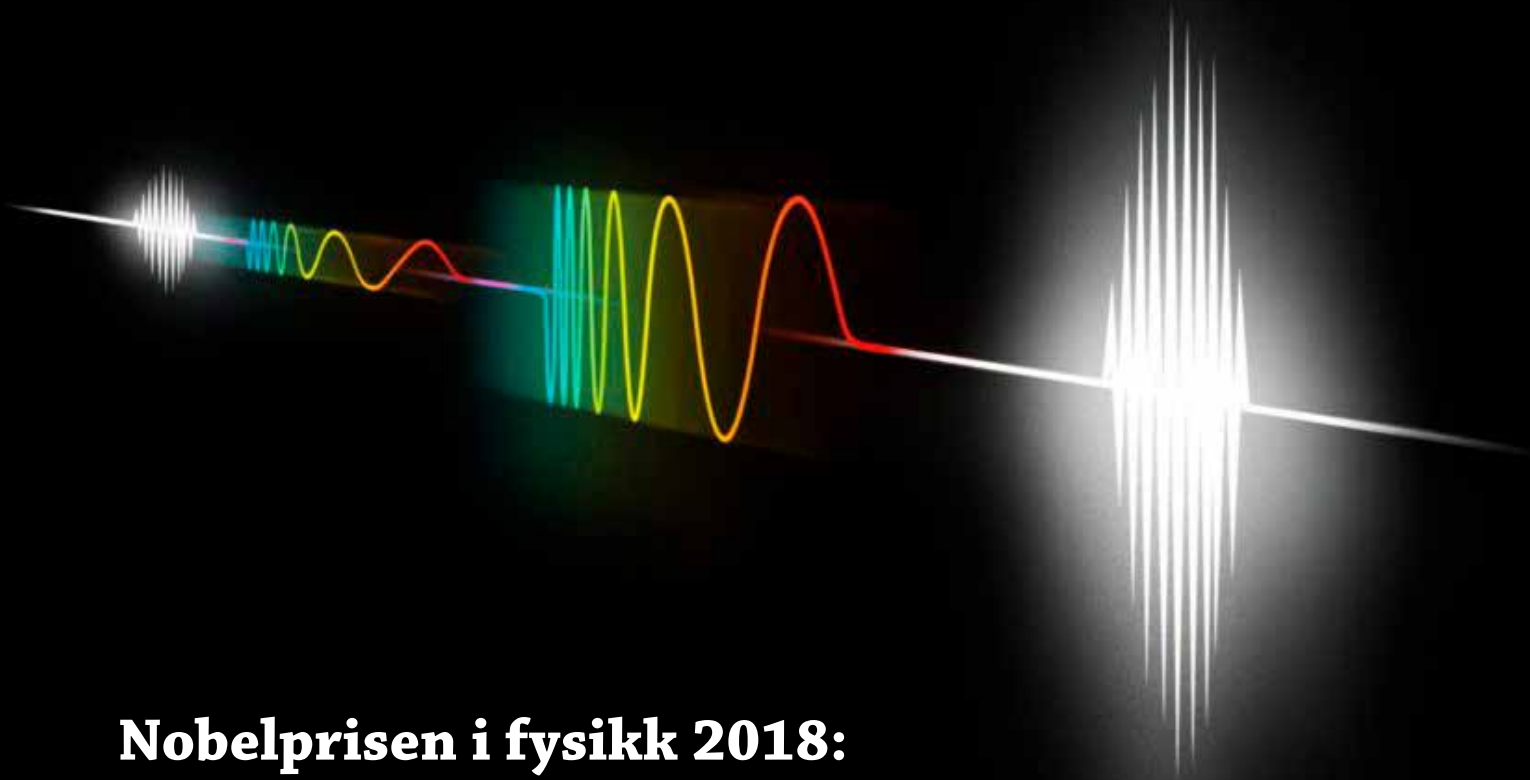


# Fra Fysikkens Verden

NR. 4 – 2018  
80. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP



## **Nobelprisen i fysikk 2018: Optiske pinsetter og forsterkning av optiske pulser**

### **Les også om:**

- Relativitetsteorien
- Tyngdeakselerasjon

- Elektrisitet
- Nøytronstråleutvikling

# Nr. 4 – 2018

## 80. årgang

### Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap

### Redaktører:

Professor Øyvind Grøn  
OsloMet – storbyuniversitetet  
og Fysisk institutt, UiO  
E-post: [oyvindg@oslomet.no](mailto:oyvindg@oslomet.no)

Professor Emil J. Samuelsen  
Institutt for fysikk, NTNU  
E-post: [emil.samuelsen@ntnu.no](mailto:emil.samuelsen@ntnu.no)

### Redaksjonssekretær:

Maria Hammerstrøm  
Realfagsbiblioteket, UiO  
E-post: [maria.hammerstrom@astro.uio.no](mailto: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

### Forsidebilde:

©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy  
of Sciences

### Trykkeri:

Oslo Sats, repro og montasje A/S

### Ekspedisjonens adresse:

*Fra Fysikkens Verden*  
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo  
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo  
Tlf.: 22 85 64 28 / 22 85 56 68  
Fax.: 22 85 64 22 / 22 85 56 71  
Internettadresse: [www.norskfysisk.no](http://www.norskfysisk.no)

### Abonnere:

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

E-post: [nfs.styret@gmail.com](mailto:nfs.styret@gmail.com)

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

### Retningslinjer for bidragsyttere

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

**Frist:** Bladet gis ut fire ganger i året: mars, juni, oktober og desember. Tidsfristene for stoff er: 1. februar, 1. mai, 1. september og 1. november. Opplaget er for tiden 1400.

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

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

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

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

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

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

# Innhold

Frå redaktørane *Emil J. Samuelsen* 83

## Fysikknytt

- Nobelprisen i fysikk 2018: Optiske pinsetter og forsterkning av optiske pulser *Marit Sletmoen og Irina T. Sorokina* 84
- Jetstrøm med tilsynelatende overlyshastighet *Øyvind G. Grøn* 88
- Nye tester av relativitetsteorien *Øyvind G. Grøn* 90

## Artikler

- Termodynamikk for svarte hull *Øyvind G. Grøn* 96
- Elektrisitet på flaske *Emil J. Samuelsen* 101
- Hundreårsminne for nobelprisvinnarar for nøytronstråleutvikling *Emil J. Samuelsen* 104
- Måling av tyngdeakselerasjonen  $g$  ved hjelp av Dopplerskift *Simen Hellesund* 108

## Småstoff

- Bokanmeldelse: *Korte svar på store spørsmål* *Hugo Parr* 110

## FRÅ REDAKTØRANE

Nobelprisen i fysikk for 2018 blei gitt for arbeid som berører mange fagområde: optikk, laserfysikk, nanovitskap og biofag. Det er sjeldan prisen er så mangesidig, og omtalen i dette nummeret er då også skriven av ein professor i fysikk og ein i biofag. Spesielt er det fascinerande å lese om korleis laserlys kan nyttast til å fange og flytte nanopartiklar, og korleis laserlys kan komprimerast til intense pulsar.

Eit tema som *FFV* ofte vender tilbake til, er relativitetsteori og om der er avgrensingar i tid og rom for gyldigheit. Temaet blir grundig gjennomgått i dette nummeret, med vekt på nye eksperimentelle og teoretiske oppdateringar. Og vi ser oss tilbake i fysikkhistoria om korleis elektrisitetforståinga kom til, og korleis viktig faststoff-fysikk fekk ein god puff framover på 1960-tallet då nøytronstråleteknikkar blei utvikla. Eit eksempel på enkel skolefysikkdemonstrasjon og ein bokomtale kan du også finne.

Resultatet av *FFV* sin skrivekonkurranse for 2018 vil bli gitt i nummer 1 for 2019.

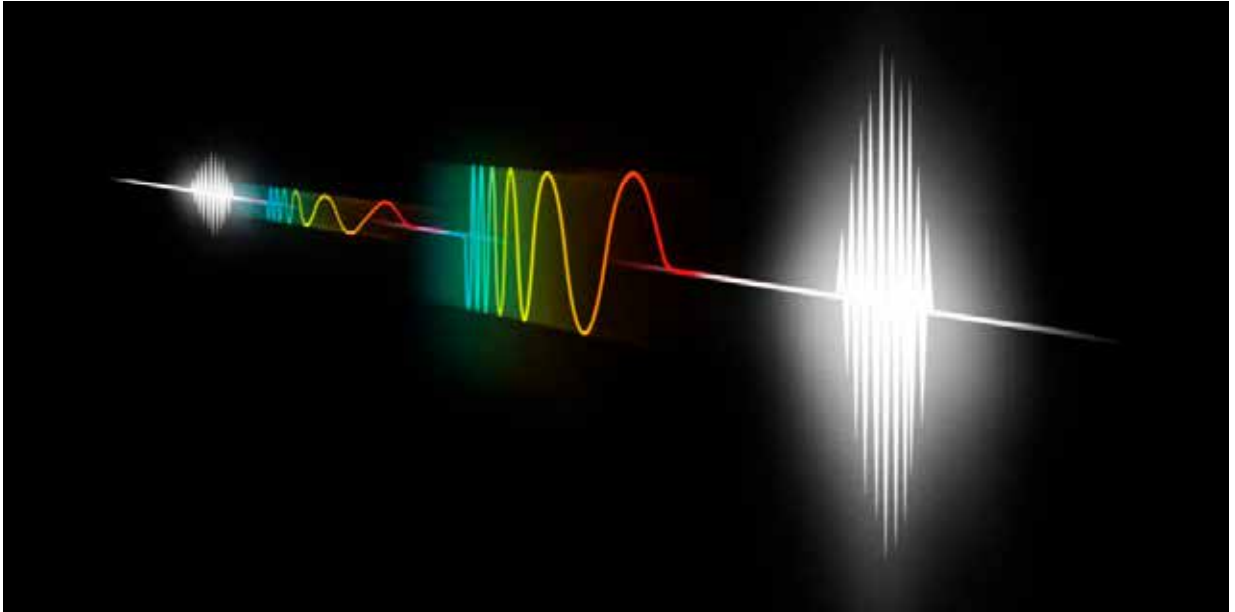
Vi minner om at *FFV* skal vere bladet for heile fysikk-Norge og er opent for stoff om stort og smått. Det er ein fin måte å profilere eigen institusjon, også med småstoff som omtale av merkedagar for grupper og personar, doktordisputasar, forfremmelsar og utmerkelsar. Vi inviterer til innspel.



Øyvind G. Grøn



Emil J. Samuelsen



©Lohan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

## Nobelprisen i fysikk 2018: Optiske pinsetter og forsterkning av optiske pulser

**Nobelprisen i fysikk for 2018 hedrer banebrytende oppfinnelser innen laserfysikk, som har ført til en bedre forståelse av verden rundt oss, samt store teknologiske fremskritt.**

**Marit Sletmoen** Inst. for biotekn. og matvitenskap, NTNU

**Irina T. Sorokina** Institutt for fysikk, NTNU

Halve prisen går til Arthur Ashkin (f. 1922) ved Bell Laboratories, New Jersey, USA, for oppfinnelsen av optiske pinsetter og deres anvendelse inn mot biologi. Den andre halvdelen ble tildelt Gérard Mourou (f. 1944) ved Ecole Polytechnique, Palaiseau, Frankrike, og Donna Strickland (f. 1959) ved University of Waterloo, Canada, for

oppfinnelsen av *chirped puls amplification* (CPA), på norsk «utstrukket pulsforsterkning», en metode for generering av intense ultrakorte optiske pulser. Slike lyspulser åpnet for oppdagelsen av flere nye grunnleggende fysiske fenomen og anvendelser, blant annet innen biomedisin.

### Arthur Ashkin og fanging av små partikler ved hjelp av lys

Arthur Ashkin bidro til mange betydningsfulle oppdagelser, men nå er han tildelt Nobelprisen i fysikk for sine studier av kraften lys kan påføre et objekt. Det var tilfeldigheter som brakte han inn i dette forskningsfeltet. Han studerte kjernefysikk men bestemte seg tidlig for å forlate dette feltet, og grunnen var at hans eldre bror allerede var en godt etablert kjernefysiker og han fryktet at han

**Figur 1.** Nobelprisvinnerne i fysikk 2018. Fra venstre: Arthur Ashkin, Gérard Mourou og Donna Strickland. (Foto: Fra nettside for Physics Today)

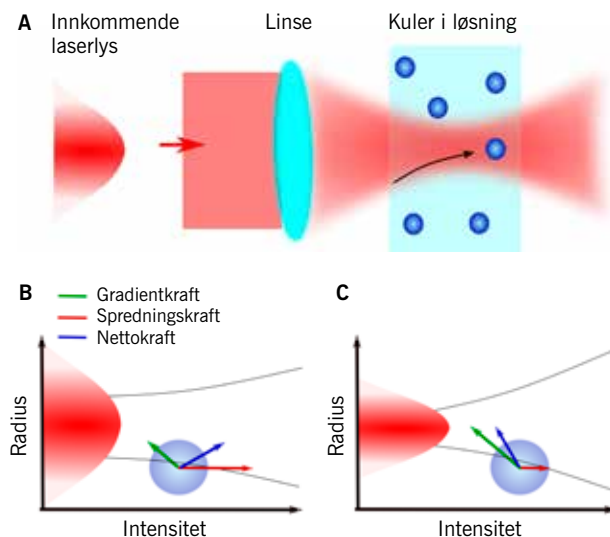


ikke ville bli kjent for sine egne bidrag, men ville forbli «Ashkins bror Ashkin». Da han i 1952 etter fullført doktorgradsstudier fra Cornell universitetet fikk en invitasjon til å arbeide ved Bell Labs, takket han derfor ja. Dette plasserte ham i miljøet der forløperen til laseren ble oppfunnet i 1958.

For å forstå fenomenet optisk fanging må man huske på at når fotoner vekselvirker med et objekt, kan impuls overføres til objektet. Objektet sies da å være under påvirkning av et strålingstrykk. Impulsen fra et enkelt foton er svært liten og det var derfor lite som tydet på at disse svake kreftene ville kunne få noen praktisk betydning på landjorda, til tross for deres betydning innen astronomi. Med bruk av lasere og små partikler kan man imidlertid gjøre disse kreftene tilstrekkelig store til å bevege, akselerere og stabilt fange partiklene. Dette er en direkte konsekvens av de høye intensitetene og intensitetsgradientene som kan oppnås med lasere.

Ashkin fortalte senere at hans interesse for temaet optisk fanging oppsto i 1969 og fant næring i følgende beregning av strålingstrykket fra en laser som ble rettet mot en liten partikkel: Ved å rette en lysstråle med en effekt lik 1 W mot en partikkel med radius om lag lik bølgelengden til lyset vil man kunne overføre en kraft lik  $10^{-9}$  N, det vil si 1 nN. Denne kraften vil være tilstrekkelig til å akselerere partikkelen  $\approx 10^5 \times g$ , hvor  $g$  er tyngdeakselerasjonen. Denne beregningen inspirerte Ashkin til å gjennomføre et eksperiment hvor dette kunne bevises. Han benyttet transparente latekskuler i vann og en lysstråle med en gaussisk intensitetsprofil (figur 2A). Dette gjorde det mulig å observere partikkelbevegelse frembrakt fra lysstrålen, og i tillegg observerte han at partikler som ved start var lokalisert mot ytterkanten av lysstrålen, ble trukket mot sentrum av intensitetsprofilen og deretter akselererte fremover.

Ashkin visste allerede at kraften som akselererte partikkelen i fremover-retning skyldtes strålingstrykket, men hva var opphavet til kraften som drev partikkelen mot sentrum av laserstrålen? Ashkin viste at begge disse kreftene kommer fra strålingstrykket. Dette fremgår av følgende tankeeksperiment: Tenk deg en kule laget av et materiale med en brytningsindeks vesentlig høyere enn det omkringliggende mediet (i Ashkins tilfelle vann) og som er plassert forskjøvet i forhold til sentrum av lysstrålen. Lysstråler som kommer inn mot kulen vil endre retning på grunn av brytningsindeksforskjellen (Snells lov). Vi velger oss to punkter på kuleoverflaten, plassert på hver sine side ift sentrum av kulen. Lysstrålen som treffer hver av disse to punktene angis som stråle 1 og 2, og kraften som



**Figur 2.** Virkemåten til optiske feller. A: Det eksperimentelle oppsettet som Ashkin benyttet i sine innledende eksperiment. En laserstråle fokuseres ved bruk av en linse. Den sorte pilen illustrerer bevegelsesbanen til en latekskule som fanges av laserstrålen. B: Oppsettet vist i A gir opphav til en optisk felle som er stabil i lateral retning men ikke i aksial retning siden spredningskraften ( $F_{scat}$ ) er høyere enn gradientkraften  $F_{grad}$ . C: Ved å bytte ut linsen med en kraftigere samlelinse kan man oppnå en optisk felle hvor gradientkraften er sterkere enn spredningskraften, og som derfor fanger partikkelen stabilt.

overføres i hvert punkt for  $F_1$  og  $F_2$ . Fordi lysstrålen har en gaussisk intensitetsprofil, er intensiteten på stråle 1 i dette tilfellet høyere enn denne for stråle 2. Kraften  $F_1$  er dermed større enn  $F_2$ . Ved å summere bidraget fra alle stråler som treffer partikkelen står man igjen med to kraftkomponenter: spredningskomponenten  $F_{scat}$  som virker i retningen til lyset og gradientkraften  $F_{grad}$  (figur 2B). Den sistnevnte har opphav i gradienten i lysintensitet over tverrsnittet av lysstrålen og virker normalt på propageringsretningen til lyset og i retningen mot området med høyest lysintensitet. Dersom partikkelen er plassert litt til siden for sentrum i lysstrålen vil gradientkraften sørge for å trekke partikkelen mot sentrum, slik Ashkin observerte.

Dersom man introduserer en tilleggskraft som motvirker kraften som virker i propageringsretningen til lyset vil man kunne oppnå en optisk felle som fanger en partikkel i et avgrenset område hvor den holdes over tid. Dette viste Ashkin kort tid etter ved å benytte to laserstråler som pekte i hver sin retning [1]. Et viktig skritt videre kom noen år senere da Ashkin sammen med samarbeidspartnere byttet ut linsen i de første eksperimentene med en kraftigere linse som fokuserte lyset fra laseren til et punkt. Denne

justeringen tillot ham å vise at dielektriske kuler fanges i fokalpunktet til linsen og forblir der. Ved hjelp av kun en laser og en kraftig samlelinse hadde de da laget en optisk felle hvor spredningskraften ( $F_{\text{scat}}$ ) er balansert av gradientkraften ( $F_{\text{grad}}$ ) (figur 2C) [2]! Ordet optiske pinsetter ble introdusert for å beskrive denne nye metoden for optisk fanging, som i likhet med en pinsett tillater og ikke bare holde fast men også forflytte små partikler.

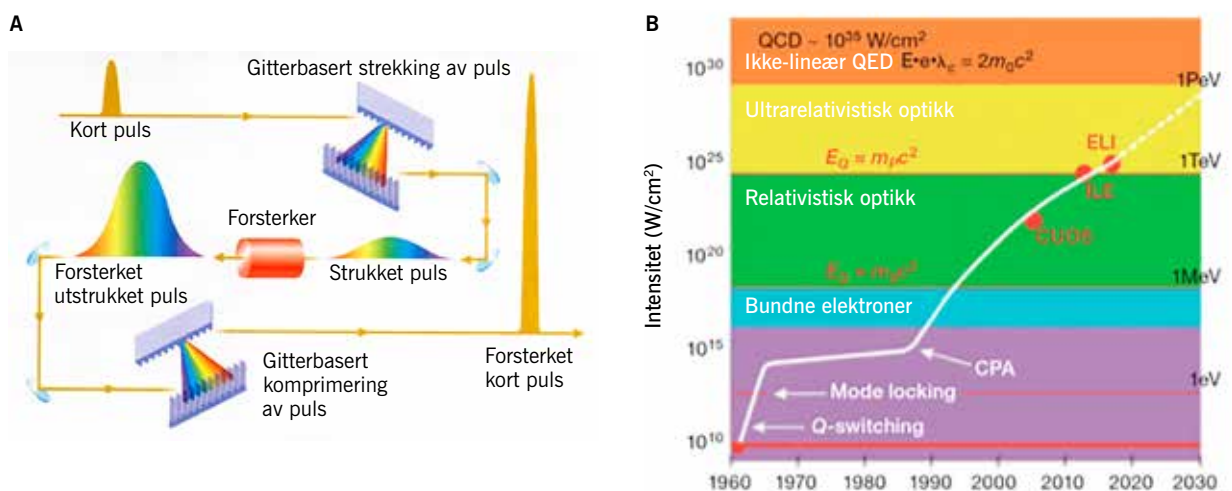
Dette relativt enkle oppsettet for realisering av en optisk pinsett gjorde det mulig å integrere det i optiske mikroskop. Det er videre interessant å merke seg at en eventuell kraft som virker på partikkelen i retning normalt på propageringsretningen til lyset vil være proporsjonal med partikkelens forflytning i denne retningen, dvs. relativt til sentrum i intensitetsfordelingen til laserstrålen. Dette betyr at dersom forflytningen av partikkelen kan bestemmes, kan kraften som virker på den også bestemmes! En metode for posisjonsbestemmelse av partikkelen relativt til laserstrålen ble foreslått sent på 1990 tallet [3]. Arthur Ashkin bidro i sin videre karriere til bruken av optiske pinsetter til å skånsomt fange biologiske strukturer som bakterier, røde blodceller og mikroalger. Han sluttet i 1992 i sin stilling ved Bell Labs, etter å ha vært ansatt der i over 40 år, men fortsatte sin forskningsaktivitet fra sitt hjem. Optiske pinsetter ligger til grunn for en rekke studier innen biofysikk. Eksempler er kvantisering av bevegelsen til RNA polymerase langs DNA [4], molekylære motorer ansvarlig for intercellulær transport, bestemmelse av mekaniske egenskaper til intracellulære komponenter slik som mikrotubuli, og studier av hvordan bakterier fester seg til celler.

### Gérart Mourou, Donna Strickland og deres oppfinnelse

Gérard Mourou er professor ved Ecole Polytechnique i Paris og leder av Institutt for anvendt optikk ved ENSTA (École Nationale Supérieure de Techniques Avancées). Han er også professor emeritus ved Universitetet i Michigan, USA. Professor Donna Strickland er en tidligere ph.d.-student av Gerard Mourou. Arbeid publisert som del av hennes doktorgrad markerer starten på deres viktige arbeid som resulterte i CPA. Strickland er førsteamanuensis ved Institutt for fysikk og astronomi ved Universitetet i Waterloo i Canada. Hun er den tredje kvinnen som mottar en nobelpris i fysikk og den første kvinnen som mottar en nobelpris siden 2015. I en pressekonferanse etter kunnngjøringen av nobelprisen fikk øverste leder ved Universitetet i Waterloo, spørsmål om det var en mulighet for at hun nå, etter å ha blitt tildelt nobelprisen, ville kunne oppnå opprykk til professor. Han svarte til latter i salen at dette ligger det til rette for: «hun må i likhet med andre sende en søknad, men hun trenger ikke utarbeide en lang CV; en setning vil holde». CPA har revolusjonert optikkfeltet ved at metoden muliggjør generering av ekstremt høye laserintensiteter.

### Fysikken som ligger til grunn for CPA

CPA innbefatter å splitte opp lys til korte impulser som varer bare i noen femtosekund, men som til gjengjeld er svært intense. For mange anvendelser har man bruk for nettopp slike korte intense doser av lys. Ved hjelp av lasere kunne man tidlig lage korte lypulser med høy effekt.



**Figur 3.** A: Skjema for strekking etterfulgt av forsterkning og deretter kompresjon av laserpuls. Dette er prinsippet som ligger til grunn for utstrukket pulsforsterkning, forkortet CPA. B: Grafen viser eksperimentelt oppnådde laserintensiteter (kontinuerlig linje) så vel som utviklingen som man antar å oppnå innen 2020–30 (stiplet linje). (Illustrasjoner: A) Fra nettside for Michigan Engineering, B) [8])

Dette ble realisert allerede på 60-tallet, men etter få år stanset den videre fremgangen. Dette skyldtes blant annet at den høye effekten per dose lys forårsaket ødeleggelse av det aktive lasermediet som benyttes til pulsforsterkningen, og utviklingen sto derfor relativt i ro frem til 1984–1985 med oppfinnelsen av CPA. Mourou og Strickland foreslo å strekke pulsen før den forsterkes (dette kalles chirping) og man kan så komprimere den tilbake etter at den har forlatt enheten hvor forsterkning finner sted [5, 6] (figur 3A). Siden den gang benytter nær sagt alle forsterkerenheter i lasere CPA tilnærmingen.

### Anvendelser og betydning av CPA-metoden

Viktigheten av CPA er betydelig for grunnleggende vitenskap, og da særlig fysikk, men vi velger her å fokusere på noen eksempler av mer anvendt karakter. CPA har åpnet dørene for relativistisk mikroelektronikk og microchip laserakseleratorer [7], så vel som prosessering av materiale for halvlederindustrien. Lysintensiteter over  $10^{22}$ – $10^{23}$  W cm<sup>-2</sup> kan i dag oppnås ved stor-skala-lasere som HERCULES ved universitetet i Michigan, USA eller ELI (the Extreme Light Infrastructure project) i Europa (figur 3B). Ved bruk av disse laserne har elektroner blitt akselerert til energier i størrelsesorden GeV over avstander på noen få centimeter. Disse observasjonene åpner for å lage laserbaserte løsninger for kompakte, kostnadseffektive partikkelakseleratorer. Når det gjelder biologisk forskning har lasere med ultrakorte pulser tillatt kirurgi på vev med svært høy presisjon. De presise, tynne kuttene som oppnås minimerer skaden fra skalpeller og muliggjør kutting under overflate av vevet. Disse laserne benyttes derfor rutinemessig til å utføre presise kutt for å korrigere for nærsyntet eller hornhinnetransplantasjon. Mer enn en million pasienter har så langt mottatt denne typen behandling. Femtosekundlasere er også viktige for gjenkjennelse av kreft i tidlig fase eller annen in-vivo diagnostikk. Et siste eksempel på bruken av CPA er innen romforskning, for fjerning av avfall i verdensrommet [9]. Materialer som er etterlatt i verdensrommet er en kilde til fare for nytt utstyr som sendes opp. Det nyeste internasjonale prosjektet ledet av Gerard Mourou har som målsetting å utvikle en intens ultrakort pulset fiberbasert laser i den hensikt å åpne for nye metoder for fjerning av avfall i rommet.

### Konklusjon

Både de optiske pinsettene og CPA-metoden utvider anvendelsesområdet for laser. Begge oppdagelsene bygger på full kontroll over og manipulering av laserlys. De tillater, hver på sin måte, studier på mikro- og til og med nanometer-nivå. Og sist men ikke minst: begge oppdagelsene har muliggjort store hopp fremover ikke bare innen teknologiutvikling av disse laserbaserte forskningsverktøyene, men også i vår forståelse av verden som omgir oss. ■

### Referanser

1. A. Ashkin & J.M. Dziedzic. «Optical Levitation by Radiation Pressure». *Appl. Phys. Lett.* 19 (1971), 283–&. doi:10.1063/1.1653919.
2. A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm & S. Chu. «Observation of a Single-Beam Gradient Force Optical Trap for Dielectric Particles». *Opt. Lett.* 11 (1986), s. 288–290. doi:10.1364/ol.11.000288.
3. A. Pralle, M. Prummer, E.L. Florin, E.H.K. Stelzer & J.K.H. Horber. «Three-dimensional high-resolution particle tracking for optical tweezers by forward scattered light». *Microsc. Res. Tech.* 44 (1999), s. 378–386. doi:10.1002/(sici)1097-0029(19990301)44:5<378::Aid-jemt10>3.0.Co;2-z.
4. M.D. Wang et al. «Force and velocity measured for single molecules of RNA polymerase». *Science* 282 (1998), s. 902–907. doi:10.1126/science.282.5390.902.
5. D. Strickland & G. Mourou. «Compression of Amplified Chirped Optical Pulses». *Opt. Commun.* 56 (1985), s. 219–221. doi:10.1016/0030-4018(85)90120-8.
6. Michigan Engineering Center for Ultrafast Optical Science: «Chirped Pulse Amplification». Lenke: <https://cuos.engin.umich.edu/researchgroups/hfs/facilities/chirped-pulse-amplification/>.
7. B.B. Gerard Mourou, T. Tajima & J. Limpert. «The future is fibre accelerators». *Nature Photonics* 7 (2013), s. 258–261.
8. B.B. Gerard Mourou & T. Tajima. «The Extreme Light Infrastructure: Optics' Next Horizon». *Optics & Photonics News* 22(7) (2011), s. 47–51. doi: 10.1364/OPN.22.7.000047.
9. R. Souldard, M.N. Quinn, T. Tajima & G. Mourou. «ICAN: A novel laser architecture for space debris removal». *Acta Astronaut.* 105 (2014), s. 192–200, doi:10.1016/j.actaastro.2014.09.004.

## Jetstrøm med tilsynelatende overlyshastighet

**En artikkel publisert i *Nature* 5. september 2018 har overskriften «Superluminal motion of a relativistic jet in the neutron-star merger GW170817». Jeg vil her presentere hva som ble observert, og hvilken forklaring observasjonene har. I en boks gis en utledning av den observerte hastigheten som kan være oppklarende og lærerik – en geometrisk betraktning som kun bruker matematikk fra videregående skole.**

**Øyvind G. Grøn** OsloMet – storbyuniversitetet

Overskriften er umiddelbart overraskende for elever og studenter som har lært om den spesielle relativitetsteorien. Overlyshastighet av en relativistisk jetstrøm? Hva betyr dette? Det er jo en konsekvens av relativitetsteorien at man ikke kan akselerere opp materie til overlyshastighet, for det krever uendelig stor energi å passere lyshastighetsbarrieren.

### Observasjoner

Hendelsen det refereres til i overskriften [1] er en kollisjon mellom nøytronstjerner som forårsaket at både gravitasjonsbølger og elektromagnetisk stråling ble sendt ut. Gravitasjonsbølgene fra kollisjonen ble registrert på jorda 17. august 2017 og et gammaglimt ble registrert under to sekunder

senere, og deretter stråling fra hele det elektromagnetiske spekteret [2, 3]. Observasjonene viste at kollisjonen skjedde 133 millioner lysår fra solsystemet.

Gammaglimtet skyldtes en jetstrøm sendt ut fra kollisjonen, og den mer langbølgete strålingen som ble observert senere, ble sendt ut da jetstrømmen vekselvirket med materie i omgivelsene. Den nye artikkelen dreier seg særlig om radiostrålingen fra denne kilden i en periode fra 75 til 230 dager etter at gammaglimtet ble registrert (figur 1).

I løpet av disse 155 dagene = 0,42 år flyttet kilden seg 2,7 millibuesekund på himmelen (figur 2). Med avstanden 133 millioner lysår svarer det til en forflytning på omtrent 1,7 lysår. Dermed blir den observerte hastigheten på tvers av synslinjen  $(1,7/0,42)c = 4c$ , det vil si fire ganger lyshastigheten i tomt rom – i tilsynelatende konflikt med relativitetsteorien.

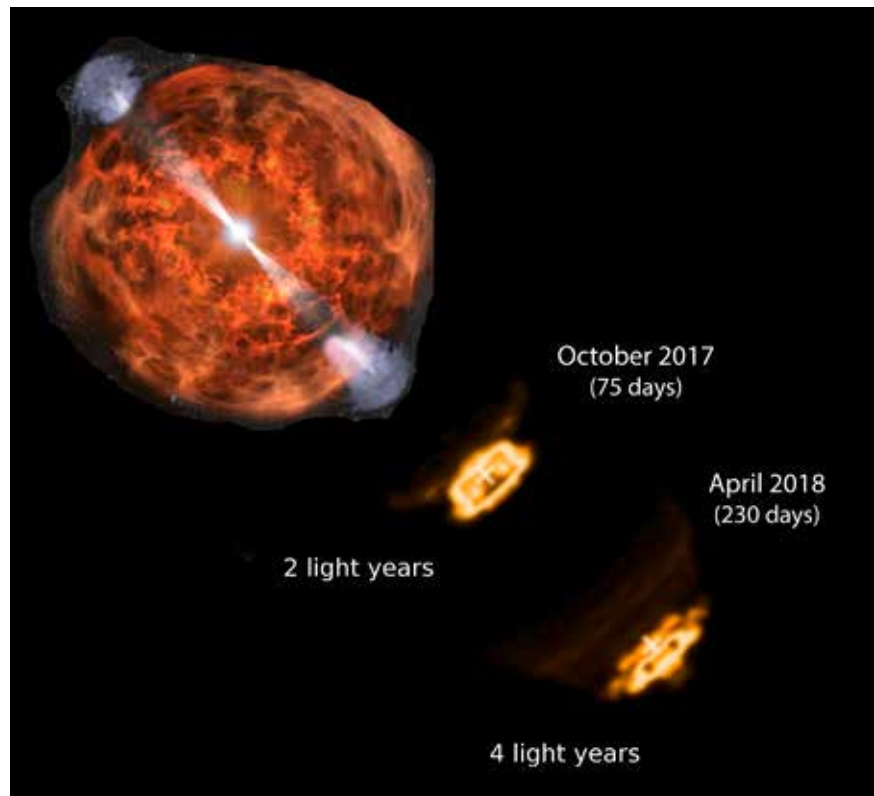
Observasjonene viste også at jetstrømmen dannet mellom  $14^\circ$  og  $28^\circ$  med synslinjen.

### Hvordan observert hastighet på tvers av synslinjen kan bli større enn $c$

Fenomenet nevnt i overskriften oppstår når en lyskilde, en lysende jetstrøm i det aktuelle tilfellet, beveger seg nesten med lyshastighet på skrå i forhold til synslinjen mot en observatør (figur 2).

Kilden sender kontinuerlig ut lys som treffer observatøren. Den observerte transverselle hastigheten er avstanden ganger den observerte vinkelendringen per sekund. For hvert sekund

**Figur 1.** Illustrasjon av hvordan kilden til observert radiostråling fra kollisjonen av to nøytronstjerner ser ut til å ha flyttet seg i tiden fra 75 til 230 dager etter kollisjonen. (Illustrasjon: D. Berry, O. Gottlieb, K. Mooley, G. Hallinan, NRAO/AUI/NSF)



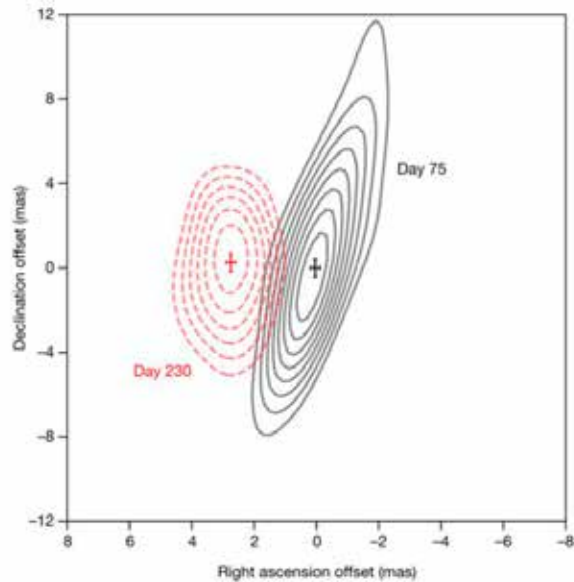
kommer lyskilden nærmere observatøren, så reisetiden for lyset blir stadig kortere, samtidig med at kilden beveger seg vekk fra synslinjen siden jetsrømmen er rettet på skrå utover.

Dette gjør at tidsforskjellen for de mottatte signalene fra ulike retninger blir mindre enn om kilden er i ro. Dermed kan den observerte transverselle hastigheten bli større enn  $c$ .

Beregningen av den observerte transverselle hastigheten er vist i boksen. ■

**Referanser**

1. K.P. Mooley og medarbeidere. «Superluminal motion of a relativistic jet in the neutron-star merger GW170817». *Nature* 5. september 2018. Lenke: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0486-3>
2. M. Hammerstrøm. «Kilde til gravitasjonsbølge avbildet for første gang». *FFV* 79 nr. 4 (2017), s. 100–101.
3. Ø. Grøn. «En ny æra: Flersignalastronomi». *Astronomi* 48 nr. 1 (2018), s. 30–47.



**Figur 2.** Endringen av posisjonen på himmelen mellom 75 og 230 dager etter registreringen av gammaglimtet for kilden til den observerte radiostrålingen. (Figur: [1])

**Beregning av observert hastighet på tvers av synslinjen**

En lyskilde beveger seg fra A til B med hastighet  $v_0$  i en retning som danner vinkelen  $\theta$  med synslinjen. Vi betrakter lys sendt ut fra A og B. Punktet A' og B har samme avstand fra jorda. Det følger fra figur 2 at

$$AB = \frac{a}{\sin \theta}, \quad AA' = \frac{a}{\tan \theta}. \tag{1}$$

Forskjellen i ankomst-tid på jorda for lys sendt ut fra A og B er

$$\Delta t = \frac{AB}{v_0} - \frac{AA'}{c} = \frac{a}{v_0 \sin \theta} - \frac{a}{c \tan \theta}, \tag{2}$$

som gir

$$\Delta t = \frac{1 - (v_0/c) \cos \theta}{v_0 \sin \theta} a. \tag{3}$$

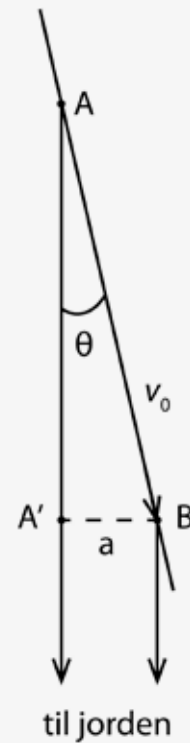
Den observerte hastigheten på tvers av synslinjen for lyskilden er

$$v_T = \frac{a}{\Delta t} = \frac{v_0 \sin \theta}{1 - (v_0/c) \cos \theta}. \tag{4}$$

Hastigheten til lyskilden er følgelig

$$v_0 = \frac{v_T}{\sin \theta + (v_T/c) \cos \theta}. \tag{5}$$

Det følger at den observerte hastigheten på tvers av synslinjen er større enn  $c$  dersom hastigheten og bevegelsesretningen til kilden oppfyller  $v_0 > c / (\sin \theta + \cos \theta)$ . Dersom jetstrålen for eksempel danner  $30^\circ$  med synsretningen er  $\sin \theta = 1/2$  og  $\cos \theta = \sqrt{3}/2$ . Da må kildens hastighet være større enn  $[2/(1+\sqrt{3})]c \approx 0,74c$  for at kilden skal observeres med overlyshastighet. Innsetting av de observerte verdiene  $v_T = 4c$  og  $14^\circ < \theta < 28^\circ$  i likning (5) gir at kildens hastighet er  $0,971c < v_0 < 0,999c$ .



**Figur 3.** En lyskilde beveger seg fra A til B med hastighet  $v_0$ . Lyskildens bevegelsesretning danner vinkelen  $\theta$  med synslinjen.

# Nye tester av relativitetsteorien

**Siste halvår er det rapportert om hele fem nye tester av den generelle relativitetsteorien. Disse presenteres her sammen med beregninger som gir en kvantitativ forståelse av eksperimentene, og som også kan brukes i fysikkundervisning i grunnkurs i fysikk.**

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Her omtales følgende fem tester av relativitetsteorien:

1. Ekvivalensprinsippets gyldighet i solsystemet er testet med stor nøyaktighet ved hjelp av MESSENGER-data.
2. Gyldigheten av ekvivalensprinsippet er nylig testet for et system med sterkt gravitasjonsfelt ved å studere et trippelstjernesystem med en nøytronstjerne og to hvite dvergstjerner.
3. Det er vist at ekvivalensprinsippet gjelder for et energirikt nøytrino som kom fra en galakse fire milliarder lysår fra jorda.
4. En gruppe fysikere har greid å bekrefte den generelle relativitetsteorien på galaktisk skala med langt større nøyaktighet enn tidligere ved å utnytte gravitasjonslinseeffekten.
5. Ved å studere en stjerne i tett bane rundt det supermassive svarte hullet i sentrum av Melkeveien er den relativistiske frekvensforskyvningen av lys kvantitativt bekreftet.

## 1. Tester av den generelle relativitetsteorien i solsystemet

Den generelle relativitetsteorien er testet mest nøyaktig i solsystemet. De klassiske testene er observasjoner av avbøyningen til banen av lys som passerer sola på vei mot jorda fra en baken-

**Figur 1.** Illustrasjon av romfartøyet MESSENGER som gikk i bane rundt Merkur fra 2011 til 2015. (Illustrasjon: NASA/JHU APL/Carnegie Institution of Washington)



forliggende stjerne, Merkurs periheljesesjon og målinger av hvordan tyngdefeltet påvirker hvor fort en klokke går.

Den 18. januar 2018 ble det publisert en artikkel i *Nature Communications* [1] der en gruppe fysikere under ledelse av Antonio Genova rapporterte om tester av relativitetsteorien basert på syv års observasjonsdata fra MESSENGER-sonden, vist i figur 1. Blant annet testet de gyldigheten av ekvivalensprinsippet i solsystemet.

Det finnes mange formuleringer av ekvivalensprinsippet. En av dem er at alle objekter i fritt fall i et gravitasjonsfelt beveger seg likt uansett hva de består av. Dette er et av grunnprinsippene i den generelle relativitetsteorien og er nylig blitt testet av franske forskere med stor nøyaktighet for ulike legeringer ved hjelp av en satellitt kalt MICROSCOPE [2].

Newtons 2. lov anvendt på et legeme med treg (inert) masse  $m_1$  og graviterende masse  $m_G$  i avstand  $r$  fra sentrum av et sfærisk legeme med graviterende masse  $M_G$  tar formen

$$\frac{GM_G m_G}{r^2} = m_1 a, \quad (1)$$

der  $G$  er Newtons gravitasjonskonstant og  $a$  er legemets akselerasjon. Dersom legemets trege og graviterende masse er lik hverandre,  $m_G = m_1$ , er legemets akselerasjon uavhengig av dets egenskaper. Da kalles akselerasjonen av et legeme i fritt fall for *tyngdeakselerasjonen* i legemets posisjon, og bokstaven  $a$  erstattes av  $g$ , slik at likning (1) tar formen

$$g = \frac{GM_G}{r^2}. \quad (2)$$

Dersom den graviterende og trege massen er forskjellige, får legemet ifølge likning (1) en akselerasjon

$$a = \frac{m_G}{m_1} g, \quad (3)$$

som avhenger av legemets egenskaper. I så fall er ekvivalensprinsippet ikke oppfylt.

For å teste gyldigheten av ekvivalensprinsippet har fysikerne innført en parameter

$$\Delta = \frac{m_G}{m_I} - 1. \quad (4)$$

Dersom  $\Delta = 0$  er ekvivalensprinsippet oppfylt.

Genova og medarbeidere brukte imidlertid en annen mye brukt parameter

$$\eta = \frac{m_G c^2}{U} \Delta, \quad (5)$$

der  $U$  er den gravitasjonelle bindingsenergien, også kalt den gravitasjonelle selvenergien, til legemet med graviterende masse  $m_G$ . For en kule med radius  $R$  og konstant tetthet er [3]

$$U = \frac{3Gm_G^2}{5R} = \frac{3}{10} \frac{R_s}{R} m_G c^2 \quad (6)$$

der

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad (7)$$

er Schwarzschild-radien til legemet, det vil si radien legemet ville fått dersom det ble presset sammen til et svart hull. Her er  $c$  lyshastigheten i tomt rom. Innsetting i likning (5) gir

$$\Delta = \frac{3}{10} \frac{R_s}{R} \eta. \quad (8)$$

Genova og medarbeidere viste at MESSENGER-dataene for Merkur leder til  $\eta = (-6,67 \pm 7,2) \cdot 10^{-5}$ . Merkur har radius  $R = 2440$  km og masse  $M = 3,3 \cdot 10^{23}$  kg. Innsetting av denne massen i likning (8) gir en Schwarzschild-radius  $R_s = 5 \cdot 10^{-7}$  km. Dermed fås  $\Delta = (-4,1 \pm 4,6) \cdot 10^{-15}$ . Dette viser at MESSENGER-dataene har gitt oss en ekstremt nøyaktig test på at Merkurs trege masse er lik dens graviterende masse.

## 2. Test av ekvivalensprinsippet for et system med sterkt gravitasjonsfelt

Den 5. juli 2018 ble det publisert en artikkel i *Nature* [4] med en rapport om en ny test av ekvivalensprinsippet for et system med sterkt gravitasjonsfelt.

Fysikerne vil gjerne teste ekvivalensprinsippet så nøyaktig som mulig for ulike typer systemer – ikke bare systemet med svakt gravitasjonsfelt slik som i solsystemet, men også for systemer med sterkt gravitasjonsfelt slike som svarte hull eller nøytronstjerner.

Under ledelse av Anne M. Archibald har en gruppe fysikere studert et system med tre stjerner kalt PSR J0337+1715 som ble oppdaget i 2014. Det består av en pulsar – en roterende nøytronstjerne med ekstremt sterkt gravitasjonsfelt – og to hvite dvergstjerner, det vil si den typen

stjerne sola kommer til å utvikle seg til når den har brukt opp grunnstoffene den kan fusjonere. De har typisk en utstrekning på størrelse med jorda. Den ene hvite dvergstjernen går i en tett bane rundt nøytronstjernen med en rundetid på bare 1,6 dager. Den andre hvite dvergen går rundt dette paret og bruker 327 dager på en runde. Hele systemet er kompakt og ville fått plass innenfor jordas bane hvis det hadde vært i solsystemet.

Ved å studere trippelstjernesystemet PSR J0337+1715 greide fysikerne å bestemme størrelsen av  $\Delta$  for dette systemet til  $\Delta = (-1,09 \pm 0,74) \cdot 10^{-6}$ . Dette betyr ifølge forskerne at det er 95 % sannsynlig at  $|\Delta| < 2,6 \cdot 10^{-6}$ .

Dette er den mest nøyaktige testen av ekvivalensprinsippet man har oppnådd for systemer med sterkt gravitasjonsfelt.

## 3. Gjelder ekvivalensprinsippet for nøytrinoer?

Den 12. juli 2018 ble det skrevet et nytt kapittel i flersignalastronomiens historie [5]. Da rapporterte en gruppe fysikere at man hadde greid å identifisere kilden til et energirikt nøytrino [6]. Kilden viste seg å være en blasar, det vil si en aktiv galaksekerne med et supermassivt svart hull i sentrum, som sendte ut en voldsom jetstrøm rett mot jorda. Galaksen er fire milliarder lysår fra jorda.

Nøytrinoet ble registrert med IceCube-detektoren på Sydpolen og hadde en energi på hele 290 tera elektronvolt. Det er en vanvittig stor energi for et nøytrino. Tera betyr  $10^{12}$ . Nøytrinoet hadde energien  $2,9 \cdot 10^{14}$  eV. Den øvre grensen for energien til et nøytrino i ro er 0,12 eV. Et nøytrino med 290 TeV har en energi lik 0,46 J, og praktisk talt all energien er bevegelsesenergi. Det er lik bevegelsesenergien til et legeme som veier 10 gram og har farten 35 km i timen. Dette nøytrinoet gikk med praktisk talt lyshastighet.

Både elektromagnetisk stråling og nøytrinoer går langsommere langt nede i et gravitasjonsfelt enn høyere oppe. Dette forlenger tiden stråling og nøytrinoer bruker fra en fjern kilde langt nede i en galakses gravitasjonsfelt og til jorda. Effekten er blitt målt for radarsignaler i solsystemet og kalles Shapiro-forsinkelsen.

Ifølge ekvivalensprinsippet skal gravitasjon virke likt på lys og alle typer legemer. Shapiro-forsinkelsen skal være den samme. Men dersom ekvivalensprinsippet ikke gjelder for nøytrinoer, vil de få en annen tidsforsinkelse på ferden fra kilden til jorda enn lys. Dette er representert ved en parameter  $p$  som har verdien null for partikler som beveger seg i overensstemmelse med ekvivalensprinsippet.

Det ble observert gammastråling fra blasaren i nøytrinokildens posisjon både før og etter at nøytri-

### Tidsforsinkelse og hastighet for nøytrinoet IceCube-170922A

Siden nøytrinoer har masse, beveger de seg langsommere enn lys. Dette introduserer også en tidsforsinkelse på den fire milliarder lysår lange ferden. Hvis den er større enn to uker vil det spolere testen av ekvivalensprinsippet. Det er en fin liten spesiell-relativistisk beregning som er gjennomførbar for elever i videregående skole med størst fordypning i fysikk, å regne ut denne tidsforsinkelsen. La oss se hvordan det kan gjøres.

Myon-nøytrinoet IceCube-170922A hadde en observert energi  $E = 2,9 \cdot 10^{14}$  eV. Sammenhengen mellom denne energien og nøytrinoets hvileenergi  $E_0$  er

$$E = \gamma E_0, \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \quad (9)$$

der  $v$  er dets observerte hastighet. Kilden til nøytrinoet ble identifisert som en blasar i avstanden  $s = 4$  milliarder lysår fra jorda. Dersom vi antar at nøytrinoet og lys har samme Shapiro-forsinkelse på ferden fra blasaren til jorda, og at de startet samtidig, er forskjellen i ankomsttid

$$\Delta t = \left( \frac{1}{v} - \frac{1}{c} \right) s. \quad (10)$$

Følgelig er

$$\gamma = \frac{1 + \frac{c\Delta t}{s}}{\sqrt{\left(1 + \frac{c\Delta t}{s}\right)^2 - 1}}. \quad (11)$$

noet ble registrert. Man vet ikke hvilket tidspunkt som skal velges som nøytrinoets sendertidspunkt. Kanskje da gammastrålingen var på det mest intense? Fysikerne har derfor ut fra variasjonen i gammastrålingen vurdert at usikkerheten i forskjell på tiden nøytrinoet og gammastrålingen har brukt fra blasaren til jorda er mellom én og to uker.

I to preprints publisert henholdsvis 15. og 17. juli [7, 8] har forskere beregnet en øvre grense av  $p$  med en tidsforsinkelse på to uker. Det ga  $p < 10^{-6}$ . Dette er tusen ganger mer nøyaktig enn tilsvarende tester av om ekvivalensprinsippet gjelder for nøytrinoer sendt ut fra supernovaen SN1987A som skyldtes en eksploderende stjerne i Den store magellanske sky i utkanten av Melkeveien.

### Et mål for forskjellen mellom relativitetsteorien og andre teorier

Den spesielle relativitetsteorien dreier seg om fysikk i såkalt flat romtid, det vil si der romtiden ikke har noen krumning. Dette kalles

Siden  $c\Delta t \ll s$  kan vi bruke tilnærmelsen

$$\gamma \approx \frac{s}{\sqrt{2}c\Delta t}. \quad (12)$$

Det følger at den relative forskjellen mellom nøytrinoets hastighet og lyshastigheten er

$$\frac{c-v}{c} \approx \frac{c\Delta t}{s + c\Delta t} \approx \frac{c\Delta t}{s}. \quad (13)$$

Ved å sette likning (12) inn i (9) fås

$$\Delta t = \frac{s}{\sqrt{2}c} \frac{E_0}{E}. \quad (14)$$

Innsetting av  $E_0 = 0,12$  eV gir  $\Delta t < 37$  s. Følgelig behøver vi ikke være engstelige for at forskjellen i nøytrinoets og den elektromagnetiske strålingens hastighet på grunn av nøytrinoets hvilemasse, skal ødelegge testen av ekvivalensprinsippet.

Årsaken til at forskjellen i tid er så liten til tross for at ferden har vart i fire milliarder år, er at det energirike nøytrinoet har en hastighet som er ekstremt nær lyshastigheten. Innsetting av uttrykket (14) i (13) gir

$$\frac{c-v}{c} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{E_0}{E}. \quad (15)$$

Med  $E_0 < 0,12$  eV og  $E = 2,9 \cdot 10^{14}$  eV fås  $(c-v)/c < 3 \cdot 10^{-16}$ .

Minkowski-romtiden. Ved å benytte tiden målt på en standardklokke i ro som tidkoordinat  $t$  og kartesiske romlige koordinater  $x$ ,  $y$  og  $z$ , tar den pytagoreiske regneregelen for avstanden mellom to hendelser i romtiden  $ds$  med koordinatavstander  $dt$ ,  $dx$ ,  $dy$  og  $dz$  formen

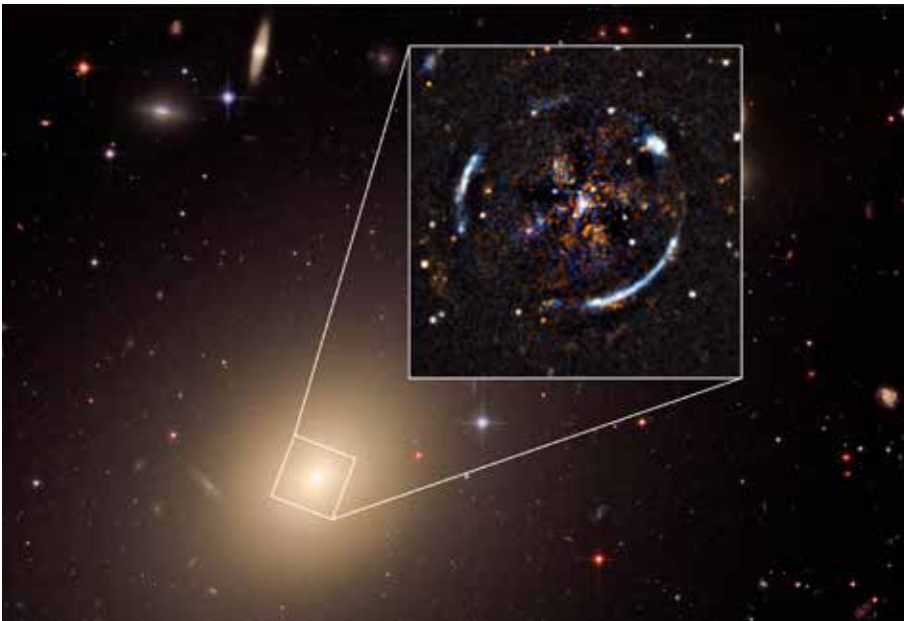
$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2. \quad (16)$$

Uttrykket (16) kalles *linjeelementet*.

I en romtid med liten krumning kan linjeelementet ifølge den generelle relativitetsteorien skrives

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2\phi}{c^2}\right)(dx^2 + dy^2 + dz^2) - \left(1 + \frac{2\phi}{c^2}\right)c^2 dt^2, \quad (17)$$

der  $\phi$  er det Newtonske gravitasjonspotensialet. «Liten krumning» innebærer at  $|\phi/c^2| \ll 1$ . I mange alternative teorier for rom, tid og gravitasjon kan linje-elementet skrives



**Figur 2.** Galaksen ESO325-G004 virker som en gravitasjonslinse. Det lille bildet viser et fotografi tatt med Hubble romteleskopet av en einsteinring som er et gravitasjonslinsebilde av en bakenforliggende galakse. (Foto: ESO)

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2\psi}{c^2}\right)(dx^2 + dy^2 + dz^2) - \left(1 + \frac{2\phi}{c^2}\right)c^2 dt^2, \quad (18)$$

der  $\psi$  er et teoriavhengig gravitasjonspotensial som avviker litt fra det Newtonske potensialet.

Forskere som tester relativitetsteorien mot alternative teorier, har utviklet en formalisme som inneholder mange parametere. En av dem er forholdet mellom de to potensialene,  $\kappa = \phi/\psi$ .

#### 4. Tester av relativitetsteorien på galaktisk skala

Frem til 2018 har det vært store systematiske usikkerheter i forsøkene på å bestemme verdien av  $\kappa$  på galaktisk skala. I en studie [9] av den gravitasjonelle linse-effekten knyttet til 80 galakser med avstander fra 1,3 til 7,8 milliarder lysår, fant man at  $\kappa = 0,995 \pm 0,04$  (statistisk)  $\pm 0,26$  (systematisk) med 68 % sikkerhet. Her er to typer usikkerhet. Den statistiske usikkerheten kommer fra unøyaktigheter i målingene, mens den systematiske usikkerheten kommer fra mangel på kunnskaper om objektet som studeres. Forfatterne av denne studien skriver at den systematiske usikkerheten er mye større enn den statistiske fordi verdien av  $\kappa$  som undersøkelsene leder til, avhenger av antagelser om tetthetsprofilen til de galaktiske gravitasjonslinsene og banene til stjernene i galaksene. Og på så store avstander som disse gravitasjonslinsene har, er det ikke mulig å bestemme massefordelingen i galaksene og stjernenes bevegelser ved hjelp av observasjoner.

I en artikkel [10] publisert i *Science* 22. juni 2018 har en gruppe forskere rapportert om tilsvarende undersøkelser basert på observasjoner av en

galaktisk gravitasjonslinse som bare er 450 millioner lysår fra jorda.

I figur 2 ser vi en einsteinring som er gravitasjonslinsebildet av en bakenforliggende galakse, hele 8,3 milliarder lysår fra jorda, forårsaket av gravitasjonslinsen ESO325-G004. Forskerne skriver at den relativt lille avstanden til gravitasjonslinsegalaksen gjorde det mulig å bestemme bevegelsen av stjerner i denne galaksen. De brukte nye instrumenter på European Southern Observatorys Very Large Telescope i Chile til å kartlegge hastigheten av stjerner i linsegalaksen med en romlig oppløsning på 500 lysår. Dermed kunne de beregne massefordelingen i den, og videre radien til einsteinringen ifølge Einsteins relativitetsteori. Dette resultatet kunne så sammenliknes med fotografiet i figur 2.

Radien beregnet fra Einsteins teori og linsegalaksens massefordeling viste seg å stemme overens. Resultatet for denne gravitasjonslinsen hadde mye mindre systematisk usikkerhet enn for de fjernere 80 galaksene i den tidligere undersøkelsen. Fortsatt dominerte den systematiske usikkerheten over den statistiske, men nå var den sunket til 8,8 %. Forskerne kunne dermed oppgi resultatet som  $\kappa = 0,97 \pm 0,09$  med 68 % sikkerhet.

Førsteforfatteren Thomas E. Collett av *Science*-artikkelen er blitt intervjuet. Han sier: «Vårt resultat viser at hvis det eksisterer avvik fra generell relativitetsteori, kan de ikke ha noen merkbar virkning på galaktisk skala.» Dette betyr at det å bortforklare den mørke materien som de galaktiske rotasjonskurvene tyder på, ved hjelp av en modifisert gravitasjonsteori [11], er svekket. Den nye undersøkelsen representerer ikke bare den første nøyaktige bekreftelsen av Einsteins teori på galaktisk skala, den styrker også troen på at antagelsen om eksistensen av mørk materie er korrekt. ►

### 5. Gravitasjonell rødforskyvning fra stjerne nær Melkeveiens supermassive svarte hull

I en artikkel publisert i *Astronomy & Astrophysics* 26. juli 2018 har en gruppe fysikere rapportert om en ny test av den generelle relativitetsteorien [12]. De har i 26 år observert en stjerne kalt S2 som beveger seg i en elliptisk bane med periode på 16 år, rundt det fire millioner solmasser store supermassive svarte hullet i Melkeveiens sentrum (figur 3). For å kunne sile ut lyset fra én stjerne i det tettpakkede området ved Melkeveiens sentrum kombinerte forskerne informasjon fra fire teleskoper i Very Large Telescope Array i Atacamaørkenen i Chile.

Et av målene med den langvarige observasjons-serien var å undersøke hvordan den gravitasjonelle rødforskyvningen til lys avhenger av stjernens avstand fra det svarte hullet. Ved å sammenlikne måleresultatene med forutsigelsen fra Einsteins relativitetsteori ville man oppnå en test av teorien under omstendigheter der den ikke tidligere er blitt testet.

Stjernens minste avstand fra sentrum av det svarte hullet var 1400 ganger radien av hullet, det vil si fire ganger avstanden mellom sola og Saturn. I denne avstanden har stjernen en hastighet på 7650 km/s. Dette betyr at man måtte ta hensyn til både den hastighetsavhengige frekvensfor-

**Figur 3.** Illustrasjon av stjernen S2 som passerer det supermassive svarte hullet i Melkeveiens sentrum. (Illustrasjon: ESO)



skyvningen fra den spesielle relativitetsteorien og den gravitasjonelle frekvensforskyvningen fra den generelle relativitetsteorien da man beregnet den relativistiske forutsigelsen. Så begge teoriene ble testet.

En parameter som har verdien null for Newtons gravitasjonsteori og én for Einsteins teori, fikk verdien  $0,90 \pm 0,09$  (statistisk)  $\pm 0,15$  (systematisk). Igjen besto relativitetsteorien testen.

#### Er det nødvendig fortsatt å teste relativitetsteorien?

Relativitetsteorien er nå godt og vel hundre år gammel, og både den spesielle- og den generelle relativitetsteorien har vært testet utallige ganger. Så hvorfor holder fysikerne fortsatt på med å teste teorien, og hvorfor aksepterer de mest prestisjefylte journalene, *Nature* og *Science*, artikler som rapporterer om nye tester av relativitetsteorien? Vi finner ikke nye artikler som rapporterer om tilsvarende tester av Newtons gravitasjonsteori.

I sammenheng med tester av teoriene, er en viktig forskjell på Newtons og Einsteins teori hva vi vet om teorienes gyldighetsområde. Gyldighetsområdet av Newtons teori er et underområde av gyldighetsområdet av Einsteins teori. Newtons teori gjelder for områder med svake gravitasjonsfelter og for objekter med lave hastigheter, dvs. hastigheter mye mindre enn lyshastigheten. Det er svake gravitasjonsfelter der avstanden fra et svart hull er mye større enn det svarte hullets radius. Her gjelder også Einsteins teori. Den

generelle relativitetsteorien inneholder Newtons gravitasjonsteori.

Vi har imidlertid ikke en komplett og sikker kunnskap om relativitetsteoriens gyldighetsområde. Fysikerne jakter på en kvantegravitasjonsteori og forventer at den inneholder relativitetsteorien i grensen hvor tidsintervaller og romlige dimensjoner er mye større enn planckdimensjonene, og at den inneholder kvanteteorien når gravitasjonskonstanten settes lik null.

En grense for relativitetsteoriens gyldighetsområde finner vi i møtet med kvanteteorien. I dette møtet defineres Planck-tiden og Planck-lengden,

$$t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}, \quad l_p = ct_p, \quad (19)$$

der  $\hbar = h/2\pi$  er den reduserte Planck-konstanten. Innsetting av tall gir  $t_p = 5,4 \cdot 10^{-44}$  s og  $l_p = 1,6 \cdot 10^{-35}$  m.

Men kanskje eksisterer flere grenser for gyldighetsområdet av relativitetsteorien ikke bare mot de ørsmå Planckdimensjonene, men også mot områder med store dimensjoner. For eksempel har det vært spekulert på om relativitetsteorien ikke gjelder på galaktisk skala. Man har prøvd å forklare bort galaktisk mørk materie ved å konstruere en modifisert Newtonsk gravitasjonsteori, der gravitasjonskraften er svakere i områder med svært liten tyngdeakselerasjon, for eksempel i utkanten av galaksene, enn den Newtonske gravitasjonen.

Siden Newtons teori er inneholdt i Einsteins, må det være slik at hvis man har vist at Einsteins teori er korrekt på galaktisk skala, så er også Newtons teori det. Testen av generell relativitetsteori på galaktisk skala er derfor svært viktig, og styrker antagelsen om at det eksisterer store mengder mørk materie i galaksene.

Når det gjelder tester av relativitetsteorien i solsystemet, så dreier det seg først og fremst om større presisjon enn tidligere, og det er rimelig å sette strek ved de resultatene som er oppnådd nå med de nye MESSENGER-dataene.

Test to og fem dreier seg om å teste relativitetsteorien i sterke gravitasjonsfelt. Det har ikke vært gjort før, og kunne ha ført til en falsifisering av teorien. Slike tester er viktige. Vi kan nå i sterkere grad enn tidligere stole på at Einsteins teori er korrekt også i områder med sterke gravitasjonsfelt.

Nøytrino-testen er også ny. Det er vist at nøytrinoer reagerer på gravitasjon på samme måte som lys slik det skal ifølge ekvivalensprinsippet. Viktig informasjon – mer om nøytrinoer enn om relativitetsteorien.

For utviklingen av fysikken er nye tester av relativitetsteorien viktigere enn gamle tester med stadig økende presisjon. Jo større del av relativitetsteoriens gyldighetsområde vi blir kjent med, desto mer slagkraftige konsekvenser av teorien kan vi trekke. Nye tester på stor skala er derfor viktige – ikke minst sett i lys av at våre universmodeller forutsetter gyldigheten av generell relativitetsteori på kosmisk skala. ■

## Referanser

1. A. Genova og andre. «Solar system expansion and strong equivalence principle as seen by the NASA MESSENGER mission». *Nature Communications* 9:289 (2018).
2. Ø. Grøn. «Ny test av ekvivalensprinsippet». *Fra Fysikkens Verden* nr. 1, s. 10–11 (2018).
3. Utledning av uttrykket finnes på: [https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational\\_binding\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_binding_energy)
4. A.M. Archibald og andre. «Universality of free fall from the orbital motion of a pulsar in a stellar triple system». *Nature* 559, s. 73–76 (2018).
5. IceCube Collaboration. «Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A». *Science* 361, 146 (2018).
6. Ø. Grøn. «En ny æra: Flersignalastronomi». *Astronomi* nr. 1, s. 30–47 (2018).
7. R. Laha. «Constraints on neutrino speed, weak equivalence principle violation, Lorentz invariance violation, and dual lensing from the first high-energy astrophysical neutrino source TXS 0506+056». arXiv:1807.15621.
8. J.J. Wei og andre. «Multimessenger Tasts of Einstein's Weak Equivalence Principle and Lorentz Invariance with a High-energy Neutrino from a Flaring Blazar». arXiv:1807.06504.
9. S. Cao. «Test of parametrized post-Newtonian gravity with galaxy scale strong lensing systems». *The Astrophysical Journal* 835:92 (2017).
10. T.E. Collett og andre. «A precise extragalactic test of General Relativity». *Science* 360, s. 1342–1346 (2018).
11. S.O. Sørensen. «Mørk materie». *Fra Fysikkens Verden* nr. 3, s. 57–67 (1990).
12. GRAVITY Collaboration. «Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole». *Astronomy & Astrophysics* 615, L15 (2018).

Husk å melde adresseendring til  
[nfs.styret@gmail.com](mailto:nfs.styret@gmail.com)

# Termodynamikk for svarte hull



**Figur 1.** Et sort hull.  
(Illustrasjon: NASA)

**Her presenteres diskusjonen mellom Jacob Bekenstein og Stephen Hawking angående entropi til et svart hull, og hvordan den med bidrag blant andre fra de russiske forskerne Yakov Zel'dovich og Alexander Starobinsky, ledet til Hawkings store oppdagelse, at svarte hull sender ut stråling.**

**Øyvind G. Grøn** OsloMet – storbyuniversitetet

Fysikkens historie har flere eksempler på at tilsynelatende absurde ideer markerer starten på en utvikling innenfor teoretisk fysikk som leder til ny innsikt om materiens egenskaper og oppførsel. Et eksempel er at observatører som beveger seg i forhold til hverandre, måler den samme hastigheten for et lyssignal. Dette var starten på en ti år lang utvikling som kulminerte med Einsteins presentasjon av den generelle relativitetsteorien i 1915.

## Innledning

Denne artikkelen beskriver hvordan den israelsk-amerikanske fysikeren Bekensteins idé om at svarte hull har en entropi, la grunnlaget for en termodynamikk for svarte hull og ledet til Hawkings store resultat: at svarte hull sender ut stråling. Stephen Hawking er kjent for *FFV* sine lesere [1]. Denne artikkelen dreier seg om en berømt diskusjon mellom Stephen Hawking og den fem år yngre Jacob Bekenstein som foregikk i årene 1972–1974.

Bekenstein ble født i 1968 i Mexico City. Han var sønn av jøder som hadde emigrert fra Polen.

I 1968 var Bekenstein student i USA og hadde fra da av både amerikansk og israelsk borgerskap. Arbeidet som gjorde ham kjent, dreide seg om termodynamikk for svarte hull og ble presentert i doktoravhandlingen hans i 1972. Den var utarbeidet med John A. Wheeler som veileder – fysikeren som innførte betegnelsen svarte hull. I flere senere artikler utviklet Bekenstein den termodynamiske teorien for svarte hull videre. Bekenstein emigrerte til Israel i 1974 der han var professor i fysikk fra 1990. Han mottok Wolfprisen i 2012 og American Physical Society sin Einsteinpris i 2015. Bekenstein døde i 2015 i Helsinki, 68 år gammel, rett før han skulle holde en gjesteforelesning der.

Entropien for svarte hull betegnes i dag Bekenstein-Hawking-entropi, og uttrykket for denne entropien (likning (6) nedenfor) er en ikonisk kombinasjon av gravitasjonskonstanten  $G$ , Boltzmanns konstant  $k$ , lyshastigheten  $c$  og Plancks konstant  $h$ , som forteller om en dyp sammenheng mellom gravitasjon, termodynamikk, relativitetsteori og kvantemekanikk.

Fysikeren Kip Thorne var en av Stephen Hawkings gode venner. I kapittel 12 i den glimrende boken *Black holes and time warps* [2] skriver han om hvordan Hawking (figur 2) i 1970 i et glimt av inspirasjon innså en fundamental egenskap ved svarte hull. Når to svarte hull slår seg sammen øker deres overflateareal. Det samme skjer når et svart hull trekker til seg masse. Hawking tenkte: Arealet til et svart hull vil alltid øke, for arealet er

proporsjonalt med dets masse, og et svart hull kan ikke gi fra seg masse siden det ikke er mulig for noe å komme ut av et svart hull.

Hawking la i november 1970 merke til den bemerkelsesverdige likheten mellom termodynamikkens 2. lov og loven han hadde bevist om at overflatearealet til et svart hull ikke kan avta. Men det var opplagt for ham at denne likheten bare var et sammentreff.

Et år senere, på den andre siden av Atlanterhavet, tenkte Bekenstein (figur 2) på analogien mellom termodynamikkens lover og de lovene som gjelder for svarte hull.

### Svarte hull og brudd på termodynamikkens 2. lov

I en artikkel [3] publisert i *Physics Today* skrev Bekenstein om hvordan tanken om en entropi knyttet til svarte hull oppsto. Det startet i en samtale med hans mastergradsveileder Wheeler i 1971. De snakket om termodynamikkens 2. lov. Ved enhver prosess vil summen av entropien i universet øke. I slike sammenhenger er det nok å betrakte universet som bestående av to deler: det svarte hullet og omgivelsene. Da sa Wheeler: «Hva skjer med entropien dersom han mister tekoppen sin inn i et svart hull som passerer? Teen har en entropi som representerer antall mikroskopiske tilstander som kan realisere teens makroskopisk tilstand med den massen og temperaturen som den har. Sluttstanden er et litt større svart hull og ingen te. Har teens entropi forsvunnet inn i det svarte hullet og blitt borte? Dette ville i så fall være et brudd på termodynamikkens 2. lov.»



**Figur 2.** Stephen Hawking (1942–2018) og Jacob Bekenstein (1947–2015). (Foto: Intel Free Press og Wikipedia Commons)

Spørsmålet fascinerte Bekenstein umåtelig. Termodynamikk for svarte hull ble hans livslange forskningsprosjekt.

### Bekensteins forsøk på å redde termodynamikkens 2. lov

Teoremet med at det ikke finnes fysiske prosesser som kan minske overflatearealet til et svart hull ble en nøkkel til å komme videre til tross for at dette senere viste seg ikke å stemme. Bekenstein tenkte at for å redde termodynamikkens 2. lov måtte svarte hull ha en entropi, og siden overflateareal til svarte hull øker var det naturlig å anta at entropien til et svart hull er proporsjonal med dets overflateareal.

Den 22. mai 1972 sendte Bekenstein inn en artikkel til det italienske tidsskriftet *Nuovo Cimento Lettere* som ble publisert 12. august [4], der han forsvarte denne hypotesen. Han skrev her: Vi formulerer termodynamikkens 2. lov på følgende måte: «Vanlig entropi pluss svart-hull-entropi avtar aldri.» Med «vanlig entropi» menes entropien utenfor et svart hull. Med svart-hull-entropi,  $S_{\text{BH}}$ , menes

$$S_{\text{BH}} = \eta k (A/L_p^2), \quad (1)$$

der  $\eta$  er en dimensjonsløs konstant av størrelsesorden 1,  $k$  er Boltzmanns konstant,  $L_p = (\hbar G/c^3)^{1/2} = 1,6 \cdot 10^{-35}$  m er Planck-lengden, og  $A$  er overflatearealet av det svarte hullet. Innsetting for  $L_p$  i likning (1) gir

$$S_{\text{BH}} = \frac{\eta k c^3}{\hbar G} A \quad (2)$$

der  $\hbar = h/2\pi$  er den reduserte Planck-konstanten.

### Hawkings reaksjon på Bekensteins forslag

I sin bok *Univers uten grenser* [5] skriver Hawking om hvordan han reagerte på Bekensteins forslag: «Dette forslaget så ut til å hindre at termodynamikkens andre lov ble brutt i de fleste situasjoner. Men her fantes en fatal feil. Hvis et svart hull har entropi, må det også ha en temperatur. Men et legeme med en viss temperatur må sende ut en viss stråling ... Dermed bør svarte hull sende ut stråling. Men per definisjon er de svarte hullene objekter som ikke sender ut noe som helst. Det så derfor ut til at arealet til overflaten av et svart hull ikke kunne oppfattes som hullets entropi.»

Tanken om at et svart hull skulle ha en entropi virket absurd på Hawking. Ifølge Ludwig Boltz-

mann er entropien til et system et mål på antall mikroskopiske tilstander som kan realisere dets makroskopiske tilstand, karakterisert ved trykk, volum og temperatur. Men et svart hull hadde ingen mikrotilstander. Det har kun tre egenskaper: masse, spinn og ladning.

Hawking var villig til å gi opp termodynamikkens 2. lov. På den tiden mente Hawking at vi bare må akseptere at eksistensen av svarte hull innebærer muligheten av å minske universets entropi. Videre argumenterte Hawking med at dette bruddet på termodynamikkens 2. lov slett ikke var så alvorlig. Han sa at det bare er en liten merkverdighet i fysikkens lover – noe vi kan leve lykkelige videre med.

Dette var langt fra slik Bekenstein følte det. Han beregnet fra likning (1) at entropien av et svart hull med en solmasse er av størrelsesorden  $10^{55}$  J/K. Bekenstein hevdet at dette betyr at det må være noe inni et svart hull som kan være i ulike mikroskopiske tilstander, og antall slike mikroskopiske tilstander er enormt stort.

På sommerskolen i Le Houches i 1972 ble svarte hull diskutert. Nesten alle fysikerne unntatt Bekensteins veileder, Wheeler, var enige med Hawking. Ved seminaret slo James Bardeen, Brandon Carter og Stephen Hawking seg sammen og utarbeidet en artikkel som sammenfattet resultatet av deres studier av svarte hull under seminaret. Den ble publisert i 1973 med tittelen «The Four Laws of Black Hole Mechanics» [6].

De fire lovene er:

0. Tyngdeakselerasjonen (surface gravity  $\kappa$ ) er den samme over alt på overflaten av et svart hull.
1. Sammenhengen mellom en liten endring  $dA$  av overflatearealet,  $dM$  av massen, og  $dL$  av spinnen til et roterende svart hull er

$$\frac{\kappa}{8\pi G} dA = dM - \Omega dL, \quad (3)$$

der  $G$  er Newtons gravitasjonskonstant og  $\Omega$  er vinkelhastigheten til det svarte hullet.

2. Overflatearealet til et svart hull kan ikke avta,  $dA \geq 0$ .
3. Det er ikke mulig å redusere tyngdeakselerasjonen på overflaten av et svart hull til null.

Termodynamikkens fire lover er:

0. Dersom to systemer er i termisk likevekt

med et tredje, er de i termisk likevekt med hverandre.

1. Energi kan verken skapes eller forsvinne, bare endre form. Termodynamikkens 1. lov for en ideal gass sier: Tilført varme  $dQ$  er lik endring i indre energi  $dU$  pluss volumarbeid,  $pdV$ :  $dQ = dU + pdV$ .
2. Entropien til et isolert system kan ikke avta,  $dS \geq 0$ .
3. Entropien til et system nærmer seg en konstant minimumsverdi når den absolutte temperaturen nærmer seg null. Det finnes en alternativ formulering: Det er ikke mulig å redusere den absolutte temperaturen av et system til null.

Vi ser at det er en likhet mellom de fire lovene i de svarte hullenes mekanikk og termodynamikkens fire lover. Dette styrket Bekensteins tro på at svarte hull må ha entropi.

I termodynamikken defineres ofte en entropiendring av et system med absolutt temperatur  $T$  som  $dS = dQ/T$ . Varmen er da  $dQ = T dS$ . Ved å sammenlikne likningene (1) og (3) og bruke at  $E = Mc^2$  fås

$$T dS = \frac{\eta k T}{L_p^2} dA = \frac{\kappa c^2}{8\pi G} dA. \quad (4)$$

Dette innebærer at et svart hull må ha en temperatur

$$T_{\text{BH}} = \frac{c^2 L_p^2}{8\pi \eta k G} \kappa, \quad (5)$$

noe som burde bety at et svart hull må sende ut stråling. Bekenstein tok ikke dette siste skrittet.

Thorne skriver [1]: «Hvis Bekenstein hadde fulgt sin intuisjon til dens logiske konklusjon, ville han ha hevdet at et svart hull *må* ha en endelig temperatur og at det derfor *må* sende ut stråling. Da ville vi i dag sett på ham som en forbløffende profet. Men Bekenstein gikk ikke til veis ende. Også for ham var det opplagt at et svart hull ikke kunne sende ut stråling. Men han sto likevel fast på sitt forslag om at svarte hull har en entropi.»

### Stråling fra roterende svart hull

Den første som foreslo at svarte hull er i stand til å sende ut stråling, var Yakov B. Zel'dovich. Det var sommeren 1971 et år før sommerskolen i Les Houches. Kip Thorne [2] forteller at Zel'dovich hadde invitert ham til Moskva for å delta noen uker i hans forskergruppe.

Klokka halv sju en morgen ringte telefonen og vekket Thorne. Det var Zel'dovich som sa: «Kom til min leilighet, Kip! Jeg har en ny idé om roterende svarte hull.» Thorne hev på seg klærne og tok første buss til Zel'dovich. Mens barn og kone var på vei ut av døren, ba Zel'dovich Thorne komme til stuen der han hadde en liten tavle.

Det første Zeldovich sa der var: «Et roterende svart hull må sende ut stråling. Det vil være en rekyl fra strålingen som bremser ned rotasjonen til det svarte hullet, og når det ikke roterer lenger, sender det heller ikke ut noen stråling.» «Det er det mest crazy jeg noensinne har hørt», svarte Thorne.

Tre timer senere, uten håp om at de skulle bli enige, tilbød Zel'dovich Thorne et veddemål: Dersom detaljerte beregninger viser at et roterende svart hull sender ut stråling, skulle Thorne gi Zel'dovich en flaske skotsk whisky av merket White Horse, og dersom beregningene viser at et roterende svart hull ikke sender ut stråling, skulle Zel'dovich gi Thorne en flaske fin georgisk konjakk. Thorne aksepterte veddemålet.

Noen uker senere skrev Zel'dovich ned sine argumenter for at et roterende svart hull sender ut stråling i en kort vitenskapelig artikkel uten detaljerte beregninger, som ble publisert et par måneder senere.

Artikkelen ble ikke lagt merke til. Kip Thorne forteller at han skammer seg over å måtte fortelle at heller ikke han nevnte denne artikkelen av Zel'dovich på sommerskolen i Le Houche et år senere.

I september 1973 var Thorne ledsager for Hawking og hans kone Jane som var invitert av Zel'dovich til Moskva. Zel'dovich og hans master-

gradsstudent Alexander Starobinsky besøkte leiligheten der Hawkings bodde flere ganger. De hadde nå gjort beregninger som viste at et roterende svart hull sender ut stråling. En dag presenterte Starobinsky disse beregningene for Hawking.

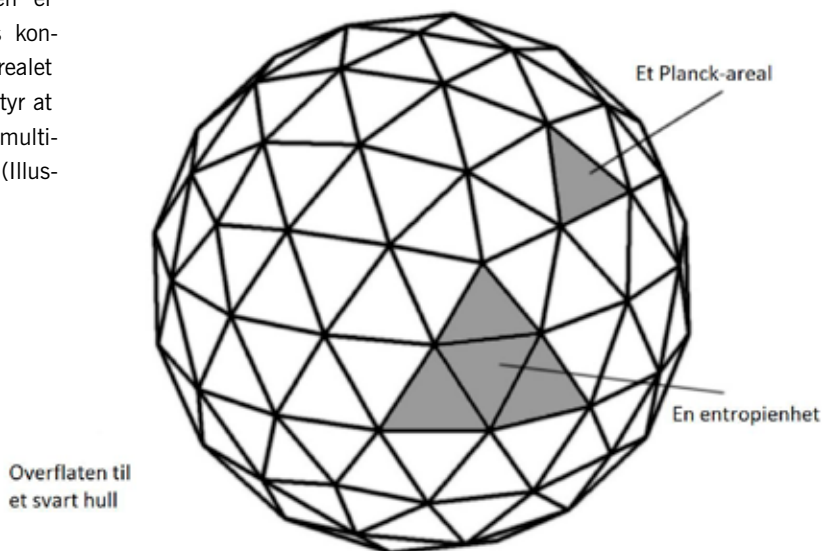
Om dette skriver Hawking [4]: «Da jeg besøkte Moskva i september 1973, diskuterte jeg svarte hull med to ledende sovjetiske eksperter, Jakov Zel'dovich og Alexander Starobinsky. De overbeviste meg om at ifølge kvantemekanikkens usikkerhetsrelasjon vil roterende svarte hull skape og sende ut partikler. Jeg trodde på argumentene deres fra fysikkens synspunkt, men jeg likte ikke den matematiske måten de beregnet strålingen på. Jeg satte meg derfor fore å finne frem til en bedre matematisk behandling.»

### Hawkingstråling

Ved juletider 1973 var Hawking i gang med å fullføre sine beregninger. Han skriver [4]: «Jeg antok at jeg ville komme frem til nettopp den strålingen Zel'dovich og Starobinsky hadde forutsagt for roterende svarte hull. Men da jeg foretok beregningen ble jeg både overrasket og irritert da det viste seg at også ikke-roterende svarte hull etter alt å dømme burde sende ut stråling. Til å begynne med trodde jeg at denne utstrålingen tydet på at en av tilnærmingene jeg hadde benyttet ikke var gangbar. Jeg var redd for at hvis Bekenstein fikk rede på dette, ville han bruke det som et ytterligere argument til støtte for sin tanke om de svarte hullenes entropi – en tanke jeg fortsatt ikke likte.»

Men videre arbeid de neste ukene overbeviste Hawking om at ikke bare roterende, men også

**Figur 3.** Bekenstein-Hawking-entropien er entropien til et svart hull: Boltzmanns konstant ganger en fjerdedel av horisontarealet med Planck-arealet som enhet. Dette betyr at entropienheten er Boltzmanns konstant multiplisert med fire ganger Planck-arealet. (Illustrasjon: Scholarpedia)



ikke-roterende svarte hull sender ut stråling. Han skrev sammen beregningene sine og sendte først ut en kortversjon av dem til *Nature* 17. januar 1974. Artikkelen ble publisert 1. mars 1974.

I siste avsnitt skriver Hawking: «Bekenstein foreslo av termodynamiske årsaker at et svart hull må ha en temperatur proporsjonal med  $\kappa$ . Men han foreslo ikke at et svart hull kunne sende ut stråling. Av denne grunn betraktet Bardeen, Carter og jeg den termodynamiske likheten mellom  $\kappa$  og temperatur bare som en analogi. Resultatet som er presentert her, tyder imidlertid på at det kan være mer i denne likheten enn dette.»

Artikkelen vakte sensasjon og vantro. Men senere beregninger utført på forskjellige måter bekreftet Hawkings resultater. Hawking viste også at  $\eta = 1/4$ . Følgelig er entropien og temperaturen av et svart hull, gitt i likningene (1) og (5)

$$S_{\text{BH}} = k \frac{A}{4L_p^2} = \frac{kc^3}{4\hbar G} A, \quad T_{\text{BH}} = \frac{c^2 L_p^2}{2\pi Gk} \kappa. \quad (6)$$

Entropien av et svart hull er lik Boltzmanns konstant ganger en fjerdedel av det svarte hullets overflateareal målt i enheter av Planck-areale (figur 3) og kalles i dag for Bekenstein-Hawking-entropien.

Et ikke-roterende og uladd svart hull har en radius

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}. \quad (7)$$

For et svart hull med én solmasse er radien 3,0 km. På overflaten av et slikt hull med masse  $M$  er tyngdeakselerasjonen

$$\kappa = \frac{GM}{R_s^2} = \frac{c^4}{4GM}. \quad (8)$$

Tyngdeakselerasjonen på overflaten av et svart hull med én solmasse er enorm,  $\kappa = 6 \cdot 10^{17} \text{ m/s}^2$ .

Temperaturen til et svart hull med masse  $M$  kan nå skrives

$$T_{\text{BH}} = \frac{c^3 \hbar}{8\pi Gk} \frac{1}{M} = 6 \cdot 10^{17} \text{ K} \frac{M_{\odot}}{M}, \quad (9)$$

der  $M_{\odot}$  er solas masse. Det vil si at svarte hull med over en solmasse har svært lav temperatur, men den er ikke null. Dette betyr at svarte hull sender ut stråling, enten de roterer eller ikke.

Når et svart hull sender ut stråling, taper det energi og dermed også masse. Dette fører til at dets overflateareal avtar. Følgelig gjelder ikke loven om at overflatearealet av et svart hull kan ikke avta. Men de andre lovene for svarte hulls mekanikk gjelder, og de har også fått en dypere betydning ved at de nå fremstår som lovene i en termodynamikk for svarte hull.

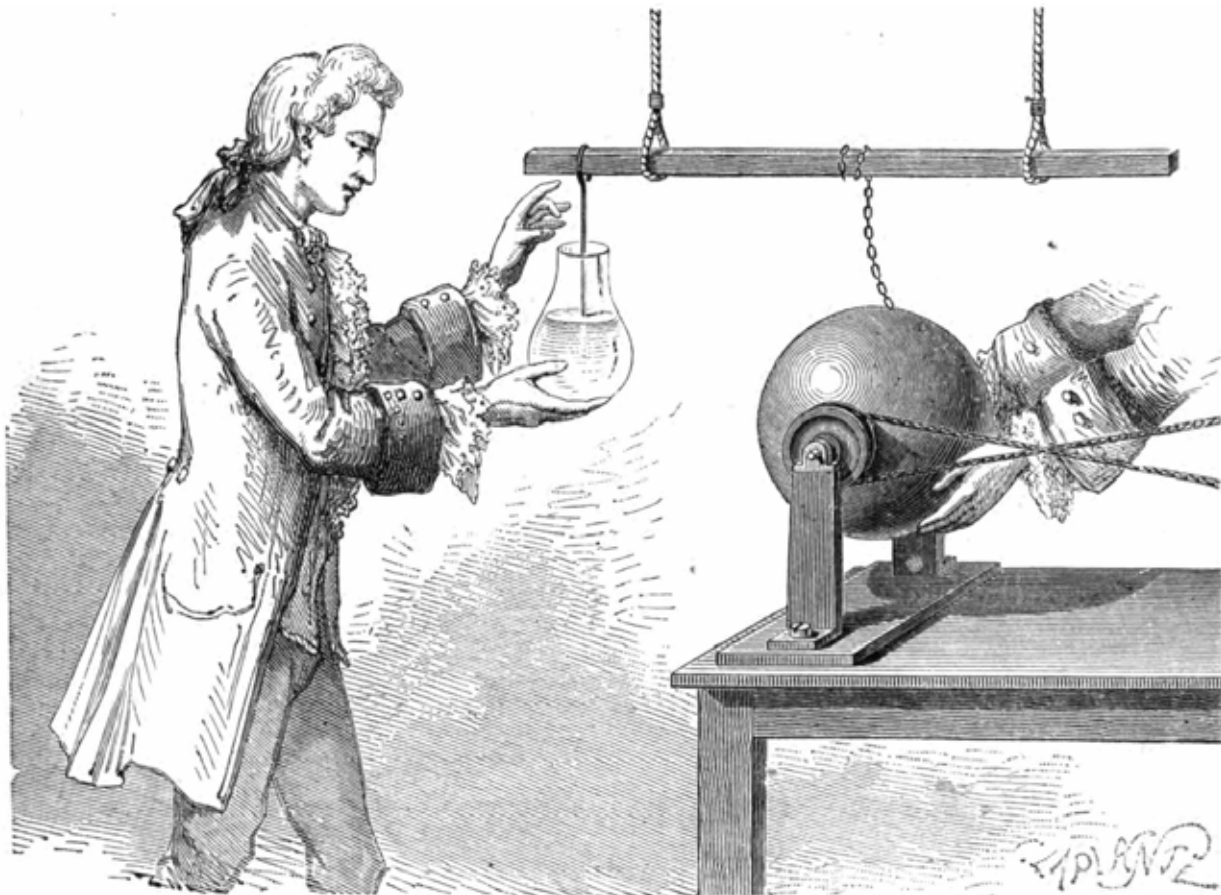
I september 1975 besøkte Kip Thorne Zel'dovich i Moskva og hadde med seg en flaske White Horse. ■

## Referanser

1. Ø. Elgarøy. «Stephen Hawking». *Fra Fysikkens Verden* nr. 2, s. 49 (2018).
2. K.S. Thorne. *Black holes and time warps*. W.W. Norton & Company, New York (1994).
3. J.D. Bekenstein. «Black-hole thermodynamics». *Physics Today* 33, s. 24–41 (1980).
4. J.D. Bekenstein. «Black Holes and the Second Law». *Nuovo Cimento Lett.* 4, s. 737–740 (1972).
5. S.W. Hawking. *Univers uten grenser*. J.W. Cappelen Forlag (1997). Førsteutgaven på engelsk kom i 1988.
6. J.M. Bardeen, B. Carter og S.W. Hawking. «The Four Laws of Black Hole Mechanics». *Communications in Mathematical Physics* 32, 161 (1973).

## Takk

Jeg vil gjerne takke Per Wethe for at han utfordret meg til å skrive en artikkel om Bekenstein-Hawking-diskusjonen om termodynamikk for svarte hull og for gode innspill til artikkelen.



## Elektrisitet på flaske

**Det er barnelærdom for oss at elektrisitet er knytt til eksistensen av positive og negative elektriske ladningar, og at like ladningar fråstøyter og ulike ladningar tiltrekker kvarandre. Utviklinga av elektrisitetslæra har gått vegen om ei flaske i Leiden.**

**Emil J. Samuelson** Institutt for fysikk, NTNU

I ettertid veit vi at det var elektrisk effekt dei gamle grekarane hadde registrert alt 600 år f.kr. ved at stykke av rav gnidd mot pels kan trekke til seg lette og tørre materialbitar, som hår og rusk. Nokon vidare innsikt i elektrisitet utvikla ikkje grekarane, men dei gav oss orda *elektron*, *elektrisk* og *elektrisitet* frå gresk *ἤλεκτρον* (elektron) og latin *ēlectrum* = «rav».

Det er interessant å lese om den historiske utviklinga som skjedde på 1600- og 1700-tallet då grunnlaget for den moderne forståelsen av elektrisitet vaks fram. Den gong som no var det ofte slik at same oppdaging og innsikt kunne komme samtidig og uavhengig av kvarandre på ulike stader. Gjennombrota skjedde ofte ved dei store vitenskapssentra i Europa, men også i miljø utan større akademisk rang.

**Figur 1.** E.G. von Kleists eksperiment med å lade opp ei flaske med væske i. Elektrifiseringsmaskinen på bordet, med kjede for rotasjon og med berøring av menneskehender. (Illustrasjon: Wikimedia commons)

### Elektrifisering ved gniding

Pionerane som utvikla elektrisitetslæra hadde det ikkje lett, for den elektrisitetstypen dei studerte, var den som oppstår ved gniding, kalla triboelektrisitet fra gresk *τριβω* (tribo) = «gnir». Fenomenet er særskilt kompleks og lar seg vanskeleg beskrive kvantitativt den dag i dag. Likevel baserer sentrale høgspenningsmaskinar seg på triboelektrisitet, med spenningar opp i mange millionar volt, som Van de Graaff-akseleratoren. Sjå også Thomson dråpegenerator [1].

Ein tidleg versjon av elektrisk generator blei laga av den tyske vitenskapsmannen Otto von Guericke (1602–1686) kring 1663 i Magdeburg. Den bestod av ein klump svovel festa til ei stong som kunne roterast og som blei elektrifisert ved at ein person tok bort i klumpen under rotasjonen. Stephen Gray (1666–1736) var ein engelsk industrimann og astronom som studerte elektrisitet, og som oppdaga at ladning kan flytte seg gjennom metall-leidningar. Han blir rekna som den første

som skilte mellom elektrisk leiande og elektriske isolerande materiale.

Viktige bidrag kom også frå Frankrike. Charles Francois du Fay (1698–1739) fann at der er to slag ladningar; eit slag oppnådd ved gniding av glass mot pels eller tekstil, og eit anna slag ved gniding av rav mot pels eller tekstil. Saman med Abbé Jean-Antoine Nollet (1700–1776) utvikla han ein teoretisk to-fluid-modell for elektrisitet av dei to ladningstypene. Nollet og du Fay blir også rekna som oppfinnarar av elektroskopet.

Ei sentral rolle hadde tyskaren Georg Mathias Bose (1710–1761), professor i Wittenberg, som (truleg tidleg på 1740-tallet) fann korleis ein kan lagre ladning i leiande materiale. Leiaren måtte vere godt isolert frå omgivnadene, til dømes med voks, og kunne då halde på betydelege ladningsmengder. Bose blei kjent for sine populære elektriske oppvisingar for publikum. Spesielt berømt blei glansnummeret «gnistrande kyss»: Han fekk jenter til å stå på eit isolerande materiale og tilførte dei ei moderat mengd ladning. Så blei menn invitert på podiet for å kysse jentene, og kysset var så heitt at det sprang gnistar mellom dei kyssande!

### Elektrisitet på flaske

Som vi skjønner var elektrisitet eit populært tema kring 1740–1750. Spesielt to namn er knytte til dette å ha elektrisitet på flaske, tyskaren Ewald Georg von Kleist og nederlandaren Pieter van Musschenbroek, begge inspirert av Bose sine

**Figur 2.** Pieter van Musschenbroek. (Bilde: Wikipedia commons)



oppdagingar. Nollet og du Fay sin fluidmodell av elektrisitet spela også ei betydeleg rolle.

Ewald Georg von Kleist (1700–1748) var frå Pommern i dagens Polen, den gong ein del av det prøyssiske kongedømmet. Von Kleist var utdanna jurist og fungerte som dekan ved katedralen i Cammin, samtidig som han var fysikar. Utdanninga var frå universitetet i Leipzig og også frå universitetet i Leiden.

Det var i oktober 1745 at von Kleist gjorde forsøk på å samle elektrisitet i ei glassflaske med alkohol. Elektrisiteten blei tilført frå ein rote-rande «elektrifiseringsmaskin» via ein Bose-type lagringselement til ei metallnål stukken gjennom korka i flaska. Tanken var at «fluidet» elektrisitet skulle blande seg i alkoholen. Etter fråkopling av kontakten til nåla fekk von Kleist erfare nokså kraftige elektriske sjokk når han heldt glasset i ei hand og rørte nåla med den andre. Resultata rapporterte han i brev til fleire eksperimentatorar han visste om, frå november 1745 til utpå våren 1746, og han fekk etter kvart tilbakemelding om at eksperimentet var blitt gjentatt andre stader. Det blei også gjort eksperiment med vatn i flaska.

Oppfinninga har i ettertid gått under namnet Leidenflaska. Det skyldest at fenomenet også blei oppdaga i Leiden, men nokre månader seinare.

Pieter van Musschenbroek (1692–1761) var vaksen opp i Leiden. Han blei professor i filosofi med faga matematikk, medisin og astronomi, først i Duisburg, så i Utrecht, og frå 1739 i Leiden. Også van Musschenbroek hadde kjennskap til Bose sine observasjonar, og han gjorde i januar 1746 saman med sin venn juristen Andreas Cuneus tilsvarande eksperiment som von Kleist, men med øl i glasset! 20. januar rapporterte van Musschenbroek resultatet til mellom anna Abbé Jean-Antoine Nollet i Paris, som gjentok eksperimentet der. Det var Nollet som gav oppdaginga namnet «Leidenflaska», og med universitetet i ryggen var det Leiden og van Musschenbroeks namn som i første omgang kom til å bli assosiert med fenomenet. Men Musschenbroek prøvde ikkje sjølv å framstå som opphavsmannen.

Mange vitskapsfolk blei sterkt interesserte i dette pussige fenomenet, og i løpet av åra 1746–1750 blei det gjort fleire viktige framsteg. I 1746 kopla Johann Henrik Winckler i Leipzig fleire flasker saman i serie og observerte at det gav større lagringskapasitet. Engelskmannen John Bevis, lege og kjent astronom, fann i 1747 at effekten blei forsterka når yttersida av flaska blei dekkja av metallfolium. William Watson i London utvida dette ved å bruke metallfolium også på innsida, og han fann at væske inne i flaska ikkje var nødvendig!

Amerikanaren Benjamin Franklin (1706–1790) er ein storkjendis i dette gamet. Han er berømt som

ein av dei fremste amerikanarane gjennom tidene, som polititar, ambassadør, avismann, skribent og vitenskapsmann. I 1748 laga han ei innretning av 11 element av samankopla blyplater med glassplater i mellom, og registrerte auke av lagringskapaisteten. Vi skjønner i dag at han eigentleg laga ein kondensator med 11 gongar større plateoverflate. Franklin tok i bruk nemninga «batteri» om dette, jamvel om det ikkje er eit elektrisk batteri slik vi bruker ordet i dag. «Batteri» er eit fransk ord avleidd av verbet *battre* = «slå», og var i bruk i militær samanheng om oppstillingar av grupper av kanonar, noko som gav stor eldkraft, og Franklin har nok tenkt på oppstillinga si som noko analogt.

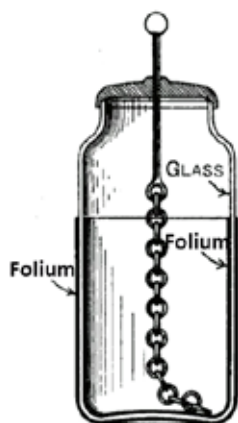
Franklin er visstnok den som innførte orda «positiv» og «negativ» om dei to typar elektrisk ladning. At «glassvarianten» blei kalla positiv og «rav-varianten» negativ er berre tilfeldig. Mange kjenner også til at Franklin blir rekna som oppfinnaren av lynavleiaren.

### Leidenflaske som kondensator

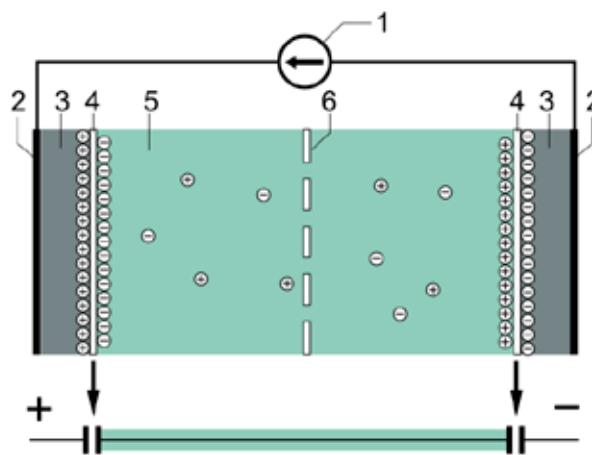
Med metallbelegg både på utsida og innsida og med kork med metalltråd igjennom og i kontakt med innsidebelegget er Leidenflaske ein bra elektrisk kondensator. Yttersida kan koplast til jord, og ladning bli tilført til innsida gjennom korka eller lokket (figur 3).

Lagringskapasitet til kondensatorar blir kvantifisert som kapasitans  $C$ , som er ladningsmengd  $Q$  per påført spenning  $V$  ( $C = Q/V$ ), med eining farad (F). Farad er ein stor eining, og fraksjonseiningane piko- ( $10^{-12}$ )-, nano- ( $10^{-9}$ ), mikro- ( $10^{-6}$ ), og milli- ( $10^{-3}$ )-farad er meir aktuelle å bruke i praksis.

Kapasitansen til ei Leidenflaske med 100 ml volum kan dreie seg om nokre nanofarad, og spenninga kan bli betydeleg, faktisk mange titusenar volt. Det er rapportert at ein matematikk lærar i Nürnberg døydde i 1750 under demonstrasjonar med ei Leidenflaske.



**Figur 3.** Leidenflaske med ytre og indre metallfolium, og metallisk gjennomføring gjennom lokket i kontakt med indre folium med metallkjede. (Illustrasjon: Wikimedia commons)



**Figur 4.** Skematisk eksempel på superkondensator. 1 – Påttrykt spenningskjelde (under lading). 2 – Kollektor av metall. 3 – Elektrodar av karbon. 4. Helmholtz dobbeltlag med + og - ladningar på kvar side av grensa. 5. Porøs elektrolytt, som aerogel med væske med + og - ion. 6. Skiljemembran. (Illustrasjon: Wikimedia commons/Tosaka)

Leidenflaske var eit viktig steg i utviklinga mot vår elektrisk-dominerte sivilisasjon av i dag, for her hadde vitenskapsfolka fått tilgang til ei elektrisitetsskjelde med kapasitet for mange nye eksperimenteringar, ei form for batteri. Typiske verdiar for kapasitans av dagens kondensatorar i elektriske kretsar er i pikofarad-området, betydeleg mindre enn i Leidenflaske, og endå mindre i mikroelektronikk.

### Superkondensatorar

Leidenflaske var ein viktig forløpar for våre dagars elektriske kondensatorar, og kunne også tjene som eit kortleva elektrisk batteri.

Elektriske batteri er eit nøkkelområde i dag, med behov i alle slags mikrodingsar, sondar, mobiltelefonar og anna berbart utstyr, i elektriske bilar og fartøy og jamvel i fly. Dagens batteri er ikkje perfekte, og ein kan med grunn spørre om ikkje store kondensatorar kunne tjene som energikjelde. Faktisk finst det eksempel på kondensatorar med ekstremt høg kapasitans, i område millifarad til tiarar av farad, kalla superkondensatorar. Ein variant utnyttar elektriske dobbeltlag i grensesjikt, kalla Helmholtz-lag, som skissert i figur 4.

Superkondensatorar leverer ikkje straum over lang tid og kan derfor ikkje fullt erstatte batteri, men kan nyttast for tilfelle der det trengst snøgg, men kortvarig straumtilførsle, som til oppstart av motorar. I elbilar prøver ein å gjenvinne energien brukt til bremsing, og i enkelte elbiltypar blir energien tilført via superkondensatorar. ■

### Referansar

1. Lars E. Helseth. «Thomsons dråpegenerator og visualisering av ladningsoverføring». *Fra Fysikkens Verden* 78 (2016) s. 84–87.

# Hundreårsminne for nobelprisvinnarar for nøytronstråleutvikling

**Bertram N. Brockhouse og Clifford G. Shull vart tildelte nobelprisen i fysikk i 1994 «for pioner-utvikling av nøytronspreiingsmetodar for studiar av fast og flytande materiale». Artikkelen gir korte framstillingar av bakgrunn for tildelinga.**

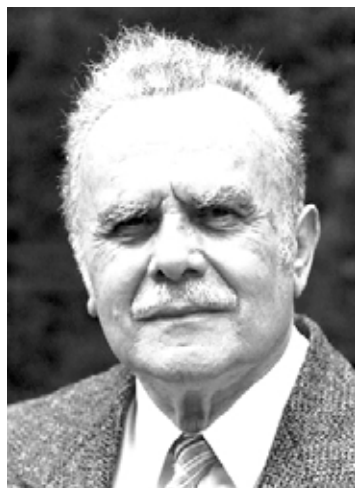
**Emil J. Samuelsen** Institutt for fysikk, NTNU

## Nøytronstrålar

Elementærpartikkelen som fekk namnet «nøytron» vart påvist i 1932 av James Chadwick. Nøytronet er elektrisk nøytralt med stor inntrengingsevne i dei fleste materiale, det har masse litt større enn hydrogenatomet, og er berar av eit magnetisk dipolmoment. Ved spaltingsprosessen av uran 238 i atomreaktorar blir nøytron med høg energi (~MeV) frigjort, men i reaktoren blir dei bremsa ned til termiske energiar (~0,01–0,1 eV) av «moderator-materiale» som grafitt, paraffin, H<sub>2</sub>O eller D<sub>2</sub>O. Energien til termiske nøytron er av same storleik som energien til typiske eksitasjonar i faste stoff, som fonon, magnon og visse elektrontilstandar.

Etter de Broglies formel for bølglengda for partikkelstrålar ( $\lambda = h/[2m_n E]^{1/2}$  hvor  $2m_n$  er nøytronmassen og  $E$  er nøytronenergien) vil termiske nøytron ha bølglengder  $\lambda$  av storleik  $10^{-10}$  m, som også er typiske atomavstandar i fast og flytande stoff. Derfor skulle nøytronstrålar

**Figur 1.** Bertram N. Brockhouse. (Foto: nobelprize.org)



kunne gi interferens- og diffraksjonseffektar som kunne gi informasjon om struktur og dynamikk, analogt med røntgenstrålar, og også kunne utnyttast spektroskopisk.

Nobelprisen blei gitt for pionerinnsatsen av Brockhouse og Shull på dette feltet i åra etter 2. verdskrigen [1], ein innsats som kom til å danne grunnlag for utviklinga av nøytronstrålar til eit uunnverleg verktøy i materialfysikken.

Verdas kraftigaste nøytronkjelde for materialforskning, eit felleseuropeiske senter kalla ESS [2], er under etablering i vårt nærrområde, Lund i Sverige, og er planlagt operativt frå 2023.

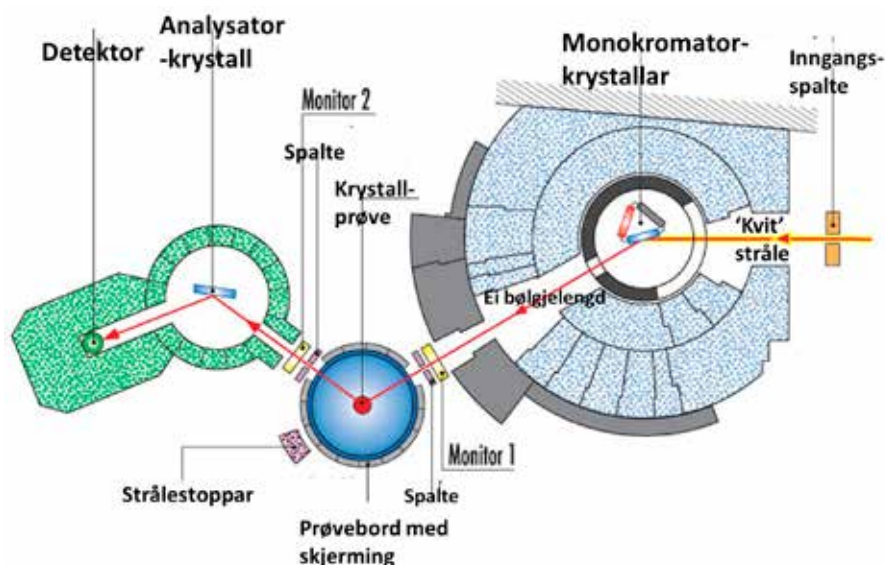
## Bertram N. Brockhouse

B.N. Brockhouse (figur 1) var kanadiar, fødd i Lethbridge i Alberta 15. juli 1918, altså for 100 år sida. Familien flytta ein del på seg, i 1926 til Vancouver, og under dei vanskelege trettiåra flytta dei til Chicago i USA i 1935. Der fekk han ingeniørutdanning ved YMCA College (seinare kalla Roosevelt University), og fekk arbeid som radioreparatør. I 1939 tok han tjeneste i Royal Canadian Navy, og var engasjert der under heile krigen som teknisk offiser.

I 1944 let Canadian Navy han bli innrullert som student i elektrisk ingeniørfag ved Nova Scotia Technical College, med tilgang til laboratoriestyr ved National Research Council i Ottawa.

Etter krigen, i september 1945, tok Brockhouse fatt på studium ved University of British Columbia på den andre sida av kontinentet, med hovudvekt på fysikk og matematikk. Med Bachelor of Science-graden i april 1947 og etter sommarjobb ved National Research Council i Ottawa blei han doktorstudent ved University of Toronto, med tema «spenningar i ferromagnetiske materiale».

Ph.D.-graden forsvarte han i 1950, og kunne etter det returnere til National Research Council, som hadde starta opp eit atomenergiprojekt i Chalk River i Ottawa. Det var her Brockhouse kom til ta opp forskning med nøytronstrålar frå reaktoren som blei bygd der, og slik utføre arbeidet som førte til nobelprisen over 40 år seinare. At nobelprisen ikkje kom før, blir av mange tolka som eit



**Figur 2.** Realistisk skisse av eit treaksenøytroninstrument. Illustrasjonen er for instrumentet IN8 ved det intereuropeiske nøytronsenteret ILL (Institut Laue-Langevin) i Grenoble [3]. Dei tre aksane er frå høgre: 1. Monokromatorakse; 2. Akse for omdreing av prøva og retning til analysator; 3. Analysator-krySTALL- og detektor-omdreingsakse. «Monitor» er detektorar i strålegangen for å kontrollere fortløpande intensitet av strålen. Spaltene avgrensar tversdimensjon av strålen. Skjerminga skal ta bort overskot av høgenergetiske nøytron- og gammastrålinga frå reaktoren. Avstanden mellom monokromatoren og prøve-materialet er typisk 1,5–2 m, og den samla vekt dreier seg om eit par tonn. (Illustrasjon: www.europeanspallationsource.se)

utslag av skepsis i vide kretsar mot atomenergi. I 1962 blei Brockhouse utnemnd til professor ved McMaster University i Hamilton, ikkje så langt frå Calk River. McMaster University hadde ein liten nøytronreaktor der Brockhouse med studentar kunne gjere innleiande arbeid før oppgavene eventuelt blei tatt til reaktoren i Chalk River for fullstendigare studium.

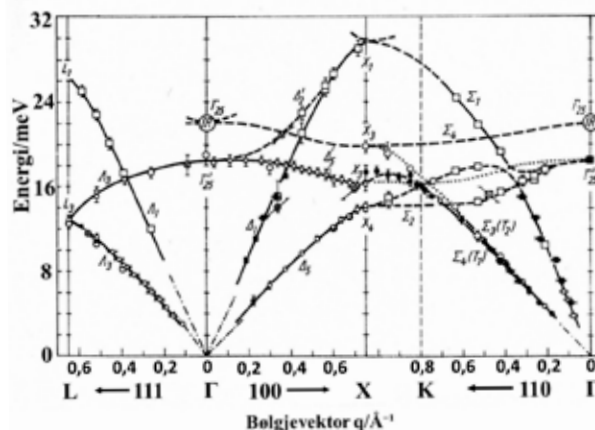
Brockhouse gjekk av for aldersgrensa i 1984. Han fanga interesse for ikkje-fysiske filosofiske emne på sine eldre dagar. Brockhouse døyde 13. oktober 2003, 85 år gamal.

### Nøytronspektroskopi

Mens kollega Shull sitt arbeid i hovudsak galdt nøytronspreiing utan energiforandring, såkalla «elastiske» prosessar, kom Brockhouse til å gjere hovudinnsetning på «uelastiske» prosessar, nemleg prosessar der nøytronet endrar energi under spreininga. Nøytronet kan kollidere med ein gittervibrasjon, eit fonon, og kan absorbere kvanteenergien til fononet som derved blir annihilert, mens nøytronet får auka energien sin (svarande til litt kortare bølgjelengd), eller eventuelt at nøytronkollisjonen kan skape eit nytt fonon og

nøytronenergien blir mindre. (Dette er analogt med Raman-spreiing av lys, med det viktige tilleggspoenget at med nøytronstråle kan også impulsoverføringa [bølgjevektor] varieras). ▶

**Figur 3.** Fonondispersjons-observasjonar på Kjeller [4] for magnetitt  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  i tre ulike retningar, markerte med rettingsindeksar på ordinataksen. Merkinga på kurvene er symmetrisymbol. Lydfarten kan bestemast frå dei rettlinja delane av dispersjonsrelasjonane. Metalloksid som magnetitt er eit aktivt forskingsfelt også i dag, og dette arbeidet blir framleis mykje sitert.



Ved å analysere energifordelinga til nøytrona etter spreingsprosessen kan ein kartlegge vibrasjonsspektret til materialet som blir studert, og det var her Brockhouse sin nobelprisinnsetning er å finne. Spesielt viktig er Brockhouses utvikling av nøytronspetroskopi-instrumenteringa som går under namnet «treaksepektrometer» eller også kalla «trippel-akse-diffraktometer», som kan skanne både i energioverføring og i bølgevektorforandring av eksitasjonane i prøvematerialet.

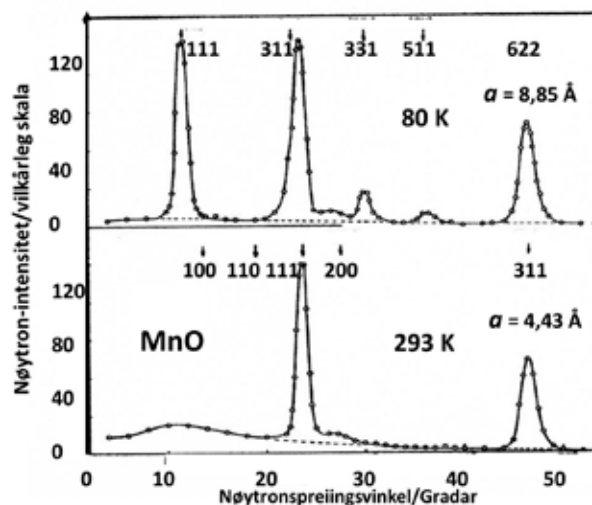
Prinsippet for treakseinstrumentet er vist i figur 2 i ei realistisk skisse. På grunn av stråling er alle elementa omgitt av solide skjermingsmateriale. Treakseinstrumentet har derfor ei totalvekt på nokre tonn.

I denne første pionertida studerte Brockhouse og medarbeidarar gitterdynamikken i ei rekke materiale som dei hadde tilgang til som einkrystallar, som metalla Al, Na, Pb, halvleiarane Ge, Si, alkaliehalida NaI, KBr, og også H<sub>2</sub>O og D<sub>2</sub>O, og magnetiske eksitasjonar i Co og Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Treakseinstrument i fleire ulike variantar blei fort installerte ved nøytronforskningsentra over alt, også ved reaktoren JEEP II ved Institutt for energiteknikk (IFE) på Kjeller. Som eksempel på observert fononspektrum viser figur 3 data for magnetitt Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> [4].

Punkta i diagrammet angir verdiar for energi og bølgevektor der signal er blitt registrert, det ein kalla for ein «dispersjonsrelasjon» for gittervibrasjonar i materialet. Lydfart i dei tre retningane kan bestemmast, og termodynamiske parameter som varmekapasitet for gitteret kan reknast ut på basis av det fulle spekteret.

Også andre eksitasjonar enn fonon blir studerte med slike instrument, sånn som det magnetiske

**Figur 4.** Clifford G. Shull. (Foto: nobel-prize.org)



**Figur 5.** Første påvising av antiferromagnetisk ordning [5]: Difraksjon av MnO under og over ordningstemperaturen på 120 K. Dei øvre rekkene av tall er «refleksjonsindeksar». a er repetisjonsavstandar.

analoge, «magnon» eller «spinnbølger», og dette kan utførast under varierende ytre vilkår som trykk, temperatur og magnetfelt, og ein har fått detaljert viten om dynamikken og mekanismen ved faseovergangar i materiale.

I dag er variantar av treakseinstrument utvikla også for bruk ved «uelastisk spreing» av røntgen (frå synkrotron-røntgen-kjelder), der også dispersjonsrelasjonar for enkelte elektroniske eksitasjonar kan studerast, også prøver som er berre nokre nanometer store.

### Clifford G. Shull

C.G. Shull (figur 4) var amerikanar, fødd i Pittsburgh 23. september 1915, altså for 103 år sidan. Han vart utdanna i Pittsburgh ved Schenley High School og ved Carnegie Institute of Technology. Doktorgradsstudiet var ved New York University (NYU) frå 1937, med disputas i 1941 på eit studium om elektronspreiing. Men han var også blitt godt kjent ved NYU med studiar av nøytronet sin verkselverknad med materiale.

Etter disputasen blei han tilsett som forskar ved ein oljebearbeidingsbedrift, Texas Company (seinare Texaco) i Beacon nær New York, med ansvar for å karakterisere katalysatormateriale med røntgendiffraksjon. Det var avgjerande viktig at han her blei godt kjent med røntgenbaserte materialstudie-metodar, som han seinare

skulle vidareutvikle for nøytronstrålar. For frå 1946 blei han engasjert i kjernefysikk-relatert forskning ved Oak Ridge National Laboratory i Tennessee, som mellom anna hadde vore ein nøkkellokalitet for Manhattan-prosjektet. Her hadde Ernest Wollan (1902–1984) tatt opp studiet av vekselverknaden med krystallinsk materiale av nøytronstrålar frå forskingsreaktorar, eit arbeid som Shull straks blei medarbeidar i, og dei kom til å samarbeide tett det neste tiåret. I nobeltalen sin beklagar Shull at Wollan ikkje kunne få sin del i nobelprisen. Wollan var frå Minnesota og hadde norske foreldre, visstnok frå Volla i Trondheim.

Clifford Shull flytta til Massachusetts Institute of Technology i 1955 der har vart professor til aldergrensa i 1986, men heldt fram med nøytronrelatert forskning også etter det. I «nøytronmiljø» overalt var han kjent som ein framifrå eksperimentator med glimrande teoretisk innsikt.

Clifford Shull døydde 31. mars 2001 og blei også 85 år.

### Nøytrondiffraksjon

Viktige resultat frå denne første tida er ikkje berre at krystallinsk stoff som NaCl gav diffraksjon med nøytron slik som med røntgen, men at nye aspekter opna seg. Å påvise lette element som hydrogen er mesta uråd med røntgen, men nøytronspreiinga er ikkje avhengig av atommassen, slik at også hydrogenhaldige strukturar kunne studerast. Nøytronspreiinga er derimot avhengig av isotop-slaget, slik at hydrogen og døyterium spreier ulikt, og dette har danna grunnlag for nøytrondiffraksjon for studiet av hydrid og organiske materiale, jamvel makromolekyl som proteinar. Eit ekstra poeng med nøytronar er at det magnetiske momentet dei har, gjer dei til eit verktøy for å studere magnetiske materiale. Figur 5 viser diffraksjonsmønstret av antiferromagneten MnO, som har overgangstemperatur 120 K mellom antiferromagnetisk tilstand under, og uordna paramagnetisk over den temperaturen. På grunn av opp-ned-alterneringa  $\uparrow\downarrow\uparrow$  av momentet på Mn-atomet i materialet blir repetisjonsavstanden fordobla for den antiferromagnetiske fasen jamført med den paramagnetiske, og nye diffraksjonssignal oppstår derfor under 120 K temperatur. Dette er den første direkte påvising av eksistensen av antiferromagnetisk ordning.

Dei første nøytrondiffraktometera var relativt små og lette instrument etter modell av røntgendiffraktometera (<10 kg), men utviklinga gjekk fort i retning av større og robustare konstruksjonar på grunn av behov for å skjerme mot mulige strålingskjelder i reaktorområdet. Treakse-instrumentet for nøytronspektroskopi (førre avsnitt) med eller utan den tredje akselen kan også fungere som diffraktometer og illustrere typiske dimensjonar for nøytroninstrumenteringa. For magnetismestudiar utvikla Shull og medarbeidarar også bruk av «polariserte nøytronstrålar», der nøytrona i strålen alle har det magnetiske dipolmomentet i same retning.

Shull var engasjert i studiar ikkje berre av krystallinske og magnetiske strukturar, men også av fundamentale nøytroneigenskapar, som nøytroninterferens i perfekte krystallar (av silisium) og diffraksjon i enkeltspalter. Han var opptatt av leve-tida for nøytronet, og han fastla nedre grense for mulig ladning og målte verdien for det magnetiske momentet for nøytronet med stor presisjon. Men nobelprisen fekk han først og fremst for utviklinga av nøytrondiffraksjon som forskingsverktøy. ■

### Referansar

1. O. Steinsvoll. «Nobelprisen i fysikk 1994». *Fra Fysikkens Verden* 56 nr. 4, s. 114 (1994).
2. K.D. Knudsen. «Europeisk nøytronkilde i Lund». *Fra Fysikkens Verden* 77 nr. 2, s. 43 (2015).
3. [www.ill.eu/user/instruments/IN8](http://www.ill.eu/user/instruments/IN8).
4. E.J. Samuelsen, O. Steinsvoll. «Low-energy phonons in magnetite». *Physica Status Solidi* 61, s. 615 (1964).
5. C.G. Shull, W.A. Strauser og E. O. Wollan. «Neutron diffraction by paramagnetic and antiferromagnetic substances». *Physical Review* 83, s. 333 (1951).

# Måling av tyngdeakselerasjonen $g$ ved hjelp av Dopplerskift

Målet med dette forsøket er å beskrive eit eksperiment der ein kan måle tyngdeakselerasjonen  $g$  ved hjelp av ein mikrofon i fritt fall vekk frå ei lydkjelde. Forsøket skal kunne utførast med enkle verktøy og forkunnskapar, slik at det skal kunne vere mogleg å gjenskape for studentar.

**Simen Hellesund** Fysisk institutt, UiO

Når den relative avstanden mellom ei kjelde og ein observatør av ein lyd endrar seg med tid, vil frekvensen  $f$  som observatøren måler, vere ein annan enn den frekvensen  $f_0$  kjelda sender ut. Denne effekten kallar me dopplereffekten. Endringa i frekvens er avhengig av den relative farten mellom kjelda og observatøren og kan bli rekna ut med formelen

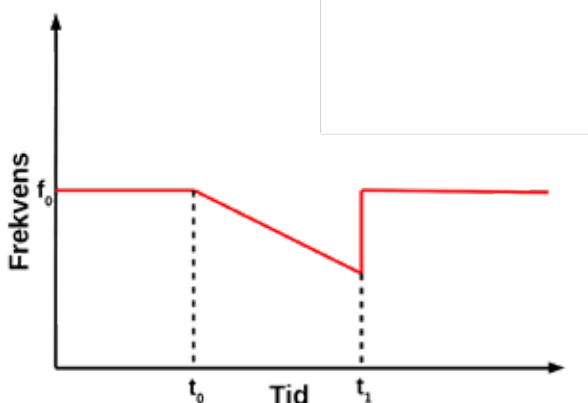
$$f = \frac{c \pm v_0}{c \pm v_k} f_0, \quad (1)$$

der  $c$  er lydfarten i mediet som lyden forplantar seg i, mens  $v_0$  og  $v_k$  er farten til observatøren og kjelda i forhold til mediet. Forsteikna i likning 1 er bestemt av om kjelda og observatøren beveger seg mot (+) eller frå (-) einannan. Likninga antek òg at rørsla til kjelde og observatør er lineær i forhold til einannan. I dette forsøket vil mediet lyden forplantar seg i, vere luft.  $c$  er difor lydfarten i luft.

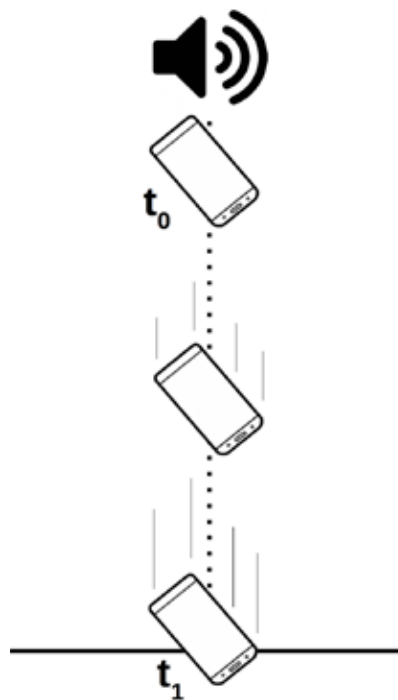
Om ein observatør er i fritt fall vekk frå ei lydkjelde i ro, vil den observerte frekvensen grunna dopplerskift vere

$$f(t) = \frac{c - gt}{c} f_0 = f_0 - \frac{g f_0}{c} t, \quad (2)$$

der  $g$  er tyngdeakselerasjonen, og  $t$  er tida sidan observatøren starta å dette. Dette er likninga for ei rett linje. Oppførselen til den målte frekvensen frå observatøren startar å dette ved tida  $t_0$  til hen



**Figur 1.** Målt frekvens som funksjon av tid av observatør som er i fritt fall vekk frå ei lydkjelde. Observatør startar å falle ved tida  $t_0$  og stoppar opp ved tida  $t_1$ .



**Figur 2.** Telefonen blir halden like under høgtalaren. Han blir deretter sleppt og dett fritt ned til golvet. Tidene  $t_0$  og  $t_1$  er markert for samanlikning med figur 1.

sluttar å dette ved tida  $t_1$  er avbilda skjematisk i figur 1.

Ein kan sjå av likning 2 at stigningstalet  $a$  til den rette linja som oppstår i frekvensutviklinga til den dettande observatøren, er proporsjonal med tyngdeakselerasjonen som

$$a = -\frac{g f_0}{c}. \quad (3)$$

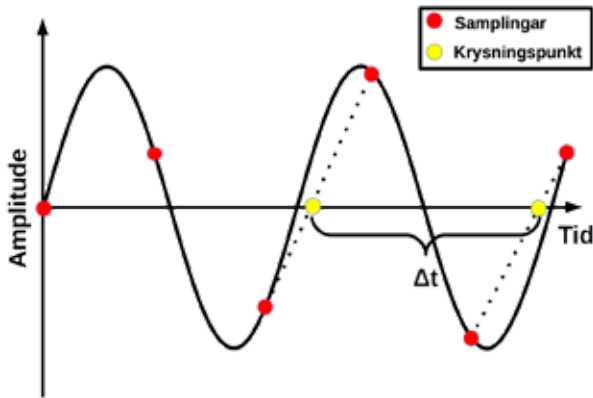
## Eksperiment

Forsøket som er utført her er ei gjenskaping av det som står beskrive i [1].

Forsøket vart utført i eit lydtempa rom på Fysisk institutt ved Universitetet i Oslo. Det er nok ikkje naudsynt for forsøket å ha eit slikt rom tilgjengeleg, men ein bør prøve å eliminere bakgrunnsstøy så mykje som råd.

Ein høgtalar kopla til ein signalgenerator vart plassert i taket på rommet, om lag 2 meter over golvet. Høgtalaren vart sett til å sende ut ei konstant sinusbølge på 2000 Hz.

Ein smarttelefon med ein applikasjon for innspeling vart brukt som observatør. Telefonen vart sett til å ta opp lyd med ei samplingsfrekvens på 44100 Hz. Telefonen vart halden like under høgtalaren før han fekk dette i fritt fall ned til golvet. Dette er skjematisk framstilt i figur 2. Lydfilene vart lagra i .wav-format. Dette formatet gjer det enkelt å analysere innsamla data. I dette forsøket



**Figur 3.** Nullkryssingsmetoden. Den svarte kurva er lyd-signalet som vert utsendt av kjelda. Dei raude punkta viser samplingspunkta som vert gjort av telefonen. Dei gule punkta er nullkryssingspunkta som vert brukt til å fastslå frekvensen til signalet.

vart analysen utført i programmeringsspråket Python. På lydopptaket kan ein klart høyre at frekvensen endrar seg på grunn av dopplerskift.

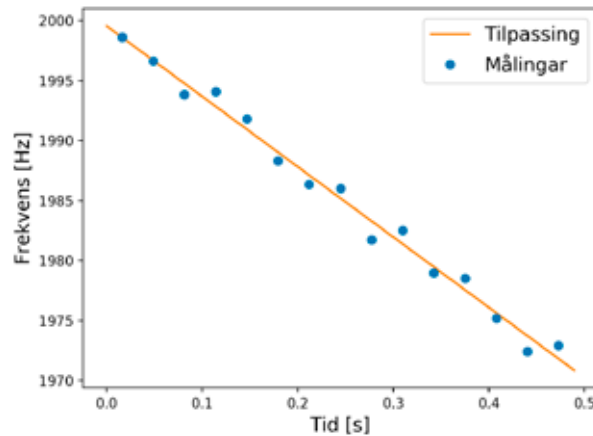
Lydfarten i lufta vart estimert ved å ta temperaturen i rommet for så å slå opp verdien i ein tabell. I dette forsøket vart  $c = 345,8 \text{ m/s}$  brukt.

### Måling av frekvens

Sidan me vil gjere ei tilpassing til frekvensen på lydopptaket, treng me ein metode for å måle frekvens. Dette er ikkje så uproblematisk som det kanskje synest ved første augekast. Lydfila som vart spelt inn på mobilen, inneheld i første rekke berre informasjon om utslaget til mikrofonmembranen i kvart samplingspunkt. Dette må konverterast til frekvensinformasjon. Det viser seg at det er umogleg å måle den momentane frekvensen i kvart samplingspunkt. Ein er nøydd til å sjå på utviklinga til lyden i eit tidsintervall. Dess finare oppløysing ein vil ha på frekvensmålingane, dess lengre tidsintervall treng ein.

I tilfellet der ein har høg signalstyrke over bakgrunnen kan ein bruke den såkalla nullkryssingsmetoden (*zero crossing method*). Denne metoden går ut på å finne punkta i bølgeforma i lydfila der utslaga kryssar frå negative til positive (eller omvendt) verdier. Når ein har funne to punkt i bølgeforma på kvar side av ei slik kryssing, kan ein trekke ei rett linje mellom dei. Punktet der denne linja kryssar tidsaksen er ei tilnærming til nullpunktet til lydbølga. Avstanden i tid mellom eit slikt punkt og neste blir då ei tilnærming til perioden til bølga. Dette er framstilt i figur 3.

I dette forsøket vart lydopptaket av telefonen som dett, først skore til slik at kun tida i fritt fall er med på opptaket. Deretter vart fila delt inn i 15 delar. I kvar av desse subseksjonane vart null-



**Figur 4.** Dei målte frekvensane, bestemt med nullkryssingsmetoden, med den rette linja som gir best tilpassing til data.

kryssingsmetoden brukt for å finne frekvensen ved kvar nullkryssing. Frekvensen i intervallet vart tatt som snittet av dei individuelle frekvensmålingane.

### Resultat

Frekvensane i dei 15 tidsintervalla er tilpassa med ei rett linje. Dette kan ein sjå i figur 4. Stigningstalet til denne linja sett inn i likning 3 gir  $g = 10,1 \text{ m/s}^2$ .

Forsøket vart gjentatt fleire gonger. Berre eit av resultatata (tilfeldig valt) er gjengitt her. Det vart ikkje gjort noko estimat av uvisse på den målte verdien for  $g$ . Både frekvensmålingane og verdien for lydfarten vil vere kjelder til uvisse. I samanlikning med desse kjeldene til uvisse kan luftmotstand reknast å vere neglisjerbar.

### Konklusjon

I dette forsøket har tyngdeakselerasjonen  $g$  vorte målt ved hjelp av dopplerskift. Dette kan gjerast utan avansert utstyr og med beskjedne programmeringskunnskapar. Forsøket burde kunne gjennomførast av studentar på eit innføringskurs i eksperimentalfysikk. Forsøket gir læringsmoglegheiter både om dopplerskift, digitalisering av lyd, og om programmering.

### Takk

Ein stor takk til professor Alex Read ved Fysisk institutt ved Universitetet i Oslo for utlån av utstyr for å gjennomføre forsøket.

Takk òg til Andreas Heggelund, Eli Bæverfjord Rye og Knut Oddvar Høie Vadla, for god hjelp som handlangarar og laboratorieassistentar.

### Referansar

1. S.M. Torres & W.J. González-Espada. «Calculating  $g$  from acoustic doppler data». *The Physics Teacher* 44(8): s. 536–539 (2006).

## Bokanmeldelse:

### **Korte svar på store spørsmål**

Stephen Hawking

230 sider, norsk utgave ved Pax forlag 2018



Stephen Hawking døde 14. mars 2018, 76 år gammel. Han ble gravlagt i Westminster Abbey, mellom Newton og Darwin. Bare 21 år gammel ble han angrepet av sykdommen ALS, amyotrofisk lateralsklerose. Det bandt ham til rullestolen for resten av livet, og etterhvert måtte han kommunisere med andre ved hjelp av en språkmaskin som ble styrt av øynene. Til tross for dette ga Hawking store bidrag til vitenskapen. Han samarbeidet mye med Roger Penrose, og i 1970 kom Hawkings gjennombrudd innen kosmologien. Han viste blant annet at svarte hull til slutt vil tape sin masse og bli borte gjennom utstråling, såkalt Hawking-stråling. Hawking har også gitt ut flere bøker, den mest kjente er *A Brief History of Time*. Den nye boka var under utarbeidelse da han døde, og er basert på materiale fra hans artikler. Undertegnede har hatt gleden av å bidra fysikkfaglig i oversettelsen til norsk.

Boka er delt i ti kapitler, som omtaler ti meget vesentlige spørsmål. Hawking skriver i en ganske spesiell slentrende og forståelig stil. Også med litt humor. Det er ytterst få ligninger i boka, men det er selvsagt en fordel at leseren har peiling på fysikk. Jeg skal liste opp de ti spørsmålene/kapitlene, med litt sitater og kommentarer:

1. *Finnes det en Gud?* Hawking tror ikke det. Her refererer han blant annet til alt vi nå vet om big bang, og om universet. Han konkluderer med at intet av dette krever noen gud som forklaring.

2. *Hvordan begynte det hele?* Han omtaler den såkalte Steady-State-teorien, lansert av fysikere i 1948, men som senere er avkreftet og forlatt. Hawking skriver: «Å spørre hva som kom forut for big bang blir som å spørre hva som ligger sør for Sørpolen.»
3. *Finnes det andre intelligente vesener i universet?* Her kommer boka inn på muligheten for parallelle universer. Her omtales det antropiske prinsippet, som er en filosofisk betraktning i kosmologien som slår fast at de fysiske lovene og naturkonstantene i universet må være innrettet slik at liv, og i siste instans mennesker, kan oppstå i naturen. Prinsippet finnes i en svak form, som er koplet til parallelle universer, og i en sterk form, som forutsetter at naturkonstantene ikke er tilfeldige, men avhenger av hverandre.
4. *Kan vi forutsi framtiden?* Tidlig vitenskap, blant annet ved Laplace, forutsatte at hvis man kjenner posisjon og hastighet til alle partikler i universet på et tidspunkt, så er alt bestemt i all framtid, såkalt vitenskapelig determinisme. Men så kom kvantemekanikken inn med usikkerhetsrelasjonen. Boka refererer Einsteins misnøye med denne relasjonen, oppsummert i hans berømte utsagn: «Gud kaster ikke terninger», og han lanserte muligheten for såkalte skjulte vari-

able. Hawking avviser dette, og antyder til og med at selve usikkerhetsrelasjonen kan stå for fall i svarte hull.

5. *Hva finnes inne i svarte hull?* Hawking skriver her blant annet om begrepet hendeshorisont, som er den overflateradien der gravitasjonen er akkurat sterk nok til at lys ikke kan unnsnippe. Han omtaler også hvordan entropien til et svart hull er direkte koplet til arealet av hendeshorisonten. Hawking omtaler her sin store oppdagelse fra 1974 om at et svart hull faktisk har en temperatur, som er omvendt proporsjonal med dets masse. Et svart hull sender derfor ut termisk stråling, såkalt Hawking-stråling.
6. *Er tidsreiser mulig?* Utgangspunktet er her den generelle relativitetsteorien. Bokas svar: Ja, vi kan reise framover i tid. Og: Nei, ikke bakover i tid.
7. *Vil vi kunne overleve på jorda?* Hawking er pessimist, og nevner blant annet atomkrig, klimaendringer, kollisjon med asteroider, samt muligheter og farer ved genmanipulasjon. Han tror vi bør forberede oss på å kunne forlate jorda, som han diskuterer i neste kapittel.

8. *Bør vi kolonisere verdensrommet?* Hawking svarer et absolutt ja, og anser Månen og Mars som mest aktuelle.
9. *Vil kunstig intelligens bli smartere enn vi?* Her er det mange artige betraktninger, blant annet om redigering av DNA og om hvordan vi kanskje om ikke så lenge kan kople hjernen til internett.
10. *Hvordan kan vi forme framtiden?* Kapitlet tar for seg betraktninger om behovet for nye vitenskapelige gjennombrudd av samme tyngde som Einsteins, og for teknologiske revolusjoner. Helt til slutt kommer Hawking med en oppfordring til hver enkelt av oss, sikkert med bakgrunn i hans egen livshistorie: «Uansett hvor vanskelig livet måtte fortone seg, så husk at det finnes alltid noe du kan lykkes med. Vær med å forme fremtiden.»

Alt i alt en svært interessant og meget leseverdige bok som jeg kan anbefale. Boka er ikke bare for fysikere, men for alle som er opptatt av de helt store spørsmålene.

Hugo Parr

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

## Styret i Norsk Fysisk Selskap

### President

Professor Asle Sudbø, Institutt for fysikk, NTNU

E-post: [asle.sudbo@ntnu.no](mailto:asle.sudbo@ntnu.no)

### Visepresident

Professor Sunniva Siem, Fysisk instiutt, UiO, Kjerne- og energifysikk

E-post: [sunniva.siem@fys.uio.no](mailto:sunniva.siem@fys.uio.no)

### Styremedlemmer

Forsker Annett Thøgersen, SINTEF Oslo, kondenserte fasers fysikk og atomfysikk

Førsteamanuensis Magnus Borstad Lilledahl, NTNU, biofysikk

Professor Åshild Fredriksen, UiT, atmosfære-, rom- og plasmafysikk

Professor Håvard Helstrup, HiB, subatomær- og astrofysikk

Professor Jon Samseth, OsloMet, industri- og energifysikk

Professor Olav Gaute Hellesø, UiT, optikk

Lektor Kaja Nordby, Kongsbakken vgs., Norsk Fysikklærerforening

### Adresse

Norsk Fysisk Selskap

Institutt for fysikk, NTNU

7491 Trondheim

Sekretær: Haakon Thømt Simensen

E-post: [nfs.styret@gmail.com](mailto:nfs.styret@gmail.com)

Bankgiro: 7878.06.03258

Org.nr.: 940 340 829

Internettadresse: [www.norskfysisk.no](http://www.norskfysisk.no)

### Bedriftsmedlemmer av NFS

Vi takker for støtten fra våre bedriftsmedlemmer:



UiT / NORGES ARKTISKE  
UNIVERSITET



 NTNU 



UiO : Universitetet i Oslo

ISSN-0015-9247