

Fra Fysikkens Verden

NR. 1 – 2019
81. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP

Nordlys og Birkelandsstrømmer

Les også om:

- Kvantemekanisk sammenfiltrering
- Sterile nøytrinoer
- Elektriske batteri
- Termoelektrisk materiale

Nr. 1 – 2019

81. årgang

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:

Professor Øyvind Grøn
OsloMet – storbyuniversitetet
og Fysisk institutt, 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
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.norskfysisk.no

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 lignende mottas gjerne, men de må ikke være lengre enn 1–2 sider. Doktoromtaler begrenses til en halv side inkludert bilde.

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

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

Innhold

Fra redaktørene <i>Øyvind G. Grøn</i>	4
Resultat for FFVs skrivekonkurranse 2018 <i>Emil J. Samuelsen</i>	4
Fysikermøtet 7.–9. august 2019 <i>Michail Baziljevich og Jøran Moen</i>	5

Fysikknytt

Sterile nøytrinoer <i>Øyvind G. Grøn</i>	6
Termoelektrisk materiale <i>Øyvind G. Grøn</i>	8

Artikler

Nordlys og Birkelandsstrømmer <i>Asgeir M. Brekke</i>	9
Elektriske batteri – uunnverlege hjelperåder <i>Emil J. Samuelsen</i>	13
Kvantemekanisk sammenfiltrering: Del I <i>Jan Myrheim</i>	18



500-årsjubileum

Multikunstneren, oppfinneren og vitenskapsmannen **Leonardo da Vinci** døde 2. mai 1519. Verden minnes han med respekt.

Selvportrett fra 1514.

Vi takker for bidrag til FFV sin skrivekonkurranse og gratulerer vinnerne som har bidratt med verdifulle artikler. Nå ønsker vi at flere skriver i FFV! Det er interesse for alle temaer innenfor fysikk inkludert nyhetsartikler, artikler om egen forskning, fysikkhistorie og fysikk som en relevant i skolesammenheng. Det bør ikke bli slik at redaktørene skriver halvparten av artiklene. For å kunne vise fram mangfoldet i fysikken er vi avhengig av bidrag fra fysikk-miljøet i Norge.

Dette første nummeret for 2019 innledes med nyhetsartikler om nøytrinoer, og om utvikling av faste stoffer med egenskaper som vil være nyttige blant annet for å nyttiggjøre seg energi som ellers «går tapt» som varme. Dernest følger en artikkel om nordlys og Birkelandstrømmer som setter denne delen av Kristian Birkelands arbeid i et historisk perspektiv. Vi har også en oversiktsartikkel vår tids om utvikling av batterier. Dette er et viktig og aktuelt tema blant annet i sammenheng med at elektriske motorer er i ferd med å gjøre sitt inntog i transportsammenheng, og da har batterier med stor kapasitet avgjørende betydning.

Nr. 1 for 2019 inneholder del 1 av en stor artikkel om kvantemekanisk sammenfiltrering skrevet av Jan Myrheim, en norsk fysikknestor som er ekspert på dette temaet. Det er et komplekst tema, og for å gi en forståelse av temaet som yter rettferdighet til hva fysikerne nå vet om det, må selv en halvpopulær innføring i temaet bli ganske krevende. Men gjør en leseranstrengelse! Belønningen er en innsikt du ikke kan få bare ved å lese mer kortfattede og overflatiske artikler av typen pressemeldinger.



Øyvind G. Grøn



Emil J. Samuelsen

Rettelse

Uttrykket (9) i FFV nr. 4 s. 100 (2018) for Hawkingtemperaturen til et svart hull skal være

$$T_{\text{BH}} = 6 \cdot 10^{-8} \text{ K} \frac{M_{\odot}}{M}.$$

Resultat for FFVs skrivekonkurranse 2018

Med formål å stimulere til auka tilgang på stoff frå fysikkmiljøa i landet har konkurransen blitt annonsert i FFV nr. 1, 2 og 3 for 2018. Konkurransen er stødd økonomisk av styret i Norsk Fysisk Selskap.

Vinnarar:

Førstepremie på kr 4000 går til:

- Eivind Hiis Hauge (NTNU) for artikkel i FFV 2018/2: «James Joule – ølbryggeren som etablerte energiloven». *Juryens vurdering: Særs velskrevet, informativ og lærerik og lettlest artikkel om en kjent fysiker.*

To andrepremiar, kvar på kr 3000, går til:

- Jon Magne Leinaas (UiO) for artikkel i FFV 2018/2: «100 år med Noethers teorem».

Juryens vurdering: Velskrevet artikkel om et fysikkemne som utgjør et betydelig bidrag til moderne fysikk, og om en fysikers livsskjebne.

- Andreas D. Haraldsrud (Valler vgs. og UiO) og Cathrine W. Tellefsen (UiO) for artikkel i FFV 2018/3: «Programmering – for fysikkens skyld». *Juryens vurdering: Et viktig og aktuelt tema skrevet på en god måte med mange konkrete eksempler.*

Juryen har bestått av staben ved redaksjonen til *Fra Fysikkens Verden*: Maria Hammerstrøm (Realfagsbiblioteket, UiO), Øyvind Grøn (OsloMet), Emil J. Samuelsen (Institutt for fysikk, NTNU), samt medlem av FFVs redaksjonskomité, Per Osland (Fysisk institutt, UiB).



Scandic Holmenkollen Park Hotell har en praktfull beliggenhet med panoramautsikt ut over Oslofjorden.

Fysikermøtet 7.–9. august 2019

Fysikermøtet 2019 arrangeres på Holmenkollen Park Hotell i Oslo, med fantastisk utsikt utover byen og fjorden. Vi ønsker alle velkommen til et givende og minnerikt møte, med faglig spennende foredrag, populærvitenskapelige innslag og markering av 50-årsjubileet for den første månelandingen. Dessuten inviteres deltagerne med til et sosialt kveldscruise på fjorden.

Programmet går over tre dager og har elementer som spenner fra grunnleggende forskning og utdanning til fysikk i bruk for å løse store samfunnsutfordringer. Det vil bli plenum og parallellsesjoner, poster- og sponsorutstilling, og møteplasser for inspirasjon og idéutveksling om fysikkfagets utviklingsmuligheter i skole, forskning, næringsliv og helsesektor. Fysikermøtet i Oslo 2019 skal være en attraktiv møteplass for fysikere i universitets- og høyskolesektoren, instituttsektoren, næringsliv, og fysikklærere i videregående skole. Utover forskning og læring av fysikkfaget er Fysikermøtet en arena for studenter som navigerer i arbeidsmarkedet og for arbeidsgivere som rekrutterer fysikere til sin virksomhet. Arrangementet gir dessuten forskere muligheten til å presentere sine arbeider, pleie kontakter, få nye ideer og inspirasjon, og etablere kontakter for nye samarbeidsprosjekter.

Alle MSc og PhD kandidater vil få mulighet til å presentere sitt arbeid som foredrag eller poster.

Arrangementskomiteen planlegger med 200 deltagere.

Professor Serge Haroche, en av nobelprisvinnerne fra 2012, vil holde åpningsforedraget med tittelen «Laser breakthroughs in basic science». Blant høydepunktene finner du også foredrag om «Den første månelandingen og fremtidsvisjonene for bemannet romfart» ved Erik Tandberg, «Climate Research: What we know and what we don't» ved Bjørn Samset, og et fysikkshow med Selda Ekiz.

I tillegg får du høre om hjernefysikk, utfordringene innen fusjonsenergi, bygningsintegreerte solceller, nanoteknologi, partikkelfysikk og akseleratorer, elektrisk sjøfart og mye mer. Plenumsforedragene skal holdes på et tilnærmet populærvitenskapelig nivå og gi tilhørerne et innblikk i de forskjellige temaene.

Dette må du ikke gå glipp av, og gjør ditt bidrag til at mange fysikkvenner kommer! Det er mulighet for dagpakker for dem som ikke har mulighet til å delta alle tre dager.

Påmelding til Fysikermøtet: mn.uio.no/fysikermotet. Der finner du oppdatert program, praktisk informasjon og registrering. Merk at Early bird-tilbudet for registrering avsluttes 15. mai.

Fysikermøtet arrangeres hvert andre år av fysikkinstituttene ved de norske breddeuniversitetene i samarbeid med Norsk Fysisk Selskap.

*Michail Baziljevich og Jøran Moen,
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo*

Sterile nøytrinoer

Her gis en oppdatering av statusen til sterile nøytrinoer etter at en rekke eksperimenter har søkt etter dem de siste 7 årene.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Det er observert tre typer nøytrinoer, såkalte elektron-nøytrinoer, myon-nøytrinoer og tau-nøytrinoer. Nøytrinoene er elektrisk nøytrale og har mye mindre masse enn elektroner – hvor liten vet man ikke. De merker bare gravitasjon og den svake kjernekraften.

Såkalte sterile nøytrinoer er en type nøytrinoer som ikke engang merker den svake kjernekraften. De er hypotetiske – man har ikke observert dem og vet ikke om de eksisterer [1]. Men det finnes grunner til at mange fysikere tror at de eksisterer.

Motivasjon

Ekspperimentelle resultater viser at alle observerte nøytrinoer roterer mot venstre når de observeres i bevegelsesretningen og antinøytrinoer mot høyre. Dette kalles henholdsvis venstrespinn og høyrespinn. Nøytrinoer har venstrespinn og antinøytrinoer høyrespinn.

Dette er egentlig ganske merkelig. For nøytrinoer har masse og beveger seg langsommere enn lys. Det betyr at det går an å bevege seg raskere enn et nøytrino. Tenk deg to observatører A og B i origo i et koordinatsystem. Et nøytrino befinner seg på x -aksen ved $x = 1$ og beveger seg i positiv x -retning. Observatøren B beveger seg i positiv x -retning med større fart enn nøytrinoet. Da vil B observere at nøytrinoet beveger seg i negativ x -retning og roterer til høyre i forhold til sin bevegelsesretning. Det betyr at nøytrinoet har høyrespinn. Men nøytrinoer med høyrespinn har ikke vært observert, kun antinøytrinoer. Så her er det noe som ikke stemmer.

Figur 1. Elektron-, myon- og tau-nøytrinoer er observert, men ikke sterile nøytrinoer.

	ELECTRON NEUTRINO	MUON NEUTRINO	TAU NEUTRINO	STERILE NEUTRINO
				
MASS		< 1 electronvolt		> 1 electronvolt
FORCES THEY RESPOND TO		Weak force Gravity		Gravity
DIRECTION OF SPIN		All three "left handed"		"Right handed"

Dette problemet hadde ikke eksistert dersom nøytrinoene var masseløse, for da hadde nøytrinoene beveget seg med lyshastighet og det hadde ikke gått an å bevege seg raskere enn nøytrinoet. Da hadde det ikke eksistert B-observatører som skulle observere nøytrinoer med høyrespinn. Derfor postulerte den såkalte standardmodellen for elementærpartiklene at nøytrinoene er masseløse.

I år 2000 viste målinger med det japanske nøytrinoobservatoriet Superkamiokande at nøytrinoene har masse. Dermed fungerer ikke lenger forklaringen i forrige avsnitt på at alle nøytrinoer har venstrespinn og antinøytrinoer høyrespinn. Det burde eksistere «B-observatører» som observerer nøytrinoer med høyrespinn, noe som krevde en utvidelse av elementærpartiklenes standardmodell.

Dette motiverte til hypotesen om at det også eksisterer nøytrinoer med høyrespinn. De kalles *sterile nøytrinoer* (figur 1).

Svak kjernekraft og nøytrinoer

Den svake kjernekraften er en svak kraft med ekstremt kort rekkevidde – bare en tusendel av diameteren til et proton. Dens virkning er å omdanne et nøytron i en atomkjerne til et proton, et elektron og et antinøytrino. Elektronet og antinøytrinoet blir sendt ut fra kjernen, og dette omtales som radioaktiv beta-stråling. Den svake kjernekraften forårsaker med andre ord radioaktiv beta-stråling.

Nøytroner og protoner består av kvarker, et nøytron av en opp-kvark og to ned-kvarker og et proton av to opp-kvarker og en ned-kvarker. Kvarker har tre typer ladning: fargeladning som gjør at de forårsaker en sterk kjernekraft, elektrisk ladning som gjør at protonet er positivt ladd, og en «svak ladning» som forårsaker den svake kjernekraften. Den gjør at en ned-kvark kan omdannes til en opp-kvark og dermed at et nøytron omdannes til et proton.

På tilsvarende måte som elektromagnetisme formidles av virtuelle fotoner, så formidles den svake kjernekraften av virtuelle bosoner kalt W- og Z-bosonet. De formidler krefter mellom partikler med svak ladning.

Nøytrinoer har verken fargeladning eller elektrisk ladning. Men de har svak ladning. Derfor merker de den svake kjernekraften.

Betegnelsen «steril» kommer av at de sterile nøytrinoene ikke engang har svak ladning. Derfor merker de ikke den svake kjernekraften. Fraværet av svak ladning er en egenskap de må ha for at deres eksistens ikke skal komme i konflikt med observasjonsdata fra en rekke forskjellige nøytrinoeksperimenter.

Nye eksperimenter

Den eksperimentelle statusen når det gjelder sterile nøytrinoer, er tvetydig. Det eksisterer resultater fra to eksperimenter som favoriserer eksistensen av sterile nøytrinoer, og det eksisterer resultater som tyder på at de ikke eksisterer. La oss først se på to eksperimenter som har gitt tegn på at sterile nøytrinoer eksisterer.

Eksperimenter ved Los Alamos Liquid Scintillator Neutrino Detector (LSND) og Mini Booster Neutrino Experiment (MiniBooNE-eksperimentet) ved Fermilab ble omtalt i [2]. Konklusjonen var at måleresultatene fra disse eksperimentene ikke kunne forklares innenfor Standardmodellen. Men det viste seg at ved å postulere eksistensen av to massive, sterile nøytrinoer, kunne man forklare observasjonsdataene fra begge eksperimentene. Dette var syv år siden.

Den 26. november 2018 kom en ny artikkel fra MiniBooNE publisert i *Physical Review Letters* [3]. Her rapporteres resultatet av innsamling av observasjonsdata i MiniBooNE-eksperimentet i over 15 år. Målingene viste at det ble observert flere elektron-nøytrinoer enn det man forventet ut fra Standardmodellen for elementærpartikler. I rapporten skrives at dette overskuddet av elektron-nøytrinoer kan forklares dersom noen av myon-nøytrinoene som produseres i eksperimentet, omformes til sterile nøytrinoer som så omformes videre til elektron-nøytrinoer. En analyse viste også at elektron-nøytrino-overskuddet observert i MiniBooNE-eksperimentet, stemte med det tilsvarende overskuddet observert i de tidligere LSND-eksperimentene. Resultatene av MiniBooNE-eksperimentet er imidlertid i konflikt med resultatene av andre eksperimenter.

På Sydpolen er det en nøytrinodetektor kalt IceCube. I to artikler publisert henholdsvis 12. august 2016 i *Physical Review Letters* [4] og 4. oktober 2018 i *European Physics Journal C* [5], rapporteres at de har søkt etter sterile nøytrinoer uten å finne dem.

I en artikkel publisert 12. februar 2016 i *Physical Review Letters* [6] rapporteres om fire års observasjoner i Daya Bay-eksperimentet basert på produksjon av nøytrinoer og antinøytrinoer fra seks kjernekraftverk. Resultatet var også her at dataene passet med det som var forventet fra Standardmodellen.

Årsaken til uoverensstemmelsen mellom resultatene av de ulike eksperimentene er foreløpig ikke oppklart.

Betydningsfulle partikler

I en artikkel med tittel «Lette sterile nøytrinoer: status og perspektiv» publisert 22. januar 2016 i *Nuclear Physics B*, runder den italienske fysikeren Carlo Giunti av med [2]: «La oss til slutt påpeke at oppdagelsen av eksistensen av sterile nøytrinoer vil være en viktig milepæl som vil ha stor betydning ikke bare for nøytrinfysikk, men for vår oppfatning av grunnleggende fysikk, fordi sterile nøytrinoer er partikler som krever en utvidelse av Standardmodellen for elementærpartikler. Eksistensen av sterile nøytrinoer ville demonstrere at det eksisterer ny fysikk ved lave energier som går ut over standardmodellen, og de kan gi oss viktig informasjon om denne nye fysikken. En slik oppdagelse ville uten tvil fortjene en Nobelpris i fysikk.» ■

Referanser

1. J.R. Kristiansen. «Finnes det sterile nøytrinoer?» *Fra Fysikkens Verden* 73, nr. 3, s. 98–101 (2011).
2. C. Giunti. «Light, sterile neutrinos: Status and perspectives». *Nuclear Physics B* 908, s. 336–353 (2016).
3. A.A. Aguilar-Arevalo og andre. «Significant Excess of Electron-Like Events in the MiniBooNE Short-Baseline Neutrino Experiment». *Physical Review Letters* 121, 221801 (2018).
4. M.G. Aartsen og andre. «Searches for Sterile Neutrinos with the IceCube Detector». *Phys. Rev. Lett.* 117, 071801 (2016).
5. M. Blennow og andre. «IceCube bounds on sterile neutrinos above 10 eV». ArXiv: 1803.02362 (2018).
6. F.P. An og andre. «Measurement of the antineutrino flux and Spectrum at Daya Bay». *Phys. Rev. Lett.* 116, 061801 (2016).

Termoelektrisk materiale

Ved Technische Universität Wien er det gjort eksperimenter for å bidra til forbedring av termoelektriske materialer. Slike materialer kombinerer god elektrisk ledningsevne med å ha dårlig termisk ledningsevne. Denne kombinasjonen av egenskaper er nyttig for å utnytte tapt energi ved hjelp av den termoelektriske effekten.

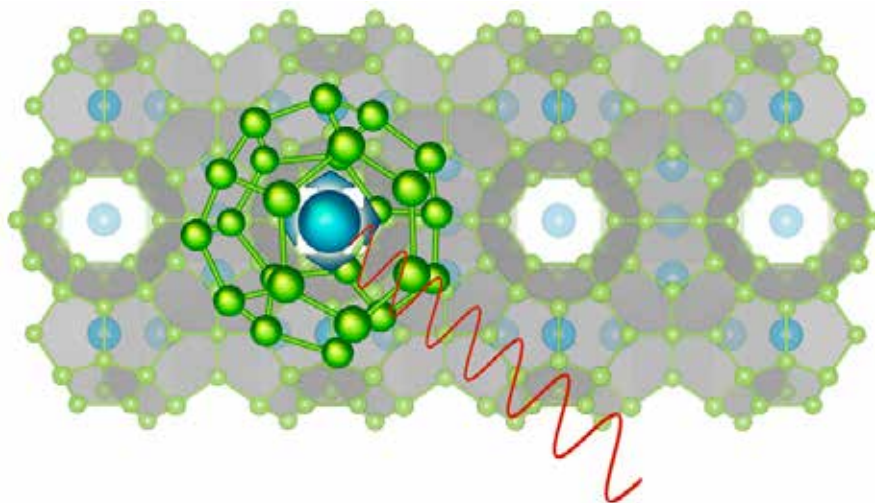
Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

I mange sammenhenger går nyttig energi tapt som varme i utstyr som motorer, lyspærer, datautstyr og liknende. I industriell sammenheng er det større konsum av energi enn det som blir nyttiggjort.

Noe av energien som går tapt, kan komme til nytte som elektrisk energi ved hjelp av den såkalte termoelektriske effekt, dvs. at en termoelektrisk generator omdanner varme til elektrisk strøm [1]. For å oppnå det trengs materialer med spesielle egenskaper. De må være gode elektriske ledere og samtidig dårlige termiske ledere.

Det har i flere år vært forsket for å utvikle materialer med slike egenskaper. I en artikkel publisert i *Nature Communications* 21. februar 2019 [2], har en gruppe forskere rapportert om nye resultater oppnådd ved Technische Universität Wien. De studerte en type materiale som kalles klatrater, som er kjemiske forbindelser med hulrom i krystallstrukturen hvor det befinner seg molekyler av et annet stoff enn i krystallstrukturen (figur 1).

Figur 1. Et atomært «bur» (grønt) med et atom av et annet stoff (blått). Det ekstra atomet kan bare bevege seg i to retninger. Den røde kurven illustrerer en innkommende lydølge. (Illustrasjon: Technische Universität Wien)



I artikkelen rapporterer forskerne at de har oppdaget en effekt som de kaller en «fonon kondoeffekt», som kan forklare denne reduksjonen av varmeledningsevnen. Den vanlige elektroniske kondoeffekten er at spredning av ledningselektroner i et materiale forårsaker en temperatur-avhengig endring av materialets elektriske ledningsevne. Fonerer er kvantiserte lydølger og er lydkvantver på tilsvarende måte som at fotoner er lyskvantver. Fonon kondoeffekten skyldes at bevegelsesretningen til fonerer (lydølger) i et termoelektrisk materiale endres i møte med «klatrat-buret», slik at varmelednings- evnen til materialet reduseres.

Forskerne skriver at denne oppdagelsen kan åpne for nye strategier for å utvikle materialer som er termisk isolerende og gode elektriske ledere med relevans for å nyttiggjøre seg tapt energi ved hjelp av den termoelektriske effekten.

Takk til Emil J. Samuelsen for bidrag til å forbedre artikkelen.

Referanse

1. E.J. Samuelsen. «Termoelektrisk effect». *Fra Fysikkens Verden* 78 nr.1 s. 12–21 (2016).
2. M.S. Ikeda og medarbeidere. «Kondo-like phonon scattering in thermoelectric clathrates». *Nature Communications* 10:887 (2019).



Bilde: Lucas Etore Chieragum/Pexels

Nordlys og Birkelandsstrømmer

Strømmer langs jordas magnetfelt betegnes ofte Birkelandsstrømmer til minne om de vitenskapelige arbeidene professor Kristian Birkeland (1867–1917) utførte for å søke kunnskap om nordlysets kilde. I det følgende gis det en historisk bakgrunn for forståelsen av nordlysprosessene på den tiden Birkeland entret arenaen, samt en oversikt over hvilke betydninger hans arbeide hadde i ettertiden.

Asgeir M. Brekke UiT

Det er få eller ingen forsker som dukker opp mellom sine kollegaer som en supernova på stjernehimmelen. Selv Kristian Birkeland (1867–1917) måtte innse at han stod på skuldrene til tidligere pionerer, etter at han i 1896 publiserte en idé om hvordan katodestråler som strømmer ut fra sola danner polarlys ved polene.

Nordlysførståelsen før det 20-århundre

Så enestående var ikke Birkelands idé siden den danske fysikeren Adam Paulsen (1833–1907) i 1894 hadde antydnet at nordlyset ble dannet av katodestråler som strømmet ned fra den øvre atmosfæren. Nordlyset var for Paulsen en sekundæreffekt av katodestråler fra sola absorbert i den øvre atmosfæren.

Bakgrunnen for Birkelands storhet er først og fremst at han raffinerte naturfilosofenes teori fra

1730-tallet om at nordlyset er et resultat av en vekselvirkning mellom solas og jordas atmosfære.

Etter å ha lest om utladningseksperimentene som den engelske fysikeren Francis Hawksbee (1660–1713) hadde utført med glasskolber i 1742, skrev den norske biskopen Erich Pontoppidan (1698–1764) i 1752 i sitt store verk, *Det første forsøg paa Norges Naturlige Historie*, at nordlyset var et elektrisk utladningsfenomen. Dette ble også antydnet i 1753 både av den franske fysikeren John Canton (1718–1772) og den russiske polyhistoren Mikhail Lomonosov (1711–1765). Da den engelske fysikeren Richard Carrington (1826–1875) i august 1859 oppdaget at det kraftigste solutbrud-



Figur 1. Framsida på Birkelands rapport fra overvintringa på Haldde (Bilde: Birkeland 1901).

det som til da var observert, ble etterfulgt av en sverm av nordlys som ble sett så langt sør som til Mexico, Cuba og jamvel Hawaii, kom det ny styrke i tankene om at sola var kilden til nordlysene.

Den danske læreren Sophus Tromholt (1851–1896) og flere andre fant etter hvert statistiske sammenhenger mellom forekomsten av solflekker og nordlys. Mot slutten av 1800-tallet foreslo flere fysikere at bindeleddet mellom atmosfærene var en form for stråling. Birkeland fulgte opp disse tankene i 1896 hvor han i en publikasjon hevdet at katodestråler fra sola blir, på sin ferd mot jorda, sugd inn mot polene hvor de danner elektriske strømmer, og produserer nordlys og magnetiske forstyrrelser som sekundære effekter.

I 1899 publiserte Birkeland en artikkel hvor han skrev at han trodde han var den første som hadde idéen om at katodestråler fra sola kunne ha innvirkning på jorda, da han ga ut sin artikkel i 1896. Han måtte beklage feilen og innrømme at den tyske fysikeren Eugen Goldstein (1850–1930) allerede i 1881 hadde indikert noe tilsvarende da han hevdet at han trodde det var mulig at sola også sendte ut elektriske stråler i rommet. Birkeland mente likevel at han var den første til å hevde at katodestrålene delvis ble sugd inn langs magnetfeltet mot magnetpolene. Det er kanskje å fortegne historien en smule idet den franske fysikeren Auguste de La Rive (1801–1873), som Birkeland hadde besøkt i Genève i 1893, hadde

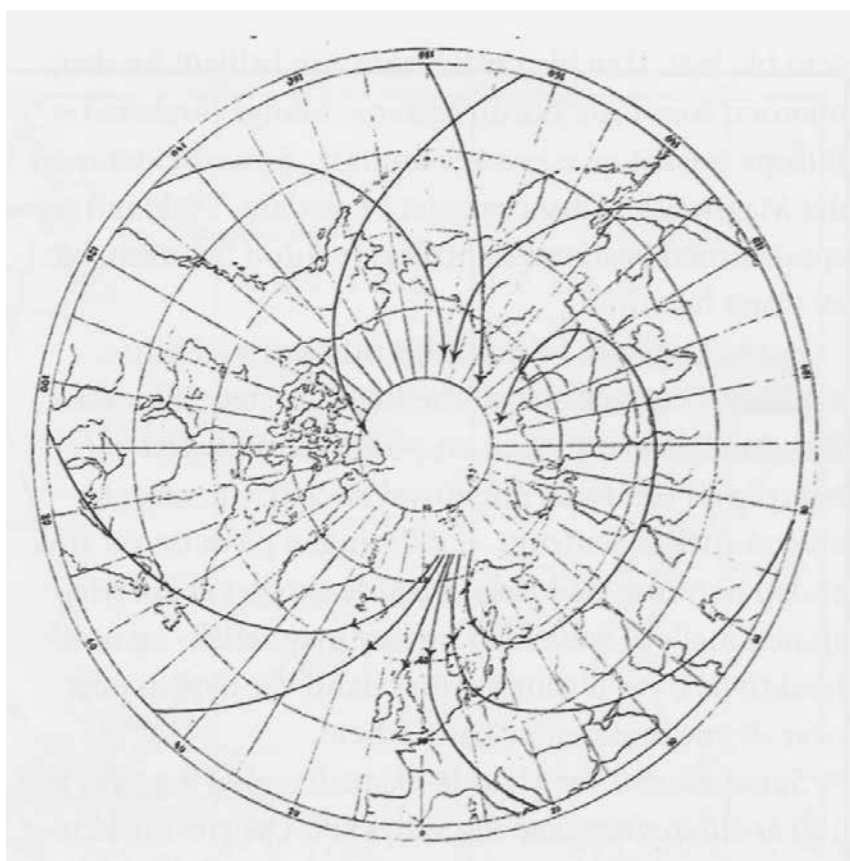
gjennomført utladningseksperimenter der han viste at katodestrålene ble påvirket av magnetfelt.

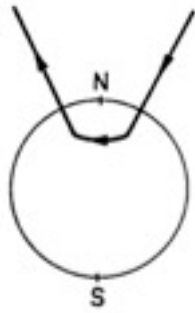
Den svenske fysikeren Erik Edlund (1819–1888) presenterte i 1878 en teori om nordlyset som bygget på egne eksperimenter med en *unipolar induktor*. Han knyttet slepkontakter til den ene polen og ekvator på kula, og lot kula rotere. Retninga og styrken på strømmen mellom slepekontaktene var avhengig av rotasjonsretning og -hastighet. Edlund så en analogi med jorda, som er en stor roterende magnet, og de øvre elektrisk luftlag som han trodde var elektrisk ledende. Han mente at det ville gå en elektrisk strøm fra ekvator mot polene. Siden denne strømmen ville følge de magnetiske feltlinjene, ville de bli mer konsentrert ved polene og forårsake utladninger i form av nordlys.

Nordlysforskerne og de som studerte døgnvariasjonene i jordas globale magnetfelt ved slutten av 1900-tallet, bedrev en form for klimatiske studier. Den tyske fysikeren Hermann Fritz (1830–1883) tegnet *isochasmer* på verdenskart som viste steder med samme midlere statistiske hyppighet av nordlysforekomster. De britiske fysikerne Balfort Stewart (1828–1887) og Arthur Schuster (1851–1934) beregnet statistiske middelværdier av globale variasjoner i jordas magnetfelt fra store datasett for å kartlegge karakteristiske trekk ved geomagnetiske stormer.

Stewart publiserte i 1886 et studium av de daglig observerte *tidevannseffektene* i de jord-

Figur 2. Birkelands illustrasjon som synliggjør de horisontale elektriske strømmenes retning over polarområdet (Illustrasjon: Birkeland, 1901).





Figur 3. Birkelands skisse som viser hvordan en radiell strømgren rettet ned mot ionosfæren og en ut av ionosfæren, er knyttet sammen med den horisontale elektrojeten i øst vest retningen i ionosfæren parallelt med jorda, i nordlyssonen. (Illustrasjon: Birkeland, 1913).

magnetiske variasjonene på midlere bredder, og han skrev som følger: «I allude to the aurora, which is unquestionably an electric current, and must therefore influence the magnetic field.» Her sluttet Stewart seg til en idé den danske fysikeren Hans Kristian Ørsted (1777–1851) allerede hadde antydnet i 1826, da han gjorde oppmerksom på at de magnetiske variasjonene i nærheten av nordlysbuer kunne forklares ved elektriske utladninger.

Elektriske strømmer i ionosfæren.

Birkeland fulgte denne britiske metoden i sitt første studium av det globale strømsystemet som han illustrerte med en figur (figur 2). Pilene viser bevegelsesretningene av de sekundære katodestrålene (negative ladninger) som svinger fra vestover om kvelden til østover om morgenen. Han konstaterte at dette strømsystemet ligger fast i rommet i forhold til sola og at jorda roterer under det. Modellen er en klar forløper for hva vi i dag omtaler som *to-cellesystemet* av de ionosfæriske strømmene ved høye breddegrader. Dette viktige arbeidet av Birkeland er imidlertid bare i liten grad påaktet.

For Birkeland ble også nordlyset en sekundæreffekt idet han mente at katodestrålene fra sola laget en elektrisk strøm, *elektrojet*, i den øvre atmosfæren (ionosfæren) og at katodestrålene fra denne elektrojeten igjen laget nordlys i lavere høyder. Slik var også de magnetiske forstyrrelsene på bakken en sekundær effekt av de opprinnelige katodestrålene fra sola, mente Birkeland.

Hans hovedinteresse konsentrerte seg først og fremst om denne elektrojeten og dens kopling til vertikale strømmer i atmosfæren. Selv om katodestrålene som skapte elektrojeten beveget seg inn mot polområdene langs magnetfeltet, dannet de vertikale (radielle) strømmer (figur 3) som knyttet seg til den horisontale elektrojeten, mente Birkeland. Nå er forskjellen på vertikal og langs magnetfeltet ikke stor i de polare strøk.

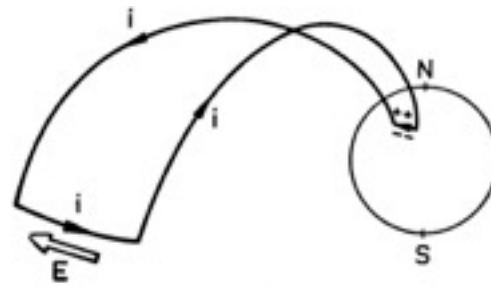


FIG. 9.

Figur 4. Boströms illustrasjon av en elektrisk strømgren fra det nære verdensrom som flyter parallelt med jordas magnetfelt inn mot ionosfæren i nordlyssonen, og en gren som flyter opp fra ionosfæren og ut i det nære verdensrom hvor strømsløyfen er sluttet. Disse parallelle strømmene knyttes i dette tilfellet til nordlys elektrojeten i øst-vest retningen i ionosfæren. Om det elektriske feltet (E) hadde hatt motsatt retning, ville strømmen i ionosfæren gå i vest-øst retningen. Polarisasjonsladninger nord og sør for elektrojetten er også inntegnet. (Illustrasjon: Boström, 1964)

Det var imidlertid den svenske fysikeren Rolf Boström som i 1964 førte Birkelands teorier om strømmene forbundet med nordlyset lenger enn de fleste da han presenterte en modell hvor han antok at elektriske strømmer langs magnetfeltet i nordlyssonen knyttet seg til en horisontal strøm, *nordlyselektrojeten*, som fulgte langs nordlysbuen i øst-vest-retninga hvor den elektriske lednings- evnen var sterkest (figur 4).

Strømmene langs magnetfeltet i nordlyssonen ble påvist av Ray J. Park og Paul A. Cloutier ved hjelp av raketter i 1971 og gitt betegnelsen Birkelandsstrømmer. Boströms polarisasjonsmodell av elektrojeten ble sterkt understøttet i 1974 av A. Brekke, J.E. Douppnik og P. M. Banks ved observasjoner med Chatanika-radaren, en inkohærent spredningsradar som ble montert i nordlyssonen utenfor Fairbanks i Alaska.

Birkeland ble lidenskapelig oppslukt av utladningseksperimentene som han etter hvert raffinerte til det berømte Terrella-eksperimentet hvor han i sitt lille univers kunne gjenskape lysende ringer rundt polene på en magnetisert kule, noe som ga sterke assosiasjoner til polarlys. Dette styrket hans argumenter for at nordlysene ble skapt av katodestråler som strømmet ut fra sola og ble opsugd av jordas magnetfelt.

Schuster hadde imidlertid en innvending mot Birkelands nordlysteori siden han mente at katodestrålene (elektronene) alene ikke kunne skape de magnetiske forstyrrelsene. Det måtte være en nøytral strålestrøm fra sola, bestående av negative så vel som positive ladninger om den skulle nå jorda, skrev han. Til dette reagerte Birkeland og mente at «the distinguished natural

philosopher» måtte ta feil, for som Birkeland sa: «one is inclined to regard the descent of the above-mentioned pencils of rays to the earth as an experimental fact».

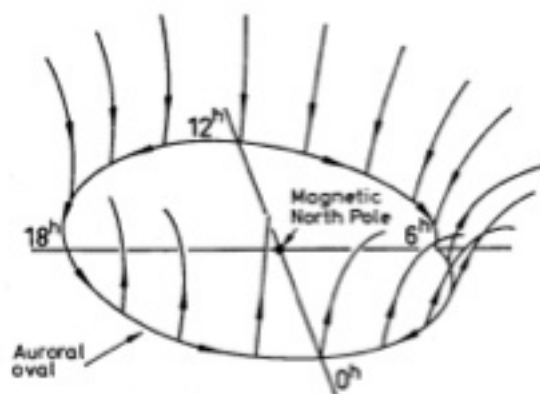
Man må kunne hevde at han ikke hadde demonstrert som «et eksperimentelt faktum» at slike strålebunter kunne nå jorda siden det var en konklusjon han i hovedsak hadde dradd på grunnlag av sine mimetiske Terrella-eksperimenter.

Nøytral eller ladd partikkelstrøm fra sola.

I 1918 fulgte den engelske fysikeren Sidney Chapman (1888–1970) opp Birkelands idé og underbygget troen på at de elektriske partiklene som strømmet inn i atmosfæren hadde kun en ladning til tross for Schusters kritikk av Birkelands arbeid. Den engelske fysikeren Frederik A. Lindemann (1866–1947) var raskt ute til å gå i rette med den yngre Chapman som måtte aksepterte kritikken fra Lindemann. Chapman skrev på 1930-tallet sammen med C.V.A. Ferraro, en rekke artikler med fellestittel; *A New Theory of Magnetic Storms*. Deres teori avvek mye fra Carl Størmers (1874–1957) og Birkelands modeller i og med at Chapman og Ferraro antok at partikkelstrømmen fra sola var nøytral, og inneholdt like mye positive som negative elektriske ladninger som foreslått av Lindemann. Disse nøytrale partikkelstrømmene ville komme mye nærmere jorda enn partikkelstrømmene med kun en ladningstype som ble diskutert av Størmer og Birkeland. Dermed mente Chapman at de gjeldende teorier for polarlys måtte modifiseres. For Chapman var det de globale stormene som var hovedinteressen og de *polare elementære stormene* i nordlyssonen som Birkeland hadde vært opptatt av, var sekundære *substormer* i det store bildet.

I 1967 inviterte Det Norske Vitenskapsakademi til et større møte i Sandefjord for å

Figur 5. Alfvéns skisse av elektriske strømmer parallelle med jordas magnetfelt som knyttet ekvatorplanet sammen med nordlysovalen. (Illustrasjon: Alfvén, 1939).



markere 100-års jubileet for Birkelands fødsel. Hit ble Chapman invitert som en hovedtaler hvor han beklaget seg overfor sitt forhold til Birkeland på følgende måte: «I feel that I unwisely neglected the valuable opportunity afforded by Birkeland's great collection of records of individual storms, available from before the time when I began to interest myself in these phenomena. Storms should be discussed both statistically and individually.»

For en nesten 80 år gammel Chapman som hadde viet mer enn 50 år av sitt liv til forskning på magnetiske stormer, var dette en ydmyk innrømmelse. Men så avsluttet han talen med noen ord som kanskje falt de norske vertene tyngre for brystet: «Birkeland, as I have said, made little direct contribution to our observational knowledge of the aurora. But his indirect influence was great, in introducing younger men to the fascination and possibilities of auroral research.» Chapman berømmet Størmer og Ole Andreas Krogness (1886–1934) som fastsatte høydene for nordlys og for Lars Vegard (1880–1963) framhevet han: «Vegard became a leading pioneer in the study and interpretation of auroral spectrum.»

Dette var jo sant, studier av det synlige nordlyset ved forrige århundreskiftet var et sentralt forskningsområde, men det ble Størmer og Vegard som skulle lede denne delen av nordlysforskningen i Norge til internasjonale høyder. Den første med høydemålinger og kartlegging av ulike nordlysformer (Nordlysatlas), den andre med utallige spektralstudier. Vegard var nok den i Norge som hadde best innsikt i atmosfæreprosessene forbundet med nordlys og benyttet spektralmålingene til å beregne temperaturen og sammensetningen av atmosfæren i nordlyshøyder. Her overdrev han betydningen av nitrogenstøv, men var tross det en ledende internasjonal fysiker på området og utarbeidet en egen modell for atmosfærens sammensetning i store høyder. Han satte til slutt kronen på verket da han påviste at protoner også strømmet fra sola og dannet nordlys. Noe Birkeland hadde vært skeptisk til.

I Norge var det ingen som tok opp studiene av polare *elementære stormer* etter Birkeland. Leif Harang (1902–1970) utførte i engelsk tradisjon et klimatisk studium av magnetiske fluktuasjoner av magnetiske observasjoner fra flere stasjoner i Ishavet hvor han, som Birkeland, kartla konveksjonsstrømmene over polar kalotten.

Studier av magnetiske stormer.

Det var den svenske fysikeren Hannes Alfvén (1925–2003) som til slutt skulle komme med den forløsende modellemn for vekselvirkningen mellom plasmastømmen fra *solvinden* og jordas

øvre atmosfære. Til forskjell fra modellen til Chapman og Ferraro, antok Alfvén at den nøytrale plasmastrømmen fra sola bar med seg et magnetisk felt som skilte ionene og elektronene fra hverandre på flankene av magnetosfæren.

Alfvén forbandt ekvatorplanet og nordlyssona med elektriske strømmer langs de magnetiske feltlinjene fra ekvatorplanet med strøm rettet innover langs magnetfeltet mot jorda på dagsida og utover på nattsida. Disse knyttet seg så til en østover rettet strøm på kveldssida og en vestover rettet strøm på morgensida langs nordlysovalen (figur 5) Det er verdt å merke seg at Alfvén refererte ikke til Birkelands arbeide i denne avhandlingen, noe som viser at det var ikke bare den engelske skolen som hadde oversett Birkelands arbeider i over 20 år, det hadde den såkalte skandinaviske også.

Disse strømmene lang jordas magnetfelt ble observert med satellittmålinger av Armstrong og Zmuda i 1970, som de fant å være i overensstemmelse med de strømmmodellene som Boström hadde foreslått.

Hvorfor heter disse strømmene Birkelandstrømmer? Det er jo minst tre svensker som burde ha sine navn knyttet til dem, dvs. Edlund, Alfvén og Boström. Å gi strømmene over til svenskene ville være å svikte den sterke nasjonalfølelsen som Birkeland la i disse strømmene da han dekorerte rapporten fra oppholdet på Haldde vinteren 1899/1900 med det reine norske flagget uten unionsmerket (figur 1). Eller for ikke å snakke om da han i et brev til Vilhelm Bjerknes (1862–1951) i 1893 skrev: «... slig skal det være, vi nordmenn skal tiltvinge os respekt hos Svenskerne, vi skal lære dem hvor David kjøbpte øllet.»

Den japanske fysikeren Naoshi Fukushima (1925–2003) hadde stor beundring for Birkelands arbeider og mente selv han var den som brakte Birkelands studier av elementære magnetiske stormer tilbake til internasjonal oppmerksomhet. Fukushima mente at ved å overse Birkelands arbeider hadde Chapman og den engelske skolen begått en feil som ledet dem til uriktige resultater. Vi bør imidlertid legge merke til at Fukushima benyttet betegnelsen «Birkeland-Alfvén's current systems for polar magnetic storms».

Fukushima ble innvalgt som utenlandsk medlem av Det Norske Vitenskapsakademi og invitert til symposiet i Sandefjord i 1967 hvor han ga et foredrag. Når han så ble sekretær i IAGA (Internasjonal Association of Geomagnetism and Aeronomi) er det ikke vanskelig å forstå at lobbyvirksomhet fra Norge gjorde susen. ■

Referanser

1. H. Alfvén. «A theory of magnetic storm and Aurorae». *Kungl. Svenska Vetenskapsakademien* III (1939), 18 no. 3, Stockholm.
2. K. Birkleland. «Expedition Norvegienne 1899–1900 pour l'étude des aurores boreales. Resultats des recherches magnetique». *Skrifter Videnskabselskabet i Christiania* I (1901), Mat.-Nat. Klasse. Christiania, s. 1–81.
3. K. Birkeland. «On the cause of magnetic storms and the Origin of Terrestrial Magnetism». *The Norwegian Aurora Polaris Expedition 1902–1903* (1913) Volume I Section 2, Christiania, Aschehoug & Co, Kristiania, s. 449–450.
4. R. Boström. «A model of the auroral electrojets». *J. Geophys. Res.* 69 (1964), 4983–4999.

Elektriske batteri – uunnverlege hjelperåder

Elektriske batteri er utstyr for å kunne skilje og lagre positive og negative elektriske ladningar separat frå kvarandre. Den lagra energien i batteria, representert ved spenninga mellom +del og –del, blir utnytta som elektrisk straum.

Emil J. Samuelsen Institutt for fysikk, NTNU

Elektrisitet er eit heilt uunnverleg element i våre dagars liv og virke. Vi lagar elektrisitet med ulike generator-metodar og fordeler han i mange og kompliserte nettverk. Men å lagre elektrisitet over tid er ikkje uproblematisk. For

korttidslagring kan vi nytte anlegg av elektriske kondensatorar. Men for langtidslagring trengst andre løysingar, der det ikkje er dei elektriske ladningane i seg sjølve som blir lagra, men energien knytt til elektrisiteten. Det kan til dømes vere stillingsenergi knytt til høgdebasseng-reservoar for vasskraft. I elektriske batteri, som er temaet her, blir den elektriske energien lagra som kjemisk energi.

Prinsipp for elektriske batteri

Elektrisk batteri er typisk eksempel på ei elektrokjemiske innretning, og terminologien er elektrokjemisk med ord som elektrolytt, anion ▶

Sekundære batteri

Sekundære eller (gjen)ladbare batteri er den typen som i dag har fått størst utbreiing, fordi elektrisitet blir tatt i bruk i aukande grad på stadig fleire område. Spesielt aktuelt er elektrisitet for transportformål, ikkje berre i kjøretøy, men også i skipsfart og kanskje til og med i luftfart etter kvart. Batteri for energilagring frå vind- og bølgekraft og solceller er eit anna hovudområde. Generelt er sekundærbatteria dyrare enn dei primære. Berre to eksempel på sekundærbatteri blir omtalt i detalj nedanfor.

Ladinga må skje med likestraum, slik at med vekselstraum som ladestraum trengst både nedtransformator og likerettar før tilkoplinga til batteriet. Prinsippet for ladbare batteri er elles det same som for eingongbatteria. Ved opplading blir negativ pol av straumkjelda kopla til negativ elektrode og positiv pol til positiv elektrode i figur 1, men straumretninga blir den andre vegen, også for ionetransporten. Ideelt sett skal oppladinga reversere dei kjemiske prosessane og gi reduksjon ved den negative elektroden, og oksidasjon ved den positive. I praksis blir ikkje reverseringa fullkommen, noko som gjer at batteria tapar seg etter mange ut- og oppladingar. Levetida for batteriet blir karakterisert med tallet på ladingssyklusar før det må kasserast.

Blyakkumulator-batteri

Blyakkumulatoren (ofte kalla bly-svovelsyrebatteriet eller også berre blybatteriet) var det første ladbare batteriet, utvikla alt i 1859 av franskmannen Gaston Planté. Han var fysikar tilsett ved Conservatoire nationale des arts et métiers, seinare professor ved Institut polytechnique i Paris. Blyakkumulatoren har overlevd all seinare batteriutvikling og er framleis nytta for mange formål der vekten ikkje er den viktigaste begrensinga. Ulemper ved blybatteriet er tyngda og bruken av tungme-

tallet bly og sterk syre. Fordelane er at dei er billige og monaleg stabile. Dei kan typisk tole hundrevis, kanskje opp mot 1500 ladesyklusar før dei må skrotast. Det finst bra system for handsaming av utbrukte blybatteri. Med referanse til figur 1 er den negative elektroden av bly (Pb, med innlegert kalsium eller selen og antimon for å gi elektrodeplatene større styrke), og positiv elektrode har blydioksid (PbO_2) som hovudmateriale. Elektrolytten er ei oppløysing eller ein gel med svovelsyre (H_2SO_4) og aniona An^- er då HSO_4^- og SO_4^{2-} , mens kationa Ka^+ er H^+ (og litt Pb^{2+}). Kvar blybattericelle gir ein teoretisk spenning på 2,1 V. I praksis er oppnådd spenning noko mindre, rundt ~1,8 V.

Bly-syrebatteri blir brukt som startbatteri i bilar, båtmotorar og til utstyr som ekkolodd og sendarar. Vanleg brukt spenning er 12 V, og det får ein til ved seriekopling av mange nok enkeltceller.

Ved utlading blir den negative blyelektroden Pb oksidert og forbrukt og det blir danna blyulfat PbSO_4 , som er tungtløseleg. Ved den positive elektroden blir blyoksidet PbO_2 redusert og dannar $\text{PbSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ frå H^+ -ion og HSO_4^- -ion. Ved opplading går prosessane andre vegen. Det er ei ulempa at batteriet har flytande elektrolytt, ikkje minst med ei sterk syre som svovelsyre. Meir handterbare utgaver blir laga med elektrolytten i høvelege gel eller glassvattmatter, og det heile godt lukka og forsegl.

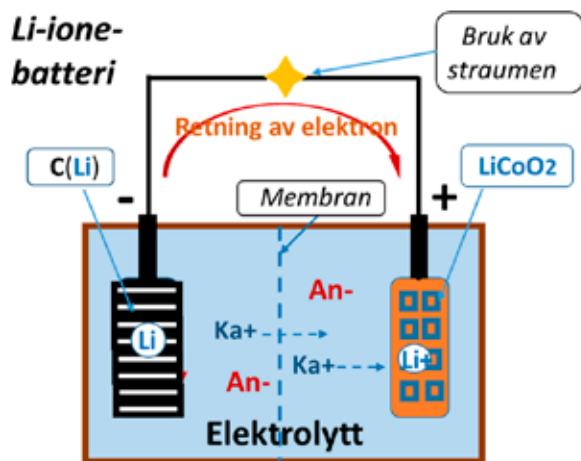
Litium-ionebatteri

Litium-ionebatteria blei lansert kommersielt i 1991 av Sony, jamvel om ideen med litium i batteri var lansert mange år før. I USA blir John B. Goodenough rekna som opphavspersonen. Li-ionebatteria representerer eit betydeleg steg i retning av å forbetre og effektivisere batteriteknologien. Dei er lette av vekt ved at dei bygger på relativt lette materiale, som litium og karbon, og kvar celle gir såpass høge spenningar som

Tabell 1. Tabellen viser eksempel på enkelte ladbare batteri, med representative karakteristika.

Batteritype	Spenning V	Energikapasitet (Wh/kg)*	Ladesyklar	Sjølvtlading %/månad	Pris	Miljørisk	Kommentar
Ni-Cd	1,2	50	500	25	Billig	Stor	Cd miljøskadelig; utgår
Ni-MH	1,2	70	200	30	Middels	Middels	MH betyr metallhydrid
Bly-akk.	2,1	30	800–1200	10	Billig	Betydeleg	I bruk. Bly er tungmetall
Li-ion	3,6	250	1000–1500	<5	Dyr	Betydeleg	Mykje brukt

*) Watt-time (Wh) er vanleg brukt som energimål for batteri. 1 Wh = 3600 J.



Figur 3. Litium-ionebattericelle i bruk. Negativ elektrode er grafitt (karbon, C), som er lagdelt og som lar seg «interkalere» av alkalieatom som litium. Positiv elektrode er eit litium-koboltoksid, og elektrolytten er ein pasta med eit litiumsalt. Membranen er oftast ein porøs polymer som lar Li^+ -iona passere.

3,6 V, med høg energilagring-kapasitet, opp mot 200 Wh/kg (jamført med rundt 40 Wh/kg for blybatteriet). Batteria er dyre, men blir likevel tatt i bruk på fleire og fleire område. Spesielt viktig her er bruken i elektriske kjøretøy.

Sjølve batteriarkitekturen er noko annleis enn i konvensjonelle batteri.

Negativ elektrode er karbon i form av grafitt, der dei små litium-iona kan finne plass mellom karbonlaga i grafitten (kalla *interkalert grafitt*). Positiv elektrode er eit litiumhaldig oksid, som litiumkoboltdioksid (LiCoO_2) eller tilsvarende jern-, mangan- eller nikkelloksid. For å unngå bruk av tungmetall som kobolt og nikkel er jernfosfatet LiFePO_4 blitt aktuell, og også peroksidet Li_2O_2 er under utprøving.

Fordi litium-metall reagerer med vatn, er elektrolytten ei oppløysing i organisk væske (m.a. dietylkarbonat $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_3$) av litiumsalt som bor-tetrafluorat (LiBF_4). Dei organiske væskene er brennbare, men blir godt forseglade og ligg føre i små mengder.

I praksis blir batteria oppbygde frå mange slike celler, der elektrodane og membranen blir plasserte sekvensielt mot kvarandre i ein felles elektrolytt. Både flate og sylindriske batteri er i bruk.

Ladbare Li-ionebatteri blir rekna blant dei dyrare batteria. Dei blir nytta i mange former til mange ulike formål: mobiltelefonar, fotoapparat, lesebrett og berbare PC'ar, trådlause boreapparat, sager, hekksakser og plenklipparar og anna dagleg verktoy. Største etterspørsel er vel til batteri i elektriske bilar og hybridbilar. Er også aktuelle for bruk ved skipsdrift, og som lagringsmedium ved vind- og solkraftverk.

Batteria gir ut høg spenning og har god ener-

gilagringskapasitet, og sjølvutladingsraten er akseptabel. For visse batteriutgaver er det påvist brannfare ved overlading.

Storproduksjon

Li-ionebatteri blir produsert i gigantskala i Kina. I USA held bilfabrikanten Tesla saman med Panasonic på å bygge opp ein liknande storfabrikk i Nevada. Tesla er også engasjert i eit kjempebatterianlegg i Australia saman med det franske selskapet Neonen, som har som mål å utvikle grøn energi frå solceller og vind med store batterianlegg for lagring av energien.

Selskapet Northvolt i Vesterås og Skellefteå siktar mot batteriproduksjon i Sverige i samarbeid med Tesla.

Materialtilgang

Grunnstoffet litium finst i nesten uavgrensa mengder i jordskorpa og i havet, men i låge konsentrasjonar, og det herskar ei viss frykt for at det skal bli mangelvare om det meste av trafikken på jorda skal bli elektrifisert med Li-batteri som energiberar. Alt i dag går $\frac{3}{4}$ av litiumproduksjonen til batteri. Dei største produsentane av Li er i Sør-Amerika, og råstoffet er i all hovudsak leire og saltsjøførekomstar, og i Australia i form av bergartar som inneheld spodumén ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$). Her i landet finst litium i små, ikkje drivverdige mengder som minerala petoritt ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_{10}$) og spodumén. Utvinninga av Li er nokså omstendeleg og går over mange ledd, og er ikkje utan skadelege miljøkonsekvensar [1].

Grunnstoffet kobolt (Co, i elektroden) er det rikeleg tilgang på på jorda, men Co blir rekna som uheldig element i miljøsamheng. Erstattingar med jern- eller nikkelhaldige elektrodar er meir akseptable, jamvel om dei gir spenning og energikapasitet som er nokre prosent lægre.

Draumen om superbatteriet

I presse og fagblad kan ein rett ofte lese store overskrifter om nyvinningar og gjennombrøt på batterifronten. Det er oftast sunt å ta slike oppslag med ein klype salt, men i blant er betydelege framsteg blitt gjort.

Ein kan til dømes håpe at det er hald i overskrifta i *Teknisk Ukeblad* 24. juli 2018: «Ny oppdagelse kan gi batteri med fem ganger så mye energi». Det gjeld «litium-luft»-batteriet, der positiv elektrode skal vere oksygen i lufta via peroksidet Li_2O_2 . Det blir referert til College of Engineering i Chicago og Universitetet i Uppsala.

Eit anna eksempel er frå *NRKbeta* 24. august 2018 om «elbilen som kan gå fra Oslo til Tromsø på én ladning». Dette gjeld forskingsrapport frå Uni-



Figur 4. Luftfoto fra 2016 av Tesla batterifabrikk under bygging i Nevada-ørkenen. (Bilde: USA Today, mai 2018).

versitetet i Austin i Texas om batteriet der litium kan bli erstatta av natrium som det finst mest av, og med elektrolytt av eit ioneleiande glass i staden for flytande løysing. Interessant er det at den 95-årige fysikkveteranen John B. Goodenough står bak dette.

Selskapet Envia Systems i Newark i USA har som mål sidan 2012 å utvikle batteri med energikapasitet over 400 Wh/kg til redusert pris. Samansetninga av elektrodar og elektrolytt og aktuell status er ikkje kjent.

Norske prosjekt

Også her i landet går det føre seg forskning ved fleire institusjonar med sikte på å utvikle batteriteknologien med forbetringar og/eller søke etter nye løysingar. I det følgjande nemner eg kort nokre prosjekt som eg som ikkje-ekspert har lagt merke til.

Selskapa Alcoa i Pittsburgh i USA med avdeling i Norge og Phinergy i Tel Aviv i Israel har sida 2014 arbeidd med å utvikle eit «aluminium-luft»-batteri for båtar og bilar. Her er norske Grenland Energy AS i Porsgrunn involvert.

Ved Kjemisk institutt, UiO, hadde dei eit EU-prosjekt ved namn MAHEATT i 2011–2015 med siktemål å vidareutvikle Li-ionebatteriet for spesielle formål som hybrid-bilar og truckar.

SINTEF og NTNU i Trondheim har eit prosjekt med sikte på å utvikle magnesium-ionbatteri, basert på nanopartiklar, men også andre arbeid, mellom anna med Li-silikat- og Li-svovel-baserte elektrodemateriale.

Selskapa Beba AS og Graphene Batteries AS, begge grunnlagde av Bellona, Oslo, annonserte i 2017 å ville utvikle litium-svovel-batteri med opptil 500 Wh/kg, der grafenoksid vil ha ei sentral rolle.

Corvus Energy, Bergen er med i eit norsk-kanadisk prosjekt for å utvikle Li-ionebatteri i store dimensjonar for skipsdrift.

Nyaste norske prosjekt er Stavangerbaserte Beyonder, som annonserte sitt batteriprojekt i november 2018, ei hybridløysing mellom Li-ione-

batteri og superkondensator (neste avsnitt) [2].

Superkondensatorar

For spesielle formål kan store, kraftfulle kondensatorar kalla superkondensatorar nyttast som el-lagring [3]. Mens kondensatorar brukt i elektronisk utstyr har kapasitansar i området 10^{-12} til 10^{-9} farad, er kapasitansen til superkondensatorar betydeleg større, i området 10^{-2} til 10^2 farad.

Superkondensatorar leverer ikkje straum over lang tid og kan derfor ikkje fullt erstatte batteri, men kan nyttast for tilfelle der det trengst snøgg, men kortvarig straumtilførsle, som ved oppstart av motorar. Fordi både utlading og opplading skjer snøgt, er superkondensatorar aktuelle for effektiv gjenvinning av energien i el-bilar ved bremsing.

Framtidig utvikling

Ein kan framleis ikkje hevde at elektriske batteri for framtidig behov er ferdigutvikla. Ønskemålet er batteri med større energilagringsskapasitet per vekteining, kortare oppladningstid, lengre levetid over fleire ladesyklar, og framstilte av miljøvenlege og delvis resirkulerbare råmateriale. Med den betydelege forskingsinnsatsen som skjer i feltet i dei fleste industrialiserte land skulle det vere von om forbetringar og nyvinningar. Derfor er nye ambisjonar velkomne, kanskje eksemplifisert med Beyonder [2] sine, som er basert på billege råvarer som silisium og aktivkol, og som skal tillate snøgg opp- og utlading, og slik kunne fungere som stabiliseringsselement for straum frå store vindmølleparkar. ■

Referansar

1. Marius Valle. «Materialene til bilbatteriet». *Teknisk Ukeblad*, 22.05.2016.
2. Odd Richard Valmot. «Norsk hybridbatteri». *Teknisk Ukeblad*, 23.11.2018.
3. Emil J. Samuelson. «Elektrisitet på flaske». *Fra Fysikkens Verden* 80 nr. 4 (2018) s. 101.

Kvantemekanisk sammenfiltring: Del I

Fenomenet kvantemekanisk sammenfiltring er knyttet til kvantemekaniske system med flere delsystemer, der kopling opptrer mellom delsystemene også når de er langt fra hverandre. Den kvantemekaniske bakgrunnen blir gitt i Del I, mens konsekvenser og eksperimentelle tester blir diskutert i Del II, som vil komme i et neste nummer av bladet.

Jan Myrheim Institutt for fysikk, NTNU

Begrepet *sammenfiltring*, på engelsk *entanglement*, beskriver typiske kvantetilstander til et fysisk system som består av to eller flere delsystem. Erwin Schrödinger innførte begrepet i 1935 og kalte det på tysk *Verschränkung* [1]. Han mente at dette fenomenet er det viktigste skillet mellom kvantefysikk og klassisk fysikk.

Hvis vi preparerer et slikt sammensatt system i en ren kvantemekanisk tilstand, så kjenner vi fullstendig tilstanden til systemet som helhet. Hvis tilstanden ikke er sammenfiltret, så kjenner vi også fullstendig tilstanden til hvert av delsystemene. Det er den situasjonen som alltid gjelder i klassisk fysikk når vi har full informasjon om tilstanden til systemet.

Hvis derimot tilstanden er sammenfiltret, så kan vi ha full informasjon om tilstanden til systemet som helhet uten at vi har full informasjon om tilstanden til hvert delsystem for seg. I så fall finnes det korrelasjoner mellom delsystemene slik at en måling på ett delsystem gir informasjon om tilstanden til de andre. Korrelasjoner er spesielt interessante når delsystemene er fysisk adskilt.

Lokalitet er et sentralt begrep i fysikken. Vi har en sterk tro på at fysikken må være lokal. Det betyr for eksempel at hvis vi vil preparere et sammensatt system i en sammenfiltret tilstand, så må vi bringe delsystemene sammen på ett sted slik at de kan vekselvirke med hverandre. Men deretter kan vi skille dem fra hverandre, og tilstanden kan fortsette å være sammenfiltret, selv om avstandene blir store.

Et prinsipielt spørsmål som melder seg da, er om det er mulig å utnytte sammenfiltringen til å overføre informasjon. Kanskje til og med overføre informasjon med overlyshastighet, siden vi kan måle på ett delsystem og få informasjon om de andre, tilsynelatende uten at det overføres noe fysisk signal.

Kvantemekanisk sammenfiltring er etter hvert blitt et slags samlebegrep, en overskrift over et stort

forskningsfelt som omfatter både grunnforskning og anvendelser. Et par stikkord er kvanteoptikk, kvantekryptografi og kvantedatamaskiner. Hele denne aktiviteten startet med John Bell, som viste hvordan kvanteteorien tillater korrelasjoner mellom deler av et sammensatt system som er sterkere enn det klassisk fysikk tillater.

Formålet med denne artikkelen er ikke å gi en oversikt over et aktivt forskningsfelt, men heller å forsøke å gi litt innsikt i bakgrunnen. Spesielt det som kalles *Bells teorem*, eller Bells ulikheter, fra 1964, som viser hvordan kvanteteorien bryter med dagligdage forestillinger [2, 3].

Bells teorem og Aspects eksperimentelle test har vært omtalt før i *Fra fysikkens verden*, i en artikkel av Jon Magne Leinaas i 1989 [4]. Gode grunner til å gjenta omtalen her kan være at 1989 er lenge siden, og at vi alle kan ha godt av å minne oss selv om hvordan kvanteteorien utfordrer det som mange av oss vil kalle for sunn fornuft. Arnt Inge Vistnes har skrevet om sammenfiltring av fotoner i *Fra fysikkens verden* [5, 6].

Bakgrunn

Heisenbergs usikkerhetsrelasjon

La oss starte med å repetere litt kvantemekanikk.

Et idealisert eksperiment som kvantemekanikken beskriver, foregår som følger. Vi har en partikkel i en veldefinert kvantemekanisk tilstand, som vi kjenner eksakt fordi vi har preparert den omhyggelig. Det kan for eksempel være en bestemt energiegentilstand, der altså energien til partikkelen har en bestemt verdi. Så måler vi en eller annen fysisk størrelse som beskriver tilstanden til partikkelen, for eksempel posisjonen langs x -aksen eller impulsen langs x -aksen.

La oss si at vi preparerer den samme tilstanden mange ganger, så nøyaktig vi er i stand til, og hver gang måler vi enten posisjonen eller impulsen langs x -aksen. Etter at vi har gjentatt hele prosedyren med preparering og måling mange ganger, sitter vi med statistiske fordelinger av målte verdier med standardavvik Δx for posisjonen x og Δp for impulsen p . Heisenbergs usikkerhetsrelasjon sier at da må

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (1)$$

der \hbar er Plancks konstant h dividert med 2π . Vi sier at posisjonen til partikkelen langs en akse og impulsen langs den samme aksene er *komplementære størrelser*. Det er mulig i prinsippet å preparere en kvantetilstand der en av dem har

vilkårlig liten usikkerhet, men da må den andre få tilsvarende større usikkerhet i den tilstanden.

Det forutsettes at Δx og Δp er spredninger i måleresultatene som ikke skyldes unøyaktigheten i hver enkelt måling. Vi kan aldri måle med null måleusikkerhet, men det er i prinsippet ingen grense for hvor nøyaktig vi kan måle en posisjon eller en impuls i ett eksperiment. Vi kan altså anta at vi måler så nøyaktig at måleusikkerhetene ikke bidrar vesentlig til Δx og Δp . Usikkerhetsrelasjonen gir forøvrig bare en nedre grense for produktet $\Delta x \Delta p$. Kvantetilstander flest er slik at produktet blir mye større.

I den matematiske formalismen som brukes i kvantemekanikken, er observable størrelser som x og p representert som *operatorer* som kan adderes og multipliseres. To operatorer A og B som representerer fysiske observable, sies å være *kompatible* dersom de kommuterer, slik at $AB = BA$.

Den fysiske betydningen av at A og B er kompatible, er at det lar seg gjøre å preparere fysiske tilstander der begge observablene har skarpe verdier samtidig. I en slik tilstand vil en måling av A alltid gi en bestemt verdi a som kan forutsies på forhånd, og en måling av B vil alltid gi en bestemt verdi b . I denne tilstanden kan vi måle A først og B etterpå, eller B først og A etterpå, i begge tilfeller får vi verdien a for A og b for B . Kompatible observable kan måles samtidig, i den forstand at målingen av den ene ikke ødelegger for målingen av den andre.

Vi definerer *kommutatoren* mellom A og B som

$$[A, B] = AB - BA. \quad (2)$$

De er kompatible observable når $[A, B] = 0$. Posisjon x og impuls p langs en akse er ikke kompatible, de er i stedet *kanonisk konjugerte* størrelser, som oppfyller den *kanoniske kommutasjonsrelasjonen*

$$[x, p] = i\hbar. \quad (3)$$

Heisenbergs usikkerhetsrelasjon kan bevises matematisk fra denne relasjonen.

Hvis vi tar som eksempel en punktpartikkel i tre dimensjoner, så er koordinatene x, y, z langs tre ortogonale akser et eksempel på tre kompatible observable som vi kan måle samtidig. Dermed har vi skaffet oss fullstendig kjennskap til tilstanden som partikkelen er i, hvis den ikke har andre målbare egenskaper enn posisjon, slik som spinn. De tre observablene tilsammen utgjør et *fullstendig sett* av kompatible observable for en spinnløs punktpartikkel. Den ene koordinaten x alene er en ufullstendig observabel: for en gitt verdi av x finnes det flere tilstander, til og med uendelig

mange, som har den samme verdien. Dette fenomenet kalles *degenerasjon*.

Om en observabel A er ufullstendig, finnes det likevel et *fullstendig sett av tilstander* med skarpe verdier av A , slik at enhver kvantetilstand kan beskrives som en superposisjon av slike tilstander. Når A og B er kompatible observable, så finnes det et fullstendig sett av tilstander med skarpe verdier av A og B samtidig. Den generelle situasjonen er at vi kan alltid finne et fullstendig sett av kompatible observable A_1, A_2, \dots, A_n slik at når vi måler verdier a_1, a_2, \dots, a_n for alle samtidig, så har vi bestemt tilstanden entydig. Den mest generelle kvantetilstanden er en superposisjon av slike tilstander, som vi beskriver med en bølgefunksjon

$$\psi(a_1, a_2, \dots, a_n). \quad (4)$$

Funksjonsverdien $\psi(a_1, a_2, \dots, a_n)$ er et kompleks tall. Måler vi A_1, A_2, \dots, A_n i denne tilstanden, så finner vi verdier a_1, a_2, \dots, a_n med sannsynlighet

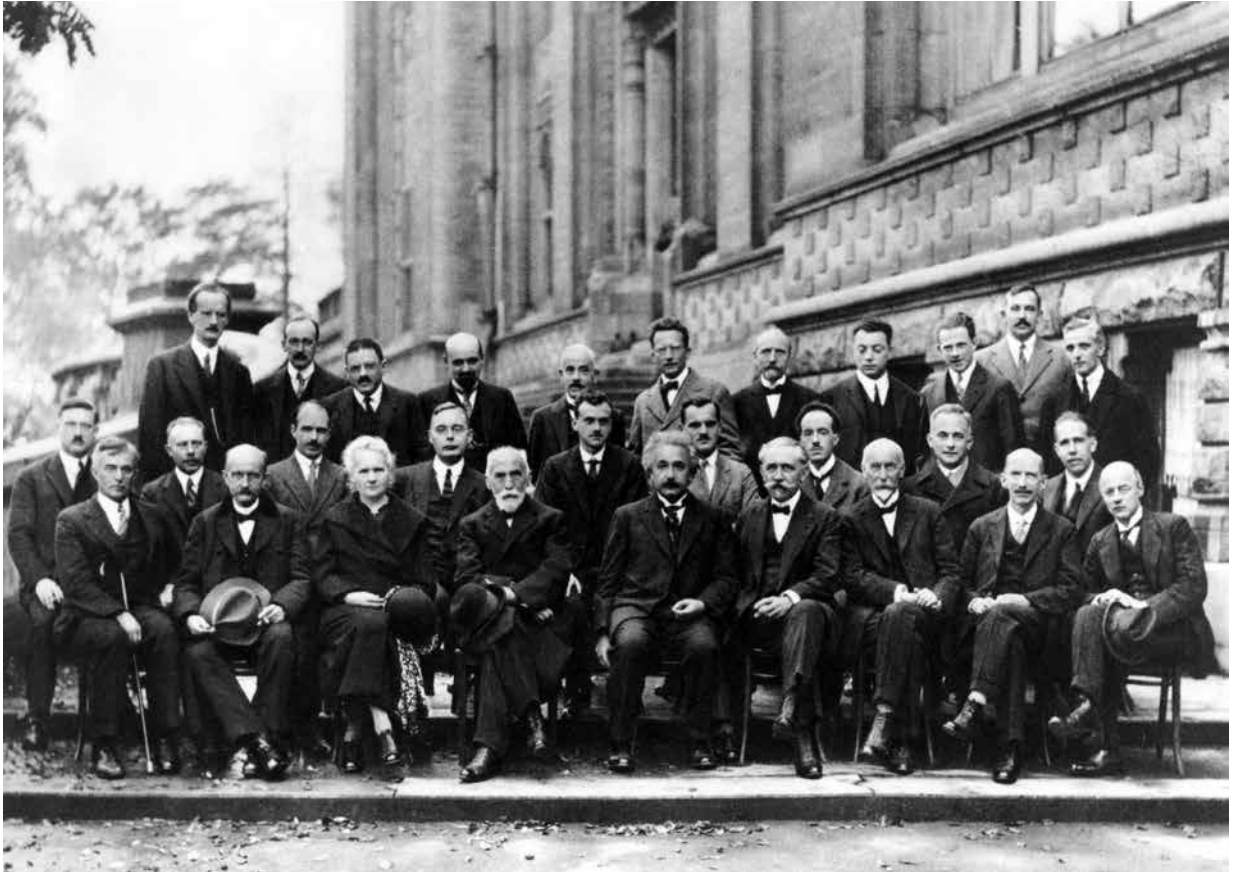
$$|\psi(a_1, a_2, \dots, a_n)|^2. \quad (5)$$

Tolkninger

Av usikkerhetsrelasjonen kan vi umiddelbart trekke den lærdommen at kvantemekanikken er en *statistisk* teori, i en fundamental forstand. Siden ingen av de to standardavvikene Δx og Δp kan bli uendelig store, kan heller ingen av dem bli null. Det er altså umulig å preparere en tilstand der enten posisjonen x eller impulsen p har en helt skarp verdi, slik at vi måler nøyaktig samme verdi hver gang vi preparerer tilstanden og måler. Og vi kan aldri forutsi helt nøyaktig resultatet av en måling av x eller p før vi måler.

Merk at denne konklusjonen gjelder for x og p fordi de er kontinuerlige variable. I følge kvantemekanikken finnes det også diskrete variable, som for eksempel dreieimpuls langs en akse eller energinivåer i et atom. Teoretisk sett kan vi preparere en tilstand der en slik diskret fysisk størrelse har en helt skarp verdi, men da finnes det alltid mange andre fysiske størrelser som ikke har skarpe verdier i den tilstanden.

På et tidlig tidspunkt i kvantemekanikkens historie mislikte Albert Einstein det statistiske elementet i teorien, og han innvendte at «Gud kaster ikke terninger». Dette sitatet ble så berømt at John Bell, blant andre, klaget over at mange misforsto Einstein og trodde at det var hans hovedinnvending mot kvantemekanikken. Det var det ikke. Han hadde ikke noe stort problem med å godta en statistisk teori. Men han mente at kvantemekanikken var en *ufullstendig* teori. At vi burde prøve å utlede kvantemekanikken fra en mer full-



Figur 1. Deltakere på den femte Solvay-konferansen, i oktober 1927. Kvantemekanikken var da en helt ny teori, som ble grundig diskutert der. Bakerste rekke (fra venstre): A. Piccard, É. Henriot, P. Ehrenfest, É. Herzen, T. de Donder, E. Schrödinger, J.-É. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R.H. Fowler, L. Brillouin. Midterste rekke: P. Debye, M. Knudsen, W. Lawrence Bragg, H.A. Kramers, P. Dirac, A. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr. Fremste rekke: I. Langmuir, M. Planck, M.S. Curie, H. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, C.-E. Guye, C.T.R. Wilson, O. Willans Richardson. Ikke tilstede på bildet: W.H. Bragg, H. Delandiers og E. van Aurel. (Bilde: Benjamin Couprie for Institut International de Physique Solvay, Brussel, Belgia/Wikipedia Commons)

stendig og grunnleggende teori som godt kunne være deterministisk. I en deterministisk teori må vi regne med sansynligheter for å beskrive tilstander som vi har ufullstendig kunnskap om.

Mens kvantemekanikken ennå var en ny teori under utforming, insisterte Niels Bohr på det han kalte *korrespondanseprinsippet*, at den nye teorien burde inneholde begreper som svarte til begrepene fra den klassiske mekanikken, slik som posisjon og impuls. Bare at de gamle begrepene måtte få nytt innhold. Einstein ville gå mer radikalt til verks, han mente at den nye teorien måtte bygges på nye grunnbegreper. Imidlertid hadde hverken han eller andre noen konkrete idéer om hva de nye begrepene skulle være, og dermed ble han stående nokså alene med sitt syn. Flertallet av fysikere, med Niels Bohr og Werner Heisenberg i spissen, godtok kvantemekanikken slik den etter hvert tok form.

Det store spørsmålet i diskusjonen mellom Einstein og Bohr var hvordan usikkerhetsrelasjonen skulle forstås. Einstein var realist, han mente at

oppgaven til en fysisk teori er å beskrive en objektiv virkelighet som eksisterer uavhengig av fysikere som observerer den. Bohr insisterte på det han kalte *komplementaritetsprinsippet*, at observatøren må velge mellom målinger som er komplementære, uforenlige, og at valget er med på å bestemme hvilken virkelighet som observeres. Da er virkeligheten ikke lenger objektiv i en viss forstand.

Realisme

Klassisk mekanikk er en realistisk teori, der vi forestiller oss at virkeligheten er objektiv og eksisterer uavhengig av om vi observerer den. Vi kan i prinsippet måle egenskapene til en partikkel så nøyaktig vi måtte ønske, uten at vi forstyrrer den merkbar. Når vi måler posisjonen til en partikkel, så tar vi for gitt at den hadde den samme posisjonen før vi målte. Deretter kan vi måle impulsen, og ta for gitt at impulsen var den samme også før vi målte posisjonen. I prinsippet kan vi altså måle posisjon og impuls samtidig med ubegrenset nøyaktighet. En måling i klassisk mekanikk er en

konstatering av et faktum som eksisterer både før og etter at vi måler.

Annerledes i kvantemekanikken, der Heisenbergs usikkerhetsrelasjon kan tolkes på forskjellige måter. Hvis vi måler for eksempel posisjonen til en partikkel to ganger i rask rekkefølge, så får vi to ganger samme verdi. Det må bety at den første målingen preparerer partikkelen i en tilstand der den har en bestemt posisjon, innenfor måleusikkerheten. Vi kjenner altså posisjonen til partikkelen like etter at vi har målt posisjonen. Det store spørsmålet er om partikkelen hadde den samme posisjonen også før vi målte den. Einstein, som var realist og forestilte seg en objektiv virkelighet, mente ja. Bohr og Heisenberg mente nei, de tolket usikkerhetsrelasjonen mer radikalt.

Siden vi ikke kan preparere en tilstand til en partikkel der den har vilkårlig skarpe verdier samtidig av to komplementære størrelser som posisjon og impuls, så må vi tolke det slik, mente de, at partikkelen ikke har en bestemt posisjon før vi måler posisjonen, og heller ikke har en bestemt impuls før vi måler impulsen. Det gir altså liten eller ingen mening å snakke om posisjonen til en partikkel før vi måler posisjonen, eller å snakke om impulsen før vi måler impulsen. En skarpt definert posisjon eller en skarpt definert impuls er egenskaper som partikkelen får i det øyeblikket vi gjør en måling, i følge denne tolkningen. Vi kan altså ikke utsette partikkelen for en måling uten å ødelegge den tilstanden partikkelen var i før målingen. Usikkerhetsrelasjonen er et uttrykk for den minimale påvirkningen som en måling har på tilstanden.

En slik tolkning, at partikkelen har hverken posisjon eller impuls før vi måler den ene eller andre størrelsen, må høres merkelig ut for uinnvidde, for «mannen i gata». Einstein tok parti for mannen i gata og spurte litt spydig: «Er Månen der når jeg ikke ser på den?» Men det som er merkelige egenskaper til en partikkel, er helt naturlige egenskaper til en bølge. Louis deBroglie foreslo i 1923 at materiepartikler oppfører seg på lignende måter som fotoner gjør i følge Einsteins fotonteori fra 1905, som forklarte den fotoelektriske effekten.

Hvis vi tenker på partikkelen som en bølge, så må vi definere impulsen som Plancks konstant dividert med bølgelengden, slik Einstein gjorde for fotoner. En bølge har ingen skarpt definert posisjon. Og en bølge med en endelig utstrekning har heller ingen skarpt definert bølgelengde. Posisjon og bølgelengde er to komplementære egenskaper ved en bølge. En bølge med en helt skarpt definert bølgelengde har en uendelig utstrekning i rommet. Og omvendt, en bølge som er lokalisert i et lite område i rommet, må inneholde et bredt spektrum av bølgelengder.

Dette dobbeltbildet av lys som bølger og/eller partikler dukket altså opp allerede i 1905, og det er like problematisk enten vi snakker om fotoner eller materiepartikler. Begge oppfører seg som bølger når de for eksempel går gjennom en dobbeltspalte og lager interferensmønstre. Usikkerhetsrelasjonen gir god mening for en bølge, men ikke for en partikkel. I andre sammenhenger, for eksempel i Compton-effekten, der et foton og et elektron kolliderer, oppfører begge seg som udelelige partikler, og ikke som bølger spredt utover i rommet. Vi må tenke på fotoner og materiepartikler som både partikler og bølger, eller som noe midt imellom, hverken det ene eller det andre.

Einstein-Podolsky-Rosen-eksperimentet

Sammen med Boris Podolsky og Nathan Rosen beskrev Einstein i 1935 et tankeeksperiment som skulle vise at Bohr og Heisenberg tok feil i sin tolkning av usikkerhetsrelasjonen, der de konkluderte med at en partikkel ikke har en posisjon før den måles, og ikke har en impuls før den måles [7]. Eksperimentet er blitt kjent som EPR-paradokset, men det er i så fall et paradoks for Bohr og Heisenberg, og ikke for Einstein.

Vi tenker oss at vi har to partikler, som vi nummererer 1 og 2. Observable størrelser er da posisjonene x_1 og x_2 og impulsene p_1 og p_2 langs x -aksen. De kanoniske kommutasjonsrelasjonene

$$[x_1, p_1] = [x_2, p_2] = i\hbar \quad (6)$$

gjelder, mens alle andre par av observable er kompatible. For eksempel er

$$[x_1, p_2] = [x_2, p_1] = 0. \quad (7)$$

Nå er differensen $x_1 - x_2$ og summen $p_1 + p_2$ kompatible observable, vi har at

$$\begin{aligned} [x_1 - x_2, p_1 + p_2] = \\ [x_1, p_1] + [x_1, p_2] - [x_2, p_1] - [x_2, p_2] = \\ i\hbar + 0 - 0 - i\hbar = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Det vil si at vi kan preparere en kvantetilstand til systemet av to partikler der disse to observable har skarpe verdier samtidig,

$$x_1 - x_2 = x, \quad p_1 + p_2 = P. \quad (9)$$

Her er den relative posisjonen x og den totale impulsen P størrelser som vi bestemmer på forhånd, i prinsippet med vilkårlig nøyaktighet.

I denne spesielle tilstanden kan vi velge å måle enten posisjon eller impuls for hver av partiklene. Vi kan for eksempel måle x_1 og x_2 , da vil vi alltid

finne at $x_1 - x_2 = x$. Vi kan måle p_1 og p_2 , da vil vi alltid finne at $p_1 + p_2 = P$.

Et tredje alternativ er å måle x_1 og p_2 , de er også kompatible observable, slik at en måling av den ene ikke ødelegger for målingen av den andre. Etterpå kjenner vi verdien av x_1 , men kjenner vi også verdien av p_1 ? Vi valgte å måle x_1 , og målingen av x_1 ødelegger muligheten til å måle p_1 . Men i det øyeblikket vi måler p_2 , vet vi hvilken verdi vi ville ha funnet hvis vi hadde målt p_1 , nemlig $p_1 = P - p_2$.

I denne situasjonen, mente Einstein, Podolski og Rosen, må det være tillatt å snakke om at impulsen p_1 har en bestemt verdi, selv om vi ikke måler den.

Bohr var snar til å rykke ut og svare på EPR-artikkelen [8]. De fleste fysikere slo seg til ro med svaret fra Bohr, og bekymret seg ikke mer om tolkingen av kvantemekanikken. Men enkelte lot seg ikke overbevise, de fant svaret uklart og vanskelig å forstå. En av dem som spant videre på EPR-argumentet, var John Bell. Han gjorde det helt klart at han sympatiserte med Einstein, men han ønsket å skjerpe argumentene så mye at hele diskusjonen kunne avgjøres eksperimentelt.

Han formulerte versjoner av EPR-eksperimentet der argumentene som brukes av Einstein, Podolski og Rosen, impliserer at målbare sannsynligheter må oppfylle et sett med ulikheter, såkalte Bell-ulikheter. Disse ulikhetene brytes av noen av de sannsynlighetene som kvantemekanikken forutsier. Siden det som måles eksperimentelt, er det samme som kvantemekanikken forutsier, må vi konkludere med at EPR-argumentet ikke er holdbart. Eksperimentene bekrefter kvantemekanikken og motbeviser den typen teorier som Einstein, Podolski og Rosen argumenterte for.

Et korrelasjonseksperiment

Her vil vi utlede et eksempel på Bell-ulikheter i et eksperiment som han foreslo. Det er et ganske ordinært eksperiment, ikke prinsipielt forskjellig fra eksperiment som utføres hele tiden i fysikklaboratorier rundt om i verden. Vi skyter to protoner mot hverandre, og setter opp to detektorer som observerer dem etter at de har kollideret og forandret bevegelsesretning. Vi nummererer detektorene som 1 og 2, og proton 1 er det vi observerer i detektor 1, mens proton 2 observeres i detektor 2.

Et proton spinner om sin egen akse, og det har spinn $1/2$. Det betyr at om vi måler spinnkomponenten langs en hvilken som helst akse, for eksempel z -aksen i et gitt koordinatsystem, finner vi alltid en av to mulige verdier, enten $\hbar/2$ eller $-\hbar/2$. Måleenheten for spinn er \hbar , Plancks konstant h dividert med 2π . Vi forenkler språkbruken og

sier at spinnkomponenten langs aksene er enten + eller -. Spinnet til et proton, eller en annen partikkel med spinn $1/2$, målt langs en akse, peker enten opp eller ned.

Et fullstendig sett av målinger vi kan gjøre for å finne tilstanden til protonene etter kollisjonen, er for eksempel posisjonene \vec{r}_1 og \vec{r}_2 og spinnkomponentene s_1 og s_2 langs z -aksen. De mulige verdiene for hver av s_1 og s_2 er + og -. En generell kvantemekanisk tilstand beskriver vi med en bølgefunksjon

$$\psi(\vec{r}_1, s_1, \vec{r}_2, s_2). \quad (10)$$

Den generelle tilstanden er slik at protonene ikke har bestemte verdier av hverken posisjon eller spinn. Absoluttkvadratet av bølgefunksjonen, $|\psi(\vec{r}_1, s_1, \vec{r}_2, s_2)|^2$, er et mål på sannsynligheten for at en måling vil gi verdiene \vec{r}_1, s_1 og \vec{r}_2, s_2 .

Siden protonene er fermioner, må bølgefunksjonen for de to protonene være antisymmetrisk under ombytte av partiklene, det vil si at

$$\psi(\vec{r}_1, s_1, \vec{r}_2, s_2) = -\psi(\vec{r}_2, s_2, \vec{r}_1, s_1). \quad (11)$$

Nå kan vi argumentere med at bølgefunksjonen etter kollisjonen vil være et produkt av en rombølgefunksjon og en spinnbølgefunksjon,

$$\psi(\vec{r}_1, s_1, \vec{r}_2, s_2) = \psi_{\text{rom}}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \psi_{\text{spinn}}(s_1, s_2). \quad (12)$$

Om rombølgefunksjonen vet vi at den må være symmetrisk,

$$\psi_{\text{rom}}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \psi_{\text{rom}}(\vec{r}_2, \vec{r}_1), \quad (13)$$

dersom vi gjør energien tilstrekkelig liten, for ellers kommer ikke de to protonene nær nok hverandre til å vekselvirke. Men når rombølgefunksjonen er symmetrisk, må spinnbølgefunksjonen etter kollisjonen være antisymmetrisk,

$$\psi_{\text{spinn}}(s_1, s_2) = -\psi_{\text{spinn}}(s_2, s_1), \quad (14)$$

for at den totale bølgefunksjonen skal bli antisymmetrisk.

Ligning (14) er utgangspunktet for Bell i hans resonnement. Teorien som leder fram til ligningen er standard kvantemekanikk, som det vil føre for langt å gå mer detaljert inn på her.

Antisymmetrien av spinnbølgefunksjonen impliserer at hvis $s_1 = s_2$, så må $\psi_{\text{spinn}}(s_1, s_2) = 0$. Det betyr at sannsynligheten er null for å måle $s_1 = s_2 = +$ eller $s_1 = s_2 = -$,

$$|\psi_{\text{spinn}}(+, +)|^2 = |\psi_{\text{spinn}}(-, -)|^2 = 0. \quad (15)$$

Vi måler alltid enten $s_1 = -s_2 = +$ eller $s_1 = -s_2 = -$. Vi sier at spinnkomponentene s_1 og s_2 til de to protonene etter kollisjonen er fullstendig antikorrelert.

Hvis vi gjentar eksperimentet mange ganger og måler s_1 og s_2 hver gang, vil vi i gjennomsnitt måle de to mulige verdiene $s_1 = +$ og $s_1 = -$ like ofte, og likeså de to verdiene $s_2 = +$ og $s_2 = -$. Utfallet av en enkelt måling på ett protonpar er umulig å forutsi, sannsynligheten er 50 % for å måle $s_1 = +$ og $s_2 = -$, og 50 % for å måle $s_1 = -$ og $s_2 = +$. Men vi kan forutsi med 100 % sikkerhet at vi kommer til å måle $s_1 = -s_2$.

Hva er mysteriet?

At det eksisterer fullstendig antikorrelasjon mellom spinnene i Bells eksperiment, er både et teoretisk og et eksperimentelt faktum. Men korrelasjoner og antikorrelasjoner er et dagligdags fenomen, som det ikke uten videre er noe mystisk ved. Her opptrer de i et kvantemekanisk eksperiment, men det er ingen åpenbar grunn til at de ikke kan forstås innenfor den klassiske fysikken. Poenget er at de to protonene har kollidert like før vi måler spinnene, og det er helt klart at antikorrelasjonen oppstår i kollisjonen. Uten kollisjon, ingen antikorrelasjon.

Forklaringen på antikorrelasjonen kunne tenkes å være så enkel som at i det øyeblikket protonene kolliderer, fordeler de spinnene mellom seg slik at det ene spinnene peker oppover langs z-aksen og det andre peker nedover. Hvilket av protonene som får spinn + i denne prosessen er helt tilfeldig. Spinnene til et proton som beveger seg fritt, er bevart, slik at begge protonene husker det spinnene de fikk seg tildelt i kollisjonen, og når spinnene måles, er de fremdeles antikorrelerte. Hvis denne forklaringen er holdbar, finnes det ikke noe mysterium.

Antikorrelasjonen blir noe som ligner på et mysterium først dersom vi holder fast på den ortodokse tolkningen av en måling, som Bohr og Heisenberg forfektet, at spinnene til et proton langs en akse ikke har noen verdi, hverken + eller -, før vi måler det. Hvordan oppstår i så fall antikorrelasjonen? Det kan se ut som vi blir nødt til å postulere at når spinnene til begge protonene måles samtidig, så sendes det et mystisk signal mellom de to detektorne som sørger for at de to målingene gir motsatt resultat. Slike hypotetiske signaler som lager antikorrelasjon, og som kanskje til og med må bevege seg med hastighet større enn lyshastigheten, kalte Einstein for «spooky action at a distance», spøkelsesaktig fjernvirkning. Han likte idéen dårlig.

John Bell gir et fornøytelig eksempel på at antikorrelasjon i seg selv ikke er noe mysterium [3]. Han legger merke til at hans gode venn og medarbeider Reinhold Bertlmann har den sære vanen

at han alltid går med sokker av forskjellig farge. Når du ser at Bertlmann går med en rosa sokk, og kjenner Bertlmann, så behøver du ikke å se den andre sokken hans for å vite at den ikke er rosa. De færreste vil gå så langt som å kalle det et mysterium. Hvis vi vil få antikorrelasjonen mellom protonspinnene til å bli et mysterium, må vi altså dykke dypere ned i kvantefysikken. ■

Referanser

1. E. Schrödinger. «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik». *Die Naturwissenschaften* 23, 807; 823; 844 (1935). Engelsk oversetting: «Proceedings of the American Philosophical Society» 124, 323 (1980).
2. J.S. Bell. «On the Einstein Podolsky Rosen Paradox». *Physics* 1, 195 (1964).
3. J.S. Bell. «Bertlmann's Socks and the Nature of Reality». *Journal de Physique Colloques* (1981), 42 (C2), s. C2-41-C2-62.
4. J.M. Leinaas. «EPR-paradokset, Bells teorem og Aspects forsøk». *Fra Fysikkens Verden* (1989), nr. 2, 36.
5. A.I. Vistnes. «Sammenfiltrede fotoner og erkjennelsesmessige konsekvenser». *Fra Fysikkens Verden* (2008), nr. 3, 75.
6. A.I. Vistnes. «Sammenfiltrede fotoner er på ny i verdensnyhetene». *Fra Fysikkens Verden* (2017), nr. 3, 71.
7. A. Einstein, B. Podolsky & N. Rosen. «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?» *Physical Review* 47, 777 (1935).
8. N. Bohr. «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?» *Physical Review* 48, 696 (1935).

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

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, OsloMet, industri- og energifysikk
Professor Olav Gaute Hellesø, UiT, optikk
Lektor Kaja Nordby, Kongsbakken vgs., Norsk Fysikklærerforening

Adresse

Norsk Fysisk Selskap
Institutt for fysikk, NTNU
7491 Trondheim

Sekretær: Haakon Thømt Simensen
E-post: nfs.styret@gmail.com
Bankgiro: 7878.06.03258
Org.nr.: 940 340 829
Internettadresse: www.norskfysisk.no

Bedriftsmedlemmer av NFS

Vi takker for støtten fra våre bedriftsmedlemmer:



UiT / NORGES ARKTISKE
UNIVERSITET



 NTNU 



UiO : Universitetet i Oslo

ISSN-0015-9247