

Fra Fysikkens Verden

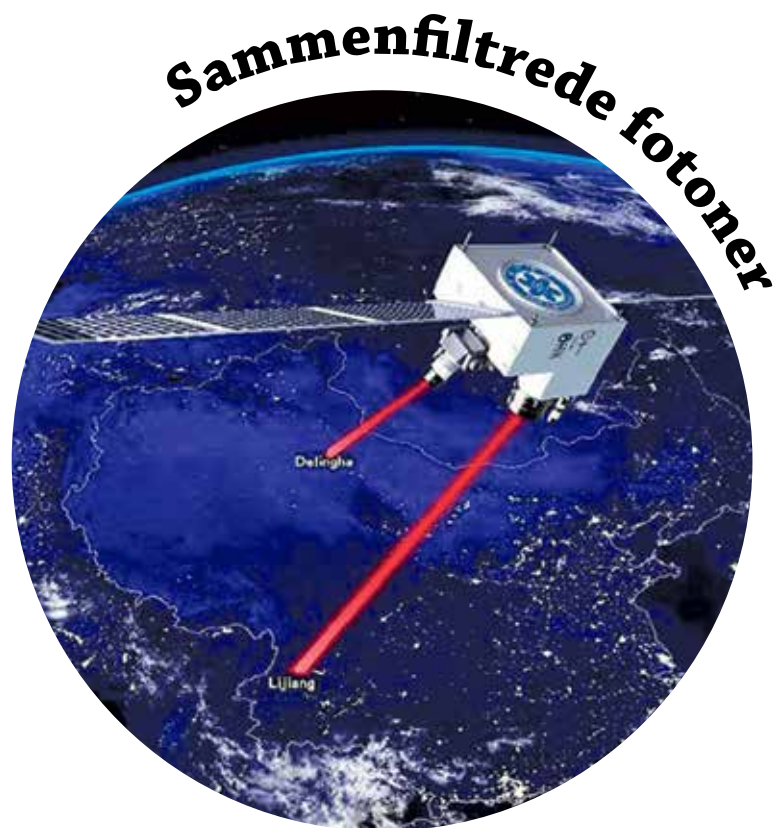
UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP



Kristian Birkeland



Den kosmologiske konstanten



Sammenfiltrede fotoner

Les også om:

- Strålevern
- Fysikermøtet 2017

Nr. 3 – 2017

79. årgang

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:

Professor Øyvind Grøn
Høgskolen i Oslo og Akershus, 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 hos selskapets sekretær
på følgende adresse eller e-postadresse:

Institutt for fysikk og teknologi, UiT,
Pb. 6050 Langnes, 9037 Tromsø
E-post: nfs.styret@gmail.com
Bankgiro: 7878.06.03258

Årsabonnement 200 kr. (studenter 100 kr.)

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 LaTeX eller Word), slik at redaksjonen kan redigere teksten direkte. Dersom manuskriptet inneholder matematiske ligninger, skal det 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 som må returneres snarest. Det må ikke gjøres unødige endringer i korrekturane.

Innhold

Fra redaktørene <i>Øyvind G. Grøn</i>	66
Fysikermøtet 2017 <i>Åshild Fredriksen</i>	66
Landrøprisen for masteroppgave til Morten Amundsen <i>Åshild Fredriksen</i>	68
Undervisningspris i fysikk til Robert Pehrson <i>Morten Trudeng</i>	68
Årsmøte i NSF <i>Åshild Fredriksen</i>	69
Æresmedlemskap til Carl Angell og Per Christian Hemmer <i>Åshild Fredriksen</i>	69
Sterke norske prestasjoner i Fysikkolympiaden 2017 <i>Thomas Frågåt</i>	70

Artikler

Sammenfiltrede fotoner er på ny i verdensnyhetene <i>Arnt Inge Vistnes</i>	71
Forskeren Kristian Birkeland (1867–1917) <i>Alv Egeland</i>	77
Hundre år med den kosmologiske konstanten <i>Øyvind G. Grøn</i>	81
Strålevern og helse: Argument for og i mot LNT <i>Thormod Henriksen og Per Ivar Wethe</i>	86

Nye doktorer

Sofie Snipstad	89
----------------	----

Gratulerer!

Hallstein Høgåsen <i>Eivind Osnes og Jan Olav Eeg</i>	90
Tore Lindmo <i>Catharina Davies</i>	91

In memoriam

Johan Baarli <i>Per Ivar Wethe og Thormod Henriksen</i>	92
Bjørn Jacobsen <i>Asgeir Brekke, Asbjørn Mo og Eivind Osnes</i>	93

Fra redaktørene

Det har vært meningsutvekslinger i *Fra Fysikkens Verden*, noen ganger fulgt av diskusjoner utenom bladet. I det siste har det dreid seg om to temaer: klimadebatten og tolkningen av kvantefysikken anvendt på lys. Det kan være bra at ulike synspunkter får anledning til å komme frem. Men det er viktig å tydeliggjøre om det dreier seg om debatt eller om presentasjon av allment aksepterte kunnskaper.

Vi har kategorier av innslag i *Fra Fysikkens Verden* som Artikler og Fysikknytt, men har foreløpig ikke hatt Debatt. Kanskje er det behov for en slik spalte.

I dette nummeret har vi fire Artikler. Én er om foton-sammenfiltring (*entanglement*), som er et tema som tas opp i videregående skoles fysikk-kurs, og er slett ikke noe enkelt tema. Vi har invitert Arnt Inge Vistnes til å forklare fenomenet og samtidig presentere nye resultater.

Det er ikke en debattartikkel, men det er mulig i forlengelsen av en slik artikkel å invitere til å presentere ulike synspunkter på lysets natur.

Videre presenteres i dette nummeret Kristian Birkeland, som har dobbelt jubileum i år – 150 år siden han var født og 100 år siden han døde. Nettopp i år, hvor Birkeland ble erstattet av en torsk på tohundre-kroner-seddelen, er det viktig å minne om Birkelands store betydning både som fysiker og som næringslivsgründer.

Nok et jubileum feires: 100 år med den kosmologiske konstanten.

I sammenheng med nekrologen over Johan Baarli har vi en inviteret artikkel om strålevern og helse som kunne ha vært presentert i en debattspalte dersom vi hadde hatt det.



◀ Øyvind G. Grøn



Emil J. Samuelsen

Fysikermøtet 2017

Fysikermøtet 2017 ble arrangert i Tromsø 7.–9. august av Institutt for fysikk og teknologi, UiT Norges Arktiske Universitet. En nasjonal programkomité bestående av Jan-Petter Hansen (UiB), Morten Trudeng (Asker vgs.), Arne Auen Grimenes (NMBU) og Cathrine Wahlstrøm Tellefsen (UiO), samt undertegnede, startet arbeidet med programmet høsten 2016. Komitéen gjorde en utmerket jobb med å skaffe internasjonalt kjente og fremragende foredragsholdere, og faggruppeliderne sammen med arrangementskomiteen lokalt bidro også med forslag til plenumsprogrammet forøvrig. Arrangementskomitéen bestående av undertegnede, Frank Melandsø, Therese Rexer, Sara Björk og Tarjei Antonsen fra UiT og Kjell-Øystein Netland fra Kvaløya vgs. gjorde sitt beste for å sette sammen et best mulig faglig og sosialt program.

Parallellsesjonene ble avholdt mandag formiddag, med sesjoner for kondenserte fasers fysikk med atomfysikk, subatomær fysikk og astrofysikk, biofysikk, samt romplasma og klimafysikk. Etter

lunsj ble møtet åpnet offisielt med hilsen fra prorektor for forskning ved UiT, professor Kenneth Ruud. Plenumsforedragene som fulgte, ga møtet en kosmisk start i dobbel forstand:

- Dame Professor Susan Jocelyn Bell Burnell, Oxford University: «We are made of star stuff»
- Professor Lynn Rotschild, NASA Ames Research Center and Brown University: «Are we alone? The search for life in the universe»
- Dr. Cyril Simon Wedlund, University of Oslo: «ROSETTA – rendezvous with a comet»

Om kvelden var det omvisning på mikrobryggeriet til Mack og på glasshytta Blåst med trivelig samvær på Ølhallen etterpå.

Tirsdagens program besto av en rekke plenumsforedrag før lunsj:

- Professor Unni Pia Løvhaug (UiT): «EISCAT_3D: The Modern Arctic Radar for Space Research»

- Dr. Jana Jágorská, NFR Young Research Talent (UiT): «On-chip methane sensing»
- Dr. Jean-Claude Tinguely (UiT): «Waveguide-based nanoscopy»
- Dr. Erik Stensrud Marstein (IFE): «The modern crystalline silicon solar cell»
- Dr. Konrad Tywoniuk (CERN): «Matter at extreme conditions in heavy-ion collisions at the LHC»
- Professor emeritus Carl Angell/ Førstelektor Cathrine W. Tellefsen (UiO): «Relevant: Aktiv og variert læring i relativitetsteori og kvantefysikk»
- Dr. Simon W. Funke (SIMULA): «The Power of Python in Science and Education»

Etter lunsj ga professor Asle Sudbø, NTNU, et innføringsforedrag om metallisk hydrogen. Han presenterte også et nytt senter for fremragende forskning, Center for Quantum Spintronics (QuSpin) hvor professor Arne Brataas er leder og Sudbø er nestleder.

Neste punkt på programmet var debatt om undervisning i fysikk, med tittelen «Vi utdanner for en framtid vi ikke kjenner. Vi skal utdanne kritiske tenkere. Hvordan gjør vi det?». Fungende instituttleder ved Institutt for fysikk og teknologi ved UiT, Stian Anfinsen, ledet debatten. Professor Cathrine Wahlstrøm Tellefsen (UiO), førsteamanuensis Rolf Jonas Persson (NTNU), førsteamanuensis Martin Rypdal (UiT) og student Mads Adrian Hansen (UiT) innledet til debatt og deltok i panelet. Etter debatten var det posterseksjon og årsmøte i Selskapet, se et eget avsnitt.

Festmiddagen på restauranten på toppen av Fjellheisen ble innledet med flott utsikt i strålende sol og uteservering av aperitif. Da tåka kom sigende, var det tid for middag innendørs, som ble avrundet med takk-for-maten tale av professor Jøran Moen, UiO.

På Fysikermøtets siste dag var de to første foredragene viet til undervisning, ved

Etter kaffepausen var det tid for prisutdeling. Ph.d.-student Audun Theodorsen (UiT) som i 2016 ble tildelt Landrøs pris for fremragende Masteroppgave *in absentia*, innledet først med foredraget «Using statistics to describe turbulence in fusion plasmas». Deretter overrakte visepresident Michael Kachelriess Landrøs pris til årets prisvinner Morten Amundsen (NTNU), se neste side, og leder for Norsk Fysikklærerforening Morten Trudeng delte ut Undervisningsprisen til Robert Pehrson (Valler vgs.), se neste side. Til slutt delte vi ut i år for første gang priser for beste studentposter og beste studentforedrag. De dyktige vinnerne var Sunniva Indrehus og Vilde Eide Skingen, for henholdsvis beste poster og beste foredrag. De fikk hver sin spesielle pizzakutter donert av Andreas Wahls nettbutikk.

Dr. Terje Brundtland rundet av møtet med et foredrag i anledning Birkelandjubileet: «Canned Aurora», som ga oss et interessant innblikk i historiske eksperimenter som ledet fram til Birkelands berømte Terella-eksperimenter.

I alt 72 bidragsytere sto for 17 postere og 38 foredrag i parallellsesjonene i tillegg til plenumsforedragene og debattinnledningene. Arrangementskomiteén takker alle de 96 deltakerne for et minnerikt og inspirerende Fysikermøte 2017.

Åshild Fredriksen,
på vegne av arrangementskomiteen,
UiT Norges Arktiske Universitet



Fra venstre: Jocelyn Bell Burnell, Lynn Rothschild, og posterseksjonen. Foto: Hanna H. Hansen

Landrøprisen for masteroppgave til Morten Amundsen

Martin Landrøs pris for fremragende masteroppgave i fysikk ble opprettet av Norsk Fysisk Selskap i 2011 basert på en gave på 150 000 kr fra professor Martin Landrø. Prisen er på 5000 kr og et diplom. Årets pristildeling ble offentliggjort under Fysikermøtet 9. august i Tromsø.

Morten Amundsen skrev sin masteroppgave i perioden høsten 2014 til våren 2016. I begrun-

Bilde: Hanna H. Hansen



nelsen heter det: Han fikk tildelt en meget krevende problemstilling som bestod i å utvikle en generell løsning for Green-funksjonen i 2D og 3D mesoskopiske superledende og magnetiske strukturer. Green-funksjoner benyttes i fysikk til å

trekke ut informasjon om fysiske egenskaper til systemet, inkludert kvantemekaniske effekter.

Amundsen fremviste gjennom hele forløpet en imponerende selvstendighet og evne til å arbeide fokusert med en krevende problemstilling. Dette førte til at han, allerede et halvt år før fristen gikk ut, klarte å løse problemet og å publisere resultatene i et velkjent tidsskrift.

Prestasjonen til Amundsen gikk ikke ubemerket hen. Kort tid etter at han hadde levert oppgaven, ble han kontaktet av NASA i USA med forespørsel om vitenskapelig samarbeid for å modellere superledende «transition edge sensors», som brukes innen astronomi som fotondetektorer.

Morten Amundsen er oppvokst på Stovner i Oslo og bor nå i Trondheim, der han er ph.d.-stipendiat ved NTNU. Norsk Fysisk Selskap gratulerer og ønsker lykke til videre med arbeid mot en doktorgrad.

Åshild Fredriksen

Undervisningspris i fysikk til Robert Pehrson

Se for deg at du står foran 30 elever som har valgt fysikk på videregående skole. Du har 30 tenåringer som har et ønske om å lære fysikk. Og du vet at mange av dem kommer til å streve med både mekanikken, relativitetsteorien og elektromagnetismen. Hva gjør du?

Årets vinner av Norsk Fysisk Selskaps undervisningspris i fysikk vet svært godt hva han gjør. Han er ikke bare faglig trygg, han har også en unik evne til å se og ta vare på hver enkelt elev.

Når man skal undervise fysikk så holder det ikke bare å skjenne faget selv, slik **Robert Pehrson** gjør til fulle. Han har også evnen til å sette seg inn i andres forståelse av faget – finne fram til ulike forklaringsmetoder og vinklinger. Han hjelper elevene der de er. Han motiverer, engasjerer og får fram lærelysten hos dem. Alt dette krever dybdeforståelse av faget og samtidig stor menneskekunnskap. Elevene til Robert sier: «Han er morsom, har stålkontroll og er flink til å forklare. Han tar seg god tid til hver og én, og han skjønner virkelig elevene. Han er opptatt av at vi forstår.»

Det er både artig, trygt og lærerikt å være elev i Robert Pehrsons fysikktimer. Hans kreativitet krydrer timene. Han har for eksempel laget samarbeidsprosjekt om universet mellom fysikk og visuelle kunstfag. Og du skal ikke se bort fra at det dukker opp et fysikkeventyr med selvlagde tegninger på fysikkprøvene hans.

Robert Pehrson har vært lektor ved Valler vgs. i Bærum kommune siden år 2000, med hovedfag i måleteknikk. Hovedoppgaven tok han eksternt ved Norsk Datas avdeling for hardware-utvikling. Han har med andre ord høy digital kompetanse. Før hovedfag i fysikk tok han



mellomfag i statsvitenskap. Han har undervisningskompetanse i både historie og geografi, i tillegg til naturfag, matematikk og fysikk. Han har jobbet med fremmedspråklige elever og voksenopplæring.

Hans allsidighet og tverrfaglighet kommer elevene til gode. Han har stor respekt for fag, elever og annerledeshet. Han leder klassen med varme og humor, skaper gode arbeidsprosesser elevene imellom, og får alle til å føle seg viktige og unike. Hans empatiske væremåte gjør at elever som har det vanskelig ikke nøler med å be Robert om faglig hjelp. Og Robert stiller alltid opp. Han er festlig å snakke med, lett å samarbeide med og får andre til å skinne.

Den verdige vinner av Norsk Fysisk Selskaps undervisningspris i fysikk 2017 er et forbilde for andre fysikklærere. Gratulerer Robert Pehrson.

Morten Trudeng

Årsmøtet i Norsk Fysisk Selskap

Årsmøtet i Norsk Fysisk Selskap (NFS) ble avholdt ettermiddagen 8. august 2017 i tilknytning til Fysikermøtet i Tromsø. Årsmøtet ga fullmakt til å justere FFV-andelen av medlemskontingenten til en størrelse som samsvarer med reelle kostnader for utgivelsen av bladet. Begrunnelsen for fullmakten er at FFV blir rimeligere å gi ut etter omleggingen av bladet, samtidig som NFS har behov for å dekke kostnader til andre oppgaver, for eksempel møtekostnader.

Det ble tildelt æresmedlemskap til professor emeritus Carl Angell (UiO) og til professor emeritus

Per Christian Hemmer (NTNU). Begrunnelsene for tildelte æresmedlemskap er gjengitt nedenfor.

Professor Asle Sudbø (NTNU) ble valgt til ny president og professor Sunniva Siem (UiO) ble valgt til ny visepresident. Revisor professor Anne Borg (NTNU) og vararevisor forsker Lars Erik Walle (SINTEF) ble gjenvalgt. Professor Randi Holmestad (NTNU, gjenvalg), førstelektor Cathrine Wahlstrøm Tellefsen (UiO, ny) og førsteamanuensis Kjartan Olafsson (UiB, ny) ble ny valgkomité.

Åshild Fredriksen, avtroppende president

Æresmedlemskap til Carl Angell og Per Christian Hemmer



Carl Angell, professor emeritus i fysikk ved UiO, tildeles æresmedlemskap i Norsk Fysisk Selskap for sin mangeårige innsats for å utvikle kunnskap i fysikkdidaktikk og om undervisning i fysikk. Han har vært særlig opptatt av hvordan elever i videregående skole oppfatter og lærer fysikk, og han har arbeidet med rekruttering til fysikkfaget i skoleverk og på universitetsnivå. Han har prøvd ut læremateriell knyttet til bl.a. matematisk modellering og til kvantefysikk og relativitetsteori. Han har også skrevet en håndfull fag- og lærebøker. Gjennom sine nærmere 30 år ved Skolelaboratoriet har Carl Angell arrangert etter- og videreutdanningskurs for lærere, veiledet master- og ph.d.-studenter, og undervist blivende fysikklektorer med stor entusiasme, humor og raushet.

Han har lagt ned en mangeårig, omfattende innsats for Fysikkolympiaden. Ikke minst var han sentral i etableringen av Norsk fysikklærerforening i 1994, der han siden har gjort en stor jobb som generalsekretær og med organiseringen av landskonferansene for fysikkundervisning som Norsk Fysikklærerforening har arrangert siden 1990-tallet.

Norsk Fysisk Selskap gratulerer og takker begge våre nye æresmedlemmer for deres store innsats for norsk fysikk.



Per Christian Hemmer, professor emeritus i fysikk ved NTNU, tildeles æresmedlemskap i Norsk Fysisk Selskap for sin omfattende innsats for norsk fysikk. Han var dosent i 1966–1968 og professor i 1969–2003 med fagfelt teoretisk fysikk, og han var kjent som en framifrå lærer og pedagog og en førsteklases veileder for en rekke hovedfagstudenter og doktorander. Hemmer har skrevet en serie lærebøker i fysikk, kjennetegnet ved sin konsise form: *Kvantemekanikk*, *Statistisk mekanikk*, *Termisk fysikk*, *Varmelære*, *Faste stoffers fysikk* og *Ikke-lineær dynamikk*, bøker som har hatt stor betydning for fysikkutdanningen ved norske universiteter. De er utkommet i flere opplag, opptil fem. Fra 1987 fram til 2017 var Hemmer fast medlem av redaksjonskomiteen for *Fra Fysikkens Verden*, der han m.a. var ansvarlig i 30 år for spalten [Fysikk]Trim i FFV. Internasjonalt har han lagt ned et stort arbeid for fysikkens fremme gjennom sin virksomhet i IUPAP, der han også var visepresident i årene 1984–1990.

Norsk Fysisk Selskap gratulerer og takker begge våre nye æresmedlemmer for deres store innsats for norsk fysikk.

*Åshild Fredriksen,
på vegne av Norsk Fysisk Selskap*



Sterke norske prestasjoner i Fysikkolympiaden 2017

Årets internasjonale fysikkolympiade var den 48. i rekken og ble arrangert i Yogyakarta i Indonesia 16.–24. juli. Arrangementet hadde rundt 395 deltakere, 165 lagledere og 76 observatører fra 86 land.

Årets norske deltakere gjorde det svært bra. Nikita Klimenko fra United World College i Fjaler, som deltok i den internasjonale finalen for Norge for annen gang, tok velfortjent bronsemedalje. Carl Fredrik Andresen fra Ullern vgs. i Oslo fikk hederlig omtale, noe som også er en sterk prestasjon. De øvrige norske deltakerne var Marius Lindegaard, Weicheng Hua og Anders Christian Mathisen. De norske laglederne var Torbjørn Mehl og Thomas Frågåt.

Årets teoretiske oppgaver var delt inn i tre temaer: Mørk materie; jordskjelv, vulkaner og tsunami (inspirert av beliggenheten til Indonesia); og kosmisk inflasjon. Den eksperimentelle delen av konkurransen hadde to temaer: Bestemmelse av avbøyningsgradient og diffusjonskoeffisient av

en saltløsning ved hjelp av laseravbøyningsmåling; og magnetisk felle med parallell dipollinje for jordskjelv og vulkanovervåkning.

Den norske fysikkolympiaden har hatt et gledelig økende deltakerantall de siste årene; godt over 1000 elever deltar i første runde, som går i november. Den norske OL-komiteen håper at denne utviklingen fortsetter og at olympiaden virker som en stimulans for fysikkelever og -lærere i norsk videregående skole.

Nyttige lenker:

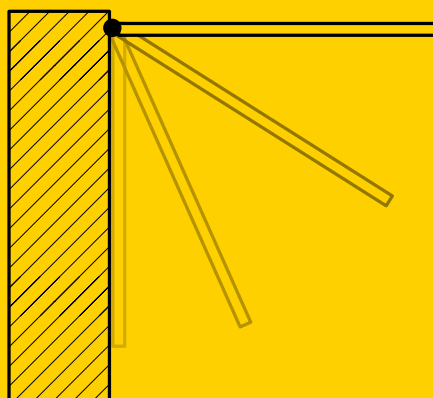
- De norske sidene med tidligere oppgaver fra de norske rundene:
www.mn.uio.no/fysikk/forskning/grupper/skolelab/fysikk-ol/
- Hjemmesiden til den internasjonale fysikkolympiaden 2017 hvor man kan finne finaleoppgavene på engelsk:
www.ipho2017.id

Thomas Frågåt

Oppgave 1 i kvalifiseringen til den internasjonale Fysikkolympiaden 2017:

En tynn, homogen stang er hengslet til en vegg i den ene enden. Stanga løftes ut fra veggen slik at den holdes horisontalt, og slippes deretter fra denne posisjonen så den svinger inn mot veggen. Hva er farten til endepunktet på staven idet den treffer veggen? Stanga er 1,0 m lang og har massen 0,20 kg.

Løsningsforslag ligger på www.mn.uio.no/fysikk/forskning/grupper/skolelab/fysikk-ol/



Sammenfiltrede fotoner er på ny i verdensnyhetene

Den 16. juni 2017 publiserte Juan Yin og 33 kollegaer artikkelen «Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers» i det prestisjetunge tidsskriftet *Science* [1]. Det har ikke manglet på superlativer etterpå. «Dette er en kjempebragd innen kvantesammenfiltrering og kvantevitenskap. Kina tar nå et klart lederskap innen kvantekommunikasjon», sier Thomas Jennewein ved the University of Waterloo i Canada, og Anton Zeilinger ved the University of Vienna sier: «Dette eksperimentet er svært viktig for utviklingen av et fremtidig kvante-internett.» [2]

Arnt Inge Vistnes Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

Sammenfiltrede fotoner (*entangled photons*) har vært et temmelig sentralt område av fysikken i om lag 30 år. Det er flere grunner til dette. Mange mener at eksperimenter med sammenfiltrede fotoner har vist at diskusjonen mellom Bohr og Einstein, som ledet til den berømte EPR-artikkelen i 1935 skrevet av Einstein, Podolsky og Rosen [3], nå er løst en gang for alle – i Bohrs favør. «Verden er merkelig», sier sentrale fysikere, og eksperimentene viser at det ikke er mulig å beskrive verden med lokal realisme – i strid med Einsteins oppfatninger.

Med lokal realisme menes her to ting: 1) At fysikken er lokal i betydning at en *virkning* aldri kan tilskrives en *årsak* som er så langt unna at påvirkningen måtte ha forplantet seg med en større hastighet enn lyshastigheten, og 2) At en partikkel må ha objektive egenskaper (reelle fysiske verdier) allerede før vi foretar en måling av disse. [4]

En annen grunn til interessen for sammenfiltrede fotoner er at de gir muligheter for å utvikle en ny type kvanteteknologi. Sammenfiltrering kan forekomme også for partikler med masse, men vi holder oss strengt til sammenfiltrering av fotoner i denne artikkelen.

En vanlig fremstilling av sammenfiltrede fotoner er som følger: Vi kan lage par av fotoner som har den pussige egenskapen at dersom vi gjør en måling på det ene fotonet, og derved endrer dette (kollaps av bølgefunksjonen), vil det føre til en øyeblikkelig endring av det andre fotonet selv om det på dette tidspunktet er mange kilometer unna det første. Dette kan synes å stride mot relativitetsteorien, for det kan synes som vi kan

overføre informasjon raskere enn lyshastigheten. Dette problemet løses ved å si at vi må overføre informasjon om måleoppsettet mellom de to stedene for at vi skal kunne tolke måleresultatet, og den informasjonen kan ikke skje momentant.

Det er likevel pussig at endringer vi gjør ett sted får momentan virkning et annet sted. Det er en utfordring for filosofiens oppfatninger av årsak-virkning. Dette problemet søkes løst ved å si at de to fotonene må betraktes som ett system («ett legeme») selv om delene er mange kilometer fra hverandre.

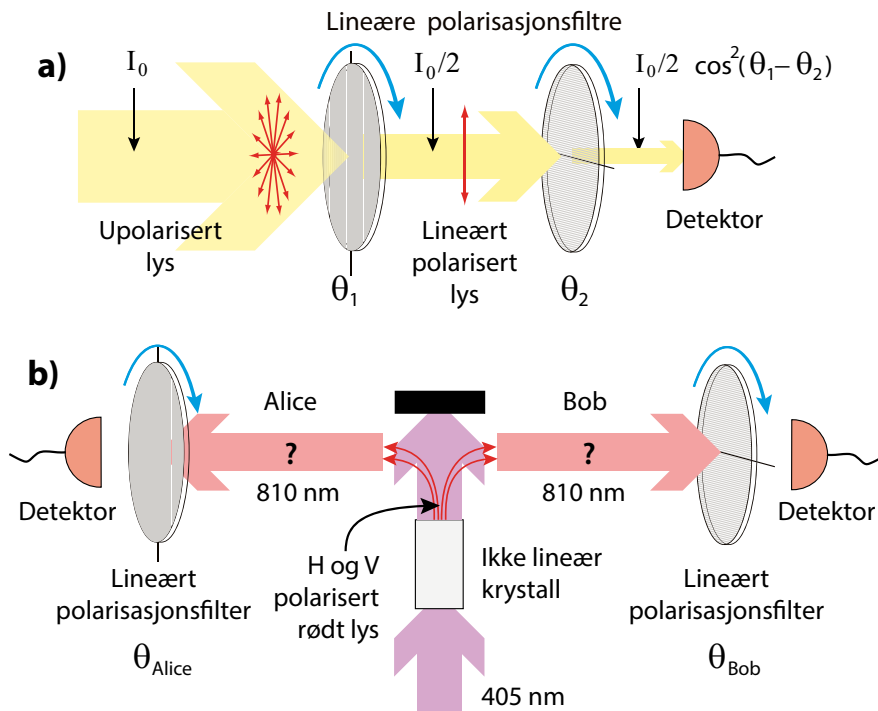
Dersom du synes dette er merkelige forestillinger, er du ikke alene! Et relevant spørsmål er da: Har vi fysikere egentlig vist at verden *er* så merkelig, eller kan det hende at våre forestillinger skyldes at vi feiltolker resultatene eller rett og slett ikke forstår fenomenet fullt ut?

I denne sammenheng er det særdeles viktig å minne om Bohrs ord, at fysikkens oppgaver er ikke å fortelle hvordan verden *er*, men å finne lov-messigheter mellom det vi kan observere. Og la oss slå det fast først som sist: Kvantefysikken gir oss korrekte sammenhenger mellom det vi kan *måle* i våre sammenfiltreringseksperimenter, så den saken er grei. Men målingene våre er ikke noe annet enn antall klikk som kommer ut av detektorer sammen med innstillinger på polarisasjonsmålingsutstyr, og ingenting mer enn det. Det er *tolkninger* av eksperimentene som gir oss utfordringer!

Ifølge Københavnerfortolkningen av kvantefysikken skal vi *ikke* gjøre krav på å fortelle hvordan verden *er*. Men det er nettopp det vi gjør når vi sier at «når vi *endrer* for eksempel polariseringen til *det ene fotonet*, skjer det øyeblikkelig en *endring av det andre fotonet*». Dette er ikke i Bohrs ånd slik jeg kan se det!

Danning av sammenfiltrede fotoner

Sammenfiltrede fotoner skapes både i vårt eget kvanteoptikklaboratorium og i det kinesiske arbeidet ved å sende fiolett lineært polarisert laserlys ved 405 nm (som svarer til en frekvens f_0 inn mot en helt spesiell ikke-lineær krystall. En ørliten del av lyset som sendes inn, blir gjort om til rødt lys. Noe av det røde lyset som kommer ut av krystallen har samme polarisering som den innkommende strålen, og omtrent like mye av det røde lyset har en polarisering vinkelrett på det første. De to bidragene betegnes som *signal* og *idler*. Frekvensen til det røde lyset med de to polariseringene er henholdsvis $f_0/2 + \delta$ og $f_0/2 - \delta$. Ved å variere temperaturen til krystallen, kan vi få $\delta = 0$, slik at begge komponentene av det røde lyset får frekvensen $f_0/2$ og altså bølglengden 810 nm. Summen av frekvensene til de to komponentene av det røde lyset er lik frekven-



Figur 1. I a) er det vist hvordan upolarisert lys endrer intensitet og karakter når det etter tur passerer tvø lineære polarisasjonsfiltre. I b) er det vist det eksperimentelle oppsettet for sammenfiltringsforsøk. Da sammenlignes på en måte polariseringen i den ene strålen (Alice) med polariseringen til den andre strålen (Bob), og relasjonen mellom dem viser om vi har sammenfiltrering eller ikke. Polariseringsretning til lysstrålen i Alice og Bob er kvantemekanisk ubestemt med hensyn til en vilkårlig valgt kvantiseringsretning før det foretas «måling» (derfor «?»).

sen til den drivende laserstrålen. Dette følger av enkel matematikk (kvadratet av en sum i matematikken, siden vi har en 2. ordens effekt), men stemmer også med fysikkens energibevareingslov dersom vi bruker fotonbegrepet og at fotonet har en energi lik $E = hf$. Innenfor en slik tenkning er det blitt vanlig å si at «ett av de fiolette fotonene er gjort om til to røde fotoner».

Det er vanlig å la lysstråler gå horisontalt parallelt med et optisk bord i et laboratorium. Siden vi betrakter lys som transversale elektromagnetiske bølger, er det naturlig å skille mellom vertikalt og horisontalt polarisert lys i lysstrålen, og betegner polariseringen med V og H [5]. Lar vi det fiolette lyset ha en polarisering V, vil noe av det røde lyset være V og noe H polarisert. Det røde V-lyset har et nært, men komplisert beslektskap med det røde H-lyset. Sagt med andre ord: Signal og idler som skapes i den ikke-lineære prosessen er nær beslektet, og for vår type krystall har de en fastlagt polarisering som er vinkelrett på hverandre. Det er her viktig å huske at intensiteten til lyset varierer i tid og at frekvensen ikke er skarp, slik at verken enkle bølge- eller enkle partikkelbeskrivelser duger.

Etter å ha gått gjennom den ikke-lineære krystallen filtreres det fiolette lyset bort, og det røde lyset deles i to lysbunter som sendes hver sin vei. Vi kaller disse lysbuntene for Alice og Bob. I en klassisk beskrivelse vil det være en sum av H- og V-polarisert rødt lys i hver av de to lysbuntene som sendes videre. Sagt med andre ord: Både signal og idler er bølger, og både Alice og Bob vil ha omtrent like mye av hver.

Bruker vi fotonbegrepet, der fotonene ofte forestilles som udelelige partikler, blir beskrivelsen helt annerledes. Når den opprinnelige strålen deles i to, er det 50 % sannsynlig at signal-fotonet går til Alice og 50 % sannsynlig går det til Bob. Det samme gjelder for idler-fotonet. For hvert «fotonpar» som dannes, vil begge fotonene enten gå samme vei (begge til Alice eller begge til Bob), eller et av dem går til Alice og et til Bob. Det er den siste kombinasjonen som anvendes ved sammenfiltringsforsøk.

I den kvantemekaniske beskrivelsen blir tilstanden en superponering av de mulige utfallene, og vi slutter å betrakte fotonene som vel definerte signal- og idler-fotoner. Det er først når vi danner en superponert tilstand etter at den opprinnelige strålen er delt i to at vi kan snakke om sammenfiltrerte fotoner. Matematisk sett har dette en viss parallell med den klassiske beskrivelsen der bølger adderes på amplitudenivå.

Sammenfiltringsforsøket

For å forstå grunnlaget for sammenfiltringseksperimentet, må vi kjenne til Malus' lov. Sender vi ikke-polarisert lys (for eksempel lys fra sola eller fra en glødelampe) gjennom et lineært polarisasjonsfilter, blir lyset som passerer filteret lineært polarisert, som vist i Figur 1 [5]. Dersom vi setter inn nok et lineært polarisasjonsfilter i den polariserte lysbunt, vil alt lys passere siste filter dersom det er dreid slik at polarisasjonsaksene til de to filterne er parallelle. Er polarisasjonsaksene til de to filterne vinkelrett på hverandre, slipper ikke noe lys gjennom det

siste filteret. Intensiteten som funksjon av vinkelen ($\theta_1 - \theta_2$) mellom de to polarisasjonsaksene, følger Malus' lov:

$$I = (I_0/2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

der I_0 er intensiteten av det upolariserte lyset vi startet ut med.

I et sammenfiltringsforsøk sender vi *ikke* en lysbunt gjennom to *etterfølgende* polarisasjonsfiltre, men vi sender Alice lysbunten gjennom ett filter og Bob lysbunten gjennom et *annet* filter. De to filtrene kan være plassert mange kilometer fra hverandre. Det pussige er da at uansett hvordan vi innstiller polarisasjonsfilteret på Alices side, vil «intensiteten» på Bobs side etter at lyset har passert polarisasjonsfilteret, følge en lov helt analogt med Malus' lov, bestemt ved

$$I_{\text{Bob}} = \kappa I_0 \cos^2(\theta_{\text{Alice}} - \theta_{\text{Bob}}) \quad (2)$$

der I_0 nå er «intensiteten» til lysbunten Alice før filteret (som er omtrent lik intensiteten til lysbunten Bob før filteret). Her er κ er et tall som i vårt laboratorium er ca. 0,06 og som delvis skyldes at detektorene ikke er 100 % effektive, men det er også uavklarte grunner til at kappas er så lav.

Det er imidlertid her svært viktig å merke seg at betegnelsen «intensiteten på Bobs side» *ikke* er intensitet i vanlig forstand! Når vi måler lys med «enkelt-foton detektorer» (detektorer som kun kan gi én puls hver gang den reagerer), måles intensiteten vanligvis i form av antall talte pulser per sekund. I sammenfiltringsforsøk er vi ikke interessert i intensitet for Alice og Bob hver for seg. Vi plukker kun ut pulsene som er slik at en puls hos Alice og en puls hos Bob skal svare til at «de to sammenfiltrede fotonene» startet ut samtidig fra den ikke-lineære krystallen. Men når vi plukker ut pulser på denne sære måten, er det slik at når vi først har slått fast at det er en puls (et klikk) i Alices detektor omtrent samtidig med et klikk i Bobs detektor, følger antall slike «koinsidenser» likning (2), og kun da. Alle andre klikk blir forkastet.

Relasjonen i likning (2) gjelder for såkalt sammenfiltrering av «type I» der de to fotonene har samme polarisering når de blir skapt. I vår egen lab, såvel som i det kinesiske eksperimentet, har de to fotonene polarisering vinkelrett på hverandre (type II). Da gjelder følgende relasjon:

$$I_{\text{Bob}} = \kappa I_0 \sin^2(\theta_{\text{Alice}} - \theta_{\text{Bob}}). \quad (3)$$

I praksis brukes ikke enkle polarisasjonsfiltre som antydnet her, men en mer komplett polarisasjonsanalyse med to detektorer både hos Alice og

Bob, men det har ikke noe betydning for grunnprinsippet vi gir her.

Vi vet at det røde lyset som skapes i den ikke-lineære krystallen har to bidrag, signal og idler, og at disse har fast polarisering i forhold til krystallaksene. Når disse blandes (superponeres) får vi en veldefinert kvantemekanisk tilstand, men polariseringen til de to resulterende sammenfiltrede fotonene er ikke kjent hver for seg. Det er bare når vi sammenligner målinger hos Alice og Bob for sammenhørende fotonpar at vi finner en sammenheng. Sammenfiltringseksperimentet går da ut på å sjekke at uansett hvordan vi stiller polarisasjonsfilteret til Alice, så vil vi ved å gjennomføre *mange* målinger, finne ut at likning (3) gjelder når vi endrer systematisk retningen til polarisasjonsfilteret på Bobs side.

Endres polariseringen?

Det kan være interessant å se hvor forestillingen om *øyeblikkelig endring av polarisering* nevnt ovenfor kommer fra.

La oss for enkelhets skyld anta at eksperimentet er satt opp slik at Alice reagerer et nanosekund eller så tidligere enn Bob når de detekterer et fotonpar (statistikken endres ikke dersom vi senere justerer dette slik at det blir ingen forskjell i deteksjonstidspunkt).

Når vi lar lys gå gjennom et polarisasjonsfilter, foretar vi en «måling» i kvantemekanisk forstand. Et foton som slipper gjennom et polarisasjonsfilter *får* den polariseringen filteret har, uansett hvordan polariseringen var før filteret. Dette ligger i forestillingen om såkalt «kollaps av bølgefunksjonen». Vi kan altså si at fotonet som blir detektert hos Alice har fått en polarisering gitt av polarisasjonsfilteret til Alice, og at dette finner sted *før* deteksjon hos Bob. Vi aner ikke hva polariseringen til Alices foton var før deteksjonen (og det er meningsløst å si at det hadde en polarisering overhodet).

Men gitt at vi nå har fått en deteksjon av et foton hos Alice, hvor stor sannsynlighet er det for at vi også skal detektere det sammenhørende fotonet av de sammenfiltrede fotonene hos Bob? Denne sannsynligheten må samsvare med det eksperimentelle resultatet vi finner i likning (3).

For såkalt type II sammenfiltrede fotoner, som både kineserne og vårt eget laboratorium bruker, får vi den ønskede statistikken dersom fotonet på Bobs side *før* deteksjon har en veldefinert polarisering vinkelrett på polariseringen til Alices foton etter deteksjon.

Siden Alice kan stille sitt polarisasjonsfilter akkurat som hun vil, og vilkårlig tett opp til deteksjonen hos Alice, og siden vi kan justere

oppstillingen slik at deteksjonen hos Bob kommer vilkårlig raskt etter deteksjonen hos Alice, er det nærliggende å trekke konklusjonen: Bobs foton endrer polarisering *øyeblikkelig* så snart Alices foton er målt. En nesten identisk formulering blir at Bobs foton får den gitte polariseringen *øyeblikkelig* så snart Alices foton er målt (betegnelsen «øyeblikkelig» må i denne sammenheng forstås på en klassisk måte der det ikke er begrensinger gitt av relativitetsteorien). Det er det som gjør at sammenfiltrering viser at verden er merkelig, at naturen har korrelasjoner som ikke kan beskrives klassisk, og det er det som gjør at disse eksperimentene støtter Bohrs oppfatninger om ikke-lokal realisme og er i konflikt med Einsteins oppfatninger. Det finnes flere og til dels sterke og motstridende oppfatninger om sammenfiltrering, men stridighetene er for det meste knyttet til tolkning, ikke så mye til den formelle beskrivelsen.

Kryptografi

La oss gå tilbake til nyheten fra Kina i juni i år. Her er det bruksområdet til såkalte sammenfiltrede fotoner som er av interesse, og da er det først og fremst innen kryptografi. Vi har ofte behov for å sende hemmelige meldinger. Det gjør vi ved å kryptere meldingene, men krypteringen fungerer bare dersom mottakeren har en nøkkel for å dechifrere meldingen etter at den er mottatt. Men hvordan skal vi sende nøkkelen uten at andre får tak i den? Sender vi den over en vanlig kabel, kan noen lytte på kabelen og fange opp nøkkelen uten at mottakeren vet om det.

Her kommer sammenfiltrede fotoner inn. Ved sammenfiltrede fotoner arbeider vi med så svakt lys (på «enkeltfotonnivå») at vi ikke kan «stjele litt» av en lysbunt for å analysere lyset der og slippe gjennom resten og late som ingen ting. Vi har heller ikke mulighet for å stjele hele lyset, gjøre en full nok analyse av dette slik at man kan lage tilsvarende lys og sende det videre, uten at den endelige mottakeren vil skjønne at noen har lyttet. Vi har rett og slett ikke nok lys til å gjøre en god nok analyse i en slik mellomstasjon. Tenker vi på lys som udelelige fotoner, er konklusjonen den samme. Vi kan ikke bestemme fotonets polarisering entydig for så å sende ut et annet med nøyaktig samme polarisering som det opprinnelige. Måler vi på et foton, endrer det seg, og vi kan ikke med bare én måling bestemme polariseringen før måling entydig. Målingen ville ødelegge sammenfiltreringen og sette spor etter seg.

Ved å bruke det underlige slektskapet mellom det V-polariserte røde lyset og det samtidig produserte H-polariserte lyset vi får i et sam-

menfiltringsoppsett, er det laget prototyper på krypteringsmaskiner som skal kunne gi en overføring av krypteringsnøkler fra ett sted til et annet som ingen kan avlytte uten å bli oppdaget. Vi bruker da likning (3) på den måten at Alice bestemmer tilfeldig hvilken vinkel θ_{Alice} hun ønsker i en måling (av fire fastsatte valgmuligheter), og Bob velger tilfeldig hvilken vinkel θ_{Bob} hans polarisasjonsfilter har. De noterer begge hvilken vinkel de bruker for hver registrering av «fotonpar». Etter at mange samtidige målinger er gjennomført, overfører for eksempel Alice en liste over de polarisasjonssettingene hun brukte. Denne informasjonen er ikke hemmelig. Bob kan så sammenligne med resultatene hans når han nå kjenner til både Alices og sine egne innstillinger, og kan velge kombinasjoner som gjør det mulig å trekke sikre slutninger. Likning (3) viser nemlig at dersom Alice og Bob begge stilte polarisasjonsretningen likt, skal det ikke være samtidig registrering, mens dersom de stilte filtrene 90 grader forskjellig, skulle det bli registrering. Er du interessert i kvantekryptering, anbefales en ph.d.-avhandling fra NTNU for en del år siden [6].

Problemer med svakt lys

Det er imidlertid lettere sagt enn gjort å få kvantekryptering til å virke i praksis. For at dette utstyret skal fungere, må sammenfiltringsegenskapen bevares når lysbunter med sammenfiltret lys sendes mellom krypteringsenhetene. Og som nevnt ovenfor under seksjonen om kryptografi, må lysstyrken være meget liten for å unngå at noen kan stjele nok av lyset uten å bli oppdaget; lysbunten med de sammenfiltrede fotonene har en effekt på bare ca. en halv picowatt eller mindre!

Lyset kan sendes gjennom optiske fibre, men lyset blir svekket og signalet litt forvrent når det går over lengre avstander gjennom optiske nett. Det har vært gjennomført mange ulike forsøk på å forlenge avstanden fra sender til mottaker hvor sammenfiltringsegenskapene beholdes. Det har gått fra noen meter, til noen kilometere, til 100 km, og nå har altså kineserne klart å beholde sammenfiltringsegenskapene til det røde lyset over en avstand på 1200 km (målt fra en bakkestasjon til en annen)! For å få det til, valgte de å miniatyrisere hele det eksperimentelle oppsettet hvor de sammenfiltrede fotonene dannes, og plassere det i en satellitt som går i en bane ca. 500 km over bakken (se Figur 2). De hadde tre mottakerstasjoner (bare to er vist i figuren), som alle var plassert på høye fjell. Selv om lyset går svært mye lengre i dette eksperimentet enn i tidligere tilsvarende eksperimenter, går det mesteparten av veien



Figur 2. Illustrasjon av satellitten *Micius* som kineserne brukte i sitt avanserte sammenfiltringseksperiment. Bilde: gjengitt med tillatelse fra American Association for the Advancement of Science (som utgir tidsskriftet *Science*).

gjennom nær vakuum. Atmosfæren blir først så tett at den kan skape problemer i de nederste ca. 10 km over bakken. Det er dette som er cluet for at kineserne har greid å beholde sammenfiltreringsegenskapene i dette meget svake lyset over så stor totalavstand.

Teknologisk avansert eksperiment

Det er et teknologisk avansert eksperiment som er gjennomført. Det er ingen nyutvikling av kvantefysikk eller kvanteoptiske prinsipper, men de har anvendt en rekke tekniske løsninger som spiller på lag på en flott måte. Miniaturisering av utstyr for å generere sammenfildrede fotoner ombord i en satellitt er en bragd i seg selv. Men når man skal sende meget svakt lys over store avstander, kan ikke mye lys gå tapt før man får store problemer. De har utviklet et meget effektivt tracking-system både for teleskopene på bakken og om bord i satellitten med dedikerte lasere både på bakkestasjonene og i satellitten for at både de tre teleskopene på bakken og de to i satellitten skulle være rettet tilstrekkelig nøyaktig inn i forhold til hverandre slik at de svake signalene fra satellittene skulle bli oppfattet (high-precision acquiring, pointing, and tracking (APT) technology).

Vanligvis blir de sammenfildrede fotonene generert i en av krypteringsenhetene og den ene lysbunten (f.eks. Alice) blir analysert samme sted mens den andre lysbunten (Bob) blir sendt over stor avstand til den andre enheten. I det kinesiske eksperimentet ble de sammenfildrede fotonene generert i satellitten. Alice-lysbusnten ble sendt gjennom ett teleskop til én bakkestasjon, mens Bob-lysbusnten ble sendt gjennom et annet teleskop til en annen bakkestasjon (sammenhold dette med Figur 1b).

For å ikke miste for mye lys ved overføringen, ble lysstrålen fra satellitt til bakke utvidet til henholdsvis 18 og 30 cm diameter i de to teleskopene

om bord for å redusere diffraksjon. Lysstrålens diameter da den nådde bakken var mellom 5,5 og 22 m (avstand mellom satellitt og bakkestasjon varierte mellom 500 og 2000 km) [7]. Bakkestasjonene hadde speil med diameter på 120 eller 180 cm. Enkel regning viser at mellom 0,3 % og 10 % av lysbuntene fra satellitten kunne fanges opp av basestasjonens teleskoper. Forutsetningen var at teleskopene på bakken ble styrt nøyaktig nok til at de pekte rett mot satellitten med en feil mindre enn ca. 50 cm i en avstand av størrelsesorden 1000 km unna! Denne nøyaktigheten måtte opprettholdes mens satellitten beveget seg!

Til tross for disse imponerende tekniske løsningene, var det likevel mye lys som forsvant i hele overføringen. I satellitten ble det skapt ca. $5,0 \cdot 10^6$ sammenfildrede fotonpar hvert sekund som ble fordelt mellom Alice og Bob. På bakken ble det imidlertid ikke mottatt mer enn 1,1 fotonpar per sekund i betydning at ett av fotonene i et par ble registrert på én bakkestasjon samtidig med at det andre fotonet ble registrert på den andre deltakende bakkestasjonen.

«Samtidighet» er her selvfølgelig en separat utfordring. Det ble sendt pulset laserlys sammen med de sammenfildrede fotonene for å holde rede på hvilke deteksjoner som svarte til ett og samme fotonpar. Siden satellitten ikke er geostasjonær, vil avstanden mellom satellitt og bakkestasjon variere mens overføring av signal pågår. Det påvirker tidsforskjeller mellom detekterte fotoner på to ulike bakkestasjoner etter som satellitten beveger seg. Også polariseringen til fotonene påvirkes av den skiftende geometrien. Avanserte systemer sørget for å kompensere for slike effekter.

Demonstrasjonen av bevaring av sammenfiltreringsegenskapene er vist på samme måte som vi gjør i vårt eget laboratorium når vi demonstrerer sammenfildrede fotoner for studenter og andre interesserte. Vi bruker *Bells ulikhet*, som angir at

en korrelasjon, beregnet på en spesiell måte, må være mindre eller lik 2,0 dersom vi har lokal realisme. I vårt eget laboratorium kan vi oppnå at denne korrelasjonen kommer opp i ca. $2,80 \pm 0,02$, der teoretisk grense er 2,84. Det er brudd på Bells ulikhet. Brudd på Bells ulikhet tolkes dithen at det finnes en dypere korrelasjon mellom fotonene enn den som kan forklares ut fra klassisk teori, og resultatet er dermed ikke forenlig med Einsteins oppfatning av lokal realisme. Kineserne fikk resultatet $2,37 \pm 0,09$. Dette er et meget bra resultat tatt i betraktning utstyr og avstand lyset har gått, men er kanskje på grensen av hva som kreves for å få full sikkerhet i overføring av signaler når man går litt dypere inn i krypteringsteoriene.

Kvantekommunikasjon?

Hele konseptet som er brukt i det kinesiske eksperimentet er etter min mening utnyttet praktisk talt så godt som det lar seg gjøre teknisk sett. Det er ikke store forbedringspotensialer innenfor den valgte eksperimentelle rammen. Vi ender opp med kun ett mulig bit informasjon overført per sekund. I praksis blir det en del mindre på grunn av den protokollen som må anvendes ved kvantekryptografi. Det er på en måte ikke mye å rope hurra for når man har i mente at prosjektet har kostet om lag \$100 millioner [8]. Man kan spørre seg om dette kanskje er mer et prestisje-prosjekt enn noe som bringer global kvanteinternett noe nærmere realisering?

Det er imidlertid et generelt håp innen kvanteoptikkmiljøet at kvantekommunikasjon kan bli viktig i framtiden. Det kinesiske eksperimentet blir sett på som en viktig brikke i en slik utvikling, ikke minst fordi man altså har flyttet produksjon av sammenfiltrede fotoner fra bakken til en satellitt. Det er håp om at vi i framtiden kan finne fram til kilder for sammenfiltrede fotoner som kan generere et langt høyere antall fotonpar per sekund enn de kildene vi har i dag.

Jian-Wei Pan ved University of Science and Technology of China Pan, som var leder for prosjektet, sier at han håper at satellitten også kan brukes i fundamental fysikk for å studere vekselvirkning mellom kvantefysikk og gravitasjon. Han sier videre: «Vi har etablert et kvanteoptikk-laboratorium med et effektivt areal på en million kvadratkilometer. Vi kan gjennomføre eksperimenter med avstander og hastigheter som er utilgjengelig på bakken.»[8]

Lokal interesse for sammenfiltrering

Jeg vil til slutt nevne at ved Fysisk institutt, UiO har professor Joakim Bergli klart å gi en kvantemekanisk beskrivelse av sammenfiltreringsforsøk i

vårt laboratorium som dekker en større variasjon i eksperimentelle betingelser enn det som folk flest har benyttet tidligere. Den enkle kvantemekaniske beskrivelsen folk flest bruker duger ikke for et bredere eksperimentelt variasjonsområde. Med Berglis «to-foton-tilstander» er det vanskelig å bruke tankegangen «når vi gjør en endring på det ene fotonet, så skjer det samtidig en endring på det andre». Det blir meningsløst å snakke om enkeltfotoner på denne måten så lenge det er helt nødvendig for en tilfredsstillende beskrivelse å kombinere de to bidragene på en meget tett måte både for Alice og Bob. Vi ender da opp med en situasjon der kvantefysikken gir oss en nær perfekt beskrivelse av de eksperimentelle resultatene, men der det egentlig ikke er mulig å tolke resultatene fysisk i vanlig forstand. Bergli er i ferd med å fullføre artikkelen for publikasjon. ■

Referanser

1. J. Yin et al. «Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers.» *Science* 356 (2017) s. 1140–1144.
2. E. Conover. «Quantum satellite shatters entanglement record.» *Science News*, 15. juni 2017.
3. A. Einstein, B. Podolsky og N. Rosen. «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?» *Phys. Rev.* 47 (1935) s. 777–780.
4. For utfyllende beskrivelse henvises det f.eks. til «Local realism» på Wikipedia.
5. A.I. Vistnes. «Polarisering av lys». *Fra Fysikkens Verden* 1 (2013), s. 4–10.
A.I. Vistnes. *Svinginger og bølgers fysikk*. (2016) Kapittel 10. Internettadresse: <http://folk.uio.no/arntvi/SBFbok.html>
6. L. Lydersen. «Practical security of quantum cryptography.» Ph.d.-avhandling NTNU 2011. (<http://hdl.handle.net/11250/2370269>)
L. Lydersen og J. Skaar. «Kvantekryptografi». *Fra Fysikkens Verden* 1 (2013), s. 10.
7. A.I. Vistnes. *Svinginger og bølgers fysikk*. (2016) Kapittel 13. Internettadresse: <http://folk.uio.no/arntvi/SBFbok.html>
8. A. Smart. «Quantum entanglement reaches new heights». *Physics today* 8 (2017), s. 14–17.

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

Forskeren Kristian Birkeland (1867–1917)

I år er det 150 siden vårt lands mest kjente fysiker og industriforsker ble født og 100 år siden han døde. Birkeland gjorde banebrytende teoretisk og eksperimentell forskning innenfor elektromagnetisme, katodestråler og utforskning av nordlyset. Han viste også hvordan man produserer nitrogenoksid fra luft, noe som dannet grunnlag for Norsk Hydro.

Alv Egeland Fysisk institutt, UiO

Slekten til Kristian Birkeland stammer fra Bakke i Vest-Agder. Kristian – hans døpenavn var Olaf Christian Bernhard – er født 13. desember 1867, men etter 1890 kalte han seg bare Kristian. Han tok eksamen artium i 1885 med beste karakter i matematikk og naturvitenskap.

I det kjente biografiske leksikon *Chambers* fra 1990 er verdensberømte forskere og teknologer kort omtalt. Bare en håndfull norske vitenskapsmenn kom med på listen. At man blant dem finner Kristian Birkeland forbauser ingen som kjenner hans imponerende bidrag innen naturvitenskap og teknologi. Hva var det Birkeland gjorde som var så genialt at han kom på samme liste som Newton, Einstein?

Naturvitenskapsmannen Birkeland

Mange har forsøkt å evaluere den intellektuelle strukturen til verdens kjente forskere og konkludert med at det finnes ulike typer genier. Birkeland hører ikke til de konsekvente, målbevisste forskerne som følger en nøye, oppsatt metode og ikke lar seg forstyrre av noe ved gjennomføringen av livsverket. Han var en annen type forsker – en multikunstner, som produserte i forskningsfronten innen ulike fagfelt. Det kom utrolig mange geniale teorier og nye resultater fra ham, men også avhandlinger og synspunkter som hurtig gikk i glemmeboka. I tillegg var han en miljøbygger. Å følge hans aktivitet gjennom et kort og hektisk liv på 49,5 år fører til flere store overraskelser.

Som for usedvanlig begavede mennesker, kom forskertrangen tidlig til syne. I ung alder skaffet Kristian seg en kraftig magnet som han lekte og eksperimenterte med. Senere i livet skulle magnetfelt på jorden og andre kosmiske objekter bli noen av hans viktigste bidrag innen forskning. I siste året på gymnaset da han var 18 år gammel, skrev han en matematisk avhandling med tittelen «Une Méthode Enuméractive de la Géometrie» som senere ble trykt



Figur 1. Kunstneren Aasta Neergaards maleri av Kristian Birkeland fra 1906. Bakgrunnen er knyttet både til grunnforskningen og etableringen av Norsk Hydro. *Bilde: Norsk Hydro*

i samarbeid med Th. Skolem i tidsskriftet til det franske vitenskapsakademiet. Kort etter universitetseksamen i 1890, som den yngste og med beste karakter – *laudabilis* – studerte han 2,5 år i Paris, Genève, Bonn og Leipzig og samarbeidet med flere verdenskjente forskere. I perioden 1890–95 skrev han åtte teoretiske avhandlinger innen feltet elektromagnetisme, hvor han presenterte den første generelle løsningen av Maxwells ligninger. Avhandlingene fikk stor internasjonal oppmerksomhet.

I skarp konkurranse med den verdenskjente meteorologen Vilhelm Bjerknes, ble Birkeland i 1898 kallet av kong Oscar II til professor ved Det Kongelige Frederiks Universitet i Christiania i en alder av 31 år. Universitetet fikk en professor som andre land prøvde å lokke til seg. To år tidligere hadde han blitt medlem i Det Norske Videnskaps-Akademi.

Etter 1895 konsentrerte Birkeland seg om den eksperimentelle fysikken og oppdaget hvordan katodestrålene kunne styres av magnetiske felt. Han oppdaget den magnetiske linsen. Disse fundamentale undersøkelsene av katodestråler burde ha ført til at Birkeland, sammen med den britiske forskeren Joseph J. Thomson (1856–1940), hadde fått æren for oppdagelsen av fysikkens viktigste partikkel, elektronet, men hans oppdagelser er bare nevnt i nobelforelesningen til Thomson. ▶

Birkelands første store avhandling (173 sider på fransk) omhandler forekomsten og variasjonene av solflekker. Hvorfor ble nordlys observert to døgn etter høy aktivitet på solen? I 1898 skrev han artikkelen «Et Bud fra Solen». Dette budet fra solen ble senere i livet Birkelands mantra. Høsten 1895 og våren 1896 fremsatte og begrunnet han sin nye nordlysteori i to avhandlinger, på fransk. Det nye og geniale var at han som første forsker i verden ikke bare hadde en hypotese, men han simulerte nordlys i laboratoriet (Figur 2 og 4).

Å knytte solen til nordlyset var kontroversielt fordi presidenten ved Royal Society i London, Lord Kelvin, ved verdens meste berømte akademi, hadde hevdet at det var helt utenkelig at solen var kilden til denne glorie av levende lys høyt oppe i atmosfæren. Verdensrommet var tomt. Med sine elegante og fundamentale nye laboratoriesimuleringer kalt terrella-eksperimentene, overbeviste Birkeland verdens forskere om selve nordlysprosessen. Hans etterligning av kosmiske prosesser i laboratoriet fikk stor oppmerksomhet. Derfor er disse eksperimentene i dag klassiske (Figur 4).

På tampen av det 19. århundre var det noe helt nytt at man underbygde hypotesene med laboratoriesimuleringer. Senere simulerte Birkeland mange fenomener som Saturns ringer, strukturen på komethalene, partikkelbevegelser i verdensrommet og solens magnetfelt. Birkelands kosmiske teorier og simuleringer i laboratoriet var for samtiden for fantasifulle, mens de i virkeligheten var så avanserte som teknikken og tidens viten tillot. De kunne ikke på denne tiden kontrolleres eller verifiseres på andre måter.

For Birkeland var katodestrålene store skurer av elektroner fra kosmos. I dag kalles de

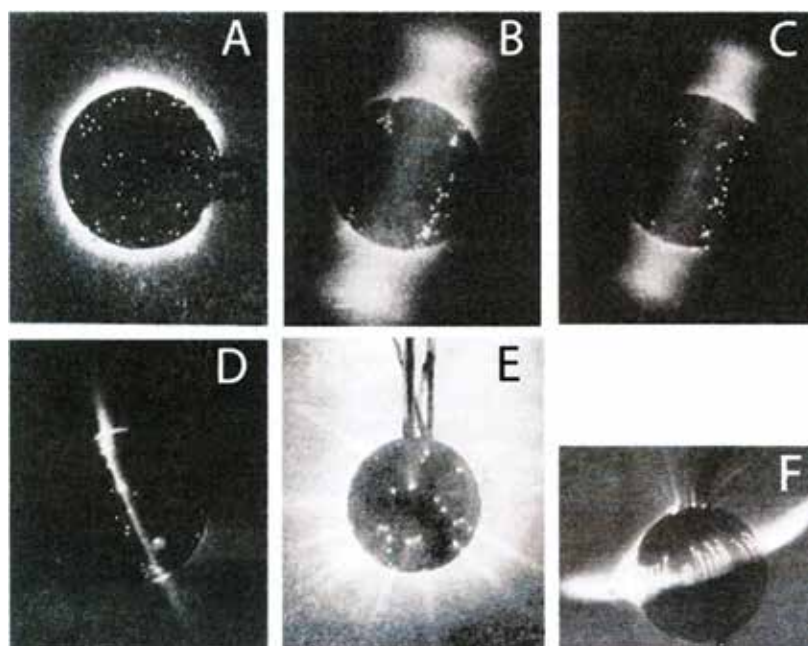


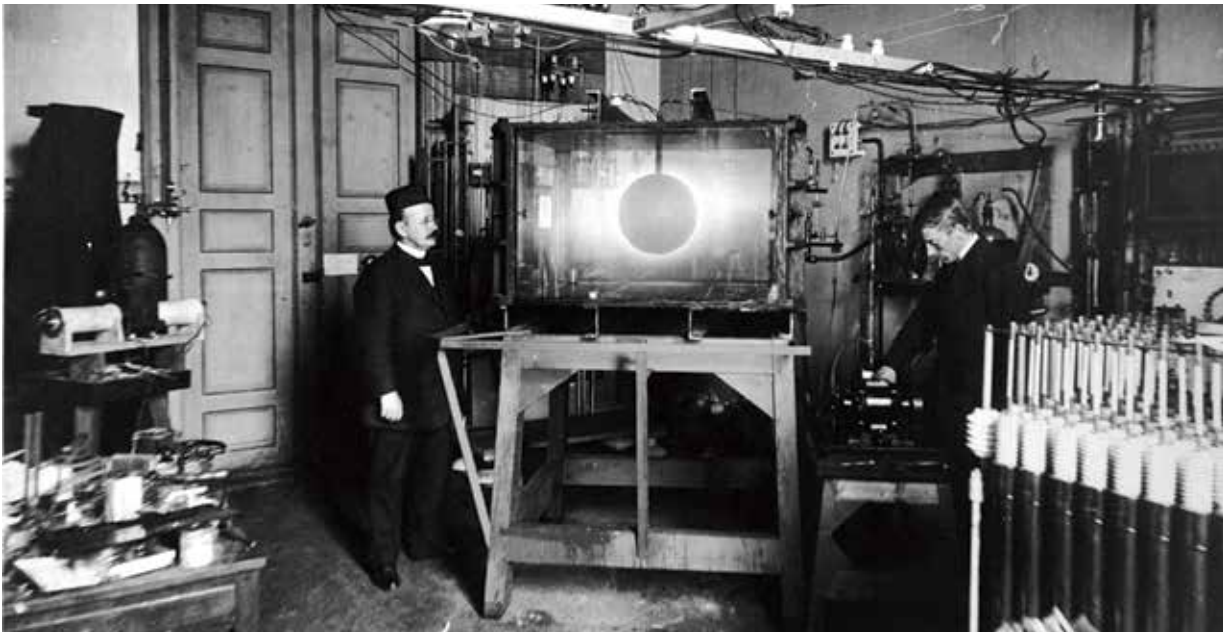
Figur 2. Nordlyskrukken er starten på generering av kunstignordlys i laboratoriet. Illustrasjonen er brukt i flere av hans tidlige avhandlinger.

solvinden, som fører til intense elektriske strømmer. De generer magnetiske felt og varmer opp atmosfæren slik at vi kan se glorien av lys høyt i atmosfæren. Skurene av solare elektroner – de viktigste ingrediensene i Birkelands nordlysteori – er hovedkilden til både nordlyset og variasjonene i jordens magnetfelt. Takket være Birkelands arbeider kunne man for første gang forklare sammenhengen mellom forekomsten av nordlys og variasjoner i jordens magnetfelt, et problem som hadde opptatt forskerne lenge.

Et annet viktig problem som opptok Birkeland var å underbygge teorien og simuleringene med direkte målinger i feltet. Derfor gjennomførte han to store nordlysekspedisjoner. I 1899 ble det første permanente nordlysobservatoriet i verden oppført på Halddetoppen i Alta. I den neste ekspedisjonen fikk han bygd nordlysstasjoner både i Novaja

Figur 3. Fotografiene viser *kunstige solflekker* på Birkelands terrellasol. Et stort antall simuleringer, med forskjellige modeller av solen, ble utført. Figur A og E viser at solflekkene er jevnt fordelt over terrellasolen, mens figurene B, C, og D viser at flekkenes beliggenhet avhenger av styrken på magnetfeltet. Figur D er tatt med et intenst magnetfelt som viser at flekkene da ligger i eller nær ekvatorplanet. Figur F viser lange lysstråler fra solflekkene som bøyes av magnetfeltet.

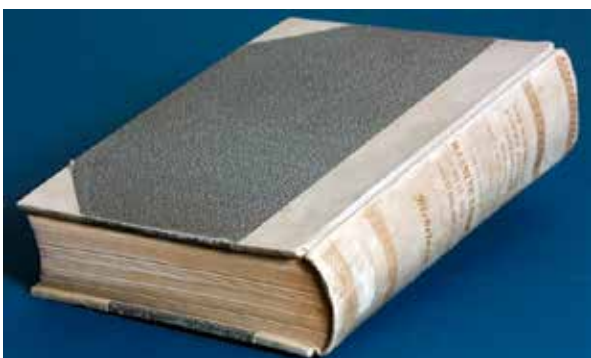




Semlja i Russland, Dyrafjord på Island, Axeløen på Svalbard i tillegg til i det på Halddetoppen, og ett nede ved fjorden i Kåfjord.

Birkelands teorier, avanserte simuleringer og nøyaktige feltobservasjoner er summert i hans monumentale verk (Figur 5). Her grublet han over universets dunkleste hemmeligheter og gang på gang finner han nye og overraskende løsninger. Birkelands hypoteser om hvordan partikkelstrålingen påvirker fysikken i kosmos var for fantasifull for datidens forskere og ble nesten fullstendig neglisjert, men den moderne romforskningen fra slutten av 1950-årene førte til at Birkelands forskning fikk en velfortjent renessanse.

Det har skjedd en gledelig nyvurdering i de senere årene. Verdensomspennende satellittobservasjoner har bekreftet mange av hans teorier. Elektriske strømmer med intensitet opptil en millioner ampere – sentrale i hans originale nordlysteori – slynger seg rundt jorden. På initiativ fra den verdensomspennende organisasjonen International Council of Science (ICSU) ble navnet



Figur 5. Birkelands hovedverk ble i 1913 utgitt i skinnbind med gullbokstaver. Det er på 850 sider og veier 5,1 kg. Både teknisk og vitenskapelig har det høy kvalitet. Bilde: Alv Egeland

Figur 4. Kristian Birkeland i terrellaboratoriet hvor han er avbildet med sin karakteristiske hatt, en Fez, i 1912 med sin assistent Karl Devik. Man får et inntrykk av størrelsen på vakuumkammeret ved å sammenligne det med Birkeland som er 165 cm høy. Bilde: ukjent

Birkeland current («Birkelandstrømmer» på norsk) som hovedkilden til nordlyset, innført i 1968, 60 år etter det først ble foreslått. Birkelandstrømmene kartlegges nå regelmessig med satellitter.

Birkeland publiserte 88 vitenskapelige avhandlinger – de fleste i tidsskriftet *Comptes Rendus* – og skrev tre bøker hvor to er på fransk, mens hovedverket er på engelsk.

Industriforskeren og teknologen Birkeland

Teknologen Birkeland hadde 60 patenter som spenner fra den elektromagnetiske kanonen til behandling av organisk avfall, tørking av fisk og fettherding, som tydelig viser at han hadde en konstruktiv fantasi. Oppfinnelsen som fikk størst betydning, var – om enn ufrivillig – hans første patent, den elektromagnetiske kanon.

I tidsrommet 1903–06 brukte han praktisk talt hele sin tid på anvendt forskning. Ikke med mål om å bli en rik oppfinner, men for å finansiere kostbare forskningsprosjekter og få midler til å bygge et moderne laboratorium for sine eksperimenter. Birkeland var den fødte eksperimentator. Det nye laboratoriet ble praktisk talt hans arbeidsrom.

Det var Birkelands kanon – som fortsatt burde være et instruktivt tema på videregående skoler – som ga opphavet til Birkeland-Eydes lysbueovn og dermed den viktige kunstgjødselproduksjonen ved Norsk Hydro. Produksjonen er basert på Birkelands oppdagelse av den elektromagnetiske

flammeskiven. Det har gått historien forbi at Birkeland ved den brutale kortslutningen samtidig kjente lukten av NO_x , som var viktig for produksjon av salpetersyre og Norgessalpeter; gnisten tente bålet.

Den første Norgessalpeteren ble produsert i kontoret på universitetet. Samarbeidet mellom bygningsingeniør Sam Eyde, professor Birkeland og bankdirektør Marcus Wallenberg førte til produksjon av 500 kg salpetersyre per kilowattår. Å produsere ett tonn gjødsel kostet selskapet de første årene omkring 10 kr, mens prisen for Chilealpeter den gangen var mer enn det tidobbelte. Det tok bare 2,5 år fra det første møte mellom Birkeland og Eyde til produksjonen startet. Dette er mindre enn det i dag tar å behandle en stor byggesøknad.

Etableringen av Hydro var et viktig bidrag til at Norge på relativ kort tid ble forandret fra et fattig bondesamfunn. Det idémessige fundamentet for produksjonen som ble benyttet fra starten, er ikke blitt vesentlig forandret gjennom år, men historien om hvem som gjorde hva bør snart oppdateres.

Birkeland hadde brede kunnskaper og mange ideer, og han var i forskningsfronten på ulike felt. Birkeland gjorde mange forsøk med trådløs telegrafi og telefoni. Han fikk endog universitetets tillatelse til å montere en stor antenne ved inngangen til Domus Medica ved universitetet for pionerforsøkene med radiobølger. Et nytt selskap med to ingeniører ble dannet. De var nær suksess, men hadde problemer med konstruksjonen av en stabil radiosender.

Våren 1906 søkte Birkeland Marcus og Knut Wallenberg om mye penger for å finne en metode til å utnytte atomenergi. Han skriver: «Det hidtil største industrielle problem som har stillet seg for meg. ... Målet er å få mer energi av 1 kg jern enn man for tiden faar af 100 000 kg kull.» Søknaden var basert på en oppdagelse han nyss hadde gjort. Wallenbergene var meget interessert, men ville vente med endelig svar til de hadde fått litt igjen fra hva de hadde satset på Norsk Hydro.

Omkring 1910 ble bruk av raketter for undersøkelser i verdensrommet diskutert i utenlandske aviser, men problemet var hvordan dette skulle gjøres. «Det rette vil være å bruke katodestråler», sa Birkeland og gjorde et vellykket forsøk i terrella-laboratoriet for 105 år siden.

Forskningsadiministratoren og privatpersonen Birkeland

Med sin fantasi og intuitive skaperevne bygde Birkeland opp et miljø innen fysikk som vakte oppsikt utenfor landet. Gruppen av fysikere og matematikere som han inspirerte og stimulerte, har satt store spor etter seg. Fire av dem ble senere professorer ved Universitetet i Oslo.

Hans driftbudsjett på universitetet var rundt 1000 kr per år. Olaf Devik fortalte at han i en rekke år brukte det mangedobbelt beløp på forskningsprosjektene, enkelte år ti ganger så mye, av egen pung. Samtidig bygget han opp et toppmoderne fysikklaboratorium.

Birkeland var medlem i The Royal Society i London og Doktor Ingenieur Honoris Causa ved Universitetet i Dresden. At han fikk lov å arrangere en salgsdemonstrasjon av sin elektromagnetiske kanon i universitetets festsal, viser at han måtte ha stor innflytelse, selv om han aldri søkte administrative stillinger.

Birkelands enorme arbeidsbelastning førte til at aktiviteten avtok med årene. I sine siste leveår var han mye syk, med betydelige nerveproblemer. Han døde 15. juni 1917 av hjertesvikt.

Oppsummering.

Birkeland har etterlatt få opplysninger om seg selv og sitt privatliv, men takket være Birkelands nære medarbeidere har vi fått mye kunnskaper om ham. I brev til sine venner står at han «har begynt å skrive sin egen odysse». Dette og andre manuskripter forsvant da det svenske dampskipet Peking, som fraktet hans eiendeler fra Tokyo, havarerte høsten 1917.

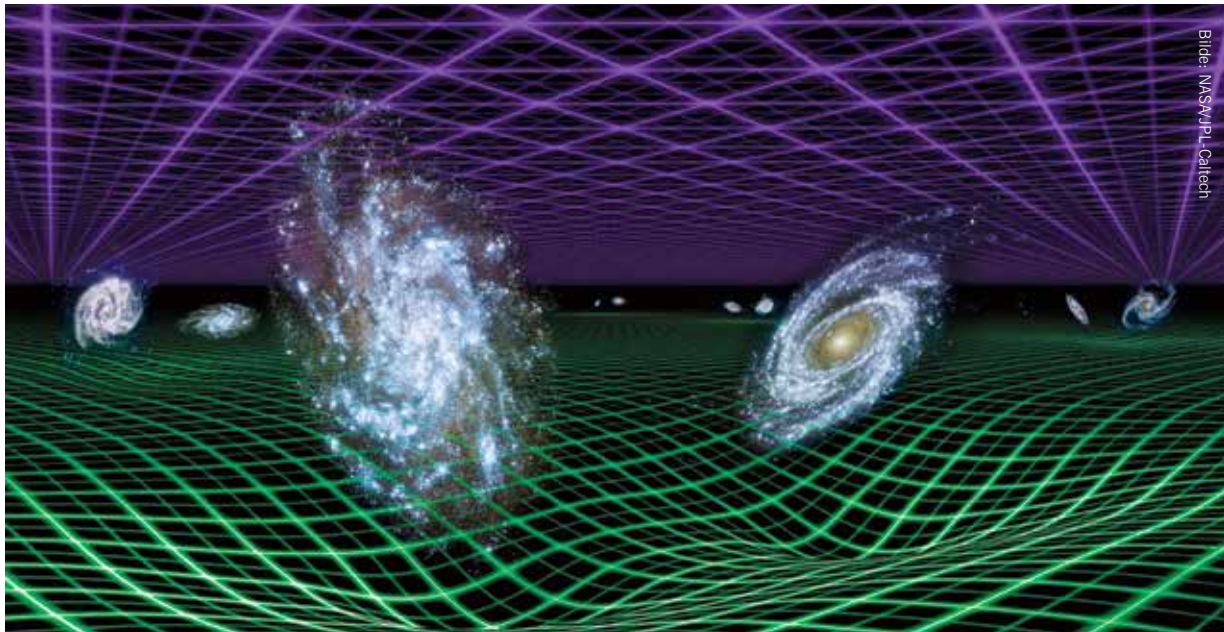
Selv om bare brokker av Birkelands vitenskapelige resultater er omtalt internasjonalt, ruver hans innsats. Han overrasket verdens vitenskapsmenn med sine konklusjoner om at «elektromagnetiske krefter dominerer i hele universet». Universitetets rektor, Sam Sæland, uttrykte seg slik: Birkeland «trængte paa flere omraader dypere ind i elektriske fænomener end noen før ham, og han forstod at belyse sine epokegjørende teorier med de mest sindrige og overbeviende eksperimenter. Han var en geni og genier kan ikke erstattes.»

Norges Bank valgte Birkeland som den første fysikeren på en norsk pengeseddel: 200-kroner-seddelen som kom i 1994. Selskapet for Oslo Bys Vel har nå satt opp et skilt på huset i Inkognitogaten 16 hvor han bodde fra 1906 til 1913. Birkeland var en av de første som fikk plass på haleroret til flyselskapet Norwegian.

En modell av Birkelands berømte elektromagnetiske kanon og hans CV burde få en fast plass i Gamle Festsal, hvor historien begynte. ■

Referanser

1. A. Egeland and W. J. Burke. *Kristian Birkeland; The First Space Scientist*. Springer (2005).
2. A. Egeland. *Kristian Birkeland; Mennesket og Forskeren*. Norges Banks Seddeltrykkeri (1994).
3. Egeland and E. Leer. *Professor Kr. Birkeland: His Life and Work*. IEEE Transactions on plasma science, bind. PS-14, No. 6 (1986).



Bilde: NASA/JPL-Caltech

Hundre år med den kosmologiske konstanten

Sammenhengen mellom den kosmologiske konstanten [1] og vakuumergien har vært et problem å forklare fordi den kvantemekaniske beregningen av den har gitt alt for stor verdi. Nylig ble det publisert en mulig løsning på dette problemet, hundre år etter at den kosmologiske konstanten først ble foreslått.

Øyvind G. Grøn Høgskolen i Oslo og Akershus

Den 15. februar 1917 presenterte Albert Einstein en epokegjørende artikkel [2] bare noen måneder etter at han kom med sin store artikkel der han presenterte den generelle relativitetsteorien. I artikkelen etablerte Einstein et nytt forskningsområde, *relativistisk kosmologi*. La oss bli med på litt av Einsteins mentale reise i denne artikkelen.

Einsteins introduksjon av den kosmologiske konstanten

Einstein startet med å diskutere Newtons gravitasjonsteori (Boks 1). Han betraktet et univers fylt av materie med konstant tetthet i stor skala og oppdaget raskt at dersom det materiefylte universet startet med å være statisk, ville det kollapse under påvirkning av materiens tiltrekkende gravitasjon.

For å bøte på dette forandret Einstein gravitasjonsteorien og innførte en kosmologisk konstant, Λ (Boks 2). Den representerte for Einstein en slags frastøtende kraft som gjorde det mulig å holde likevekt med materiens tiltrekkende gravitasjon. Men det var ikke en ordinær kraft som oppfyller Newtons 3. lov om kraft og motkraft. Einstein gir

ikke noen klar tolkning av betydningen til Λ . Han nøyer seg med å studere konsekvensene av den. Men fra måten han introduserte den på i den generelle relativitetsteoriens feltlikninger, følger at det er naturlig å tolke Λ slik at den representerer en tendens til at rommet vil ekspandere dersom ikke ekspansjonen hindres av tiltrekkende gravitasjon forårsaket av materie og stråling i rommet.

Einstein rundet av sin kosmologiartikkel med å skrive: « Λ er nødvendig kun for å gjøre en kvasistatisk fordeling av den kosmiske materien mulig, slik det kreves for å passe med det faktum at de observerte hastighetene til stjernene er små». Denne modellen kalles Einsteins statiske universmodell.

Den nederlandske astronomen Willem De Sitter lot seg inspirere av Einsteins arbeid og presenterte allerede samme år en relativistisk universmodell med tomt rom og en kosmologisk konstant. Denne kalles De Sitters universmodell. Den tilsvarende Newtonske modellen er beskrevet i Boks 2. I disse modellene vil frie testpartikler (som tester dynamikken i det tomme rommet) akselerere vekk fra hverandre. Avstanden mellom partiklene vokser eksponentielt med tiden.

De første ekspanderende universmodellene

I årene fra omkring 1915 ble de første målingene av frekvensforskyvningen av spektrallinjer i lyset fra stjerner og noe som ble kalt «stjernetåker», utført. Denne forskyvningen ble tolket som en Dopplereffekt. Rødforskyvning betyr da at stjernen beveger seg vekk fra oss og blåforskyvning at den beveger seg mot oss. I begynnelsen av 1920-årene ble det

Boks 1. Newtons gravitasjonsteori

Teorien består av en lov for gravitasjonskraften mellom legemer med masse og en lov som beskriver hvordan legemer beveger seg. Anta et kuleformet legeme, for eksempel sola, med masse m_1 befinner seg i sentrum av et kulekoordinatsystem, og en partikkel med masse m_2 befinner seg i avstand r fra sentrum. Da sier Newtons gravitasjonslov at det virker en tiltrekkende gravitasjonskraft

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (1)$$

mellom dem, der G er Newtons gravitasjonskonstant. Videre sier Newtons 2. lov at kraft er lik masse ganger akselerasjon, og Newtons 1. lov sier at hvis summen av kreftene på et legeme er null, eller hvis det ikke virker noen krefter på legemet, så vil legemet forbli i ro dersom det opprinnelig var i ro. *Et treghetssystem defineres som et referansesystem der Newtons 1. lov gjelder.*

Den potensielle energien til et legeme er lik arbeidet som skal til for å føre legemet fra et valgt nullnivå der det har null potensiell energi, til den posisjonen det har. *Potensial* er potensiell energi per masseenhet. Bevegelseslikningen til et legeme påvirkes ikke av hvor nullnivået velges, og derfor kan dets posisjon velges fritt. I situasjonen ovenfor er det vanlig å velge nullnivå uendelig langt fra legemet i sentrum. Da er potensialet i avstand fra r sentrum

$$\varphi = -\frac{Gm_1}{r}. \quad (2)$$

Når man skal sammenlikne den Newtonske grensen av den generelle relativitetsteorien med Newtons gravitasjonsteori, er det det gunstig å skrive kraftloven på

lokal form som en differensiallikning. Newtons gravitasjonslov på lokal form er

$$\nabla^2\varphi = 4\pi G\rho, \quad (3)$$

der ρ er massetettheten i punktet med potensial φ og ∇ -operatoren i kulekoordinater i et kulesymmetrisk gravitasjonsfelt kan finnes for eksempel i Rottmanns matematiske formelsamling,

$$\nabla\varphi = \frac{d\varphi}{dr} \mathbf{e}_r, \quad \nabla^2\varphi = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right), \quad (4)$$

der \mathbf{e}_r er en enhetsvektor i radiell retning. Likningen (3) kalles *Poissons likning*. Dersom det ikke er noen masse der potensialet beregnes, er $\rho = 0$, og gravitasjonslikningen reduseres til

$$\nabla^2\varphi = 0, \quad (5)$$

som er *Laplace-likningen*. Potensialet (2) er en løsning av Laplace-likningen utenfor et kuleformet legeme med masse m_1 i avstanden r fra sentrum av det. Akselerasjonen til en testpartikkel som bare er påvirket av gravitasjon, dvs. *tyngdeakselerasjonen*, er

$$\mathbf{g} = -\nabla\varphi. \quad (6)$$

Denne likningen sier at tyngdeakselerasjonen er minus gradienten til gravitasjonspotensialet.

Newtons gravitasjonsteori kan nå sammenfattes på følgende måte. Masse bestemmer potensialet ifølge Poissons likning, og potensialet bestemmer tyngdeakselerasjonen, dvs. hvordan partikler påvirket av gravitasjon beveger seg.

forstått at «stjernetåkene» var enorme ansamlinger av stjerner, og disse ble kalt galakser. Det ble også klart at Melkeveien, det lysende båndet på himmelen, er den nærmeste delen av vår egen galakse sett fra innsiden av galaksen. Videre viste målingene at strålingen fra de fleste stjernene i fremmede galakser var rødforskjøvet.

Det ble også gjort avstandsmålinger til stjernene. Det var en vanskelig oppgave, og måleresultatene viste seg å ha mye større systematiske feil enn astronomene på den tiden var klar over.

Observasjonene ble i første omgang tolket ut fra De Sitters universmodell. Hvis stjernene ble oppfattet som testpartikler i fritt fall, ville det at de akselererte vekk fra hverandre gi dem en hastighet vekk fra solsystemet, noe som forklarte rødforskyvningen.

De første ekspanderende universmodellene med materie ble konstruert av russeren Alexan-

der Friedmann i 1922 og 1924 som løsninger av Einsteins feltlikninger, både med og uten kosmologisk konstant. Disse løsningene danner utgangspunkt for standardmodellen av universet. Friedmann hadde ikke gode nok observasjonsdata til disposisjon til å kunne teste modellene mot astronomiske observasjoner.

Lemaîtres epokegjørende kosmologiartikler

Georges Lemaître var en belgisk pater som også hadde oppdaterte kunnskaper om datidens astronomiske observasjonsresultater, han var en glimrende matematiker og hadde gode kunnskaper om Einsteins generelle relativitetsteori.

I årene fra 1927 til 1934 presenterte han en serie kosmologiartikler som danner grunnlaget for den moderne relativistiske kosmologien [3].

Boks 2. Newtonsk universmodell med kosmologisk konstant

Einstein innledet sin kosmologiartikkel [2] med en diskusjon av Newtonsk gravitasjonsteori der han endte opp med å erstatte likning (3) med

$$\nabla^2\varphi - \Lambda\varphi = 4\pi G\rho, \quad (7)$$

der $\Lambda > 0$ er den kosmologiske konstanten. Dette er imidlertid ikke korrekt grense av generell relativitetsteori med den kosmologiske konstanten. Den korrekte likningen er

$$\nabla^2\varphi + \Lambda = 4\pi G\rho, \quad (8)$$

Vi kan undersøke den fysiske betydningen av Λ ved å se på et rom der $\rho = 0$ over alt unntatt i sentrum av koordinatsystemet der det er et kuleformet legeme med masse m_1 . Da er løsningen av likning (8)

$$\varphi = -\frac{Gm_1}{r} - \frac{\Lambda}{6}r^2. \quad (9)$$

Tyngdeakselerasjonen er

$$\mathbf{g} = -\frac{Gm_1}{r^2}\mathbf{e}_r + \frac{\Lambda}{3}r\mathbf{e}_r. \quad (10)$$

I liten avstand fra partikkelen i sentrum dominerer den tiltrekkende gravitasjonen, og en fri testpartikkel faller innover. Men i stor avstand faller en partikkel utover. Det betyr at den kosmologiske konstanten innebærer en tendens til at frie partikler akselererer fra hverandre. Dette ble opprinnelig oppfattet som at et tomt rom vil ha en tendens til å ekspandere. Likning (10) viser at i avstanden

$$r_0 = \left(\frac{3Gm_1}{\Lambda}\right)^{1/3} \quad (11)$$

fra sentrum av det sentrale legemet, er tyngdeakselerasjonen null. Her er det likevekt mellom det sentrale legemets tiltrekkende gravitasjon og frastøtningen som den kosmologiske konstanten representerer. For $r \ll r_0$ dominerer gravitasjonsvirkningen av det sentrale legemet, og for $r \gg r_0$ frastøtningen knyttet til den kosmologiske konstanten.

Den første var skrevet på fransk og ble publisert i 1927 i et ukjent og lite lest belgisk tidsskrift. Oversatt til norsk er artikkelens overskrift: «Et homogent univers med konstant masse og økende radius som forklaring på de radielle hastighetene til tåker utenfor vår galakse». Merk at det Lemaître her kaller «tåker» i dag er det vi kaller galakser.

I 1998 ble det oppdaget at universets ekspansjon øker farten. Fra dette kunne man bestemme verdien av den kosmologiske konstanten, $\Lambda = 1,1 \cdot 10^{-35} \text{ s}^{-2}$. Ved å sette inn i likning (11) at Newtons gravitasjonskonstant er $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ og solas masse $m_1 = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, fås $r_0 = 3,4 \cdot 10^{18} \text{ m}$. Et lysår er $9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}$. Dermed fås at $r_0 = 360$ lysår. Dette forklarer hvorfor vi kan neglisjere den kosmologiske konstanten når vi beregner gravitasjonseffekter i solsystemet. Det kommer av at avstandene i solsystemet er mye mindre enn r_0 .

Akselerasjon er den andre deriverte av posisjonen med hensyn på tiden, $g = \ddot{r}$. I stor avstand fra legemet i sentrum kan det første leddet på høyre side av (10) neglisjeres. Da blir bevegelseslikningen

$$\ddot{r} - \frac{\Lambda}{3}r = 0. \quad (12)$$

En løsning av denne likningen er

$$r(t) = r(0)e^{Ht}, \quad H = \sqrt{\Lambda/3}. \quad (13)$$

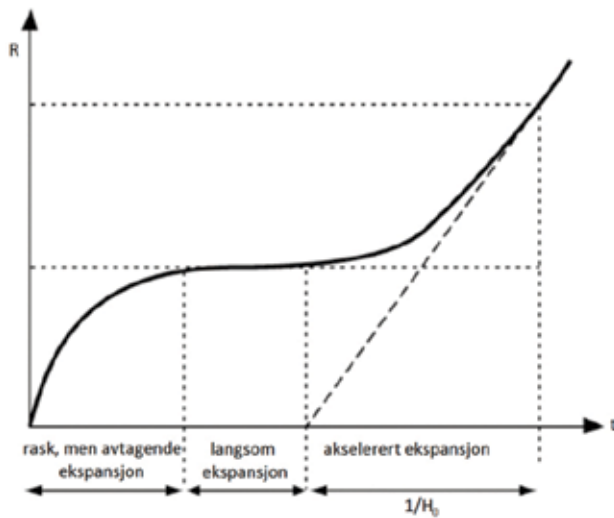
Konstanten H kalles Hubbleparameteren. Likning (13) betyr at ifølge den modifiserte gravitasjonsteorien med en kosmologisk konstant er «grunntilstanden» til et tomt rom ikke å være statisk, men å ekspandere eksponentielt som i «steady state-universet». Betegnelsen «steady state» kommer av at et slikt univers ser likt ut til enhver tid i den forstand at Hubbleparameteren er uavhengig av tiden.

Hvis universet er fylt av materie med konstant massetetthet, ρ_0 , åpnes muligheten for at materien kan være i ro under likevekt mellom materiens tiltrekkende gravitasjon og rommets tendens til å ekspandere. I dette tilfellet er det konstante potensialet

$$\varphi = \frac{4\pi G\rho_0}{\Lambda} \quad (14)$$

en løsning av likning (8), og tyngdeakselerasjonen er null. Dette representerer et statisk univers. Noe Einstein ikke oppdaget, var at den statiske likevekten er ustabil. Det ble oppdaget av den britiske astrofysikeren Arthur Eddington i 1930.

I Lemaîtres overskrift presenteres en tolkning av rødforskyvningen av lyset fra fjerne galakser som er blitt standardtolkningen i moderne kosmologi – nemlig at den skyldes universets ekspansjon og ikke at galaksene beveger seg gjennom et statisk rom. Det er selve rommet som ekspanderer. Dette var så radikalt at Hubble som senere fikk æren for å ha oppdaget universets ekspansjon, aldri fikk



Figur 1. Hvordan de kosmiske avstandene endres som funksjon av tiden i Lemaître's universmodell. Størrelsen $1/H_0$ der H_0 er den nåværende verdien av Hubbleparameteren, er den såkalte Hubblealderen til Universet, dvs. den alderen det ville hatt dersom det hadde ekspandert med den nåværende farten hele tiden. Universet har tre faser: først en periode med rask, men avtagende ekspansjon, så en periode med langsom ekspansjon, fulgt av en tredje periode med akselerert ekspansjon.

seg til å akseptere den relativistiske forestillingen om et ekspanderende rom. På grunn av universets ekspansjon beveger galaksene seg vekk fra oss med en hastighet proporsjonal med avstanden. Denne sammenhengen ble senere kalt Hubbles lov, men var altså først utledet av Lemaître i 1927.

Lemaître estimerte avstanden l til tåkene med utgangspunkt i Hubbles antagelse om at de alle sendte ut stråling med samme intensitet. Avstandene kunne dermed beregnes ut fra hvor sterkt de lyste sett fra Jorda. Lemaître korrigerte så for Jordas bevegelse rundt Sola. På denne måten fant han (med dagens skrivemåte) $v = H_0 l$, der Hubbleparameteren $H_0 = 192 \text{ km/s per million lysår}$. Med konstant ekspansjonsfart ville denne verdien av H_0 innebære at Universet bare er 1,7 milliarder år gammelt, langt yngre enn de eldste stjernene. Dette ble kalt universets aldersproblem.

I november 1931 publiserte Lemaître en artikkel med tittelen «L'expansion de l'espace» der han presenterte en ny universmodell som løste universets aldersproblem og er forbausende lik den moderne standardmodellen for universet. Lemaître introduserte et såkalt sfærisk univers som har endelig volum, men ingen grenser, og skrev: «Vi kan forestille oss at rommet oppstår som et første atom og at rommets begynnelse også markerer tidens begynnelse. Rommets radius var opprinnelig lik null. Ekspansjonen fant sted i tre faser (Figur 1). Universet startet med en eksplosjon av selve rommet og gikk inn i en første fase med rask ekspansjon som ble bremsset ned av materiens tiltrekkende gravitasjon. Det gikk så inn i fase to med svært langsom ekspansjon der det nesten var likevekt mellom tiltrekkende gravitasjon og frastøtning på grunn av den kosmologiske konstanten. Denne «nølede» fasen hadde en varighet som kan bestemmes slik at universets alder stemmer med observasjonsdata. Deretter gikk universet inn i en tredje fase dominert av den kosmologiske konstanten med akselerert ekspansjon. Vi befinner oss uten tvil i den tredje perioden i dag.» Lemaître forutsa ikke bare at universet ekspanderer, men også at ekspan-

sjonen øker farten, noe som ble anerkjent som en observert egenskap ved universet først i 1998, etter at to grupper av astronomer hadde bestemt sammenhengen mellom rødforskyvning og avstand for supernovaer i fjerne galakser. Dette ble belønnet med Nobelprisen i fysikk i 2011.

Variasjonen av ekspansjonshastigheten skyldes en «kamp» mellom materiens tiltrekkende gravitasjon og rommets tendens til å ekspandere i en gravitasjonsteori med en kosmologisk konstant. I 1934 introduserte Lemaître en ny tolkning av den kosmologiske konstanten. Han skrev: «Relativitetsteorien innebærer at når vi identifiserer masse og energi, må vi introdusere en konstant. Alt skjer som om energien i vakuum er forskjellig fra null. For at det ikke skal være mulig å måle bevegelse i forhold til vakuum må vi assosiere et trykk med energitettheten i vakuum. Dette er essensielt betydningen av den kosmologiske konstanten.» Den representerer den konstante tettheten til vakuumergien (i dag omtalt som «universets mørke energi») og forårsaker frastøtende gravitasjon. Ifølge Lemaître representerer ikke den kosmologiske konstanten en modifikasjon av gravitasjonsteorien, men av universets innhold.

Vi kan dermed forklare variasjonen av ekspansjonshastigheten i Lemaître's universmodell på følgende måte: Universet oppstår i en eksplosjon som fører til en enormt stor ekspansjonsfart. Denne bremses ned av materiens tiltrekkende gravitasjon, og det blir en periode med liten ekspansjonsfart. Materiens tetthet avtar under ekspansjonen, men tettheten av vakuumergien holder seg konstant, og dens frastøtende gravitasjon vil etter hvert dominere over materiens tiltrekkende gravitasjon og få ekspansjonshastigheten til å øke. En slik utvikling (se Figur 1) betyr at universet kan være mye eldre enn Hubblealderen, og dette løste universets aldersproblem.

De to kosmologisk konstant-problemene

I 1968 relaterte russeren Yakov B. Zel'dovich den kosmologiske konstanten til kvantemekanisk

vakuumenergi. Han viste at dersom det finnes en energi som er slik at det ikke går an å måle en observatørs hastighet gjennom energien, så vil denne energien ha konstant tetthet selv i et ekspanderende univers, og Λ representerer energiens tetthet. Ifølge den generelle relativitetsteorien er sammenhengen mellom den kosmologiske konstanten og vakuumenergiens tetthet $\Lambda = 8\pi G\rho_v$.

Videre argumenterte Zel'dovich for at ifølge kvantefeltteori vil kvantefluktuasjoner bidra med en energi av denne typen. Andre forskere, inkludert Lemaitre, hadde vært inne på slike tanker tidligere, men Zel'dovich gikk videre og forsøkte å beregne tettheten av denne energien og dermed størrelsen av den kosmologiske konstanten.

Det gikk ikke så bra. Svaret ble uendelig. Beregningen ble da modifisert ved en «cut off» ved Plancktettheten som er $\rho_p = 5,2 \cdot 10^{96} \text{ kg/m}^3$. Den gjennomsnittlige tettheten av den kosmiske materien er $\rho_p = 8,5 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$. Dette betyr at den beregnede tettheten er omtrent 10^{120} ganger for stor. Denne enorme uoverensstemmelsen mellom teori og observasjon omtales som det første kosmologisk konstant-problemet. Zel'dovich modifiserte også beregningen av den kvantemekaniske vakuumenergiens tetthet på andre måter ved å ta i betraktning ulike bidrag til denne energien, der noen kunne ha motsatt fortegn, men den beregnede tettheten ble fortsatt over 10^{50} større enn den gjennomsnittlige energitettheten i universet.

Det andre kosmologisk konstant-problemet er at observasjoner tyder på at den kosmologiske konstanten ikke er lik null, men har en ekstremt liten verdi i forhold til tettheten av vakuumenergi beregnet fra kvantefeltteori. Fysikerne er av den oppfatning at det hadde vært lettere å forklare at den kosmologiske konstanten er lik null enn å forklare at den er svært liten.

Frem til mai 2017 har begge disse kosmologisk konstant-problemene vært uløst.

Løsning av det første kosmologisk konstant-problemet

Den 11. mai 2017 ble det publisert en interessant 34 sider lang artikkel forfattet av Q. Wang, Z. Zhu og W.G. Unruh [4] i det anerkjente tidsskriftet *Physical Review D*. De presenterte her en omfattende beregning av kvantevakuums gravitasjonsvirkning. Resultatet viste seg å være annerledes enn det man har trodd frem til nå. Det er ikke selve den enorme energitettheten til vakuumenergien som gir opphav til den frastøtende gravitasjonen representert ved den kosmologiske konstanten.

Hvis man hadde et mikroskop som gjorde det mulig å se romtiden på Planckskala, dvs. med en romlig oppløsning på 10^{-35} m, og hvor man

kunne se flukturasjoner med varighet på under 10^{-43} s, ville man se et voldsomt fluktuerende «romtidsskum» der rommet lokalt vekslet mellom å kollapse og ekspandere. Også energitettheten knyttet til vakuumenergien fluktuerer vilt. Ifølge relativitetsteorien er den gravitasjonelle masse-tettheten $\rho_{\text{grav}} = \rho + 3p/c^2$, der p er trykket som vanligvis er positivt, men som også kan være negativt (negativt trykk betyr en tilstand av strekk). Dette betyr at også fortegnet til den gravitasjonelle massetettheten fluktuerer. Gravitasjonen varierer på Planckskala mellom å være tiltrekkende og frastøtende. Selv om gravitasjonsvirkningen av kvantefluktuasjonene er store på Planckskala, så midles den nesten ut på makroskopisk skala.

Beregningene viste imidlertid at for hver oscillasjon er ekspansjonen litt større en kontraksjonen. På makroskopisk skala summerer dette seg opp til en ekspansjon. Derfor midles ikke vakuumflukturasjonenes gravitasjon ut til null. Det blir igjen en frastøtning som kan forklare den observerte fart-søkningen av den kosmiske ekspansjonen.

Wang og medarbeideres beregninger viser at når de kvantemekaniske vakuumflukturasjonene analyseres ved å bruke kvantefelt teori i krumme rom beskrevet ved hjelp av den generelle relativitetsteorien, viser det seg at flukturasjonene har egenskaper som gjør at gravitasjonsvirkningene deres nesten utelukker hverandre på makroskopisk skala. Det er en konsekvens av deres beregninger at det må eksistere en kosmologisk konstant på makroskopisk skala med en uhyre liten verdi i forhold til den enorme verdien den ville hatt om den beregnes uten at man tar hensyn til fasene med tiltrekkende gravitasjon og kollaps i kvantefluktuasjonene. Dette er løsningen av det første kosmologisk konstant-problemet.

Men det gjenstår å beregne størrelsen av den kosmologiske konstanten. Det andre kosmologisk konstant-problemet er fortsatt åpent. ■

Referanser

1. S.E. Rugh og H. Zinkernagel. «The quantum vacuum and the cosmological constant problem». *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 33 (2002), s. 603–705.
2. A. Einstein. «Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie». *Sitzungsberichte der Preussischen Akad. Der Wissenschaften Part 1* (1917), s. 142–152. Engelsk oversettelse i *The Principle of Relativity* (1952). Dover Publication.
3. Ø. Grøn. «Hvem oppdaget universets ekspansjon?» *Naturen* 2 (2014), årgang 138, s. 49–65.
4. Q. Wang, Z. Zhu og W. G. Unruh. «How the huge energy of quantum vacuum gravitates to drive the slow accelerating expansion of the universe.» *Phys. Rev. D* 95, 103504 (2017).

Strålevern og helse: Argument for og i mot lineariseringsteorien

For rundt 30 år siden uttalte daværende direktør for Statens strålevern, Johan Baarli, at det radioaktive nedfallet fra Tsjernobyl ulykken ikke utgjorde noen helsefare for nordmenn, men at det tvert imot kunne ha en positiv helseeffekt. Vi vil orientere litt om dette og den helsemessige betydning vi kan ha av små stråledoser gitt med liten dosehastighet.

Thormod Henriksen Fysisk institutt, Universitetet i Oslo
Per Wethe tidligere IFE

De fleste land har et strålevern som skal påse at vi ikke får for mye stråling fra radioaktive kilder eller røntgenstråling. Det er en internasjonal organisasjon ICRP (International Committee on Radiation Protection) som gir retningslinjer for tillatte doser. Denne ledende organisasjon har de siste 60 år hevdet at de biologisk skadelige effekter av stråling kan beskrives ved *en rett linje gjennom origo i et plot for dose og effekt*. Den rette linjen har ingen nedre terskel og kalles ganske enkelt for LNT, som står for *linear no threshold*. Vi har i læreøyemd og i publikasjoner brukt tegningen i Figur 1 for å forklare dette.

LNT er så enkel at alle kan beregne skadene når vi kjenner stråledosen og steilheten av den rette linje. Det er intet i LNT prinsippet som angir noen positive effekter av stråling. Det var derfor en skikkelig brannfakkell da direktøren for Statens Strålevern, Johan Baarli, kom med sin uttalelse. Baarli var så godt orientert for 30 år siden at han kjente til eksperimenter der stråling i små

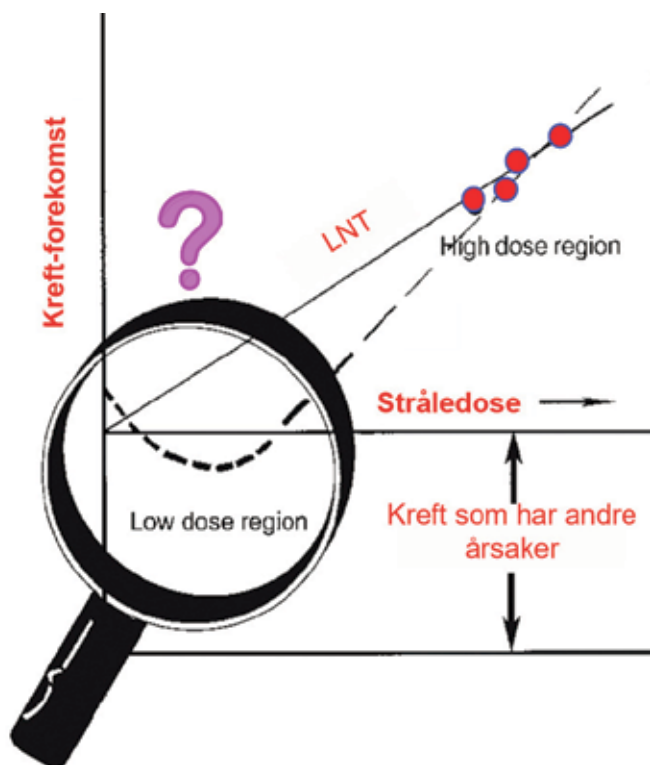
mengder gitt med en liten dosehastighet kunne være positive (det er eksperimentene til Planel og S. Wolf som vi omtaler nedenfor).

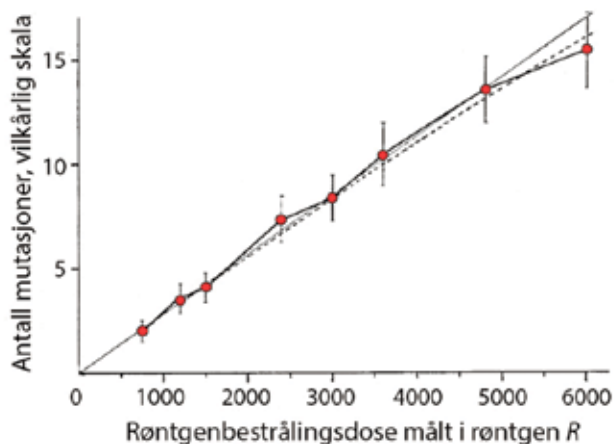
Vi skal kort nevne hvordan LNT kom til verden – og hvilke konsekvenser den har når vi bruker den uten reservasjoner. Idag strømmer det på med strålebiologiske data som viser at LNT har utspilt sin rolle og at strålevern etterhvert må baseres på andre prinsipper.

LNT – En rett linje gjennom origo

Strålevernet skal regulere den planlagte bruken av stråling slik at den ikke fører til akutte skader eller økt risiko for senskader som kreft eller skader på arvestoffet. Strålevernets mål er å sørge for et hensiktsmessig nivå på det aktuelle reguleringsregimet uten å innebære urimelige restriksjoner på de fordelaktige virksomheter som er årsak til strålingen. Rimelighetskravet blir ofte nedtonet eller misforstått når det gjelder den praktiske gjennomføringen av strålevern og det blir en nådeløs jakt på ekstremt lave og ubetydelige stråledoser. Dette kan legitimere bruken av uforholdsmessige store ressurser for å bekjempe eller forebygge situasjoner eller hendelser som ifølge LNT-modellen kan ha en dramatisk effekt, men som i realiteten har liten betydning for vår helse og velferd. Strålevernet har brukt og bruker fortsatt den rette linje gjennom origo i dose-responsdiagrammet – uansett dose og dosehastighet. Det betyr at bakgrunnsstrålingen, som for eksempel radon, kommer inn i dette bildet.

Figur 1. Her er en tegning som på en enkel måte viser problemstillingen. Stråledosen er gitt langs horisontalaksen og den biologiske effekt (gjerne kreftforekomst) er gitt langs vertikalaksen. En kan studere sammenhengen mellom dose og biologisk effekt bare hvis dosene er store. Men det er området under lupen som er interessant. Det gjelder de små doser – som for eksempel bakgrunnsstrålingen vi lever i eller nedfallet fra Tsjernobyl. Biologiske eksperimenter med for eksempel dyr kan bare utføres for store doser utenfor lavdoseområdet så lenge antall dyr er rimelig (vi har genetiske forsøk med ca. 7 millioner mus – «Mega-mouse experiment»). De senere årene har strålebiologene funnet at dosehastigheten er svært viktig for sluttresultatet. Kommer de små dosene over lang tid kan de ofte gi positive resultater. Figuren viser også en kurve (stiplet) som har både en terskel og et område med positiv effekt – noe vi kaller hormese.





Figur 2. Her er resultatet av arbeidet til Timofeev-Resovsky, K.G. Zimmer og Max Delbrück. Dosen (langs horisontalaksen) er gitt i enheten røntgen som dengang ble brukt. Dosene er kjempestore – den minste dosen er ca. 800 R noe som svarer til 7,7 Gy. Doser i Norge i forbindelse med Tsjernobyl var mer enn 1000 ganger mindre enn minste dose her. Høydosedata kan her tilpasses som en rett linje gjennom origo.

Alle med enkle matematiske kunnskaper kan regne med rette linjer. Brukes den innen dosimetri vil en raskt innse at denne linjeformen gir rom for det som kalles *kollektive doser*. En kollektiv dose er den samlede dose til en gruppe mennesker. Dersom alle enkeltdoser følger LNT vil også den samlede dose gjøre det. Det betyr at en kan bruke den rette linje og raskt fortelle konsekvensene av strålingen. Det ble gjort i forbindelse med Tsjernobyl, da noen hevdet at 400 nordmenn måtte dø av kreft på grunn av det radioaktive nedfallet.

Kurveformen (LNT) er ideell for fysiske ikke-biologiske produkter av strålingen som egner seg for dosimetri (en ønsket og nødvendig forutsetning). En stråledose gir fysiske produkter som for eksempel ioner. Antall ioner øker lineært med dosen. Vi kan derfor måle stråledoser ved å bestemme antall ioner som er dannet. Det gjøres daglig innen stråleterapi. Stråledose er et fysisk begrep som måles i enheten gray (Gy). Definisjonen er energi absorbert per masseenhed: 1 joule/kg = 1 gray eller 1 Gy.

Fysiske stråleprodukter som gir grunnlag for dosimetri er brukbare når mengden øker lineært med stråledosen. Her er LNT et «must». Det er gjerne ioner, men kan også være radikaler eller en kjemisk reaksjon som oksidering av Fe^{+2} -ioner til Fe^{+3} (Fricke dosimeter).

Biologi og LNT

Når vi kommer til biologiske effekter blir det vanskeligere fordi den biologiske effekt er avhengig av en rekke prosesser – prosesser som ofte tar lang tid. Vi har prosesser som reparerer stråleskader og prosesser som hindrer skadde celler i å dele seg. Noen ganger fjernes celler med store skader av apoptose (det beskrives også som en selvmords-prosess). Flere av disse prosessene er influert av stråling. Derfor kan ikke biologiske prosesser så enkelt beskrives med en LNT-mekanisme.

ICRP besluttet i slutten av 1950-tallet at de ville gå inn for LNT innen strålevernbruk. Denne beslut-

ningen var nok preget av atomkapprustningen og prøvesprengningene som foregikk. For å stanse prøvesprengningene måtte en overdrive betydningen av de små stråledosene som kom sammen med nedfallet av radioaktive stoffer. Vi i Norge fikk vår del fra sprengningene ved Novaja Semlja. Det har preget strålevernet siden den gang og ført til kostbare tiltak som ikke bidrar til en fornuftig omgang med stråling fra radioaktive isotoper.

Hvordan kom LNT inn?

Mange av de første eksperimentene som ga grunnlaget for strålebiologien, ble gjort med bananfluer. De var enkle å bruke og en kunne lett observere mutasjoner – som for eksempel øyefarge, vingeforandringer etc. I 1927 oppdaget Hermann Muller at røntgenstråler økte frekvensen av mutasjoner i bananfluer og han fikk Nobelprisen i 1946 for dette arbeidet.

Muller målte *ikke* stråledoser, men i et senere arbeid på midten av 1930-årene gjorde Timofeev-Resovsky et lignende arbeid. Han knyttet til seg to fysikere; Karl G. Zimmer og Max Delbrück. Zimmer var ekspert på dosimetri og Max Delbrück var fysikeren som fikk Nobelprisen i medisin i 1969 for studier av reproduksjonsmekanismen og den genetiske strukturen til virus. Dette trekløveret publiserte et glimrende arbeid om stråleinduserte mutasjoner i bananfluen. Resultatene, i form av en dose-effektkurve er vist i Figur 2.

Kurven kan tilpasses en rett linje og noen mente den gang som nå at det er et bevis for at LNT er gyldig. Men både dosestørrelse og dosehastighet gjør at det ikke er noe bevis for LNT teorien.

Det er gjort eksperimenter med bananfluer og stråleinduserte mutasjoner ved både lavere doser og langt mindre dosehastighet av Ernst Caspari og Curt Stern på 1940-tallet. De brukte strålingen fra en radiumkilde og dosen ble gitt over 3 uker. Kilden var på 10 mCi eller $3,7 \cdot 10^8$ Bq. Dosehastigheten var 23 mGy per døgn og totaldose etter 21 dager var ca. 500 mGy. De hadde også en gruppe som fikk

0,29 mGy per dag og en maksimaldose på ca. 6 mGy på 3 uker. Disse eksperimentene viste to ting:

1. Dosehastigheten er viktig. Det var langt mindre effekt når dosen ble gitt over 21 dager enn om den samme dose ble gitt over kort tid.
2. Resultatene kunne *ikke* tilpasses en rett linje i lavdoseområdet.

Bruken av LNT var dominerende for ca. 30 år siden og førte til mange kostbare og negative handlinger i forbindelse med Tsjernobylulykken. Det har ført til en rekke ukloke utsagn og negative tiltak. Vi nevner at det ble foretatt mange provoserte aborter i Europa av frykt for misdannelser etter Tsjernobyl. Den største negative effekt var nok evakueringen av flere hundre tusen mennesker som bodde i områder med nedfall. I Norden ble det kastet kjøtt som inneholdt Cs-137 og betydelige midler gikk med for å fore ned sauer før de ble slaktet.

Misbruk av LNT ble vidreført i Japan etter Fukushima. Her har hysteriet blant annet ført til at det samles opp store mengder vann fra kjøling av de ødelagte reaktorene. Dette vannet er renses for omkring 60 ulike isotoper, men ikke for tritium. På grunn av tritiuminnholdet er det ennå ikke bevilget utslippstillatelse for dette vannet. Det ser ikke ut til at noen av de ansvarlige har forsøkt å sammenligne forurensningen rundt Fukushima (eller Tsjernobyl) med de stråledoser en får i de såkalte høydoseområdene vi har naturlig i Brasil (Guarapara), Iran (Ramsar), India (Kerala) og Kina (Yangjiang). Her lever millioner av mennesker med et strålenivå som ikke ligger noe tilbake for strålemiljøet i Fukushima og Tsjernobyl.

Eksperimenter og data som viser at LNT ikke er noen god biologisk risikomodel

Allerede Casparis arbeid med bananfluer for 70 år siden viser at de biologiske effekter av stråling er langt mer kompliserte enn de fysiske prosessene som dannelse av ioner og radikaler.

Vi skal nevne en del avgjørende eksperimenter som viser at LNT har utspilt sin rolle. Punkt 1 og punkt 2 er eksperimenter som Baarli kjente da han sendte ut sin brannfakkell.

1. *Planels arbeid med paramecium (tøffeldyr) på 1980-tallet.* Disse eksperimentene gikk ut på følgende:

- Når paramecium ble satt i et blybeskyttet kammer (5–10 cm vegger av bly) ble strålingen redusert med det resultat at celleveksten stoppet opp.
- Inn i dette blykammeret førte de en radioaktiv kilde som økte bakgrunnstrålingen fra 2 til 7 mGy (på årsbasis). Det er omtrent lik den normale bakgrunnstrålingen. Resultatet ble

at celleveksten økte igjen til det normale. Det viser at stråling kan ha en positiv effekt på de prosesser som gir cellevekst.

2. *Adaptiv respons.* Dette ble første gang vist i 1984 av G. Olivieri, J. Bodycote og S. Wolff ved University of California i San Francisco. Vi har tidligere omtalt det i FFV 2/2011. De dyrket lymfocytter med 3H-merket thymidine (³H-TdR). Tritium var inkorporert direkte i DNA og tjente som en kilde for kronisk lav-dose bestråling. Tritium (³H eller H-3) er radioaktivt med en halveringstid på 12,3 år. Den sender ut en β-partikkel med maksimum energi på 18,6 keV.

Cellene ble så bestrålt med røntgenstråler til en dose på 1,5 Gy. Det var mengden av kromosomaberasjoner som ble målt. En fant da at tallet på kromosomaberasjoner var *mindre* etter bestråling fra begge kildene (tritium β-partikler og røntgenstråler) enn for røntgenstråler alene. Resultatene viser at små mengder stråling kan starte eller inducere en økt reparasjon av kromosombrudd.

Adaptiv respons viser at stråling i små porsjoner stimulerer forsvarsmekanismene. Gitt *før* en større dose trigger de reparasjonsprosessene – det kan sammenlignes med en vaksine som beskytter en ved et angrep.

3. *Cellesyklus og forsvarsmekanismer.* Av nyere arbeid som er i konflikt med LNT vil vi nevne noen av de celleforsøkene som er gjennomført på den biomedisinske avdeling ved Fysisk institutt i Oslo av Erik Pettersen og Nina Jeppesen Edin. De arbeider med levende celler som dyrkes i laboratoriet. I disse eksperimentene får cellene en liten stråledose, gitt med liten dosehastighet, før cellene får en større dose. Denne forskingen har i flere år vært gjenstand for et stort EU-prosjekt. Forskningen er beskrevet i FFV 2/2011. LNT teorien er også beskrevet i en større artikkel om radon og lungekreft. En finner hele denne artikkelen på nettet (<http://go-nuclear.org/radiation/item/978-radon-lung-cancer-and-lnt-model-thormod-henriksen-biophysics-and-medical-physics-group-u-of-oslo>).

Den internasjonale forskning innen strålebiologi er full av artikler som viser at LNT har utspilt sin rolle innen strålevern.

Konklusjon

Johan Baarlis utsagn for 30 år siden om Tsjernobylulykkens virkninger for vår helse var dristig og ble desverre møtt med negativitet av mange politikere og miljøorganisasjoner. Det er med smerte vi må konstatere at situasjonen ikke har bedret seg siden den gang. Ioniserende stråling har så mange positive anvendelser innen stråleterapi –

diagnostikk med CT og PET – og anvendelser som for eksempel kjernekraft som er en betydelig kilde for «grønn» energi.

Bruk av ioniserende stråling gir ingen grunn til bekymringer hvis to krav er oppfylt:

1. Dosen er lik eller i nærheten av naturlig bakgrunnsstråling.
2. Dosehastigheten er liten.

Det siste kravet gjør at en må se bort fra doser som de i Hiroshima der hele dosen kom i det vi kaller gammaglimtet.

Fysikere i skolen kan informere om strålingen fra radioaktive kilder. Rekkevidden til α - og β -partikler er meget liten i kroppen. Så lenge isotopene er utenfor kroppen er det stort sett bare γ -strålingen vi må ta hensyn til.

Vann med tritium kan drikkes eller slippes direkte ut. Når det gjelder tiltak mot radioaktive isotoper kan en sammenligne dosene med de en har i «høydoseområdene». Her lever mange mennesker og helsetilstanden er ikke dårligere enn de fleste andre steder. ■



Sofie Snipstad

Sofie Snipstad forsvarte den 23. juni 2017 sin avhandling «Ultrasound-mediated delivery of nanomedicine across biological barriers – for improved treatment of cancer and diseases in the brain» ved NTNU i Trondheim.

Til tross for store fremskritt innen kreftforskning de siste tiårene, er kreft fortsatt en ledende dødsårsak. En utfordring i behandling med cellegift er at cellegiften sprer seg til hele kroppen og skader de friske cellene, svært lite når frem til svulsten. Ved å kapsle cellegiften inn i nanopartikler kan medisinen fraktes mer selektivt til de syke cellene, slik at bivirkningene reduseres. Dette oppnås fordi blodårene i svulsten har porøse vegger, i motsetning til friske blodårer, slik at nanopartiklene kan lekke ut. Men nanopartiklene når bare ut til de kreftcellene som er nærmest blodåren. For at behandlingen skal være effektiv, er det viktig at behandlingen når ut til hele svulsten.

NYE DOKTORER

Sofie Snipstad har i sitt doktorgradsarbeid brukt en spesiell type nanopartikler som kan stabilisere små gassbobler, utviklet av SINTEF. Boblene med nanopartikler sprøytes inn i blodet og svulsten behandles med ultralyd. Ultralydbølgene får boblene til å vibrere og sprekke, slik at nanopartiklene løsner. Vibrasjonene masserer vevet og danner enda flere porer. Sofie Snipstad har vist at dette gir en mer effektiv levering av nanopartikler med cellegift til svulsten, og at denne behandlingen kan kurere kreft i mus.

Blod-hjerne barrieren beskytter hjernen vår fra alle stoffer i blodet, og slipper kun inn akkurat det hjernecellene trenger. Derfor er det svært vanskelig å levere medisin til hjernen, og for mange sykdommer finnes det ingen behandling. I avhandlingen beskriver Sofie Snipstad hvordan de samme nanopartikkel-stabiliserte mikroboblene i kombinasjon med ultralyd også kan brukes for å åpne barrieren og levere medisin til hjernen.

I tillegg har forskningsgruppen benyttet en annen type gassbobler som er utviklet av Phoenix Solutions AS, bestående av klynger av mikrobobler og mikrodråper av olje, som ved eksponering for ultralyd skifter fase og danner store bobler som blokkerer blodårene. Videre ultralydbehandling skaper vibrasjoner og mekaniske krefter. Disse boblene har tidligere vist seg å øke effekten av ko-injisert cellegift til svulster i mus. Avhandlingen omhandler også hvordan boblene kan brukes for å åpne blod-hjerne barrieren for å levere medisin til hjernen.

Doktorgradsstudiet er foretatt ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for naturvitenskap, ved Institutt for fysikk. Veileder har vært professor Catharina Davies, og seniorforskere Yrr Mørch og Rune Hansen ved SINTEF har vært medveiledere. ■



Hallstein Høgåsen

80 år

Hallstein Høgåsen fylte 80 år 21. august 2017, og me gratulerer post festum.

Hallstein Høgåsen voks opp i Vågå der far hans var lærar og klokkar. Oppveksten i Vågå ser ut til å ha forma han sterkt, og referanse til barndom og ungdom i Vågå kjem ofte fram i samtala rundt kaffikoppen.

Han gjekk på landsgymnas på Vinstra, og han kom til Oslo for å studere. Etter endt eksamen arbeidde han ei stutt tid i Trondheim der han tok doktorgraden, og han hadde forskingsopphald ved teoriavdelinga ved CERN. Han vart dosent ved Fysisk institutt (FI) i Oslo i 1969, og professor frå 1984. Innimellom arbeidet ved FI hadde han forskingsopphald ved t.d. CERN, Stony Brook og Annecy.

I mesteparten av si forskarkarriere har Høgåsen arbeidd med sterk vekselverknad mellom elementærpartiklar. Fram til 1970-talet kunne det tyde t.d. studium av Reggepolar, fenomenlogiske modellar og S-matriseteori. Seinare tydde det arbeid med ulike kvarkmodellar, som t.d. variantar av «bag-modellar». Han har også lagt ned mykje arbeid i studiet av multi-kvarksystem, det vil seia partiklar som inneheld meir enn tre kvarkar. Han har i fleire år arbeidd i lag med nordmannen Fred Myhrer (University of South Carolina), og med franskmannen Paul Sorba (ved CNRS, Annecy). Høgåsen fekk Norsk Data sin fysikkpris i 1980.

I førelesingane til Høgåsen vart den breie og djupe kunnskapen hans i fysikk kombinert med den skarpe og framifrå formuleringsevna hans, til glede og nytte for dei mange studentane som har studert fysikk på Blindern.

Han har også vore ein god formidlar av fysikkens kultur. Han har skriva mange populærvitenskaplege artiklar og halde mange foredrag, blant anna i radio. Han har også halde fram vitenskapsfolk sitt etiske ansvar, i skrift og tale, og som medlem av både den norske Pugwash-komiteen og av Den nasjonale forsknings forskningsetiske komite for naturvitenskap og teknologi (NENT).

Høgåsen har vist stor omsorg for FI, og har teke ansvar for styre og stell ved instituttet. Han har stor tillit ved instituttet. Som styremedlem og visestyrar var han ei god støtte for styraren ved instituttet.

Det faglege arbeidet til Høgåsen er ein integrert del av personlegdomen hans. Varemerka hans er kunnskapsrikdom, kreativitet, originalitet, og klokskap. I mange diskusjonar kjem han ofte opp med den stutthogde replikken som set ting på plass, slik at det ikkje er naudsynt å seia meir. Han er svært flink til å ordleggje seg, både skriftleg og munnleg. Og ein kan ofte lure på om han kunne ha vorte folketalar eller forfattar. Han er ein kulturpersonlegdom i vid forstand, med solide og djupe røter i norsk kultur og historie.

Eivind Osnes og Jan Olav Eeg



Tore Lindmo

70 år

En pioner innen biofysikk og medisinsk teknologi, Tore Lindmo, fylte 70 år 30. april i år. Lindmo er født i Steinkjer. Han ble uteksaminert fra NTH i 1972 i teknisk fysikk med spesialisering i biofysikk og medisinsk teknologi, det første kullet av biofysikere fra NTH. Siden har han spilt en avgjørende rolle for utviklingen av biofysikk og medisinsk teknologi i Norge, både innenfor forskning og utdanning. Som nyutdannet flyttet han til Oslo og begynte å arbeide ved Radiumhospitalet, Avdeling for biofysikk der han utførte sitt doktorgradsarbeid og tok dr.philos. graden ved Universitet i Oslo i 1982.

Karakteristisk for Lindmos forskningsarbeid er at det har hatt stor betydning innenfor en rekke områder, og de publiserte arbeidene er blitt bredt anerkjent. Ved Radiumhospitalet etablerte han det første væskestrøm-cytometeret i Norge på 1970-tallet, et instrument for å utføre kvantitative målinger på enkeltcelle- eller enkeltpartikkelnivå. Lindmo benyttet sitt egenbygde instrument til å studere cellekinetikk. Med et unikt instrument til rådighet ble hans forskningsarbeid banebrytende. Han utviklet også i samarbeid med Harald Steen et nytt konsept for væskestrøm-cytometre som ble patentert og kommersialisert. I dag er væskestrøm-cytometri en meget brukt metode i forskningslaboratorier og i analyser ved sykehus med mange kommersielle leverandører.

I 1989 ble Lindmo professor ved Institutt for fysikk, NTH. Erfaringen i væskestrøm-cytometri ble kombinert med de nylig utviklede monodisperse Ugelstad-kulene for å etablere en ny metode for blodserumanalyser (såkalt immunasay). Flere aspekter ved teknologien ble patentert og kommersialisert. Lindmo har også kombinert eksperimentell forskningsaktivitet med Monte Carlo-simuleringer, blant annet for å optimalisere

strålingstransport og dosimetri ved stråleterapi. Han har gjennom flere utenlandsopphold fått et internasjonalt nettverk som har vært viktig for forskningen ved NTNU.

Lindmo var avgjørende i etableringen og oppbyggingen av medisinsk teknologi som satsingsområde ved NTNU. Han var ledende i arbeidet med å fremme et strategisk universitetsprogram i medisinsk teknologi ved NTNU, SINTEF og St. Olavs hospital etter invitasjon fra Norges forskningsråd i 1997. Universitetsprogrammet ble avgjørende for oppbyggingen av mange nye forskningsgrupper og utdanning av nye ph.d.-stipendiater i medisinsk teknologi ved NTNU, og har ledet til utviklingen av ny medisinsk teknologi for bedre diagnostiske metoder og nye behandlingskonsepter.

Lindmo har hatt en avgjørende rolle i utdanningen av biofysikere, spesielt innen strålingsfysikk og medisinsk fysikk. Han har vært pådriver for å forbedre og oppdatere studieprogrammene slik at NTNU utdanner studenter med kompetanse som samfunnet trenger, og han bidro til etableringen av nye studieemner innen strålingsfysikk og medisinsk fysikk. I tillegg til utdanningen på masternivå, så Lindmo tidlig at det manglet emner på ph.d.-nivå og etterutdanningskurs innen strålingsfysikk og medisinsk fysikk. Han var drivkraften bak etableringen av tre store nye emner ved NTNU i ioniserende strålingsfysikk, ikke-ioniserende stråling og dosimetri, som har bidratt til kompetanseheving blant mange nordiske strålingsfysikere. Lindmo er også høyt verdsatt av studentene for sine strukturerte og klare forelesninger.

Biofysikk er et relativt lite fagfelt i Norge og det meste av forskningsaktiviteten forgår ved NTNU, UiO, Oslo Universitetssykehus og til en viss grad også ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet og Universitetet i Bergen og Haukeland sykehus. I 1990 tok Lindmo initiativet til at biofysikere i Norge skulle møtes regelmessig, og det første Kongsvoldmøtet ble arrangert. Kongsvoldmøtet har vært viktig for å opprette og utvikle kontakt mellom biofysikere i Norge.

Lindmo er medlem av Det Kongelige Norske Videnskabers Selskab. Han er nå professor emeritus ved Institutt for fysikk, NTNU. Han er en aktiv 70 åring som reiser mye, går turer i fjellet og er aktiv på sjøen i kajakk. Vi gratulerer hjertelig med 70 år og ønsker lykke til med mange gode og innholdsrike år.

*Seksjon for biofysikk og medisinsk teknologi,
Institutt for fysikk, NTNU ved Catharina Davies*



Johan Baarli
(1921–2017)

Johan Baarli, tidligere direktør ved Statens strålevern, døde 15. juli i år, 96 år gammel. Det er en markant lederskikkelse innenfor strålevern og strålingsvitenskap som er gått bort. Helt til det siste var Baarli engasjert i faglige spørsmål særlig knyttet til lavdoseproblematikken ved ioniserende stråling og de store misforståelser som i dag preger den alminnelige forståelsen av dette feltet.

Baarli gikk på Eidsvoll Landsgymnas og studerte matematikk og fysikk ved Universitetet i Oslo til han i 1943 ble arrestert av tyskerne og sendt i krigsfangenskap, bl.a. i Buchenwald. Tiden i Tyskland førte til et unikt vennskap med andre medfanger som varte livet ut. Gjennom flere tiår møttes Birger Nossum, Carl Fredrik Hasseltvedt, Sigmund Strømme, Knut Erik Tranøy, Knut Eidem og Johan Baarli én gang i måneden. Johan Baarli var den siste gjenlevende av denne kameratgjengen fra fangenskapet i Tyskland.

Johan Baarli ble cand.real. i fysikk på et eksperimentelt arbeid «The construction of a neutron generator and the study of neutrons from d-d reactions». Han fortsatte på Blindern som amanuensis ved Fysisk institutt, og fra 1952 var han Fulbright-stipendiat ved Institute of Radiobiology and Biophysics ved Universitetet i Chicago. Her arbeidet han også en periode ved Argonne Cancer Research Hospital.

I perioden 1953 til 1961 var Baarli leder av biofysikkavdelingen ved Norsk Hydros Institutt for Kreftforskning ved Radiumhospitalet. Hospitalet fikk en betatron med maksimal energi på 31 MeV og en del av arbeidet var å bli kjent med slik stråling og hvordan den ble absorbert i vev og bein. Baarli var opptatt av den store frigjøringen av nøytroner gjennom (γ, n) -reaksjoner. I 1961 tok Johan Baarli sin doktorgrad med arbeidet «An

experimental study of gamma-ray backscattering using scintillation gamma-ray spectroscopy».

I de neste 20 år, 1961–1980, var Johan Baarli direktør for helsefysikkseksjonen ved Det Europeiske kjerneforskningscenteret CERN i Genève. Her fikk han muligheter til å gjennomføre en rekke strålebiologiske studier om virkninger av høyenergetisk partikkelstråling (negative π -mesoner) på biologiske systemer. Disse studiene er i dag aktuelle innen strålingsterapi og for planlegging av lange bemannede romferder. Baarli knyttet i disse årene internasjonale kontakter som er viktige for norske forskningsmiljøer. På bakgrunn av sin vitenskapelige kompetanse i strålevern var Baarli i flere år rådgiver for den europeiske romforskningsorganisasjonen, European Space Agency.

Fra 1980 til fylte 70 år i 1991 var Johan Baarli direktør ved Statens strålevern (tidl. Statens Institutt for Strålehygiene, SIS). Han var institusjonens tredje direktør etter Nelius Moxnes (1939–1956) og Kristian Koren (1956–1979). I disse årene ble strålevernets oppgaver formidlet og markert som viktige funksjoner i samfunnet.

Mange vil nok huske Baarlis tydelige utsagn i forbindelse med Tsjernobylulykken i 1986: «Strålenedfallet fra Tsjernobyl har aldri utgjort noen helsefare for nordmenn. Tvert imot kan den økte strålingen over Norge ha hatt en positiv helseeffekt.» Dette provoserte deler av det politiske miljøet og miljøbevegelsen. Det var Baarlis perspektiv og utsagn som i erttertid har fått gjennomslag (se artikkel på s. 86).

Tsjernobylulykken i 1986 avdekket imidlertid svakheter i den norske beredskapen mot atomulykker, ikke minst i informasjonsberedskapen. Kunnskapsformidling til befolkningen ble derfor et svært viktig anliggende for Baarli, ikke bare som direktør for Statens strålevern, men også i hans lange og aktive periode som pensjonist.

I november 1991 ledet Johan Baarli Tromsø-møtet om strålevernproblemene i Nordområdene. Denne konferansen var i stor grad et resultat av hans engasjement og internasjonale kontaktnett, og for første gang kunne strålevernproblemer og radiologisk sikkerhet i nordområdene drøftes på et faglig plan med russiske forskere. Under dette møtet ble Baarli tildelt Kongens fortjenestemedalje i gull for fremragende vitenskapelig innsats og for sitt arbeid for å knytte internasjonale kontakter på områder som er viktige for Norge, og der norske fagmiljøer er små.

Som pensjonist fortsatte Johan Baarli i mange år sitt faglige arbeid ved Biofysikkgruppen, Fysisk

institutt, Universitetet i Oslo. Her var han en høyt verdsatt kollega og faglig kapasitet, og en viktig del av forskningsmiljøets sosiale fellesskap. Vi lyser fred over Johan Baarlis minne som en av våre

fremste stridsmenn for faglig entusiasme, kvalitet og integritet.

*Per Ivar Wethe, tidl. IFE
Thormod Henriksen, Fysisk institutt, UiO*



Bjørn Jacobsen (1961–2017)

Spesialrådgiver i Norges forskningsråd, Bjørn Jacobsen døde 13. juni etter noen få måneders sykdom.

Jacobsen var født i Moss 1. august 1961. Han studerte fysikk ved Universitetet i Oslo, der han ble dr.scient. i romfysikk i 1991. Så fulgte 12 år med forskning, bl.a. to år ved European Space Research and Technology Centre i Noordwijk i Nederland. Han kom til Norges forskningsråd som seniorrådgiver med ansvar for fysikkprogrammene i 2003.

I Forskningsrådet ble Jacobsen raskt en sentral medarbeider, både når det gjelder forskningsfinansiering og internasjonalt samarbeid om forskningsinfrastruktur. Han var uhyre arbeidsom og effektiv, og hans leveranser var alltid de beste.

Jacobsen ble allerede fra 2003 knyttet til CERN som rådgiver for de norske rådsdelegatene og medlem av finanskomiteen. Fra 2008 var han også rådsdelegat. Han var leder for finanskomiteen 2011-2013 etter å ha vært nestleder 2008-2010. Som leder av finanskomiteen var han også leder av CERN Standing Advisory Committee for Audit. Fra 2016 til sin død var han medlem av en ekstern ekspertkomite som skulle evaluere CERNs bruk av økonomiske og personellmessige ressurser. Jacobsen høstet stor anerkjennelse for sin ledelse av finanskomiteen. Han var lyttende og konsensusorientert, kombinerte fasthet og fleksibilitet, og styrte denne krevende komiteen med klokskap og stø hånd. Budskapet om Jacobsens bortgang nådde CERN under junimøtene i finanskomiteen

og rådet, og hans minne ble hedret på en gripende og verdig måte.

Jacobsen var en viktig inspirasjonskilde for de få norske ansatte ved CERN og hele høyenergimiljøet i Norge. Han bidro også sterkt til å trekke norske tekniske studenter til CERN.

Jacobsens oppgaver i Norges forskningsråd var ikke begrenset til høyenergifysikk. I en årrekke koordinerte han alle rådets fysikkprogrammer og fikk god kontakt med bredden av norsk fysikk. De senere årene var han spesialrådgiver med ansvar bl.a. for de norske bidragene til store internasjonale infrastrukturprogrammer. CERN er allerede omtalt. Videre nevnes Nordic Optical Telescope, European Spallation Source og European Incoherent Scatter Scientific Association (EISCAT). I det internasjonale EISCAT-rådet var han norsk delegat fra 2008. I tillegg til arbeidet med infrastrukturprogrammene koordinerte han hele tre grunnforskningsprogrammer.

Jacobsen var beundret av oss alle for sin usnobbete, diplomatiske og vennlige væremåte. Gjennom sin saklige opptreden fikk han stor tillit i de nasjonale og internasjonale fora han deltok, og han ga betydelige bidrag til løsning av mange vanskelige oppgaver. Jacobsen var en kollega, forskningspolitisk rådgiver og venn som vi ikke hadde råd til å miste. Vi vil savne ham, og hans minne vil bli værende hos oss.

Asgeir Brekke, Asbjørn Mo og Eivind Osnes

Styret i Norsk Fysisk Selskap

President:

Professor Åshild Fredriksen
Inst. for fysikk og teknologi, UiT
E-post: *ashild.fredriksen@uit.no*

Visepresident:

Professor Michael Kachelriess
Institutt for fysikk, NTNU
E-post: *michael.kachelriess@ntnu.no*

Styremedlemmer:

Førsteamanuensis Wojciech Jacek Miloch, Fysisk institutt, UiO
Seniorforsker Rolf Korneliussen, Havforskningsinstituttet i Bergen
Professor Jan Petter Hansen, Institutt for fysikk og teknologi, UiB
Professor Håvard Helstrup, Høgskolen i Bergen
Førsteamanuensis Magnus Lilledal, Institutt for fysikk, NTNU
Professor Jon Samseth, Høgskolen i Oslo og Akershus, Kjeller
Lektor Morten Trudeng, Asker videregående skole

Selskapets sekretær:

Ph.d.-stipendiat Ole Meyer
Inst. for fysikk og teknologi, UiT,
Pb. 6050 Langnes, 9037 Tromsø,
E-post: *nfs.styret@gmail.com*
Bankgiro: 7878.06.03258

www.norskfysikk.no/nfs/

ISSN-0015-9247