

Fra Fysikkens Verden

NR. 1 – 2018
80. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP

**Nytt
internasjonalt
einingsystem**



Les også om:

- Joseph Fourier
- Foton-foton-spredning
- Ekvivalensprinsippet
- Lyn

Nr. 1 – 2018

80. årgang

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:

Professor Øyvind Grøn
OsloMet – storbyuniversitetet
og Fysisk institutt, UiO
E-post: oyvind.gron@hioa.no

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

Redaksjonssekretær:

Maria Hammerstrøm
Institutt for teoretisk astrofysikk, UiO
E-post: maria.hammerstrom@astro.uio.no

Redaksjonskomité:

Professor Odd-Erik Garcia, Institutt for fysikk, UiT
Professor Ellen K. Henriksen, Fysisk institutt, UiO
Professor Per Osland, Inst. for fysikk og teknologi, UiB

Layout og sats:

Maria Hammerstrøm

Trykkeri:

Oslo Sats, repro og montasje A/S

Ekspedisjonens adresse:

Fra Fysikkens Verden
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo
Tlf.: 22 85 64 28 / 22 85 56 68
Fax.: 22 85 64 22 / 22 85 56 71
Internettadresse: www.norskfysikk.no/nfs/

Abonnere:

Fra Fysikkens Verden kommer ut 4 ganger årlig.
Abonnement tegnes på postadressen ovenfor
eller på følgende e-postadresse:

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 <i>Øyvind G. Grøn</i>	4
Velkommen til ny president og nytt styre i NFS <i>Åshild Fredriksen</i>	4
Asle Sudbø er ny president for Norsk Fysisk Selskap <i>Emil J. Samuelsen</i>	5
Yaras Birkelandpris i fysikk <i>Asle Sudbø</i>	5
Landskonferanse om fysikkundervisning <i>Morten Trudeng</i>	5

Fysikknytt

Har jorda en manke av hårete mørk materie? <i>Øyvind G. Grøn</i>	6
Deteksjon av foton-foton-spredning <i>Øyvind G. Grøn</i>	8
Ny test av ekvivalensprinsippet <i>Øyvind G. Grøn</i>	10
Lyn kan skape positroner <i>Øyvind G. Grøn</i>	12

Artikler

Desimalteiknet – komma eller punktum? <i>Emil J. Samuelsen</i>	12
SI – det nye internasjonale einingssystemet <i>Aasmund Sudbø</i>	14
250-årsjubileum for Joseph Fourier <i>Emil J. Samuelsen</i>	20
Bokanmeldelse: Alv Egeland: Kristian Birkeland – Naturvitenskapsmann og industriforsker <i>Øyvind G. Grøn</i>	24

Gratulerer

Jan Myrheim <i>I.H. Brevik, H. Høgåsen, J.S. Høye og J.M. Leinaas</i>	26
Eivind Hiis Hauge <i>E.J. Samuelsen og K. Fossheim</i>	27

Indeks for FFV 2017 finner du på www.norskfysikk.no/nfs/FFV/ffv/

Hovedartikkelen i dette nummeret er presentasjonen av det nye SI-systemet. Det er mer enn en revisjon av det gamle SI-systemet som vi var vant til og som var basert på det gamle MKSA-systemet med fysiske prototyper av lengdestaver og kilogramlodd i Paris. Tidene har forandret seg, og kravene til presisjonen i prototypene er kraftig skjerpet. Dette har ført til at grunnenhetene har måttet få nye definisjoner. Aasmund Sudbø gir i dette nummeret av *FFV* en viktig oppdatering av hvordan det nye SI-systemet er bygget opp, og av hva som nå er gjeldende enheter.

I dette nummeret markerer vi 250-årsjubileumet til den franske fysikeren og matematikeren Joseph Fourier med en artikkel av Emil Samuelson om Fouriers liv og virke. Det er flere store fysikkjubileer i 2018 som vil bli omtalt i *FFV* i løpet av året.

Vi har ellers nyhetsspalten Fysikknytt i *FFV*, og ber om bidrag. Det vil bli mer variasjon, og formodentlig mer spennende for leserne, hvis flere enn redaktørene skriver i *FFV*. I Fysikknytt-spalten oppsummeres nye vitenskapelige resultater og forskningsprosjekter. Kanskje har det skjedd nye ting innen ditt fagfelt som du mener flere kan ha glede av å lese om?

Kanskje kunne vi innføre flere faste spalter, for eksempel Fysikkhistorie og Skolefysikk. Men vi er avhengig av bidrag fra mange hvis slike spalter skal fungere.

For øvrig håper vi å kunne utlyse en skrivekonkurranse med premier for de tre beste bidragene. Se forhåndsannonsering nedenfor. Kjære lesere, vi oppfordrer dere til å skrive i *Fra Fysikkens Verden!*



Øyvind G. Grøn



Emil J. Samuelson

Skrivekonkurranse med premier i *FFV*!

Under forutsetning at styret i NFS vil støtte prosjektet økonomisk, vil Redaksjonen arrangere skrivekonkurranse, der hensikten er å inspirere flere til å skrive for bladet.

Det blir lagt opp til tre pengepremier. En jury på fire personer vil vurdere innsendte arbeider, innkomet før 1/9. Standard artikkellengde er på 4–6 sider i bladet. Se Retningslinjer for bidragsytere på side 2 for flere detaljer. Mer informasjon kommer i neste nummer.

Velkommen til ny president og nytt styre i NFS

Som rapportert fra årsmøtet i *FFV* 3/2017, ble det valgt ny president og nytt styre som startet sin periode ved årsskiftet. Styret består nå av:

- *President:* Professor Asle Sudbø, NTNU
- *Visepresident:* Professor Sunniva Siem, UiO
- Forsker Annett Thøgersen, SINTEF Oslo, kondenserte fasers fysikk og atomfysikk
- Førsteamanuensis Magnus Borstad Lilledahl, NTNU, biofysikk
- Professor Åshild Fredriksen, UiT, atmosfære-, rom- og plasmafysikk
- Professor Håvard Helstrup, HiB, subatomær- og astrofysikk
- Professor Jon Samseth, OsloMet, industri- og energifysikk

- Professor Olav Gaute Hellesø, UiT, optikk, medlem frem til april 2018
- Lektor Morten Trudeng, Asker VGS, Norsk Fysikklærerlag
- Førsteamanuensis Arne Auen Grimenes, NMBU, fast vara

Med dette vil jeg takke avtroppende styremedlemmer for godt samarbeid og innsats for Selskapet i min periode som president. Jeg ønsker den nye presidenten og det nye styret lykke til med arbeidet i perioden som kommer!

Åshild Fredriksen
avtroppende president

Asle Sudbø er ny president for Norsk Fysisk Selskap

Asle Sudbø er professor i teoretisk faststoffysikk ved Institutt for fysikk, NTNU frå 1994.

Han tok sivilingeniøreksamen ved NTH i 1985, og tok doktorgrad ved Brown-universitetet i USA i 1990. Sudbø har ein omfattande vitenskapleg produksjon og har mottatt ei rekke nasjonale prisar. Han har vore hovudarrangør og medlem av styringskomitear for eit stor tal internasjonale og nasjonale konferansar, mellom anna for møte for Norsk Fysisk Selskaps gruppe for kondenserte fasar 1996–1998, og for Nordiske fysikk dagar i regi av Norsk Fysisk Selskap i 2015. I 2009–2013 var han leiar for Institutt for fysikk ved NTNU.

Sudbø vart saman med nytt styre for Norsk Fysisk Selskap valde på årsmøtet i NFS i Tromsø 8. august 2017.



Yaras Birkelandpris i fysikk

Yaras Birkelandpris deles ut på grunnlag av et doktorgradsarbeid utført ved et norsk universitet. Prisen alternerer mellom fysikk og kjemi. I 2018 deles prisen ut i fysikk.

Aktuelle kandidater må ha avlagt doktorgrad i løpet av de to siste år. Avhandlingen skal være i samsvar med den ånd som man finner i Kristian Birkelands forskning. Birkelands forskervirk-somhet var ledet av grunntankene innovasjon, grensesprenging, nyskaping, kobling mellom teori og empiri, tverrfaglighet, teknologisk nyvinning og miljørelevans. Det skal også legges vekt på at doktorgradsarbeidet skal ligge i den internasjonale forskningsfronten.

Forskningsgrupper, veiledere og fast vitenskapelige ansatte ved norske universitet kan fremme forslag. Forslaget skal inneholde navn på kandidaten, hvor arbeidet er utført, veileder, kandidatens

nåværende arbeidsplass, en fyldig beskrivelse av doktorgradsarbeidet og en vurdering av arbeidets relevans innenfor dagens forskning.

Prisen består av et pengebeløp på kr. 100 000 og et diplom. Prisutdelingen skjer i forbindelse med Birkelandforelesningen 20. september 2018.

Forslag sendes til Norsk Fysisk Selskap innen **15. mai 2018**. Kopi av doktoravhandlingen skal vedlegges, enten i papirutgave (3 eksemplarer) eller som et PDF-dokument.

Adresse:

Professor Asle Sudbø
Institutt for fysikk NTNU, 7491 Trondheim
e-postadresse: asle.sudbo@ntnu.no

Statuttene for Yaras Birkelandpris:

norskfysikk.no/nfs/nfs/priser/yara_statutter.php

Landskonferanse om fysikkundervisning

Norsk fysikklærerforening (NFL) arrangerer landskonferanse om fysikkundervisning 5.–8. august 2018 på Holmen fjordhotell i Asker. Fysikklærere i hele skoleverket, fra grunnskole til universitet ønsker vi skal delta på konferansen.

Mål for konferansen:

- Faglig oppdatering
- Utveksle undervisningserfaringar og arbeidsmetodar
- Drøfte læreplanutvikling, fagets innhold og form
- Styrke undervisninga og fagets plass i utdanningssystemet

Program – flerfaglig fysikk:

1. Fysikkens betydning inn mot ulike fagområder som er sentrale i løsningen av fremtidens utfordringer.
2. Datamaskinens betydning for utviklingen av fysikkfaget – må vi egentlig se bort fra friksjon og luftmotstand lenger?
3. Analoge og digitale forsøk som gir dybdelæring i fysikkfaget.

Arbeidsmåtar: Foredrag, debatt, demonstrasjonsforsøk, uformelle aktiviteter, læremiddelutstilling.

Program og påmelding til konferansen blir lagt ut i februar på: www.fysikklarer.blogspot.no

Morten Trudeng, Leder NFL

Figur 1. Illustrasjon av hvordan jordas gravitasjonslinseeffekt for massive legemer forårsaker en manke av mørk materie rundt jorda.

Har jorda en manke av hårete mørk materie?

Nye beregninger av hvordan jorda virker som en gravitasjonslinse for mørk materie tyder på at dersom mørk materie eksisterer, så vil både jorda og andre massive legemer være omgitt av en hårete manke av mørk materie.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Mørk materie merker ikke noe til elektromagnetiske krefter. Derfor er den usynlig eller mørk. Den mørke materien avslører sin eksistens ved gravitasjonsvirkningene den har.

Man snakker om varm og kald mørk materie. Den varme beveger seg med nesten lyshastighet, slik nøytrinoene gjør, den kalde mye langsommere. På samme måte som nøytrinoer kan mørk materie bevege seg gjennom jorda uten å kolliderer med atomene som jorda består av. Men partiklenes baner avbøyes av jordas gravitasjonsfelt. Jorda virker som en gravitasjonslinse for den mørke materien.

Den gravitasjonelle linseeffekten

Ved å bruke den ytre Schwarzschildløsningen [1] kan man vise at lys som passerer i en avstand b fra sentrum av et legeme med Schwarzschildradius R_s avbøyes en vinkel

$$\theta = 2R_s/b. \quad (1)$$

Man kan se fra Figur 2 at $\tan \theta = b/F(b)$ der $F(b)$ er lensens brennvidde. Vinkelen θ er så liten at $\tan \theta$ kan erstattes med θ målt i radianer. Dermed fås

$$F(b) = b^2/2R_s. \quad (2)$$

For lys som passerer utenfor jorda er $b > R_E$ hvor $R_E = 6,37 \cdot 10^3$ km som gir $F(b) = 2 \cdot 10^{15}$ m. Jordas avstand fra sola kalles en astronomisk enhet, og er $1 \text{ AE} = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. Vi ser at lys som kommer parallelt inn mot jorda fokuseres over ti tusen astronomiske enheter fra jorda. Jorda har alt for liten masse til å fungere effektivt som en gravitasjonslinse.

Men jorda har en tilsvarende virkning på frie partikler. Hvis de går adskillig saktere enn lys, vil de avbøyes mye mer, og dersom vi tenker på sola som en gravitasjonslinse for slike partikler, vil brennpunktet ligge mye nærmere jorda. Akkurat som for lys som konsentreres i brennpunktet, vil tettheten av en strøm av materielle partikler som passerer jorda, forstørres ved brennpunktet.

Gravitasjonell linseeffekt, Schwarzschildløsningene og mørk materie

Den 25. november 2015 presenterte fysikeren G. Prézeau en artikkel [2] i tidsskriftet *Astrophysical Journal* der han undersøkte denne effekten. Ved å bruke den ytre Schwarzschildløsningen viste han at for partikler som beveger seg forbi jorda med en

hastighet v i forhold til jorda og passerer utenfor jorda i avstand b fra sentrum, avbøyes banene slik at jorda virker som en gravitasjonslinse med brennpunkter i avstand

$$F(b) = \frac{v^2}{c^2} \frac{b^2}{R_s} . \quad (3)$$

Prézeau antok at Melkeveien drar med seg den mørke materien, men at den ikke deltar i Melkeveiens rotasjonsbevegelse. Han satte derfor inn solsystemets hastighet på grunn av bevegelsen rundt Melkeveiens sentrum, $v = 220$ km/s. For $b > R_s$ fås da $F(b) > 2,5 \cdot 10^9$ m. Dette er bare 1/60 av jordas avstand fra sola.

Prézeau gjorde så en tilsvarende beregning for mørk materie som passerer gjennom jordas indre. Da brukte han den indre Schwarzschildløsningen og fant at brennpunktets avstand fra jordas sentrum er

$$F(b) = \frac{v^2}{c^2} \frac{4R_E^2 + b^2}{6R_s} . \quad (4)$$

For partikler som passerer nær jordas senter er $b \ll R_E$, og da fås $F(b) \cong 1,5 \cdot 10^6$ km som bare er en hundredel av jordas avstand fra sola. For mørk materie som går gjennom sola og fokuseres av den solare gravitasjonslinsen fås $F = 5 \cdot 10^4$ km som er inni sola.

Partikler som passerer gjennom jorda i økende avstand fra jordas sentrum, vil fokuseres lenger bak jorda. Det oppstår da et «hår» av mørk materie bak jorda. Prézeau har beregnet at ved «hårroten», dvs. i den enden av håret som er nærmest jorda, vil tettheten av den mørke materien bli forstørret med en faktor $M = (2R_E/1m)^{4/3}$. For mørk materie som passerer gjennom jorda, gir det $M = 3 \cdot 10^9$. Tettheten av mørk materie ved hårroten er altså tre milliarder ganger større enn den ville vært uten en slik fokusering. Hvis tettheten uten fokusering i jordas omgivelser er lik den gjennomsnittlige tettheten av mørk

materie i Melkeveien, $\rho_{m0} = 5,4 \cdot 10^{-22}$ kg/m³, er tettheten av mørk materie i hårroten $\rho_{mh} = 1,6 \cdot 10^{-12}$ kg/m³. For Jupiter leder fokuseringen til omtrent hundre ganger større tetthet ved hårroten.

Kan mørkt hår observeres rundt planeter?

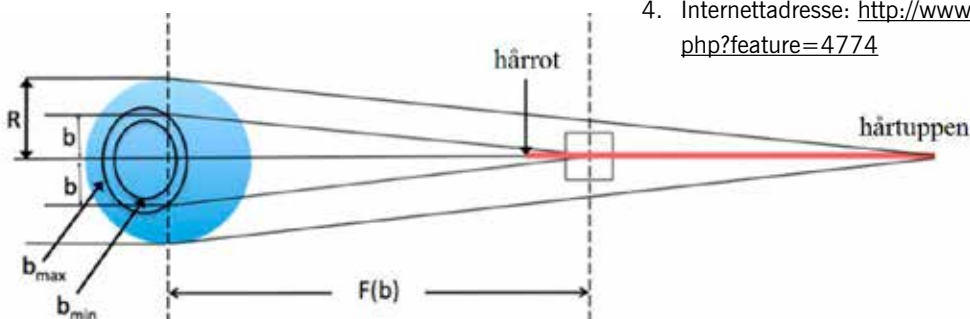
Prézeau avslutter sin artikkel med å diskutere muligheten av å observere det mørke materie-håret, og hvilken informasjon slike observasjoner kan gi oss. Hovedresultatet i artikkelen er at han har vist: *Standardmodellen for universet med omtrent 70 % mørk energi, 25 % mørk materie og 5 % vanlig materie forutsier at planetene omgir seg med manker av mørkt hår som består av konsentrert mørk materie.*

Jordas mørke hår inneholder informasjon om tetthets- og hastighetsfordelingen av mørk materie i jordas omgivelser. Siden jordas indre har betydning for avbøyningen av banen til en mørk materiepartikkel som passerer gjennom jorda, inneholder håret også informasjon om jordas indre. Dette gjelder også for andre legemer, for eksempel Jupiter [3].

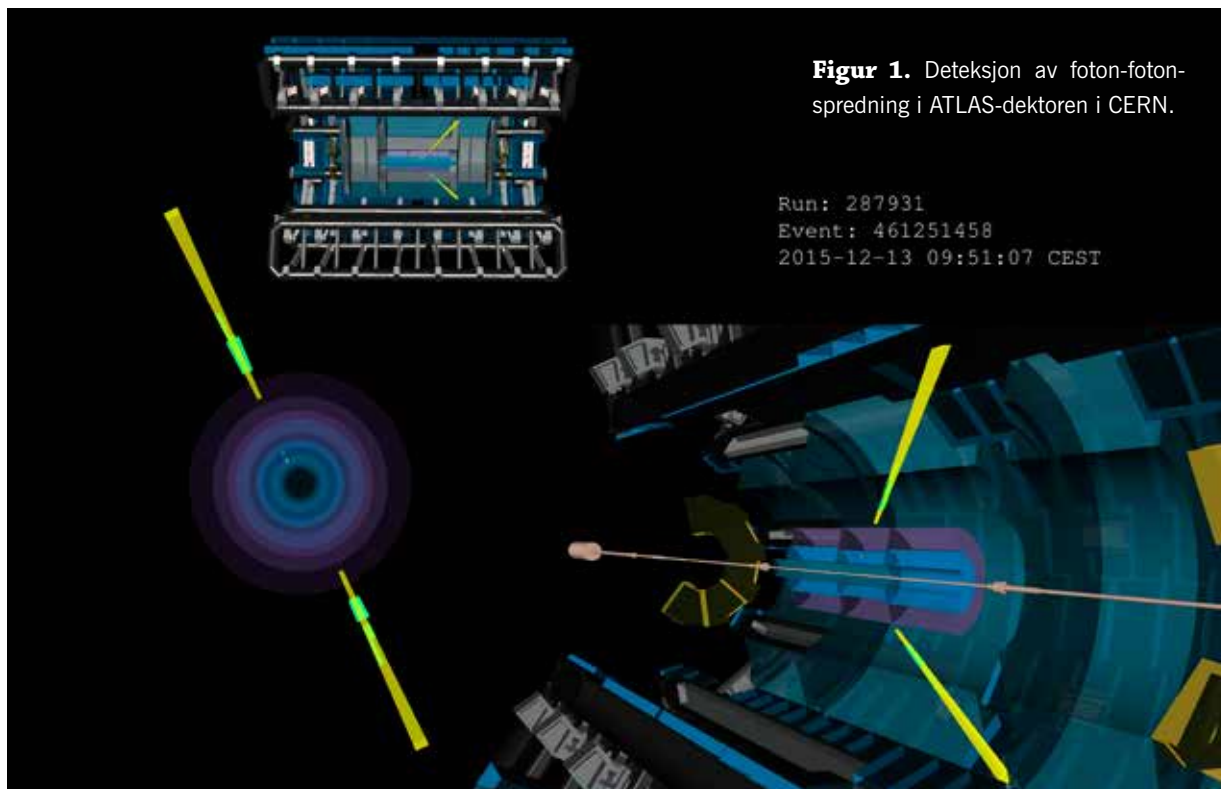
Til tross for den kraftige fokuseringen av den mørke materien, er hårene av mørk materie svært vanskelige å observere. Det er bare gravitasjonsvirkningen deres som er observerbar. Prézeau har vist at de mørke hårene ikke kan registreres med det detektorutstyret vi har på jordoverflaten. Men han skriver at forbedret observasjonsutstyr i bane rundt jorda vil kunne gi en betydelig økning av sannsynligheten for å registrere jordas mørke hår. ■

Referanser

1. Ø. Grøn. «Romelven inni og utenfor et legeme i et ekspanderende univers». *FFV* 4 (2016).
2. G. Prézeau. «Dense dark matter hairs spreading out from Earth, Jupiter and other compact bodies». *The Astrophysical Journal* 814: 122 (2015).
3. NASA press release. «Earth Might Have Hairy Dark Matter». 23. november 2015.
4. Internettadresse: <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4774>



Figur 2. Jorda virker som en gravitasjonslinse for mørk materie som dels passerer utenfor jorda og dels gjennom (her er bare idealiserte baner gjennom jorda med en knekk ved et vertikalt plan gjennom jordas sentrum, tegnet inn). Mørk materie som passerer gjennom sirkelskiven mellom b_{\min} og b_{\max} , treffer den horisontale linjen gjennom jordas sentrum innenfor boksen. Den røde linjen markerer området der den mørke materien som passerer gjennom jorda, treffer denne linjen. Dette kalles et «hår» dannet av materien. Tettheten er størst ved hårroten nærmest jorda.



Figur 1. Deteksjon av foton-foton-spredning i ATLAS-detektoren i CERN.

Deteksjon av foton-foton-spredning

Ved å sende blyioner mot hverandre med høy energi, har man ved hjelp av ATLAS-detektoren i CERN registrert foton-foton-spredning på en mer direkte måte enn tidligere.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Fordi lys er elektrisk nøytralt, vil ikke to lysstråler som treffer hverandre virke på hverandre med elektromagnetiske krefter, ifølge den klassiske (ikke-quantemekaniske) elektromagnetiske teorien. I svært energirik gammastråling er lysets partikkelegenskap mer fremtredende, og det er da vanlig å si at ettersom fotoner er elektrisk nøytrale, vil det ikke skje noen foton-foton-spredning.

Foton-foton-spredning – en kvantemekanisk effekt

Men den kvantemekaniske virkeligheten er annerledes. I 1936 utledet W. Heisenberg og E. Euler [2] en forutsigelse fra kvante-elektrodynamikken (QED) som ikke har noe klassisk motstykke nemlig foton-foton-spredning, som betyr at fotoner endrer bevegelsesretning når de kommer tilstrekkelig nærme hverandre.

Innen relativistisk kvantefeltteori kan man beskrive en del fysiske prosesser som ikke kan skje ifølge klassisk fysikk, for eksempel dannelse av et partikkel-antipartikkel par, innenfor et så kort tidsintervall, $\Delta t = h/4\pi\Delta E$, at det er umulig å observere

dem på grunn av begrensningene gitt ved Heisenbergs uskarphetsrelasjon. Her er ΔE energien som er delaktig i prosessen og h er Plancks konstant. En slik prosess kalles *virtuell*, og partiklene i et partikkelpar som dannes og forsvinner med en kortere levetid enn Δt kalles *virtuelle partikler*.

Anta at $\Delta E = mc^2$ er energien til et elektron-positronpar der hver partikkel har masse m , og Δt er levetiden til partikkelparet. Dette betyr at et foton kan oppføre seg som et elektron-positronpar i en liten del av den tiden det eksisterer, og kalles ofte for *vakuumpolarisasjon*. I et sterkt elektromagnetisk felt generert for eksempel i høyenergi-kollisjoner mellom ladde partikler eller ved hjelp av en kraftig laser, kan det virtuelle elektron-positronparet vekselvirke elektromagnetisk. Disse virtuelle tilstandene forårsaker små effekter som er målt, for eksempel Lamb-forskyvningen i hydrogenspekteret. De leder også til effekten forutsagt av Heisenberg og Euler allerede i 1936: foton-foton-spredning. Sterke elektromagnetiske felter kan da forsterke de vanligvis små effektene av de kvantemekaniske virtuelle prosessene.

Det har vist seg uhyre vanskelig å demonstrere foton-foton-spredning eksperimentelt fordi vekselvirkningen mellom to fotoner er så svak. Partikkelfysikerne snakker i denne sammenhengen om *kollisjonstverrsnitt*. Det er et mål for sannsynligheten for at to partikler skal påvirke hverandre i en nesten-kollisjon slik at bevegelsen deres endres.

Dersom partiklene kommer så nær hverandre at banene deres passerer innenfor ett og samme «effektive tverrsnittareal», så vekselvirker de.

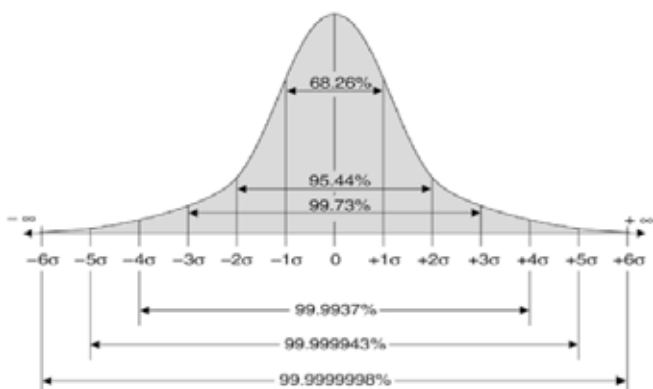
Det følger fra QED at kollisjonstverrsnittet for foton-foton-spredning vokser med økende energi for fotonene. Men kollisjonstverrsnittet er uansett svært lite. Tidligere har denne effekten kun vært observert på en indirekte måte som en tidsreversert foton-foton-spredning [2].

Deteksjon av foton-fotonspredning med LHC-detektoren ATLAS i CERN

Det var først da man kunne bruke partikkelakseleratoren Large Hadron Collider (LHC) i CERN at forskerne øynet muligheten til å demonstrere eksistensen av foton-foton-spredning direkte. De ville vise at virtuelle fotoner kan danne reelle fotoner som så vekselvirker og beveger seg hver sin vei. En rapport om resultatet av forsøket ble publisert i *Nature Physics* 14. august 2017 [3] og omtalt redaksjonelt samme sted [4].

Forslaget var å akselerere ladde blyioner til nær lysets hastighet og så sørge for at de beveget seg mot hverandre i en detektor. Det ble bygget inn tilleggsutstyr i en av de store LHC-detektorene, ATLAS, for å kunne registrere fotoner i et spesifisert energiområde. De hurtige ladde blyionene omga seg med et elektrisk og et magnetisk felt.

Når to ladninger virker på hverandre med elektriske krefter sier man innen kvanteteorien at de utveksler virtuelle fotoner. Det er fotoner med en levetid og rekkevidde begrenset av Heisenbergs uskarphetsrelasjon, i motsetning til reelle fotoner som sender ut elektromagnetisk stråling og har ubegrenset levetid hvis de får bevege seg fritt. Ifølge den spesielle relativitetsteorien ble det elektromagnetiske feltet til blyionene lengdekontrahert slik at det eksisterte i et plan vinkelrett på bevegelsesretningen med det magnetiske feltet vinkelrett på det elektriske. Dette likner veldig på en plan elektromagnetisk bølge av reelle fotoner



Figur 2. Normalfordelingskurven. Det samlede arealet under kurven er 1. Arealet innenfor for eksempel 4 standardavvik er 99,9937 % av 1.

selv om blyionenes elektromagnetiske felt utgjøres av virtuelle fotoner. Dermed kunne en vekselvirkning mellom de elektromagnetiske feltene til blyionene, fra et kvantemekanisk perspektiv, med svært god tilnærming betraktes som en vekselvirkning mellom reelle fotoner.

Dersom blyionene kommer for nær hverandre og treffer hverandre, inntreffer kjernereaksjoner som man ikke var interessert i ved dette eksperimentet. Det ATLAS-gruppen så etter, var at to fotoner traff detektoren samtidig i motsatte retninger uten at det ble registrert andre partikler (Figur 1).

Dette kunne bare inntreffe dersom blyionene kom akkurat passe nær hverandre: ikke så nær at det ble utløst kjernereaksjoner, men heller ikke så langt fra hverandre at de elektromagnetiske feltene til ionene ikke vekselvirket. Dette kalles *ultra-perifere kollisjoner*. I en slik prosess mister blyionene en forsvinnende liten del av sin energi og beveger seg videre i LHC-ringene. I en liten brøkdel av kollisjonene vil fotonene tilknyttet blyionenes elektromagnetiske felter da vekselvirke.

Forskerne registrerte over 4 milliarder kollisjoner med blyioner og registrerte 13 hendelser med samtidige fotoner i motsatt retninger uten andre partikler. Den beregnete bakgrunnen fra andre mulige prosesser, for eksempel dannelse av elektronpar der hvert av elektronene sender ut elektromagnetisk stråling i motsatte retninger, var $2,6 \pm 0,7$ hendelser per 4 milliarder kollisjoner. Dette gir et sikkert resultat med en signifikans på 4,4 standardavvik. Det betyr at sjansen for at resultatet ikke bare er en statistisk fluktusjon som blir borte når man samler mer data, er representert ved arealet innenfor det aktuelle standardavviket på en normalfordelingskurve (Figur 2).

Kravet blant partikkelfysikerne for å kalle noe et sikkert resultat, er at resultatet skal være signifikant med 5 standardavvik. Det betyr at sjansen for at resultatet ikke bare er en statistisk fluktusjon er 99,999943 %. Resultatet til ATLAS-gruppen er ikke helt der ennå. Men det er likevel en sannsynlighet på 99,999946 % for at de har observert foton-foton-spredning. ■

Referanser

1. W. Heisenberg og E. Euler. «Folgerungen aus der Diracschen Theorie des Positrons». *Z. Phys.* 98 (1936) s. 714–732.
2. Sh.Zh. Akhmadaliev et al. «Experimental investigation of high-energy photon splitting in atomic fields». *Phys. Rev. Lett.* 89, 061802 (2002).
3. ATLAS Collaboration. «Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at GERN». *Nature Physics* (2017).
4. S.R. Klein. «Heavy ion collisions: A clash of photons». *Nature Physics* (2017).

Ny test av ekvivalensprinsippet

I en artikkel publisert i *Physical Review Letters* 4. desember 2017 [1] har en gruppe franske forskere rapportert om resultatet av en ny test av relativitetsteoriens ekvivalensprinsipp. De har vist med ti ganger større nøyaktighet enn tidligere, at to legemer av forskjellige legeringer faller med lik akselerasjon samme sted i tyngdefeltet.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Den generelle relativitetsteorien er vår tids aksepterte teori for tid, rom og gravitasjon. Et av de grunnleggende prinsippene teorien bygger på, er ekvivalensprinsippet (EP). Det finnes mange formuleringer av dette prinsippet. En av dem er: *Alle legemer faller med samme akselerasjon på et gitt sted i et tyngdefelt, uansett hva de består av.*

Hensikten med MICROSCOPE-satellitten er å teste gyldigheten av ekvivalensprinsippet med en relativ nøyaktighet 10^{-15} , det vil si at den såkalte Eötvösparameteren,

$$\delta(A,B) = 2(a_A - a_B)/(a_A + a_B)$$

har en størrelse lik 10^{-15} , der a_A og a_B er akselerasjonen til to legemer A og B i fritt fall samme sted i et tyngdefelt.

I denne sammenhengen melder et spørsmål seg: Ved hvilken presisjon vil man si at ekvivalensprinsippet er godt nok testet? Dette spørsmålet har vært behandlet av James Overduin og medarbeidere i en artikkel [2] publisert i 2009.

De skriver at det nå er en alminnelig oppfatning at dersom den generelle teorien skal kunne forenes med teorier for elektrisk, svak og sterk kjernekraft, må teorien ha en grense for sitt gyldighetsområde som det bør være mulig å avdekke ved tilstrekkelig nøyaktige eksperimenter.

Overduin og medarbeidere peker på flere årsaker til at det bør eksistere et brudd på ekvivalensprinsippet. Den svakeste restriksjonen på gyldighetsområdet av EP kommer fra generelle krav til egenskapene av en kvantegravitasjonsteori og sier at det forventes et brudd på EP i området

$$m_{\text{proton}}/m_{\text{Planck}} < \delta(A,B) < m_{\text{Higgs}}/m_{\text{GUT}},$$

der $m_{\text{proton}}c^2 \approx 1 \text{ GeV}$, $m_{\text{Planck}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$, $m_{\text{Higgs}} \approx 100 \text{ GeV}$, $m_{\text{GUT}} \approx 10^{16} \text{ GeV}$ ($\text{GeV} = 10^9 \text{ elektronvolt} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ Joule}$), dvs. $10^{-19} < \delta(A,B) < 10^{-14}$.

En mer restriktiv betingelse kommer fra strengeteorier basert på eksistensen av ekstra romlige dimensjoner. Ifølge slike teorier opptrer i vår firedimensjonale romtid skalarfelter med fysiske virkninger som gir brudd på EP i området $10^{-18} < \delta(A,B) < 10^{-13}$.

Forfatterne skriver videre at dersom $\delta(A,B) < 10^{-18}$ blir ulike fysiske størrelser som opptrer i teoriene så fininnstilt at teoriene blir kunstige og dermed uinteressante. Derfor er det ikke noe poeng å lete etter brudd på EP med $\delta(A,B) < 10^{-18}$. Fysikernes svar på spørsmålet overfor er derfor at ved presisjonen $\delta(A,B) = 10^{-18}$ er ekvivalensprinsippet godt nok testet.

Eksperimentet

Satellitten ble skutt opp 25. april 2016 og går i en sirkulær bane 710 km over jordoverflaten der tyngdeakselerasjonen er $7,9 \text{ m/s}^2$ (Figur 1). Den inneholder utstyr til et eksperiment kalt Twin Space Accelerometers for Gravitation Experiment (T-SAGE) som inneholder to akselerometre hvert med to testlegemer formet som konsentriske sylinderskall. De befinner seg i fritt fall inni parallelle beholdere 17,5 cm fra hverandre i satellitten. De er forbundet med en gulltråd med 7 mikrometer diameter. Ørsmå endringer av spenning i

gulltråden kan registreres med elektronisk utstyr. Dersom sylinderskallene i et akselerometer får en akselerasjon i forhold til hverandre, oppstår en spenning i gulltråden. Et slikt signal ville indikere et brudd på ekvivalensprinsippet.

I det ene akselerometret, kalt SUREF, består de to sylinderskallene av samme legering; platina og rhodium i forholdet 90:10. I det andre, kalt SUEP, av forskjellige legeringer; det innerste av platina og rhodium i forholdet 90:10, og det ytterste av titan, aluminium og vanadium i forholdet 90:6:4.

Satellitten roterer med en frekvens f_{spin} om en akse (markert med rødt i Figur 1) vinkelrett på satellittens bevegelsesretning. Banebevegelsens frekvens er f_{orb} . Jordas gravitasjonsfelt vil da rotere rundt satellitten med en frekvens $f_{\text{EP}} = f_{\text{spin}} + f_{\text{orb}}$. Et brudd på ekvivalensprinsippet vil gi et periodisk spenningssignal med frekvensen f_{EP} .

I akselerometeret SUREF med identiske testlegemer, skal det ikke opptre noe signal. Dette akselerometeret sjekker at utstyret fungerer som det skal. I løpet av det første året med målinger

ble det heller ikke registrert noe signal i SUEP. Dette betyr at man ikke registrerte noen brudd på ekvivalensprinsippet.

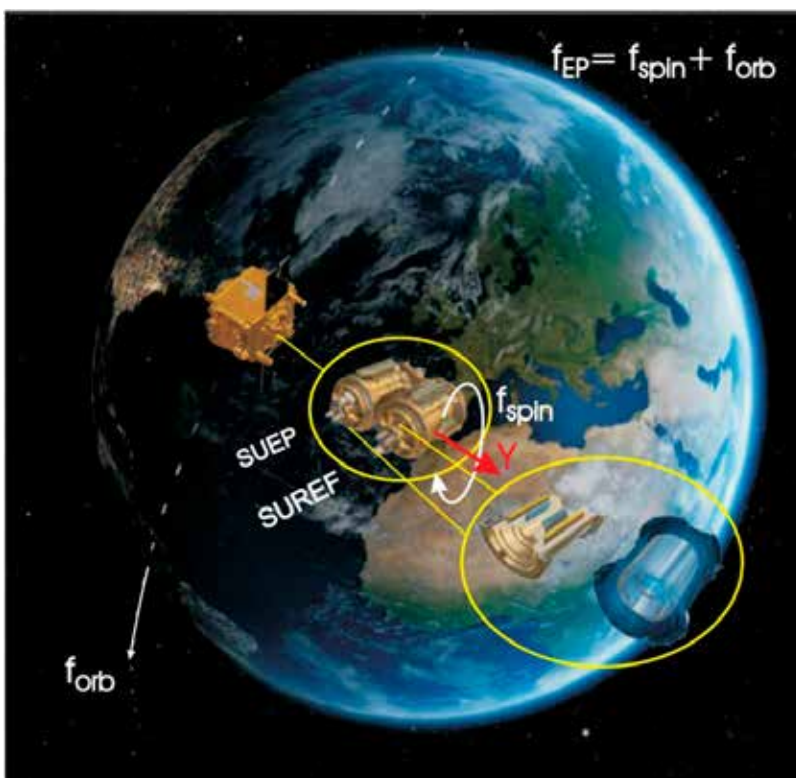
Med følsomheten til gulltråden og utstyret for å registrere spenningsendringer i den, samt en vurdering av andre mulige kilder til unøyaktigheter, konkluderte forskerne med at Eötvösparameteren her var målt til å være null med en nøyaktighet på 10^{-14} .

De mest presise målingene utført i laboratorier på jordoverflaten har bestemt denne parameteren med en nøyaktighet på 10^{-13} .

Forskere har til hensikt å måle Eötvösparameteren med en nøyaktighet på 10^{-15} i løpet av 2018. ■

Referanser

1. P. Touboul et al. «MICROSCOPE Mission: First Results of Space Test of the Equivalence Principle». *Physical Review Letters* 119, 231101 (2017).
2. J. Overduin et al. «The Science Case for STEP». *Advances in Space Research* 43 (2009), s. 1532–1537.



Figur 1. Den franske romsonden MICROSCOPE er blitt brukt til å teste ekvivalensprinsippet. Detaljert forklaring er gitt i hovedteksten.

Lyn kan skape positroner

I en artikkel publisert 23. november 2017 i Nature [1] har en gruppe japanske forskere rapportert om oppdagelsen av positroner – elektronets antipartikkel – registrert ved et lynnedslag.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Lyn produserer ikke bare synlig lys, men også mer energirik stråling som gammastråling. En gruppe japanske forskere bestemte seg for å undersøke hva som skjer når den mest energirike strålingen fra lyn treffer atomer i atmosfæren.

I 2015 begynte de å bygge gammastråling-detektorer som de plasserte forskjellige steder på Japans vestkyst der det er hyppige tordenvær.

Ved et tordenvær 6. februar 2017 registrerte fire detektorer et gammastrålingssignal samtidig med et lynnedslag mellom 500 m og 1,7 km fra detektorene. Det viste seg at signalet besto av tre glimt. Det første varte under et millisekund, det neste noen hundredeler av et sekund, og det tredje omtrent ett minutt. Det hadde en fotonenergi på 0,511 megaelektronvolt.

Forskerne gjennomførte en detaljert analyse av observasjonsmaterialet med beregninger basert på ulike hendelsesforløp for å identifisere kildene til gammastrålingssignalet. Resultatet er illustrert i Figur 1.

Tredelt gammastrålingssignal

Det første, korteste glimtet var den mest energirike delen av lynet. Et slikt gammaglimt fra et lyn

kan forårsake mange hendelsesforløp. Vi skal her rette oppmerksomheten mot hendelsene de japanske forskerne fant kunne forklare det observerte tredelte gammastrålingssignalet.

Den andre delen av det registrerte signalet, som varte noen hundredeler av et sekund, kom ifølge forskerne fra en prosess som startet med at lyn-glimtet traff et ^{14}N -nitrogenatom og satte i gang en kjernereaksjon. I prosessen som har betydning for denne delen av det observerte signalet, ble den vanlige ^{14}N -isotopen ustabil og sendte ut et nøytron som kolliderte med et annet ^{14}N -atom. Noen ganger førte dette til at nøytronet ble fanget av atomkjernen samtidig med at et proton i atomkjernen ble omdannet til et nøytron. Dermed oppsto en ^{14}C -isotop av karbon. Andre ganger førte absorpsjonen av nøytronet til at det ble dannet en ^{15}N -isotop av nitrogen i en eksitert tilstand med overskudd av energi. Atomkjernen kvittet seg med overskuddsenergien ved å sende ut et gammaglimt. Ifølge beregningene kan et lynglimt generere denne typen gammastråling i noen hundredeler av et sekund i atmosfæren.

Det gjenstår å forklare den ett minutt lange tredje delen av det registrerte signalet. Forskerne pekte da på et annet mulig hendelsesforløp med samme start som prosessen beskrevet ovenfor. Når et ^{14}N -atom blir truffet av et lyn og blir ustabil, kan det sende ut et positron og et nøytrino, slik at det dannes en ^{13}C -karbonisotop. I atmosfæren eksisterer frie elektroner. Når det utsendte positronet treffer et fritt elektron, vil disse partiklene omdannes til gammastråling

Desimalteiknet – komma eller punktum?

Desimalteiknet, det som markerer skillet mellom heiltallsdelen og fraksjonsdelen i desimaltall, har hatt mange ulike former gjennom tidene og i ulike land. I dag er det stort sett berre komma og punktum som står igjen.

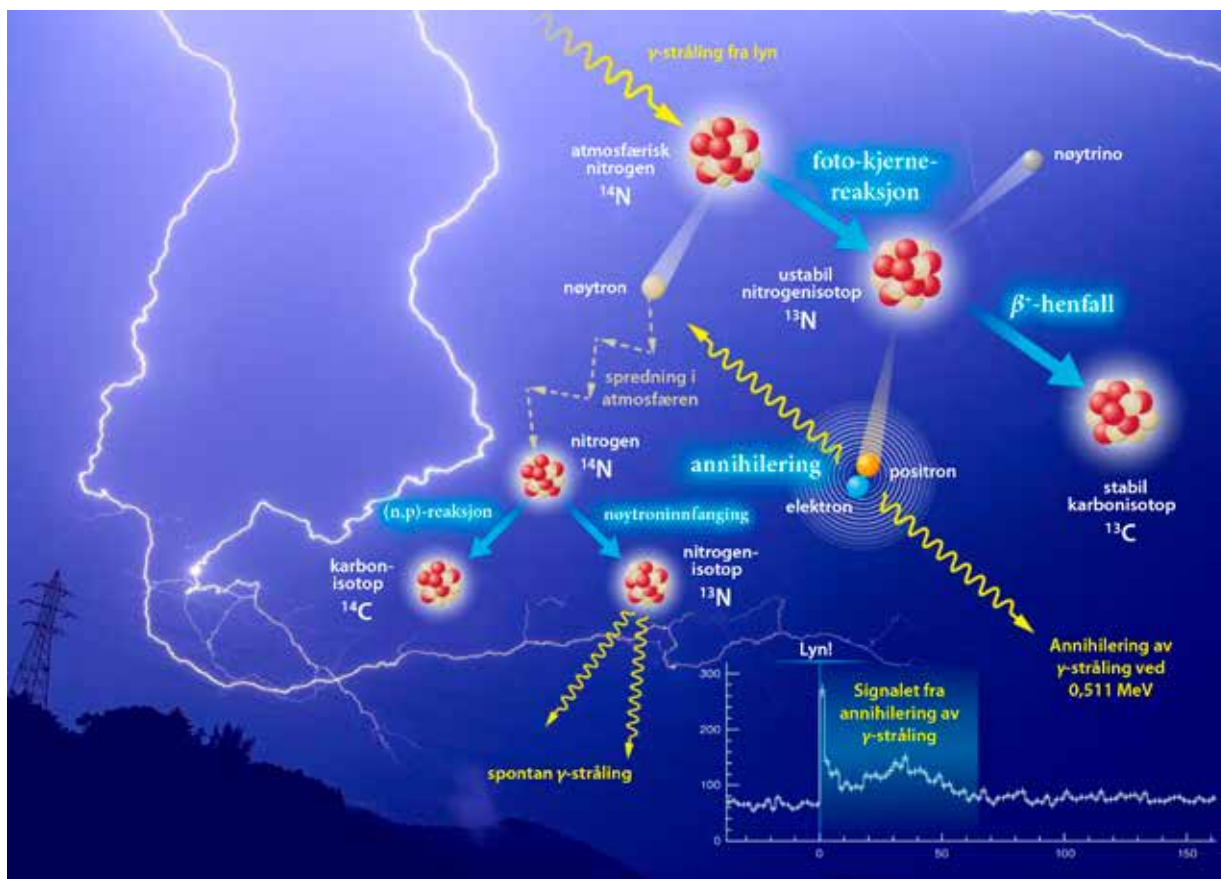
Emil J. Samuelson Institutt for fysikk, NTNU

Situasjonen kan kort oppsummerast slik: punktum blir nytta i dei fleste engelskspråklege land og tidlegare britiske koloniar, og komma dominerer i resten av verda, det vil seie fastlands-Europa med Russland og tidlegare Sovietstatar og Tyrkia, Sør-Amerika og store delar av Afrika. Kina og

Japan nyttar punktum. I Sør-Afrika og Canada, som også er tidlegare britiske koloniland, er begge teikna i bruk. Irak, Iran, Syria og Saudi-Arabia har eit anna system. Sjå figuren med kart over bruken i heile verda.

Dataalderen førte med seg ei viss ustøtheit i bruk av desimalteiknet, fordi dataprogram lenge brukte omtrent berre den britisk-amerikanske varianten. No er det ofte valbart kva for variant ein vil arbeide med i mange dataprogram med matematiske operasjonar.

I dei nordiske landa inkludert vårt land følger ein naturleg den fastlands-europeiske standarden. Komma som desimalteikn er eksplisitt uttrykt som norsk standard i standardiseringsdokumen-



Figur 1. Hvordan lyn forårsaker produksjon av positroner [2]. Detaljert forklaring i hovedteksten.

med fotonenergi på 0,511 megaelektronvolt. Et resultat av beregningene var at med luftens tetthet og sammensetning vil et lyn initiere slike prosesser i et minutts tid.

Den siste delen av gammastrålingssignalet viste dermed at ved lynnedslag kan det oppstå kjernereaksjoner som danner positroner. ■

Referanser

1. T. Enoto og medarbeidere. «Photonuclear reactions triggered by lightning discharge». *Nature* 551, 481–484 (2017). doi:10.1038/nature24630
2. SciNews. «Lightning Strikes Produce Antimatter Particles in Earth's Atmosphere». 23. november 2017.

Figur 1. Fordelinga mellom landa på heile kloten går fram av figuren: Grønt for 'komma', blått for 'punktum', blågrønt for begge (Sør-Afrika og Canada), raudt for midt-austen-varianten. (Kilde: Wikipedia Commons)



tet NS-ISO 31-1 av 1996 og seinare variantar, og skal sjølvsagt nyttast i norske publikasjonar, bøker, dokument og læreverk.

I skole-, høyskole- og universitetssamanheng er det altså komma som er normen for desimalteiknet her i landet. ■

SI – det nye internasjonale einingssystemet

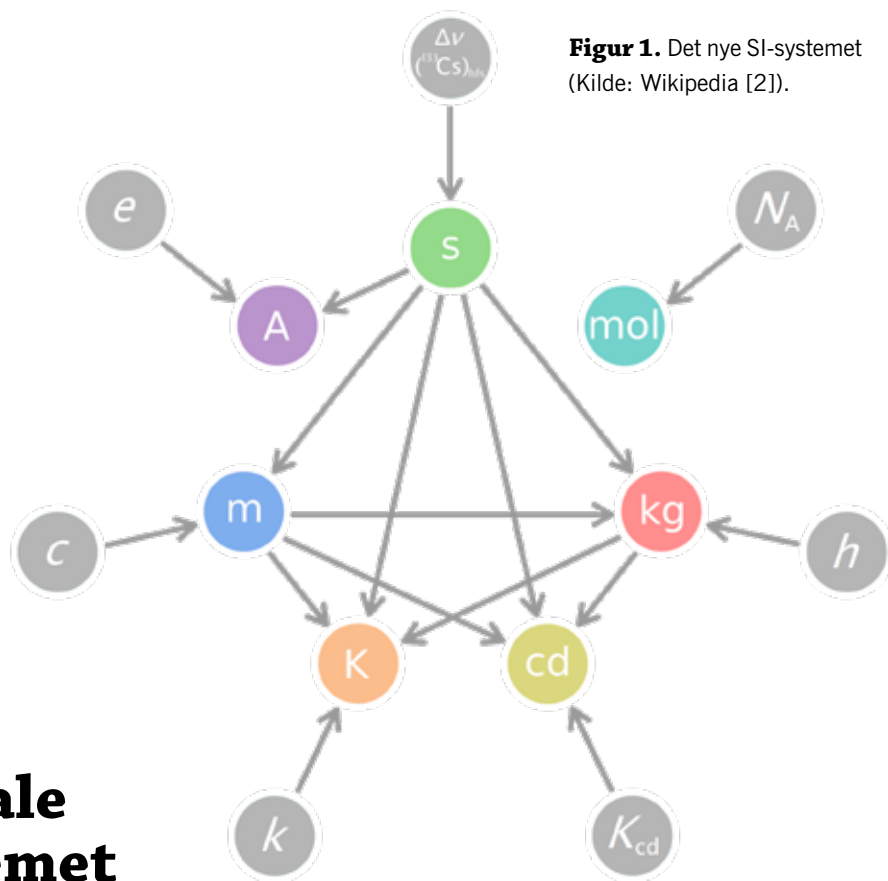
Det har nettopp kome forslag til revisjon av det internasjonale einingssystemet. Forslaget representerer ei omfattande ombygging av systemet.

Aasmund Sudbø Universitetet i Oslo

Dagens SI-system har basiseiningane sekund, mol, kilogram, candela, kelvin, meter og ampere, med spesifikasjonar av korleis ein kan realisere basiseiningane fysisk. Etter det reviderte forslaget vil basiseiningane i det nye SI-systemet bli knytte til endeleg vedtekne verdiar for fylgjande naturkonstantar: Den hyperfine frekvenssplittings i grunntilstanden til cesium-133-atomet $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})$, Plancks konstant h , Avogadrotalet N_A , strålingsstyrken K_{cd} , Boltzmanns konstant k , elementær ladninga e og lysfarten c . Dette er mogleg fordi det nå endelig har blitt målt med mange siffers nøyaktighet kor mange elektriske kilowattimar som trengst for å lyfte ein kilogramprototype nøyaktig ein meter opp i jordas tyngdefelt.

Innleiing

I dag finst det billege elektroniske måleinstrument som set oss i stand til å måle elektrisk straum og spenning med svært mange siffers nøyaktighet. Dagens instrument set oss også i stand til å telje enkeltelektron med lite sannsyn for feilteljing. Denne utviklinga har gjort at det



Figur 1. Det nye SI-systemet (Kilde: Wikipedia [2]).

har kome forslag til revisjon av det internasjonale einingssystemet (SI-systemet). Det mest sentrale i det nye forslaget er å bruke ekvivalensen som relativitetsteorien gjev mellom masse og energi til å frigjera kilogram frå noko som står under lås og slå i Paris til å vera noko som er knytt til energi i elektromagnetisk form.

Eg blei kjent med det nye SI-systemet gjennom ein artikkel i *Physics Today* i 2014 [1], og gjennom ein artikkel på Wikipedia [2]. Artikkelen i *Physics Today* synest eg er ein god artikkel for fysikarar, og eg vil gjerne presentere eit samandrag av den, og legge til litt om kva som har hendt med SI-systemet sidan 2014. La meg starte med å takke redaktørane og Marit Ulset Nordsveen frå Justervesenet for omfattande hjelp i arbeidet mitt med manuskriptet.

Historia bak SI-systemet

Det internasjonale målesystemet som vi har i dag har sitt opphav i den franske revolusjonen. På fransk heiter det «Système International d'Unités», og på norsk heiter det SI-systemet. Jordrotasjonen var noko stabilt som gav oss døgn, time, minutt og sekund som vi kjenner det i dag. Men det var eit problem at det var mange oppfatningar om kor lang ein fot skulle vera.

Det nye universelle målesystemet tok utgangspunkt i avstanden frå ekvator til nordpolen på jorda, ved at denne avstanden skulle vera 10^7 meter = 10 millionar meter, forkorta m.

Liter (l) blei definert som rommål lik $0,001 \text{ m}^3$, og kilogram blei definert som massen til ein liter vatn ved ein temperatur på $4 \text{ }^\circ\text{C}$. I 1799 blei ein referansemeter og ein referansekilogram framstilt av platina og lagra i Paris, og for å sitere markien av Condorcet, eit nytt målesystem «for alle tider, for alle folk» hadde sett dagens lys.

SI-systemet hadde ein trong fødsel, der det blei lansert som politisk vedtak i Paris under den franske revolusjonen. Endå om det var mange ulike mål for rom og vekt i bruk i byen, så var mangel på brød å kjøpe eit større problem enn undervekt på brødet, og påbodet om å taka i bruk eit nytt og ukjent målesystem var lite velkomne i byen. Det at systemet i starten blei lansert med desimaltid, med døgnet oppdelt i desidøgn og centidøgn, hjelpte lite på velkomsten, og systemet blei så upopulært at Napoleon i 1812 utsette heile standardiseringsprosjektet.

Etter kvart gjekk det betre med det nye målesystemet, som fekk sitt internasjonale gjennomslag ved at meterkonvensjonen blei underskriven av 17 statar i 1875. I Noreg vart systemet vedteke ved lov 22. mai 1875, og kjent gyldig frå 1. juli 1882. I 1889 fekk alle i meterkonvensjon sin eigen kilogramprototyp, og Noreg fekk den som det er bilete av i Figur 2.

I 1875 blei tre nye organisasjonar oppretta: Generalkonferansen for vekt og mål (CGPM), Den internasjonale komiteen for vekt og mål (CIPM), og Det internasjonale byrået for vekt og mål (BIPM). Desse organisasjonane fekk ansvaret for å vedlikehalde SI-systemet, ei oppgåve dei framleis har.

SI-systemet har levd og utvikla seg i takt med ny vitenskapleg kunnskap og nye målebehov. Termodynamikken og elektromagnetismen kom tidleg som nye vitenskapar som blei bygde inn i SI-systemet, og det same skjedde med relati-

Figur 2. Kilogramreferanse (foto: Justervesenet).



tetsteorien. Men det å bygge kvantemekanikken inn i SI-systemet har stått att. Nå er CGPM klar for å taka det steget også.

Dagens SI-system

SI-systemet slik vi kjenner det har ein struktur med sju basiseiningar, med tilhøyrande definisjonar av realisering av einingane. Basiseiningane er: sekund, meter, kilogram, ampere, kelvin, mol og candela. Til basiseiningane høyrer sju basisstorleikar: tid, lengde, masse, elektrisk straum, termodynamisk temperatur, stoffmengde og strålingstyrke, med som vist i Tabell 1.

Systemet har i tillegg 22 avleia einingar med eigne namn og symbol, som hertz, joule og watt. For at systemet skal kunna representere dagens kunnskap i fysikk, kjem vi i 2018 til å få eit SI-system med ein heilt ny struktur, med nye basisstorleikar, utan nokon basiseiningar. I staden vil systemet få sju naturkonstantar med vedtekte verdier. I dagens SI-system har vi alt nå tre basiseining av den typen. I det nye SI-systemet vil det bli sju tilsvarande vedtekte naturkonstantar.

Korleis lagar ein eit einingssystem ?

Eit einingssystem som skal uttrykke alle fysiske målingar må taka inn i seg alle fysiske storleikar og likningane som knyter saman storleikane, altså dei kjende lovane i fysikk. Eit enkelt eksempel er

$$F = ma = m \, dv/dt = m \, d^2x/dt^2, \quad (1)$$

der kraft F , masse m , akselerasjon a , fart v , lengde x og tid t alle er fysiske storleikar som går inn i Newtons andre lov i mekanikken.

Med godt valde, uavhengige basisstorleikar kan resten av storleikane utleiast med hjelp av kjende lovar i fysikk. Vi har litt fridom i valet av basisstorleikar, men dei må både vera uavhengige og samtidig vera ein fullstendig representasjon av den fysikken vi vil representere. For eksempel, om likning (1) var det einaste vi visste om den fysiske verda, altså seks storleikar og tre enkeltlikningar, så ville vi kunna velje oss ut tre uavhengige referansesorleikar, og så ville vi kunna uttrykke dei tre andre storleikane med hjelp av dei tre utvalde.

I dagens SI-system står massen til kilogramprototypen i Paris sentralt. Men relativitetsteorien knyter masse og energi tett saman, og kjernen av fysikken ligg i dei mange ulike formene som energi kan ha, som lys, masse, elektrostatisk og termisk:

$$E = hv = mc^2 = eV = kT, \quad (2) \blacktriangleright$$

Tabell 1. Basisstorleikar, einingar og definisjonar i dagens SI-system.

Basisstorleik	Eining	Definisjon
Tid	sekund	Tida for 9 192 631 770 periodar av strålinga frå ^{133}Cs -atomet ved overgang mellom dei to hyperfinstrukturnivåa til grunntilstanden
Lengde	meter	Lengda på den vegen som lys i tomt rom går på 1/299 792 458 sekund
Masse	kilogram	Massen av «Den internasjonale kilogramprototypen» (en platina-iridiumsylander hos BIPM, Sèvres, Paris).
Elektrisk straum	ampere	Styrken til ein konstant straum, som når han går i to parallelle, uendeleg lange leiingar med forsvinnande lite sirkulært tverrsnitt, og som har ein avstand på ein meter i vakuum, fører til at den eine leiaren påverkar den andre med ei kraft lik 2×10^{-7} newton per meter.
Temperatur	kelvin	Brøkdelen 1/273,16 av den termodynamiske temperaturen til vatn ved sitt trippelpunkt.
Stoffmengde	mol	Ei mengde lik talet på atom i 0,012 kg ^{12}C , altså Avogadros tall ($6,022 \times 10^{23}$).
Lysstyrke	candela	Lysstyrken i ei gjeven retning til ein lyskjelde som sender ut monokromatisk lys med frekvens 540×10^{12} Hz, og med ein strålingsstyrke i den gjevne retninga lik 1/683 watt per steradian.

der vi har energi E , Plancks konstant h , lysfrekvens ν , masse m , lysfarten c , elementærladninga e , elektrisk spenning V , Boltzmanns konstant k , og absolutt temperatur T . Her kan både Plancks konstant h , lysfarten c , elementærladninga e og Boltzmanns konstant k vera referansestorleikar, sidan dei alle har faste verdiar.

I vårt teknologiske samfunn med aukande krav til presisjon, har det å bestemme naturkonstantane i likning (2) med større og større nøyaktighet vore eit kontinuerleg arbeid.

Det nye SI-systemet

I det nye SI-systemet vil det, som i det gamle, vera sju basisstorleikar: frekvens, fart, aksjon, elektrisk ladning, varmekapasitet, stoffmengde og strålingsstyrke. Referansestorleikane vil bli vedtekne eksakte numeriske verdiar for sju naturkonstantar: Den hyperfine frekvenssplittinga i grunntilstanden til cesium-133-atomet $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})$, c , h , e , k , Avogadro-talet N_A , og strålingsstyrken K_{cd} , som vist i Tabell 2. Referansestorleikane i Tabell 2 er uttrykte ved gamle og velkjende SI-einingar som joule, meter og sekund.

Nå er CGPM i prosessen med å få vedteke alle siffer i dei sju naturkonstantane avslutta [3], og dei vedtekne verdiane står i Tabell 2.

Eit lite steg eller eit stort sprang?

Som det går fram av Tabell 1 og Tabell 2, er det mykje likt i det gamle og det nye SI-systemet, med tid og lengde i det gamle som er eksakt ekvivalente med frekvens og fart i det nye, og med strålingsstyrke som før. Dette er fordi SI-systemet gjennom revisjonar i 1967 og i 1983 blei tilført ein del av det som var kjent om naturkonstantane då. SI-systemet har vore gjennom ei kontinuerleg utvikling, i takt med ny kunnskap og ny teknikk, og eit godt spørsmål blir då om det nye SI-systemet er endå ein naturleg revisjon av det gamle, der ein tek inn dei siste nyvinningane innanfor måleteknikk, eller om vi står overfor ein revolusjon.

Når kilogramprototypen nå truleg vil ende opp på eit teknisk museum, så vil det vera siste kapi-telet i ei lang historie, om eit målesystem som nå endeleg har blitt «for alle tider, for alle folk», i tråd med visjonen til dei som skapte systemet.

Om vi tek som eksempel den meterdefinisjonen som vi har hatt i SI-systemet sidan 1983, så tillet definisjonen oss å bruke røntgenstråler til å måle avstanden mellom atomplana i spesielt reine silisiumkrystallar med ein usikkerhet på noko så lite som 10^{-18} meter (relativ usikkerhet mindre enn 10^{-8}). Synleg laserlys har bølglengde mindre enn

Tabell 2. Basisstorleikar, definerande konstantar og definisjonar i det nye SI-systemet

Basisstorleik	Konstant	Definisjon
Frekvens	$\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$	Den uperturberte hyperfine frekvenssplittinga til grunntilstanden til cesium-133-atomet er eksakt 9 192 631 770 hertz.
Fart	c	Lysfarten i vakuum er eksakt 299 792 458 meter per sekund.
Aksjon	h	Plancks konstant h er eksakt $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ joule sekund.
Elektrisk ladning	e	Elementærladninga e er eksakt $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ coulomb.
Varmekapasitet	k	Boltzmanns konstant k er eksakt $1,380\,649 \times 10^{-23}$ joule per kelvin.
Stoffmengde	N_A	Avogadrotalet N_A er eksakt $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ per mol.
Strålingsstyrke	K_{cd}	Strålingsstyrken K_{cd} til monokromatisk stråling med frekvens 540×10^{12} hertz er eksakt 683 lumen per watt.

10^{-6} meter. Vi kan bruke laserlys og måle avstanden mellom jord og måne med ein usikkerhet på nær 1 millimeter (relativ usikkerhet mindre enn 10^{-11}). Den same meteren måler alt. I det nye SI-systemet vil langt fleire storleikar enn meter og sekund bli målbare «for alle tider, for alle folk».

Endå om vi i prinsippet står nokså fritt i valet av fundamentale konstantar for å definere eit einingssystem, blei h , e , k og N_A valde ut frå at det er praktisk, reproduserbart, tilgjengeleg, og tek utgangspunkt i den målepresisjonen som er tilgjengeleg i dag. Dersom vi tenkjer oss h og e låst, så er det vist eksperimentelt at om vi samanliknar måleresultat frå ulike oppstillingar rundt i verda som er bygde for presisjonsmåling av elektrisk spenning basert på Josephson-effekten, så får vi ein relativ variasjon på mindre enn 10^{-7} mellom målingane. Vidare er det vist eksperimentelt at om vi samanliknar måleresultat frå ulike oppstillingar som er bygde for presisjonsmåling av elektrisk resistans basert på den kvantiserte Hall-effekten, så får vi ein relativ variasjon på mindre enn 10^{-10} mellom målingane.

Konsekvensar

Det å la h , e , k og N_A ha vedtekne verdiar i staden for målte verdiar, har konsekvensar langt utanfor den ramma som målesystemet SI representerer. Fleire naturkonstantar blir eksakt kjende, fordi dei er knytte til dei nye eksakte konstantane gjennom fysikkens lovar, og kan difor også reknast ut eksakt. Ein del av arbeidet med det gamle SI-systemet låg i dei siste fire radene i Tabell 3, i å få redusert usikker-

heten i dei omrekningsfaktorane som knyter saman ulike representasjonar av joule. Med energibevaring innebygt i systemet blir denne usikkerheten heilt borte. Med dette blir det som lenge har vore eit sentralt arbeid innanfor SI endeleg fullført.

Med jamne mellomrom får vi eit nytt sett av tilrådde verdiar for fundamentale konstantar og tilhøyrande usikkerhetar frå The International Council for Science's Committee on Data for Science and Technology (CODATA), til bruk i vitenskap og teknikk. I fyrste kolonne av Tabell 3 er ei liste av eit utval fundamentale konstantar frå SI-systemet. Andre kolonne i tabellen er tilhøyrande relative usikkerhetar frå CODATA-tilrådinga frå 2010. Justerte CODATA-verdiar med reduserte relative usikkerhetar kom i 2017, og med basis i CODATA-verdiane frå 2017 kunne den siste kolonnen i Tabell 3 stillast opp, der konsekvensane av å låse h og e er vist. Hovudresultatet er at med unntak av trippelpunktstemperaturen til vatn og massen til kilogramprototypen vil alle storleikane i Tabell 3 få sterkt reduserte relative usikkerhetar med låst h og e . Forventinga i 2014 var at fire års vidare arbeid med å låse h og e ville redusere den relative usikkerheten i storleikane i Tabell 3, og slik gjekk det. Den siste CODATA-tilrådinga kom sommaren 2017, og nå er dei låste verdiane som skal bli SI-standard i 2019 fastlagde [3].

Oppdaginga av Josephson-effekten og den kvantiserte Hall-effekten opna for at h og e kunne målast direkte elektrisk, gjennom den elektriske spenninga som Josephsonkonstanten $K_J = 2e/h$ representerer, og gjennom den elektriske resis-

Tabell 3. CODATA-tilrådd relativ usikkerhet i fysiske storleikar slik det var i det gamle SI-systemet etter CODATA-justeringa i 2010, og slik det blir i det nye SI-systemet nå etter justeringa i 2017.

Storleik	Symbol	Dagens SI	Nytt SI
Den internasjonale kilogramprototypen	$m(K)$	0	$1,2 \times 10^{-8}$
Den magnetiske konstanten	μ_0	0	$2,3 \times 10^{-10}$
Den elektriske konstanten	ϵ_0	0	$2,3 \times 10^{-10}$
Trippelpunkttemperaturen til vatn	T_{TPW}	0	$5,7 \times 10^{-7}$
Molar masse til karbon-12	$M(^{12}\text{C})$	0	$4,7 \times 10^{-10}$
Plancks konstant	h	$4,4 \times 10^{-8}$	0
Elementærladninga	e	$2,2 \times 10^{-8}$	0
Boltzmanns konstant	k	$9,1 \times 10^{-7}$	0
Avogadrotalet	N_A	$4,4 \times 10^{-8}$	0
Den molare gasskonstanten	R	$9,1 \times 10^{-7}$	0
Faradaykonstanten	F	$2,2 \times 10^{-8}$	0
Stefan-Boltzmanns konstant	σ	$3,6 \times 10^{-6}$	0
Elektronmassen	m_e	$4,4 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-10}$
Atomær masseening	m_0	$4,4 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-10}$
Massen til karbon-12-isotopen	$m(^{12}\text{C})$	$4,4 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-10}$
Josephson-konstanten	K_J	$2,2 \times 10^{-8}$	0
von-Klitzing-konstanten	R_K	$3,2 \times 10^{-10}$	0
Finstrukturkonstanten	α	$3,2 \times 10^{-10}$	$2,3 \times 10^{-10}$
$E = mc^2$ energiekvivalent	$\text{J} \leftrightarrow \text{kg}$	0	0
$E = hc/\lambda$ energiekvivalent	$\text{J} \leftrightarrow \text{m}^{-1}$	$4,4 \times 10^{-8}$	0
$E = h\nu$ energiekvivalent	$\text{J} \leftrightarrow \text{Hz}$	$4,4 \times 10^{-8}$	0
$E = kT$ energiekvivalent	$\text{J} \leftrightarrow \text{K}$	$9,1 \times 10^{-7}$	0
1 J = 1 (C/e) eV energiekvivalent	$\text{J} \leftrightarrow \text{eV}$	$2,2 \times 10^{-8}$	0

tansen som von-Klitzing-konstanten $R_K = h/e^2$ representerer. I 1990 vedtok CIPM låste verdiar for desse konstantane som nå heiter K_{J-90} og R_{K-90} , fastsett på grunnlag av best tilgjengelege data i 1990. Etterpå har all elektrisk presisjonsmetrologi vore måling av elektrisk spenning og motstand knytt til K_{J-90} og R_{K-90} , endå om SI-definisjonen av elektrisk straum stadig er knytt til krafta som er tenkt å vera mellom to uendeleg tynne parallelle straumførande leiingar.

Nå har det faktisk gått eit kvart hundreår der praktisk elektrisk metrologi i realiteten ikkje har hatt nokon basis i SI-systemet! Dette blir det slutt på når h og e nå får faste verdiar. Men også i det nye SI-systemet vil det vera naturkonstantar frå grunnleggjande fysikk som det stadig er knytt ein måleusikkerhet til, som elektronmassen og fritromsimpedansen $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$.

Standardiseringsarbeid er viktig

Visjonen om å skape eit SI-system basert på naturkonstantar aleine, har vore ein del av arbeidet rundt CGPM lenge. Den 23. CGPM gav i 2007 ei klar tilråding om at arbeidet då måtte setjast i gang, med å gjennomføre eksperiment som kunne leie fram til låsing av verdiane for ein del naturkonstantar, med å utvikle eksperimentelle metodar for realisering av måleiningane («mises en pratique») i det planlagte nye SI-systemet, og setja i gang ein formidlingskampanje om det nye systemet. Den 24. CGPM gjorde i 2011 formelt vedtak om at konstantane i Tabell 2 skulle vera dei som skulle definerte det nye SI-systemet. Etterpå er det gjort store framsteg i å skaffe fram samstemte målere-sultat med stadig minkande måleusikkerhet frå dei ulike eksperimenta som bestemmer h , e , k og N_A . Konsultative komitear har laga nye «mises en pratiques», og alt ligg nå klart for vedtak til den 26. CGPM i 2018.

Det er ingen fare for at innføringa av nytt SI-system vil påverke dagleglivet til folk. Baderomsveker og kokkeveker vil halde fram med å måle med den lova presisjonen. Med sin usikkerhet i masse på 12 μg vil den antikke kilogramprototypen i Paris vera ein massereferanse som vil vera meir enn god nok for mitt daglegliv så lenge eg lever.

Men for dei som skal undervise fysikk kan det nye SI-systemet by på utfordringar, fordi det er så sterkt knytt til atomfysikk og relativitetsteori, medan fysikkstudentar gjerne fyrst lærer om fysikk for dagleglivet, klassisk mekaniikk og termodynamikk. Ein måte å knyte det nye SI-systemet til dagleglivet på vil vera å taka

utgangspunkt i fotodioden som dei fleste kjenner i form av solceller. Sollys strøymar inn mot fotodioden og blir absorbert i silisiummaterialet som fotodioden er bygt opp av.

Lysstraumen inn mot fotodioden set opp ein elektrisk straum som går rundt i krinsen som går mellom framsida og baksida av fotodioden. I ein ideell fotodiode blir det for kvart lysfoton som blir absorbert i fotodioden sendt eit elektron rundt i den tilkopla krinsen. Kvart foton ber med seg ein energi $E = h\nu$ (lik Plancks konstant gonger lysfrekvensen), så fotodioden kan brukast til måling av lyseffekt. Presisjonsmålingar vil kunne realiserast når både h og e blir eksakt definerte, fordi både lysfrekvens og elektrisk straum er lette å måle presist i dag. På Justervesenet har ein doktorstudent arbeidd i fleire år med ei slik måleoppstilling med ein spesialfotodiode [4], etter at dei der stad-feste eit avvik på mindre enn 10^{-4} mellom målt elektrisk straum frå fotodioden og tilført effekt i form av laserlys [5].

Det å bruke naturkonstantar som basis for målingar vil gjeva oss betre middel til å undersøke den fysiske verda, og auke sannsynet for å oppdage nye fenomen. I framtida vil vi kanskje oppdage at somme av naturkonstantane ikkje er konstante, men tidsavhengige. Om det skjer, vil SI-systemet taka inn den nye kunnskapen, på same måten som då vi gjekk frå å tenkje på landjord til å tenkje på univers då meteren skulle definerast. Gjennom kontinuerleg utvikling kan SI halde fram som eit universelt målesystem «for alle tider, for alle folk», i Kina like godt som i Noreg! ■

Referanser

1. D.B. Newell. «A more fundamental International System of Units». *Physics Today* 67, 7, 35 (2014), doi: 10.1063/PT.3.2448
2. Nettside: https://en.wikipedia.org/wiki/Proposed_redefinition_of_SI_base_units
3. D.B. Newell og andre. «The CODATA 2017 Values of h , e , k , and N_A for the Revision of the SI». *Metrologia*, Volume 55, Number 1, 29 January 2018. doi: 10.1088/1681-7575/aa950a
4. M.U. Nordsveen. «The dual-mode detector - development of a self-calibrating primary standard for optical power measurement». Avhandling, Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet, Universitetet i Oslo (2018).
5. I. Müller og andre. «Predictable quantum efficient detector: II. Characterization and confirmed responsivity». *Metrologia* 4 (2013), s. 395–401.

250-årsjubileum for Joseph Fourier

Joseph Fourier er eit velkjent namn i fysikk ved Fouriers lov om varmeleiing, og i fysikk og matematikk ved Fourier-seriar og Fourier-transformasjon. Han var i tillegg den første som påviste drivhuseffekten.

Emil J. Samuelsen Institutt for fysikk, NTNU

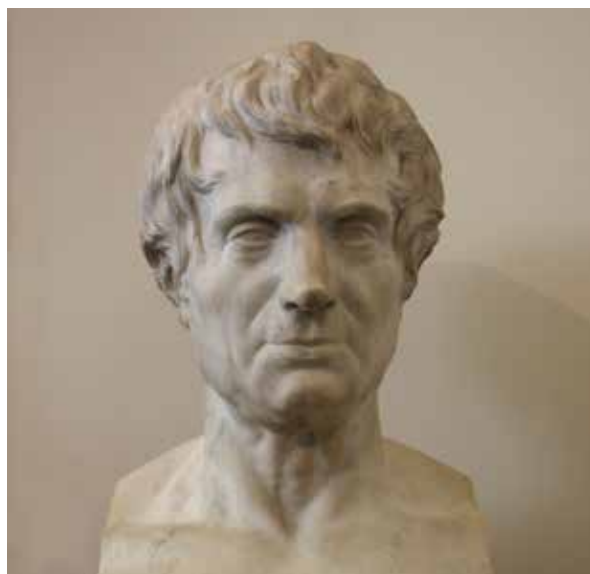
Biografi

Jean Baptiste Joseph Fourier vart fødd 21. mars 1768 i Auxerre, søraust for Paris, altså for 250 år sidan. I Frankrike blir han kalla berre Joseph Fourier.

Foreldra døydde då han var ni år, og han fekk skolegangen sin ved ein militær skole som Benediktinerkloster i Auxerre hadde. Joseph var ein flink og lærevillig elev, og alt som 16-åring vart han lærar, men tok også tidleg til med eigne studiar og forskning.

Fourier var tilhengar av Den franske Revolusjonen (1789–1799) og tok til på studier ved den revolusjonsinspirerte l'Ecole Normale de l'an III, som altså er namngitt med år III etter den nye, revolusjonære tidsrekninga. Året var 1795, og skolen varte berre fire månader, men er likevel forløparen til den prestisjetunge l'Ecole Normale Supérieure i Paris. Under Terrortida (juni 1793–juli 1794) vart han arrestert, men unngjekk å bli offer for giljotinen. I 1797 vart han så matematikklærer ved l'Ecole Polytechnique i Paris, og året etter drog han med Napoleon sin ekspedisjon til Egypt og vart sekretær for det franske l'Institut d'Egypte. Det blir fortalt at Fourier seinare var ein sentral inspirator for Jean-François Champollions tolking av hieroglyfteikna på den egyptiske Rosettasteinen.

Då Fourier var tilbake i Frankrike i 1801, fekk han ei stilling ved l'Ecole Polytechnique, men like etterpå, i 1802, utnemnde Napoleon han til prefect (guvernør) for Departementet Isère med sete i Grenoble (Figur 1). Eitt av hans store prosjekt som prefect er alpe-vegen mellom Grenoble



Figur 1. Byste av Joseph Fourier i Musée d'Ancien Évêché i Grenoble. (Kilde: FrWikipedia)

og Briançon ved grensa mot Italia. Samtidig som han administrerte, dreiv han for seg sjølv vitskapeleg arbeid, jamvel på prefect-kontoret sitt, mellom anna studium av varmeleiing, som omtalt seinare i denne artikkelen.

I 1810 fekk han grunnlagt eit Faculté Impériale de Grenoble, eit startgrunnlag for eit universitet, med seg sjølv som den første rektoren. I nyare tid hadde universitetet namnet Université Joseph Fourier (Figur 2), men det vart slått saman i 2015 med to andre institusjonar til l'Université de Grenoble Alpes.

I Grenoble eksisterte eit akademi sidan 1772, l'Académie Delphinale (namnet refererer til landskapnamnet Dauphiné for Grenoble-området), der Fourier var ein aktiv medlem. Seinare ville Napoleon gjere Fourier til prefect i Lyon, men det var mot slutten av Napoleon-tida, og Fourier unndrog seg. I 1815 flytta han til Paris, med tilknytting til l'Ecole Polytechnique.

I 1817 vart Fourier valt til medlem av det prestisjetunge l'Académie des Sciences i Paris (stifta i 1666), der han i 1822 vart sekretær, ein funksjon han hadde resten av livet. I 1826 vart han også innvald medlem av l'Académie Française (Dette akademiet har som hovudformål å ta vare på fransk språk). Elles hadde Fourier ei rekke honorære medlemskap, mellom anna i Kungliga Vetenskapsakademien i Stockholm frå 1830.



Figur 2. Kjennemerke for universitetet i Grenoble fram til 2015 (l'Université de Grenoble Alpes)

Varmeleiing og Fouriers lov

Mange fysiske fenomen kan med god tilnærming beskrivast med lineære lover, at påverknaden er proposjonal med påtrykt potensial. Det gjeld også for varmetransport, noko som vart formulert alt tidleg på 1800-tallet: Varmetransporten er styrt av temperaturforskjellar eller temperaturgradientar etter Fouriers lov for varmefflukstettleik \mathbf{j} i medium med varmeleiingsevne κ

$$\mathbf{j} = -\kappa \nabla T. \quad (1)$$

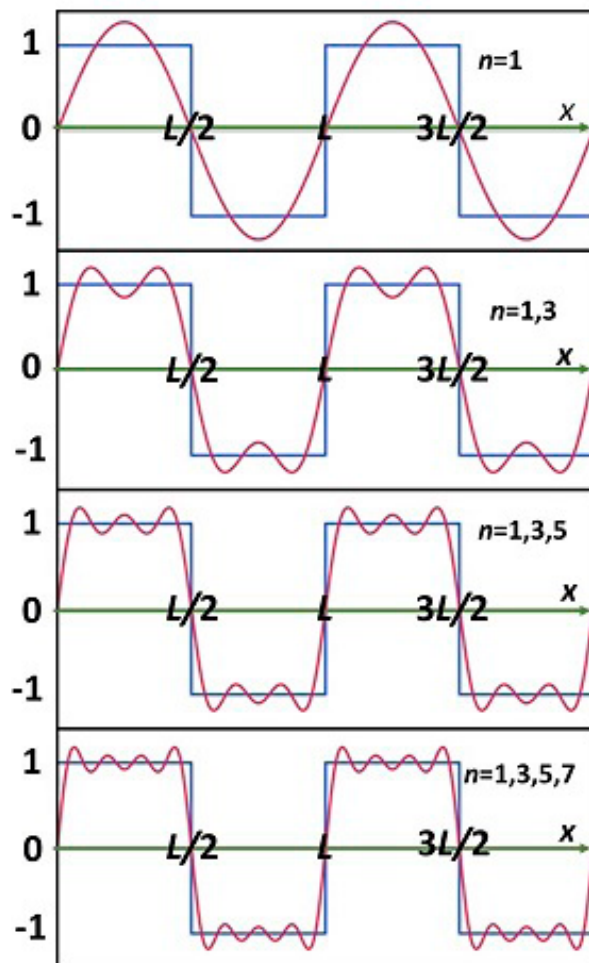
Her er ∇T temperaturgradienten over mediet. Likning (1) vart formulert teoretisk i 1804 av Jean-Baptiste Biot og ikkje av Fourier som ein skulle tru. Men Fourier utleide varmeleiingslikninga (likning (2)), og påviste at likning (1) stemte godt med eksperiment som han utførte. Alt i 1807 kom dei første rapporteringane, i form av akademi-presentasjonar [1], og han hadde ein skriftleg avhandling klar i 1816, som ikkje vart trykt før i 1822 og 1827 [2]. Men vel så viktig som Fouriers lov er dei matematiske metodane som han utvikla under arbeidet, som skildra lenger framme. Det blir sagt at i samtida si gjekk han blant matematikarar for å vere fysikar, og omvendt at fysikarane heldt han for å vere matematikar. Fourier sjølv framheva at eit hovudmål med matematikken er å vere til allmenn nytte og å forklare naturfenomen.

Fouriers lov av 1807 (og 1816 og 1822) for varmestrøyming er analog med Ohms lov av 1827 for elektrisk straum gjennom resistansar under elektrisk potensialgradient, og Ficks lov av 1855 om diffusjon i væsker og gassar under konsentrasjonsgradient.

Varmeleiing blir ofte presentert også i ei anna form kalla varmeleiingslikninga. Ved å kreve energi-bevaring for varmestraum inn og ut av eit medium der det kan vere ei varmekjelde P , og der temperaturen kan endre seg med tida, kan det utleiast at

$$P + \kappa \nabla^2 T = \rho c (\partial T / \partial t). \quad (2)$$

ρ er densiteten av mediet, og c varmekapasitet per masseining. ∇^2 er Laplace-operatoren (sum av 2. deriverte av komponentar) og $(\partial T / \partial t)$ gir tidsvariasjonen av temperaturen T . Likninga dekkjer mange interessante situasjonar, og løysinga er avhengig av om der er varmetilførsle og korleis den eventuelt varierer med tida, sånn som ved



Figur 3. Fouriertilpassing til ein eindimensjonal periodisk firkantfunksjon, med tilpassing for $n = 1, 3, 5, 7$. Tilpassinga blir betre med høgre n -verdiar.

periodiske varmepulsar. Fourier-matematikken er viktig verktøy for å finne løysingar.

For eindimensjonalt tilfelle, og utan varmeutvikling P , blir uttrykket

$$\kappa (\partial^2 T / \partial x^2) = \rho c (\partial T / \partial t), \quad (3)$$

som er diffusjonslikning for temperaturen, som har kjend løysing. For tilfelle stasjonære forhold, at temperaturen ikkje endrar seg, blir løysinga særleg enkel, nemleg at temperaturen varierer lineært gjennom mediet.

Fourier-seriar og Fourier-transformasjon

Fourier hadde ein solid matematisk bakgrunn, og alt som 18-åring hadde han vist god matematisk innsikt og levert eit arbeid om røtene i algebra- ▶

iske likningar. Det var arbeidet med å analysere varmeleing utifrå varmeleingslikninga som førte til det han vel er mest kjent for: Fourier-seriar og Fourier-transformasjon. Men det skal føyast til at han også vart møtt med betydeleg skepsis blant framtrekande matematikarar på den tida, som Lagrange og Laplace.

Fourier-seriar

Å utvikle funksjonar i Fourier-seriar betyr å uttrykke funksjonane som sum av trigonometriske funksjonar, til dømes i éin dimensjon uttrykt i kompleks form

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{inx}. \quad (4)$$

Relasjonen til trigonometriske funksjonar er som kjent Euler-formelen $e^{\pm inx} = \cos(nx) \pm i\sin(nx)$. Koeffisientane A_n blir tilpassa funksjonen som skal beskrivast, og kan uttrykkast ved integralet

$$A_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx. \quad (5)$$

I integralet her er funksjonen $f(x)$ den som skal beskrivast med (4), til dømes ei observert kurve.

I praksis vil funksjonstilpassinga ikkje bestå av uendeleg mange ledd, men så mange ledd som trengst for akseptabel tilpassing. Eksempel i Figur 3. Fourier-serie-tilpassing er særleg nyttig for tilfelle der funksjonen har eit visst mønster av periodisitet. Eit viktig poeng er at også kompliserte ikkje-deriverbare funksjonar kan beskrivast med kontinuerlege (og deriver- og integrerbare) tilpassa funksjonar i form av Fourier-sum. Fourier-seriar er sentrale verktøy for både vitenskaplege og tekniske problemstillingar.

Den variable, x , er i radianar, og blir ofte erstatta av variabel z med L som periode: $nx = kz$, der $k = 2\pi n/L$. z kan til dømes vere ein fysisk posisjonskoordinat eller ein tidskoordinat.

For ein funksjon som er periodisk med periode L , det vil seie i intervallet $[-L/2, L/2]$, blir koeffisienten

$$A_n = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} f(z) e^{-ikz} dz. \quad (6)$$

Denne forma er utgangspunkt for å utleie Fourier-transformasjon nedanfor.

Fourier-transformasjon

Den matematikken som går under namnet Fourier-transformasjon kan utleiast av Fourier-serieuttrykka.

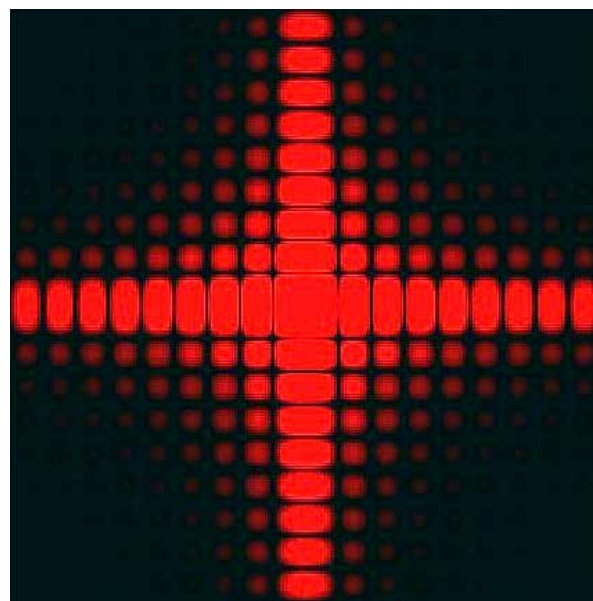
Vi innførte storleiken $k = 2\pi n/L$, og A_n er ein funksjon k . Likning (6) kan då skrivast på følgjande form når L blir stor:

$$F(k) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{\infty} f(z) e^{-ikz} dz. \quad (7)$$

Denne versjonen av koeffisienten A_n kan innførast i (4), og ein gjer summen til integral ved å innføre steglengder $dk \sim 1/L$:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{ikx} dk. \quad (8)$$

Likningane (7) og (8) er det som har fått namnet Fourier-transformasjonen. Ved (7) blir ein funksjon i z -doménet overført til ein funksjon i k -doménet, og (8) uttrykker den omvendte overføringa tilbake til z -doménet. Dersom z tilhører det fysiske (direkte) rommet, svarar k til det ein kallar for faserommet, eller også det resiproke rommet. Er z ein tidskoordinat t , vil k svare til vinkelfrekvens ω . Fourier-transformen beskriv altså effekten av fysiske operasjonar. Om til dømes $f(z)$ beskriv eit optisk element, som ei spalteopning eller eit gitter, fortel $F(k)$ korleis lysmønsteret



Figur 4. Diffraksjonsbilde av ei kvadratisk opning, tatt med laserlys (He-Ne-laser, bølgjelengd 632,8 nm). Bildet er Fourier-transformen av den kvadratiske spalta. (Kilde: Wikipedia commons).

(diffraksjonsbildet) blir som funksjon av bølgevektor k for det spreidde lyset etter at elementet er belyst med laserlys. Eit eksempel er gitt i Figur 4.

Omvendt kan ein bestemme forma av lyskjelda ved tilbaketransformasjon og slik få informasjon frå diffraksjonsmønsteret om det spreiane objektet.

Fourier-transformasjonen og andre transformasjonar

Fourier-transformasjon er grunnlag for ei rekke fagområde i teknikk og fysikk: Signalanalyse, spektroskopi, akustikk, optikk, avbilding, filtrering, diffraksjon av lys, røntgen, nøytronar og elektron.

Der er enkelte Fourier-liknande transformasjonar som det er naturleg å nemne her: Laplace-transformasjon, rask-Fourier-transformasjon og såkalla wavelet-transformasjon. Laplace-varianten nyttar komplekse variable, og er eit viktig verktøy for matematisk analyse. Rask-Fourier gjer bruk av diskrete funksjonar, og har faktoreringsrutinar veileigna for raske datamaskinprogram for kommunikasjon og spektroskopi. Wavelet-varianten nyttar andre moderfunksjonar enn Fouriers trigonometriske (eller kompleks eksponentiale) funksjonar, og er effektive for snøgg signalbehandling og datakompresjon.

Wavelet-transformasjon har også fransk opphav, der den blir kalla ondelette-transformasjon («ondelette» = småbølge), men den engelske omsettinga synest å vere tatt i bruk i mange språk, som i Skandinavia, Tyskland og Russland. Franskmannen Yves Meyer, som fekk Abelprisen for 2017 for sin innsats på wavelet-teori, gav uttrykk for kor viktig han vurderte Fourier å vere som underlag også for dette feltet.

Fourier og drivhuseffekten

Forskarar i tidlegare tider var ofte multidisiplinære i større grad enn i dag. Vi har sett at Fourier sin innsats var både i fysikk og i matematikk. At han også blir nemnd i samband med drivhuseffekten er mindre kjent. Men i 1824 offentleggjorde han ein teoretisk betraktning at atmosfæren må ha betydning for temperaturen på jorda, der han tok omsyn til solstråling inn og varmestråling ut [3]. Han kunne til og med dokumentere effekten frå eksperiment med svart boks med og utan glas-slokk som professor i filosofi og naturhistorie i Geneve, Horace-Benedict de Saussure, hadde utført på 1760-tallet [4].

Ettermæle

Joseph Fourier døydde 16. mai 1830 og er gravlagd på Cimetière du Père-Lachaise i Paris. Joseph Fourier er ein av dei 72 namna over framstående fransk borgarar som er inskriberte i Eiffeltårnet i Paris.

I tillegg til Fourier-seriar og Fourier-transformasjon finn ein Fourier-namnet i uttrykk som Fourier-optikk, Fourier-spektrometer, Fourier-teknologi. På månen er det eit krater som heiter Fourier-krateret. Vi har nemnt Université Joseph Fourier i Grenoble. I Auxerre er ein skole i teknologi kalla opp etter han, og byen har også eit Société Joseph Fourier.

I samband med 250-årsjubileet er det blitt utgitt i alle fall ei ny bok, François Arago: *Joseph Fourier* (CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016). Ein tidlegare biografi er John Herevel: *Joseph Fourier, the man and the physicist* (Clarendon Press, 1975). Ein lett tilgjengeleg tekst som mellom anna gir ein meir utfyllande omtale av matematikaren Fourier, er gitt i referanse [5]. ■

Referansar

Referansar 1–3 er alle arbeid av Joseph Fourier.

1. «Mémoire sur la propagation de le chaleur dans les corps solides». Exposé 21 decembre 1807 à l'Institut National. Imprimé à Nouveau Bulletin des sciences par la Société Philomatique de Paris (mars 1808), s. 112–116.
2. *Theorie analytique de la chaleur* (1822). Firmir Didot, Paris. Nettside: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1045508v>
«Mémoire sur la theorie analytique de la chaleur». Mémoires de l'Academie royale des sciences de l'Institut de France, tome VIII, s. 581–622 (1827).
3. «Mémoire sur les températures des globe terrestre et des espace planétaire». *Annales de chimie et de physique* (1824), og i ny versjon i *Mémoires de l'Academie royale des sciences de l'Institut de France*, tome VII, s. 570–604 (1827).
4. Ken Butti. «Horace de Saussure and his hot boxes of the 1700s» (2004). Nettside: <https://www.solarcooking.org/saussure.htm>
5. Jean-Pierre Kahane. «Le retour de Fourier». Institut de France, l'Academie des sciences (2005). Nettside: http://www.academie-science.fr/pdf/dossiers/Fourier/Fouriere-pdf/Fourier_Kahane.pdf

Bokanmeldelse:

Alv Egeland: Kristian Birkeland – Naturvitenskapsmann og industriforsker (God Strek 2017)

Vi har fått tilsendt Egelands birkelandbiografi i redaksjonen i *Fra Fysikkens Verden*. Planen var å sende den videre med ønske om en anmeldelse. Men så begynte jeg å bla i boka. Den viste seg å være så fengslende at det nesten ikke var mulig å legge den fra seg. Egeland har gjort et kjempearbeid og samlet et stort materiale om Kristian Birkeland over en lang årrekke. Dette presenteres nå i en fin biografi om Kristian Birkeland.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

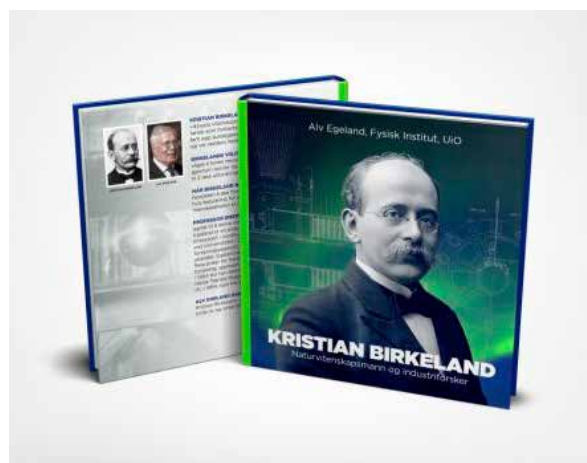
Boka er delt inn i 12 kapitler. I kapittel 2 omtales ungdom og utdannelse. Her får vi vite at Kristian allerede som skolegutt var usedvanlig vitebegjærlig når det gjaldt naturfag, og at han raskt utviklet en stor interesse for matematikk, fysikk og kjemi. Han tok eksamen artium ved Aars og Voss skole i 1885 med glimrende karakterer.

Birkeland begynte så på studier ved Universitetet i Oslo og valgte fysikk som fordypningsfag. Han hadde fem gode år som student ved universitetet og tok lærereksamen i 1890, igjen med beste karakter.

Allerede som elev ved Aars og Voss skole gjorde Birkeland et vitenskapelig matematisk arbeid som imidlertid ble publisert først i 1914 i en artikkel sammen med Toralf Skolem.

Birkeland var ansatt som lærer ved Aars og Voss skole fra 1889 til 1893. Våren 1893, da Birkeland var 25 år, ble han utnevnt til universitetsstipendiat ved Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo. Han satset umiddelbart på utenlandsopphold for forske sammen med kjente matematikere og fysikere. Det ble et vellykket opphold i Paris og samarbeid med Poincaré. Etter Parisoppholdet reiste Birkeland via Genève der han var et halvt år, og så til Tyskland der han blant annet fikk god kontakt med den norske matematikeren Sophus Lie.

Birkeland hadde en enorm iderikdom og store kunnskaper. Han arbeidet raskt og effektivt, så han utarbeidet, både som eneforfatter og i samar-



beid med kolleger, en jevn strøm av vitenskapelige artikler og rapporter. I perioden 1890–95 fullførte Birkeland 14 avhandlinger innenfor feltet elektromagnetisme – både eksperimentelle og teoretiske arbeider. Birkelands viktigste bidrag i dette fagområdet kom i en artikkel publisert i 1994, der han utledet det generelle matematiske uttrykket for overføring av energi ved hjelp av elektromagnetiske bølger.

Birkeland var en omgjengelig og munter person som det ganske sikkert var en fornøyelse å samarbeide med. Egeland omtaler dette på en underholdende og fengslende måte i boken.

Den 6. oktober 1898 ble Birkeland kalt til professor i fysikk ved Det kongelige Fredriks Universitet i Christiania.

Birkelands omfattende nordlysforskning omtales i kapittel 3. Det begynte med at han i andre halvpart av 1890-årene arbeidet med katedrstråler. Egeland forteller at Birkeland var nær ved å oppdage elektronet. Men J.J. Thomson i England var tydeligere i sine konklusjoner og regnes som elektronets oppdager.

Egeland gir her en grundig fremstilling av hva som var kjent om nordlyset på Birkelands tid og hvilke bidrag Birkeland kom med. På dette området gjorde Birkeland en formidabel innsats. Han innså sammenhengen mellom utstråling av ladde par-

partikler fra sola og nordlyset. Birkeland kom frem til sine resultater ved å kombinere omfattende eksperimentering med krevende beregninger av banene til ladde partikler i jordas magnetfelt. Hans arbeid med å forstå nordlyset foregikk over en 15 års periode fra slutten av 1890-årene og frem mot 1912, avbrutt i årene 1903–1906 av forskningen som førte til produksjon av norgessalpeter og etableringen av Norsk Hydro.

Egelands bok er detaljert og innholdsrik. Han gir oss en innføring i Birkelands nordlysteori, og forteller om Birkelands laboratorieeksperimenter og etableringen av observatorier i ekstremt værharde steder i Nordnorge slik som på toppen av Halddefjellet.

Birkelands såkalte terellaeksperimenter [1] ble berømte. Her gjorde han simuleringer som viste sammenhengen mellom ladde partiklers bevegelse og produksjon av nordlys. Birkeland forsto at nordlyset har sammenheng med solaktivitet. Dette var en ny tanke som særlig møtte motstand i England. Først i 1960-årene og fremover ble det klart for de fleste at Birkeland hadde rett, og betegnelsen Birkelandstrømmer ble innført i omtalen av de ladde partiklene fra sola som ble fanget opp av jordas magnetfelt.

Egeland har videre skrevet et kapittel med tittelen «Solen og Universet». Her omtales Birkelands forskning på egenskapene til det interstellare rom. Det ble på Birkelands tid oppfattet som tomt. Men Birkeland mente at rommet mellom stjernene var fullt av partikler, dels ladde og dels nøytrale. Han beregnet partikkeltettheten av dette plasmaet i Melkeveien, og kom frem til en verdi som stemmer godt med resultater fra vår tids satellittmålinger.

Så kommer et sentralt kapittel: Industriforskeren og teknologen. Her omtales blant annet Birkelands elektriske kanon. Historien om hvordan en kortslutning inntraff da kanonen skulle demonstreres under en forelesning i Universitetets festsal 6. mars 1903, blir levende fortalt. Det oppsto en lysbue og Birkeland kjente da en merkelig lukt som han greide å identifisere. Dette tente en gnist i Birkelands kreative sinn, og han

ble satt på sporet av hvordan man kan bruke en slik lysbue til å produsere kunstgjødsel fra lufta.

Videre forteller Egeland om samarbeidet mellom Kristian Birkeland og Sam Eyde. Her gir Egeland en grundig diskusjon av hva slags bidrag Birkeland og Eyde og andre medarbeidere ga til oppfinnelsen av den kompliserte prosessen som førte til at de greide å produsere kunstgjødsel ved å ekstrahere kvelstoff fra luft. Konklusjonen er at Birkeland var drivkraften i det vitenskapelige arbeidet, mens Eyde konsentrerte seg om etableringen av Norsk Hydro. Diskusjonen er viktig for historikere, for det har vært publisert en del feil informasjon i denne sammenhengen blant annet basert på Eydes selvbiografi fra 1939.

Egeland skriver at Birkeland ble foreslått som nobelprisvinner åtte ganger, fire i kjemi og fire i fysikk, flere av gangene sammen med Sam Eyde. Men nobelkomiteen var klar over at Eyde ikke var noen betydelig vitenskapsmann, så dette var et problem. Om Birkeland hadde fått nobelprisen dersom Eyde ikke hadde vært så oppsatt på at da måtte også han få den, får vi neppe noen gang vite.

Egelands biografi om Birkeland er en viktig og god bok. Ikke feilfri. Korrekturen kunne vært bedre – jeg fant en del trykkfeil, og det var noen gjentakelser her og der. Men forfatteren har gjort en gedigen jobb og presenterer et stort materiale. Temaet – Kristian Birkeland – er fascinerende, og Egeland har fått frem Birkelands enorme kreativitet og arbeidskapasitet – og den store betydningen han har hatt både som vitenskapsmann og teknolog. ■

Referanse

1. A. Egeland. «Forskeren Kristian Birkeland». *Fra Fysikkens verden* nr. 3 (2017), s.77–80.

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



Jan Myrheim

70 år

Jan Myrheim ble født 14. februar 1948 i Nord-Trøndelag og vokste opp på garden Myrheim i Røyrvik, et tettsted i Namdalen ikke langt fra svenkegrensen. Med bare omtrent 230 innbyggere på stedet, skulle man kanskje tro at en akademisk karriere ikke var det mest aktuelle yrkesvalg på 1960-tallet. Men Jan Myrheim skaffet seg kunnskaper med brevkurs og ved selvstudium, slik at han kunne ta artium som privatist våren 1965.

Høsten samme året ble han immatrikulert ved Universitetet i Oslo og markerte seg straks som en av de beste studentene der. Han ble cand.real. med karakter *Laudabilis praecesteris* høsten 1972. Hovedfagsoppgaven hans var om de første observasjonene av positive rho-mesoner produsert i bakoverretningen ved proton-proton-kollisjoner. Eksperimentet ble gjort i gruppen til professor Arne Lundby ved CERN. Myrheim hadde også med en egen teoretisk studie av denne reaksjonen.

Jan Myrheim ble så ansatt som vitenskapelig assistent i teoretisk fysikk ved UiO. I 1974 begynte han et samarbeid med en av oss, Jon Magne Leinaas, som også var vitenskapelig assistent ved samme institutt. Sammen publiserte vi tre år senere en artikkel med tittel «On the Theory of Identical Particles» i *Nuovo Cimento* 37 B, 1 (1977), som omhandlet partikler med fraksjonell statistikk i to-dimensjonale systemer. Den vakte ikke særlig stor oppmerksomhet til å begynne med, men fikk senere betydelig oppmerksomhet. Frank Wilczek (nå ved MIT) ga partikler av denne type navnet anyoner, og dette navnet har blitt hengende ved. Se nærmere omtale av denne delen av Myrheims forskning i hans egen artikkel i *FFV* nr. 4, s. 100–102 (2016).

I årene 1976–78 hadde Myrheim forskeropphold ved CERN i Geneve. Under dette oppholdet skrev han blant annet et manuskript med tittelen

«Statistical Geometry». Det eksisterer bare som et CERN preprint (TH. 2538), men inneholder viktige, nye idéer. Fysikere som G. 't Hooft, R. Penrose og C.N. Yang har vært inne på liknende tanker som de Myrheim her hadde utviklet på egen hånd.

Dette arbeidet spilte en viss rolle da Myrheim søkte om NORDITA-stipend i 1981. Han ga da et seminar i København om hvorledes en kunne utlede romtidens eksistens fra en tilfeldig fordeling av punkter. Den danske fysikkprofessoren Holger Bech Nielsen hadde den største respekt for det Jan her hadde gjort.

Etter at NORDITA-perioden var slutt og det ikke var stilling å få i academia, flyttet Jan hjem til Myrheim. Der arbeidet han med programmering for Grong Gruber som utvant sovelkis i Røyrvik.

I 1985 flyttet Myrheim til NTH/NTNU i Trondheim, og har blitt værende her siden. I perioden 1987–90 var han ansatt ved MR-senteret ved SINTEF i Trondheim. Med forskerstipend i 1990–93 fortsatte han sine studier av identiske partiklers vekselvirkning i en og to dimensjoner, noe som førte til hans dr. philos.-grad i Trondheim i 1994. Fra samme år fikk han sitt professorat i teoretisk fysikk ved NTNU.

Det som har stått mest i fokus for Myrheims forskning de siste årene, er studier av kvantemekanisk sammenfiltring. Arbeidet har for det meste gått for seg ved å studere numerisk sammenfiltring i lavdimensjonale tetthetsmatriser. Dette har ført til mange interessante resultater, der Myrheims gode forståelse av geometrien i problemene og evnen til å utvikle effektive numeriske metoder har vært avgjørende. Disse arbeidene har vært utført sammen med studenter og stipendiat ved NTNU og UiO, og med Jon Magne Leinaas.

Både som eksperimentell og teoretisk fysiker har Myrheim demonstrert uvanlig gode evner. Han er kunnskapsrik og iderik. Dette har gjort han til en ettertraktet samarbeidspartner.

I tillegg til sin aktivitet innen kvantemekanikkens grunnlag har han i senere år vært engasjert innen astrofysikk, både i den regulære undervisning på Institutt for fysikk ved NTNU, og som veileder for yngre medarbeidere i deres forskning. Han har forelest mange fag innen teoretiske fysikk og har vært en verdifull ressurs. Myrheim har i alle år vært en vennlig og omgjengelig kollega og samarbeidspartner.

Jan Myrheim har fått Norsk Datas pris i partikkelfysikk, IBMs fysikkpris og Nansenprisen for fremragende forskning. Han er medlem av Det Kongelige Norske Videnskabers Selskab i Trondheim.

Nå er Myrheim blitt emeritus ved NTNU. Vi ønsker ham lykke til med jubileet, og håper han fremdeles vil ha produktive år som forsker foran seg, og at han vil fortsette å utvikle nye interessante samarbeidsprosjekter!

*Iver H. Brevik, Hallstein Høgåsen,
Johan S. Høye og Jon Magne Leinaas*



Eivind Hiis Hauge

80 år

Hiis Hauge passerte milepelen 15. november 2017. Han er fødd i Bergen, hadde del av oppveksten i Oslo der han m a tok examen artium, og heile yrkeskarrieren har han hatt i Trondheim. Han tok eitt år ved Nansenskolen før universitetsstudiet, som var i teknisk fysikk ved NTH 1958–1962. Alt i 1965 vart han dr. techn. i teoretisk fysikk, eit uvanleg kort løp for doktorgraden. Han understrekar sjølv at samarbeidet med den litt eldre Per Chr. Hemmer var vesentleg for den gode starten som teoretisk fysikar ved instituttet, som då var leia av Harald Wergeland. Etter nokre år som forskar og stipendiat, mellom annet tre år ved Rockefeller University i New York, vart han dosent i 1972 og full professor i 1976 ved NTH/NTNU. Han har hatt ei rekke opphald ved universitet i Nederland og USA.

Hiis Hauge sitt interesseområde omfattar både klassiske og kvantefysiske emne, som fast- og flytande tilstandar, faseovergangar, overflatefukting, tidsavhengige fenomen som tunnelling og andre kvanteeffektar. Han er kjent som ein drivande forelesar, og har gitt ut læreverk som *Fysikk for elektrostudiet*, *Fysikk for byggstudiet*, og , saman med J.A. Støvneng, *Grunnleggende fysikk – klassisk mekanikk og varmelære*.

Dei akademiske forskingsregistra (Cristin og Bibsys) har om lag 125 oppføringar på Hiis Hauge,

med betydeleg vekt på fysikk i lågdimensjonale system. Her rangerer arbeidet med to-dimensjonal elektrongass saman med Hemmer mellom dei mykje siterte.

Hiis Hauge har brukt svært mykje tid og innsats på styrings- og administrative oppgåver. Fysikk-miljøet ved NTH var delt i fem småinstitutt under fellesnamnet Fysikkseksjonen fram til 1985. Det er Hiis Huges fortjeneste at dei frå 1988 vart samla i eitt Institutt for fysikk, med Hiis Hauge som leiar 1988–1992. I perioden 1996–2002 var han dekan ved Fakultet for fysikk, informatikk og matematikk ved NTNU, som er det nye universitetsakronymet etter omskipinga i 1995. Dette var den tida då ein framleis valde rektor, og Hiis Hauge var vald NTNU-rektor 2002–2005. Han seier seg stolt over initiativet han tok som rektor at NTNU skulle satse på nanoteknologi. Elles gjekk han dristig ut og tok opp att ein tidlegare nedstemt idé, at heile universitetet burde samlast ved Gløshaugen nær sentrum. Igjen vart idéen lagt død, men var visst udødeleg, for samlingsprosessen er i mellomtida velsigna av Storting og Regjering og er no i full førebuing!

Etter rektortida, i 2006, vart Hiis Hauge utnemnd til Kommandør av St. Olavs Orden. Men det betydde ikkje inngang til otium for denne vitale mannen. I tre år, 2013–2016, var han president i Norges tekniske vitenskapsakademi NTVA, styremedlem av Polsk-norsk forskingsfond i 10 år, og i åtte år av Danmarks Grundforskningsfond.

Blant Hiis Huges mange karakteristika er musikkinteresse og kunnskap om klassisk musikk, kombinert med utprega språksans og interesse for litteratur. Desse interessene førte til mange styreverv på musikkområdet, der han har særleg engasjement. Han var styremedlem for Trondheim symfoniorkester 1977–1983, og var styreleiar i eitt år, og vidare var han styreleiar for Trondheimssolistene 1990–1995 og medlem i styret for Trondheim kammermusikk-festival i 12 år. Hiis Hauge var også styreleiar for stiftelsen Nansenskolen 2005–2010, og styremedlem for NTNUs Institutt for språk og litteratur, og han er med i styringsgruppa for eit nyoppretta SFF i fysikk ved NTNU.

Hiis Hauge er medlem av Norges tekniske vitenskapsakademi NTVA frå 1986. og av Det Kongelige Norske Videnskabers Selskab DKNVS frå 1991.

Som kollega utmerkar jubilaranten seg som ein person med positiv vinkling på det meste i livet. Han er språkmektig som få, og meistrar engelsk og fransk pluss noko nederlandsk, og også sognamål når det krevst.

Emil J. Samuelsen og Kristian Fosshem

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

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
Professor Åshild Fredriksen, UiT, atmosfære-, rom- og plasmafysikk
Professor Håvard Helstrup, HiB, subatomær- og astrofysikk
Professor Jon Samseth, HiOA, industri- og energifysikk
Professor Olav Gaute Hellesø, UiT, optikk
Lektor Morten Trudeng, Asker VGS, Norsk Fysikklærerlag

Adresse:

Norsk Fysisk Selskap
Institutt for fysikk, NTNU
7491 Trondheim

E-post: nfs.styret@gmail.com
Bankgiro: 7878.06.03258

Org.nr.: 940 340 829

www.norskfysikk.no/nfs/

ISSN-0015-9247