

# Fra Fysikkens Verden

NR. 3 – 2019  
81. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP



## Bronse til Norge i Den internasjonale fysikkolympiaden

### Les også om:

- Protonet
- Murray Gell-Mann
- Thomas Young
- Theta-nordlys

# Nr. 3 – 2019

## 81. årgang

### Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap

### Redaktører:

Professor Øyvind Grøn  
OsloMet – storbyuniversitetet  
E-post: [oyvind.gron.no@gmail.com](mailto:oyvind.gron.no@gmail.com)

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

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

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

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

# Innhold

Fra redaktørene <i>Øyvind G. Grøn</i>	52
Bronse til Norge i Den internasjonale fysikkolympiaden (IPhO) <i>Thomas Frågåt</i>	52

## Fysikknytt

Stjerne rundt svart hull følger relativitetsteorien <i>Øyvind G. Grøn</i>	53
---------------------------------------------------------------------------	----

## Artikler

Det flyvende kjede <i>Eirik G. Flekkøy</i>	54
Allviteren Thomas Young (1773–1829) <i>Eivind Hiis Hauge</i>	57
Epokegjørende solformørkingsmålinger i 1919 <i>Emil J. Samuelsen</i>	60
Protonet 100 år <i>Eivind Osnes</i>	61
Murray Gell-Mann (1929–2019) <i>Per Osland</i>	64
Theta-nordlys - himmelrommets solur <i>Alv Egeland</i>	66
Om harmoni i song og musikk <i>Aasmund Sudbø</i>	69

## Nye doktorer

Mathias Myrtveit Sæther	71
-------------------------	----

## Nobelprisen i fysikk for 2019

Den 8. oktober 2019 klokka 12 annonserte Nobelinstituttet i Stockholm at nobelprisen i fysikk for 2019 er gitt for bidrag til vår forståelse av universets utvikling og jordas plass i kosmos, med én halvpart til den kanadisk-amerikanske fysiker og kosmolog James Peebles som nå er professor emeritus ved University of Princeton, og den andre halvparten delt mellom de sveitsiske astronomene Michel Mayor, Université de Genève, og Didier Queloz, Université de Genève og University of Cambridge, for oppdagelsen av en planet utenfor solsystemet i bane rundt en stjerne av samme type som sola.

Arbeidene som prisen er gitt for, vil bli presentert i neste nummer av *Fra Fysikkens Verden*.



Fysikkolympiaden er en årlig begivenhet i fysikkverdenen. Redaksjonen i *Fra Fysikkens Verden* gratulerer deltakerne med en flott innsats.

I dette nummeret av *FFV* har vi artikler som omhandler temaer fra klassisk mekanikk med et spennende eksempel «det flyvende kjedet», via historikk om Thomas Young, samt en artikkel om protonets oppdagelse til fysikken i selvopplevd harmoni i korsang. Vi har også en artikkel om Murray Gell-Mann som døde i år og en doktorgradsamtale.

Vår hjemlige nestor når det gjelder forskning og formidling om nordlysets fysikk, Alv Egeland, har gitt oss en artikkel om såkalt theta-nordlys. Den føyer seg inn i rekken av historiske artikler i dette nummeret.

Vi ønsker flere bidrag til *Fra Fysikken Verden*. Artikler om alle fysikkrelaterede temaer er velkomne. Det oppfordres også til å sende doktorgradsamtaler. Alle norske doktorander i fysikk fortjener å bli omtalt med sitt doktorarbeid i *Fra Fysikkens Verden*.

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



Øyvind G. Grøn



Emil J. Samuelsen

## Bronse til Norge i Den internasjonale fysikkolympiaden (IPhO)

**Norge gjorde en av sine beste fysikkolympiadeprestasjoner da den femtiende internasjonale fysikkolympiaden ble arrangert i Tel Aviv i Israel 7.-14. juli 2019.**

Det norske laget kunne reise hjem med én bronsemedalje og én Honourable Mention i bagasjen. Sistnevnte er en pris som viser at du er blant de 67 % beste i konkurransen, som er en stor prestasjon i en konkurranse mellom 367 av de beste elevene fra 78 land fra hele verden.

Det var Ola Tangen Kulseng (Thor Heyerdal vgs.) som tok bronsemedaljen og Honourable Mention gikk til Andreas Solberg Stapnes (St. Olav vgs.). Til tross for god innsats ble det dessverre ingen priser på de tre andre deltakerne: David Grevbo (Gjøvik vgs.), Olai Gaarn Skogen (Spjelkavik vgs.) og Edvard Holen (Oslo Katedralskole).

Årets oppgaver var vanskeligere enn det de har vært i foregående år og det er derfor desto mer imponerende at Norge tar med seg to priser hjem. Årets teoretiske oppgaver handlet om fysikken i trappetroll som slippes fra en høyde, fysikken bak mikrobølgeovner og hvordan man kan lage en



**Figur 1.** Det norske teamet som deltok på IPhO2019. Fra venstre: David Grevbo, Torbjørn Mehl (lagleder), Andreas Solberg Stapnes, Ola Tangen Kulseng, Thomas Frågått (lagleder), Olai Gaarn, Skogen og Edvard Holen.

termoakustisk maskin (det vil si en maskin som konverterer varme til lydølger som kan utføre mekanisk arbeid). De eksperimentelle oppgavene handlet om å måle optiske egenskaper til forskjellige materialer med høyest mulig presisjon hvor

kreativitet ga ekstra belønning og i det siste eksperimentet skulle deltakerne gjennom eksperimenter komme frem til Wiedemann-Franz lov som sier at det i metaller hvor varmetransport er dominert med ledning av elektroner, avhenger forholdet til termisk- og elektrisk ledningsevne lineært av den absolutte temperaturen.

I tillegg til selve konkurransen var det tid til sosialt samvær, og elever og lagledere fikk oppleve steder som Jerusalem, Nazareth, Dødehavet, Akko (Acre) og Haifa.

Neste internasjonale fysikkolympiade finner sted i juli 2020 i Vilnius, Litauen.

*Thomas Frågåt, Fysisk institutt, UiO*



**Figur 2.** Bronsevinner Ola Tangen Kulseng og Andreas Solberg Stapnes som fikk Honourable Mention. (Bilde: Thomas Frågåt)

## FYSIKKNYTT

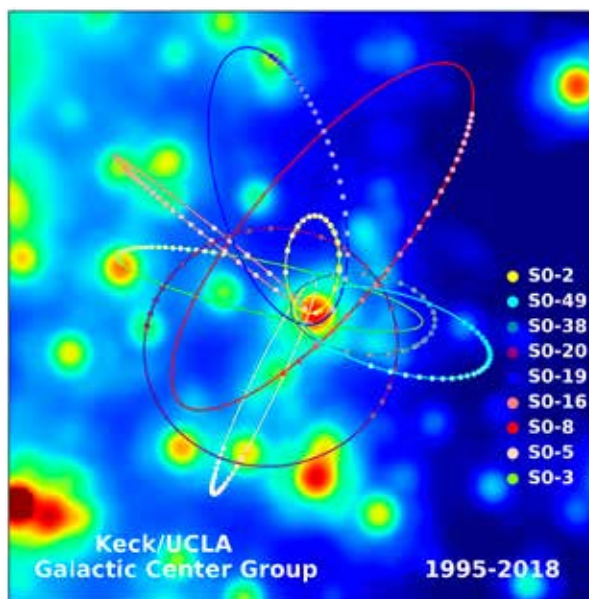
### Stjerne rundt svart hull følger relativitetsteorien

**Størrelsen av den hastighetsavhengige dopplereffekten og den gravitasjonelle rødforskyvningen av lys forutsagt av den spesielle- og den generelle relativitetsteorien, er blitt testet mot observasjoner av stjernen S0-2 i bane rundt det supermassive svarte hullet i Melkeveiens sentrum. Relativitetsteorien besto testen.**

**Øyvind G. Grøn** OsloMet – storbyuniversitetet

Observasjoner av kortperiodiske stjerner i bane rundt det supermassive svarte hullet i Melkeveiens sentrum (figur 1) tillater relativitetsteorien å bli testet i en situasjon der teorien tidligere ikke har vært testet: i det sterke gravitasjonsfeltet nær et supermassivt svart hull.

Stjernen S0-2 går i bane rundt det supermassive svarte hullet i Melkeveiens sentrum, og har en periode på 16 år. Den har vært observert fra 1995 til 2018. Banen og stjernens hastighet er bestemt med stor nøyaktighet, og ved hjelp av spektroskopiske målinger har forskerne målt hvordan rødforskyvningen av lyset fra stjernen har variert med posisjonen og hastigheten. På denne måten kunne de måle størrelsene av den hastighetsavhengige dopplereffekten og den posisjonsavhengige gravitasjonelle rødforskyvningen, og sammenlikne med forutsigelsene til relativitetsteorien.



**Figur 1.** Banene til stjerner som beveger seg rundt det supermassive svarte hullet i Melkeveiens sentrum. Stjernen S0-2 er brukt til å teste relativitetsteorien.

I en artikkel [1] publisert i *Science* 16. august 2019 konkluderer de at målingene stemmer med relativitetsteorien og er i konflikt med Newtonsk gravitasjonsteori med en signifikans på 5 standardavvik. ■

#### Referanse

1. T. Do og medarbeidere. «Relativistic redshift of the star S0-2 orbiting the galactic center supermassive black hole». *Science*, 365, issue 6454, s. 664–668 (2019).



**Figur 1.** Kjedefontenen slik den arter seg når det er et 5 meters fall utenfor glasset. I bakgrunnen sees Fysikkbygningen ved Universitetet i Oslo. Hånden tilhører Marcel Moura, som har gjort flere kontrollerte eksperimenter med kjedet.

$$T_1 = \frac{dm}{dt} v = \left( \lambda \frac{dl}{dt} \right) v = \lambda v^2, \quad (1)$$

der  $dl$  er lengden av kjedet som trekkes opp av beholderen i løpet av  $dt$  og  $dm$  massen. I figur 2 er de forskjellige tensjonene tegnet inn. Av symmetri grunner er  $T_1 = T_2$  ved stasjonær tilstand. På toppen av kjedet antar vi at det snur så fort at sentripetalaksellerasjonen er vesentlig større enn tyngdeaksellerasjonen  $g$ . Figur 3 illustrerer dette. Der er normalkraften på et stykke av kjedet  $T_t \delta\alpha$  i balanse med massen  $\lambda r \delta\alpha$  ganget med sentripetalaksellerasjonen  $v^2/r$  slik at

$$T_t = \lambda v^2. \quad (2)$$

Legg merke til at krumningsradien  $r$  ikke opptrer i dette uttrykket og at  $T_t$  er bestemt av  $v$  alene. Det betyr at under vektløse betingelser ( $g = 0$ ) vil en hvilken som helst romlig fasong av kjedet kunne opprettholdes bare randbetingelsene forsyner det med tensjonen  $\lambda v^2$ .

Tilsvarende, dersom  $g \neq 0$  vil kjeder med fason-

## Det flyvende kjedet

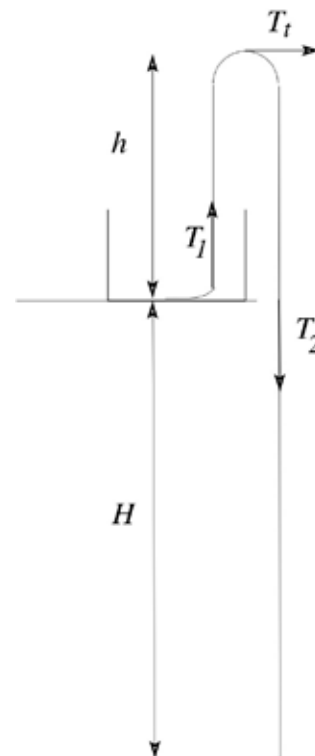
**Det flyvende kjedet, eller kjedefontener, dannes når et kjede slippes ut over kanten av en beholder. Da dannes en bue som kan være betydelig høyere enn beholderen. Dette kan bare forstås dersom man innfører en kraft fra beholderen, som skyver kjedet til værs.**

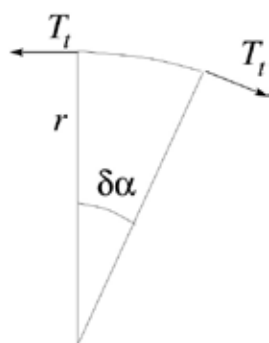
**Eirik G. Flekkøy** PoreLab, Fysisk institutt, UiO

Dersom man slipper enden av et langt kjede utover kanten av beholderen det befinner seg i, vil det etter en liten stund stige opp over kanten. Jo lengre fall det er på utsiden, jo høyere stiger kjedet. I figur 1 er dette fallet på 5 meter. Dette fenomenet har fått navnet *kjedefontenen* og ble første gang observert av Steve Mould. Derfor er det også blitt kjent som Mould-effekten [4]. På YouTube har mer 3 millioner visninger av Moulds opprinnelige video trolig gjort mye for å stimulere interesse for fysikk, men ikke like mye for å skaffe til veie en forståelse av effekten.

For å forstå effekten er det nyttig å studere impulsregnskapet: For det første må det stadig tilføres vertikal impuls til kjedet som skal aksellereres ut av beholderen. Det er tensjonen  $T_1$  som står for dette, og dersom man antar at kjedet har en stasjonær form, beveger seg med hastighet  $v$  og har en masse  $\lambda$  per lengdeenhet, kan man skrive impulstilførselen per tid  $dt$  som

**Figur 2.** Skisse av kjedet som stiger rett opp av en beholder for så å snu i en skarp sving på toppen. Kjedet består av kuleformede ledd som kan bøyes omtrent 60° relativt til hverandre.





**Figur 3.** Krumningsradius, bøyingsvinkel og tensjon over et lite element av kjedet.

ger som skaper likevekt med tyngdekraften kunne realiseres med en hvilken som helst hastighet.

Balansen mellom tensjonen  $T_2$  og vekten av kjedet på undersiden av beholderen kan uttrykkes som  $T_2 = \lambda gh$  ( $= T_1$ ). Sammen med ligning (1) medfører dette at

$$v^2 = gH. \quad (3)$$

Men også i den øvre delen av kjedet må det herske balanse mellom tensjon og tyngde, spesielt må vi ha at

$$T_t - T_1 = \lambda gh, \quad (4)$$

noe som i lys av ligningene (1) og (2) umiddelbart medfører  $h = 0$ , dvs. at det overhodet ikke er noen kjedefontene.

Legg merke til at dette er fullkomment forenlig med våre teoretiske betraktninger så langt. Vi har observert at det er fullt mulig å opprettholde vilkårlig skarpe svinger, eller buktninger av kjedet slik at det *kunne* fulgt kanten av beholderen. Resultatet er imidlertid ikke forenlig med observasjonen i figur 1.

Hva mangler så i teorien? Ligning (4) gir et hint i retning av hvordan denne kan endres for å komme på linje med eksperimentene. Om vi nemlig reduserer  $T_1$  ser vi straks at vi vil kunne få endelige  $h$ -verdier. Fysisk sett må en slik endring bety at det skal mindre kraft fra det bevegelige kjedet til for å aksellerere den ubevegelige delen

ut av beholderen. Dette kan bare bety at det må eksistere en kraft fra den underliggende delen av kjedet på den delen som tar av oppover.

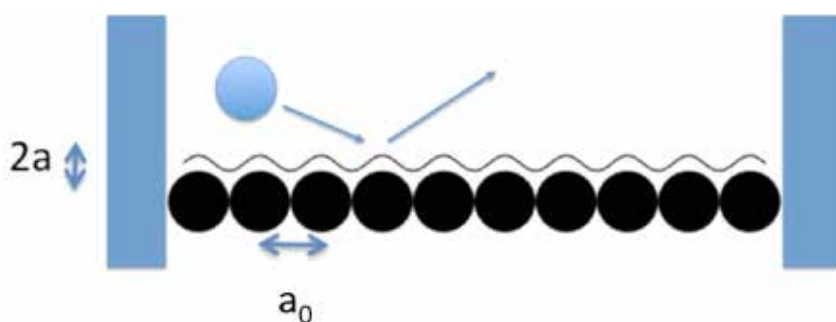
Denne kraften er nøkkelen til å forstå kjedefonten. Når kjedet tar av fra underlaget, starter bevegelsen først horisontalt før leddene beveger seg oppover, og mens leddene beveger seg horisontalt kolliderer de også med andre ledd. Disse kollisjonene tilfører leddene en impuls som vi kan anta å være proporsjonal med  $\lambda v$ . Men også kollisjonsfrekvensen må antas å være proporsjonal med  $v$ , slik at den gjennomsnittlige kraften fra underlaget må kunne skrives  $b\lambda v^2$ . Om vi erstatte  $T_1 \rightarrow T_1 - b\lambda v^2$  kan ligning (4) skrives  $\lambda gh = b\lambda v^2$ , som sammen med ligning (3) medfører at

$$h = bH, \quad (5)$$

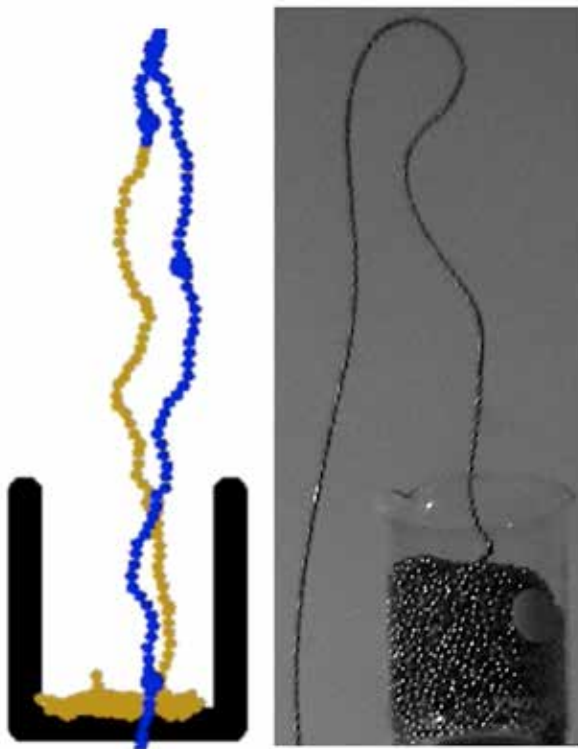
der  $b$  er en dimensjonsløs konstant som vil avhenge av leddenes størrelse og form, og dessuten hvordan kjedet som ennå er i beholderen, er pakket eller stablet.

Den lineære relasjonen mellom  $h$  og  $H$  er vel etablert eksperimentelt. Problemet er å bestemme den riktige mekanismen som styrer verdien av  $b$ . De første som studerte kjedefonten kvantitativt, Biggins og Warner [1, 2], foreslo at det var leddenes inbyrdes stivhet som ga forklaringen på kraften fra beholderen. Tanken var at fordi leddene bare kunne bøyes i forhold til hverandre opp til en viss vinkel, ville take-off prosessen arte seg litt som når man brått løfter en blyant av bordet etter den ene enden. Da vil den rotere om sitt tyngdepunkt og skape et fraspark mot underlaget.

Eksperimentelle nærbilder viser imidlertid lite tegn på at kjedet faktisk bøyer seg nok til at dette skjer. Problemet er likevel at dette ikke utelukkert mekanismen fullstendig, og begge mekanismer, både fraspark-mekanismen og kollisjonene med et ujevnt underlag, må ventes å gi en middelkraft som er proporsjonal med  $\lambda v^2$ . Dette betyr at  $h = bH$ -prediksjonen vil være den samme for begge hypoteser.



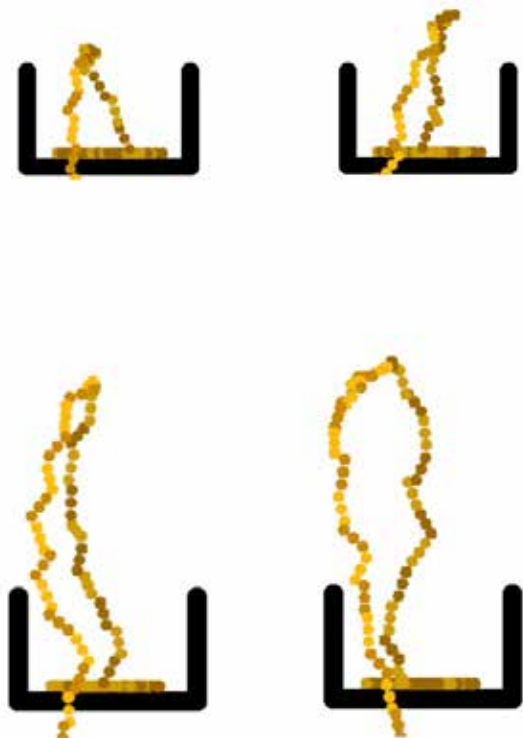
**Figure 4.** Modell for kjedepakningen som en ru bunn med amplitude  $a$ .



**Figur 5.** Eksperimentell og simulert fontene. De store leddene i simuleringene har ingen spesielle egenskaper, de har bare en rolle for visualisering.

For å avgjøre saken utførte vi (se referansen [3]) numeriske simuleringer der vi fritt kunne kontrollere kjedeleddenes innbyrdes stivhet og deres vekselvirkning med underlaget. Dette underlaget er illustrert i figur 4 som viser hvordan man kontinuerlig kan gå fra et ru til et glatt ( $a = 0$ ) underlag. Selve kjedet ble simulert ved å løse Newtons 2. lov for hvert enkelt ledd. Leddene vekselvirket med sine nærmeste naboled gjennom en stiv fjærkraft, med tyngdekraften og med beholderen. Fjærkraften ble også brukt til å innføre en realistisk øvre bøyingsvinkel mellom leddene. Figur 5 viser at simuleringer og eksperiment produserer lignende fontener når amplituden  $a$  av underlaget er omtrent halvparten av ledd-seperasjonen, noe som skulle være en realistisk geometrisk antagelse for en kulepakning. På den andre siden forsvinner fontenen helt dersom amplituden settes til 0. Det gir sterk støtte til kollisjonshypotesen fremfor frasparkshypotesen.

På den andre siden trenger ikke denne hypotesen å ha veldig generell gyldighet. Hva om man endrer kjedets konstruksjon? Biggins og Warner gjorde nettopp det, bl.a. ved å erstatte kjedet med kuleformede ledd med ett der leddene var stavformede. Nærmere bestemt tredde de pastarør på en tråd og fikk på den måten et kjede som definitivt



**Figur 6.** En simulert tidssekvens av en kjedefontene basert på en modell av pastakjedet. I dette tilfellet er underlaget flatt, dvs.  $a = 0$  og  $H = 1,8$  m.

hadde stive utstrakte ledd. Dette eksperimentet ble simulert ved å stive av tre og tre ledd, som vist i figur 6. I dette tilfellet ble fontenen dannet også når beholderbunnen var flat, dvs.  $a = 0$ .

Ved siden av å være en ny effekt, som er egnet til å vekke interesse, er kjedefontenen et morsomt eksempel på metodebruk. Den tette og enkle koblingen mellom teori, simulering og eksperiment definerer nærmest en slag vitenskapsteoretisk sandkasse, der intuisjon, ide og testing går hånd i hånd på en veldig gjennomslagsfull måte. ■

### Referanser

1. J. Biggins. «Growth and shape of a chain fountain». *Europhys. Lett.* (2014) 106, 44001.
2. J. Biggins og M. Warner. «Understanding the chain fountain». *Proc. R. Soc. A* (2014) 470, 20130689.
3. E. Flekkøy, M. Moura og K. Måløy. «Mechanisms of the flying chain fountain». *Front. Physics* (2018) <https://doi.org/10.3389/fphy.2018.00084>.
4. Mould, S. <http://stevemould.com/siphoningbeads/> (2013).

# Allviteren Thomas Young (1773–1829)

**Den nylig utgitte biografien [1] over Thomas Young har tittelen «The last man who knew everything». Vi fysikere er jo oppvokst med dobbeltspalteeksperimentet som demonstrerer lysets bølgenatur (og senere også for kvanteelektroner), og vi har hørt om Youngs modulus. Men «everything»? Historien om den mangfoldige Thomas Young fortjener å fortelles! Vi gir et utsnitt her, starter med en biografisk skisse, og tar så for oss noen av Youngs viktige bidrag til fysikk, biofysikk definitivt inkludert.**

**Eivind Hiis Hauge** Institutt for fysikk, NTNU

## Biografi

Thomas Young vokste opp som den eldste av ti søsken i en strikt kvekerfamilie i landsbyen Milverton, sørvest i England. Han var åpenbart et vidunderbarn. Allerede som toåring kunne han lese flytende. Han hadde en makeløs hukommelse, og da han var fjorten behersket han latin og gresk, leste bibelen på hebraisk, var fascinert av østlige språk og hadde kjennskap til en rekke andre språk, som fransk, italiensk, tysk.

Hans yrkesvalg var lege, men utdanningsveien ble kronglete. I 1792 startet han på et hospital i London, og fra 1794 et år ved universitetet i Edinburgh. Så dro han til Tyskland. Allerede i 1796 tok han doktorgraden i Göttingen på en avhandling om strupehodet, stemmen, hvordan mennesket former forskjellige lyder. I et appendiks foreslår han for første gang et «universelt» fonetisk alfabet. Men dette var ikke godt nok til å få lisens som praktiserende lege i London. Der vokter legene sine eksklusive privilegier, og ett av kravene var to års studier ved ett universitet, som i praksis betydde Cambridge. Der var han en svært så selvstendig medisinerstudent fra 1797 til 1799, og brukte store deler av tiden på andre fag, humaniora og naturvitenskap.

Alle studenter i Cambridge måtte (helt til 1871!) være innmeldt som medlem av Church of England. Young hadde lenge vært på vei bort fra sin kvekerbakgrunn, og universitetets krav innebar et endelig, formelt brudd. Kvekerne brøt også formelt med Young, men der var begrunnel-

sen snarere at han hadde oppført seg uakseptabelt ved å gå i teateret.

I 1797 arvet han sin grandonkel Richard Brockselsby. Dette gjorde ham økonomisk uavhengig.

Som praktiserende lege ble Young ingen suksess. Kommunikasjon med helt alminnelige pasienter var ikke hans styrke. Og kollegene var mistenksomme, Young var for opptatt av alle sine andre interesser. I tillegg hadde han med god grunn begrenset respekt for tidens medisinske visdom.

I årene 1801–03 hoppet Young av legeyrket og ble professor i «natural philosophy» ved Royal Institution i London. Denne institusjonen var opprettet i 1799 med sikte på å utvikle samfunnet ved å undervise i anvendt vitenskap. I løpet av de to årene han underviste der, holdt Young 91 originalforelesninger, utgitt i 1807 (og trykt på nytt i 2002!) under tittelen «Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts» [2]. Emnene forelesningene dekket var mangfoldige: Matematikk, mekanikk, fysikk, hydrodynamikk, musikk, arkitektur, astronomi, geografi. Det er



**Figur 1.** Portrett av Thomas Young (Wikipedia)

i dette tidlige storverket vi finner hans viktige bidrag til fysikken.

Thomas Young giftet seg i 1804 med Eliza Maxwell. Ekteskapet var lykkelig, men barnløst.

Etter hvert ble han brukt i en rekke offisielle sammenhenger. Han bidro til standardisering av sekundet ved en pendel med nøyaktig spesifiserte dimensjoner, var sekretær for lengdegrads-komiteen, og overinspektør for Hans Majestets Nautiske Almanakk-kontor.

Og gjennom mange år ble Young brukt av redaktøren for *Encyclopaedia Britannica* til å skrive artikler om de forskjellige emner. De første årene anonymt, for ikke å irritere sine lege-kolleger. Men etter hvert sto han frem med eget navn. Den mest siterte av dem var artikkelen «Language», der han klassifiserer 400 språk (!) og blant annet innfører klasse-betegnelsen «indo-europeiske språk».

I 1814 ble Youngs oppmerksomhet fanget av Rosetta-stenen, funnet i Egypt av Napoleons styrker, med inskripsjon på tre skriftspråk: Gresk, demotisk, og hieroglyfer. Young bidro med avgjørende fremskritt, viste at begge de to siste skriftspråkene bestod av en kombinasjon av alfabetiske bokstaver og begrepsmessige symboler, og dechiffrerte i alt vesentlig Rosetta-steinens demotisk. Franskmannen Champollion var den som fullførte tolkningen av hieroglyfene.

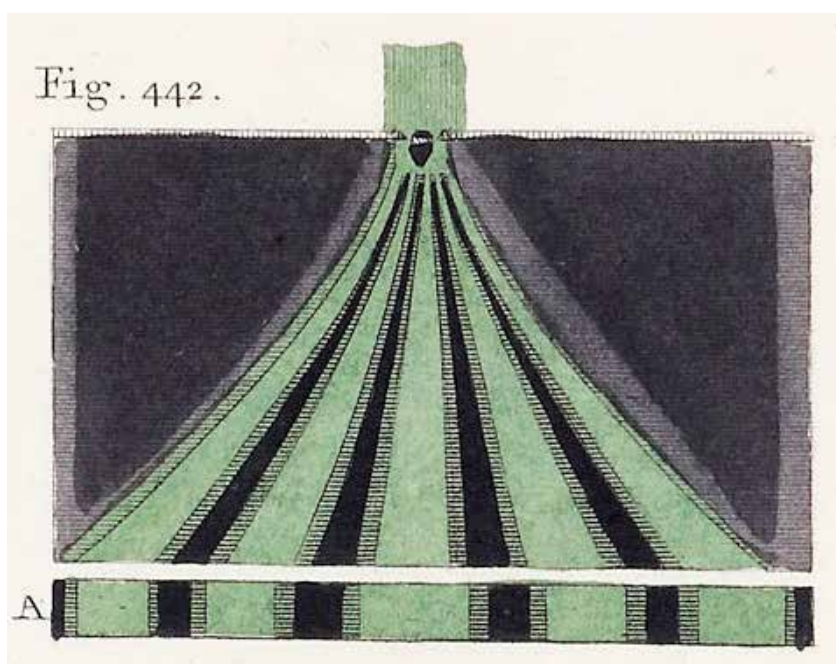
### Øyets virkemåte

Young var 19 da hans aller første vitenskapelige publikasjon, «Observations on vision», ble fremført for Royal Society av hans grandonkel Brocklesby. Der argumenterte han for at når øyet fokuserer på objekter på forskjellig avstand, skjer det ved at linsen endrer form. Dette var et kontroversielt tema, også når det gjaldt prioritet. Men han kom tilbake til saken i en omfattende artikkel i 1801. Der presenterte han en lang rekke finurlige eksperimenter som legger et solid grunnlag for hans tidligere påstand. Og han går videre og diagnostiserer og forklarer astigmatisme.

Et år senere publiserte han enda en artikkel om øyets funksjon. Ikke basert på nitide eksperimenter denne gangen. Young var nå blitt overbevist om at lyset består av bølger med forskjellig bølgelengde. Det inspirerte til et svimlende intuitivt sprang: Han postulerte at vårt fargesyn er basert på en mosaikk på netthinnen av tre typer reseptorer, på norsk kalt tapper. Hver av de tre typene er følsomme i sitt frekvensområde. Standardterminologi i dag: L-tappene absorberer i hovedsak langbølget, rødt lys. M-tappene mellombølget, grønt lys, og S-tappene kortbølget, blått lys. Tripletter av disse ørsmå reseptorene er tett fordelt over den følsomme delen av netthinnen.

Young satset altså på at vårt mangfoldige fargesyn er lineærkombinasjoner av tre «grunnfarger». I utgangspunktet valgte han rød, gul og blå, men reviderte dette valget senere. La oss

**Figur 2.** Youngs egen illustrasjon av dobbeltspalteeksperimentet [2].



sitere noen linjer fra hans 1802 publikasjon: «Now, as it is almost impossible to conceive each sensitive point of the retina to contain an infinite number of receptors, each capable of vibrating in perfect unison with every possible undulation, it becomes necessary to suppose the number limited, for instance to the three principal colors.»

Youngs trefargeteori ble gjenopplaget av en begeistret Helmholtz, som videreførte den på 1850-tallet [3]. Først på 1950-tallet ble netthinnens struktur som triplett-mosaikk eksperimentelt verifisert! Se f.eks. [4].

### Lysets bølgenatur

Allerede i 1678 hevdet nederlenderen Christiaan Huygens (1629–95) at lys er bølger. Men den 13 år yngre Isaac Newton, i sin *Opticks* fra 1704, argumenterte for at lys er partikkelstråler. Et velkjent fenomen som lysbrytning er lett å forklare med Huygens' bølger, mens fenomenet krever kompliserte antakelser for å passe inn i et partikkelbilde. Likevel var Newtons faglige pondus så sterk at hans bilde dominerte fullstendig. Spesielt i hans hjemland England hadde Newton tilnærmet gudestatus. Å utfordre ham var for blasfemi å regne!

Men Thomas Young ble overbevist om at lys er bølger som forplanter seg i en allesteds nærværende eter. Han var kanskje inspirert av sine erfaringer med lyd og sin kjærlighet til musikk, men brukte likevel overflatebølger på vann til å visualisere interferensfenomener. Ikke alle hadde tatt inn over seg superposisjonsprinsippet, men det var tindrende klart for Young: Så lenge amplitudene er små, kan slike bølger adderes direkte, og en rekke slående fenomener kan studeres og forklares. På denne bakgrunn introduserte han dobbeltspalteeksperimentet. Det er riktignok reist tvil om Young faktisk utførte eksperimentet, eller om tankeeksperimentet var nok til å overbevise Young. Uansett, dette eksperimentet er for alltid blitt stående som Youngs aller viktigste bidrag til fysikk.

Artig, høyteknologisk etterpåklokskap: Med en tilstrekkelig svak lysstråle (ett eller noen få fotoner av gangen) kan observasjon av det langsomt oppbygde diffraksjonsmønsteret på detektoren vise at kvantemekanisk har lys både partikkel- og bølgekarakter!

Young hadde selvsagt stor respekt for Newton: Han brukte for eksempel mesterens målinger på «Newton-ringer» til å bestemme bølgelengden til rødt lys, helt i tråd med våre dagers tall. Men



**Figur 3.** Absorberte dråper. (Bilde: Stocksnap.io)

for en engelskmann var det ikke kostnadsfritt å opponere mot Newtons lyspartikler, Young ble frakjent all ære. I *Edinburgh Review* var renheklet mobbing tydeligvis tillatt: «In our second number, we exposed the absurdity of this writer's law of interference, as it pleases him to call one of the most incomprehensible suppositions that we remember to have met in the history of human hypotheses, [...] The paper contains more blunders, more unfounded hypotheses, more gratuitous fiction, all upon the same field on which Newton trod, all from the fertile, yet fruitless, brain of the same eternal Dr Young.» Nei, det var ikke lett.

Young mente i utgangspunktet at lys, i likhet med lydbølger, er longitudinale. Men observasjoner av polarisasjonseffekter førte til at han i 1817 åpnet for muligheten at lys også kunne ha transversale komponenter. Young hadde god kontakt med Augustin Fresnel, som i 1821 postulerte at lysbølger er rent transversale, med to polarisasjonsretninger. Dermed kunne Fresnel utvikle et fullstendig formelapparat for fenomener som refleksjon og brytning.

### Fukting av overflater

For dem som er interessert i fukting av overflater og kapillærphenomener (som forfatteren), har Thomas Young æren for å ha formulert en helt grunnleggende likning, som gir vinkelen  $\theta$  mellom dråpeoverflaten og det faste underlaget langs dråpens kant [5]:

$$\sigma_{sg} - \sigma_{sl} = \sigma_{lg} \cos \theta.$$

Her er  $\sigma_{ij}$  overflatespenningene mellom fast underlag og væske (*sl*) eller gass (*sg*), og mellom væske og gass (*lg*). Figur 3 gir et vakkert eksempel.

Når  $\theta \rightarrow 0$  vil væsken spre seg utover, så langt geometri og væskevolum tillater: Væsken *fukter* overflaten. Dette er faktisk et enkelt eksempel på en faseovergang. Åpenbart er denne Youngs grunnleggende ligning helt sentral i forbindelse med kapillære fenomener som f.eks. olje/vann transport gjennom porøse medier.

### Sluttord

Thomas Young var aktiv over et utrolig bredt felt. Det var hans styrke, men samtidig hans svakhet. Av alle de fruktbare ideene han sådde, ble de fleste fulgt opp av andre, og han fikk ikke alltid den kreditten han fortjente. Det var den *begrepsmessige* utviklingen som var hans styrke, selv om han i yngre år også var en førsteklasses eksperimentalist. Hans ry som vitenskapsmann og allviter vokste stadig, og ikke bare i England. Mot slutten av hans liv var han, foruten å være «Foreign Secretary of the Royal Society», også innvalgt medlem av det amerikanske akademi for vitenskap og kunst, det franske vitenskapsakademi, og det kongelige svenske vitenskapsakademi.

I denne skissen har vi begrenset oss til noen av hans bidrag til fysikk, og blant mye annet hoppet over Youngs modulus. For biofysikere veier selvsagt Thomas Youngs bidrag til forståelsen av øyets fysiologi tungt. Men det er og blir dobbeltspalt-eksperimentet Youngs berømmelse fremfor alt hviler på! For den som vil utdype bildet, anbefales biografien [1]. ■

### Referanser

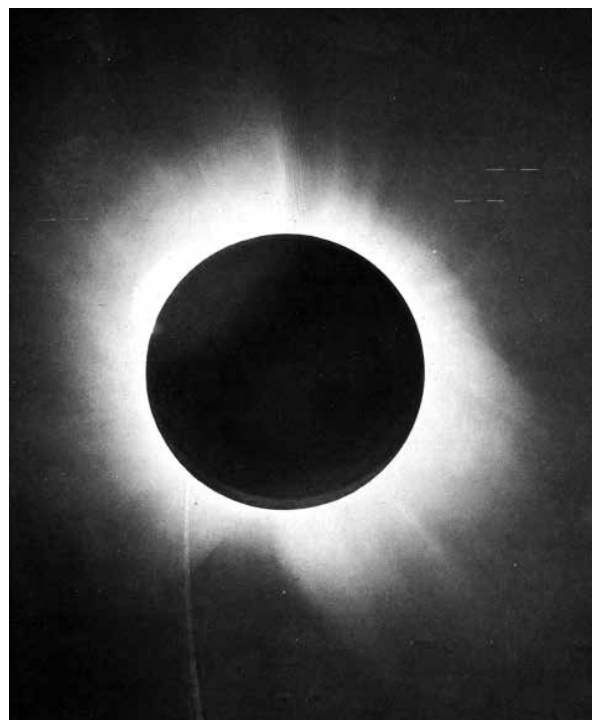
1. Andrew Robinson. *The last man who knew everything*. Plume, 2007.
2. De to bindene, på tilsammen 1686 sider, finnes nå digitalisert på internett.
3. Kuriosum: Før det kvantemekaniske gjennombruddet var Erwin Schrödinger mest kjent som biofysiker med raffinering av fargeteorien som spesialitet, se W. Moore. *Schrödinger, Life and Thought*. Cambridge University Press, 1989.
4. G. Svaetichin. *Actaphysiol. Scand.* 39 Suppl. 134, 17–46, 1956.
5. T. Young. *Philos. Trans. R. Soc. London* 95, 65, 1805.

---

## Epokegjørende solformørkingsmålinger i 1919

Etter Einstein sin generelle relativitetsteori av 1915 skulle lys bli påverka og avbøyd av gravitasjonskrefter frå store massar som sola. Ved solformørkinga 29. mai 1919 lyktes det briten Arthur Eddington å få gjort måling av lys frå stjerner plasserte på himmelen like ved sola. Målingane skjedde frå øya Principe utanfor Vest-Afrika. Ettersom resultatet var i betre samsvar med berekna lysavbøying etter Einsteins relativitetsteori enn etter Newtons gravitasjonsformulering, er 1919-observasjonane av Eddington blitt ståande som den første overtydande stønad for Einstein sin gravitasjonsmodell.

*Emil J. Samuelsen*



**Figur 1.** Eitt av bilda tatt av A. Eddington i 1919. Avbildte stjerner er snautt synlege på denne kopien. (Bilde: Wikipedia commons)

# Protonet 100 år

**Her beskrives de viktigste eksperimentene som førte til oppdagelsen av protonet, en av atomkjernens grunnleggende bestanddeler, for 100 år siden.**

**Eivind Osnes** Fysisk institutt, UiO

Subatomær fysikk begynner å trekke på årene. I år er det 100 år siden protonet ble oppdaget, og flere hundreårsjubileer for subatomære partikler vil følge. Det er imidlertid ikke lett å tidfeste oppdagelsen av de første partiklene presist, for med datidens instrumentering (og begrepsapparat) tok det ofte år å forstå betydningen av de forskjellige funnene. Alle var heller ikke like spektakulære. Sånn sett kom oppdagelsen av protonet i skyggen av oppdagelsen av atomkjernen i 1911. Og faktisk også, som vi skal se, av selve prosessen som førte til dets påvisning! Skal en først tidfeste oppdagelsen av protonet til et bestemt årstall, må det bli 1919, da Rutherford publiserte en serie på fire artikler i *Philosophical Magazine*. Betegnelsen proton ble først brukt av ham i 1920. Men la oss først gå tilbake til 1911.

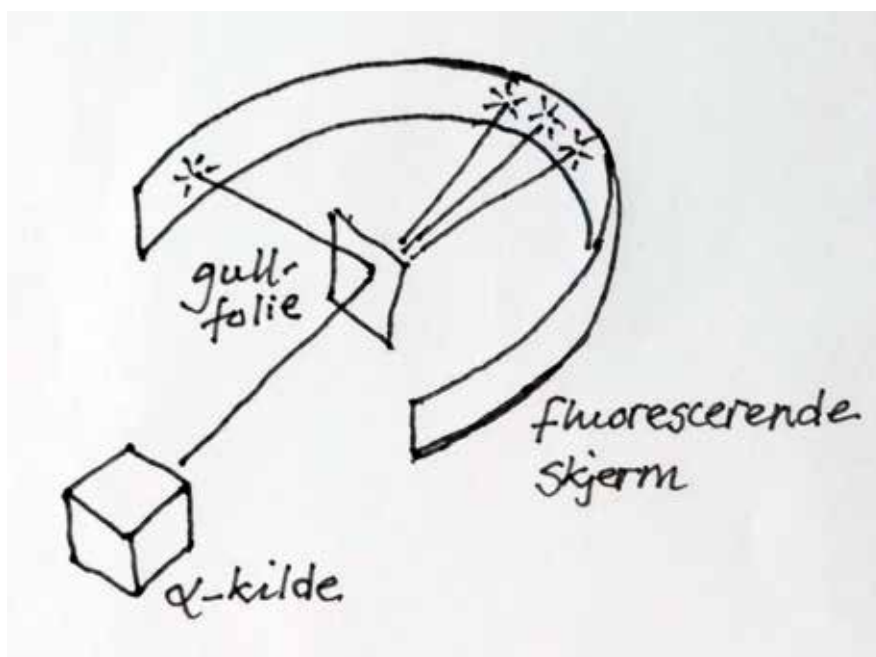
## Atomkjernen

«Det var nesten like utrolig som å bombardere et fluepapir med et 15 tommer prosjektil, og så få prosjektilet rett tilbake mot deg,» sa Ernest Rutherford da han skulle beskrive eksperimentet som førte til oppdagelsen av atomkjernen. Prosjektilet var alfapartikler som ble emittert fra en radioaktiv kilde (ulike radiumisotoper), og fluepapiret var en gullfolie. Figur 1 viser et idealisert bilde av instru-

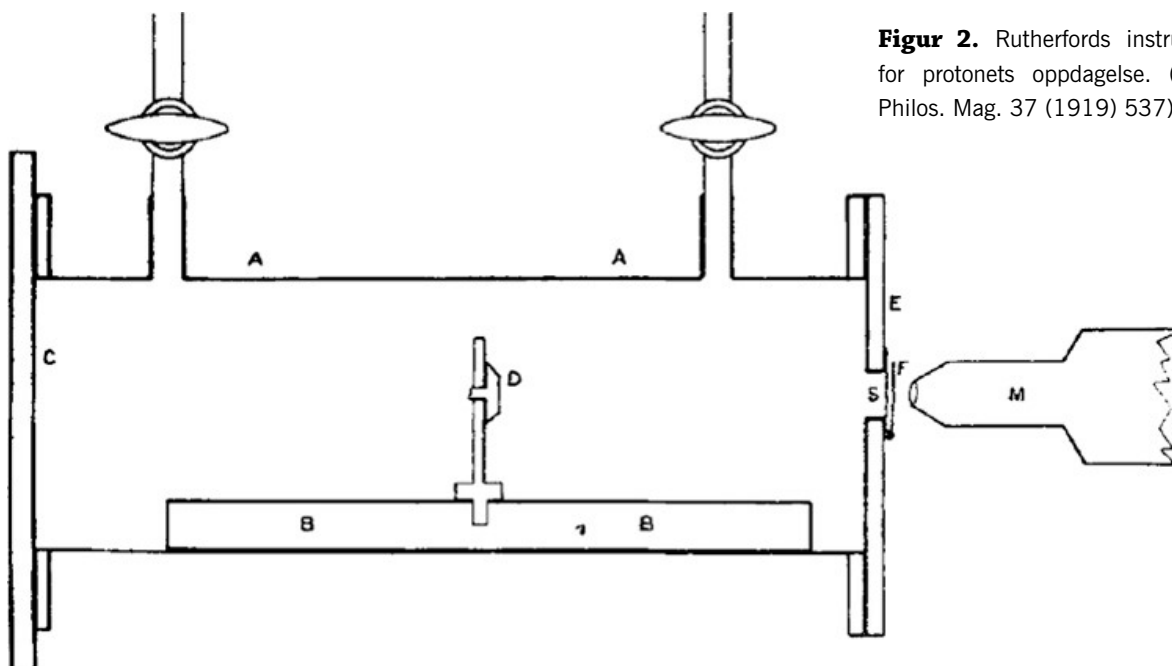
mentoppstillingen. Som antydnet på figuren gikk de fleste alfapartiklene rett gjennom folien eller ble bare svakt avbøyd. Men nitid observasjon av treffpunktene på en scintillerende skjerm ved hjelp av mikroskop i mørkerom viste at 1 av om lag 20 000 partikler ble avbøyd mer enn 90 grader. Det stemte bra med det en skulle forvente for spredning fra et elektrisk  $1/r$ -potensial fra en punktkilde. Dette kalles Rutherford-spredning; selve eksperimentet ble utført av hans medarbeidere Hans Geiger og Ernest Marsden.

Resultatet var ikke forenlig med den rådende modellen for atomet, J.J. Thomsons såkalte «Plum Pudding Model» eller «rosinbollemodell», som noen ville kalle den. Her var den positive ladningen i atomet jevnt fordelt over hele volumet av deigen i bollen, mens elektronene utgjorde rosinene. Gullfolie-eksperimentet viste at den positive ladningen (og massen) ikke kunne være av endelig utstrekning, men måtte være konsentrert i et lite område i sentrum av atomet. Dette området ble omtalt som atomkjerne (nucleus) først året etter. Rutherford fortsatte imidlertid i mange år å bruke atom synonymt med atomkjerne.

Rutherfords eksperiment la grunnlaget for Niels Bohrs atommodell, men det fortalte ikke hvordan atomkjernen var oppbygd. Fortsatt trodde en at atomkjernen besto av tunge, positivt ladede bestanddeler (hydrogenatomer, alfapartikler, etc.) samt elektroner. Det skulle gå enda et par tiår før oppbygningen av kjernen var klarlagt. ▶



**Figur 1.** Skjematisk bilde av gullfolieeksperimentet.



**Figur 2.** Rutherford's instrument for protonets oppdagelse. (Kilde: Philos. Mag. 37 (1919) 537)

### Protonets oppdagelse

I mellomtiden fortsatte Rutherford og andre å eksperimentere med alfapartikler fra radioaktive kilder. Det var datidens akseleratorer. Energien var noen få MeV og rekkevidden i luft opp mot 10 cm. En kan se på disse eksperimentene som en fortsettelse av eksperimentene med katodestråler (elektroner) i vakuumrør mot slutten av 1800-tallet og på begynnelsen av 1900-tallet. Man var stort sett interessert i å se hva som skjedde når alfapartiklene traff forskjellige stoffer, til å begynne med først og fremst metaller.

Etter hvert begynte en å interessere seg for hva som skjedde når alfapartiklene ble sendt gjennom gasser av forskjellig slag. Det var ved hjelp av slike eksperimenter en ble klar over at det fantes protoner i atomkjernen. Flere av disse eksperimentene ble utført og delvis klarlagt i perioden 1911–1914. Så brøt krigen ut, og det ble stillstand i undersøkelsene. Fysikere trengtes både ved og bak frontene. Rutherford selv ble engasjert for å utvikle metoder til å detektere ubåter, mens hans nære tyske medarbeider fra laboratoriet i Manchester, Hans Geiger, måtte reise tilbake og tjenestegjøre ved den andre fronten. Ernest Marsden fikk stilling i New Zealand, men meldte seg like etter til tjeneste for England.

Det instrumentet Rutherford benyttet er vist i figur 2. Det besto av et kammer som kunne evakueres eller fylles med gass gjennom ventilene i overkant. Inne i kammeret var det plassert en alfapartikkelkilde D. I åpningen til høyre er F en scintillerende skjerm (belagt med sinkulfid), mens S er en metallskjerm som skulle bremse ned alfapartiklene. Alfakildens avstand til skjermene kunne varieres ved å skyve den langs underla-

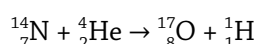
get B. Partikler som traff skjermen F forårsaket lysglimt som ble observert visuelt gjennom et mikroskop M. Lysglimtene var så små og lyssvake at det var nødvendig å plassere instrumentet i et mørkerom. Observatøren trengte å vende seg til «lysforholdene» og måtte oppholde seg lenge i mørke før registreringen kunne begynne. En registrerte så i ett minutt, tok ett minutts pause i mørke før neste registrering, og så videre, og avsluttet dagens telling etter en time. Og en telte bare noen få dager i uken.

Som sagt ville Rutherford nå studere hva som skjedde når alfapartikler kolliderte med forskjellige gassatomer (fra f.eks. hydrogen, luft, karbondioksyd, oksygen og nitrogen). Da måtte han klare å identifisere de forskjellige atomene/ionene som nådde skjermen F etter kollisjonen, og ikke minst skille dem fra alfapartiklene selv. En viktig parameter var rekyllengden til gassatomene som følge av kollisjonen. Den kunne bestemmes ved å variere posisjonen til alfakilden D og stoppeevnen til absorbatoren S. Som ventet fikk de letteste atomene størst rekyllengde, men de ga til gjengjeld de svakeste lyssignalene, så det var nødvendig å fjerne signalene fra tyngre atomer. Lengst kom hydrogenionene, og det var deteksjon av disse som tilsynelatende fanget den største interessen. At de virkelig var hydrogenioner ble verifisert ved hjelp av elektrisk og magnetisk avbøyning.

En fant imidlertid alltid hydrogensignaler, også når de aktuelle gassene inneholdt lite eller intet hydrogen. Det måtte skyldes forurensninger, f.eks. av vanddamp, og en gjorde derfor sitt ytterste for å fjerne disse. Overraskelsen var derfor stor da man observerte ekstra mange hydrogenrekyl

når man hadde ren nitrogengass i kammeret. Det hjalp ikke hvor mange kontrollundersøkelser en gjorde – dette funnet lot seg ikke rokke!

Rutherford presenterte dette resultatet i den fjerde av 1919-artiklene i *Philosophical Magazine* om «Collision of  $\alpha$ -particles with light atoms». Den hadde undertittelen «An anomalous effect in nitrogen». Her konkluderte han med at hydrogenatomet frigjøres fra nitrogenatomet når det desintegrerer etter kollisjon med alfapartikkelen. Altså måtte hydrogenatomet være byggesten i nitrogenatomet. Rutherford hadde ikke mulighet til å forstå i detalj hva som skjedde i reaksjonen. Han trodde alfapartikkelen unnslett helskinnet. I så fall skulle en karbonisotop være dannet. Men han hadde ikke deteksjonsmetoder til å påvise det. Først etter at Patrick Blackett i 1924–1925 hadde gjentatt kollisjonsekperimentene med et Wilson tåkekammer tilknyttet et automatisert kamera og produsert 23 000 bilder med 400 000 partikkelspor, fikk man den endelige bekreftelsen på hva Rutherford hadde observert i 1919. Alfapartikkelen var blitt fanget inn i nitrogenkjernen og en hydrogenkjerne frigjort. Dermed var en oksygenisotop blitt produsert (uten at den kunne detekteres). Med dagens notasjon ville vi skrive reaksjonen som



der superskriptet angir det totale antallet nukleoner, mens subskriptet angir antallet protoner.

To oppdagelser er nedfelt i disse ligningene: 1) De viser den første kunstige transmutasjon av grunnstoffer. Tidligere transmutasjoner som radioaktivitet ble sett på som naturlige prosesser. Rutherford likte ikke begrepet transmutasjon; som fysiker var han redd for å bli betraktet som alkymist av kjemikerne (Nobelprisen hans fra 2008 var imidlertid i kjemi). Han foretrakk å snakke om desintegrasjon av grunnstoffer. 2) Han hadde påvist at hydrogenkjernen måtte være byggesten i atomkjernene. Antagelig var det den «kunstige kjernereaksjonen» som fikk størst oppmerksomhet, iallfall utad. *Boston Globe* delte nyheten med overskriften «Riddle for Ancient Alchemists Solved – Sir Ernest Rutherford Said to Transmute Matter». Heller ikke for 100 år siden kunne vitenskapen tøyle media!

Først året etter lanserte Rutherford nølende betegnelsen proton for hydrogenkjernen. Etter et foredrag i British Association for the Advancement of Science i Cardiff 25. august 1920 ble han spurt om han hadde et navn på hydrogenkjernen, slik at man kunne unngå forveksling med det vanlige hydrogenatomet. På sparket foreslo han to mulige

navn – prouton eller proton. Det første for å hedre William Prout som tidlig på 1800-tallet hadde ment at alle grunnstoffene måtte være oppbygd av det letteste grunnstoffet (som han kalte protyle). Proton betyr først, og var det navnet som slo an, ikke minst etter at et møtereferat hevdet at det var det navnet Rutherford foretrakk. Det var imidlertid en tilsnikelse. Rutherford selv unngikk i det lengste å anvende den betegnelsen. Han fortsatte å skrive H-atomer, H-kjerner eller H-partikler. Tidligere (1914) hadde han også kalt hydrogenkjernen for positivt elektron. I 1923 var navnet proton antatt i amerikanske lærebøker, og Rutherford begynte smått om senn å benytte det i offentlige foredrag. Men det var først i 1925 han tok navnet proton i alminnelig bruk.

### Nøytronet manglet fortsatt

Selv om Rutherford hadde vist at protonet måtte være en byggesten i atomkjernen, var en ikke kommet mye lenger i forståelsen av dens oppbygging. En hadde lenge ment at hydrogenpartiklene måtte være til stede i atomkjernene for å forklare grunnstoffenes periodiske system. Så en satt tilbake med den samme atomkjernemodellen en hadde hatt i flere år. En kjerne med massetall  $A$  og ladningstall  $Z$  måtte bestå av  $A$  protoner og  $A-Z$  elektroner. Det tilsvarende elektrisk nøytrale atomet hadde i tillegg  $Z$  elektroner utenfor kjernen. At det måtte finnes elektroner i kjernen syntes klart, fordi elektronene fra  $\beta$ -radioaktivitet ble emittert fra kjernen. Selv om proton-elektron modellen virket aldri så tiltrekkende, ble det fort klart at den måtte være fullstendig feil, men det er ikke temaet her. Allerede i 1921 mente Rutherford at det måtte finnes en elektrisk nøytral partikkel med øvrige egenskaper som lignet på protonets, men som det ville være vanskelig å påvise eksperimentelt. Han kalte til og med partikkelen for nøytron, men forvirret nok bildet med å lansere andre partikler med massetall to og tre. Først i 1932 lyktes det en av Rutherfords tidligere studenter, James Chadwick, å påvise nøytronet. Men det er en annen saga! ■

### Referanser:

1. J. Campbell. Cern Courier, May 2011, p 20; May/June 2019, p 29
2. A. Pais. *Inward Bound (Of matter and forces in the physical world)*. Oxford University Press (1986).
3. A Romer. *American Journal of Physics* 65 (1997) 707.
4. E Rutherford. *Philosophical Magazine* 37 (1919) 537; 562; 571; 581.

# Murray Gell-Mann (1929–2019)

**Murray Gell-Mann, som av mange betraktes som kvarkenes far, døde i mai.**

**Per Osland** Institutt for fysikk og teknologi, UiB

Murray Gell-Mann var født i 1929, i New York. Familien var jødiske immigranter som hadde kommet fra et område som dengang var en del av Østerrike-Ungarn keiserdømmet, i dag er det i Ukraina. Murray viste tidlig interesse for matematikk, det fortelles at han imponerte broren med komplisert hoderegning. Etter en B.Sc. ved Yale University (1948) og Ph.D. ved MIT (1951) kom han i 1952 til Princeton, og var også en tid ved University of Chicago, men de viktigste bidrag kom fra hans tid ved California Institute of Technology hvor han underviste fra 1955 til 1993.

## Partiklene satt i system

På 1960-tallet var der et rotete mangfold av hadroner, partikler tilsynelatende i slekt med protoner, nøytroner og pi-mesoner. Gell-Mann fant en måte å klassifisere disse på, ved å postulere at de var sammensatt av mer fundamentale enheter,



**Figur 1.** Murray Gell-Mann. (Foto fra Nobel-stiftelsens arkiv)

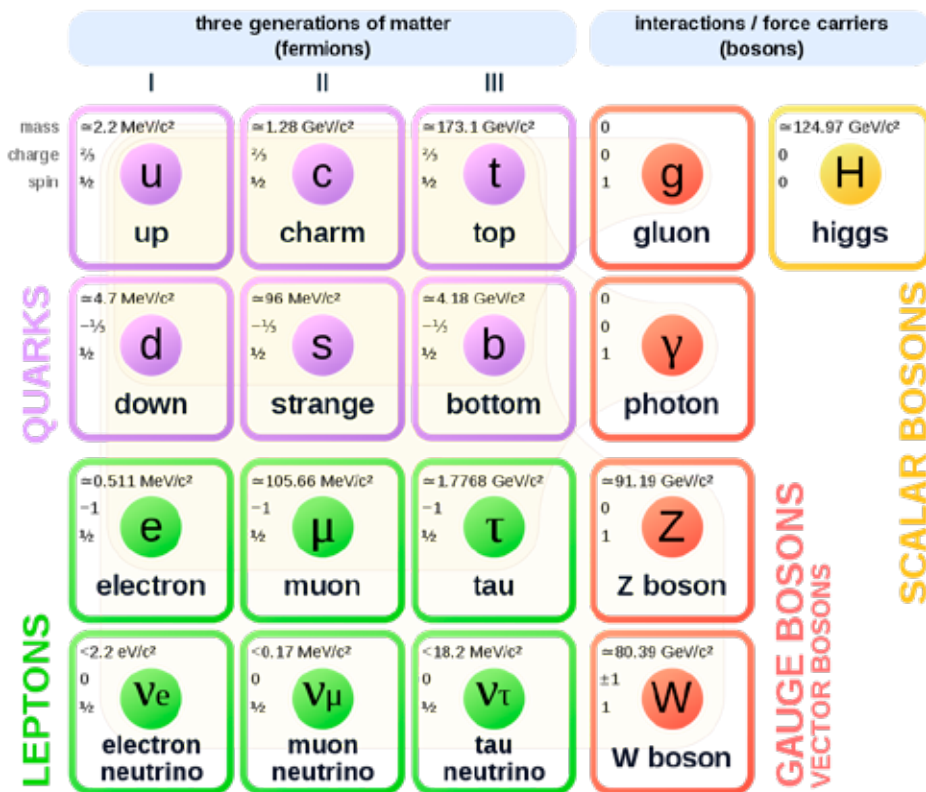
kvarker. Hans systematikk minner litt om Mendelejev sin systematisering av kjemiske grunnstoffer. Gell-Mann insisterte lenge på at kvarkene ikke var fysiske partikler (ingen frie kvarker var observert, til tross for mange eksperimentelle søk), de var kun et matematisk begrep.

Han kalte klassifiseringen av hadroner bygd opp av kvarker «The Eightfold Way», inspirert av buddhistisk filosofi hvor dette begrepet refererer til «veien til opplysning». Den konkrete tilknytningen til hadroner skyldes at de mest vanlige forekommer i oktetter, familier bestående av åtte medlemmer med mange felles egenskaper. Matematisk er dette en representasjon som naturlig oppstår når man kobler sammen tre kvarker til et baryon eller kvark og antikvark til et meson. Her spiller den matematiske symmetrigruppen SU(3) en sentral rolle. Dens generatorer er blant fysikere kjent som  $3 \times 3$  Gell-Mann-matriser, analogt med Pauli-matrisene for symmetrigruppen SU(2).

Order *quark* hentet han fra setningen «Three quarks for Muster Mark!» i James Joyce sin novelle *Finnegans Wake*. Det må nevnes at grupperingen i oktetter også ble lagt merke til, uavhengig, av Ne'eman (i 1961), og at hans kollega George Zweig presenterte en nokså lik tolkning av hadronene bygd opp av kvarker omtrent samtidig som Gell-Mann (i 1964). Zweig kalte disse partiklene «aces».

I dag kjenner vi til seks kvarker, som illustrert i figur 2. De tre som inngår i Gell-Mann sin systematisering, er de tre letteste, «up», «down» og «strange». Selv om disse tre kvarkene har nokså forskjellige masser, er de likevel såpass lette i forhold til de hadronene man kjente på 1960-tallet, til at «The Eightfold Way» gir en kvasi-kvantitativ bestrivelse av mange av deres egenskaper. De tre tyngre kvarkene, «charm», «bottom» og «top», som er blitt oppdaget senere, er for tunge til at SU(3) symmetrien kan utvides til SU(4) eller en høyere symmetri.

Jeg opplevde Gell-Mann som foreleser ved en sommerskole i Erice i 1972. Strøm-algebra var dengang hans tema (en forløper for QCD, kvantekromodynamikk). Dette var under Vietnam-krigen, og progressive studenter (spesielt de italienske) visste at han arbeidet som konsulent for Pentagon. De organiserte en «konfrontasjon» en dag etter



**Figur 2.** Elementærpartikler, med kvarkene øverst til venstre (lilla). Under er leptoner (grønt); til høyre er kraftpartikler eller gauge-bosoner (rød) og Higgs-bosonet (gul). Gell-Mann sin innsikt var mulig fordi at u-, d- og s-kvarkene er relativt lette i forhold til de c-, b- og t-kvarkene (1 GeV = 1000 MeV).

forelesningene. Gell-Mann forsvarte sitt engasjement med å si at det var mer effektivt å påvirke politikken innenfra enn utenfra.

### Utmerkelser og annet arbeid

I 1959 ble han tildelt Dannie Heinemann-prisen, som er en pris for viktige bidrag innen matematisk fysikk. Han var den første som fikk denne prestisjetunge prisen, utdelt av American Physical Society.

I 1969 ble han tildelt Nobelprisen for sitt arbeid med kvarker. I tillegg til å forenkle klassifiseringen av hadronene hadde de etterhvert fått solid støtte i resultatene av spredningeksperimenter ved Stanford Linear Accelerator (SLAC). Kvarkene er fermioner, med halvtallig spinn (som elektronet), men med elektriske ladninger som er  $2/3$  og  $-1/3$  av protonets ladning. Disse egenskapene ble reflektert i eksperimentene ved SLAC, der elektroner ved stor impulsoverføring ble spredt fra protoner og døyteroner.

Av andre viktige bidrag må nevnes hans bidrag til forståelse av hvordan fysiske prosesser endres ved forskjellige energier, noe som teknisk refere-

res til som renormaliseringsgruppen (med Francis Low, i 1954), og hans studie av Lorentz-strukturen til svake vekselvirkninger (med Richard Feynmann, i 1958) hvor paritets-symmetri er brutt (de er «venstrehendte»).

Senere postulerte han at kvarkene vekselvirker ved utveksling av vektor-gluoner (kvantekromodynamikk) med Harald Fritzsch og Heinrich Leutwyler. Dette sistnevnte arbeidet kom dog noen måneder etter Steven Weinberg sin artikkel om QCD.

Mens SU(3) i kvarkmodellen benyttes for å beskrive en symmetri som oppstår ved å bytte om på kvarker av forskjellige «flavours», så spiller den i dag en større rolle i QCD, hvor den beskriver symmetri under ombytte av kvarkenes «farge».

Gell-Mann visste mye om mange temaer, noe han heller ikke la skjul på.

Han var i 1984 med på å opprette Santa Fe Institute, et multidisiplinært institutt for studier av komplekse systemer. Selv ledet han der en gruppe som studerte utviklingen av menneskers språk. ■

# Theta-nordlys - himmelrommets solur

## Historiske målinger inneholder informasjonen som ble gjenopplaget i romalderen

**I 1981 ble en ny nordlysform, beliggende sentralt over polkalotten – kalt Theta-nordlys, oppdaget. Den vakte stor oppmerksomhet fordi den åpnet et nytt vindu for studier av nordlyssprossen. Observasjoner på Nordvestpassasjen mer enn 100 år tidligere viser at sentrale deler av denne nordlysformen lå skjult i nordlysdataene som ble samlet på Gjøahavn, vintrene 1903/04 og 1904/05.**

Alv Egeland Fysisk institutt, UiO

Roald Amundsen (1872–1928) er med rette kjent som den store polarfareren, men som vitenskapsmann er han praktisk talt ukjent. Fra hans undersøkelser av jordas magnetfelt og nordlys på Gjøahavn har vi fått nye kunnskaper om elektromagnetiske relasjoner mellom sola og jorda for mer enn 100 år siden.

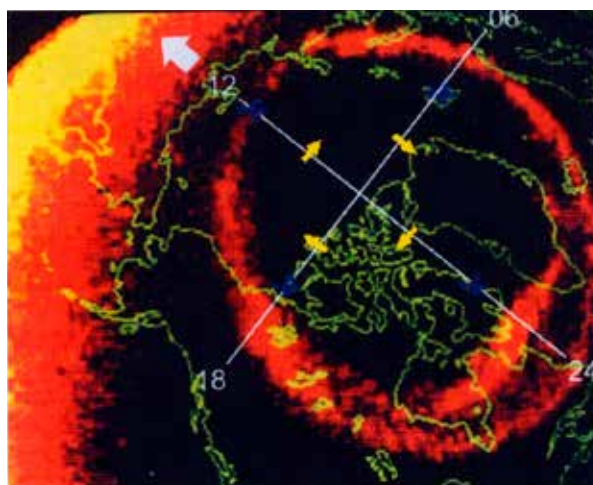
### Nordlysforskning i romalderen

Takket være utviklingen av spesielt følsomme instrumenter og bruk av satellitter har våre kunnskaper om nordlyssprosessen øket enormt i romalderen. Så snart satellitter ble tatt i bruk ble det oppdaget at sola sender ut en kontinuerlig strøm av elektrisk ladde partikler i alle retninger – den såkalte solvinden. Vårt solsystem ligger inne-sluttet i denne ekspanderende skyen av elektroner og ioner. Solvinden bærer med seg et magnetfelt på veien mot jorda. På grunn av solrotasjonen har magnetfeltet en spiralform i det interplanetare rommet (IMF).

Nordlysringen rundt den magnetiske polen, kalt *nordlysovalen*, ble kartlagt tidlig i 1960-årene (figur 1). Ovalen representerer de områdene på jorda hvor nordlyset forekommer hyppigst og med sterkest intensitet. Som figuren viser opptrer nordlyset tidvis som en sammenhengende lysende ring, men på grunn av sollyset og den geografiske utstrekningen vil man bare se deler av ovalen fra et nordlysobservatorium på bakken. Nordlyset dekker et markert større areal på nattsiden enn om dagen. Viktigere og mer interessant er det at nordlyset på dagen opptrer ca. 1000 km nærmer magnetpolen enn nattnordlyset. De gigantiske elektriske strømmene i verdensrommet som generer nordlyset er derfor asymmetrisk fra natt til dagsiden.

I vår del av verden ligger nattnordlyset typisk langs kysten av Troms og Finnmark, mens for å studere dagnordlyset bør man flytte til Svalbard. Svalbard har i romalderen fått en helt unik oppmerksomhet for studier av dagnordlys. Variasjoner i både intensitet, fargesammensetning og form på nordlyset oppstår ved jordas rotasjon under nordlysovalen. På Bjørnøya, omtrent midt mellom Svalbard og Nord-Norge, kan man se nordlys i senit både morgen og kveld. Det er store variasjoner i nordlysaktiviteten fordi solvinden ikke er konstant.

Takket være koordinerte, internasjonale undersøkelser både fra bakken, raketter og satellitter har vi fått ny kunnskap om de fysiske prosessene bak *himmelens lysorgel*. Ved satellittobservasjoner får vi bilder som dekker hele nordlysovalen. Samtidige observasjoner av nordlys i polområdet med registreringer av aktiviteten på sola, har gitt oss nye, spennende resultater.



**Figur 1.** Dette bildet av jorda over den nordlige halvkulen er tatt fra DE-satellitten, ca. 20 000 km over bakken, i UV-lys. Satellitten registrer UV-nordlys og viser at nordlyset opptrer som en lysende oval i løpet av døgnet. Den hvite pilen peker mot sola og tiden på de ulike stedene rundt polområdet er merket. De gule pilene viser hvor Gjøahavn ligger relativt til nordlysovalen i løpet av 24 timer. Bildet ble tatt da klokken var omtrent 06 i Norge. Der linjene 12-24 og 6-18 møtes, ligger den magnetiske pol. Figuren viser at nordlyset på natten ligger nesten dobbelt så langt fra den magnetiske polen som dagnordlyset. Legg merke til at denne dagen var det ikke noe nordlys over den sentrale polkalotten.

## Theta-nordlyset

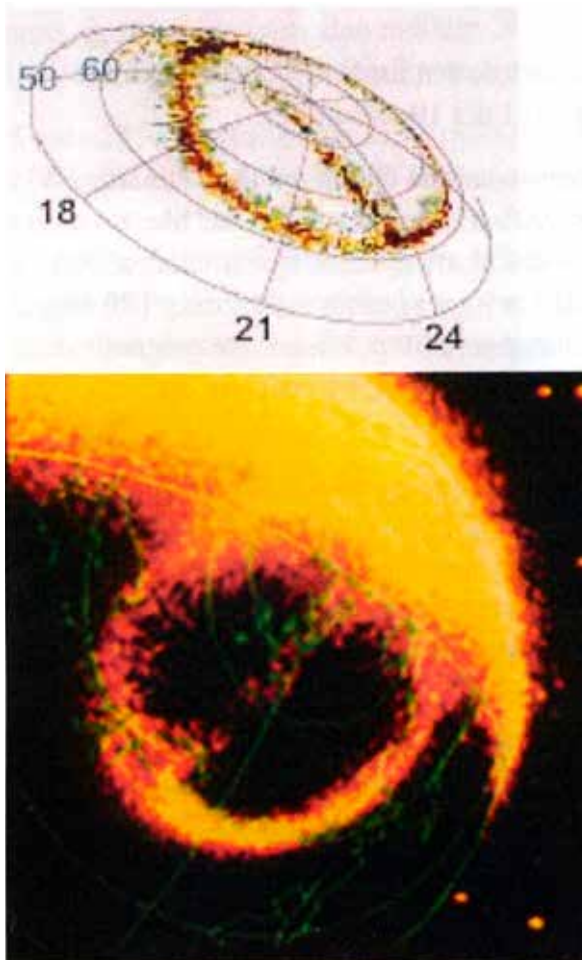
Med satellitten Dynamics Explorer (DE) oppdaget man i 1981 nordlysformen som er vist i figur 2. Den fikk navnet *Theta-nordlys* fordi den lysende nordlysovalen rundt polkalotten med en markert jord-sol-nordlysstråle – som en diameter i nordlysringen – minnet om den greske bokstaven theta. Denne nordlysformen var ikke med i Størmers nordlysatlas. Theta-nordlys ble observert over både den nordlige og sørlige polkalotten. Intensiteten av selve «jord-sol-nordlysbuen» er svakere og fargesammensetningen forskjellig fra nordlyset på nattsiden. Mens fargene i ovalen om natten er mest intens i det gulgrønne området, er nordlysbuen over polarkalotten rødlig. Spektrale registreringer viser at lyset i buen over polen kommer fra oksygenatomer med en bølgelengde på 630 nm, mens nattnordlyset domineres av brede emisjoner fra molekylære gasser i atmosfæren mellom 100 og 200 km over bakken. To øyeblikksbilder av theta-nordlys fotografert i UV sees i figur 2. Fra DE satellitten fikk man nye bilder hver 12. minutt. Det første bildet i figuren er tatt med IMAGE-satellitten i 2002, som fløy i en polarbane med apogeum (lengst fra jorda) og perigeum (nærmest jorda) henholdsvis 8,3 og 1,1 jordradier.

Selve nordlysbuen – diameteren i nordlysovalen på tvers av polkalotten – er orientert i en bestemt retning. Den peker langs forbindelseslinjen mellom sola og jorda, og dreier seg med jorda når den roterer i løpet av et døgn. Theta-nordlyset over polkalotten framstår dermed som et «fantastisk solur», sett fra rommet. Den rødlig buen opptrer bare når solaktiviteten er lav. Forekomsten er derfor ikke koordinert med forstørrelser i jordas magnetfelt, som er typisk for nattnordlys. Estimerte målinger av høyden viser at theta-nordlysbuen ligger mer enn 300 km over bakken, dvs. den ligger dobbelt så langt fra jorda som typisk nattnordlys. Satellittobservasjoner viser at sol-jordbuen opptrer tilnærmet 50 % av tiden (Sandholt et al., 2002), men det er ikke ofte at sol-jordbuen er så intens at den er synlig med det blotte øye.

I tillegg til theta-nordlyset er lysende skyer som driver over polkalotten fra dagsiden til midnatt – på tvers av den sentrale polkalotten – blitt et nytt, viktig forskningsprosjekt. Denne nordlysformen kalles *patches*.

## Historiske data fra Gjøekspedisjonen kaster lys over theta-nordlys mer enn 50 år før «gjenoppdagelsen»

Lite var kjent om nordlys og jordas magnetfelt i polkalotten fordi ingen systematiske observasjo-



**Figur 2.** Figuren viser to observasjoner av theta nordlys. I det nederste fra DE-satellitten, tatt over Antarktisk, befinner sola seg opp til høyre. Bildet over er observert med IMAGE i 2002. Både tid og magnetisk breddegrad er gitt. Sola befinner seg nå opp til venstre. (Foto. NASA)

ner var utført da polarekspedisjonene begynte i det 19. århundre.

Her skal vi kort diskutere hva man kan lære fra observasjoner på Gjøahavn (koordinater 68° 37" N; 95° 54" W; 81° magnetisk nord) i perioden 1903–1905. Jordas magnetfelt ble kontinuerlig registret, og nordlys i polkalotten – med det blotte øye – ble systematisk notert. Alle dataene ble lagret ved Nasjonalbiblioteket hvor de har ligget nesten urørt i over 100 år. Nyss har dagbøkene fra de som hadde ansvaret for målingene blitt publisert. De magnetiske registreringene ble omtalt i et par avhandlinger i 1930-årene (Steen, Russeltvedt og Wasserfall, 1933; Wasserfall, 1939).

De 19 månedene med geomagnetiske data av høy kvalitet ble for kort tid siden analysert på nytt, basert på hva vi har lært i romalderen. De er omtalt i en rapport fra Fram-museet (Egeland and Deehr, 2014). En markert 27-dagers periodisk variasjon i dataene, sett fra Gjøahavn, viser tydelig at solaktiviteten også påvirker jordas

magnetfelt i polområdet. Fra Gjøahavn-målinger har vi dermed fått nye kunnskaper om magnetfelt i verdensrommet.

Målingene viste også at den magnetiske polen ikke har en fast beliggenhet, men flytter seg både daglig samtidig som den driver nordøstover med tiden. Fra observasjonene fikk man informasjon om magnetfeltet i det interplanetare rommet som omkring 1900 var delt opp i fire markerte sektorer for hver solrotasjonsperiode, hvor det interplanetare feltet vekselvis pekte mot sola og jorda. Når magnetfeltet var rettet fra sola mot jorda, ble en økning i feltet observert på jorda.

At Robert Falcon Scott på motsatt ende av den magnetiske feltlinjen gjennom Gjøahavn – på stasjonen Cape Armitage – gjorde samtidige observasjoner av magnetfelt og nordlys som Amundsen, førte til nye kunnskaper om magnetfeltet på de to polkalottene. Nordlysobservasjonene fra Gjøahavn og Cape Armitage vil bli presentert i et prosjekt vi nå arbeider med. Det står også i dagboken, side 252, at Amundsen hadde en avtale med Scotts ekspedisjon om internasjonale «termindager», hvor de da skulle gjøre samtidige observasjoner med ekstra høy tidsoppløsning.

Nordlyset over Gjøahavn – basert på hva de så med det blotte øye – er dokumentert i nordlysprotokoll nummer 80. Det var Peder Ristvedt som hadde ansvaret for observasjonene. I tillegg til de 75 dagene hvor 94 observasjoner er oppført, har Amundsen i sin dagbok omtalt 15 andre nordlyseventer. Basert på det som står i protokollen og dagbøkene fra Amundsen, Ristvedt og Gustav Wiik, mener jeg at sol-jordnordlysbuen – den sentrale formen i theta-nordlyset – ble observert på Gjøahavn. Fordi man med det blotte øye bare så de intense sol-jordbuene, er det bare noen få observasjoner av denne nordlysformen.

Fra et observatorium på bakken kan man bare se deler av theta-formen, dvs. en del av ovalen på nattsiden og selve buen fra ovalen opp til senit og noen få ganger litt lengre nord.

På side 241 fra 4/11 1903 i Amundsens dagbok står: «Så et tydeligt og skarpt Nordlys. Det viste seg i en halvcirkeldannelse ca. 30° over horisonten i SE. Fra halvcirkelen strakte det seg store stråler mot zenith. Strålene kom & svant afvekslende, så jeg er fuldt overbevist om at det var Nlys. Det varede ca. et kvarter og forsvandt.» (Dagen etter står: «Nordlyset jeg iaktog i går havde svagt forstyrrelser på magnetkurvene.») Det finnes i protokollen flere omtaler hvor de ser deler av ovalen mellom 20 og 40 grader over horisonten i syd, samtidig med en eller flere buer fra denne som krysser senit.

På side 253 i dagboken skriver Amundsen den 17/11 1903: «Jeg holder oppe til midnat, når der er

Nlys for at observere.» Han skriver om «nær sagt rette linjer» med nordlysstråler, men det er ikke ofte det ble sett nord for senit. På side 259 og flere andre steder i dagboken, diskuterer han forekomsten av nordlys og forstyrrelser i jordas magnetfelt. «Thi nu har vi flere gange hat anledning til at se, at enkelte og ofte sterke Nlys ingensomhelst indflytelse har medens andre og svakere kan virke meget forstyrrende.»

## Epilog

Roald Amundsen og hans seks-manns besetning utførte et imponerende observasjon og kartleggingsarbeid under meget vanskelige forhold ved gjennomføringen av Gjøa-ekspedisjonen. Takket være deres målinger fikk vi for første gang informasjon om nordlys og jordas magnetfelt i polkalotten. Fra Gjøahavndataene kan man også få kunnskaper om magnetfelt på sola, 60 år før romalderen.

Ved bruk av avanserte instrumenter som i dag brukes på bakken, i raketter og satellitter, har vi fått et nytt bilde av verdensrommet. Historiske data som f.eks. Amundsens målinger og Sigrid Undsets (T. Rød Larsen, privat kommunikasjon) observasjoner av perlemorskyer er av stor verdi. Man lærer f. eks. at solaktiviteten og jordas magnetfelt har forandret seg mye i løpet av de siste par hundre årene.

Da både solaktiviteten og jordas magnetiske felt er utsatt for langsommere variasjoner over noen hundre år, er pålitelige data fra ett eller noen hundre år tilbake av stor interesse. Slike data vil også være viktige for å kunne spå om framtida. Et viktig spørsmål reiser seg: hvordan har vi tatt vare på historisk interessant materiale? Når vi etter hvert vet hvor dynamisk jorda og solsystemet er, er det viktig at vi kan dokumentere signifikante langtidsvariasjoner. ■

## Referanser

1. A. Egeland and S. Deehr. The North Magnetic Pole. The Fram Museum (90 p.), 2014.
2. A.S. Steen, N. Russeltvedt and K. F. Wasserfall. The scientific results of the Norwegian Arctic expedition in the Gjøa, Geophys. Publ. no.7, (310 p), 1933.
3. K. F. Wasserfall. Studies on the magnetic conditions in the region between Gjøahavn and the magnetic pole during the year 1904. Terr. Mag., 44 , pp. 263-275, 1939.
4. P. E. Sandholt, H. Carlson and A. Egeland. Dayside and Polar Cap Aurora, Kluwer Academic Pub. (290 p.) 2002.

# Om harmoni i song og musikk



**Artikkelen set harmoni i song og musikk i samanheng med omgrepa samstemming, overtonar og skalatypar og drøftar tilhøyrande frekvensforhold.**

**Aasmund Sudbø** Institutt for teknologisystem, UiO

Som songar finn eg stor glede i den fleirstemte korsongen, som illustrert ved Berlevåg mannsangforening i figur 1. Det var også tema i dokumentarfilmen «For vi er gutta» [1, 2]. Den reinaste songforma er *samstemt song*, at alle syng på same tone. Nesten like reint er *oktavsong*, med to korstemmer der ein faktor 2 skil stemmefrekvensane. Om eg høyrer ei tredje stemme med frekvens som er ein faktor 3/2 over den lågaste stemma, høyrer eg også ein rein og harmonisk song, kalla *kvintsong*. Eg opplever også den reinstemde treklangen med frekvensforhold på 4:5:6 som harmonisk i samsong i kor. For meg blir songgleda sterkast om koret mitt framfører reinstemde treklanger når samsongen gjev rom for det.

Som fysikar er eg interessert i lyden av song, trykkbølgjene som går gjennom lufta og inn i øyret. Lyden av song er bølgjer med ein grunnfrekvens og overtonar med frekvensar som er heiltalige multiplum av grunnfrekvensen. Slik er det om lyden kjem frå menneskestemmer og slik er det om lyden kjem frå musikkinstrument. I det følgjande skal eg nytte ordet «song» om lyden frå både stemmeband og instrument. Den sentrale eigenskapen med lyden av song blei halden fram av lord Rayleigh, ein av grunnleggjarane av lyd-kunnskap (akustikk) som naturvitskap [3]. Ein songar i kor høyrer lyden av korsongen rundt seg, og vil prøve å syngje sjølv med same tone og same lydstyrke. Dersom han ikkje treffer heilt med sin tonefrekvens, vil han høyre ein tydeleg lågfrekvent variasjon i lydstyrken. Dette skjer fordi lydbølgjene frå stemmebanda til øyret har ein ulik *fase*

**Figur 1.** Songgleda i Berlevåg mannsangforening. Koret blei landskjent gjennom filmen *Heftig og begeistret* frå 2001. Bildet er kopiert med løyve.

enn lydbølgjene som kjem utanfrå gjennom trommehinna, ved at lyden høyrst sterkast dersom lydbølgjene frå hans egne stemmeband er i fase med lydbølgjene utanfrå, og svakast når eigenbølgjene er i motfase med utebølgjene. Denne effekten, kalla *sveving*, gjer at ein øvd songar kan merke om faseforskjellen mellom eigenbølgja og utebølgja forandrar seg. Om frekvensforskjellen mellom eigenbølgja og utebølgja er 1 Hz, skjer dette etter 1/4 sekund.

La meg bruke ordet *tonelyd* om lyd som har éin frekvens, og ordet *songlyd* om lyd som har både grunntone og overtonar, og orda *tonestubb* og *songstubb* om lyd som varer ei kort stund, eit sekund eller mindre. For rytmisk musikk er tre eller fire taktslag per sekund nokså vanleg, slik at ein songstubb som markerer takten i musikken varer typisk eit kvart sekund. For taktmarkeringsar som varer eit kvartsekund betyr kravet om ein felles tonefrekvens i koret at ingen må syngje med ein frekvens som er meir enn 1 Hz feil. Vi kan forlange resonnementet om frekvensfeil til å seie at ein tonestubb som varer eit kvart sekund ikkje bare har ein *senterfrekvens*, men dekker eit frekvensområde på  $\pm 1$  Hz rundt. Tonestubben som varer eit kvartsekund har altså ei bandbreidde på omlag 2 Hz. Men av og til har musikken songstubb som kling eit heilt sekund med same frekvens. For ein sekundlang songstubb bør songaren halde frekvensen på sin tone mindre enn  $\frac{1}{4}$  Hz frå korfrekvensen, heile songstubben gjennom.

## Oktavar, overtonar og skalaer

Kammertonefrekvensen  $f_c = 440$  Hz er ein referansefrekvens i moderne musikk, ved at den frekvensen definerer tonearten A. Det som karakteriserer ein toneart er ei rekke av tonar med frekvensar som er skilde med ein faktor 2. I musikken blir denne faktoren 2 i tonefrekvens kalla ein oktav. I oktavtonerekka for tonearten A finn vi frekvensane 110 Hz, 220 Hz, 440 Hz, 880 Hz og 1760 Hz. Det eg vil halde fram om desse frekvensane er at om vi tek rekka av frekvensar som er heiltalige multiplum av 110 Hz, så omfattar denne rekka alle A-frekvensane 110 Hz, 220 Hz, 440 Hz, 880 Hz og 1760 Hz. Om vi går opp ein oktav og ser på rekka av frekvensar som er heiltalige multiplum av 220 Hz så finn vi stadig

A-frekvensane 440 Hz, 880 Hz og 1760 Hz! Her ser eg som fysikar hovudgrunnen til at oktavsong er så harmonisk i eit kor! Det er fordi all oktavsong gjev ein songlyd slik vi har definert det, med ein grunntone og tilhøyrande overtonar.

Ein viktig tonefrekvens i A-tonearten er 330 Hz, som er ein faktor 3/2 større enn oktavfrekvensen 220 Hz, som er ein faktor 3/4 mindre enn oktavfrekvensen 440 Hz, og som ligg midt mellom 220 Hz og 440 Hz. Om vi ser på frekvensane som gjev overtonane til 330 Hz så finn vi frekvensane 660 Hz, 990 Hz, 1360 Hz og 1650 Hz. La oss sjå på den tette rekka av frekvensar som er heitallige multiplum av 110 Hz, og la oss plukke ut dei som er faktorar 2 av 330 Hz, altså oktavtone-rekka oppover frå 330 Hz. Då finn vi frekvensane 660 Hz og 1360 Hz. Desse frekvensane er dei som karakteriserer E-tonearten i musikken. Her finn eg som fysikar hovudgrunnen til at kvintsong er så harmonisk i eit kor! Det er fordi kvintsong saman med oktavsong gjev ein songlyd slik vi har definert det, med ein grunntone og tilhøyrande overtonar.

Den vanlege A-skalaen i musikken finn vi i dei åtte stega på 110 Hz som går frå 880 Hz til 1760 Hz. Men eit piano skal ikkje ha skala med fast frekvensavstand mellom tonane, men derimot vera «Wohltemperiert», etter råd frå vår sæle komponist J.S. Bach. Den tempererte skalaen har steg med eit fast frekvensforhold,  $f_t = 2^{1/12}$ , slik at vi kan taka oktavsteget frå  $f_c$  til  $2f_c$  med å multiplisere  $f_c$  tolv gonger med  $f_t$ ,  $2f_c = f_t^{12} f_c$ . Vi kan taka eit svært presist kvintsteg opp frå  $f_c$  til  $3f_c/2$  med å multiplisere  $f_c$  sju gonger med  $f_t$ ,  $3f_c/2 \approx f_t^7 f_c$ , og vi kan taka eit svært presist kvartsteg ned frå  $f_c$  til  $3f_c/4$  med å dividere  $f_c$  fem gonger med  $f_t$ ,  $3f_c/4 \approx f_t^{-5} f_c$ .

I tabell 1 er rekka av frekvensar med fast avstand på 110 Hz stilt opp saman med dei tilhøyrande frekvensane frå den tempererte tone-skalaen. Frekvensen aukar nedover i tabellen, og startar med ein frekvens som ligg ein faktor fire under kammertonefrekvensen  $f_c = 440$  Hz, altså to oktavar under kammertonen. I fyrste kolonne finn vi tonenummer, i kolonne 2 finn vi rekka av tonefrekvensar som ligg 110 Hz frå kvarandre, i kolonne 3 har vi markert A-frekvensane som ligg ein oktav frå kvarandre, i kolonne 4 har vi markert E-frekvensane som ligg ein oktav frå kvarandre, i kolonne 5 finn vi symbolet for tonen som er vanleg å bruke i musikken, og i kolonne 6 finn vi dei tempererte tonefrekvensane som er nærast overtonefrekvensane i kolonne 2. Om vi skal vera svært nøye på harmonien i ein songstubb på eit kvartsekund så vil vi krevje at frekvensforskjellen mellom overtonen og den næraste tempererte tonen er på mindre enn 1 Hz. Tabellen ovanfor visar at i A-to-

**Tabell 1.** Rekka av frekvensar med 110 Hz avstand, frekvensane som gjev toneartane A og E, og tilhøyrande frekvensar frå den tempererte toneskalaen.

N	$n f_c / 4$	A	E	Tone	Temperert
1	110	*		A	110,0000
2	220	*		A	220,0000
3	330		*	E	329,6276
4	440	*		A	440,0000
5	550			C#	554,3653
6	660		*	E	659,2551
7	770			G	783,9909
8	880	*		A	880,0000
9	990			H	987,7666
10	1100			C#	1108,7305
11	1210			D#	1244,5079
12	1320		*	E	1318,5102
13	1430			F#	1479,9777
14	1540			G	1567,9817
15	1650			G#	1661,2188
16	1760	*		A	1760,0000

nearten er det bare dei tempererte E-tonane som er nær nok i frekvens.

Ein annan viktig tonefrekvens for musikk som går i tonearten A er 550 Hz. Den frekvensen ligg midt i kvintintervallet frå 440 Hz til 660 Hz, frekvensen er i overtonerekka for 110 Hz, og frekvensen inngår i den harmoniske treklangen. Pianoet skal ikkje tone med frekvensen 550 Hz, men med frekvensen 554 Hz. Pianoet har sin styrke i musikalsk samspel i dei kortvarige songstubbane som det kan gjeva. Pianomusikk er full av songstubbbar som ikkje varer lenger enn 1/16 sekund. Ein tonestubb som varer 1/16 sekund har frekvensbreidde på godt over 8 Hz. For ein pianotreklang som bare varer i 1/16 sekund er frekvensbreidde til den tempererte tonestubben på 554 Hz så stor at det ikkje er mogeleg å høyre avviket på 4 Hz frå 550 Hz.

### Ein harmonisk songfelleskap

Lyd er eit sanseinstrykk som hjernen til eit foster byrjar å arbeide med i mange månader før barnet blir fødd. Fosteret som ligg i mors mage høyrer mykje av den lyden som er rundt mora til dagleg. Alle som opplever svangerskap i familien burde difor synge for barnet i magen! Song burde vera eit emne på alle svangerskapskurs, og song burde stadig ha ein stor plass i skulen! Om vi ser for oss lydbølgjene der dei går inn i barneøyret så treffer

dei fyrst trommehinna, og går vidare innover til den delen av øyret der lyd­bøl­gje­ne blir sortert etter frekvens. Lydbølger med ulike frekvensar går til ulike sanseceller i øyret. Sanseopplevinga som lyden gjev kan følgjast som elektriske puls­signal langs nervetrådane inn i hjernen, og eg ser for meg at dei ulike frekvenskomponentane i lyden blir sansa i ulike hjerneceller. Den mest harmo­niske songen blir då den som gjev ein songlyd med mange harmoniske overtonar, for slik songlyd sti­mulerer mange hjerneceller i parallell! Som fysikar

trur eg difor at sansen for harmonisk song er inne­bygt i høyrselssansen. ■

#### Referansar:

1. <https://www.filmweb.no/film/article1356819.ece>
2. Hilde Lundgaard. «På sangens lykkepille». *Aftenposten A-magasinet* 2. desember 2018.
3. J.W. Strutt, Baron Rayleigh. «The Theory of Sound». MacMillan et Co, London 1877.

## NYE DOKTORER



### Mathias Myrvtveit Sæther

Mathias Myrvtveit Sæther forsvarte sin PhD-avhandling, *Elastic wave velocities and attenuation under methane hydrate growth in Bentheim sandstone. –Measurements and modelling*, for PhD-graden ved Institutt for Fysikk og Teknologi, Universitetet i Bergen, 18. desember 2018.

Store forekomster av metan ligger fanget i krystallisert form sammen med vann under havbunnen. Disse ressursene kalles metanhydrat og kan potensielt bli brukt som energikilde.

Hastigheten til kompresjons-lydbølger (P-bølger) og skjær-lydbølger (S-bølger) i et hydratholdig reservoar er avhengig av en rekke faktorer. Det samme gjelder energitapet for disse bølgene under lydforplantingen. Eksempler på slike faktorer kan være: Frekvensen til lydbølgene, om reservoaret består av sementerte eller løse materialer, trykket i reservoaret, mengde fri gass eller fritt vann i reservoarporene, konsentrasjon av metanhydrat og vekstmønsteret inne i porene. Med vekstmønster menes hvorvidt hydratene har vokst fast i reservoarmassene og sementerer dem eller om hydratene har blitt dannet midt inne i porene uten kontakt med de faste massene. Målinger av slike

elastiske bølger kan derfor potensielt benyttes til å lokalisere og kvantifisere metanhydrat.

Under tidligere laboratorieforsøk har hastigheten til elastiske bølger i hydratholdige sandprøver blitt målt for å studere sammenhengen mellom noen av faktorene nevnt ovenfor. I motsetning til tidligere utførte målinger har Mathias M. Sæther i sitt doktorarbeid målt P- og S-bølgene med "Fourier-spektrum-metoden" (FSM). Denne metoden muliggjør lyd­hastighets­målinger for forskjellige frekvenskomponenter og målinger av energitap for bølgene. Målinger utført med FSM ble sammenlignet med ulike transit-tid-målemetoder tradisjonelt brukt i feltet.

"Biot-squirt-flow-modellen" (BISQ) beskriver hvordan lydbølgetrykket induserer en væskestrøm inne i porøse materialer og resulterer i tap av akustisk energi. De målte dispersjonskurvene (kurver som viser endring av lyd­hastighet som funksjon av frekvens) og det målte tapet for P-bølgene, ble tolket gjennom bruk av BISQ og spredningsteori for lydbølger, for frekvenser 350 kHz-600 kHz.

Lyd­hastighets- og tapsmålinger ble utført på sandsteinsprøver under hydratdannelse i en trykkcelle. Spesialtilpassede lydkilder og sensorer ble konstruert. Effekter fra uønskede lydrefleksjoner og diffraksjonseffekter i måleoppsettet ble analysert ved hjelp av endelig element modelleringer.

I dette arbeidet ble endringen av hastigheten til de elastiske bølgene som funksjon av hydratkonsentrasjonen i sandsteinene målt til å være lavere enn i hydratholdige sandprøver fra tidligere studier. Resultatene ble tolket ved hjelp av numeriske modeller der vekstmønsteret til hydratene i sandsteinene inngår.

Arbeidet ble utført ved Institutt for Fysikk og Teknologi, Universitetet i Bergen. Hovedveileder var Per Lunde og biveileder var Geir Ersland.

RETURADRESSE:

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

## Styret i Norsk Fysisk Selskap

### President

Professor Asle Sudbø, Institutt for fysikk, NTNU

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

### Vara

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

E-post: [arne.grimenes@nmbu.no](mailto:arne.grimenes@nmbu.no)

### Styremedlemmer

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

Førsteamanuensis Magnus Borstad Lilledahl, NTNU, biofysikk

Postdoktor Audun Theodorsen, UiT, atmosfære-, rom- og plasmafysikk

Professor Håvard Helstrup, HiB, subatomær fysikk og astrofysikk

Professor Jon Samseth, OsloMet, industri- og energifysikk

Professor Astrid Aksnes, NTNU, optikk

Lektor Kaja Nordby, Kongsbakken vgs., Norsk Fysikklærerforening

### Adresse

Norsk Fysisk Selskap

Institutt for fysikk, NTNU

7491 Trondheim

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

Sekretær: Haakon Thømt Simensen

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

Bankgiro: 7878.06.03258

Org.nr.: 940 340 829

### Bedriftsmedlemmer av NFS

Vi takker for støtten fra våre bedriftsmedlemmer:



UiT / NORGES ARKTISKE  
UNIVERSITET



 NTNU 



UiO : Universitetet i Oslo

ISSN-0015-9247