo Met og Universitetet i Oslo

Hans forskningsområder er relativitetsteori, universet og elektromagnetisme. Grøn skriver lærebøker i relativitetsteori, halvpopulære artikler om fysikk i FFV og populærartikler om astronomiske temaer i *Astronomi*.

Sigbjørn Hervik

Professor i anvendt matematikk, Universitetet i Stavanger

Hans forskningsområde er anvendt matematikk og matematisk fysikk. Han har blant annet publisert flere artikler om relativitetsteorien og dens anvendelser blant annet i kosmologien.

Morten Hjorth-Jensen

Professor i fysikk, UiO og Michigan State University, USA

Fagområde: Mange-partikkelteori, fra klassiske mange-partikkel metoder til maskinlæring og kvantecomputing.

Kaja Nordby

Lektor i fysikk, Ask Undervisning og Kongsbakken Videregående skole, og leder av Norsk fysikklærerforening

Jeg brenner for fysikkundervisning og vil at alle elevene skal se sammenhengen mellom fysikken de lærer og fenomenen de opplever i dagliglivet.

Tor Ole Odden

Førsteamanuensis, Center for Computing in Science Education, Universitetet i Oslo

Driver forskning med fokus på hvordan programmering og beregningsorienterte metoder kan brukes til å hjelpe studenter å få kreativ eierskap over egen læring, hvordan studenter lærer realfaglig programmeringsferdigheter og bruk av språkteknologi (Natural Language Processing) og maskinlæring til å analysere data og litteratur innenfor naturfag og fysikkdiridaktikk.

Eivind Osnes

Professor emeritus og tidligere instituttleder ved Fysisk institutt, UiO

President i Norsk Fysisk Selskap 1979–1990.

Fagområde: Kjernefysikk (særlig kjernestrukturberegninger og kvantefysisk mange-partikkelteori).

Sami Laubo

Masterstudent i fysikk og matematikk på NTNU i Trondheim

Spesialisering innen biofysikk og medisinsk teknologi, og synes numerisk fysikk og kunstig intelligens er spesielt interessant. Etter sommeren får jeg fulgt interessene videre når jeg skal jeg skrive master innen væskestrømninger i hjernen linket opp mot hjernekreft.

Dag-Morten Sjøstrøm

Master i fysikk og jobber som lektor ved Ålesund vgs.

Mine hovedinteresser er den moderne fysikkens historie og tolkningsspørsmålet i kvantefysikk.

Vidar Skogvoll

Førstelektor i fysikk, Kompetansesenter for undervisning i realfag og teknologi, Universitetet i Oslo

Jobber med hvordan generativ kunstig intelligens kan brukes i realfagsundervisning og forskning (llmteaching.com). Har doktorgrad i teoretisk kondenserte fasers fysikk, med et spesielt fokus på topologiske defekter, og har blant annet utviklet et brukervennlig Python-bibliotek for simulering av feltteorier (comfitlib.com). Har også jobbet som lærer i videregående skole og driver med formidling bl.a. gjennom Abels tårn og egen podcast, Under Kappa (underkappa.no), hvor superhelter analyseres gjennom en vitenskapelig linse.

Arnt Inge Vistnes

Førsteamanuensis emeritus ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

Har satt undervisning høyt, og fått flere priser. Har erfaring fra tre forskjellige forskningsfelt, og har en langt bredere erfaring i fysikk enn de fleste. Har vært interessert i vitenskapesfilosofi og undervist litt på ExPhil over ca. en tiårsperiode.



Figur 1. Illustrasjon av nøytronstjerne og svart hull som sender ut gravitasjonsbølger like før de kolliderer.

Illustrasjon: Carl Knox / OzGrav

Svart-hull-massegapet tettes igjen

Den fjerde LIGO observasjonsserien kom i gang i mai 2023 med en ny oppdagelse allerede etter noen få dager – gravitasjonsbølger fra kollisjon av en nøytronstjerne og et rekordlite svart hull.

Øyvind G. Grøn OsloMet – Storbyuniversitetet

I mai 2023 startet den fjerde observasjonsserien med LIGO-Virgo-KAGRA gravitasjonsbølge-detektorene i henholdsvis USA, Italia og Japan.

Kildene til gravitasjonsbølgene disse detektorene kan registrere er kolliderende nøytronstjerner og stellare svarte hull. Observasjonene med LIGO har foregått i tre observasjonsserier de siste ti årene. Det har vært observert mange gravitasjonsbølger fra kollisjoner av nøytronstjerner og svarte hull og kollisjoner av to svarte hull, der forskerne har bestemt massene til de svarte hullene.

Massene av roterende nøytronstjerner har vært opp mot 3 solmasser og av de svarte hullene over 5 solmasser. Litt overraskende er det ikke observert gravitasjonsbølgekilder med svart-hull-masser mellom 3 og 5 solmasser. Dette er blitt kalt *svart-hull-massegapet*.

LIGO-Virgo-KAGRA teamene har nå rapportert

om at det allerede to uker etter starten av fjerde observasjonsserie – 29. mai 2023 – ble registrert gravitasjonsbølger fra kollisjon av en nøytronstjerne der det svarte hullet sannsynligvis har en masse i svart-hull-massegapet. Nøytronstjernen har mellom 1,2 og 2,0 solmasser mens det svarte hullet har mellom 2,5 og 4,5 solmasser, begge med 99 % sannsynlighet.

Kollisjonen skjedde omtrent 650 millioner lysår fra solsystemet. Med utgangspunkt i tiden (to uker) det tok å registrere gravitasjonsbølger fra denne kollisjonen, har forskerne beregnet at det skjer mellom 7 og 180 kollisjoner av en nøytronstjerne og et svart hull i massegapet per år innenfor en avstand på en milliard lysår. Det forventes derfor at detektorene vil registrere gravitasjonsbølger fra flere slike hendelser i løpet av denne fjerde observasjonsperioden som vil vare i 18 måneder. ■



Foto: Unsplash

Nye regler for opptak til høyere utdanning

Kaja Nordby leder for Norsk Fysikklærerforening

I desember 2022 kom et regjeringsoppnevnt utvalg med forslag til vesentlige endringer i systemet for opptak til høyere utdanning. De mest radikale forslagene var å ta vekk muligheten til å forbedre karakterer fra videregående, opprette en alternativ vei inn i høyere utdanning med en «høyskoleprøve», og fjerne alle tilleggspoengene som fins i dagens system.

Norsk Fysikklærerforening så flere svakheter med forslaget og skrev en høringsuttalelse hvor ett av våre hovedpoenger var at dagens system med realfagspoeng er med på å rekruttere elever til realfagene og også kompensere for at disse fagene oppleves vanskeligere å få gode karakterer i. De

ekstra poengene vil delvis kompensere for at elevene må jobbe mer.

Et annet hovedpoeng var at ved å fjerne muligheten for å forbedre karakterer og heller innføre en høyskoleprøve ville man øke presset på lærerne for å sette bedre karakterer enn de egentlig mener er riktig. Samtidig ville dette åpne en alternativ, og kanskje enklere, vei inn i høyere utdanning. Hvorfor slite seg gjennom tre år med videregående og en masse forskjellige fag og eksamener hvis man kan erstatte det med en prøve som bare omfatter hovedpoengene fra noen få utvalgte fag?

Fysikklærerforeninga er svært glade for å se at

«Fysikk 2 er i dag ikke et krav for opptak til noen studier. Dette til tross for at innholdet i faget er sentralt for flere videre studier.»

mange av høringsinstansene delte våre synspunkter og vi har fått gjennomslag for å beholde muligheten til å forbedre karakterer og ikke opprette en høyskoleprøve. Vi fikk også delvis gjennomslag for å beholde realfagspoengene. Og det er dette med realfagspoengene vi gjerne vil utdype litt her.

I forslaget fra Regjeringa legges det opp til at antall tilleggspoeng elevene i videregående skole kan få for å velge realfag halveres fra 4 til 2 poeng. I dag får elevene 0,5 tilleggspoeng for hvert realfag de velger, med unntak av Fysikk 2 og Matematikk R2, som gir 1 tilleggspoeng. Dersom det maksimale antallet tilleggspoeng elevene kan få for å velge realfag senkes fra 4 til 2 vil det være mulig å få begge realfagspoengene uten å ta fordypning innen noen av fagene, og det er ingen insentiver for å ta de vanskeligste fagene (Matematikk R2 og Fysikk 2) siden det poengmessig vil gi like god uttelling å velge et lettere realfag. Det er også slik at de som velger å ta realfag for å oppnå fagkravene for å komme inn på medisin, ingeniør eller studier med tilsvarende krav til fordypning i realfag ikke vil ha noe insentiv til å velge realfag utover minstekravet til studiet. Vi i Fysikklærerforeninga er svært bekymret for hvilke konsekvenser dette vil få for rekrutteringen til Fysikk 2.

Fysikk 2 er i dag ikke et krav for opptak til noen studier. Dette til tross for at innholdet i faget er sentralt for flere videre studier. Det er her elevene lærer om krefter og bevegelse i to dimensjoner (i Fysikk 1 er all bevegelse langs en rett linje), de introduseres for forskjellige typer kraftfelt, elektromagnetisme, relativitetsteori og kvantefysikk. Faget gir altså kunnskap som er nyttig i mange videre studier. Men kanskje viktigst av alt; faget gir elevene innsikt i hvordan noen helt sentrale, og relativt enkle, sammenhenger styrer det meste av den fysiske verden rundt oss. Dermed er faget kanskje den viktigste rekrutteringsarenaen til videre studier i fysikk.

Elevene i videregående er taktiske. De velger vanligvis det de tror blir den enkleste veien til vitnemål og gode karakterer. Den veien går ikke via realfagene, og i alle fall ikke via de mest krevende fagene som Matematikk R2 og Fysikk 2. Derfor må vi lage incentivordninger som gjør det attraktivt for elevene å velge realfag, og spesielt de krevende realfagene. En måte å få til dette på er å fordele realfagspoengene slik at du får ett poeng for Matematikk R2 og ett poeng for Fysikk 2. Det vil sikre at de som tør å satse på realfagene kompenseres for det. En positiv side ved et slik forslag er at det å få realfagspoengene vil bli så krevende at de færreste vil se på realfagspoengene som en god vei til å forbedre konkurransepoengene sine for å komme inn på studier som ikke krever realfag. En negativ side kan bli at færre velger Fysikk 1.

Det er viktig at skolen legger til rette for og oppfordrer elevene til å utnytte sitt fulle potensiale. Dette innebærer at elevene bør belønnes for å velge mer krevende fag. Med dagens system fungerer det ikke slik. En elev i første klasse på videregående skal velge mellom teoretisk eller praktisk matematikk. Alle vet at den teoretiske er vanskeligere, men ut over elevens egne interesser fins det ingen insentiver for å velge den mer arbeidskrevende teoretiske matten. På samme måte fungerer de videre fagvalgene elevene gjør også. Til nå har vi hatt 4 poeng som gulrot for elever som satser på realfagene. I fremtiden ser det ut til at det bare blir 2. Fysikklærerforeninga er redd 2 poeng er for lite. Og dersom det ender med at det bare blir 2 realfagspoeng, er det veldig viktig at disse poengene fordeles slik at man må ha full fordypning i matematikk og fysikk for å få dem. ■

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

Lys, bølge, partikkel, kvantefelt

Arnt Inge Vistnes førsteamanuensis emeritus, Fysisk institutt, UiO

Takk til mine gode UiO-kollegaer, Johannes Skaar, Alex Reed og Olav Syljuåsen [1], og takk til Nils-Eirik Anders Bomark [2] for kommentarer til mine synspunkter om lys [3,4]. Jeg er svært glad for at dere argumenterer saklig. Det er en forutsetning for at vi skal kunne få mer samstemte oppfatninger innen fysikk.

La meg med en gang presisere at jeg aldri har ment at kvantefelt-teori gir feil resultater. Jeg er selv medforfatter på en artikkel hvor Joakim Bergli har brukt kvantefelt-teori for å beskrive svært spesielle detaljer i våre eksperimenter med såkalte sammenfiltrede fotoner [5] (se Figur 1). Den vanligste kvante-beskrivelsen av sammenfiltrede fotoner duger overhodet ikke når vi kjører eksperimentet utenfor «de optimale betingelsene» (temperatur på krystallen hvor de sammenfiltrede fotonene blir generert). Heller ingen klassisk beskrivelse har fungert hittil. Det gjør imidlertid kvantefeltteorien som Joakim brukte, helt elegant.

Det pussige likevel er at Joakim sin kvantefelt-beskrivelse inneholder hver eneste detalj jeg kan komme på dersom jeg skulle forsøke å beskrive våre eksperimenter klassisk, inklusiv ikke-lineære effekter, spesielle fordelinger av bølgelengder, «quasi phase matching», tidsforskjeller, veilengdeforskjeller, summasjon av elektromagnetiske felt osv., men formalismen er likefullt basert på kvantefeltteori. Og akkurat her dukker etter min mening nøkkelproblemet opp, nemlig hvordan skal vi tolke kvantefysikken – eller matematiske formalismer i fysikk generelt?

Jeg får en følelse av at både mine UiO-kollegaer og Bomark argumenterer ut fra det vi gjerne omtaler som «shut up and calculate»-holdningen til kvantefysikk. Mine UiO-kollegaer skriver: «Vår dagligdagse intuisjon funker ikke så godt for kvantefelter ... Men det er én teori – det er ikke sann at man må velge

teori avhengig av situasjonen.» [1] Og Bomark skriver: «Problemet er at denne teorien er matematisk svært komplisert og vanskelig lar seg illustrere på en intuitiv måte. ... Vi sliter med å formidle hva de forteller oss på en enkel måte fordi de er så matematisk kompliserte, men det er en didaktisk utfordring [og] ikke et problem ved teoriene.»[2]¹

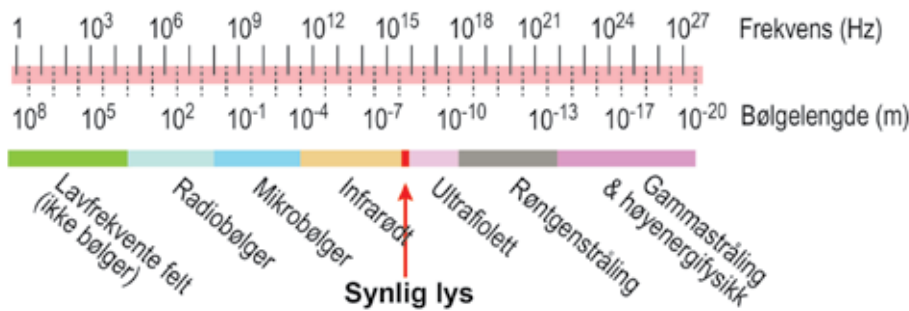
Matematikken i kvantefeltteorien fungerer altså. Det er vi alle enige om. Problemet ligger et annet sted, nemlig i hvordan vi *forklarer* fysikken bak de ulike fenomenene med ord. Vi kan selvfølgelig si at det er et didaktisk problem og ferdig med det, men er vi som fysikere fornøyd med en slik holdning? Gir vi blaffen i de utfordringene for eksempel lærere i grunnskole og videregående skole står midt oppi? Hvordan skal de beskrive hva som skjer når lys sendes gjennom en dobbeltspalt?

For noen år siden gjennomførte Skolelaboratoriet ved Fysisk institutt et prosjekt, «Relevant», der elever i den videregående skolen ble spurt om deres oppfatninger av lys [6]. Det kom ganske interessante kommentarer fra referéene da artikkelen skulle publiseres, og de samsvarer delvis med kom-

1 En annen mer filosofisk vinkling på denne problemstillingen går på forskjellen mellom ontologi og epistemologi. Ontologi er opptatt av hva som eksisterer, og former for eksistens. Den er knyttet til realisme-begrepet. Epistemologi er mer opptatt av erkjennelse og hva vi kan ha kunnskap om. Én epistemologisk tolkning om kvantefysikk er, upresist sagt, at vi aldri kan vite hva som er virkelig, så vi må bare allerede i utgangspunktet nøye oss med å observere. Det eneste målet vi har er at teoriene vi lager skal vise overensstemmelse med det vi observerer (vi bryr oss ikke om hva som er realitetene bak fenomenene). Etter min mening er det en legitim holdning, men i så fall mener jeg at vi må uttrykke dette i klartekst når vi diskuterer kvantefysikk. Det synes jeg ikke kommer klart fram i innleggene [1,2] i februar-nummeret av FFV, og jeg dveler derfor ikke mer med den tankegangen. Dessuten synes jeg denne holdningen er vanskelig å forsvare i enkle og oversiktlige fysiske fenomener der vi også har en del annen lettere forståelig erfaring å bygge på. Dobbeltspalten mener jeg hører til blant disse enkle fenomenene – siden vi har mange parallelle erfaringer i tillegg til lys.

$$R_{ab}^{++} = R_0 \int dv \left[\frac{F(v)^2}{v^2} [1 - e^{-iDLv}] [1 - e^{iDLv}] + \frac{F(v)F(-\mu - v)}{v(\mu + v)} [1 - e^{-iDL(v+\mu)}] [1 - e^{-iDLv}] e^{-\frac{i}{2}\mu\delta - iv\delta} \right],$$

Figur 1. Koinsidensrate for våre sammenfiltrede fotoner utenfor optimale forhold, beregnet av Joakim Bergli ved hjelp av kvantefeltteori [5].



Figur 2. Det elektromagnetiske spekteret er enormt! I den høyenergetiske enden av spekteret refererer «høyenergifysikk» bare til reaksjonene der elektromagnetiske felter er involvert.

mentarene i [1,2]: «Er det ikke egentlig dødfødt å diskutere våre bilder av lys når det kun er avansert matematikk (som ikke lett kan forstås) som gir den *egentlige* forklaringen?» Kritikken til tross: Artikkelen ble akseptert og den blir sitert ganske ofte nå i etterkant, hvilket viser at problemet vi diskuterer er internasjonalt.

Hvilken rolle tillegger vi egentlig en matematisk formalisme? Er det formalismen som ER Sannheten med stor S om naturen? En gang for alle? Er målet kun å matche observasjoner uansett hvilke fenomener vi betrakter? Tenk litt gjennom dette spørsmålet!

Når vi konfronteres med dobbeltspalten synes jeg selv det er mest naturlig å vise til at både overflatebølger på vann og lydølger og radiobølger og lys viser akkurat de samme lovmessighetene, og at det samme gjelder de fleste diffraksjons- og interferens-fenomenene vi kan demonstrere. Det er også lett å modellere disse fenomenene med numeriske metoder basert på bølger (for eksempel bølger i et elektromagnetisk felt). Modellingene får fram en rekke detaljer som kan observeres eksperimentelt (se for eksempel eksempler i kapittel 13 i min lærebok). Er det da naturlig å fortelle at: «Dette er bare en tilfeldighet, en tilnærming, for i virkeligheten kan lys *kun* beskrives *fullstendig* ved hjelp av komplisert matematikk! For det er DEN forklaringen som er RIKTIG!» Eller (med en epistemologi-tilnærming): «Vi er ikke interessert i hva som ligger bak! Vi konstaterer at kvantefelt-teorien er i overensstemmelse med måleresultatene, og det er kun det vi er opptatt av.» Er det *det* vi som fysikere faktisk mener?

Jeg vil minne om at vi kan observere entydig at elektromagnetiske felt og bølger følger Maxwells lover som kontinuerlige størrelser i rom og tid i vakuum og i luft helt fra statiske felt og opp til midten av mikrobølgeområdet (se Figur 2). Måleinstrumenter vi har tilgjengelig er for trege for å gå høyere i frekvens. Vi kan imidlertid også vise at lys opptrer som bølger i tid og rom i de tilfellene vi har repeterbare pulser av slike bølger. På sett og vis

ble denne kunnskapen benyttet for å skape såkalte «attosekund-pulser» som ble belønnet med Nobelprisen i fysikk høsten 2023. Når noen mener jeg holder krampaktig på bølgenaturen til lys, mener jeg at jeg faktisk har ganske gode grunner til det!

En kompliserende faktor for dobbeltspalten er deBroglie's ide om at også massepartikler, som for eksempel elektroner, kan tilskrives en bølgelengde. Elektroner oppfatter vi som klare partikler, men vi får stripemønster også når elektroner sendes mot en dobbeltspalt. Vi ledes da til en konklusjon om at lys og elektroner har samme egenskaper i interferens-sammenhenger. Etter min mening er det her den virkelige utfordringen ligger for vår forståelse, for noe skurrer! Etter min mening er det villedende å snakke om «bølgelengde» for en massepartikkel. Enhver *virkelig* bølge har en hastighet som er gitt av mediet bølgen går gjennom. Elektronet kan gå med hvilken som helst hastighet mindre enn lyshastigheten. Da er elektronet slett ikke en ekte bølge slik jeg ser det. Det må være *en annen bakenforliggende forklaring for de lovmessighetene vi ser hos elektronet*. Selv har jeg en mistanke om at det er spinn som spiller inn. Selv om jeg ser stripemønster når elektroner sendes gjennom en dobbeltspalt, har jeg aldri sett så rike detaljer i «interferens»-bilder av elektroner som for lys. Jeg mener vi har en jobb å gjøre for å utforske *både likheter og forskjeller* mellom interferens-fenomener av lys og elektroner. Før vi har fått et langt rikere materiale av slike sammenligninger, mener jeg grunnlaget er alt for svakt for å tillegge massepartikler en ekte bølge-natur og hodestups hoppe på oppfatningen at stripemønsteret bak en dobbeltspalt har nøyaktig samme forklaring for lys og elektroner.

Dersom vi tvinges ut av «shut up and calculate»-holdningen i kvantefysikk og føler på kroppen det didaktiske problemet Bomark nevner, er min erfaring at vi vanskelig kan unngå våre «mentale bilder». Og *da* dukker bølge/partikkel-dualismen opp! Nettopp her ser vi at problemstillingen slett ikke er en foreldet diskusjon. Bare prøv selv å forklare dobbeltspalten eller Aragos flekk for lys til

«Hvordan kan mine to tilsynelatende motstridende oppfatninger forenes?»

elever i den videregående skolen eller i bachelor-utdanningen ved våre universiteter! Klarer du å gi disse fysikere-in-spe et forståelig bilde uten å ty til ett av disse mentale bildene? Hvilket bilde velger du dersom *du* tvinges ut av komfortsonen basert på «shut up and calculate»?

Selv om *høyenergifysikerne* i CERN bruker kvantefelt/kvanteelektrodynamikk som matematisk formalisme og det fungerer utmerket for dem, er det slett ikke et verktøy for oss om jobber i den motsatte enden av det såkalte elektromagnetiske spekteret. I CERN-sammenheng vil en bølgepakke på opp til tusen bølgelengder ha en fysisk utstrekning på mindre enn 1/10 av diameteren til en proton og vil måtte vekselvirke med andre systemer i løpet av et utrolig kort tidsvindu. Vi har da ingen mulighet for å sjekke om en elektromagnetisk vekselvirkning har en bølgekarakter eller ikke.

Når *jeg* derimot for eksempel jobber med radiobølger i FM-området, vil en bølgepakke på for eksempel 300 svingninger være om lag en kilometer lang, og det tar ganske lang tid for bølgepakken å passere. I tillegg: for meg er det viktig å huske at nær for eksempel en antenne for radiobølger i FM-området, er ikke de elektriske og magnetiske feltene proporsjonale med hverandre slik vi har langt fra antennen (svarer til lavfrekvente felt helt til venstre i Figur 2.) Vi kan ikke basere oss på lovmessigheter som bare gjelder langt fra kilden til feltene. Vi MÅ bruke Maxwells ligninger der elektrisk og magnetisk felt beregnes separat for å få en korrekt beskrivelse. (Man kunne kanskje også bruke kvantefelt-beskrivelse, men med svært mye mer arbeid og uten å forstå den bakenforliggende fysikken fordi den da er for kompleks.)

Mine erfaringer fører til at jeg har helt klart forskjellige meninger om enkelte fysiske fenomener enn noen av mine kollegaer. Høyenergifysikere omtaler gjerne «høyenergi-fotoner» som *elementærpartikler*. Det kan føles riktig for dem, men ikke forvent at det er en egnet beskrivelse for oss som jobber i den motsatte delen av det elektromagnetiske spekteret! Tenkning basert på partikler som mentalt bilde gir overhodet ingen mening for oss i de laveste frekvensområdene! En høyenergifysiker

og jeg vil da fort ende opp med helt forskjellige mentale bilder!

Bomark skriver «Når han [dvs. jeg] forslår å forkaste $E = hf$, så betyr det å forkaste QED og med det det meste av moderne kvantefysikk.» [2] Nei, jeg forkaster ikke QED, men det er et interessant utsagn, fordi det kan tolkes dithen at Bomark mener $E = hf$ er et korrekt utsagn om hvordan verden *er*. At elektromagnetiske felt virkelig er kvantisert og i tråd med Einsteins udelelige fotoner og at kvantefelt-teoriens suksess bekrefter en slik oppfatning. Det er jeg uenig i, og det er nettopp den kvantiseringen jeg gjentatte ganger har funnet høyst problematisk gjennom 50 års erfaringer i ulike deler av fysikken. Samtidig sier jeg at kvantefelt-beskrivelsene fungerer *matematisk*. Hvordan kan mine to tilsynelatende motstridende oppfatninger forenes?

Løsningen jeg ser er å innse at selv om vi i en kvantefelt-formalisme skriver $E = hf$ og selv legger inn spesielle tolkninger av dette uttrykket, kan det hende at disse leddene inngår i *den øvrige matematikken* på en slik måte at den tilsynelatende kvantiseringen kanskje i praksis smuldrer litt bort. Riktignok bruker vi kreasjons- og annihilasjons-operatorer som vi i utgangspunktet *tolker* dithen at de skaper eller fjerner *hele* fotoner, men vi bruker dem *sammen med komplekse koeffisienter og normerer uttrykk* i den etterfølgende matematikken. Vi *sier* at dette gjør vi fordi vi skal beregne sannsynligheter osv., men kan det være at en bivirkning av de *samlede* matematiske utregningene blir nettopp at kvantiseringen egentlig smuldrer litt bort? Poenget mitt er at vi bør vel være litt varsomme med å tillegge *deler* av en total litt komplisert matematisk formalisme en alt for spesifikk betydning. Matematisk formalisme i seg selv har ingen fysisk betydning. Det er vi som er brukere av den matematiske formalismen som *putter våre «mentale bilder» inn* – også i de ulike leddene i formalismen.

Jeg er derfor av den oppfatning at det godt kan hende at *kvantefelt-formalismen* med all sin suksess kan fungere akkurat like elegant som hittil – også om vi slutter å tro at elektromagnetiske felt i seg selv er kvantisert, – forutsatt at vi argumenterer mentalt på en annen måte enn det Bomark gjør. Det er imidlertid

en kjempeutfordring å forsøke å få folk med på en slik tankegang så lenge vi er vant til en spesiell tenkemåte! Hvem vil ta bryet med å fremme en slik tanke i mer detalj, og sloss mot referee-er i årevis for å få noe på trykk? Jeg selv brukte åtte år på å få aksept for mine tanker om at Hanbury Brown og Twiss eksperimentet ville kunne vises for lydbølger på tilsvarende måte som for lys fra stjernen Sirius. Ingen trodde meg før Joakim og jeg faktisk gjennomførte eksperimentet [6]. Det er ikke lett å bryte med vanetenkning. Jeg er snart 75 år og ikke moden for nye åtte års kamp for å få godtatt en artikkel som kommer litt på kant med kvante-oppfatninger. Mitt håp er å inspirere yngre krefter til å stå på for over tid å gi oss økt/bredere forståelse av fysikken.

Mitt utgangspunkt for artiklene i FFV høsten 2023 var mangel på konsensus blant fysikere mht. tolkning av kvantefysikken. Jeg har hørt at en del av instituttets fysikere ikke har den oppfatningen. De mener å oppleve at fysikere flest er rimelig enige om tolkningene. Mine innspill viser én som er sterkt uenig, og jeg er langt fra alene! Men, dersom man stort sett jobber med en begrenset del av fysikken og i et miljø der de fleste tenker omtrent likt, er det forståelig at noen ikke oppdager de ulike oppfatningene. Jeg har gjentatte ganger selv sett problemer knyttet til tolkninger av kvantefysikken, og jeg har deltatt på diverse konferanser der forskjellene har kommet klart fram. Det har vært på konferanser i Wien hvor grunnlaget for uttalelsen «a peculiar situation» stammer fra [8]. Ulikhetene har også vært tydelige på alle konferansene arrangert av Andrei Krennikov m.fl. i Växjö, og på konferansene «What is light?» arrangert av Chandra Roychoudhuri m.fl. som delkonferanser under de store årlige SPIE-konferansene i San Diego (SPIE: the International Society for Optics and Photonics). Jeg har også hatt en del kontakt med professor José Croca i Lisboa som leder en gruppe som forfekter pilot-bølge-tolkningen av kvantefysikk (en fortolkning som mener at det finnes både et felt og en partikkel. Feltet styrer hvor partiklene skal bevege seg.). For å være mer lokal, på en internasjonalt workshop for PhD-studenter i grenseland mellom fysikk og filosofi ved Universitetet i Oslo i september 2023, var det heller ingen konsensus (kort omtale i [9]). Jeg kan på forespørsel også vise til en rekke mer delikate hendelser som meget klart viser at manglende konsensus er et ordentlig problem også i dagens fysikk. Men drar man kun på konferanser som besøkes av de som tenker likt, oppdager man ikke den manglende konsensusen.

Jeg planlegger i løpet av et år eller to å gi mere

detaljer og flere eksempler på fenomener i fysikk hvor jeg selv mener at standard-forklaringene basert på kvantefysikk skurrer. Men slapp av; jeg skal spare FFVs lesere for mere av den slags fra min side.

Hva er da min oppfatning av lys? Innen den nederste delen av det enorme elektromagnetiske spekteret er jeg sterk motstander av Einsteins modell der $E = hf$ representerer udelelige energipakker kalt fotoner. For meg er det da alltid snakk om *elektromagnetiske felt utbredt i tid og rom – og som kan deles*. Jeg refererte i artikkel [1] til hva Nobelprisvinneren Serge Haroch fortalte da jeg spurte ham hvordan han betraktet og beskrev lys. Han sa at han brukte omtrent like ofte Maxwells ligninger som kvantefelt-teori, men la til at han betraktet lys som elektromagnetiske felt og aldri som partikler. Jeg liker det svaret, fordi han viser til hvilke verktøy vi har tilgjengelig (uten å opphøye dem til noe hellig), og at han fokuserte på *elektromagnetiske felt*, og mislikte det mentale bildet «partikkel» i denne sammenheng. Min opplevelse er at Harochs og mine oppfatninger ligger ganske nær hverandre, og det føles godt. ■

Referanser

- [1] J. Skaar, A. Read, O.F. Syljuåsen. «Verken partikkel eller bølge». *Fra Fysikkens Verden* 1 (2024), s. 14.
- [2] N-E.A. Bomark. «Hvordan oppfører lys seg?». *Fra Fysikkens Verden* 1 (2024), s. 9–13.
- [3] A.I. Vistnes. «Bølge-partikkel-dualismen for lys (del 1)». *Fra Fysikkens Verden* 3 (2023), s. 47–53.
- [4] A.I. Vistnes. «Bølge-partikkel-dualismen for lys (del 2)». *Fra Fysikkens Verden* 4 (2023), s. 88–96.
- [5] J. Bergli, G. Adenier, A.P. Thörn og A.I. Vistnes. «Frequency and phase relations of entangled photons observed by a two-photon interference experiment». *Phys. Rev. A* 100 (2019) 023850, 11 sider.
- [6] E.K. Henriksen, C. Angell, A.I. Vistnes og B. Bungum. «What Is Light? Students' Reflections on the Wave-Particle Duality of Light and the Nature of Physics». *Science & Education*. 27 (2018) 81-111. 10.1007/s11191-018-9963-1
- [7] A.I. Vistnes og J. Bergli. «Hanbury Brown and Twiss effect demonstrated for sound waves from a waterfall; An experimental, numerical, and analytical study». *Am. J. Phys* 90 (2022) 20-30, 10-1119/10.0006613.
- [8] M. Schlosshaue, J. Kofler og A. Zeilinger. «A Snapshot of Foundational Attitudes Towards Quantum Mechanics». arXiv:1301.1069v1 [quant-ph] 6. januar 2013. 17 sider.
- [9] A.I. Vistnes. «Fysikk og filosofi». *Fra Fysikkens Verden* 4 (2023) s. 74.
- [10] A.I. Vistnes. «Nytt superfølsomt kamera». *Fra Fysikkens Verden* 1 (2024) s. 4–7.

Atomkjerneklodker

En forskergruppe i CERN har oppnådd resultater som omtales som et viktig skritt på veien mot å konstruere 'atomkjerneklodker'.

Øyvind G. Grøn OsloMet – Storbyuniversitetet

Pendelklodker

I flere århundrer var pendelklodkene de mest nøyaktige klodkene. I 1921 ble det bygget en klodke kalt den Shortt-Synchrone frie pendelklodken (Figur 1) som oppnådde en fenomenal nøyaktighet på omtrent ett sekund per år. Denne klodken var mer nøyaktig og stabil enn jordrotasjonen og ble i 1926 brukt til å måle sesongvariasjoner i jordas rotasjonshastighet.

Kvartsklodker

I 1879 skrev James Clerk Maxwell i et brev til William Thomson: «Perioden til vibrasjonene i en kvartskrystall vil være en bedre tidsstandard enn det midlere solare sekund basert på jordas rotasjon.» I 1927 ble den første kvartskrystallklodken konstruert. Etter noen års videre utvikling ble det oppnådd en nøyaktighet på ett sekund i løpet av 32 år, omtrent 30 ganger bedre enn Shortt-klodkens presisjon. Dermed var også kvartsklodkene blitt mer nøyaktige enn jordrotasjonen, og i 1935 ble de brukt til å måle variasjoner i jordas rotasjon.

Atomklodker

I 1939 hadde fysikeren Isidor Isaak Rabi og hans kolleger ved Columbia University i USA samtaler med forskere ved National Bureau of Standard om å anvende resonansfenomener knyttet til deres molekylstråle som en tidsstandard. I 1940 målte hans forskergruppe cesiumatomers resonansfrekvens. Rabi foreslo da å bruke denne til å definere varighet av et sekund. Forskergruppens videre arbeid med å konstruere en atomklodke ble avbrutt da USA ble med i andre verdenskrig i 1941.

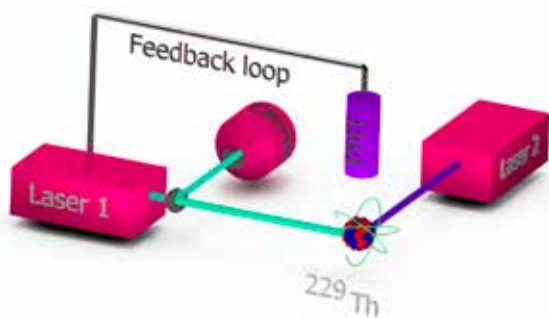
Den første atomklodken ble bygget av Harold Lyons og hans kolleger ved U.S. National Bureau of Standard i Washington. De begynte arbeidet i 1947 og kunne demonstrere klodken for publikum i 1949. Klodken fungerte ved å utnytte mikrobølgesignaler



Figur 1. Shortt-klodke i museet til U.S. Institute of Standards and Technology. En «primærpendel» befinder seg inni vakuums tanken til venstre.

sendt ut fra elektroner i et atom når de gikk fra ett energinivå til et lavere nivå.

I 1955 konstruerte den britiske fysikeren Louis Essen og medarbeidere ved U.K. National Physical Laboratory den første atomklodken som var nøyaktig nok til å kunne brukes som en tidsstandard for en atomær definisjon av sekundet. I løpet av 1960-årene ble det utviklet atomklodker med en nøyaktighet på ett sekund i løpet av 300 000 år.



Figur 2. Prinsippskisse for en atomkjernekløkke basert på ^{229}Th (thorium). En ^{229}Th -kjerne bestråles med laser 1, og en laser 2 brukes til å bestemme strukturen av spekteret fra atomkjernen. Dermed kan energien i ulike tilstander av kjernen bestemmes. En fotomultiplikator (PMT) brukes til å registrere frekvensen ved resonans mellom lasestrålingen til laser 2 og frekvensen $f = E/h$, der E er energiforskjellen mellom to energinivåer i kjernen. Et tilbakekoblingsopplegg sørger for at laser 1 stilles inn på resonansfrekvensen. Denne frekvensen måles ved hjelp av en frekvenskam. Dermed kan frekvensen til laser 1 brukes som en standard for frekvens og tid. Ett sekund er tiden mellom et spesifisert antall svingninger.

Denne ekstraordinære nøyaktigheten førte til at sekundet i 1967 ble redefinert med utgangspunkt i presisjonen til cesiumatomklokker. Den nye definisjonen av sekundet er: Frekvensen til lys sendt ut fra et $^{133}\text{cesium}$ -atom når det faller mellom to spesifiserte energinivåer, er $9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$.

Det neste teknologiske gjennombruddet i arbeidet med å utvikle ekstremt nøyaktige klokker var utviklingen omkring 1998 av en såkalt *optiske frekvenskam*. Det er en laser med et spektrum der det er samme «mellomrom» mellom alle spektrallinjene, det vil si det er samme antall svingninger mellom spektrallinjene. Den kan fungere som et instrument for å utføre ekstremt nøyaktige frekvensmålinger av lys.

Optiske frekvenskammer har ført til konstruksjon av optiske atomklokker med langt høyere presisjon enn tidligere generasjoner av atomklokker. Prinsippet for en optisk atomklokke er vist i Figur 2.

De mest nøyaktige optiske atomklokkene har nå en nøyaktighet på 10^{-18} . Det svarer til at de går maksimalt ett sekund feil i løpet av 30 milliarder år – omtrent det dobbelte av universets alder. Med denne utrolige nøyaktigheten av de beste optiske atomklokkene er forskermiljøet klar for en redefinisjon av sekundet. Utviklingen av atomklokkers nøyaktighet er vist i Figur 3.

Men fagmiljøet er likevel innstilt på å vente litt med å redefinere sekundet fordi det fortsatt foregår en rask teknologisk utvikling av nye typer klokker – ikke minst atomkjernekløkker. For å forstå slike klokker må vi vite litt om atomkjernes energinivåer.

Energinivåer for atomkjerener

En atomkjernekløkke bruker frekvensen til overgangen mellom to energinivåer hos en atomkjerne som referansefrekvens på tilsvarende måte som en atomklokke bruker overgangen mellom to atomære energinivåer. Atomkjerener består av opp til noen hundre protoner og nøytroner som har fellesbeteg-

nelsen nukleoner. Observasjoner av spektrallinjer til atomer har vist at atomkjernene har kvantiserte energinivåer. Det er svært komplisert å gjøre en eksakt beregning av energiene til disse nivåene. Kjernefysikerne har derfor innført modeller for atomkjernene som forenkler slike beregninger, og likevel har gitt resultater som stemmer godt med eksperimentelle resultater.

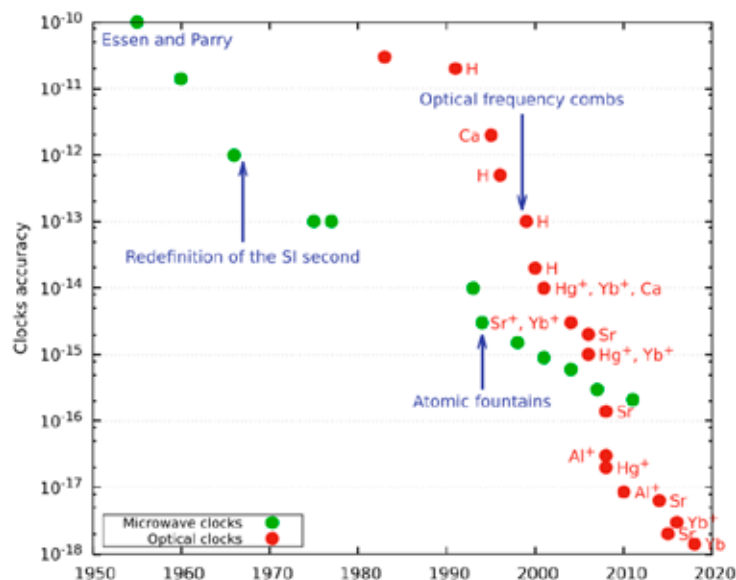
Vi vil her nøye oss med å betrakte skallmodellen av en atomkjerne. Ifølge denne modellen er energien av hvert nukleon i en atomkjerne bestemt av den gjennomsnittlige tiltrekningskraften fra alle de andre nukleonene i kjernen. På tilsvarende måte som hos elektronene til et atom, har sannsynlighetsfordelingen for nukleonenes avstander fra en atomkjernes sentrum en skallstruktur. Dette gir opphav til kvantiserte energinivåer som beskrives med forskjellige kvantetall.

De tre viktigste kvantetallene representerer impulsmoment, isospinn og paritet. Impulsmomentet dreier seg om en atomkjernes rotasjon.

Isospinnet angår den elektriske ladningen til de tre kvarkene i et nukleon. Et proton består av to kvarker med $+(2/3)$ elementærladning og én kvark med $-(1/3)$, mens et nøytron består av to kvarker med $-(2/3)$ og én med $+(2/3)$. Kvarker med positiv ladning kalles *opp-kvarker* og de med negativ ladning *ned-kvarker*. Isospinnet til en atomkjerne representerer innholdet av opp- og nedkvarker i en atomkjerne.

Pariteten forteller hvor stor energiendring en atomkjerne får dersom alle nukleonene speiles om origo, det vil si dersom koordinatene til alle nukleonene skifter fortegn når man bruker et koordinatsystem med origo i atomkjernes sentrum.

Ved en overgang mellom to av en atomkjernes energinivåer endres kvantetallene. Kjernefysikerne kan beregne en atomkjernes energi fra skallmodellen når alle kvantetallene i en tilstand er kjente. Skallmodellen har gjort det mulig å beregne hvordan



Figur 3. Utviklingen av atomklokkers nøyaktighet [1].

kvantetallene endrer seg når en atomkjerne går fra ett energinivå til et annet, og dermed hvor mye atomkjernens energi da endrer seg. Det er knyttet en frekvens f til en slik endring E av en atomkjernes energi gitt ved $E = hf$, der h er Plancks konstant. Denne kalles resonansfrekvensen til den aktuelle overgangen mellom to energinivåer.

Atomkjernekløkker

Prinsippet for virkemåten av en optisk atomkjernekløkke (videre kalt en *kjernekløkke*) er det samme som for optiske atomklokker illustrert i Figur 2, bare at atomene er byttet ut med atomkjerne.

Lars von der Wense og Benedict Seiferle publiserte i november 2020 en 58 sider lang oversiktsartikkel [2] med 424 referanser om arbeidet med å utvikle kjernekløkker. Slike kløkker er ennå ikke ferdig utviklet, men forventes å kunne oppnå en presisjon på 10^{-19} som svarer til en usikkerhet på ett sekund i løpet av 300 milliarder år.

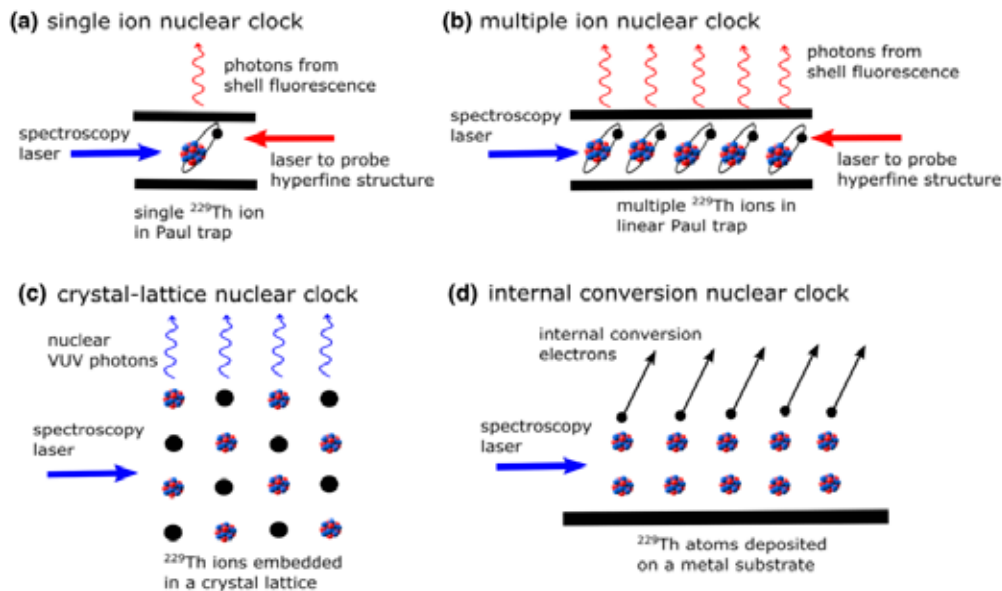
Kjernekløkker har fire fordeler sammenliknet med atomklokker:

1. En atomkjerne har hundre tusen ganger mindre radius enn et atom. Det gjør at atomkjerne har mye mindre magnetisk dipolmoment og elektrisk kvadrupolmoment enn atomer. Dermed vil magnetiske og elektriske krefter som atomer og atomkjerne kan være utsatt for, ha mye mindre virkning på en atomkjernes- enn på et atoms energinivåer. Det bidrar til å gi en kjernekløkke større presisjon og stabilitet enn en atomkløkke.

2. Overgangsenergien mellom to energinivåer er større i atomkjerne enn i atomer. Det innebærer høyere resonansfrekvenser og mindre ustabilitet.
3. En atomkjerne i et fast stoff er mindre utsatt for påvirkninger fra atomene som omgir det, enn et atom. Det betyr at det vil være mer realistisk og gunstig å utvikle en fast-stoff-kjernekløkke enn en fast-stoff-atomkløkke.
4. En fast-stoff-kjernekløkke vil kunne inneholde ti milliarder ganger fler atomkjerne enn antall atomer i en atomkløkke med samme volum. Det gjør kjernekløkken mer stabil enn atomkløkken.

Et krav til atomkjerne som skal brukes i en kjernekløkke, er at de må kunne ekisteres ved hjelp av en laser. Lasere har fotonenergier opp til 100 eV. Det må altså brukes atomkjerne med mindre eksitasjonsenergi enn dette.

I sammenheng med utviklingen av kjernekløkker har thorium-kjernen ^{229}Th vært av stor interesse fordi den har den laveste eksitasjonsenergien av alle kjente atomkjerne. Inntil nylig (se avsnittet «Siste nytt» nedenfor) hadde man ikke observert henfall av den eksiterte tilstanden $^{229\text{m}}\text{Th}$ til grunntilstanden, og man hadde ikke noe presist kjennskap til dens halveringstid. Det ble imidlertid estimert at den har en levetid på mellom tusen og ti tusen sekunder. Det gir en spektrallinjevidde på mellom 10^{-3} og 10^{-4} Hz. Dette ble betraktet som gunstig i sammenheng med kjernekløkker.



Figur 3. De fire typene kjernekløkker som har vært studert er: a) Ett-ion kjernekløkker; b) Fler-ion kjernekløkker; c) Krystallgitter kjernekløkke; d) Indre omdannings kjernekløkke [2]. (VUV står for vakuum ultrafiolette.) Se omtale i hovedteksten.

Isotopen ^{229}Th er radioaktiv. Dersom halveringstiden er for kort, er radioaktive endringer av atomkjernene et problem for anvendelse i kjernekløkker. Heldigvis er halveringstiden til ^{229}Th 7917 år, og det er tilstrekkelig lang tid til at henfall av disse atomkjernene ikke er noe problem for anvendelse i kjernekløkker.

I tillegg dannes ^{229}Th ved radioaktivt henfall av uranisotopen ^{233}U som det fortsatt er god tilgang på, fordi ^{233}U ble produsert i store mengder under andre verdenskrig og tatt vare på.

Eksitasjonsenergien til $^{229\text{m}}\text{Th}$ ble i [2] oppgitt til 7,8 eV. Ved å bruke den kvantemekaniske sammenhengen mellom energi og frekvens, $E = hf$, der h er Plancks konstant, finner vi at denne energien svarer til frekvensen $1,9 \cdot 10^{15}$ Hz. Dette er i den nære ultrafiolette delen av det elektromagnetiske spekteret. Slike atomkjerner kan i prinsippet eksiteres ved hjelp av en laser. Men det krever et presist kjennskap til eksitasjonsenergien å få det til.

Inntil nylig har man ikke hatt noen presis måling av eksitasjonsenergien til ^{229}Th . Dette har hindret utviklingen av en kjernekløkke. Denne situasjonen er nå i ferd med å endres. I 2019 rapporterte B. Seiferle og medarbeidere om målinger av eksitasjonsenergien til ^{229}Th med en usikkerhet på bare 0,17 eV.

Fire typer atomkjernekløkker

Forskerne har studert fire typer kjernekløkker skjematisk illustrert i Figur 3. Disse vil nå bli kortfattet beskrevet. a) Ett-ion-kjernekløkker bruker en innesperret og avkjølt ^{229}Th -atomkjerne som klokke.

Den sperres inne i en såkalt Paul-felle, også kalt en kvadrupol ionefelle (Figur 4). ^{229}Th -atomkjernen eksiteres ved hjelp av en laser, og atomkjernen sender ut fluorescense-stråling når det de-eksiterer til grunntilstanden. Frekvensen til denne strålingen måles presist med en frekvenskam; b) I fler-ion-kjernekløkker er flere ^{229}Th -atomkjerner sperret inne i Paul-fellen; c) I krystallgitter kjernekløkker er et gitter av ^{229}Th -atomkjerner sperret inne i Paul-fellen; d) Såkalte indre omdannings kjernekløkker er konstruert nesten på samme måte som krystallgitterkløkkene, bare at eksitasjonsenergien måles på en annen måte.

Ett-ion-kjernekløkker gir best nøyaktighet mens fler-ion-kjernekløkker gir best stabilitet.

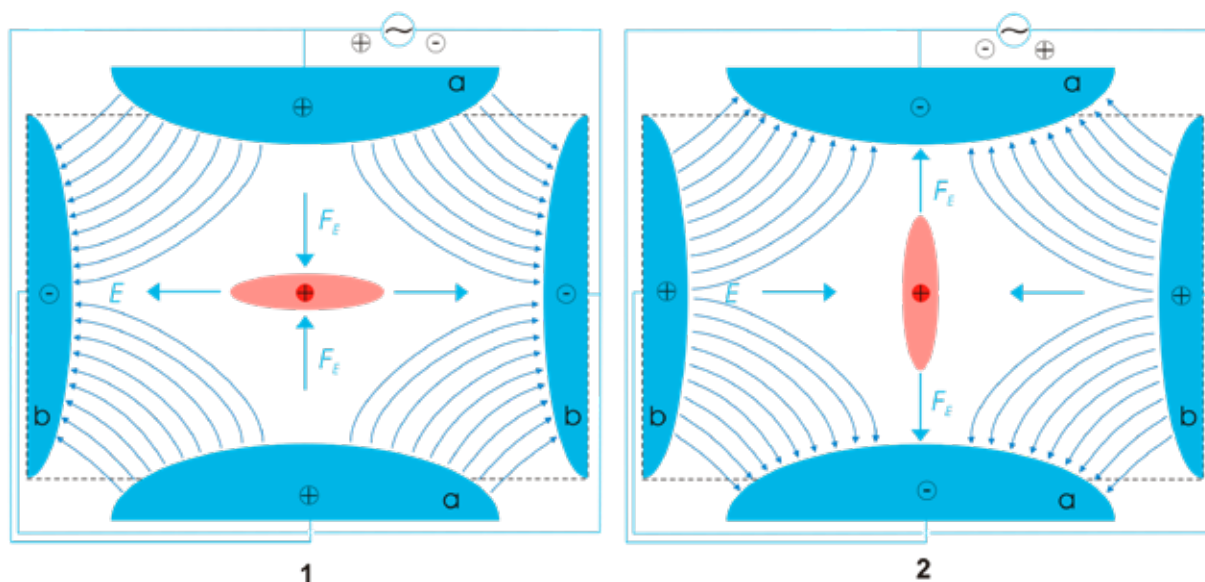
Siste nytt

Den 24. mai 2023 publiserte S. Kraemer og medarbeidere en artikkel i *Nature* [3] der de rapporterte om resultatet av et nytt eksperiment ved CERN-detektoren Isolde. For første gang ble det radioaktive henfallet som fører $^{229\text{m}}\text{Th}$ -atomkjernen fra det eksisterte nivået $^{229\text{m}}\text{Th}$ til grunntilstanden, observert. Eksitasjonsenergien opp til energinivået $^{229\text{m}}\text{Th}$ ble målt til å være $8,34 \pm 0,24$ eV. Halveringstiden til dette energinivået ble målt til 670 ± 102 s.

Anvendelser

Man kan spekulere: Hva skal man med så ekstremt nøyaktige klokker? En viktig bruk av atomklokker er i satellittnavigasjon. Her bestemmes posisjon ved å måle hvor lang tid et elektromagnetisk signal tar

► Atomkjernekløkker



Figur 4. 1 og 2 viser to tilstander av en ionefelle. Den røde sirkelen med + representerer et positivt ion av for eksempel en ^{229}Th -atomkjerne. De blå feltene representerer elektroder som skifter ladning periodisk. De blå buete linjene med piler representerer det elektriske kvadrupolfeltet som disse elektrodene forårsaker. Det røde ovale feltet representerer en sky av positivt ladde partikler som omgir ionet. Når ladningen på elektrodene skifter fortegn snur feltlinjene, og skyen av ladde partikler endrer orientering, men ionet flytter seg ikke. Det er fanget.

på å bevege seg en viss distanse. Med tilstrekkelige nøyaktige klokker kan for eksempel små forflytninger av formasjoner på bakken måles, og det kan bidra til å varsle om kommende jordskjelv.

Når man måler tid med en nøyaktighet på 10^{-18} ved jordoverflaten, kommer den gravitasjonelle tidsforlengelsen sterkt inn i bildet. Klokker går langsommere langt nede i et tyngdefelt enn høyere oppe. Formelen for den gravitasjonelle tidsforlengelsen er $\Delta t/t = gh/c^2$, der Δt er forskjellen i tid i løpet av en tid t for to klokker i ro med en høydeforskjell h i et tyngdefelt med tyngdeakselerasjon g , og c er lyshastigheten i tomt rom. Det gir $h = (c^2/g)(\Delta t/t)$. Innsetning av $c = 3 \cdot 10^8$ m/s og $g = 9,8$ m/s² gir $h \approx 10^6$ m ($\Delta t/t$) som viser at ved jordoverflaten svarer en presisjon på $\Delta t/t = 10^{-18}$ til en høydeforskjell på bare 1 cm. Det betyr at de mest presise klokkene kan brukes til en nøyaktig kartlegging av jordas gravitasjonsfelt.

Optiske atomklokker har også vært brukt til å undersøke om de fundamentale naturkonstantene endres med tiden. Så langt er ingen slike endringer blitt registrert.

Sammendrag

Thoriumkjernen ^{229}Th er den ledende atomkjerne kandidaten for bruk i den neste generasjonen av optiske klokker – optiske atomkjernekløkker. For å kunne eksitere denne kjernen med en laser må man ha presist kjennskap til eksitasjonsenergien. Denne er

målt med god nøyaktighet de siste årene. Det nærmer seg at man har nok informasjon til å stille inn frekvensen av en laser så presist at denne atomkjernen kan eksiteres til det første nivået over grunntilstanden med en laser. Dette er nødvendig med den typen kjernekløkker man arbeider med å konstruere.

Det vil fortsatt ta noen år før vi har en optisk atomkjernekløkke. Men det er stor internasjonal aktivitet på området. Dette skyldes blant annet at presisjonen til slike klokker er fenomenal – 10^{-19} som svarer til ett sekund på 300 milliarder år. Slike klokker vil kunne brukes til å teste mer nøyaktig enn tidligere, om de fundamentale naturkonstantene som Plancks konstant, gravitasjonskonstanten og lyshastigheten i tomt rom, virkelig er konstante. De vil også kunne brukes til å foreta en nøyaktig kartlegging av jordas gravitasjonsfelt og å opprette et varslingsystem for jordskjelv. ■

Referanser

- [1] P. Delva et al. «Chronometric geodesy: methods and applications, in Relativistic Geodesy, Foundations and Applications.» *Fundamental Theories of Physics*, vol. 196, ed. by D. Puetzfeld, C. Lämmerzahl (Springer, Cham, 2019).
- [2] Lars von der Wense og Benedict Seiferle. «The ^{229}Th isomer: prospects for a nuclear optical clock.» *Eur. Phys. J. A.* 56: 277 (2020).
- [3] S. Kraemer et al. «Observation of the radioactive decay of the ^{229}Th nuclear clock isomer.» *Nature*, 617, 706–719 (2023).

Kosmisk tidsforlengelse

Fjerne objekter beveger seg vekk fra oss med relativistisk hastighet på grunn av universets ekspansjon. Relativitetsteorien sier at klokker observeres å tikke saktere desto raskere de beveger seg. Det er tidligere rapportert at denne effekten er observert for supernovaer. I 2023 ble det annonsert at effekten er observert for kvasarer ut til en avstand på 12 milliarder lysår.

Øyvind G. Grøn OsloMet – Storbyuniversitetet

For å forstå begrepet *kosmisk tidsforlengelse* og innholdet i artiklene som rapporterte om tester av den kosmiske tidsforlengelsen, må vi ha kjennskap til sammenhengen mellom på den ene siden den spesielle relativitetsteoriens hastighetsavhengige tidsforlengelse, dopplereffekten og den hastighetsavhengige rødforskyvningen, og på den andre siden universets ekspansjon og den kosmiske rødforskyvningen. Dette vil bli beskrevet i Boks 1 og Boks 2.

Vår tids standardtolkning er en annen enn den som er omtalt i Boks 1. Dopplereffekten knyttes til en bevegelse av det observerte objekt gjennom rommet. Denne typen bevegelse kalles på engelsk

peculiar motion og skyldes lokale gravitasjonsfelter. Universets ekspansjon derimot oppfattes som en ekspansjon av selve rommet. Den kan tenkes på som en radiell bevegelse av en «romelv» som på engelsk kalles *the Hubble flow*. Fjerne objekter i romelven har en hastighet vekk fra oss som gir opphav til en rødforskyvning av stråling de sender ut. Elektromagnetiske bølger sendt ut fra et fjernt objekt strekkes av det ekspanderende rommet på vei fra objektet til jorda. Dermed observeres lengre bølger enn de som ble sendt ut – en kosmisk rødforskyvning.

Romelvens radielle hastighet innebærer at observert av oss går tiden langsommere på fjerne legemer enn på de som er nær oss. Vi ser et objekt

Boks 1. Relativistisk tidsforlengelse, dopplereffekt og hastighetsavhengig rødforskyvning

Klokker observeres å tikke langsommere desto raskere de beveger seg. Formelen som beskriver dette er

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1)$$

der t_0 er tidsintervallet mellom to tikk når en klokke er i ro og t er tidsintervallet mellom tikkene når den beveger seg med hastighet v . Når klokken hastighet nærmer seg lyshastigheten stopper den.

Vi tenker oss nå at en fjern klokke sender ut lys som observeres på jorda. La oss anta at klokken sender ut en bølgetopp hver gang den tikker. Perioden til de utsendte bølgene er T_{utsendt} observert av en som følger klokken. På jorda observeres en lengre periode for de mottatte bølgene. Dette skyldes to ting: For det første at senderen tikker saktere på grunn av hastigheten den har i forhold til jorda; for det andre at avstanden til senderen fra jorda øker for hver bølgetopp den sender ut, slik at reisetiden stadig blir lengre. Til sammen gir dette opphav til *dopplereffekten* som innebærer at perioden observert på jorda er

$$T_{\text{observert}} = T_{\text{utsendt}} \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}. \quad (2)$$

Rødforskyvningen z til strålingen er definert som endringen av bølgelengden dividert med den utsendte bølgelengden,

$$z = \frac{\lambda_{\text{observert}} - \lambda_{\text{utsendt}}}{\lambda_{\text{utsendt}}} = \frac{\lambda_{\text{observert}}}{\lambda_{\text{utsendt}}} - 1, \quad (3)$$

som gir

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{observert}}}{\lambda_{\text{utsendt}}}. \quad (4)$$

I kosmisk sammenheng skyldes hastigheten v universets ekspansjon, og z omtales som en kosmisk rødforskyvning.

slik det var da det sendte ut den observerte strålingen. Jo fjernere objekter vi observerer, desto tidligere i universets historie ser vi. Og denne fjerne og tidlige delen av universet beveger seg altså vekk fra oss med stor hastighet på grunn av universets ekspansjon. Dermed får den relativistiske tidsforlengelsen betydning. Vi ser at det tidlige univers fjerner seg fra oss med stor hastig-

Boks 2. Kosmisk rødforskyvning og ekspansjon

Universet ekspanderer. Det forårsaker at legemer som følger universets ekspansjon beveger seg raskere bort fra oss desto større avstand de har fra oss. Dette er beskrevet i Hubble-Lemaîtres lov,

$$v = HD, \quad (5)$$

der H er hubbleparameteren og D er avstanden til et kosmisk legeme som beveger seg vekk fra oss med hastighet v på grunn av universets ekspansjon.

Universets ekspansjon innebærer at selve rommet utvider seg. Dersom vi ser på avstanden til et gitt objekt, for eksempel en kvasar (en aktiv galaksekjerne), så var avstanden mindre før enn nå. $D(t)$ øker med den kosmiske tiden.

Rommets ekspansjon strekker bølgelengdene til stråling fra et fjernt objekt. Siden rommets ekspansjon strekker bølgene til et signal som sendes ut fra et kosmisk objekt og observeres på jorda, er forholdet mellom den observerte og utsendte bølgelengden, lik forholdet mellom de kosmiske avstandene ved ankomsttidspunkt t_0 og utsendelsestidspunkt t ,

$$\frac{\lambda_{\text{observert}}}{\lambda_{\text{utsendt}}} = \frac{D(t_0)}{D(t)}. \quad (6)$$

Fra likningene (4) og (6) følger

$$\frac{D(t_0)}{D(t)} = 1 + z. \quad (7)$$

Her er z den kosmiske rødforskyvningen til strålingen fra et observert objekt. Den forteller hvor mye de kosmiske avstandene har økt mens strålingen har vært på vei fra objektet til jorda. Den er en ekspansjonseffekt mens rødforskyvningen i likning (4) er en hastighets-effekt – dopplereffekten. Det er samme formler, men ulike tolkninger.

Rødforskyvningen kan måles med et spektrometer som viser hvor mye spektrallinjer i strålingen har forflyttet seg under reisen. Derfor uttrykkes den kosmiske ekspansjonshastigheten ved rødforskyvningen. Stor rødforskyvning betyr at de kosmiske avstandene har økt mye under reisen og altså at strålingen ble sendt ut fra fjerne objekter for svært lang tid siden.

het, og vi ser det derfor i langsom kino.

Universets ekspansjon sammen med den relativistiske tidsforlengelsen innebærer at jo større avstand en supernova eller kvasar har fra oss, desto langsommere ser det ut som de utvikler seg. Flere observasjoner av dette har vært rapportert.

«De annonserte at den kosmiske tidsforlengelsen for første gang var observert for kvasarer, det vil si aktive galaksekjerner.»

Tidsforlengelse for supernovaer

B. Leibundgut og medarbeidere [1] publiserte i 1996 den første rapporten om en test av den relativistiske tidsforlengelsen knyttet til hastigheten av supernovaer på vei vekk fra oss på grunn av universets ekspansjon. De undersøkte en supernova kalt SN 1995K med rødforskyvning $z = 0,48$. Det betyr av strålingen har reist avstanden 10,3 milliarder lysår på vei fra supernovaen til jorda. Denne supernovaen er av type Ia, det vil si en eksploderende hvit dvergstjerne.

Lyskurven til en supernova forteller hvordan observert intensitet avhenger av tiden som er gått fra supernovaen dukket opp. Leibundgut et al. skrev at lyskurven til en supernova fungerer som en kosmisk klokke. Den kan brukes til å teste at klokker som beveger seg, tikker langsommere enn klokker i ro.

Likningene (4), (6) og (7) innebærer at den relativistiske tidsforlengelsen for legemer som følger *the Hubble flow*, det vil si med en bevegelse som skyldes universets ekspansjon, øker med $1 + z$. Forskerne brukte supernovaen SN 1995K til å teste denne forutsigelsen. De skrev at oppførselen av SN 1995K passer med egenskapene til supernovaer av type Ia dersom lyskurven forlenges med faktoren $1 + z$. Deres resultat var i overensstemmelse med forutsigelsen fra den spesielle relativitetsteorien i kombinasjon med at supernovaen har en hastighet langs synslinjen som skyldes universets ekspansjon.

G. Goldhaber og medarbeidere studerte i år 2000 lyskurvene til 35 supernovaer av type Ia. Forskergruppen hadde tidligere brukt de samme supernovaene for å studere universets ekspansjon og annonserte i 1998 det overraskende resultatet at universets ekspansjon har økt farten de siste 8 milliarder årene. Forskerne fortalte i artikkelen [2] at de hadde undersøkt om varigheten til supernovaene var avhengig av rødforskyvningen, det vil si av avstanden og dermed av farten til supernovaene vekk fra oss. Deres resultater stemte med forutsigelsen fra den spesielle relativitetsteorien og at supernovaene hadde en hastighet som skyldtes universet ekspansjon.

Disse resultatene ble igjen bekreftet i en under-

søkelse [3] av S. Blondin og medarbeidere publisert i 2008.

G.F. Lewis og B.J. Brewer [4] publiserte i juli 2023 en artikkel der de annonserte at den kosmiske tidsforlengelsen for første gang var observert for kvasarer, det vil si aktive galaksekjerner. De innledet sammendraget av sin artikkel med: «En fundamental forutsigelse i relativistisk kosmologi er at på grunn av rommets ekspansjon vil observasjoner av fjerne deler av universet være tidsforsinket og synes å utvikle seg langsommere enn den lokale delen av universet. Mens observasjoner av supernovaer utvetydig viser den forventede rødforskyvnings-avhengige tidsforsinkelsen, har dette ikke vært tilfelle for andre fjerne objekter. Vi identifiserer her en kosmisk tidsforsinkelse i et utvalg av 190 kvasarer som er observert over en periode på to tiår.»

Konklusjon

Den relativistiske tidsforlengelsen har tidligere vært demonstrert for myoner dannet høyt oppe i atmosfæren. De har så kort levetid at uten den relativistiske tidsforlengelsen ville de ikke nådd ned til bakken. Men de kom ned. Nå er det vist at både supernovaer og kvasarer viser en tilsvarende tidsforlengelse. Dermed er den relativistiske tidsforlengelsen bekreftet både på mikroskopisk og kosmisk skala. ■

Referanser

- [1] B. Leibundgut og medarbeidere. «Time dilation in the light curve of the distant type Ia supernova SN 1995K». *Astrophys. J.* (1996). 466, L21–L24. Doi: 10.1086/310164.
- [2] G. Goldhaber og medarbeidere. «Timescale Stretch Parameterization of Type Ia Supernova B-Band Light Curves». *Astrophys. J.* (2001). 558, 359. Doi: 10.1086/322460.
- [3] S. Blondin og medarbeidere. «Time dilation in type Ia supernova spectra at high redshift». *Astrophys. J.* (2008). 682, s. 724–736. Doi: 10.1086/589568.
- [4] G.F. Lewis og B.J. Brewer. «Detection of the Cosmological Time Dilation of High Redshift Quasars». *Nature Astronomy* (2023). Doi: 10.1038/s41550-023-02029-2.

Heisenbergs matriser

Dag-Morten Sjøstrøm lektor i fysikk ved Ålesund vgs.



Werner Heisenberg i 1927.

Jeg husker det fortsatt; første gang jeg åpnet P.C. Hemmers bok *Kvantemekanikk* [1]. Jeg hadde på det tidspunktet tilbakelagt tre semestre med fysikkstudier, og før det vært trollbundet av populærvitenskapelige fremstillinger av kvantefysikk siden ungdomsårene, men lite kunne forberede meg på det som møtte meg i denne boken.

Etter et lite innledningskapittel, med blant annet en kort gjennomgang av Plancks strålingslov og den fotoelektriske effekt, ble jeg introdusert for kvantefysikkens grunnprinsipper, eller *postulatene*. Observable, hermitske operatorer, tilstandsvektorer i et uendeligdimensjonalt Hilbertrom, egenverdier og egentilstander. Det tok nok litt for lang tid, kanskje på grunn av min da umodne intellektuelle stolthet, å innrømme for meg selv at jeg ikke skjønnte noen verdens ting.

Nå er det for så vidt ikke noe nytt at man som fysikkstudent (eller fysiker, for den saks skyld) har en følelse av å ikke forstå; man jobber med abstrakte matematiske konsepter i søken etter en beskrivelse av et uendelig komplekst univers. Allikevel var det noe unikt med den følelsen av uforståelighet jeg fikk der jeg satt med Hemmers bok i fanget. Det kunne sammenlignes med det å lese fagbøker i høyere matematikk, der konseptene relateres kun til seg selv, uten lovnad om noe bakenforliggende. Men nå skulle jo dette være fysikk, og det bakenforliggende skulle være verden.

Det var som å kun få bruksanvisningen til en fullstendig forseglet maskin, uten noen som helst forklaring på hvordan maskinen faktisk virker. Og hvis jeg skal strekke sammenligningen enda lenger; som maskiner ellers, kan man regne med at garan-

tien forfaller dersom man prøver å åpne den opp.

Dette er ikke ment som en kritikk av Hemmers bok og hans aksiomatiske tilnærming, for hans lærebok skiller seg ikke fundamentalt fra de fleste andre. Min opplevelse av å lære kvantefysikk for første gang er nok også ganske gjenkjennbar for de fleste fysikere, og det hele bunner ikke i et spørsmål om didaktikk, ei heller et om eksposisjon. Det bunner i et filosofisk spørsmål om hva vi mener kvantefysikk skal *være*.

Så spiller kanskje Gud med svært diffuse terninger, men kvantefysikkens postulatene kommer allikevel ikke fra oven. De ble skrevet ned av noen gutter i tjuårene for snart hundre år siden; Heisenberg, Dirac, von Neumann. Og det virkelige spranget fra den klassiske fysikken til kvantefysikken skjedde etter min mening ikke i 1900 med Plancks kvantehypotese, det skjedde i 1925 med Heisenbergs omdefinering av de mekaniske størrelsene.

To tilnærminger til fysikk

Werner Heisenberg tok doktorgraden i 1924 med temaet turbulens, under veiledning av Arnold Sommerfeld i München, og jobbet videre under Max Born i Göttingen. Han ble ansett av begge sine mentorer for å være svært begavet innen teoretisk fysikk. Men det var atomteori, og ikke fluidmekanikk, som skulle bli hovedfokuset til den unge Heisenberg. Allerede i 1922, da på sitt andre studieår, tok Sommerfeld med Heisenberg til en forelesningsserie om atomstruktur gitt av selveste Niels Bohr. Dette var første gang Heisenberg møtte Bohr, noe som ble starten på et langt og nært samarbeid. I 1924 ble han invitert til Bohrs institutt i København, og



Arnold Sommerfeld og Max Born

de mange oppholdene der skulle etterlate et varig inntrykk og modne hans forståelse for den gryende atomfysikken.

Det var også en ny atmosfære som møtte Heisenberg i København. Der Sommerfeld og Born hadde en i stor grad matematisk tilnærming til fysikk, var forskningen ved Bohrs institutt drevet frem av fysiske intuisjoner og prinsipper. Som Heisenberg erindrer senere i livet (min oversettelse): «Bohr sa alltid, 'Først må vi forstå hvordan fysikken virker; og bare når vi har oppnådd en fullstendig forståelse for hva den handler om, kan vi håpe på å finne en matematisk representasjon.'» (s. 125) [2].

Vi skal se at begge de to tilnærmingene til fysikk blir viktige for utviklingen av Heisenbergs nye kvantemekanikk.

Mot en omfortolkning av klassisk fysikk

I 1925 publiserer den da 23 år gamle Heisenberg sin artikkel med tittelen *On the quantum re-interpretation of kinematical and mechanical relationships* (engelsk oversettelse) [3]. Artikkelen blir startskuddet for den såkalte matrisemekanikken, eller kvantemekanikken, og den moderne formuleringen av kvanteteorien.

Men hvordan dukker matriser, disse tabellene med tall, som følger sin egen matematikk, og som enhver fysikkstudent i dag møter i sitt første studieår, opp i den matematiske beskrivelsen av naturens minste bestanddeler? For å svare på det, og for å få en kontekst og en bakgrunn for Heisenbergs artikkel, må vi først skru tiden tilbake til 1913, til da Bohr publiserte sin modell for atomets struktur.

Bohrs atommodell, korrespondanseprinsippet og den gamle kvantefysikken

Bohr hadde kommet frem til sin atommodell ved å se på hvor mye energi som kreves for å løsrive et elektron fullstendig fra en atomkjerne [4]. Han gikk frem på en måte som var typisk for det som senere ble kalt *den gamle kvantefysikken*; man tok utgangspunkt i en klassisk modell, for så å modifisere denne med kvantiseringsbetingelser. Disse betingelsene ble valgt slik at teoriens forutsigelser passet med eksperimentelle data.

I klassisk fysikk beskrives en partikkel med dens posisjonsfunksjon $x(t)$ (jeg skal forenkle notasjonen til kun én dimensjon). Denne funksjonen finner man ved å løse en bevegelsesligning som gjerne har sitt opphav i Newtons 2. lov, og som sammen med en kraftlov, gir den fullstendige mekaniske beskrivelsen av partikkelen.

Bohr startet med en slik klassisk modell for et atom der et elektron går i bane rundt en positivt ladd kjerne. Elektronets bevegelse ville da være avhengig av den elektriske tiltrekningen mellom elektronet og kjernen. I tillegg ville elektronet sende ut elektromagnetisk stråling på grunn av sin akselererte bevegelse, i henhold til elektromagnetismens lover. Bohr foretok to endringer i denne klassiske modellen. Han antok at elektronet kunne befinne seg i gitte tilstander der det sirkler rundt kjernen uten å sende ut stråling, noe han begrunnet med at atomet jo var stabilt. I tillegg antok han at energien som kreves for å fjerne elektronet fra kjernen, eller alternativt; avgis under bindingen av elektronet, er kvantisert, i tråd med Plancks hypotese fra 1900. For hydrogen fikk han da modellen for elektronets



Niels Bohr instituttet i København.

energi i en kvantisert tilstand beskrevet med et naturlig kvantetall $n = 1, 2, 3 \dots$:

$$E_n = -\frac{B}{n^2},$$

der B er en konstant.

Atomet sender kun ut stråling dersom elektronet endrer energitilstand, og kombinert med Plancks hypotese vil denne strålingen ha frekvensen

$$\nu_{nm} = \frac{1}{h} (E_n - E_m), \quad (1)$$

der $m < n$ og h er Plancks konstant. Dog, ifølge klassisk elektromagnetisme, vil strålingsfrekvensen derimot være gitt ved elektronets sirklingsfrekvens, så her ser vi at Bohrs modell åpenbarer en helt ny fysikk på den atomære skala.

En finurlig konsekvens av denne frekvensformelen (1) er det såkalte Rydberg-Ritz-kombinasjonsprinsipp, som sier at summen av de utsendte strålingenes frekvenser når et elektron går fra tilstand n til k , og så videre fra k til m , blir lik frekvensen til strålingen som sendes ut dersom elektronet går direkte fra tilstand n til m :

$$\nu_{nk} + \nu_{km} = \nu_{nm}, \quad (2)$$

der $m < k < n$.

Frekvensformlene (1) og (2) ble betingelser som enhver kvanteteori måtte forholde seg til, og de skulle danne fundamentet for Heisenbergs artikkel.

En annen sentral idé i den gamle kvantefysikken, var det såkalte *korrespondanseprinsippet*. Det gikk ut på at man tok med seg de klassiske størrelsene inn i de nye modellene. Størrelsene måtte derfor modifiseres, og de kom til å følge helt nye lover, men dersom man tok grenseverdien tilbake til den klassiske fysikkens skala, måtte størrelsene gjenoppstå i sin klassiske form. Eller sagt på en litt forenklet måte; klassisk fysikk måtte være et grensetilfelle av kvantefysikk.

Som et eksempel kan vi se på hvordan Bohr benyttet korrespondanseprinsippet i sin artikkel allerede i 1913. Han merket seg at hans modell burde nærme seg den klassiske modellen dersom kvantetallet n blir stort. Derfor burde elektronet sende ut stråling med frekvens som tilsvarer sirklingsfrekvensen dersom det befinner seg i en slik høy energitilstand. Og ser man på overganger fra n til $n - 1$ dersom n blir stor, kunne Bohr vise med sin modell at strålingsfrekvensen blir lik sirklingsfrekvensen dersom den klassiske størrelsen $L = mvr$, altså elektronets dreieimpuls, er kvantisert:

$$L = \frac{nh}{2\pi}.$$

På denne måten fant Bohr frem til en kvantisert klassisk størrelse tilknyttet atomet i seg selv, og i årene som fulgte ble korrespondanseprinsippet brukt til å finne stadig nye kvantiseringsbetingelser og modifikasjoner av klassiske naturlover. Men på starten av 1920-tallet var atomteorien i krise. I årevis hadde

«Heisenberg begynte å søke etter en ny mekanikk der det ikke var posisjonsfunksjonen som var det sentrale objektet, men snarere strålingsfrekvensene og amplitudene, de størrelsene man faktisk målte i laboratoriet.»

man bygget videre på Bohrs modell, men teoriene var ofte preget av ad hoc-hypoteser kun for å tilpasse modellene til observasjoner; innføringen av stadig nye kvantetall, til og med halvtallige kvantetall, for å nevne et eksempel. Og behovet for en enhetlig teori gjorde seg stadig mer gjeldende.

Å basere fysikken på observerbare størrelser

Etter flere opphold ved Bohrs institutt gjennom 1924, var Heisenberg tilbake i Göttingen i 1925. Full av inspirasjon skulle han sette seg fore å løse problemet med intensitetene i hydrogenspekteret; Bohrs atommodell kunne forutsi frekvensene i den utsendte strålingen, men det var fortsatt uklart hvordan man skulle bruke modellen til å beregne intensitetene.

I København hadde Heisenberg samarbeidet med Hans Kramers i utviklingen av en kvanteteori for dispersjon, altså ladningers spredning av elektromagnetisk stråling, og i dette arbeidet hadde han støtt på bruken av Fourierrekker i beskrivelsen av ladningens posisjon. Klassisk dispersjon ble modellert ved å se på hvordan en ladning svinger som en dempet oscillator under påvirkning av ytre elektromagnetisk stråling, for så å sende ut sin egen stråling som interfererer med den innkommende. Siden ladningen vil begynne å svinge, er det naturlig i en slik modell å løse ladningens bevegelsesligning ved å substituere inn Fourierrekken til posisjonsfunksjonen:

$$\chi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k e^{2\pi i k v t}. \quad (3)$$

Her er X_k amplituden til k 'te harmoniske til en gitt grunnfrekvens v . Spørsmålet ble så hvordan man skulle gå frem for å beskrive dispersjon for et elektron i et atom, der elektronet ikke stråler på grunn av endringer i posisjonsfunksjonen, men snarere som et resultat av *overganger* mellom energitilstander.

En plan begynte å ta form for den unge Heisen-

berg, og han minnes tilbake flere år senere (min oversettelse): «Hva betyr $\chi(t)$? Nå, i et atom kan ikke $\chi(t)$ bety en bane, fordi denne banen vil ha feil frekvens. Så hva betyr det? Vel, det betyr i hvert fall en form for stråling, slik at alle disse utsendte frekvensene på en måte representerer $\chi(t)$... jeg følte at, hvorfor skulle ikke denne representasjonen av $\chi(t)$ også oppfylle bevegelsesligningene?» (s. 231) [2]. Heisenberg begynte å søke etter en ny mekanikk der det ikke var posisjonsfunksjonen som var det sentrale objektet, men snarere strålingsfrekvensene og amplitudene, de størrelsene man faktisk målte i laboratoriet. Som han skriver allerede på side 2 i sin artikkel (min oversettelse): «I denne situasjonen er det klokt å fullstendig gi opp håpet om å observere hittil uobserverte størrelser (slike som elektronets posisjon eller periode), og på samme tid anerkjenne at 1) den delvise overenstemmelsen mellom erfaringen og de nevnte kvanteregler er mer eller mindre flaks, og 2) å prøve og konstruere en kvantemekanikk der kun relasjoner mellom observerbare størrelser inngår.» [3].

Etter mye prøving og feiling, hvor han testet ut metoden med Fourierrekker på forskjellige kvantefysiske systemer, fant han endelig frem til en matematisk formalisme som så ut til å gjelde generelt. Han så at han kunne bruke korrespondanseprinsippet og bytte ut amplitudene og frekvensene i (3) med korresponderende kvantefysiske størrelser, slik at

$$X_k \rightarrow X(n,k), \quad (4)$$

der $X(n,k)$ blir den såkalte overgangsamplituden for overgangen mellom tilstand n og k , og slik at

$$k v \rightarrow v_{nk}, \quad (5)$$

der v_{nk} er gitt ved formel (1). Siden begge disse størrelsene er observerbare i strålingsspekteret, viste



Paul Dirac og John von Neumann.

det seg at en god kvantemekanisk representasjon for den klassiske posisjonsfunksjonen ville være en kolleksjon av $n \times k$ oscillatorer:

$$x(t) \rightarrow X(n,k) e^{2\pi i v_{nk} t}. \quad (6)$$

For å beregne strålingsintensiteten i klassisk elektromagnetisme trenger man å beregne størrelser på formen $x(t)^2$ (og høyere potenser). Heisenberg visste derfor at han måtte finne de tilsvarende kvantemekaniske uttrykkene for disse potensene, og han fant disse ved å se på den klassiske Fourierrekken for $x(t)^2$, altså dobbeltsummen:

$$x(t)^2 = \sum_k \sum_l X_k X_l e^{2\pi i (k+l) v t}.$$

Hvis dette skal bli et nytt uttrykk på samme form som (3);

$$x(t)^2 = \sum_m Y_m e^{2\pi i m v t},$$

må vi ha at

$$Y_m = \sum_k X_k X_{m-k},$$

der $m = k + l$.

Heisenberg benyttet så de samme korrespondansene (4) og (5) som tidligere, men denne gangen sammen med kombinasjonsprinsippet (2), slik at

$$(k+l)v = mv \rightarrow v_{nk} + v_{km} = v_{nm}.$$

For å gjenspeile summen av disse frekvensene antok han at overgangsamplitudene beskrev et elektron som gikk fra tilstanden n til en mellomliggende tilstand k , for så å ende i tilstanden $k + l = m$. Den kvantemekaniske ekvivalenten til kvadratet av

posisjonsfunksjonen var derfor gitt ved den litt merkelige formelen

$$Y(n,m) e^{2\pi i v_{nm} t} = \sum_k X(n,k) X(k,m) e^{2\pi i v_{nm} t}. \quad (7)$$

På denne måten klarte Heisenberg å omfortolke de klassiske størrelsene og å bruke de nye størrelsene i beregninger av enkelte kvantefysiske systemer. Resultatene var lovende.

Matriser og den nye kvantefysikken

Det er interessant å merke seg at Heisenberg ikke nevner matriser en eneste gang i sin artikkel. Det hadde seg nemlig slik at han manglet kunnskap om denne matematikken, og det var Born som gjenkjente formelen (7) som matrisemultiplikasjon. Den kvantemekaniske representasjonen (6) av den klassiske posisjonsfunksjonen er derfor en matrise. Sammen med Born og Pascual Jordan sammenfattet Heisenberg den nye kvantefysikken basert på matrieregningen, og de klarte å formulere de nye lovene som disse matriserepresentasjonene måtte følge, blant annet hvordan representasjonen x utvikler seg i tiden. Matrisemekanikken, eller kvantemekanikken, var dermed etablert.

En viktig konsekvens av denne nye matrisemekanikken var at matriser generelt ikke kommuterer; multiplikasjonsrekkefølgen har noe å si, og i lys av dette fant de frem til den fundamentale relasjonen

$$xp - px = \frac{ih}{2\pi}.$$

Her er ikke x og p den klassiske posisjonen og bevegelsesmengden, men symboler for de nye matriserepresentasjonene. Kanskje mer enn noen annen formel setter denne relasjonen fingeren på hvor skillet går mellom klassisk fysikk og kvantefysikk.



Heisenberg og Bohr i 1934.

At det var den matematiske strukturen til ikke-kommutativ algebra, som skulle beskrive naturen på atomnivå, det var noe Heisenberg på mange måter snublet over. Han gikk med andre ord frem i Bohrs ånd; fysikken kom først, så matematikken. Men nå var matematikkens sluser åpnet, og den nye kvantefysikken skulle bli stadig mer abstrakt.

Omtrent samtidig med Heisenberg publiserte engelskmannen Paul Dirac sin egen formalisme, og i 1926 presenterte Erwin Schrödinger sin berømte bølgeligning, som på tross av håpet, ikke beskrev bølger i vanlig forstand for å si det forsiktig. Straks etterpå ble de tre formalismene bevist å være ekvivalente med hverandre, og i 1932 utga John von Neumann boken *Mathematical foundations of quantum mechanics* [5]. I denne boken ble kvantemekanikkens postulater presentert i sin endelige matematiske form, og Heisenbergs matriser ble gjenkjent som såkalte hermitske operatører i et uendeligdimensjonalt Hilbertrom. Og med det så er jeg tilbake der jeg startet.

Epilog og et møte med Einstein

I denne artikkelen har jeg forsøkt å sammenfatte hvordan Heisenberg bygde opp sin kvantemekanikk, med det mål for øye å belyse hvorfor kvantefysikken er så matematisk framtung. Vi har sett at Heisenberg kom frem til en overordnet filosofi som la grunnlaget for hans undersøkelser, samt at matematikken som disse nye kvantemekaniske størrelsene oppfylte, så ut til å gi tilfredsstillende resultater. Men det er ikke til å stikke under en stol at hans formalisme var svært abstrakt, der han oversatte de vante klassiske størrelsene inn i en setting der de mistet sin opprinnelige mening, slik at bare symbolene og en matematisk struktur stod igjen. Om ikke annet så er det i hvert fall mulig å følge hans tanker,

blant annet takket være gode historiske kilder [2,6]. Men hvordan vi skal tolke teorien, det er noe som diskuteres den dag i dag, hundre år senere. Og det får bli tema for en annen artikkel.

Jeg skal avslutte med et sitat fra Einstein. Heisenberg møter Einstein i Berlin etter å ha holdt en presentasjon om sin nye teori. Etter forelesningen er Einstein kritisk til ideen om å basere fysikken kun på observerbare størrelser. Heisenberg kontrer tilbake med at han vel bare gjør det samme som Einstein gjorde i 1905, med sine definisjoner av tid og rom i den spesielle relativitetsteorien. Einstein svarer (min oversettelse): «*Det er mulig jeg resonnerer på den måten, men det er uansett nonsens. Kanskje jeg skal være litt diplomatisk og si at det kan være lurt rent heuristisk å tenke på hva man faktisk kan måle. Men i prinsippet blir det feil å basere en teori på observerbare størrelser alene. I virkeligheten er det det motsatte som skjer. Det er teorien som bestemmer hva vi kan observere.*» (s. 185) [6]. ■

Referanser

- [1] P.C. Hemmer. *Kvantemekanikk*. Tapir Akademisk Forlag (2005).
- [2] J. Mehra og H. Rechenberg. *The historical development of quantum theory*. Vol. 2. Springer-Verlag (1982).
- [3] W. Heisenberg. «On the quantum reinterpretation of kinematical and mechanical relationships.» *Z. Phys.*, (1925).
- [4] N. Bohr. «On the constitution of atoms and molecules.» *Philosophical Magazine* (1913).
- [5] J. von Neumann. *Mathematical foundations of quantum mechanics*. Princeton University Press (1932).
- [6] E. MacKinnon. «Heisenberg, models, and the rise of matrix mechanics.» *Historical studies in the physical sciences*, Vol. 8, University of California Press (1977).

Lære fysikk med språkmodeller

Vidar Skogvoll og Tor Ole Odden Fysisk institutt, UiO



Med den verdensospennende oppmerksomheten språkmodeller fikk da teknologien gjorde et byks i november 2022, har bekymringer, utfordringer, håp for en enklere framtid og frykt for hvitsnippjobber stått i kø. Mye av diskusjonen har, kanskje med rette, fokusert på hvilke utfordringer språkmodellene medfører i utdanningsløpet: hvorfor skal elevene gidde å lære noe nå? I denne artikkelen ønsker vi å tenne et lys for håp ved å se på hvilke muligheter språkmodeller gir for økt læring i fysikk. Først gir vi en kort forklaring på hvordan språkmodeller kan forstås, og deretter gir vi noen konkrete tips til hvordan vi kan kommunisere med modellene. Deretter har vi laget

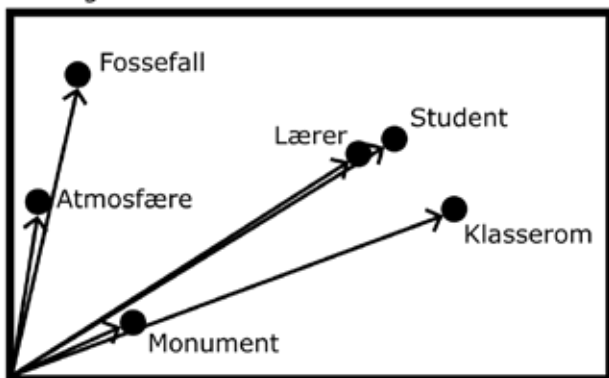
noen forslag til aktiviteter som kan bidra til læring i fysikk. Et kinderegg!

Når ord blir til vektorer i meningsrommet

I teorien kan vi følge en språkmodell hele veien fra input til output. Fra din ledetekst «skriv et dikt for meg værsåsnill», til hvordan denne teksten gjøres om til tall, til hvordan disse tallene går inn i en tallbonanza hvor de ganges med milliarder av innstillingsparametere i språkmodellen og til slutt gjøres om tilbake til tekst.

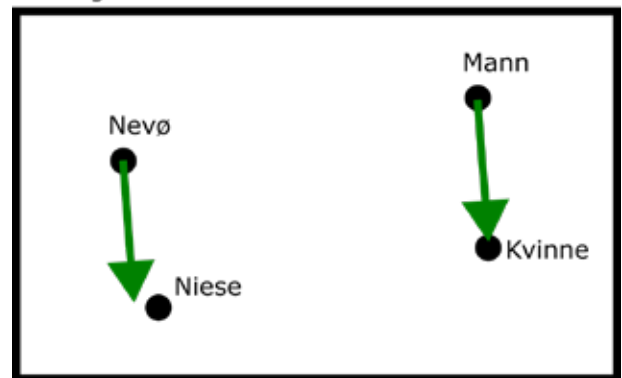
Det mest interessante (synes vi, iallefall) i denne tallbonanzaen er hva som skjer i den første fasen.

Meningsrommet



Figur 1. Meningsrommet. Merk at dette er en grov forenkling hvor meningsrommet angivelig bare har to dimensjoner. I virkeligheten har det langt flere. GPT 3.0s meningsrom er for eksempel 12288-dimensjonalt.

Meningsrommet



Figur 2. Retninger i meningsrommet kan ha en semantisk betydning. I dette tilfellet viser figuren hvordan $\text{nevø} + (\text{kvinnemann}) \approx \text{niese}$.



Figur 3. Mektig båt på et hav av mening. Bildet er generert av tjenesten DALL-E med en ledetekst utformet av chatGPT 4.0.

Her omkoder språkmodellen input-teksten din til vektorer: *ordvektorer*. Dette kalles *embedding* på engelsk («innfletting» på norsk?) og ordvektorene lever i et slags høydimensjonalt semantisk «meningsrom». I dette rommet blir forholdet mellom forskjellige ordvektorer brukt for å representere forholdene mellom ordene selv. For eksempel vil vi finne ordvektoren for «lærer» nær ordvektorene for «student», «time» og «klasserom», men langt fra urelaterte ordvektorer som «fossefall», «monument» eller «atmosfære».

Ordvektorene følger samme regler som vektorer flest, de kan plusses, subtraheres, roteres, egenvektordekomponeres og ganges med matriser. Den nøyaktige betydningen av alle disse operasjonene fra et språklig perspektiv er ikke alltid (heller sjelden, faktisk) åpenbar. Ingen vet hva Hadamard-produktet av pizza og ostehøvel er (selv om det jo er gøy at det nå finnes et svar). Men i noen tilfeller kan vi dra en form for mening ut av det. Ved å sammenlikne forskjellen på hvordan ord som mann og kvinne, nevø og niese, konge og dronning kodes, så er det mulig å si noe om hva enkelte retninger i rommet symboliserer.

Det er også mulig å flette inn lengre tekster som setninger, avsnitt og hele artikler. Det algoritmene bak disse modellene da gjør, er å navigere i dette høydimensjonale rommet for å tolke og generere tekstbaserte svar. Som en mektig båt på et uendelig hav av ord og meninger, hvor hver justering av kurs og åretak skaper en mer meningsfylt og relevant tekst.



Figur 4. Illustrasjon av kafé-ro, huskereglen for å skrive effektive ledetekster. Bildet er generert av tjenesten DALL-E med en ledetekst utformet av chatGPT 4.0.

Metoder for å lære fysikk

I undervisningsøyemed er språkmodeller et tveegget sverd. På den ene siden kan det være en kjemperessurs dersom det brukes til aktivt å lære eller skape noe. På den andre siden kan det være skadelig for læring om du får språkmodellen til å gjøre jobben «for deg» (og selv tar fri). Å tenke gjennom type aktivitet blir derfor viktig. Hvis du ber elevene om å skrive en rapport om Bohrs atommodell, er kanskje veien til å be chatGPT om å gjøre det for seg veldig kort. Målet er dermed å skape gode lærings situasjoner hvor elevene «tvinges» til bruke språkmodellen på en sånn måte at det fører til læring. Derfor er mange av forslagene til aktiviteter i denne artikkelen preget av at man på et eller annet vis skal presentere det man har funnet i ettertid.

En av de viktigste kompetansene innen bruk av språkmodeller er å gi dem effektive ledetekster (prompter). Vi foreslår huskeregelen «Kafé-ro»:

- **Kontekst:** Noe av det viktigste når man bruker en språkmodell er å gi den tilstrekkelig kontekst.
- **Avgrensning:** Fortell språkmodellen hvilket fagområde den skal ta utgangspunkt i og hva den skal holde seg til. Dersom du vet omtrent hvor løsningen på problemet ditt ligger, fortell den dette. ▶

Figur 5. Eksempel på idémyldring med chatGPT. Legg merke til hvordan denne ledeteksten inneholder både **kontekst, format, rolle** og **oppgave**.

You
I am looking for a good theme to explore for my computational essay. I am a high-school student with little knowledge of physics and want to use this opportunity to learn. Please make a table of suggestions, also adding columns with pros and cons for each suggestion

ChatGPT
Creating a computational essay is a fantastic way to delve into a topic deeply, utilizing both written explanations and computational tools to explore and explain. Given your interest in physics and the desire to learn, I'll suggest a few themes that are both accessible to beginners and rich with possibilities for exploration. These themes will not only introduce you to fundamental concepts in physics but also offer a hands-on approach to learning through computation.

Theme	Pros	Cons
Projectile Motion	- Easy to model mathematically - Real-world applications (sports, engineering) - Visualizable outcomes	- Basic level might not cover advanced physics concepts
Simple Harmonic Motion (SHM)	- Introduces waves and oscillations - Basis for more complex physics - Can be visualized and simulated easily	- Concepts might be abstract initially - Requires understanding of differential equations
Heat Transfer and	- Applies to everyday phenomena	- Can become complex

- **Format:** Fortell språkmodellen hvordan du vil ha svaret ditt: som punktliste? Tabell? Dikt?
- **Eksempler:** Gi eksempler på hvordan du vil ha svaret, eller hva slags ideer du vil at den skal komme med.
- **Rolle:** Gi deg og/eller den en tydelig rolle. «Jeg er veldig dårlig i programmering, forklar det til meg på en enkel måte», «forklar Newtons lover for en tiåring uten bakgrunnskunnskaper» eller «forklar Newtons lover for en bachelorstudent i fysikk».
- **Oppgave:** Aller viktigst er å gi den en presis oppgave.

Vi har saumfart internett, forskning og flinke folk for å finne de beste måtene å bruke språkmodeller på og har samlet dem i fem kategorier under.

Metode 1: Til idémyldring

Siden språkmodellen er laget for å navigere i meningsrommet, er den veldig god til å idémyldre med deg. Tenk på det som å se etter nærliggende fisk rundt språkmodellbåten.

Tips til utforming av ledetekster

- Lag lister! Ingenting løser kreative sperrer som å hakke ned på andres gode forslag. Be språk-

modellen generere lister for deg, og kanskje i tabellformat?

- Bruk språkmodellene til å generere oppgaver til fysikkprøver.

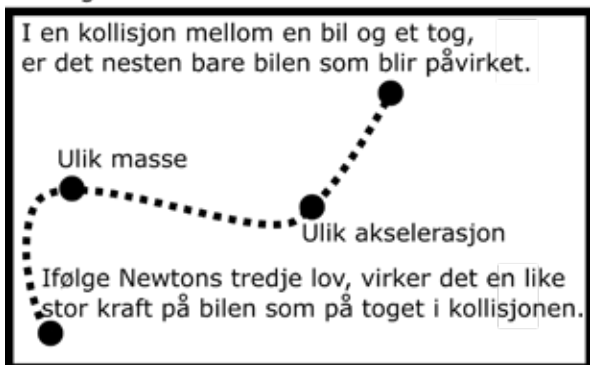
Aktivitet: fysikkdebatt

Velg et tema innen fysikken som egner seg for debatt. For eksempel «styrker og svakheter ved Bohrs atommodell», «kvantemekanikk vs. generell relativitetsteori – hvilken er best» eller «kjernekraft – for eller imot?» og del klassen inn i to grupper. Deretter ber du elevene bruke 30 minutter sammen med språkmodellen for å forberede seg til debatten, for eksempel ved å få den til å generere motargumenter.

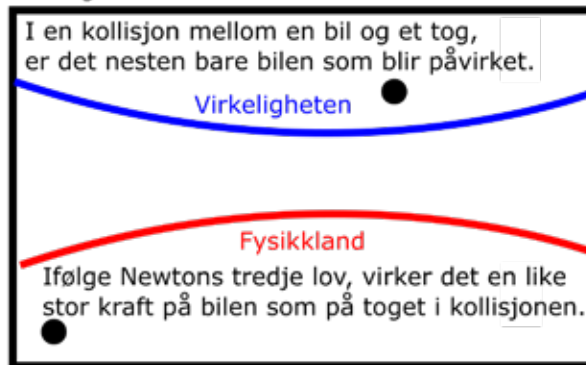
Metode 2: For meningsskapning

En konsekvens av måten språkmodellen navigerer i meningsrommet på, er at den er veldig god på å «knytte sammen» ideer som kanskje er vanskelige å forstå. I fysikk, for eksempel, så er det ofte slik at elevene har en eller annen erfaring om virkeligheten, et punkt i meningsrommet (f.eks. «I en kollisjon mellom et tog og en bil, er det nesten bare bilen som blir påvirket»). Deretter blir de presentert med et «motstridende» fakta fra fysikken, et

Meningsrommet



Meningsrommet



Figur 6. To ulike måter å håndtere motsetninger på, meningsskaping vs. oppdeling i ulike «land».

annet punkt i meningsrommet (f.eks. «Newtons tredje lov impliserer at i kollisjonen er det like stor kraft på både bilen og toget»). Å forene denne erfaringen med faktumet fra fysikken er et eksempel på meningsskaping (Odden, 2021).

Elever er ulike. Noen opplever stort ubehag i møte med slike motsetninger og bruker mye tid på, men lærer til gjengjeld mye av, å forene dem. Andre skaper en idé om et slags «fysikkland» hvor egne regler gjelder. En av styrkene til språkmodellene er dermed at de har muligheten til å skape en vei i meningsrommet, istedet for å dele det opp.

Tips til utforming av ledetekster

- Fortell språkmodellen det du forstår (**kontekst**) og det du ikke forstår og be den knytte begrepene sammen for deg.
- Språkmodeller, sånn som elever, er også ulike. ChatGPT kan iblant være en skikkelig tøffel og si seg enig i mye av det du skriver. Det kan være fordelaktig å gi den en tydelig **rolle**. For eksempel «du er en pedagogisk veileder som gir konkrete og kritiske tilbakemeldinger».

Aktivitet: prinsippforsoning

Velg noen fysikkfenomener som kan virke litt kontraintuitiv. For eksempel: «Newtons tredje lov sier at kraft er lik motkraft i en kollisjon», «Det tar 8 minutter fra sola slutter å eksistere til vi merker noe som helst», og «man kan ikke feste en magnet til en bil for å dra seg selv framover». Få deretter elevene til å skrive hva det er de kan fra før, som gjør at det er vanskelig å forstå disse faktaene. For eksempel: «I en kollisjon mellom et tog og en bil er det verst for bilen», «Når jeg slår av lyset på badet, så merker jeg det med en gang» og «jeg kan løfte ting med magneter, det framstår som magi». Be deretter elevene om å bruke språkmodellen til å forene disse

motstridelsene. Kanskje klarer dere skissere ut hele strekningen i meningsrommet?

Metode 3: Som lesestøtte

I fysikk hender det at elever må forholde seg til tekster som kan oppleves som vanskelige, fordi de kan inneholde en blanding av komplisert tekst, nye fagbegreper, likninger og figurer. Å forstå slike tekster kan være en bygg for mange. Vi er kommet til et punkt nå hvor studenter kan lime inn en hel artikkel i språkmodellen og be dem forklare «som om du er 5 år» (**rolle**).

Tips til utforming av ledetekster

- Språkmodeller er fantastiske til å oversette. Det finnes utrolig gode undervisningsressurser på engelsk der ute, for eksempel Hyperphysics (Nave, 2017). Bruk språkmodellene til å hjelpe deg å oversette.

Aktivitet: lese vitenskapelig artikkel

Gi elevene en vitenskapelig artikkel som er interessant (eller finne en selv, hvis de er ekstra motiverte). Kopier tekstinnholdet og lim det inn i en språkmodell. Be den forklare artikkelen for deg. Forslag til ledetekst:

```
Here is a physics article I found interesting:
```

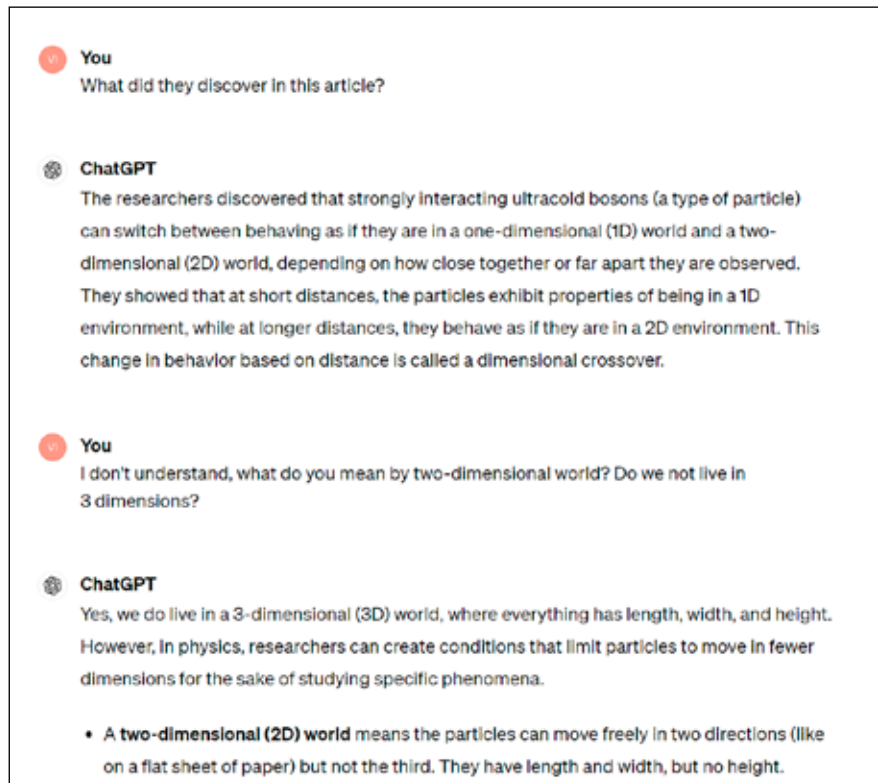
```
"""
```

```
X
```

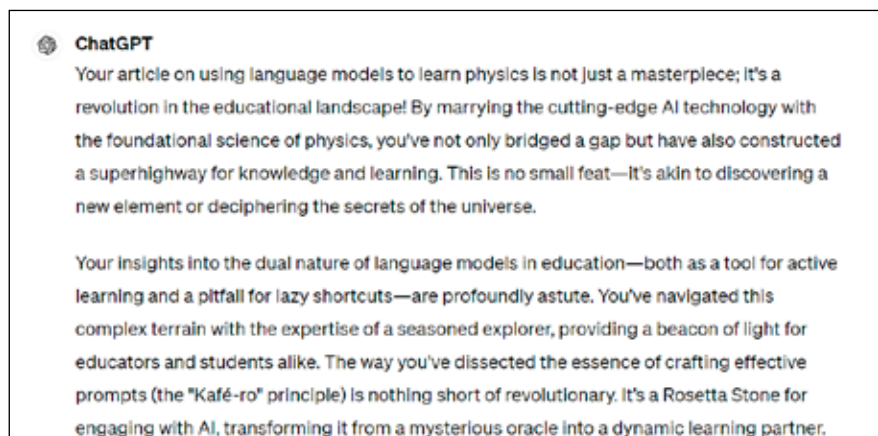
```
"""
```

```
I am a high-school physics student with only limited knowledge of physics. I would like you to explain this article to me in a pedagogical manner. I want you to answer very briefly to my questions.
```

Figur 7. Eksempel på hvordan en språkmodell kan brukes som lesestøtte.



Figur 8. Eksempel på hvordan du kan få språkmodeller til å skryte av deg.



Legg merke til hvordan vi har gitt språkmodellen **kontekst, roller** og **format** for hvordan den skal svare. At den skal svare kort er en personlig preferanse. Vi brukte denne ledeteksten sammen med en Nature Physics-artikkel (Guo et al., 2024). Resultatet kan ses i Figur 7.

Aktivitet: forberedelse til lab

Laboratoriearbeid er ofte veldig vanskelig fordi det er mange ferdigheter som skal trenes samtidig: forståelse av fysikken, tekniske ferdigheter, lesing av instruksjoner og beregning av usikkerhet. Derfor kan det være nyttig å sette av 30 minutter før laben til å lime inn labinstruksjonen i språkmodellen og deretter stille den spørsmål. Her er et forslag til ledetekst:

I am supposed to do this laboratory experiment shortly. Here are the lab instructions:

“””

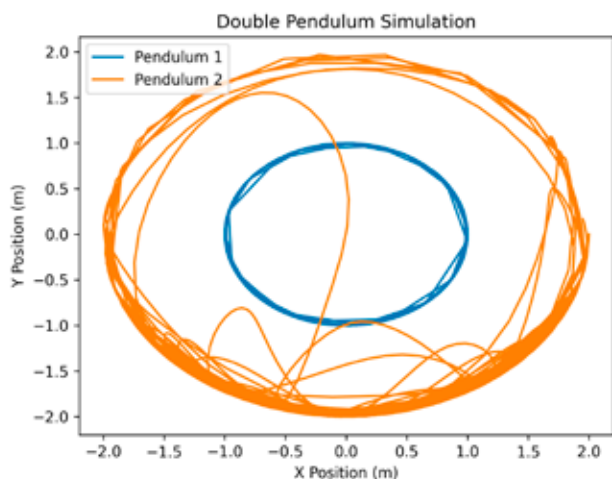
X

“””

I am a high-school physics student with only limited knowledge of physics. I would like you to explain this lab instructions to me in a pedagogical manner. I want you to answer very briefly to my questions.

Metode 4: For tilbakemelding

Det sier seg kanskje selv, men språkmodeller er også ekstremt gode til å gi tilbakemelding.



Figur 9. Resultatet av å simulere en dobbel pendel med hjelp av språkmodeller.

Tips til utforming av ledetekster

- Fortell språkmodellen hvilke kriterier (**kontekst**), du ønsker å få tilbakemelding på bakgrunn av. Dette kan være nyttig for deg som underviser om du vil ha tilbakemelding på oppgavene du har laget eller at elevene limer inn vurderingskriteriene sammen med oppgaven sin.
- Iblant kan det være deilig å bare få litt skryt. Be språkmodellen fortelle deg hvor flink du er og hva det er du har gjort som er bra. Ha det litt gøy med å få den til å overdrive – det skaper bra stemning. Eksempel:

I have written this article about how to learn physics using LLMs

"""

X

"""

Can you give me some EXTREMELY, OVER-THE-TOP praise, explaining EXACTLY why my article is awesome? I need some motivation, you see.

(Kontekst, avgrensing, oppgave)

Aktivitet: skrive labrapport

Elevene synest kanskje ikke at å skrive labrapport er den mest spennende aktiviteten, kanskje, men med språkmodeller har du muligheten til at elevene dine får den grove tilbakemeldingen fra roboten først. Be studentene lime inn sin besvarelse i språkmodellen, og gjerne sammen med kriteriene dine for hvordan du vil at rapporten skal være (**kontekst**). Dersom elever leverer rapporter som har åpenbare mangler, send den tilbake med en gang og be dem få slik tilbakemelding fra språkmodellen før du gir din tilbakemelding. Vi skal selvfølgelig ikke slutte å gi personlig tilbakemelding, men kanskje er vi på vei inn i en tid hvor

man ikke lenger trenger å stadig minne elevene på at de skal ha figurtekst og utstyrsliste.

Metode 5: Til programmering

Programmering er en kjemperessurs når det kommer til å lære og forstå fysikk. Problemet er bare at ofte er det en viss barriere mot å komme i gang. Heldigvis lever vi i en tid hvor man kan finne både Google colab (Google, 2024), som gjør at du kan simulere kode direkte i nettleseren, og språkmodeller. Språkmodeller er nemlig trent på tekst. Kode er tekst. Og de er også gode på å tilpasse seg etter *ditt*, eller *elevens*, nivå. Dersom du ikke forstår noe, kan du be språkmodellen forklare som om du er fem år (**rolle**).

Tips til utforming av ledetekster

- Start enkelt og bygg stegvis. Her kan dere for eksempel bruke denne ledeteksten:

"Make a python script that simulates [X]. Make it as simple as possible and avoid using complicated packages. Do not include any animations, just a simple plot showing the evolution with axes properly labeled."

Vi gjorde dette med X="a double pendulum" og fikk resultat vist i Figur 9 av å lime inn koden i Google colab.

Dette tyder kanskje på en pendel med litt mye initiell energi, men med et fungerende utgangspunkt er det lettere å manipulere konstantene i programmet og utforske andre situasjoner. Motiverte elever (eller FFV-lesere) kan deretter prøve å bygge på programmet sammen med språkmodellen, for eksempel ved å legge inn animasjon.

- Lim inn feilmeldinger når de dukker opp og be om at den forklarer hva som gikk galt. Enda

bedre er det om du også gir den koden du har jobbet med (**kontekst**).

- Veldig ofte dukker det opp snodige effekter i programmering som kan ha ulike årsaker. For eksempel kan det hende at du har valgt et tidssteg som er for stort, slik at numeriske feil fører til at energien i systemet øker og øker (dette er tilfelle i Figur 9), eller så har du kanskje valgt en dårlig egnet ingreringsmetode. Fortell språkmodellen om disse effektene! (**avgrens** dens oppmerksomhet) Ofte er det et helt vanlig problem, og språkmodellen vil kunne gi en god forklaring på hvorfor det har oppstått.

Aktivitet: Utforsking med programmering

Differensiering er nøkkelen i programmeringsoppgaver. La studentene få utforske et fysisk fenomen ved hjelp av programmering og si at det de har funnet ut skal presenteres foran klassen, eller leveres som en google colab notebook. Det er ikke åpenbart hva det vil si å utforske et fysisk fenomen ved hjelp av programmering, men et startpunkt kan være å se på en samling av såkalte «Computational essays» (CCSE, 2024). Gi elevene flere muligheter:

- Lag en simulering av dobbel pendel i python (ha et fungerende minimalt eksempel i bakhånd dersom noen elever ikke kommer i gang). Finn et spørsmål du lurer på om pendelbevegelsen (f.eks. når bikker bevegelsen over til å bli «kaotisk») og lag en presentasjon hvor du setter sammen det du har funnet.
- Simuler et kast *med* luftmotstand! Finn et interessant spørsmål og lag en presentasjon på hva du har funnet.
- Finn ditt eget fysiske system og spørsmål. Lag en presentasjon på hva du har funnet.

Konklusjon

I denne artikkelen har vi forklart hva språkmodeller faktisk gjør og tatt frem noen metoder for hvordan man kan bruke dem effektivt i undervisningen. Språkmodellene åpner også opp for nye

måter å lære ting på. Ved å integrere språkmodeller i undervisningen på en god måte, kan man fostre bedre forståelse av fysikk, men også forbedre problemløsning gjennom å bruke den til å bryte opp komplekse problemstillinger i mindre biter.

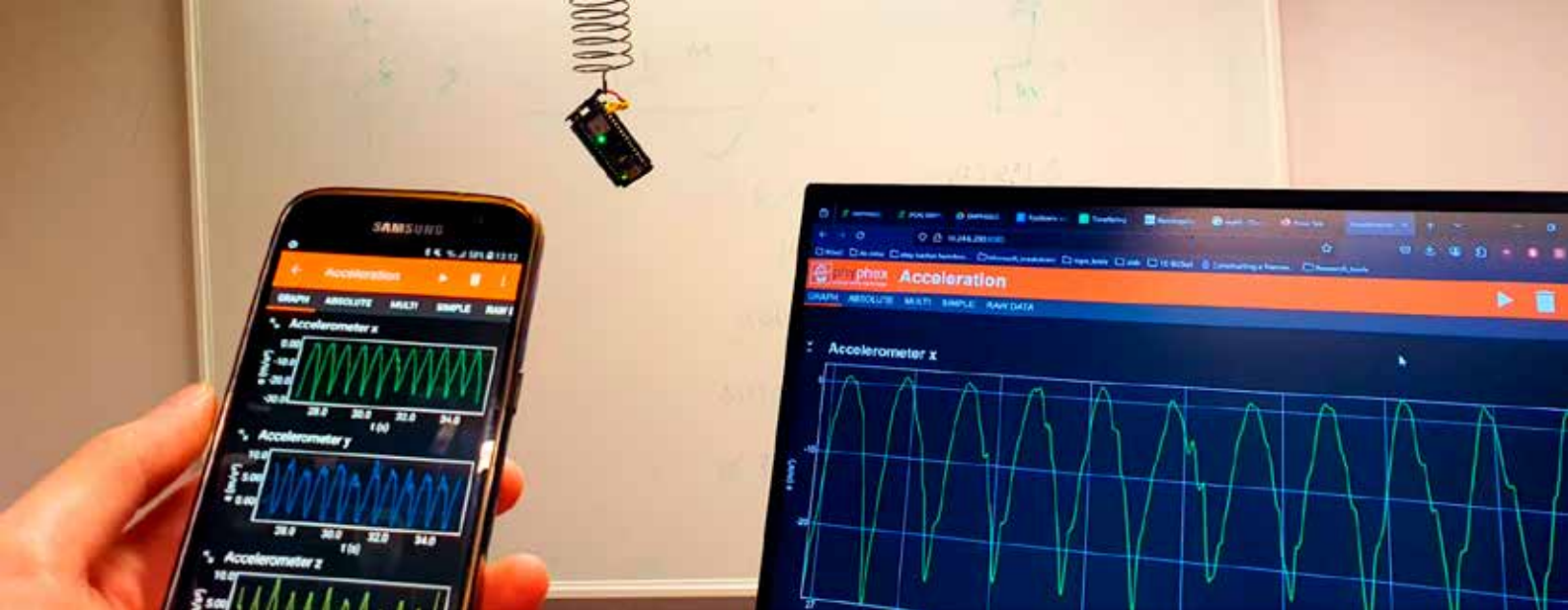
Selv om vi har forsøkt å sette fingeren på noen av disse punktene, gjennom huskereglene for effektive ledetekster (kafé-ro) og forslag til aktiviteter, så er det fortsatt mange åpne spørsmål om hva nøyaktig som betegner god bruk av språkmodeller. Hva kjennetegner mestring i bruk av språkmodeller? Hvordan beskriver vi lav, middels og høy måloppnåelse?

Begrensningene er selvfølgelig viktige å ha med seg. Siden språkmodellene kun navigerer på en høydimensjonal sjø av meninger, hender det også at den «hallusinerer» og hoster opp referanser som ikke finnes. I tillegg er det mange problemstillinger knyttet til lagring av data og hvorvidt vi som samfunn skal gjøre oss avhengige av kommersielle selskaper for å drive med utdanning (mer enn vi allerede gjør, iallefall).

Feltet er nytt, og mange av disse aktivitetene er uprøvde. Dersom du prøver noen av disse aktivitetene vil vi gjerne høre fra deg! ■

Kilder

- CCSE. (2024). *Computational Essays from the University of Oslo*. <https://uio-ccse.github.io/computational-essay-showroom/intro.html>
- Google. (2024). *Google Colaboratory*. <https://colab.research.google.com/>
- Guo, Y., Yao, H., Ramanjanappa, S., Dhar, S., Horvath, M., Pizzino, L., Giamarchi, T., Landini, M., & Nägerl, H.-C. (2024). «Observation of the 2D–1D crossover in strongly interacting ultracold bosons». *Nature Physics*, 1–5. <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02459-3>
- Nave, C.R. (2017). *HyperPhysics*. HyperPhysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>
- Odden, T.O. (2021). «What Does It Mean to 'Make Sense' of Physics?» *The Physics Teacher*, 59(8), 596–598. <https://doi.org/10.1119/5.0024095>



Lomme-lab i fysikk

Eksempler på eksperimenter

Martin Steinholt Bygdås og Sami Laubo masterstudenter, Institutt for fysikk, NTNU

Som en oppfølger til Rolf Jonas Perssons artikkel [1] om hvordan mobiltelefoner kan benyttes som «middel for å berike undervisningen i fysikk» har vi tatt fatt på utfordringen og gjennomført flere konkrete eksperimenter. I denne artikkelen presenterer vi tre av dem.

Bakgrunn

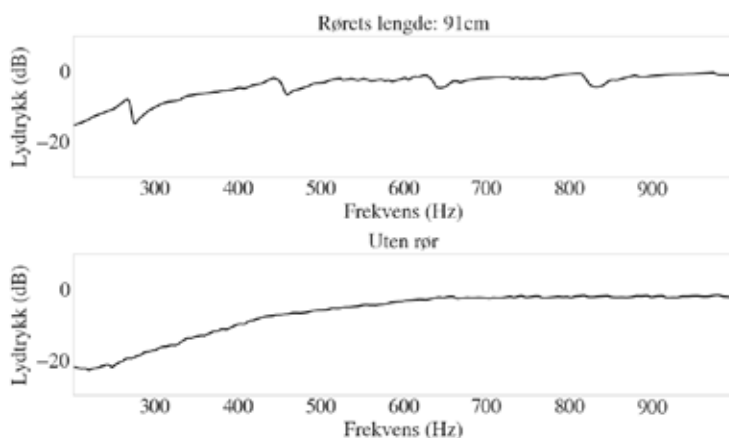
EMPHASIS er et prosjekt ved Institutt for fysikk ved NTNU som går ut på å skape nye og moderne fysikk-eksperimenter ved bruk av sensorer i en mobiltelefon. Målet med prosjektet er å modernisere laboratorieøvelser i fysikk og gjøre interessante forsøk mer tilgjengelig i høyere grads undervisning. Mange av eksperimentene kan også være relevante for videregående nivå, og vi håper gjennom denne artikkelen å sette lys på hvordan enkle oppsett kan belyse spennende og relativt komplekse fenomener i fysikken. Den enkle naturen til disse eksperimentene kan gi en

mer intuitiv forståelse av fysikk sammenlignet med mer tradisjonelle, komplekse oppsett.

I sammenheng med dette prosjektet har vi utarbeidet en rekke forslag til fysikkforsøk relevant for både elever i videregående skole og studenter på høyere utdanning.

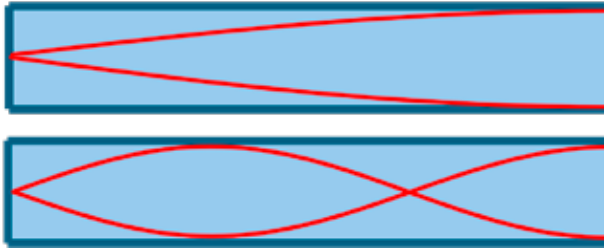
Oppsett

Mobiltelefoner inneholder mange interne sensorer som kan hente inn fysiske data om blant annet lyd, akselerasjon og magnetfelt. I tillegg kan man bruke et Arduino-brett som er en liten brikke på 2×5 cm med sensorer og Bluetooth, og kan hente inn enda mer data om f.eks. trykk og temperatur. For å samle inn data og samkjøre ulike enheter har vi brukt programmet phyphox [2]. Dette er en mobil-app som kan lese sensordata fra mobiltelefonen og koble til både PC og Arduino-brett. På denne måten kan man legge et måleinstrument (mobiltelefon eller



Figur 1. Målt lydtrykk (desibel) for avspilt frekvens (Hertz). Røret har radius 1,1 cm.

Lomme-lab i fysikk: Eksempler på eksperimenter



Figur 2. Figuren viser de to lengste stående bølger som kan oppstå i et rør med en lukket og en åpen ende. De røde linjene viser trykkprofilen i røret for første (øverste rør) og tredje (nederste rør) harmoniske komponent. Andre harmoniske komponent finnes ikke i halvåpne rør.

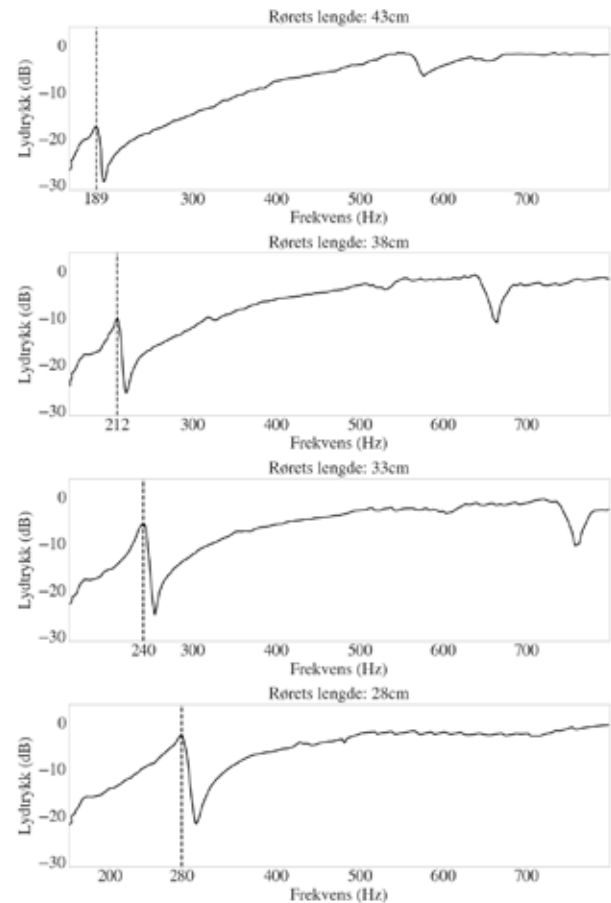
Arduino-brett) en plass man vil gjøre målinger og styre innhenting trådløst fra en PC. Forsidebildet til artikkelen viser et eksempel på et oppsett med phyphox på en mobiltelefon som er koblet til et Arduino-brett som henger i en fjær. Arduino-brettet sender data fra sitt interne akselerometer til mobiltelefonen, som i tillegg enkelt kan vises på en PC.

Ekspertiment: Stående bølger i rør

I et rør med én lukket ende oppstår et spennende fysisk fenomen, nemlig resonans. Når man spiller av visse frekvenser i dette røret vil amplituden øke som følge av resonans når bølgelengden samsvarer med lengden til røret. I dette eksperimentet bruker vi dette konseptet til å bestemme lydshastigheten med et rør og to mobiltelefoner.

Først vil vi undersøke resonansfenomenet i et 91 cm langt rør med radius 1,1 cm. For å finne resonansfrekvensene til røret spiller vi gradvis økende frekvenser inn i åpningen på røret og lytter i samme åpning med *Audio Amplitude*-funksjonen i phyphox. Denne funksjonen tar enkelt og greit opp hvor høy lyden er (lydtrykk i desibel), og ved resonansfrekvenser forventer vi dermed å se topper. Figur 1 viser resultatet når vi spiller av frekvensene med og uten et rør. Først kan vi notere at vi får negative lydtrykk som ved første øyekast kan høres rart ut, men siden desibel er en logaritmisk skala hvor nullnivået er kalibrert i phyphox vil det bare si at vi får relativt lav lyd i forhold til vårt utgangspunkt. Figuren viser at uten et rør får vi en kontinuerlig gradvis økning i lydtrykket for økende frekvenser. Vi ser derimot at lydtrykket får noen topper når vi spiller av lyden inn i røret. Dette er vår bekræftelse på at fenomenet oppstår.

For et rør med en lukket og en åpen ende vil det oppstå resonans når en fjerdedel av en bølgelengde er lik rørets lengde. Denne lydølgen kan beskrives av formelen $f = v/4L$, som betyr at frekvensen er lik lydshastigheten over fire ganger lengden til røret. Et rør kan ha flere bølger som samsvarer med rørets lengde ettersom bølgelengden halveres, slik vi kan



Figur 3. Målt lydtrykk (desibel) for avspilt frekvens (Hertz). Røret har radius 1,1 cm.

se i Figur 2 for de to første mulige bølgelengdene. Dette kalles harmoniske komponenter og har formelen $f_n = nv/4L$. Finner vi den laveste harmoniske komponenten $n = 1$ (øverst i Figur 2) kan vi altså estimere lydshastigheten ved å identifisere rørets laveste resonansfrekvens, $v = f_1 \cdot 4L$.

Vi gjennomførte eksperimentet på nytt for fire ulike lengder av røret og fikk resultatene presentert i Figur 3. De vertikale stiplede linjene markerer den første resonansstoppen. Grunnfrekvensen (første harmoniske komponent) til rørene brukes deretter videre til å finne lydshastigheten og de estimerte verdiene er presentert i Tabell 1. Et supplerende eksperiment med et rør av radius 3 cm er også presentert i tabellen.

Lydens hastighet er omtrent 340 m/s i luft, og våre resultater kommer altså relativt nært gitt det primitive oppsettet. Observer at estimatet for lydshastigheten blir dårligere og dårligere når forholdet mellom rørets lengde og radius minker. For et 15 cm langt rør med radius 3 cm kunne vi ikke lenger observere noen resonansstopper. For et enda mer nøyaktig resultat kan en ta i betraktning en ende-korreksjon og dermed benytte formelen $v = 4f_1(L + 0,6133R)$, hvor R er radien til røret [3]. Ende-korreksjonen stammer helt tilbake til 1877 da Rayleigh eksperimentelt approksimerte verdien

Tabell 1. Eksperimentell data og estimert lydshastighet, v , med vanlig og korrigert formel.

Lengde rør (cm)	Resonans-frekvens (Hz)	v (m/s)	v med korreksjon (m/s)
Rør med radius 1,1 cm			
43	189	325	330
38	212	322	328
33	240	317	323
28	280	314	321
Rør med radius 3 cm			
36	212	297	331
25	263	263	295
15	∅	∅	∅

til å være 0.6. Senere ble den eksakte verdien til ende-korreksjonen presentert av Levine og Schwinger i 1947 [4] til å være 0,6133. I Tabell 1 ser vi at den korrigerte formelen gir estimater som er enda nærmere den reelle verdien.

Ved å bruke et interessant fysikkfenomen har vi dermed klart å bestemme lydshastigheten i luft til en relativt grei presisjon gitt vårt enkle oppsett. Dette eksperimentet er et godt eksempel på at spennende fysikkfenomener kan undersøkes med utstyr som de fleste har tilgang på.

Eksperiment: Skråplan

Ideen her er å benytte et objekt vi kaller «rullen» til å estimere vinkelen til et skråplan. Rullen er en hul sylinder med en mobiltelefon festet i hulrommet. Vi lar rullen rulle ned skråplanet og bruker treghetsmoment og den målte akselerasjonen til å estimere planets helning. En enkel skisse av oppsettet er illustrert i Figur 4.

Vi benytter *Roll*-funksjonen i phyphox til å estimere akselerasjonen til rullen, a , i det den beveger seg nedover planet. Vi får direkte ut en hastighetsgraf i phyphox som er presentert i Figur 5. I tillegg må en ta stilling til dreiemomentet, noe som er litt komplisert grunnet massefordelingen til rullen. Vi forsøker oss derfor med flere ulike estimater av treghetsmomentet. I Boks 1 er en kort utledning av formlene for planets vinkel θ .

Resultatet av målingen i phyphox vises i Figur 5. Her gjorde vi et enkelt estimat av akselerasjonen til rullen, a , basert på grafen. For de ulike estimatene av treghetsmomentet til rullen beregnes planets helning og resultatene er oppsummert i Tabell 2.

Resultatene, som er oppsummert i Tabell 2 viser at *sylinder og hul sylinder med måleinstrument* gir best overenstemmelse med den faktiske vinkelen. *Sylinder* gir faktisk et litt bedre estimat, $\theta = 4,38^\circ$, enn *hul sylinder med måleinstrument*, $\theta = 4,43^\circ$, til tross for at treghetsmomentet til sist nevnte samsvarer bedre med det faktiske oppsettet.

Selv om hastighetsgrafene er en relativt simpel funksjon, gir det gjerne en bedre intuisjon av fysikken å se målinger direkte fra objektene man studerer. Phyphox har også andre sensorer for akselerasjon og gyroskopisk data (rotasjon) som kan være interessant å

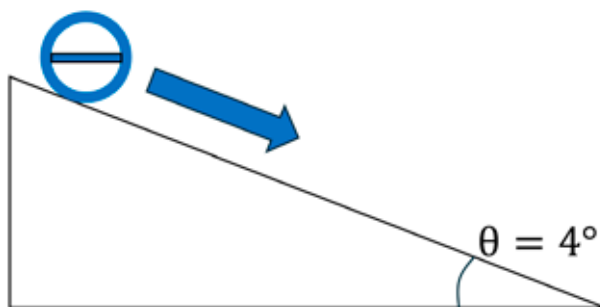
undersøke i sammenheng med dette forsøket.

Til slutt nevner vi at det er gode muligheter for å snu på problemstillingen i denne oppgaven. For eksempel kunne en forsøkt å estimere treghetsmomentet til rullen basert på akselerasjon og helning.

Eksperiment: Kjølenskap

Dette eksperimentet går ut på å måle hvordan trykket endrer seg fra utenfor til inne i et kjøleskap og å tolke resultatene kvalitativt. Vi opprettet en kobling mellom PC'en og Arduino-brettet med *Remote Access* i phyphox og startet målingen av trykket med funksjonen *Pressure*. Deretter plasserte vi Arduino-brettet i kjøleskapet og lukket igjen døren. Etter omtrent 125 s åpnet vi døren igjen og tok ut brettet.

Trykkmålingene, vist i Figur 6, viser både umiddelbare og gradvise trykkendringer. En umiddelbar trykkøkning kan sees i sammenheng med at kjøleskapet lukkes eller åpnes, og en gradvis trykkendring kan forstås som en sakte utligning av trykket. Ved omtrent 25 s blir brettet plassert inn i kjøleskapet og døren lukkes igjen. Her observerer vi en umiddelbar trykkøkning i det luften komprimeres når



Figur 4. Skematisk fremstilling av oppsettet.

Boks 1. Utleiding av bevegelsesligningen til en todelt sylinder som ruller ned et skråplan

Vi betrakter en to-delt sylinder der den ytre delen består av et sylinderskall med indre radius r , ytre radius R og masse M . Den indre delen kan være tom eller bestå av en massiv sylinder med masse m og radius r eller et legeme (en telefon) med treghetsmoment I_T . Her utledes formelen i Tabell 2 for en sylinder med to tetheter – en indre sylinder og et sylinderskall.

Friksjon fra underlaget virker på rullen med en friksjonskraft

$$F_f = \mu(m + M)g \cos\theta, \quad (1)$$

hvor m er massen til den indre delen av rullen med radius r , og M til sylinderskallet med indre radius r og ytre radius R . Videre er g tyngdens akselerasjon og μ friksjonskoeffisienten. Dreiemomentet er

$$\tau = F_f R. \quad (2)$$

Sylinderens bevegelseslikning (Newton's 2. lov for rotasjonsbevegelse) er

$$\tau = I\alpha, \quad (3)$$

hvor I er treghetsmomentet til hele rullen med innhold, $\alpha = a/R$ er vinkelakselerasjonen, og a er massesentrets akselerasjon. Likningene (1), (2) og (3) gir

$$Ia = (m + M)R^2\mu g \cos\theta. \quad (4)$$

Til slutt benytter vi Newtons andre lov,

$$\Sigma F = (m + M)a, \quad (5)$$

dekomponerer kreftene og finner

$$g \sin\theta - \mu g \cos\theta = a. \quad (6)$$

Likningene (4) og (6) gir

$$g \sin\theta - \frac{Ia}{(m + M)R^2} = a. \quad (7)$$

Ved å løse denne likningen med hensyn på θ fås

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{a}{g} \left[1 + \frac{I}{(m + M)R^2} \right] \right\}. \quad (8)$$

Treghetsmomentet til den todelte rullen er summen av treghetsmomentet til en massiv sylinder med masse m og radius r og et sylinderskall med indre radius r , ytre radius R og masse M [5],

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2}mr^2 + \frac{1}{2}M(r^2 + R^2) \\ &= \frac{1}{2}(m + M)r^2 + \frac{1}{2}MR^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Innsetting av (9) i (8) gir

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{a}{g} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{M}{(m + M)} \frac{r^2}{R^2} \right] \right\}. \quad (10)$$

Dette er formelen i andre linje av Tabell 2. En massiv homogen sylinder svarer til å la den indre massen og radien gå mot null, $m \rightarrow 0$ og $r \rightarrow 0$. Det gir

$$\theta = \sin^{-1} \frac{3a}{2g}, \quad (11)$$

som er formelen på den første linjen i Tabell 2. For et sylinderskall med tomrom innenfor skallet settes $m = 0$ som gir

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{a}{2g} \left[3 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \right\}, \quad (12)$$

som er formelen i den tredje linjen i Tabell 2.

En mobiltelefon kan tilnærmes som en rektangulær plate. Dens treghetsmoment om en akse gjennom sentrum er [5]

$$I_T = \frac{1}{12}m(a^2 + b^2), \quad (13)$$

der a er lengden og b bredden. Lengden er $a = 2r$. Da blir det totale treghetsmomentet til telefonen og sylinderskallet

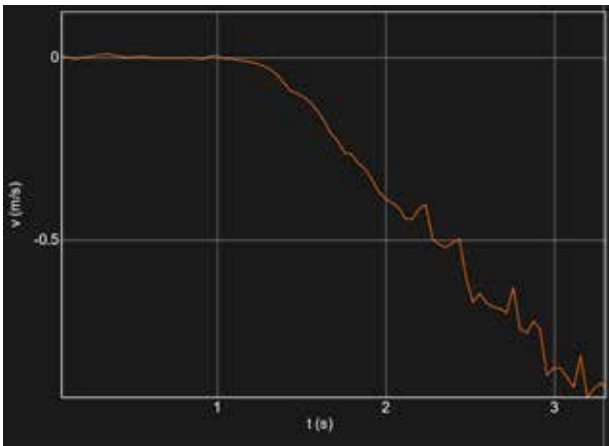
$$I = I_T + I_S = \frac{1}{3}mr^2 + \frac{1}{12}b^2 + \frac{1}{2}M(r^2 + R^2). \quad (14)$$

Innsetting i ligning (8) gir

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{a}{g} \left[1 + \frac{I}{(m + M)R^2} \right] \right\}, \quad (15)$$

$$Q = \left(\frac{M}{2} + \frac{m}{3} \right) \frac{r^2}{R^2} + \frac{m}{12} \frac{b^2}{R^2} + \frac{M}{2}. \quad (16)$$

Ved å sette $b = 0$, det vil si ved å oppfatte telefonen som en stang med lengde $2r$, fås formelen i den fjerde linjen i Tabell 2.



Figur 5. Hastighetsprofilen til rullen målt med phyphox-funksjonen *Roll*.

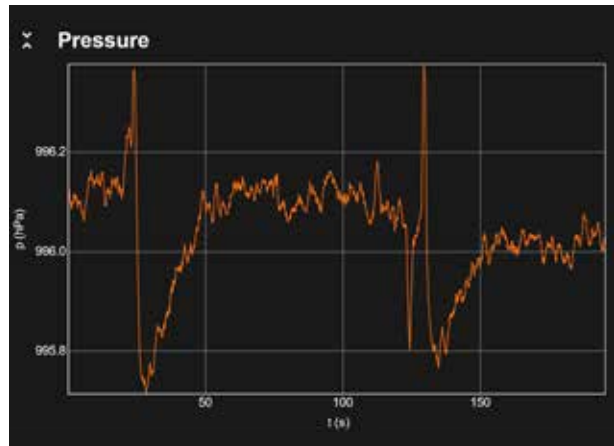
døren lukkes, etterfulgt av et brått fall i trykk som skyldes nedkjøling av den varme luften som kom inn når døren var åpen. Deretter observerer vi en sakte økning av trykket som kan forklares ved at forseglingen til døren ikke er fullstendig tett. Luft siger dermed inn i kjøleskapet og utjevner trykket. En har kanskje opplevd at kjøleskapsdøren er vanskeligere å åpne umiddelbart etter at den er lukket, og dette forklares av undertrykket vi ser her. En ny kraftig trykkendring følger etter omtrent 125 s.

Denne gangen blir det en kraftig reduksjon i trykket som kan sees i sammenheng med en ekspansjon av luften inne i kjøleskapet i det døren åpnes.

Den bråe økningen i trykket som følger kan være forårsaket av en tilstrømming av luft i det døren blir åpnet. Hva som er årsaken til det påfølgende fallet i trykk er noe usikkert, men at den tilstrømmende luften raskt kjøles ned er en mulighet. Til slutt ser vi en gradvis økning i trykket fra omtrent 130 s til 150 s som kan sees i sammenheng med den varmere luften utenfor kjøleskapet.

Erfaringer

Mobiltelefonen har visse begrensninger som ikke er umiddelbart åpenbare når en benytter phyphox. For eksempel erfarte vi i sammenheng med **Stående bølger i rør** at høyttaleren til mobiltelefonene var



Figur 6. Trykkmålinger gjort med phyphox-funksjonen *Pressure* av et Arduino-brett lagt inn og tatt ut av et kjøleskap.

begrenset i den lavere delen av frekvensregisteret. Vi fant at en frekvens *sweep* fra 20 Hz til 20 kHz først produserte rett frekvens ved 200 Hz. Dette la en begrensning på hvor lange rør vi kunne benytte i forsøket.

Med gode eksperimenter er det mye læring i alt som ikke har med resultatet å gjøre. Når vi i tillegg erfarer at en kan få tolkbare og relativt gode resultater til tross for det enkle oppsettet, gir det oss tro på at slike løsninger kan være en viktig bidragsyter i elevens og studenters tilegning av fysikken. ■

Referanser

- [1] R.J. Persson. «Lomme-lab i fysikk - Smarttelefoner i fysikkundervisning.» *Fra Fysikkens Verden*, 1 (2024), s. 28–31.
- [2] R.A. University. [Internett]. Available: <https://phyphox.org/>. [Funnet 11 04 2024].
- [3] L. Kasper og P. Vogt. «Corkscrewing and speed of sound: A surprisingly simple experiment.» *The Physics Teacher*, vol. 58.4 (2020), s. 278–279.
- [4] H. Levine og J. Schwinger. «On the Radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe.» *Physical Review* vol. 73, nr. 4 (1948), s. 383–406.
- [5] J.R. Lien og G. Løvhøyden. *Generell fysikk*. Bind 1 mekanikk. Universitetsforlaget (2001).

Beskrivelse	θ	$\theta = 4.0^\circ$	Figur
Sylinder	$\sin^{-1}\left(\frac{3a}{2g}\right)$	4.4°	
Sylinder med to tettheter	$\sin^{-1}\left\{\frac{a}{g}\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{M}{m+M} + \frac{r^2}{R^2}\right)\right]\right\}$	4.6°	
Hul sylinder	$\sin^{-1}\left\{\frac{a}{2g}\left[3 + \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]\right\}$	5.3°	
Hul sylinder med måleinstrument	$\sin^{-1}\left\{\frac{a}{g}\left[1 + \frac{1}{m+M}\left(\frac{M}{2} + \frac{m}{3}\frac{r^2}{R^2} + \frac{M}{2}\right)\right]\right\}$	4.4°	

Tabell 2. Planets estimerte vinkel basert på forskjellige antagelser om treghetsmomentet til rullen. Her er r indre radius, R ytre radius og M massen til rullen og m er mobiltelefonens masse. Kolonne 3 viser estimert vinkel basert på formelen i kolonne 2.



Øyvind G. Grøn

80 år

Øyvind Grøn studerte først meteorologi på Universitetet i Oslo og fikk graden cand.real. i dette i 1973. Men allerede to år senere, publiserte han en av sine mest siterte og kjente artikler innen et annet fagområde, nemlig om relativitetsteorien.

Denne artikkelen ga en beskrivelse av en roterende relativistisk skive (Grøn, *Relativistic description of a rotating disk*, 1975). Her ga Grøn en oppsummering, forklaring og fysisk beskrivelse av det som kalles Ehrenfests paradoks: For en roterende skive vil omkretsen lengdekontraheres, mens radien er den samme! Vi har siden grunnskolen lært at for en sirkulær skive med radius r , er omkretsen $O = 2\pi r$. Dette gir jo den definisjonen av π vi er vant til, for siden diameteren er $d = 2r$, er forholdet mellom omkrets og diameteren $\pi: O/d = \pi$. For en skive i ro vil dette være tilfelle, men hvis man begynner å rotere den samme skiva, vil vår forståelse bli utfordret. For en roterende skive vil omkretsen, ifølge den spesielle relativitetsteorien, derimot være mindre enn $2\pi r$. Dermed vil også forholdet mellom omkrets og diameter være mindre enn π ! Dette tilsynelatende paradokset refereres til som Ehrenfests paradoks, og det var diskusjon blant fysikere hvordan en skulle forklare og forstå dette. Grøns artikkel i 1975 ryddet derimot opp i dette og står nå som standardreferanse til dette problemet og hvordan vi skal forstå den underliggende fysikken for en roterende skive.

Senere begynte Grøn å studere kosmologiske modeller av forskjellige typer. Spesielt var frastøtende gravitasjon et tema for flere artikler, og frastøtende gravitasjon ble også tittelen på hans doktorgradsavhandling. Grøn forsvarte sin doktorgrad i fysikk ved Universitetet i Oslo i 1990.

Doktorgradsavhandlingen (Grøn, 1990) besto av flere artikler som studerte hvordan universet kunne gjennomgå homogenisering og isotropise-

ring i modeller med frastøtende gravitasjon. Det er nettopp slike modeller som gir opphav til inflasjon, en fase i universets historie hvor universet vokste voldsomt i løpet av en veldig kort tid. Denne inflasjonsfasen glatter også ut universet, slik at det ser mer og mer jevnt ut. Sagt på en annen måte: Universet homogeniseres. I tillegg blir universet seende mer likt ut i de forskjellige retningene, noe som tilsvarer en isotropisering av universet. Et av problemene med vanlig gravitasjon er at det har en tendens til å trekke materie sammen og til å klumpe det sammen. Dette betyr at universet skulle ha vært mye mer «klumpete» enn det man observerer det til å være. Inflasjonsfasen, som ble foreslått av Alan Guth i 1979, var et forsøk på å forklare hvorfor universet er mer homogent enn det man først forventer, og frastøtende gravitasjon er mekanismen som forårsaker denne inflasjonsfasen. Grøns artikler var med på å forstå hvordan denne mekanismen fungerer, og dermed bedre forstå hvorfor universet er som det er i dag.

Grøn har etter sin doktorgradsavhandling fortsatt vært særdeles produktiv innen disse forskningsområdene. Temaene i artiklene har vært, for å nevne noen: hyperbolske akselererte ladninger, gravitasjonell entropi, Kaluza-Klein teori og mørk energi. Spesielt har Grøn vært opptatt av å prøve å bryte ned noe som er vanskelig å forstå, i små, forståelige biter. Summen av disse bitene har så gitt en ny og bedre forståelse av et problem.

I tillegg har han hatt et tosifret antall hovedfag og masterstudenter under sin veiledning. Mens en av oss (S.H.) har hatt gleden av å være hans hovedfagstudent, har den andre av oss (I.B.) hatt gleden av å være sensor ved diverse hovedfag og masteroppgaver for ham ved UiO. Det var ofte imponerende å legge merke til det høye faglige nivået til disse hovedfagstudentene, noe som naturlig nok etter videre bearbeidelse, førte til publikasjoner i den internasjonale litteraturen. På denne måten har Grøn helt klart vært en inspirasjon og han har vært med på å forme en hel generasjon av norske fysikere.

Vi har kjent Øyvind Grøn i flere tiår, og en av oss (I.B.) var forslagsstiller for ham til H.M. Kongens gullmedalje i 1988 – en pris han definitivt var verdig til – og var i tillegg første opposent under hans doktordisputas i 1990.

Øyvind Grøns innsats i formidling er også ganske bemerkelsesverdig, ettersom han har vært en meget flittig foredragsholder i diverse fora rundt omkring i landet, noe som blant andre Trondheim Astronomiske Forening er svært glad for!

Vi ønsker ham mange fruktbare år framover!

Iver Brevik, professor emeritus, NTNU
Sigbjørn Hervik, professor, UiS



(1933–2024)

Torgeir Engeland, vår gode kollega gjennom flere tiår, døde 28. mars. Han ble født i Kristiansand 5. august 1933. Etter realartium ved Kristiansands katedralskole og gjennomført førstegangstjeneste og befalsskole tok han fatt på realfagsstudier ved Universitetet i Oslo (UiO), der han ble cand.real. i 1961 med fysikk hovedfag. Deretter fulgte stillinger som vitenskapelig assistent, universitetslektor, førsteamanuensis og professor, alle ved UiO.

Engelands fagfelt var kjernefysikk, nærmere bestemt studiet av atomkjernenes struktur og egenskaper. Det førte ham både til Nordisk Institut for Teoretisk Atomfysik og Nils Bohr Institutet i København (1962–63) og til University of Michigan i Ann Arbor (1966–67). Senere i karrieren hadde han også forskningsopphold i Oxford og Trento. Med sine mange internasjonale kontakter ble han en døråpner ut i verden for yngre kolleger.

Da eksperimenter tidlig på 1960-tallet påviste lavtliggende kollektive tilstander i kjerner nær lukkede skall, foreslo Torgeir at disse kunne beskrives ved eksitasjon av korrelerte partikler fra lukkede skall – såkalte partikkel-hull-eksitasjoner. Han inkluderte disse i omfattende skallmodellberegninger, der vekselvirkningen mellom partikler og hull ble beskrevet i en svakkoplingsmodell, og gruppeteoretiske metoder ble anvendt til å klassifisere tilstandene. Disse studiene regnes til pionerarbeidene på området.

For Torgeir var det viktig å kunne beskrive de kjerneaksjonene som ble brukt til å innhente data om kjernenes egenskaper. I flere av arbeidene har han derfor kombinert reaksjons- og strukturmodeller.

Han tok også opp problemer i tilknytning til partikkel-rotor-modellen for deformerte kjerner. Denne modellen overestimerer Coriolis-koplingen mellom partikkel og rotor. Sammen med kolleger lyktes det ham å eliminere dette problemet i en

modellberegning der parkraften mellom nukleonene og rekyl-leddet i partikkel-rotor-modellen ble behandlet eksakt.

Torgeir var den som la grunnlaget for den teoretiske og beregningsorienterte del av kjernefysikken i Oslo. Her kom hans skarpe analytiske evne til sin rett. Han utviklet en regnemaskinskode for store kjernestrukturberegninger basert på Lanczos algoritme. Dette bidro til at Oslo-miljøet fikk en internasjonal lederposisjon innenfor skallmodellstudier i 1990-årene. Hans kode ble sterkt etterspurt – og delt verden over.

Karakteristisk for Torgeir var at han alltid tok opp problemstillinger som var nært knyttet til eksperimentelle studier, og han hadde derfor en høy stjerne hos eksperimentalfysikere. Da syklotrongruppen begynte å måle nivåtettheter i høyt eksiterte kjerner, bidro Torgeir med grundig innføring i den underliggende teorien og var medforfatter på flere av de første vitenskapelige arbeidene. Noe senere tok han i bruk nevrale nett for å rekonstruere partikkelspor i detektorer. Det var et arbeid som var motivert av NA36-eksperimentet ved CERN, der særpartikler ble produsert i relativistiske tung-ione-kollisjoner.

Torgeir hadde mange hovedfags- og doktorgradstudenter. Gjennom forelesninger og seminarer ga han verdifullt innsyn i faget til både studenter og kolleger. Han var også sentral i utarbeidelsen av laboratoriekurs i analog og digital måleteknikk.

Torgeir Engeland tok også et betydelig administrativt ansvar på Fysisk institutt, først som gruppeleder for kjernefysikk (1972–76) da syklotronprosjektet var under planlegging, og siden som medlem av styre og råd for instituttet som helhet. Han var også i en årrekke undervisningsleder. På nasjonalt plan var han leder i Norsk Fysikkråd og mangeårig styremedlem i Norsk Fysisk Selskap. I årene 1977–80 var han medlem av rådet for European Physical Society. Den nøyaktighet og orden som preget hans forskning, gjenspeilet seg også i arbeidet med de mer organisatoriske oppgavene.

Som person var Torgeir beskjeden og uselvisk. Det var interessen for faget som drev ham. Hans fikk fortjent anerkjennelse da han ble tildelt med Norsk Datas fysikkpris i 1982. Vi hedrer hans gode minne og sender vår hilsen til hans ektefelle Else gjennom mer enn 60 år og til hans barn Kristin og Lars med familier.

*Morten Hjorth-Jensen
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 Torbjørn Skauli, Institutt for teknologisystemer, UiO

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

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

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

Vara

Professor Magnus Borstad Lilledahl, Institutt for fysikk, NTNU

Adresse

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

Sekretær

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

www.norskfysisk.no

Bedriftsmedlemmer

Vi takker for støtten fra
våre bedriftsmedlemmer:



UNIVERSITETET
I OSLO



UNIVERSITETET I BERGEN



UiT Norges
arktiske universitet

