

Fra Fysikkens Verden

NR. 1 – 2021
83. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP

De mest nøyaktige atomklokkene



Les også om:

- Mørk materie
- Fagfornyelsen

- Ferroelektrisitet

Nr. 1 – 2021

83. årgang

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap
www.norskfysisk.no

Redaktører:

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

Professor Emil J. Samuelsen
Institutt for fysikk, NTNU
E-post: emil.samuelsen@ntnu.no

Redaksjonssekretær:

Maria Hammerstrøm
Realfagsbiblioteket, UiO
E-post: 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:

Steven Burrows/The Kaufman Group,
gjengitt med tillatelse

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 bidragsyttere

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 1400.

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

Småstykker: Gratulasjoner, nekrologer, bokomtaler, skolestoff, møterefater 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 korrekturene.

Innhold

Fra redaktørene Øyvind G. Grøn 3

Fysikknytt

Nytt om mørk materie Øyvind G. Grøn 4

Artikler

Atomklokker Øyvind G. Grøn 6

Hundre år med ferroelektrisk materiale Emil J. Samuelsen 11

Hvor går fysikkfaget i skolen? Ellen Karoline Henriksen 14

FRA REDAKTØRENE

Det er fortsatt tid for hjemmekontor så lenge koronapandemien ikke er over. I mange typer jobb er vi heldige siden effektive internettløsninger har gjort det mulig å møtes via internett. Men en stor takk til helsepersonell som gjør en kjempejobb under vanskelige forhold – en jobb som ikke kan utføres hjemme.

I dette nummeret av *Fra Fysikkens Verden* har vi fokus på fire temaer: Mørk materie, nøyaktige klokker, faststoff-fysikk og skolefysikk.

Det finnes en rekke forskjellige typer observasjoner som tyder på at den dominerende formen av materie i universet ikke består av protoner, nøytroner og elektroner slike den 'vanlige' materien gjør. Hva den mørke materien er, vet vi fortsatt ikke.

Både i fysikken og i vårt GPS-dagligliv er vi avhengig av nøyaktige klokker. De siste ti årene har det vært utviklet en ny type ekstremt nøyaktige klokker kalt optiske atomklokker. I artikkelen presenteres atomklokkenes fysikk.

Kunnskaper om faste stoffers fysiske egenskaper har stor praktisk betydning. I dette nummeret av FFV fokuserer faststoff-fysiker Emil Samuelsen på ferroelektriske materialer siden det er hundre år siden denne typen materialer ble identifisert.

Fysikkens fremtid ligger ikke bare i forskernes innsats, men også i fysikklærernes. Elevene er vår fremtid. En ny læreplan i fysikk er på trappene, og professor Ellen Karoline Henriksen ved skolelaboratoriet til Fysisk Institutt ved Universitetet i Oslo gir oss sine refleksjoner om hvilken retning skolefysikken går i.

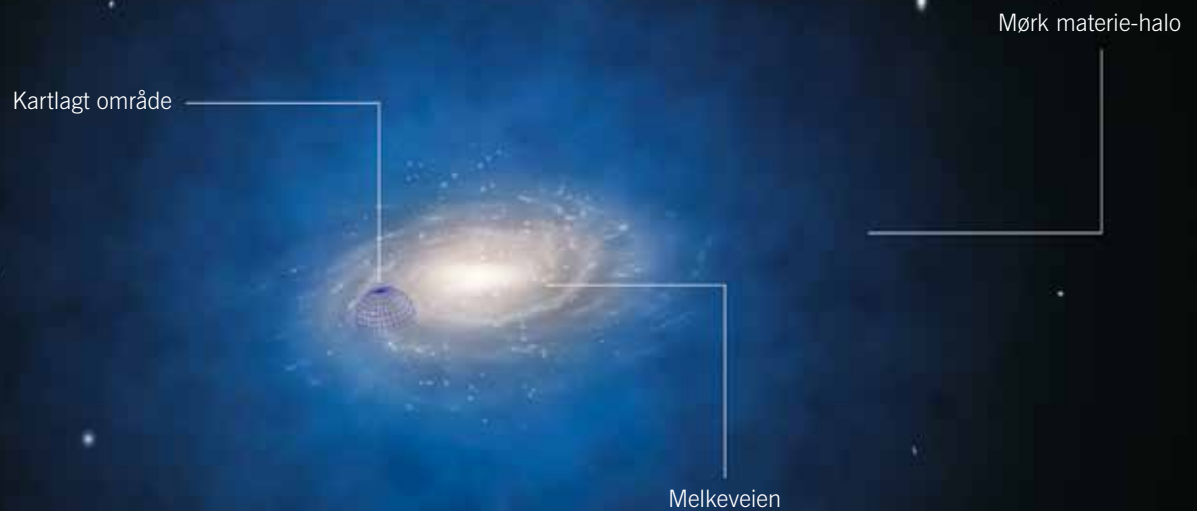


◀ Øyvind G. Grøn



Emil J. Samuelsen

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



Nytt om mørk materie

I en nylig publisert artikkel rapporteres det om nye grenser på mørk materie-partikler. De er beregnet fra kvantemekaniske betraktninger i kombinasjon med ikke-eksistensen av en femte fundamental kraft og kravet til lang levetid for mørk materie-partikler.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Det er mange typer observasjoner, for eksempel av galaksenes rotasjonsbevegelse og temperaturfluktuasjoner i den kosmiske bakgrunnsstrålingen, som tyder på at omtrent 75 % av all materien i universet består av såkalt mørk materie, det vil si materie som ikke sender ut elektromagnetisk stråling, og som vi derfor ikke kan se.

Men vi vet svært lite om hva den mørke materien består av. Noen bidrag kjenner vi, for eksempel nøytrinoer og svarte hull, men det er altfor lite av de kjente typene av mørk materie til å utgjøre 75 % av materieinnholdet i universet.

Mulige kandidater

Det er ingen aktuelle partikkelkandidater for mørk materie i den såkalte standardmodellen for elementærpartikkelfysikk. Når det gjelder å forklare hvorfor de ytre delene av roterende galakser beveger seg så raskt at de for lengst skulle ha løst seg opp om de bare ble holdt sammen av gravitasjonsfeltet til den ordinære (lysende) materien, har forskerne foreslått tre hovedtilnærmelser for å løse problemet:

1. De har foreslått at det må eksistere ukjente, elektrisk nøytrale partikler med lang levetid. En klasse av slike partikler kalles *Weakly Interacting Massive Particles* (WIMPs).
2. Modifisering av gravitasjonsloven. Forslaget går ut på at for store avstander, noen titusener lysår, avtar tyngdeakselerasjonen langsommere med avstanden fra en massefordelings sentrum enn forutsagt i Newtons og Einsteins teorier. Det er konstruert en teori som inneholder denne hypotesen. Den kalles *Modified Newtonian Dynamics* (MOND). Det å forkaste Newtons

Figur 1. Illustrasjon av Melkeveiens halo av mørk materie. Det er blitt søkt etter mørk materie i solsystemets omgivelser i området vist ved globen, og funnet mindre enn ventet. (Illustrasjon: ESO/L. Calçada)

og Einsteins gravitasjonsteorier er så inngripende at jeg har liten tro på at dette er den korrekte løsningen av problemet med at gravitasjonen til lysende materie er for svak til å forklare materiens bevegelser.

3. Astrofysikerne har spekulert på om det finnes haloer av mer konvensjonelle objekter som svarte hull i den ytre delen av galaksene. Disse objektene kalles *Massive Astrophysical Compact Halo Object* (MACHOs). Estimerer av mengden av slike objekter tyder på at det er alt for lite av dem til å forklare galaksenes bevegelser.

En femte fundamental kraft?

Det har lenge vært spekulert på om det eksisterer en femte fundamental kraft i tillegg til gravitasjon, elektromagnetisk kraft, svak kjernekraft og fargekraften mellom kvarker. Ifølge kvanteteorien formidles disse kreftene av såkalte virtuelle partikler – partikler som har en levetid begrenset av Heisenbergs usikkerhetsrelasjon, slik at det ikke er mulig å observere dem direkte i rollen som kraftformidlere. Virtuelle gravitoner formidler gravitasjon, fotoner elektromagnetisme, W- og Z-bosoner den svake kjernekraften og gluoner fargekraften.

På samme måte som det eksisterer både virtuelle fotoner som formidler elektrisk kraft mellom ladde partikler, og vanlige fotoner som opptrer når elektromagnetisk stråling vekselvirker med materie, så vil eksistensen av en femte kraft innebære eksistensen av langlivete partikler som svarer til de virtuelle partiklene som formidler den femte kraften. Disse langlivete partiklene kan tenkes å utgjøre en vesentlig del av den mørke materien i universet.

Det har vært utført en mengde eksperimenter, observasjoner og beregninger for å søke etter tegn til en partikkel som kan formidle en femte fundamental kraft og for å komme frem til restriksjoner av egenskapene til kraften. Resultatet er at dersom det eksisterer en femte fundamental kraft må den være svak og ha kort rekkevidde. Det betyr at partikkelen som formidler den ikke kan være masseløs slik som fotonet.

I august 2016 ble det publisert en artikkel [1] der observasjoner rapportert i januar samme år ble tolket som tegn på at det kunne være registrert en partikkel som formidler en femte kraft. Det dreide seg om kjernereaksjoner for Beryllium-8

atomer. Det kunne se ut til at en ukjent kortlivet X-partikkel ble produsert som raskt henfalt til elektron-positron par. Partikkelen hadde 34 elektronmasser. Levetiden var så kort at hvis denne partikkelen formidler en kraft, så har kraften en rekkevidde på bare $1,2 \times 10^{-14}$ m, omtrent ti ganger utstrekningen til en atomkjerne.

Utelukking av kandidater

I en artikkel [2] publisert 13. januar 2021 rapporteres det om grenser for massen av mørk materie-partikler fra kvanteteori, ikke-eksistens av en femte fundamental kraft, og krav om at for å kunne utgjøre en dominerende del av universets masse må partikkelen ha minst like lang levetid som universets alder – 13,8 milliarder år.

De to britiske forskerne X. Calmet og F. Kuipers fant at massene til partiklene må være mellom 10^{-3} eV og 10^7 eV, der eV står for elektronvolt og er en energienhet som det er vanlig å bruke for å angi massene av elementærpartikler, underforstått at massen kan beregnes fra $m = E/c^2$. For eksempel er elektronets masse omtrent 0,5 MeV der MeV står for millioner elektronvolt. Dette betyr at ifølge den beregnede begrensningen på massen av mørk materie-partiklene, må slike partikler ha mellom 2 milliarddels og 20 elektronmasser.

Dersom denne begrensningen er gyldig, elimineres praktisk talt alle WIMPs og MACHOs som kandidater for universets mørke materie, men X-partikkelen omtalt ovenfor har en masse som ikke er så langt utenfor dette området.

Den mørke materien må da bestå av en kald gass av lette partikler. Det kan gi eksperimentalfysikerne hint om hva de skal lete etter. Men fortsatt leter de i blinde. Den nye begrensningen av massen til mørk materie-partiklene gjør ikke mysteriet med deres mulige eksistens mindre enn det var. ■

Referanser

1. J.L. Feng, B. Fornal, I. Galon, S. Gardner, J. Smolinsky, T.M.P. Tait og P. Tanedo. «Protophobic Fifth-Force Interpretation of the Observed Anomaly in ^8Be Nuclear Transitions.» *Phys. Rev. Lett.* 117 071803 (2016).
2. X. Calmet og F. Kuipers. «Theoretical bounds on dark matter masses.» *Physics Letters B* 814, 136068 (2021).



Figur 1. Illustrasjon av atomklokke. (Illustrasjon: Steven Burrows/The Kaufman Group, gjengitt med tillatelse)

Atomklokker

Epoken med hypernøyaktige klokker begynte med konstruksjonen av cesiumatomklokken. Senere er det bygget optiske atomklokker med hundre ganger større presisjon enn cesiumklokkene. Likevel er det cesiumklokkene som er i bruk, for eksempel for å gi de nøyaktige tidsmålingene som kreves for et velfungerende GPS-system. Men det gjøres nå en betydelig innsats for å konstruere praktiske og pålitelige optiske atomklokker.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Den fysiske mekanismen som utnyttes i atomklokker, er at atomene har energinivåer som bare i liten grad avhenger av de fysiske forholdene i atomklokkens omgivelser. Frekvensen til elektromagnetisk stråling sendt ut når atomene faller fra et høyere

energinivå til et lavere, brukes som standard for å måle tiden.

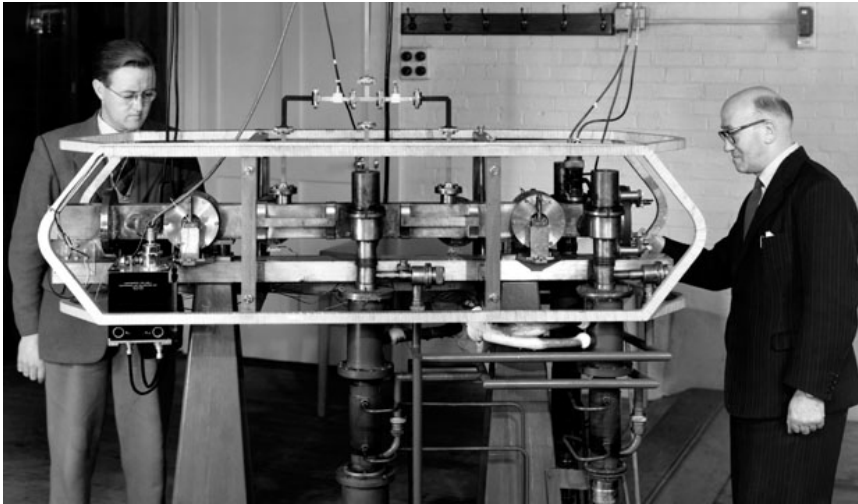
Den første nøyaktige atomklokken ble konstruert av de britiske fysikerne Louis Essen og Jack Parry i 1955. Det var en cesium-133-atomklokke der frekvensen til mikrobølgestråling sendt ut ved en såkalt hyperfin atomær overgang (Figur 2).

Sekundet

Historisk definerte man ett sekund som $1/86400$ -del av et døgn. Men nøyaktige målinger viste at jorda ikke roterer helt jevnt. Så da kravene til nøyaktighet økte, ble denne definisjonen for upresis.

I 1956 ble et sekund definert som $1/315569259746$ -del av det tropiske år 1900. Denne definisjonen ble adoptert som en del av det internasjonale enhetssystemet (SI-systemet) i 1960.

Nøyaktigheten og stabiliteten av cesium-133-klokken konstruert av Parry og Essen ledet i 1967 til en ny definisjon av sekundet: Et sekund



Figur 2. Jack Parry (til venstre) og Louis Essen (til høyre) ved cesium-133-atomklokken de hadde konstruert. (Foto: National Physical Laboratory)

defineres som 9 192 631 770 ganger perioden til elektromagnetisk stråling sendt ut fra et cesium-133-atom som faller mellom to energinivåer som representerer en hyperfin separasjon av atomets grunntilstand.

Atomklokkens fysikk

I denne sammenhengen er det nå i ferd med å bre seg en misforståelse på internett. Yasemin Saplagoglu skrev i en artikkel i Space.com med tittelen *Forgotten Element Could Redefine Time*: «I 1967 definerte den Internasjonale komité for vekt og mål et sekund som den tiden det tar for et cesiumatom å absorbere nok energi til å bli eksitert – dvs. tiden det tar for dets elektroner å hoppe fra ett energinivå til det neste.» Men frekvensen til den absorberte strålingen har ikke noe med dette å gjøre. Ifølge kvanteteorien er dette en tid som ikke kan måles og som i fysisk forstand ikke eksisterer.

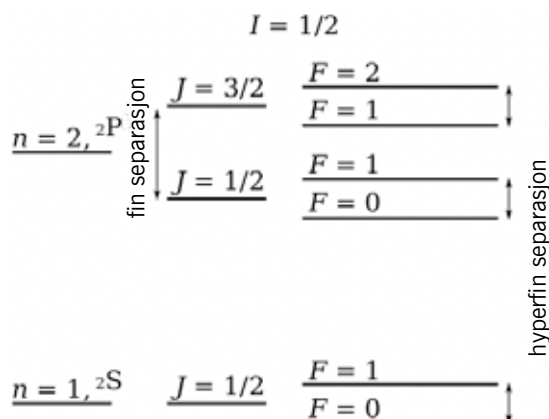
Det er forskjellen i energi, ΔE , for de to energinivåene det dreier seg om. Når et atom faller fra et høyere til et lavere energinivå sender det ut elektromagnetisk stråling med frekvens f i form av fotoner med energi $\Delta E = hf$, der h er Plancks konstant, og perioden er $T = 1/f$. Sekundet er definert som 9 192 631 770 perioder av strålingen ved

en bestemt ‘hyperfin overgang’ mellom to energinivåer i cesium-133-atomet.

For å gi en enklest mulig illustrasjon av begrepet ‘hyperfin separasjon’ vil vi her betrakte de to laveste energinivåene til hydrogenatomet (Figur 3).

La oss nå se på den hyperfine separasjonen av energinivået til et cesiumatom i grunntilstanden. Cesiumatomet har et odde antall elektroner. Et like antall elektroner utgjør par med motsatte spinn, men det blir igjen et odde elektron med spinn $\frac{1}{2}$. Dette er da elektronskyens totale spinn. Kjernens spinn er $7/2$. Denne verdien er målt. Kjernens spinn kommer fra spinnene til kvarkene som protonene og nøytronene består av, og man har ikke greid å utlede en formel for å regne ut atomkjernens spinn fra antallet protoner og nøytroner i kjernen.

I en såkalt hyperfin vekselvirkning mellom atomkjernen og elektronskyen oppstår to undertilstander av grunntilstanden, én der elektronskyens og atomkjernens spinn har samme retning slik at $F = 7/2 + 1/2 = 4$, og én med motsatte retninger slik at $F = 7/2 - 1/2 = 3$. Cesiumatomet med $F = 3$ har litt mindre energi enn det med $F = 4$. Dette gir opphav til den hyperfine oppsplittingen av grunntilstandens energinivå. Når et atom i tilstanden



Figur 3. Bokstaven n kalles hovedkvantetallet. Et atom med $n = 1$ sies å være i grunntilstanden og et med $n = 2$ i den første eksisterte tilstanden. Betrakt et eksitert hydrogenatom med $n = 2$. Målinger har vist at hovedenerginivåene er splittet i to undernivåer på grunn av vekselvirkning mellom et atoms kjerne og atomskyen med $j = \frac{1}{2}$ og $j = \frac{3}{2}$, der j er rotasjonskvantetallet for atomets elektronsky. For et atom i et magnetfelt spaltes et finstrukturnivå videre i en hyperfinstruktur. For eksempel spaltes nivået med $n = 2, j = \frac{1}{2}$ i to undernivåer med $F = 0$ og $F = 1$ der F kalles det totale rotasjonskvantetallet som inkluderer atomkjernens spinn.

med $F = 4$ faller til tilstanden med $F = 3$ sender det ut stråling med frekvens 9 192 631 770 Hz. Det svarer til bølgelengden 3,26 cm som er typisk for mikrobølgestråling.

En cesiumklokke (Figur 1) 'tikker' jevnt og trutt med denne frekvensen. Variasjonen er utrolig liten. 'Nøyaktighetsfaktoren' til en klokke er forholdet mellom usikkerheten i den målte lengden av et tidsintervall og varigheten av tidsintervallet. Her er en språklig vanskelighet: jo mindre dette tallet er, desto større er nøyaktigheten, på tilsvarende måte som at det er mer nøyaktig å måle en lengde med millimeterpresisjon enn centimeterpresisjon. Cesiumklokkene som brukes i vår tid, oppgis å ha en nøyaktighetsfaktor mellom 2×10^{-16} og 3×10^{-16} . For den største verdien av nøyaktighetsfaktoren betyr det at unøyaktigheten ved måling av et tidsintervall er 3×10^{-16} ganger lengden av tidsintervallet. Det er omtrent 30 millioner sekunder i et år. Dette betyr at en cesiumklokke med nøyaktighet 3×10^{-16} kan måle et tidsintervall på en milliard års varighet med en presisjon på ett sekund.

Hvordan tiden måles med en atomklokke

La oss kalle energinivåene til Ce-133-atomer i den hyperfine oppsplittingen av grunntilstanden med $F = 3$ og $F = 4$ for A og B. I en cesium-atomklokke produseres en stråle at Ce-133-atomer i tilstanden A. Den sendes inn i en resonator. Der utsettes atomene for mikrobølgestråling fra en laser. Det endrer noen av atomene så de havner i tilstanden B. Når strålen av Ce-133-atomer har passert resonatoren påvirkes de av et magnetfelt som fjerner atomer i tilstanden A. En teller samler og teller atomer i tilstand B i den gjenværende strålen. Frekvensen til mikrobølgestrålingen i resonatoren bestemmer hvor mange av atomene i den opprinnelige strålen som ble eksitert fra A til B.

Jo nærmere laserstrålingens frekvens er frekvensen til fotoner som svarer til den hyperfine overgangen mellom A og B, desto flere atomer eksiteres. Frekvensen av strålingen bestemmes med maksimalt antall atomer i strålingen som har passert magnetfeltet. Dermed oppnås en ekstremt presis verdi av strålingens frekvens. Så telles antall oscillasjoner. Denne tellingen foregår ved hjelp av en signalgenerator bygget inn i klokken. Det er en elektrisk svingekrets med frekvens 9 192 631 770 Hz. Når 9 192 631 770 svingninger av strålingen som gir maksimalt antall atomer i B-tilstanden har inntruffet, har det gått et sekund.

De mest nøyaktige klokkene

Til tross for cesiumklokkenes fenomenale nøyaktighet arbeides det med å utvikle enda mer presise klokker. Flere prosjekter er i gang.

1. Kvanteklokker

Omkring 2010 ble det utviklet en ny type klokker ved det amerikanske National Institute of Standards and Technology (NIST), kalt kvanteklokker. De var da 37 ganger mer nøyaktige enn den tidens cesiumklokker. Disse klokkene var basert på energinivåer i aluminiumatomer. De målte tid ved hjelp av ioniserte aluminiumatomer fanget i en såkalt ionefelle konstruert ved hjelp av laserstråling. Strålingen som brukes til å måle tid med slike klokker, er i den optiske delen av det elektromagnetiske spekteret, og frekvensen er ti tusen ganger høyere enn for cesiumklokkenes mikrobølgestråling.

I juli 2019 demonstrerte forskere ved NIST en kvanteklokke med nøyaktighetsfaktor på $8,4 \times 10^{-19}$ som svarer til et avvik på ett sekund i løpet av 33,7 milliarder år.

2. Optiske atomklokker

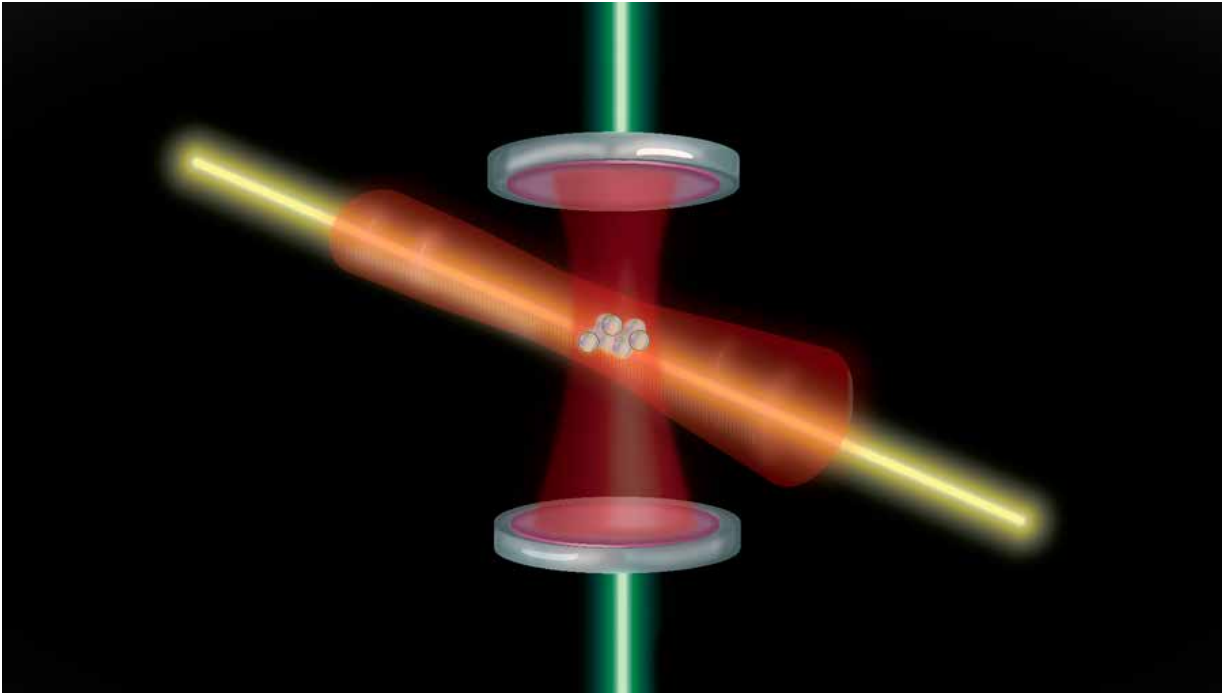
I 2005 ble halvparten av nobelprisen i fysikk gitt til John L. Hall og Theodor W. Hänsch for deres bidrag til utviklingen av presisjonsspektroskopi. Deres resultater har hatt betydning for utviklingen av ekstremt nøyaktige klokker av typen optiske atomklokker.

Det er klokker der tidsenheten består av atomer som sender ut elektromagnetiske stråling i den optiske delen av spekteret, det vil si lys. I denne sammenhengen er særlig grunnstoffet ytterbium med atomnummer 70 brukt. I 2012 var en spesiell overgang mellom to energinivåer i ytterbiumatomer som svarer til utstråling med bølgelengde 578 nm, det vil si gult lys, omtalt som den mest nøyaktige optiske standarden for måling av tid.

I 2018 rapporterte forskere ved NIST en artikkel [1] der de hevder at de hadde konstruert en optisk klokke med nøyaktighet $1,6 \times 10^{-18}$ ved å bruke ioniserte lutetium-atomer. Det svarer til en unøyaktighet på litt under ett sekund i løpet av universets levetid på 13,8 milliarder år. Dette betyr at de optiske klokkene har omtrent hundre ganger bedre nøyaktighet enn cesiumklokkene.

Årsaken til den høyere presisjonen av de optiske klokkene enn cesiumklokkene som er basert på mikrobølgestråling, er at lys har mye kortere bølgelengde enn mikrobølgestråling. Dermed oppnår man flere datapunkter per sekund. Det blir som å ha et målebånd som viser millimetre i stedet for bare centimetre.

Men utviklingen av optiske klokker er i dag likevel fortsatt et forskningsprosjekt fordi de er mer kompliserte enn cesiumklokkene. Det har vist seg å være vanskeligere å konstruere optiske klokker som går stabilt i lang tid med den optimale nøyaktigheten enn å få dette til med cesiumklokker. For eksempel påvirker varierende temperatur



Figur 4. Prinsippskisse for å studere sammenfiltrede atomer ved hjelp av to lasere [2]. Her vises ytterbium-171-atomer fanget i en ionefelle konstruert ved hjelp av laserstråling. Se mer detaljert forklaring i hovedteksten. (Illustrasjon: Vladan Vuleti, gjengitt med tillatelse)

i omgivelsene til en optisk klokke de atomære energinivåene.

Mye av forskningen på optiske klokker dreier seg om å finne atomer med energinivåer som i størst mulig grad er upåvirket av for eksempel temperaturen i klokkenes omgivelser. Forskning rapportert i 2018 tyder på at grunnstoffet lutetium kan være lovende i denne sammenhengen.

Standard kvantegrense for nøyaktighet

Det eksisterer en grense for nøyaktigheten av en atomklokke som kalles 'standard kvantegrensen'. Fysikken bak denne grensen er den følgende: Energinivåene for et atom er ikke presist observerbare. I kvantemekanikken er atomære egenskaper definert ved sannsynligheter. Det vil derfor alltid være en kvantemekanisk usikkerhet som begrenser nøyaktigheten av atomære klokker.

Men denne usikkerheten kan minskes ved å bruke mange atomer i en klokke. Standard kvantegrensen innebærer at en atomklokke har en nøyaktighetsfaktor som er omvendt proporsjonal med roten av antall atomer i klokken som brukes til å måle tid (atomer i en ionefelle, se Figur 4).

Bruk av kvantemekanisk sammenfiltring for å overkomme kvantegrensen

I en artikkel [2] publisert 16. desember 2020 i *Nature* har en gruppe fysikere under ledelse av Vladan Vuletić rapportert om et eksperiment for å overkomme standard kvantegrensen. Denne

grensen er utledet uten å ta fenomenet 'kvantemekanisk sammenfiltring' [3] (*entanglement* på engelsk) i betraktning.

Kvantemekanisk sammenfiltring er at det kan eksistere en sammenheng mellom partikler som er adskilt fra hverandre slik at de ikke vekselvirker med hverandre. Men det er etablert en korrelasjon mellom atomene ved at de har vært utsatt for en påvirkning på et tidligere tidspunkt.

Vuletić og hans forskergruppe fanget omtrent 350 ytterbium-171-atomer i en ionefelle mellom to speil (Figur 4). Så sendte de laserlys gjennom ionefellen slik at lyset ble reflektert og beveget seg frem og tilbake mellom speilene. Da lys traff et første atom ble frekvensen endret. Da det modifiserte lyset traff et nytt atom ble dette påvirket og korrelert med det første atomet. Slik fortsatte det, og til slutt var det etablert en sammenfiltringsrelasjon mellom alle atomene. Så ble energinivåene til atomene målt med en annen laser, og atomene ble brukt som måleenhet i en optisk klokke.

Deretter ble det konstruert en tilsvarende klokke med atomer som ikke hadde noen sammenfiltringsrelasjon. Nøyaktighetsfaktoren for de to klokkene ble sammenliknet. Det viste seg (som ventet) at klokken med sammenfiltrede atomer var mer presis enn den andre klokken.

Forskerne rapporterte at ingen av klokkene kom opp mot nøyaktigheten til de beste optiske klokkene, for de hadde ikke gode nok lasere. Men eksperimentet viste potensialet til sammenfiltrede

atomer for å konstruere klokker med enda større presisjon enn det standard kvantegrensen tillater. De vil nå arbeide videre for å forbedre laserne.

Koherenstid

Det er vanskelig å kontrollere oppførselen til atomer. De kan lekke ut av en beholder ved såkalt kvantemekanisk tunnelering. For at en optisk atomklokke skal fungere må atomene være under kontroll. Forskerne bruker uttrykket at atomene må oppføre seg på en *koherent* måte. I sammenheng med elektromagnetisk stråling betyr dette at atomene må kunne produsere stråling med for eksempel samme frekvens for stråling sendt ut fra ulike atomer.

Selv i de beste optisk atomurene som er fremstilt, vil den atomære enheten som måler tid – atomene fanget i ionefeller – utsettes for såkalt dekoherens i løpet av noen sekunder. Dette kan skje for eksempel på grunn av ufullkommenheter i laserne som brukes til å fange atomene. Dette betyr at klokken bare kan måle tid i noen sekunder før de må justeres og 'trekkes opp'.

Det har vært brukt to metoder for å kontrollere oppførselen av atomer i optiske atomklokker:

1. *Klokker med fangete ioner*: Her måles frekvensen av stråling fra godt kontrollerte enkeltioner. Men på grunn av kvantemekaniske fluktuasjoner av enkeltatomer må forskerne gjøre gjentatte tidsmålinger for å oppnå presise resultater.
2. *Gitterklokker*: Det produseres stående bølger av reflektert laserlys for å fange mange atomer, for eksempel noen tusen. Her oppnås mer presise tidsmålinger på kortere tid. Men vekselvirkninger mellom de fangete atomene fører til rask dekoherens.

I en artikkel [4] publisert i *Nature* 16. desember 2020 rapporterte forskergruppen til Kaufmann og Ye ved JILA om en ny måte å forlenge koherenstiden til optiske atomklokker på. Det ble brukt såkalte *optiske pinsetter*. Det er fokuserte laserstråler som er i stand til å gripe og påvirke enkeltatomer. Forskerne greide å forlenge koherenstiden for en optisk atomklokke med omtrent 150 strontium-88-atomer til 48 sekunder. Klokken oppnådde en nøyaktighetsfaktor på $5,2 \times 10^{-17}$.

Anvendelser

I vår tid er den viktigste praktiske bruken av atomklokker at et nettverk av over hundre cesium atomklokker fordelt over meste av jorda, danner

et system av nøyaktige tidsmålinger på jorda som er nødvendig for å oppnå de fenomenalt nøyaktige posisjonsbestemmelsene GPS-systemet gir oss.

I et eksperiment utført i 2010 ble to kvanteklokker plassert over hverandre med en høydeforskjell på en halv meter. Målingene viste at den som var lavest nede i tyngdefeltet gikk langsommere enn den øverste klokken og at forskjellen i tidsforløpets hurtighet i de to nivåene stemte med relativitetsteoriens forutsigelse av en gravitasjonell tidforlengelse.

JILA er et forent institutt for University of Colorado Boulder og National Institute of Standards and Technology som ble opprettet i 1962. Da var JILA et akronym for Joint Institute for Laboratory Astrophysics. De har senere flyttet hovedtyngden av forskningen til områdene atomfysikk, nanofysikk og utvikling av presisjonsklokker, og nå brukes JILA kun som et navn og ikke som et akronym. Forskere fra JILA har de siste ti årene gjort fremskritt i utviklingen av optiske klokker.

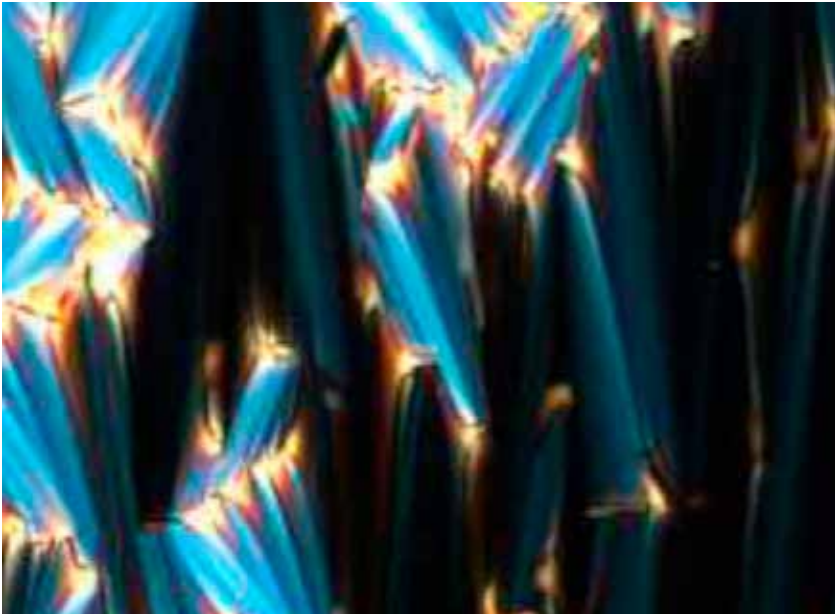
I 2015 rapporterte forskere fra JILA at de hadde konstruert en optisk klokke basert på strontium-87 med en nøyaktighet på $2,1 \times 10^{-18}$. Det betyr at slik klokker kan brukes til å måle forskjellen i tidsforløpets hastighet for to klokker som befinner seg bare to centimeter over hverandre i jordas gravitasjonsfelt ved jordoverflaten.

Klokker med en slik nøyaktighet kan derfor brukes til å kartlegge jordas gravitasjonsfelt ved å måle posisjonsavhengigheten av tidsforløpets hastighet forutsagt i Einsteins relativitetsteori. Massekonsentrasjoner – enten de består av vanlig materie eller mørk materie – vil kunne kartlegges på denne måten. ■

Referanser

1. K.J. Arnold, R. Kaewuam, A. Roy, T.R. Tan og M.D. Barrett. «Blackbody radiation shift assessment for a lutetium ion clock.» *Nat Commun* 9, 1650 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04079-x>.
2. E. Pedrozo-Peñafiel, S. Colombo, C. Shu, et al. «Entanglement on an optical atomic-clock transition.» *Nature* 588, s. 414–418 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3006-1>.
3. Jan Myrheim. «Kvantemekanisk sammenfiltrering. Del 1.» *Fra Fysikkens Verden* nr. 1, side 18 (2019).
4. A.W. Young, W.J. Eckner, W.R. Milner et al. «Half-minute-scale atomic coherence and high relative stability in a tweezer clock.» *Nature* 588, s. 408–413 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3009-y>.

Hundre år med ferroelektrisk materiale



Figur 1. Utsnitt av mikroskopbilde mellom to polarisatorar av ferroelektrisk flytande krystall av 4-(2-metylbutoksy)fenyl 4-(oktyloksy)-benzoat. (Bilde: [1])

Ferroelektrisitet opptrer i elektrisk isolerende fast stoff ved at positiv og negativ ladning forskyv seg i forhold til kvarandre og materialet blir ein makroskopisk elektrisk dipol. Fenomenet blei først oppdaga i eit syntetisk stoff, som til og med er kjent under to ulike namn.

Emil J. Samuelsen Institutt for fysikk, NTNU

Piezoelektrisitet er ein materialeegenskap med nær slektskap med ferroelektrisitet. Faktisk er alle ferroelektriske materiale også piezoelektriske, jamvel om det motsette ikkje alltid gjeld.

Piezoelektriske materiale blir elektrisk polariserte når dei blir utsett for ytre trykk, og endrar form når dei blir utsette for elektrisk felt.

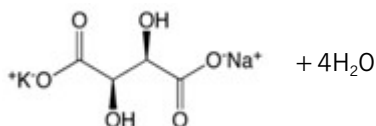
Piezoelektrisitet blei oppdaga i eit syntetisk materiale med formel Figur 2.

Oppdagaren var apotekar Elie Seignette i 1665 i den vest-franske byen La Rochelle. Stoffet er eit dobbeltsalt av ei organisk syre kalla tartar-

syre eller vinsyre (COOH-COH_2), der kalium K og natrium Na erstattar H i $-\text{COOH}$. Stoffet blei kjent under namnet *Seignette-salt*. Samansetninga var lenge halden løynd av apotekaren, for stoffet blei lansert som ei tilsetting til ein medisinsk salve. Etter at ferroelektrisitet blei oppdaga 255 år seinare, er det blitt vanleg å kalle stoffet *Rochelle-salt*.

Piezoelektrisk oppførsel blei påvist kring 1880 av brødrene Pierre og Paul-Jacques Curie, både i Rochelle-salt og i ein del andre materiale. Under første verdenskrigen gjekk fleire forskarar i gang med å utvikle piezoelektrisk drivne ultralyd-sensarar for registrering av ubåtar, mellom andre kjente fysikarnamn som Paul Langevin i Paris og Peter Debye i Zürich. Debye hadde tankar at her kunne ligge føre eit nytt fenomen, nemleg at materiala kanskje var permanente elektriske dipolar. Faktisk hadde Erwin Schrödinger ved universitetet i Wien alt i 1912 brukt ordet 'ferroelektrisch' som tenkeleg nemning for denne nye eigenskapen ein var så opptatt av å finne ut av.

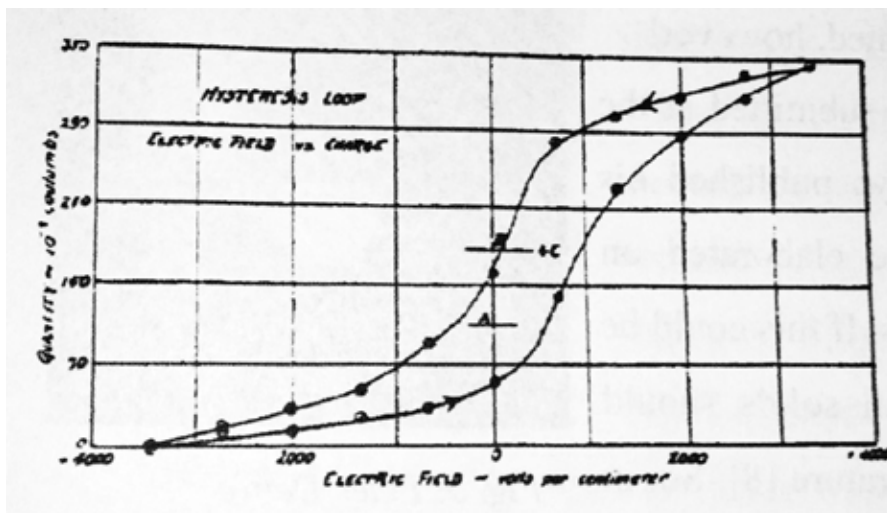
Figur 2. Kjemisk formel for Seignette- eller Rochelle-salt: Hydrogen H, oksygen O, kalium K og natrium Na.



Ferroelektrisitet

Trass i dei tidlege spekulasjonane av Debye og Schrödinger er oppdaginga av ferroelektrisk materiale knytt til ein ung amerikanar, 22-åringen Joseph Valasek, ved universitetet i Minnesota i 1920 og 1921. Valasek hadde før det sett seg inn i fenomenet magnetisme, spesielt ferromagnetisme, ▶

Figur 3. Variasjon av dielektrisk polarisasjon av Rochelle-salt som funksjon av styrke av påtrykt elektrisk felt, med hysteres mellom kurve for aukande og minkande feltstyrke.



som kan beskrivast med atomære *magnetiske* dipolar. Dipolane kan innta felles orientering ved tilstrekkeleg låge temperaturar. Valasek meinte å registrere analog oppførsle i Rochelle-salt: kunne materialet vere sett saman av 'atomære *elektriske* dipolar', og at ytre elektrisk felt skapte ei permanent elektrisk polarisering av materialstykket?

Dielektrika er (i dag) karakterisert ved at påtrykt elektrisk felt E skapar ei indre *polarisering* P eller ei *dielektrisk forskyving* $D (= P + \epsilon_0 E)$ gitt ved

$$D = \kappa \epsilon_0 E.$$

$\epsilon_0 \approx 8,8542 \times 10^{-12}$ F er *permittivitet for vakuum*, og κ er ein dimensjonslaus materialkonstant kalla *relativ permittivitet*. Vanleg storleik for κ er i området 5–15, men for ferroelektriske stoff er κ 100 til 10000 gonger større. I ferroelektriske materiale er det også skilnad på oppførsel om feltstyrken er *aukande* eller *minkande*, eit fenomen kjent som *hysteres* (sjå Figur 3).

Rochelle-salt, kaliumdihydrogenfosfat, perovskittar og andre ferroelektrika

Det hører med i bildet at Rochelle-saltet er eit særskilt krevande materiale å beskrive mekanismen for ferroelektrisiteten i detalj. For eksempel er materialet upolarisert (eller paraelektrisk som vi seier i dag) ved temperaturar *over* $T_{c1} = 297$ K, der det blir polart (ferroelektrisk som vi seier), men blir igjen paraelektrisk for temperatur *under* $T_{c2} = 255$ K. I den publiserte versjon av artikkelen i *Physical Review* i 1921 skreiv Valasek at han har funne at permanent polarisasjon er den naturlege tilstanden for Rochelle salt ved romtemperatur, og han viste at materialet oppviser elektrisk *hysteres* under aukande og minkande elektrisk felt (Figur 3). Dette arbeidet representerer gjennombrøtet for ferroelektrisitet som fenomen i faste-stoff-fysikken.

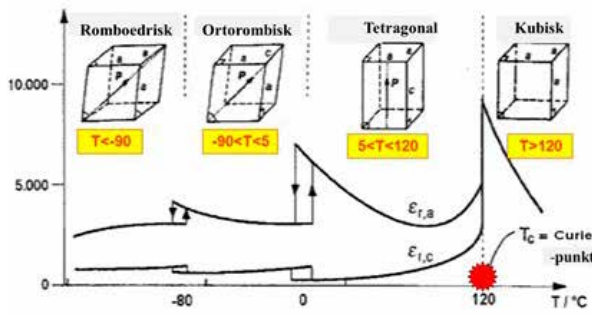
Etter gjennombrøtet ved oppdaginga av ferroelektrisitet for Rochelle-saltet kunne søking etter andre ferroelektrika ta til.

Ei særskilt viktig nyvinning blei gjort på 1930-tallet, ved at ferroelektrisitet blei påvist for kalium-dihydrogenfosfat KH_2PO_4 for temperaturar under $T_c = 123$ K av Busch og Scherrer. Mekanismen for faseendringa ved T_c blei foreslått å vere orden og uorden i hydrogenbindingar av typen $\text{O}-\text{H}-\text{O}$, noko som seinare blei verifisert med nøytron-diffraksjon. Andre funn var triglysinulfat $((\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4)$ med overgangstemperatur 322 K, og natriumnitritt NaNO_2 med overgangstemperatur 436 K, der polarisasjonsretninga er gitt ved at dei ikkje-lineære $\text{O}-\text{N}-\text{O}$ molekyla som er berarar av dipolmoment, orienterer seg i ei felles retning. Nitrittet NaNO_2 er meir kjent som mattilsetningsstoff enn som ferroelektrikum.

Bariumtitanat

Mange forskarar hevdar at eit viktig framsteg i utviklinga av ferroelektriske materiale er truleg knytt til behov for ny instrumentering av krigsutstyr under andre verdskrigen. I alle fall blei ei klasse syntetisk materiale utvikla kalla *perovskittar*, der den mest kjente er bariumtitanat BaTiO_3 . Ein oversikt over ulike variantar av ferroelektrisitet i ulike temperaturområde for BaTiO_3 er vist i Figur 4.

For temperaturar *over* 120°C er materialet kubisk utan ferromagnetisk orden (kalla *paraelektrisk*). *Under* 120°C er materialet sterkt ferroelektrisk, med ulik grad av ferroelektrisk orden i ulike temperaturområde, representert ved ulike krystallografiske strukturar: i området -5 til 120°C er det tetragonalt, i området -75 til -3°C ortorombisk, og under -75°C er det romboedrisk. Av Figur 4 går det fram at grad av ferroelektrisk



Figur 4. BaTiO₃ har fire ulike strukturformer mellom temperaturar <90 °C og > 120 °C, med høge verdier av relativ dielektrisitetkonstant ϵ_r , i horisontal (a) og vertikal (c) retning. Hysteresar ved to overgangar.

polarisering (i form av relativ dielektrisitetkonstant ϵ_r) er høg.

Figur 5 viser korleis det elektriske dipolmomentet oppstår i den tetragonale fasen ved at negative og positive ion i strukturen blir forskyvne i motsette retningar langs z-akse til strukturen.

Mange andre perovskittar viser analoge eigenskapar. Spesielt kjenner ein i dag fleire hundre blandings-perovskittar, som kan tillempast ulike formål. Spesielt viktig er blyhaldige variantar som PbZrO₃-PbTiO₃, kalla PZT. Det har uvanleg sterk piezoelektrisk effekt brukt til ultralyd-sensorar. PbSrTiO₃ (PST) er ein annan attraktiv variant som er grei å framstille, som er stabil og ikkje sprekk lett.

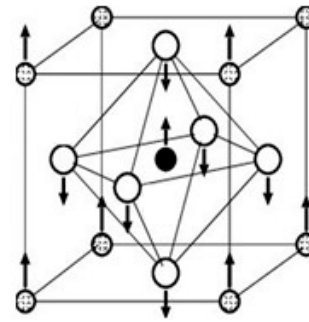
Beslekt med desse stoffa er litiumniobat LiNbO₃, jamvel om det ikkje er ein ekte perovskitt. Spesielt viktig er den høge overgangstemperaturen, 1483 K.

Ferroelektriske flytande krystallar

Enkelte materiale av lange organiske molekyl har temperaturområde der materialet er verken fast eller flytande, men har ein mellomfase der molekyla tenderer å innrette seg etter kvarandre over små område kalla 'domenar'. Er molekyla polare, vil ordninga i kvart domene vere ferroelektrisk, og i polarisert lys vil domena komme til syne som eit mønster av farga nåler. Eit eksempel er vist i Figur 1, med eit såkalla smektisk fase ved 50 °C (av eit materiale kalla 4-(2-metylbutoksy)fenyl 4-(oktyloksy)-benzoat, med dobbel fenylgruppe på ein ende og ein lang alkanhale på den andre enden, som gir eit polart molekyl) [1].

Bruk av ferroelektriske materiale

Både ferroelektrisiteten og piezoelektrisiteten blir utnytta. Her nemner eg berre kort nokre bruksområde, og viser til spesiallitteraturen for detaljar.



Figur 5. BaTiO₃-celle ('prikka' ring Ba²⁺; open ring O²⁻; fylt ring Ti⁴⁺) med markerte forflytningar av iona mellom kubisk og tetragonal struktur som gir netto polarisering i vertikal retning.

Kondensatorar

På grunn av at materiala kan ha svært høge verdier av dielektrisk konstant, inngår bruk i elektriske kondensatorar med høg kapasitans. Kondensatorar er element i elektronisk utstyr, sånn som elektriske svingekretsar.

Optisk minne, bølgleiar, overflatebøljer og vibrasjonsdetektorar

Dette er stikkord for noko av bruksområda for piezoeigenskapar.

Ferroelektrisk 'random access memory' (FeRAM) for datalagring

FeRAM utnyttar hysteresen ved ferroelektrika. Ytre elektrisk felt kan nyttast til å styre polariteten i materialet som får rolla som '0' eller '1', altså 'dataminne'. For lesing av minnet trengst 'lesepulser', som nok har den ulempa at dei kan øydelegge informasjonen, og FeRAM krev derfor *regenerative* pulsar som reproduserer informasjonen frå før leseprosessen. Den lagra informasjonen er svært stabil og langvarig, slik at FeRAM gjerne blir kalla 'ikkje-flyktig', med opptil millionar gongars repetisjon, jamvel betre enn 'flash-minne'. ■

Supplerande lesnad

1. J. Fitas, M. Marzec, M. Tykarska, S. Wrobel og R. Dabrowski. «Ferroelectric liquid crystal for use in LCD». *Acta Physica Polonica A* 124 s. 954–958 (2013).
2. M.E. Lines og A.M. Glass. «Principles and Applications of Ferroelectric and Related Materials». *Oxford University Press* (1977)
3. J. Schröder og D.C. Lupascu. «Ferroic Functional Materials». *Springer Verlag* (2018).
4. J. Schröder og D.C. Lupascu. *Ferroic Functional Materials*. Springer Verlag (2018)

Hvor går fysikkfaget i skolen?

Refleksjoner i høringsprosessen på utkast til ny læreplan

Hva er det viktigste elevene bør lære i fysikkfaget i videregående skole? Ny læreplan i fysikk skal vedtas våren 2021. Her gir jeg en oversikt over prosessen med utvikling av ny læreplan og kommenterer høringsutkastet fra oktober 2020.

Ellen Karoline Henriksen Fysisk institutt, UiO

Fagfornyelsen: dybdeløring, tverrfaglige temaer, kjerneelementer og kompetansemål

Fagfornyelsen, en gjennomgripende reform av læreplanene i alle fag på alle trinn i norsk skole, nærmer seg sluttføring og har nå kommet fram til programfagene som elever kan velge på studiespesialisierende program i videregående skole.

Mye av grunnlaget for Fagfornyelsen ble utmeislet i NOU 2015:8, *Fremtidens skole. Fornyelse av fag og kompetanser* [1], der dybdeløring og progresjon gjennom skoleløpet var sentrale prinsipper og der det ble anbefalt at læreplanen skulle inneholde færre kompetansemål enn i dag. Det konkrete arbeidet med utvikling av nye læreplaner bygger på Meld. St. 28 (2015–2016), *Fag – Fordypning – Forståelse — En fornyelse av Kunnskapsløftet* [2]. Det var et mål å unngå stofftrengsel og gi elevene tid til å fordype seg.

Et sentralt aspekt i fagfornyelsen er utvelgelsen av tre tverrfaglige temaer som skal inkluderes på tvers av fag. Disse er *folkehelse og livsmestring, demokrati og medborgerskap* og *bærekraftig utvikling*. De to sistnevnte er eksplisitt inkludert i det foreliggende høringsutkastet for læreplan i fysikk. Videre ble det i første fase av læreplanarbeidet definert en håndfull *kjerneelementer* i hvert fag. Meld. St. 28 (s. 34) forklarer at «kjerneelementene i et fag er det elevene må lære for å kunne mestre og anvende faget, det mest betydningsfulle faglige innholdet elevene skal arbeide med i oppløringen». Ideen om kjerneelementer er inspirert av læreplanarbeid i USA og Storbritannia, der de bruker betegnelser som «practices, crosscutting concepts and core ideas» [3] og «big ideas in science» [4].

For fysikkfaget ble følgende kjerneelementer fastlagt i 2019:

- Praksiser og tenkemåter i fysikk
- Energi og energioverføring
- Krefter og felt
- Materie, tid og rom
- Bølger og stråling

Siden 2006 er norske læreplaner formulert i form av et sett med *kompetansemål* som beskriver hva oppløringen har som mål at elevene skal kunne.

Høringsutkastet til læreplan i fysikk: Få og overordnede kompetansemål

Læreplanen for fysikk har tidligere vært gjennom to innspillsrunder, og et høringsutkast ble offentliggjort i oktober 2020 med høringsfrist 28. januar 2021 [5]. Høringsutkastet inneholder en generell omtale av faget, beskrivelse av kjerneelementer og grunnleggende ferdigheter, og kompetansemål for fysikk 1 og 2 (se tabell 1).

Det mest slående ved høringsutkastet er at det virkelig har tatt på alvor Kunnskapsdepartementets prinsipp om at antall kompetansemål skal holdes lavt: Antall kompetansemål er redusert fra 47 i gjeldende læreplan til 24 i høringsutkastet. Målene er svært åpent formulert. Der elevene ifølge gjeldende plan skal «definere og regne med begrepene frekvens, periode, bølgelengde og bølgefart, og forklare kvalitativt bøyings- og interferensfenomener», skal de ifølge høringsutkastet «utforske hva som skjer når bølger møtes, og forklare hvordan dette resulterer i observerbare fenomener». Der de i dag skal «identifisere kontaktkrefter og gravitasjonskrefter som virker på legemer, tegne kraftvektorer og bruke Newtons tre lover», skal de ifølge høringsutkastet «forstå sammenhenger mellom krefter og bevegelser, og bruke dem til å gjøre beregninger».

En læreplan med såpass få og åpent formulerte kompetansemål er ikke uproblematisk, noe som også diskuteres i Meld. St. 28 (s. 43): «I høringen av NOU 2015: 8 pekes det på mulige utfordringer ved å formulere færre og mer overordnede kompetansemål i læreplanene. Dersom resultatet er enda

Tabell 1. Kompetansemålene

Kompetansemålene i Utdanningsdirektoratets utkast til ny læreplan i fysikk, høringsutkast av 30. oktober 2020 [5].

| FYSIKK 1 | FYSIKK 2 |
|---|--|
| planlegge og gjennomføre forsøk, analysere data og trekke konklusjoner | planlegge, gjennomføre og videreutvikle forsøk, og analysere data og beregne usikkerhet for å vurdere gyldigheten av funn |
| vurdere, bruke og lage modeller til å beskrive og forutsi fysiske fenomener | gjøre rede for hvordan internasjonalt samarbeid har bidratt til å utvikle kompetanse i fysikk og hvilke konsekvenser dette har fått |
| vurdere ulike påstander og argumenter om energi og klima i samfunnsaktuelle problemstillinger | bruke numeriske metoder og programmering til å utforske og modellere fysiske fenomener |
| utforske og analysere rettlinjert bevegelse | utforske, beskrive og modellere bevegelse i to dimensjoner |
| forstå sammenhenger mellom krefter og bevegelser, og bruke dem til å gjøre beregninger | gjøre rede for hvordan krefter kan forårsake krumlinjet bevegelse, og bruke dette i beregninger |
| bruke numeriske metoder og programmering til å modellere og utforske bevegelse i situasjoner der akselerasjonen ikke er konstant | beskrive ulike typer felt og bruke disse til å gjøre rede for krefter på objekter med masse og ladning |
| forstå konsekvenser av at bevegelsesmengde og energi er bevart, og bruke dette i beregninger | gjøre rede for energibevaring i sentralfelt og bruke dette til å beregne bevegelse i slike felt |
| gjøre rede for ulike former energi kan opptre i, utforske hvordan energi kan gå fra en form til en annen, og vurdere anvendelser av dette | utforske ulike måter å indusere elektromotorisk spenning og strøm, forklare resultatene og vurdere anvendelser av dette |
| utforske hva som skjer når bølger møtes, og forklare hvordan dette resulterer i observerbare fenomener | beskrive de sentrale prinsippene i den spesielle og generelle relativitetsteorien og forklare hvordan disse har endret vår forståelse av tid, rom og felt |
| utforske, sammenligne og beskrive stråling fra legemer med ulik temperatur og overflate | forklare hva som skiller kvanteobjekter fra klassiske objekter, og beskrive situasjoner der kvanteeffekter observeres |
| modellere strålingsbalansen til jorda og vurdere hvordan endringer på jordoverflaten og i atmosfæren påvirker denne balansen | utforske en selvvalgt teoretisk eller praktisk problemstilling relatert til et kjerneelement i faget, og presentere viktige prinsipper, sammenhenger og konsekvenser |
| beskrive ulike atommodeller og forklare hvordan observerbare effekter støtter eller utfordrer dem | |
| gjøre rede for hvordan strukturer og prosesser i atomene avgjør hvordan stjerner dannes og utvikler seg | |

mer overordnede kompetansemål, kan resultatet bli et så høyt abstraksjonsnivå at det blir for krevende for lærere og elever å forstå hva læreplanen forventer.» Stortingsmeldingen anbefaler likevel at antall kompetansemål holdes lavt, samtidig som det presiseres (s. 46) at læreplanene skal gi tydeligere retning for lærernes valg av innhold i opplæringen.

Spørsmålet er om det er mulig å forene det å gi tydeligere retning for innhold i opplæringen samtidig som man formulerer færre og mer åpne kompetansemål? Vil dette faktisk minske stofftrengselen, eller er det snarere slik at kortfattede læreplaner gir tykke lærebøker og lange pensumlister fordi lærere og lærebokforfattere vil være sikre på å få med alt som kan tenkes å dukke opp på sentralgitt eksamen?

Et definerende trekk ved fysikk som vitenskap er at den har utviklet svært presise fagbegreper som gjør det mulig å beskrive og utforske fenomener. Dette er også beskrevet i læreplanutkastet under «Grunnleggende ferdigheter», der det blant annet står at «å skrive i fysikk innebærer å formidle faglig innhold på en strukturert og tydelig måte med bruk av fagterminologi, symboler og vitenskapelig notasjon». Hvorfor er ikke denne fagterminologien benyttet i formuleringen av kompetansemålene?

Jeg frykter at Utdanningsdirektoratet har laget for trange rammer for læreplangruppa og er usikker på om en såpass åpent formulert læreplan vil være et godt arbeidsverktøy for lærere. Høringsuttalelser som er kommet inn i den pågående høringsrunden tyder i stor grad på dette; mange av de videregående skolene uttrykker at de ønsker mer spesifikke kompetansemål og at det særlig for fysikk 2 blir vanskelig å vite hva elevene skal testes i på eksamen.

Stor frihet til lærere – og stor makt til lærebokforfattere og eksamensnemnd

Hovedgrunnene til å fastsette få og åpne kompetansemål er altså at elevene skal få tid til fordypning og oppnå dybdelæring, og at skoler og lærere lokalt skal ha stor frihet i å tilrettelegge undervisningen for sine elever. Frihet til lærere og lokal skoleledelse er i seg selv et godt prinsipp, særlig i Norge hvor vi har velutdannede og erfarne fysikklærere: I 2015 hadde omkring 86 % av fysikklærerne mastergrad, og de hadde gjennomsnittlig undervist i fysikk i ca. 14 år [6].

Likevel er det en kjent sak at lærere i stor grad støtter seg til et læreverk når de planlegger undervisningen. Frihet for lærerne kan dermed i praksis bety stor innflytelse for forlag og lærebokforfattere. Dette behøver ikke være negativt; Norge har også lenge hatt gode lærebøker i fysikk, og alt tyder på at dette vil fortsette. Men fagkulturen i

fysikk er ganske konservativ. Mange lærere holder seg til det velprøvde, og fagene har tunge tradisjoner for hva og hvordan elever skal lære. Med en åpent formulert læreplan kan det være lett å gjøre ting slik man alltid har gjort. Kombinert med at lærebokforfatterne har svært kort tid på seg til å ferdigstille nye læreverk etter at læreplanen er endelig vedtatt, kan dette bety at man gjør minst mulig endringer i eksisterende læreverk.

Den store friheten som ligger i den foreslåtte læreplanen, kan altså i praksis føre til man legger seg tettest mulig opp til den «tradisjonelle skolefysikken» innenfor rammene av kompetansemålene. Her står fagfornyelsen i kontrast til forrige læreplanprosess, K06, som satte tydelige krav til å innarbeide helt nye temaer og vinklinger i fysikkfaget: Halvlederteknologi, digitalisering av lyd, sammenfiltrede fotoner og generell relativitetsteori var nye temaer som kom inn i læreplanen den gang og stilte konkrete krav til fornyelse av fysikkfaget (dog ikke uten en del diskusjon og motforestillinger).

En annen sterk påvirkningsfaktor er eksamensordningen. Ifølge høringsutkastet skal gjeldende ordning med lokalgitt, muntlig eksamen i fysikk 1 og sentralgitt, skriftlig eksamen i fysikk 2 videreføres. Utformingen av eksamen blir i praksis avgjørende for hva som vektlegges av lærestoff, spesielt i fysikk 2. Med den foreslåtte åpne formuleringen av kompetansemål vil eksamensnemnda bli den andre sterke påvirkningsfaktoren i tillegg til lærebokforfatterne. Dette er også en bekymring som uttrykkes i mange av de innsendte høringsvarene til læreplanutkastet.

Satt litt på spissen kan man spørre om Utdanningsdirektoratet i stor grad har overlatt utformingen av norsk skolefysikk til lærebokforfatterne og eksamensnemnda – og om dette faktisk vil gi den ønskede fornyelsen av fysikkfaget?

En kikk på læreplanene til noen andre land¹, alle vedtatt i perioden 2013–2018 og dermed nyere enn den gjeldende norske fra 2006, viser at de alle er vesentlig mer detaljerte enn det nye, norske høringsutkastet. Mange inneholder detaljerte innholdslistene og lister over formler. Det ser dermed ikke ut til å være noen internasjonal trend at læreplaner i fysikk formuleres så åpent som det norske høringsutkastet. NOU 2015:8 (s. 63) oppgir Sverige som eksempel på et land som i de siste årene har redusert antall mål i læreplanen. Likevel inneholder

1 Sverige: www.skolverket.se/download/18_189c87ae1623366ff374c3/1521539980000/Physics-swedish-school.pdf
Danmark: www.retsinformation.dk/eli/lta/2013/776#Bil23
Skottland: www.sqa.org.uk/files_ccc/AHPysicsCourseSpec.pdf
Nederland: www.examenblad.nl/examenstof/syllabus-2019-natuurkunde-vwo/2019/vwo/f=/natuurkunde_2_versie_vwo_2019.pdf



Figur 1. Fysikkelever jobber med nettbaserte læringsressurser i moderne fysikk. (Begge foto: ReleKvant-prosjektet, www.viten.no/kvantefysikk)

dagens svenske fysikk læreplan vesentlig flere kompetansemål enn det norske høringsutkastet.

Det finnes fordeler ved å bygge opp læreplanen med få og åpne kompetansemål. Det kan føre til mindre fragmentert undervisning og læring og hjelpe elevene med å sette stoffet sammen til en mer helhetlig forståelse. For eksempel kan en integrert tilnærming til krefter og felt (se neste avsnitt) bidra til at elevene ser sammenhenger mellom elektriske felt og gravitasjonsfelt, ladning og masse. Åpne kompetansemål gir også skoler og lærere mer lokalt handlingsrom og derfor bedre muligheter til å tilpasse undervisningen til sine elever. Dette krever samtidig mye av lærerne, spesielt i møte med en sentralgitt eksamen de skal forberede elevene sine på.

Temaer og kompetansemål i læreplanen

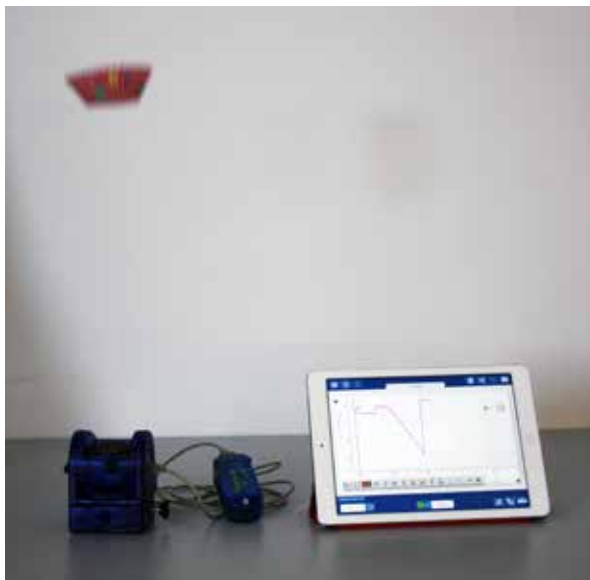
I alt gir kompetansemålene i høringsutkastet, sammenlignet med gjeldende læreplan, inntrykk av et noe økt fokus på klassisk fysikk, økt valgfrihet og et visst fokus på bærekraft, mens vi ser en nedtoning av teknologi og av moderne fysikk.

Innenfor **klassisk fysikk** har høringsutkastet langt på vei lyktes med å formulere brede kompetansemål som likevel gir tydelige føringer for hva elevene skal arbeide med. Dette gjelder for eksempel målet «beskrive ulike typer felt og bruke disse til å gjøre rede for krefter på objekter med masse og ladning». Her legges det opp til at elevene skal utvikle en bred dybdeforståelse av feltbegrepet og hvordan dette henger sammen med krefter. Kompetansemålet «utforske ulike måter å indukere elektromotorisk spenning og strøm, forklare resultatene og vurdere anvendelser av dette» knytter elektromagnetisk induksjon til energiproduksjon og dermed til de delene av læreplanen som handler om bærekraftige løsninger for fremtiden. Samtidig har veldig mange av de videregående skolene som har uttalt seg i høringsprosessen, påpekt at det er

vanskelig å arbeide med dette kompetansemålet i fysikk 2 når det ikke står noe (eksplisitt) om strøm, spenning eller elektriske kretser i planen.

Et ankepunkt mot gjeldende læreplan er at energi- og termofysikk var svakt representert, noe som også ga tydelig utslag i form av svake resultater i den internasjonale TIMSS Advanced-undersøkelsen [6]. Denne mangelen er rettet opp i foreliggende høringsutkast, der energifysikk er med og dessuten er knyttet til det tverrfaglige temaet *bærekraftig utvikling* gjennom kompetansemålene «modellere strålingsbalansen til jorda og vurdere hvordan endringer på jordoverflaten og i atmosfæren påvirker denne balansen» og «sette seg inn i og vurdere kvaliteten på argumentasjon brukt i samfunnsaktuelle problemstillinger knyttet til energi og klima». Dette er mål som passer godt i et framtidrettet fysikkfag.

En mindre andel av kompetansemålene i læreplanutkastet omhandler **moderne fysikk og astrofysikk**. Her mener jeg også at læreplangruppa har lyktes dårligere med å formulere brede kompetansemål som samtidig gir mening. Det gjelder for eksempel punktet «beskrive ulike atommodeller og forklare hvordan observerbare effekter støtter eller utfordrer dem». Er det snakk om ulike atommodeller som har vært rådende gjennom historien; er det snakk om konkurrerende modeller (i så fall hvilke?), eller er det snakk om modeller som kan forklare ulike fenomener (for eksempel Bohrs atommodell som forklaring på spektrallinjer fra hydrogen)? Kompetansemålet «gjøre rede for hvordan strukturer og prosesser i atomene avgjør hvordan stjerner dannes og utvikler seg» er også vanskelig å tolke. Hvilke «strukturer og prosesser» er det snakk om? Det er dessuten uheldig at dette er det eneste stedet hvor astrofysikk eksplisitt nevnes i planen – og da som en slags anvendelse av kjernefysikk. Et såpass svakt fokus på astrofysikk og kosmologi ▶



```
#Eulers metode
for i in range(N-1):
    a[i]=g-(k/m)*v[i]**2 #utledet fra Newtons 2. Lov
    v[i+1]=v[i]+a[i]*dt
    s[i+1]=s[i]+v[i]*dt
    t[i+1]=t[i]+dt
```

mener jeg er svært uheldig for elevenes motivasjon og dermed for rekrutteringen til fysikkfaget (mer om det nedenfor). Internasjonalt har fokuset på kvantefysikk i skolen økt de siste årene [7], og det er også en del oppmerksomhet internasjonalt om relativitetsteori som tema i skolen; se for eksempel [8]. I dette perspektivet kan det foreliggende læreplanutkastet ses på som et skritt tilbake til mer tradisjonelt fysikkinnhold.

I høringsutkastet til ny plan er **teknologi og anvendelser** i liten grad nevnt eksplisitt, med unntak av kompetansemålene om energiproduksjon og energiovergang. Slike aspekter kan selvsagt godt tas inn under en del av de vide målene. I beste fall kan dette gi elever og lærere mulighet til å fordype seg i eksempler som de selv har kunnskap om eller interesse for; i verste fall kan det hende at viktige anvendelser av fysikk blir utelatt. Dette gjelder for eksempel halvlederteknologi (som også etterlyses i mange av høringsuttalelsene) og medisinsk avbildningsteknologi som sentrale eksempler, og det kan ha alvorlige konsekvenser for motivasjon og rekruttering til fysikkfaget å utelate slike sentrale eksempler på hvordan faget brukes og hvilken betydning det har for livet vårt.

Læreplanutkastet har et tydelig fokus på **praksiser og tenkemåter i fysikkfaget**: Elevene skal gjennomføre forsøk og analysere data, arbeide med modeller av fysiske fenomener og bruke programmering som verktøy. Forøvrig er programmering nå innført gjennom hele skoleløpet, slik at vi kan anta at elevene som kommer til fysikkfaget om noen år allerede behersker enkel

Figur 2. Ifølge høringsutkastet til ny læreplan skal fysikk1-elevene «bruke numeriske metoder og programmering til å modellere og utforske bevegelse i situasjoner der akselerasjonen ikke er konstant». Muffinsformer som faller i luft er et godt eksempel på en slik situasjon. Øverst beskrives bevegelsen med ultralydbasert posisjonssensor og datalogger; nederst en for-løkke i programmeringsspråket Python der Eulers metode brukes til å modellere bevegelsen. (Øverste foto: Carl Angell. Nederst: skjermdump fra UiO sitt opplæringstilbud i programmering for realfagslærere i videregående skole, ProFag:VGS (https://uio-profag.github.io/vgs/endrer/fall_med_luftmotstand))

programmering. Haraldsrud og Tellefsen [9, 10] argumenterte i FFV for hvordan programmering kan støtte læring i fysikkfaget og ga noen eksempler på hvordan enkle programmeringsaktiviteter kan inngå. Det er også utført flere masteroppgaver i de siste to årene som dreier seg om hvordan programmering kan inngå i norsk skolefysikk.

Når det gjelder vitenskapssamfunnet og hvordan det fungerer, er fokuset i gjeldende læreplan på hvordan vitenskapen kan gå framover gjennom vitenskapelige strider. I høringsutkastet er dette erstattet med at elevene skal kunne «gjøre rede for hvordan internasjonalt samarbeid har bidratt til å utvikle kompetanse i fysikk og hvilke konsekvenser dette har fått». Dette mener jeg er et godt grep: Ved å fokusere på vitenskap som et fellesskapsprosjekt framfor en arena for strider, framhever høringsutkastet at fysikken utvikles gjennom målrettet innsats fra et mangfold av personer i et stort, internasjonalt forskersamfunn.

Her er det nærliggende å tenke på CERN- eller LIGO-samarbeidet som aktuelle eksempler som samtidig gir rom for å fokusere på dagsaktuell fysikk. Fokuset på at elevene skal forstå hvordan vitenskapen fungerer og hvordan vitenskapelig kunnskap blir til, er likevel tydelig svakere i høringsutkastet enn i gjeldende læreplan. Dette er et tankekors i en verden med økende skepsis til vitenskapsbasert kunnskap.

I fysikk 2 inneholder foreliggende læreplanutkast et selvstendig, utforskende arbeid. Elevene skal «utforske en selvvalgt teoretisk eller praktisk problemstilling relatert til et kjerneelement i faget, og presentere viktige prinsipper, sammenhenger og konsekvenser». Dette kan være motiverende for mange elever, det åpner for differensiering og tilpasning, og det er en god forberedelse til de mer selvstendige arbeidsformene som venter elevene i høyere utdanning.

Hva er viktig i et fysikkfag for det 21. århundre?

Et fysikkfag for framtida må gi elevene solide basis-kunnskaper innen sentrale deler av faget slik at de

kan bruke disse både i fysikkfaglige og tverrfaglige sammenhenger, det må vise hvordan fysikk brukes både til praktisk problemløsning og til å utforske de store spørsmålene innen grunnforskning, og det må motivere elever til å fortsette med fysikk. Kjerneelementene som er foreslått, dekker sentrale prinsipper i fysikk og vil gjøre elevene i stand til å bruke fysikken som samfunnsborger og forberede dem på videre studier.

Men hvis vi skal få en tilstrekkelig stor og mangfoldig elevgruppe som velger faget, som fortsetter fra fysikk 1 til fysikk 2 og som velger seg fysikkrelatert høyere utdanning, så må faget oppleves relevant og motiverende. Andelen elever som fortsetter videre fra fysikk 1 til fysikk 2 er synkende og lavere enn den tilsvarende andelen for de andre realfagene. Mens jenteandelen i fysikk 1 har steget jevnt de siste 20 årene slik at kjønnsfordelingen nå er tilnærmet jevn, har jenteandelen i fysikk 2 ligget stabilt på under 30 % i samme periode.

For å treffe et større mangfold av elever og motivere flere til å fortsette med fysikk er det særlig to grep som peker seg ut basert på fagdidaktisk forskning. For det første bør astrofysikk få en tydeligere plass i fysikkfaget. Verdensrommet er det temaet som engasjerer og motiverer elever mest i naturfaget. Astrofysikken er også et forskningsfelt som viser fram fysikken som en dynamisk vitenskap i rask utvikling. Å vise fram dette motiverer elever: Fysikken ble ikke avsluttet for hundre år siden; det er fortsatt mulig å være med på å gjøre nye oppdagelser og skape ny innsikt innen faget! For det andre er det en betydelig elevgruppe som motiveres av å se hva fysikk kan brukes til i praksis. I læreplanutkastet presiseres anvendt fysikk i forbindelse med energi og elektromagnetisk induksjon, men vi mener læreplanen bør forplikte skolen til å vise elevene en større bredde av anvendelser. Medisinske avbildningsteknikker som røntgen, CT, ultralydabildning og PET vil være en god måte å vise anvendelser av sentrale fysiske prinsipper som også har tilknytning til andre temaer i læreplanen (bølger, stråling, atomfysikk, kvantefysikk).

Hvordan gjøre læreplanen til et godt arbeidsverktøy for lærere og elever?

Jeg mener at når den endelige versjonen av fysikk-læreplanen skal utarbeides, bør Utdanningsdirektoratet:

- være noe mer spesifikk i kompetansemålene, særlig innenfor fysikk 2, der det er sentralt skriftlig eksamen, og innen moderne fysikk, der en del av formuleringene er uklare. Det bør tillates en moderat økning i antall kompetansemål – ikke for å ta inn

mer stoff, men for å øke presisjonen.

- eksplisitt nevne astrofysikk fordi dette er et område av fysikken som viser fysikken som en dynamisk vitenskap i utvikling og som mange elever blir motivert av.
- tydeliggjøre at strøm, spenning og energiomsetning i elektriske kretser er med i læreplanen.
- gi tydeligere føringer for at anvendelser av fysikk innen viktige områder som for eksempel medisinsk avbildningsteknologi skal være en del av faget.
- styrke fokuset på hva som kjennetegner vitenskapelig kunnskap i fysikk og hvordan slik kunnskap blir til.

Med noen slike justeringer bør den nye læreplanen kunne bli et godt verktøy for arbeidet rundt om i landets fysikklasserom. ■

Takk

Takk til Maria Vetleseter Bøe, Universitetet i Oslo, for nyttige innspill og diskusjoner av innholdet i denne artikkelen.

Referanser

1. Kunnskapsdepartementet. NOU 2015:8 *Fremtidens skole: fornyelse av fag og kompetanser*. Oslo (2015).
2. Kunnskapsdepartementet. Meld. St. 28 (2015–2016) *Fag – Fordypning – Forståelse — En fornyelse av Kunnskapsløftet*. (2016)
3. National Research Council. *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*: National Academies Press (2012).
4. W. Harlen. *Principles and big ideas of science education: Association for Science Education*. (2010)
5. Utdanningsdirektoratet: «Høring fysikk». Lenke: <https://hoering-publisering.udir.no/1487>
6. L.S. Grønmo, A. Hole & T. Onstad. *Ett skritt fram og ett tilbake. TIMSS Advanced 2015*. Oslo: Cappelen Damm Akademisk (2016).
7. H. Stadermann, E. van den Berg & M. Goedhart. «Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic». *Physical Review Physics Education Research* 15(1) (2019), 010130.
8. D. Blair & M. Kersting (red.). *Teaching Einsteinian Physics in Schools: An Essential Guide for Teachers in Training and Practice*. Singapore: Routledge (2021).
9. A.D. Haraldsrud & C.W. Tellefsen. «Debatt: Programmering og fagfornyelsen i skolen». *Fra Fysikkens Verden* 80(3) (2018a), s. 76–77.
10. A.D. Haraldsrud & C.W. Tellefsen. «Programmering – for fysikkens skyld». *Fra Fysikkens Verden*, 80(3) (2018b), s. 70–75.

RETURADRESSE:

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

Styret i Norsk Fysisk Selskap

President

Professor Asle Sudbø, Institutt for fysikk, NTNU
E-post: asle.sudbo@ntnu.no

Visepresident

Professor Sunniva Siem, Fysisk instiutt, UiO, Kjerne- og energifysikk
E-post: sunniva.siem@fys.uio.no

Styremedlemmer

Forsker Annett Thøgersen, SINTEF Oslo, kondenserte fasers fysikk og atomfysikk
Førsteamanuensis Magnus Borstad Lilledahl, NTNU, biofysikk
Postdoktor Audun Theodorsen, UiT, atmosfære-, rom- og plasmafysikk
Professor Håvard Helstrup, HiB, subatomær fysikk og astrofysikk
Professor Jon Samseth, OsloMet, industri- og energifysikk
Professor Astrid Aksnes, NTNU, optikk
Lektor Kaja Nordby, Kongsbakken vgs., Norsk Fysikklærerforening

Vara

Førsteamanuensis Arne Auen Grimenes, Fakultet for realfag og teknologi, NMBU

Adresse

Norsk Fysisk Selskap
Institutt for fysikk, NTNU
7491 Trondheim
Internettadresse: www.norskfysisk.no

Sekretær: Haakon Thømt Simensen
E-post: nfs.styret@gmail.com
Bankgiro: 7878.06.03258
Org.nr.: 940 340 829

Bedriftsmedlemmer av NFS

Vi takker for støtten fra våre bedriftsmedlemmer:



UiT / NORGES ARKTISKE
UNIVERSITET



UiO : Universitetet i Oslo

ISSN-0015-9247