

Fra Fysikkens Verden

NR. 2 – 2021
83. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP



**Nye funn
innen fisjon**

Les også om:

■ Higgspartikkelen
■ Myonet

■ Polaroner

Nr. 2 – 2021

83. årgang

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap
www.norskfysisk.no

Redaktører:

Professor emeritus Øyvind Grøn
OsloMet – Storbyuniversitetet og UiO
E-post: oyvind.gron.no@gmail.com

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

Redaksjonssekretær:

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

Redaksjonskomité:

Professor Odd-Erik Garcia, Institutt for fysikk, UiT
Professor Ellen K. Henriksen, Fysisk institutt, UiO
Førsteamanuensis Trygve Buanes, Institutt for datateknologi, elektroteknologi og realfag, HVL

Layout og sats:

Maria Hammerstrøm

Forsidebilde:

Steven Burrows/The Kaufman Group,
gjengitt med tillatelse

Trykkeri:

Oslo Sats, repro og montasje A/S

Abonnere:

Fra Fysikkens Verden kommer ut fire ganger årlig.
Abonnement tegnes på følgende postadresse
eller e-post:

Fra Fysikkens Verden
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo

E-post: nfs.styret@gmail.com

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

Retningslinjer for bidragsyttere

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

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

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

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

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

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

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

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

Innhold

Frå redaktørane *Emil J. Samuelsen* 23

Fysikknytt

Nytt om higgspartikkelen *Øyvind G. Grøn* 24

Dannelse av polaroner *Øyvind G. Grøn* 26

Artikler

Ny måling av myonets anomale magnetiske moment *Bjarne Stugu* 28

Spinnville fisjonsfragmenter *Dorthea Gjestvang* 32

Småstoff

Fysikere på frimerker: Ernst Abbe *Øyvind G. Grøn* 37

Bokomtale: *Vi er stjernestøv – Kjernefysikk for folk flest*
av Sunniva Rose *Øyvind G. Grøn* 38

Personomtaler

Gratulasjon: Olav Steinsvoll *Emil J. Samuelsen og Arne T. Skjeltnor* 40

Ny doktor: Fredrik Kristoffer Mürer 42

Nekrolog: Arnfinn Graue *J.R. Lien, E. Osnes, T.B.Skaali og J.S. Vaagen* 43

FRÅ REDAKTØRANE

Fra Fysikkens Verden er eit blad som prøver å avspegle kva som skjer i fysikk til kvar tid. Dette nummeret er på 24 sider, og inneheld element frå «alle» sider av fysikken. Her er nytt om higgspartikkelen og jamvel om dannelsesmekanisme for fenomenet polaronar i faste stoff.

Her er nye tal for magnetisk moment for myonet, tilsynelatande eit ubetydeleg avvik frå forventingane etter 'standardmodellen', men nok til å gi grunnlag for spekulasjonar. *FFV* kan gi ein grundig rapport om nye detaljar frå ein så «klassisk» kjernefysisk prosess som fisjon. Historisk fysikar på frimerke blir omtalt, og likeeins ny doktorgrad og ein bokomtale. Omtale av veteranar høyrer med. Ettersom åra går, er det somme som har fylt år og somme som er gått bort.

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



Øyvind G. Grøn



◀ Emil J. Samuelsen

Nytt om higgspartikkelen

I eksperimenter ved CERN har en forskergruppe observert tegn til at kollisjoner av energirike protoner kan produsere higgs-partikler som henfaller til elektroner eller myoner.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Eksistensen av higgspartikkelen ble forutsagt av flere fysikere omkring 1964. En av dem var Peter Higgs som partikkelen er oppkalt etter. Det er en partikkel med spinn 1, og slike partikler kalles bosoner etter den indiske fysikeren Satyendra Nath Bose som først beskrev statistikken for dem. Derfor kalles partikkelen gjerne higgsbosonet.

Partikkelen ble innført for å forklare hvorfor noen partikler som ifølge teorien omkring 1960 skulle vært masseløse, likevel ble observert å ha masse. Problemet var særlig akutt for de såkalte W- og Z-bosonene som formidler den svake kjernekräften.

I løpet av de ti årene fra midt i 60-årene til midt i 70-årene ble teorien for higgspartikkelen og dens tilhørende felt, kalt higgfeltet, utviklet som en del av det som nå kalles *standardmodellen* i elementærpartikkelfysikken. Teorien innebærer at vekselvirkning med higgfeltet gir masse, ikke bare til W- og Z-bosonet, men også til andre elementærpartikler.

I de neste 30 årene ble spørsmålet om higgspartikkelen virkelig eksisterer, oppfattet som det

kanskje viktigste uløste spørsmålet i elementærpartikkelfysikken. I 2010 var den fortsatt ikke funnet. Men det var gitt estimer på hvilken masse den kunne ha, og man var i gang med å bygge partikkelakseleratoren Large Hadron Collider (LHC) i CERN, for å få svar på spørsmålet om dens eksistens. Standardmodellen forutsa at den skulle ha en masse på omtrent 125 GeV, det vil si omtrent 133 protonmasser.

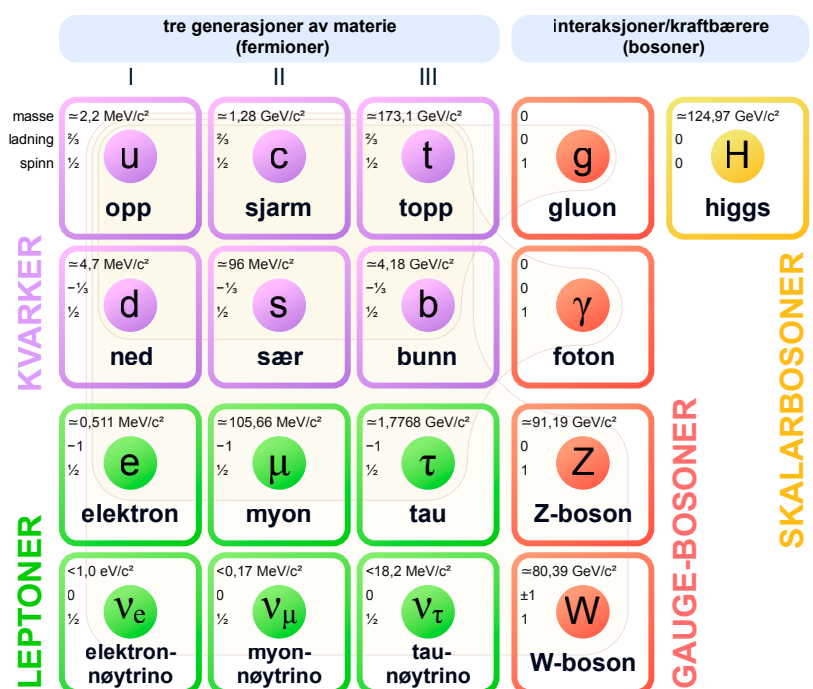
Oppdagelsen

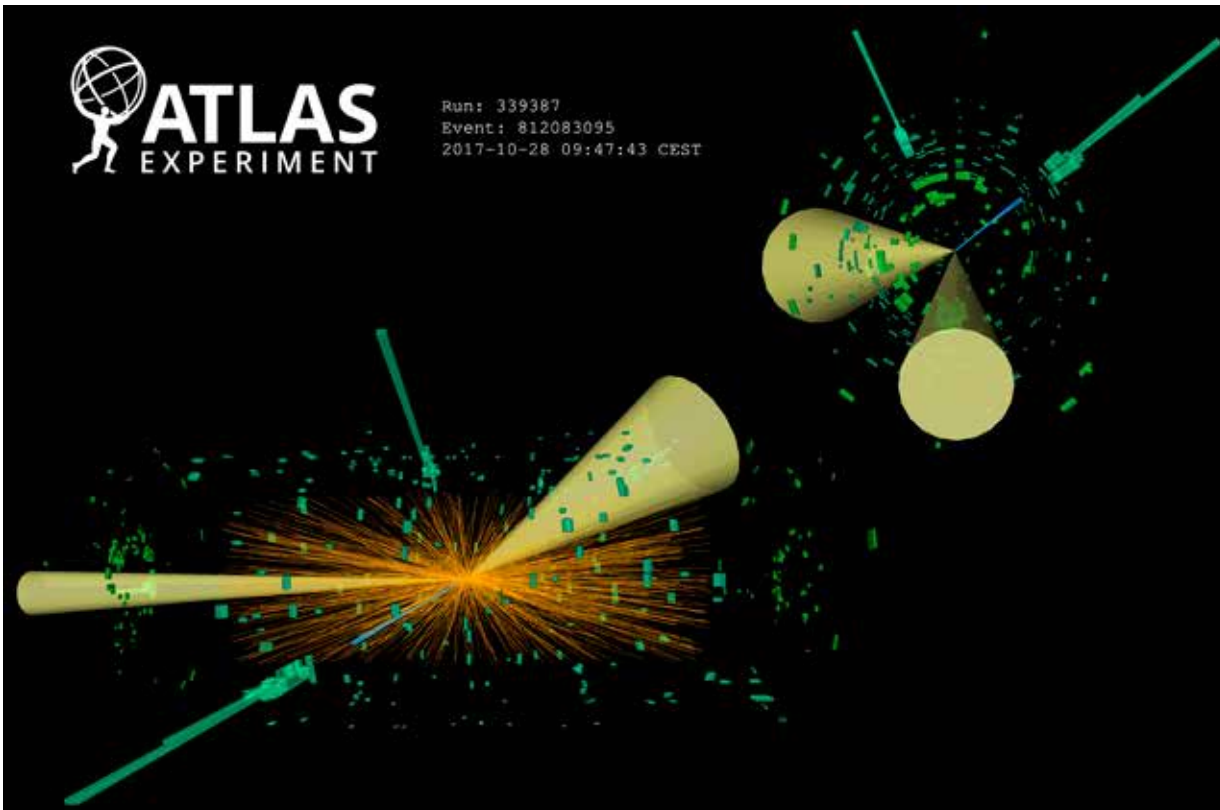
Jakten på higgspartikkelen med LHC-akseleratoren ble en suksess. Higgspartikkelen ble oppdaget i 2012 ved hjelp av ATLAS- og CMS-detektorene til LHC. Dette førte til at Peter Higgs og François Englert fikk Nobelprisen i fysikk allerede i 2013 for forutsigelsen av dens eksistens.

I årene etter 2012 har man brukt LHC blant annet til å undersøke higgspartikkelens egenskaper. Dette gjøres ved å skyte protoner mot hverandre med praktisk talt lysets hastighet. Når de treffer hverandre kommer en skur av partikler ut fra kollisjonsstedet. En stor del av protonenes bevegelsesenergi brukes til å produsere nye partikler, mange av den med utrolig kort levetid.

Blant de som lever kortest er higgspartikkelen. Den er så ustabil at den i gjennomsnitt bare eksisterer i $1,6 \times 10^{-22}$ sekund. Det betyr at selv med lysets hastighet beveger den seg bare $4,8 \times 10^{-14}$ meter, dvs. omtrent en tusendel av

Figur 1. Partiklene som inngår i standardmodellen.
(Grafikk: Wikipedia Commons)





Figur 2. Slik kan det se ut i ATLAS-detektoren etter en kollisjon av to protoner. Her er en skur av partikler dannet ved en kollisjon av energirike protoner, vist fra to ulike vinkler. Fra denne har ATLAS-gruppen greid å vise at blant de mange tingene som skjedde, ble det dannet en higgspartikkel som raskt henfalt til et foton og et partikkel-antipartikkel-par som enten besto av et elektron og et positron eller en myon og en antimyon. (Grafikk: CERN/ATLAS)

utstrekningen til et atom. Så den greier man ikke å observere direkte. Det er partiklene den går over til, man kan registrere med for eksempel med ATLAS-detektoren.

Det har stor interesse å vite hva slags partikler en higgspartikkel kan gå over til, for det forteller om hvilke partikler higgspartikkelen og dens tilhørende higgfelt vekselvirker med, og hvor sterk denne vekselvirkningen er. Dette kan også gi informasjon om i hvilken grad higgfeltet gir ulike partikler masse.

Nye resultater

2. februar 2021 publiserte ATLAS Collaboration en konferanserapport der de annonserte nye måleresultater for higgspartikkelen.

Det krever stor datakraft og kunnskaper om hva man skal lete etter, å trekke ut interessant informasjon fra en enorm skur av partikler man ikke er interessert i (Figur 2).

Ved hjelp av spesialutstyr designet for å finne ut om en higgspartikkel kan henfalle til leptoner, har ATLAS-gruppen nå vist at dette høyst sannsynlig skjer. Leptoner er partikler med spinn $\frac{1}{2}$ som ikke

merker den sterke kjernekräften, slik som elektronet og dens tyngre variant myonet.

Det nye resultatet som ble annonsert i februar, er at en higgspartikkel er blitt omdannet først til fotoner og så videre til et foton og et lepton-antilepton-par der den samlede massen til lepton-antilepton-paret er under 30 GeV. Det var foreløpig ikke mulig å avgjøre om leptonene er elektroner eller myoner.

Forskerne har oppgitt at det er en signifikans på 3,2 standardavvik på at det observerte signalet ikke bare er en fluktusjon i bakgrunnsstøyen av andre partikkelsignaler. Dette er ikke nok til å hevde at det er gjort en sikker oppdagelse. For å kunne si det kreves en signifikans på fem standardavvik.

Observasjonene ble gjort i den andre perioden av eksperimenter med LHC. Akseleratoren er nå lukket for å oppgradere den til en tredje periode med ennå mer kraftfulle eksperimenter. Planen er at den tredje perioden med forsøk skal starte i løpet av 2022. Da vil det bli klarlagt med langt større sikkerhet om higgspartikkelen kan henfalle til leptoner, noe som ville indikere at higgfeltet også bidrar til å gi leptoner masse. ■

Dannelse av polaroner

I studier utført ved Aarhus universitet er simuleringer og eksperimenter brukt til å studere hvordan en kvasipartikkel kalt polaron kan dannes.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

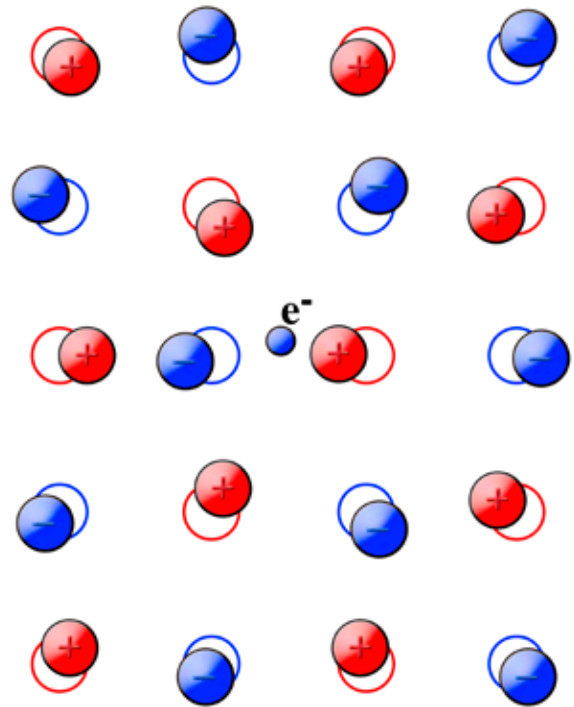
En kvasipartikkel er ikke en partikkel, men en matematisk modell der molekylene i et fast stoff erstattes av et partikkel-liknende objekt som bare vekselvirker svakt med sine omgivelser. En slik tilnærming gjør det mulig å beregne en del egenskaper for faste stoffer, beregninger som ville vært håpløst kompliserte hvis man skulle regne på oppførselen av de virkelige partiklene i et fast legeme.

Denne modellen for å beskrive faststoff-fenomener ble introdusert av den russiske fysikeren Lev Landau i 1933. Han brukte den til å gi en kvantemekanisk beskrivelse av vekselvirkningen mellom elektroner og lydbølger, som i kvantisert tilstand representeres ved en type kvasipartikler kalt fononer.

Det er nesten et under at idéen fungerer så godt. Kompliserte fenomener som eksitasjoner, vibrasjoner og elastiske bølger i faste stoffer kan representeres ved partikler med modifisert masse som vekselvirker svakt med hverandre og oppfører seg enkelt nok til at deres oppførsel kan beskrives matematisk. Teorien danner det teoretiske grunnlaget for å forstå fenomener som magneto-resistans og superledning i faste stoffer.

Språkbruk

Elementærpartiklene har *spinn*, en form for mikroskopisk impulsmoment. SI-enheten for spinn er kgm^2/s . Plancks konstant har samme enhet, $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ kgm}^2/\text{s}$. Den såkalte reduserte Plancks konstant er $\hbar = h/2\pi$. Spinnen til en elementærpartikkel oppgis vanligvis i enheter av \hbar . Partikler med spinn $1/2$ kalles *fermioner* og de med



Figur 1. Illustrasjon av et polaron. Se forklaring i hovedteksten. (Grafikk: Wikipedia Commons)

spinn 1 *bosoner*. Dersom de «matematiske partiklene» har spinn $1/2$, kalles de *kvasipartikler*, og de med spinn 1 kalles ofte, men med visse unntak, *kollektive eksitasjoner*.

Polaronet

Et *polaron* er en kvasipartikkel som brukes for å forstå vekselvirkningen mellom elektroner og atomer i faste legemer. Da den ble introdusert av Landau i 1933 var det for å beskrive bevegelsen av elektroner i en dielektrisk krystall. Et ledningselektron i en halvleder frastøter negativt ladde ioner og trekker til seg positivt ladde (Figur 1). Det betyr at gitteret i nærheten av elektronet blir elektrisk polarisert. Dermed oppstår et elektrisk felt fra krystallgitteret som gjør at elektronet beveger seg langsommere.

Dette kan beskrives ved å erstatte elektronet med en partikkel med større masse som vekselvirker svakere med ionene i krystallgitteret – et polaron. Navnet polaron kommer av at denne kvasipartikkelen representerer den elektriske polariseringen av et gitter induisert av et ledningselektron i stoffet.

Polaroner er viktige blant annet for å forstå optiske egenskaper av materiale. De har også vært til nytte i studiene av organiske halvledere.

Nye resultater

Det har inntil nylig ikke lyktes å gi en detaljert beskrivelse av hvordan kvasipartikler dannes siden slike prosesser foregår uhyre raskt.

Men den 25. februar 2021 publiserte en gruppe fysikere ved Aarhus universitet en artikkel i *Nature Physics* der de rapporterte om nye eksperimenter som gjorde det mulig å observere hvordan polaroner ble dannet.

De framstilte et Bose-Einstein-kondensat slik at de kunne observere hvordan kollektive forskyvninger av positive og negative ladninger i forhold til hverandre dannet elektrisk polariserte områder

med en kvantisert oppførsel som gjorde at det ble dannet polaroner.

Et Bose-Einstein kondensat er en fase av materien som kan dannes dersom en gass av partikler med spinn 1 (bosoner) med svært lav tetthet (en hundre tusendel av tettheten til atmosfæren ved jordoverflaten) avkjøles til temperatur nær det absolutte nullpunkt.

De manipulerte et Bose-Einstein-kondensat slik at det ble dannet en populasjon av partikler som de «dopet» kondensatet med. Det ble utviklet utstyr til å studere vekselvirkningen av disse partiklene med Bose-Einstein-kondensatet i omgivelsene. Man kunne da «se» hvordan denne vekselvirkningen ga opphav til dannelsen av polaroner.

Denne forskningen bidrar til å øke forståelsen av hvordan fenomener som superledning kan oppstå i faste stoffer. ■

Referanse

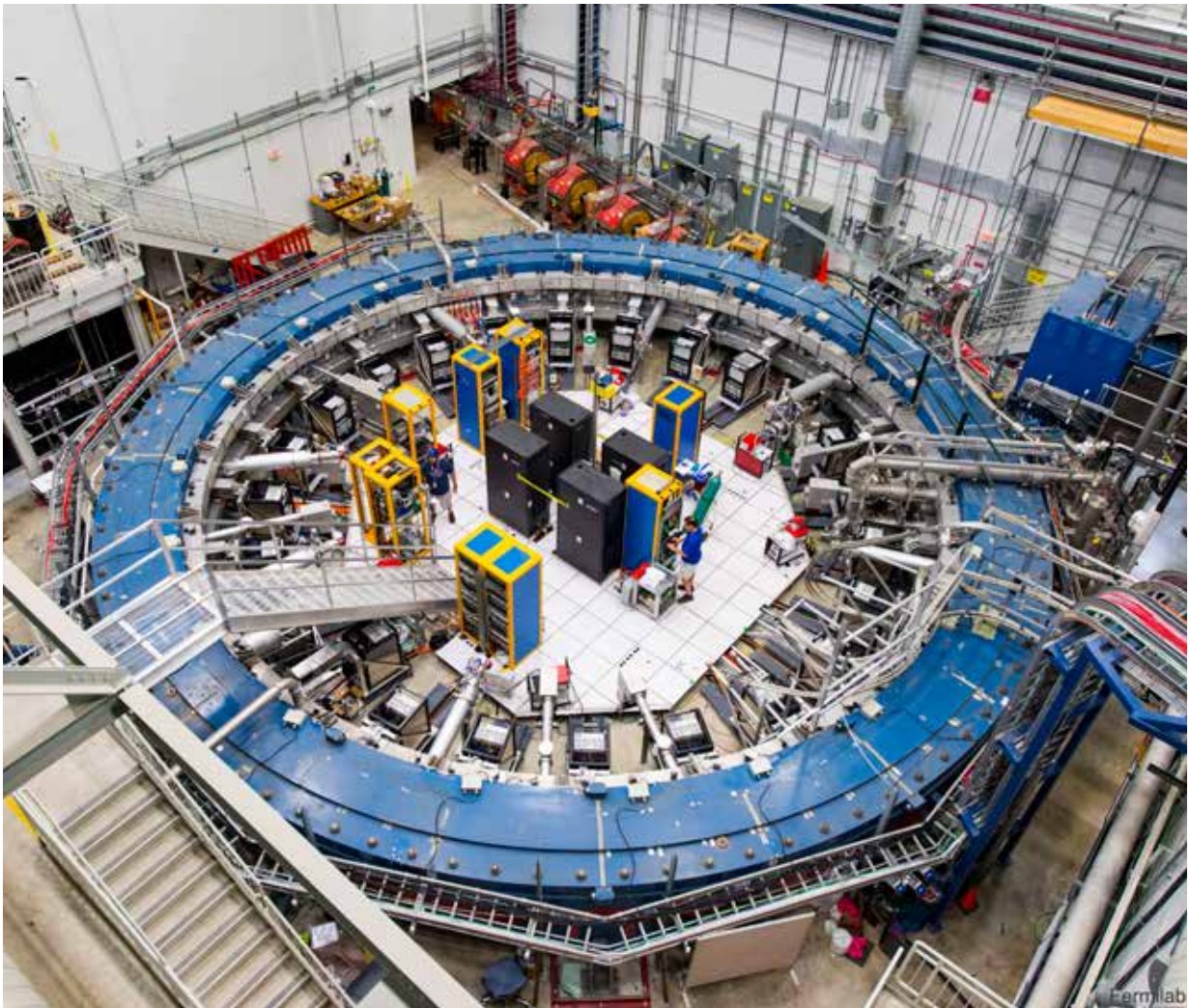
- [1] M.B. Skou og medarbeidere. «Non-equilibrium quantum dynamics and formation of the Bose polaron». *Nature Physics* (2021). doi: 10.1038/s41567-021-01184-5.



Nordiske fysikkdagar i Uppsala 4.–6. august 2021

Norsk Fysisk Selskap og *Fra Fysikkens Verden* minner om at planlagte, men utsette fysikkdagar 2020 skal avviklast i august 2021 i Uppsala.

Sjå kunngjering med påmelding og fristar under www.nordicphysicsdays2021.se.



Ny måling av myonets anomale magnetiske moment

Etter noen års datainnsamling og analyse, har 'Muon g-2'-eksperimentet ved Fermilab publisert sine første resultater på målingen av myonets anomale magnetiske moment. Resultatet er konsistent med en tidligere presisjonsmåling av denne størrelsen, og øker signifikansen til avviket fra Standardmodellens prediksjon, som nå er på 4,2 standardavvik.

Bjarne Stugu Institutt for fysikk og teknologi, UiB

Dersom man har tatt bachelorkurs i kvantemekanikk, vil man antakelig ha kjennskap til atomers oppførsel i magnetfelt, og hvordan energinivåene splittes opp. Når atomene plasseres i magnetfelt så inntreffer oppsplittingen på grunn av forskjellige tilstander i elektroners banespinn. Den grunnleg-

gende formel for energitilstandene er, når man ser bort fra elektronets egenspinn:

$$E = \frac{e\hbar}{2m_e} Bm_l$$

Her er komponenten av atomets angulære moment langs retningen av det magnetiske feltet, m_l , et helt tall eller null, og B er verdien av den magnetiske flukstettheten til magnetfeltet det er plassert i. Størrelsen $\mu B = e\hbar/(2m_e)$, der e er elektronets elektriske ladning, m_e er elektronets masse og \hbar er Plancks konstant delt på 2π , kalles Bohr-magnetonet.

Elektronet har også et egenspinn $S^2 = \hbar^2 s(s+1)$ med $s = 1/2$. Dette gir også opphav til oppsplitting, idet egenspinnet kan ha to verdier for sin komponent langs B-feltet, $m_s = 1/2$ eller $m_s = -1/2$. Men oppsplittingen blir ikke som forventet fra

Figur 1. Fermilab-ringen der et g-2-eksperiment utføres. Elektronene fra myonhenfall bøyes inn i ringen og treffer elektronetektorer plassert med jevne mellomrom på innsiden av røret. Utlesningselektronikk er plassert i de svarte boksene man ser på bildet. (Foto: Fermilab)

formelen over. Det magnetiske momentet må multipliseres med en faktor g . Dersom man erstatter Schrödinger-ligningen med Dirac-ligningen (eller utvider Schrödinger-ligningen til å ta med elektronets spinn tilstander i den såkalte Pauli-ligningen), så forutsies det at elektronets g -faktor er $g = 2$ slik at elektronets magnetiske moment gir en oppsplitting $E = \mu_e B m_s$ med $\mu_e = e\hbar/m_e$.

Elektronets anomale magnetiske moment

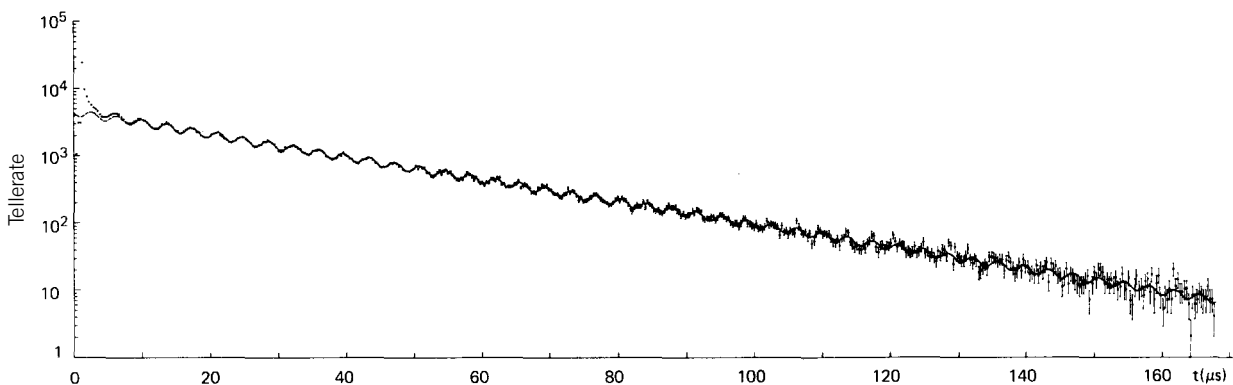
Den eksperimentelle verdien av g avviker fra 2 med litt mer enn en promille. Elektronet har et anomal magnetisk moment, $a_e = (g - 2)/2$. For å forstå dette må man kvantisere det elektromagnetiske feltet, altså beskrive det som en samling av fotoner. Teorien for dette, QED (Quantum Electro Dynamics, eller kvantefeltteori) gjør det mulig å beregne verdien av a_e approksimativt til stadig høyere orden, og har blitt beregnet med svært stor nøyaktighet. Det største bidraget ble i 1948 tallfestet til $a_e = \alpha/(2\pi)$, der α er finstrukturkonstanten, av en av grunnleggerne av teorien, Julian Schwinger. Det er ofte framhevet at den målte verdien av elektronets anomale moment representerer verdens mest presise verifikasjon av en fysikkteori, idet målinger av a_e gir samsvar med den teoretiske verdien med 11 siffrers nøyaktighet [1]!

Den eksperimentelle teknikken for å måle elektronets magnetiske moment har gått ut på å plassere elektroner i et kjent magnetfelt i en såkalt «Penning trap», og er i prinsippet basert på anvendelse av formelen for splitting av energinivåer, der man bestemmer forskjellen i energinivåer for $m_s = 1/2$ og $m_s = -1/2$ gjennom presis bestemmelse av frekvensen på den tilhørende strålingen som sendes ut eller absorberes i overgangene, og naturligvis, like god bestemmelse av magnetfeltet i Penning-fella [2].

Myonets anomale moment

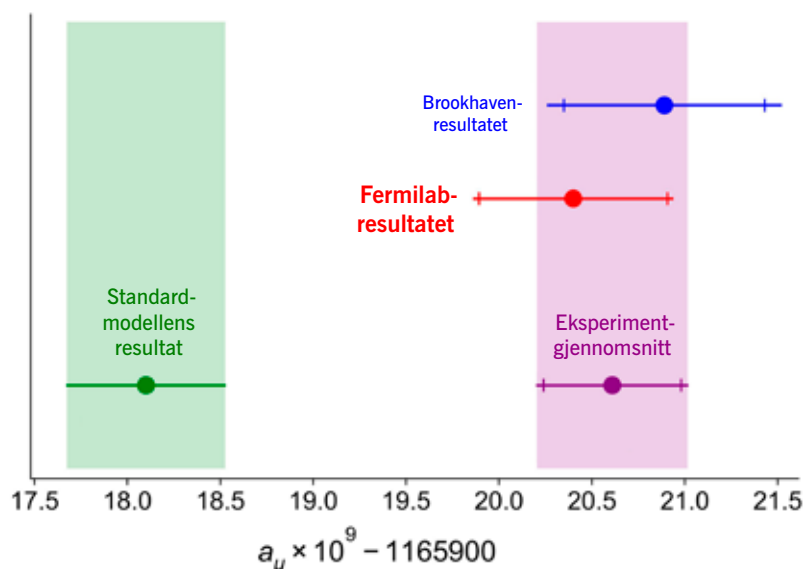
For å finne myonets anomale moment kreves mer apparatur. For det første må man ha tilgang til store mengder myoner. Dette krever en større protonakselerator. Energirike protoner skytes inn i en metallblokk der protonenes kollisjoner med atomkjerner fører til skapelse av mange ladde pioner, som i sin tur henfaller til de ønskede myonene i prosessen $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. Myonene kan fokuseres og samles opp i en lagringsring, der verdien av magnetfeltet bestemmer hvilken energi disse myonene har. Myonene kommer i kortvarige pulser, gitt av varigheten av protonpulsene i den opprinnelige akseleratoren.

To viktige kjennsgjæringer gjør det mulig å



Figur 2. Tellerrate til henfalls-elektroner modulert med (g-2)-frekvensen, som observert i et av CERNs myoneksperiment. (Grafikk: fra referanse [3])

Figur 3. Forskjellen på 4,2 standardavvik mellom verdiene av myonanomalien beregnet fra elementærpartikkel-fysikkens standardmodell og oppnådd i eksperimenter ved Brookhaven og Fermilab. (Grafikk: Fermilab)



finne myonets anomale magnetiske moment. For det første: Om vi hadde $g = 2$ nøyaktig ville retningen av myonenes spinnvektor endres med nøyaktig samme frekvens som syklotronfrekvensen til lagringsringen. Hvis et myon sin spinnvektor var rettet langs bevegelsesretningen ville det i så fall forbli i denne tilstanden til tidspunktet for henfall (til et elektron og to nøytrinoer). Men siden g er litt større enn 2, endres spinnretningen noe raskere enn bevegelsesretningen.

Ifølge [3] kan forskjellen i frekvens, kalt den anomale presesjonsfrekvensen, med rimelig stor nøyaktighet skrives som

$$\omega_a = a_\mu \frac{e}{m_\mu c} B.$$

For det andre: Pioner henfaller gjennom partitetsbrytende svak kraft. Dette medfører at myonene som leveres til lagringsringen er 100 % polarisert mot fartsretningen. Dette har konsekvenser for det paritetsbrytende myonhenfallet (som så godt som alltid er til ett elektron og to nøytrinoer). Elektroner fra myoner med spinnretning rettet langs fartsretningen har en tendens til å sendes i samme retning, mens myoner som har motsatt spinnretning vil foretrekke å sende elektronene baklengs i forhold til fartsretningen. Asymmetrien i elektronretninger fra en samling myonhenfall vil dermed gi et mål for polarisasjonen av myonene.

Eksperimenter ved CERN

Kjennsgjeringene beskrevet over var først utnyttet av Leon Lederman og medarbeidere, som startet en serie $g-2$ -eksperimenter ved CERN

allerede i begynnelsen av 1960-årene. Det ble konstruert lagringsringer der energien til myonene var stor nok til at de fleste henfallprodukter fortsetter i fartsretningen. Men energispekteret vil avhenge av myonets spinnretning. Elektroner som kommer fra myoner med spinnretning langsmed fartsretningen er gjennomgående mer energirike enn de som kommer fra motsatt rettet spinn. Videre vil elektronene aldri få med seg hele energien til myonene, og banene til elektronene vil avbøyes inn mot sentrum av lagringsringen. Her står detektorsystemer klare for å måle elektronenergien. Så teller man opp antall elektroner over en passende energiterskel som funksjon av tiden etter at en puls med myoner ble injisert i ringen. Det observerte antallet vil følge den radioaktive henfallsloven, men modulert med en cosinusfunksjon som gir tidsavhengigheten i polariseringen. Figur 2 gir et eksempel på et slikt spektrum:

Full konsistens med teoretiske beregninger var observert innenfor en relativ presisjon, $\sigma(a_\mu)/a_\mu$ på 7,6 ppm [3] ($\sigma(a_\mu)$ er usikkerheten i bestemmelsen av a_μ).

Eksperimenter i USA

Fra 1990-tallet har $g-2$ -eksperimenter vært utført i USA. Først i Brookhaven [4], og nå pågår ett ved Fermilab [5], som altså har kommet med sine første resultater. Ringen de har brukt har en diameter på omtrent 15 meter og lagrer myoner med energi på 3,094 GeV. Etter å ha stått i Brookhaven ble ringen flyttet til Fermilab. Den eksperimentelle teknikken utviklet ved CERN er beholdt, men med forbedrede utgaver av apparatur for identifi-

sering og måling av elektroner. Figur 1 viser bilde av lagringsringen slik den står på Fermilab.

Siktemålet har vært å oppnå en betydelig forbedring av presisjonen. Det har de fått til. Resultatet fra Fermilab gir a_μ med en presisjon på 0,46 ppm. Videre bekrefter det resultatet fra Brookhaven, slik at den kombinerte presisjonen nå er på 0,35 ppm. Men resultatene har vært overraskende. Verdien fra Brookhaven og Fermilab er konsistente med hverandre, men de avviker fra de teoretiske forventninger, som nå ligger mer enn fire standardavvik under den eksperimentelle verdien [6], slik Figur 3 illustrerer.

Hva betyr et slikt avvik fra Standardmodellen (og er det reelt)?

De teoretiske beregningene er svært omfattende, idet store deler av Standardmodellen må tas i bruk for å få presise resultater. Effekter på grunn av sterk vekselvirkning (virtuelle hadroner), og «elektrosvake» tyngre bosoner som W , Z^0 og Higgsbosonet påvirker a_μ i mye større grad enn a_e . Det er lavenergi hadronresonanser som gir størst korreksjon og usikkerhet i den teoretiske verdien, der korreksjonen beregnes på nokså indirekte vis ved hjelp av eksperimentelle resultater fra hadronproduksjon i elektron-positron-kollisjoner. Likevel mener de ca. 130 teoretikerne som står som medforfattere av [6], at de har kontroll på Standardmodellen innenfor en presisjon som er omtrent like god som den eksperimentelle verdien, og har publisert sin verdi vel vitende om resultatet fra Brookhaven.

Et slikt avvik fra Standardmodellens prediksjoner vekker stor interesse: Kan avviket ha opphav i ny fysikk (nye partikler og vekselvirkninger)? Det er allerede publisert mange artikler om emnet, i alle fall på arXiv, det åpne preprintarkivet, der man diskuterer bidrag fra forskjellige typer nye partikler og vekselvirkninger. Fellesnevneren for bidragene er kanskje at de må forårsakes av partikler med nokså høy masse, der de fleste også er kandidater til verdensrommets mørke materie. I en oversiktsartikkel fra Particle Data Group [7] vises det til at dersom det dreier seg om supersymmetriske partikler (som også kan være

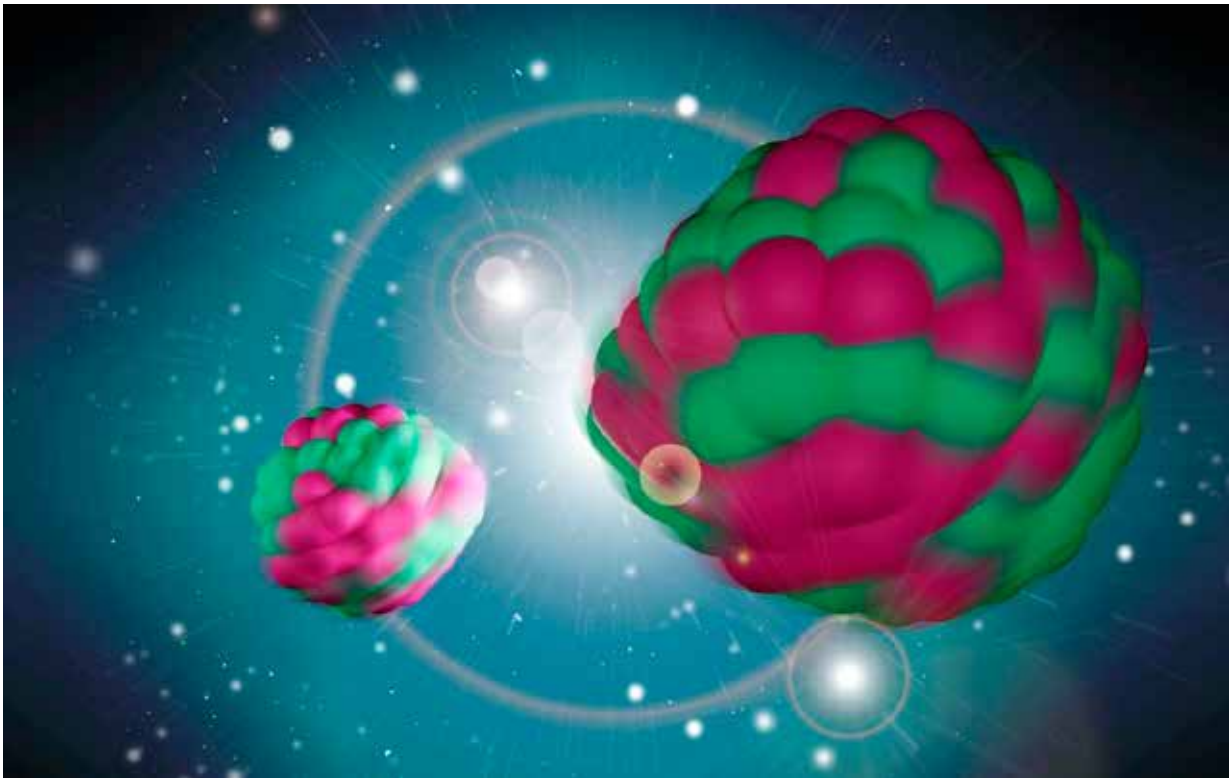
kandidater til mørk materie), så burde de ha en masse i området 100–500 GeV og kunne observeres ved LHC. Dette har ikke skjedd.

FFVs redaksjon har også gjort meg oppmerksom på nye, mer direkte beregninger av bidrag fra virtuelle hadroner som gir resultater mye nærmere den eksperimentelle verdien [8]. Kan det være at dette avviket også kan forklares med «konvensjonell» fysikk? Det bør i så fall først bli bekreftet av andre forskningsgrupper. Metoden går under betegnelsen «Lattice QCD» og er i sin helhet numerisk. Den krevde store dataressurser for at ønsket presisjon skal oppnås.

Fermilab-eksperimentet er på langt nær ferdig med sin innsamling og analyse av data, og det skal bli interessant å se hvordan denne historien utvikler seg i løpet av de neste årene! ■

Referanser

- [1] T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio. «Tenth-Order QED Contribution to the Electron $g-2$ and an Improved Value of the Fine Structure Constant». *Phys. Rev. Lett.* 109: 111807 (2012).
- [2] D. Hanneke, S. Fogwell Hoogerheide, G. Gabrielse. «Cavity Control of a Single-Electron Quantum Cyclotron: Measuring the Electron Magnetic Moment». *Phys Rev A* 83: 052122 (2011).
- [3] F. Combley, F.J.M. Farley, E. Picasso. «The CERN Muon ($g-2$) Experiments». *Physics Reports* 68 93–119 (1981).
- [4] G.W. Bennett med flere. «Final Report of the Muon E821 Anomalous Magnetic Moment Measurement at BNL». arXiv:hep-ex/0602035, 20. februar 2006.
- [5] B. Abi med flere. «Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm». *Phys. Rev. Lett.* 126, 141801 (2021).
- [6] T. Aoyama med flere. «The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model». *Phys. Rept.* 887, 1 (2020).
- [7] A. Hoecker, W.J. Marciano. «Muon Anomalous Magnetic Moment». Oversiktsartikkel i *Review of Particle Properties*, lenke: <https://pdg.lbl.gov>.
- [8] S. Borsanyi, Z. Fodor, J.N. Guenther med flere. «Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD». *Nature* (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03418-1>



Spinnville fisjonsfragmenter

Noe av det mest utrolige man kan oppleve som forsker er å undersøke et fenomen som har en opplest og vedtatt forklaring; for å så stirre vantro på de eksperimentelle dataene sine som viser noe helt annet enn forventningene. Dette er fortellingen om en forbløffende kjernefisjon-opdagelse som ble publisert i Nature, og om en fersk PhD-student som fikk bli med på reisen.

Dorthea Gjestvang Fysisk Institutt, UiO

Kjernefysisk fisjon har en spesiell plass i feltet for kjernefysikk. En ting er at det er en av de mest dramatiske prosessene en kjerne kan gjennomgå, hvor en tung atomkjerne (uran for eksempel), blir utsatt for voldsomme krefter som river atomkjernen i to fragmenter, samtidig som enorme mengder energi blir frigjort (Figur 2). Videre er det også kanskje den mest alminnelige kjente kjernereaksjonen; når jeg forteller jeg jobber på fisjon, så får jeg raskt oppfølgerspørsmål om både kjernereaktorer og kjernevåpen. Likevel er det som overrasker folk mest at veteran-feltet fisjon fremdeles inneholder en rekke ubesvarte spørsmål. En av disse gåtene er knyttet til hvorfor de to fragmentene som kommer ut fra fisjonen

spinner – dette til tross for at kjernen før fisjon ikke roterte i det hele tatt. 50 år siden dette spørsmålet først dukket opp har man endelig kommet ett skritt videre i forståelsen av hvordan dette kan skje. Men før vi kommer helt dit, må vi ta et skritt tilbake og se på historien som ligger bak dette spørsmålet.

Kjerner som snurrer

Hvordan fisjon kan finne sted og at det frigjør store mengder energi, har vært kjent siden Otto Hahn, Lise Meitner og Fritz Strassman undersøkte problemet i 1939. Oppdagelsen deres var med på å forme gangen i andre verdenskrig, hvor motpartene kappløp om utviklingen av atombomben. Det fenomenet vi skal fokusere på, derimot, snublet man først over flere tiår etter at krigen var ferdig. I 1972 studerte Wilhelmy et al. [1] kjernen californium-252 (eller ^{252}Cf på kompakt form), en atomkjerne som er satt sammen av 98 protoner og 154 nøytroner slik at det totale antallet *nukleoner*, kjernepartikler, er 252. ^{252}Cf er en skikkelig spennende kjerne når det kommer til fisjon. Selv om den får ligge i fred for seg selv, helt uforstyrret, vil det iblant plutselig skje at kreftene som vil rive kjernen i stykker tar overhånd, og kjernen splittes. Vi sier at kjernen *fisjonerer spontant*. Dette er i motsetning til for eksempel uran-235 (^{235}U),

Figur 1. Illustrasjon av fisjonsfragmenter (forrige side). (Illustrasjon: Birdeesign/Luc Petizon)

ofte brukt i kjernekraftverk, som trenger litt hjelp i form av tilført energi før den greier å fisjonere.

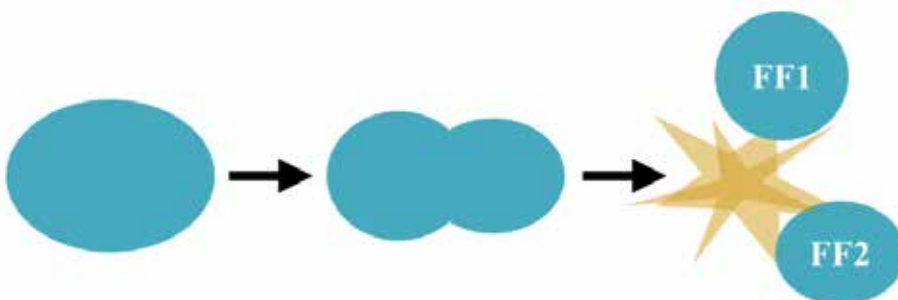
Når vi snakker om kjerner som roterer, så oppgir vi mengden rotasjon som hvor mye *totalt angulærmoment* I kjernen har. For de som kjenner litt kvantefysikk, er dette summen av spinn og det orbitale angulærmomentet til kjernen – men vi kan tenke på I som «hvor mye kjernen roterer». Ettersom dette er et kvantemekanisk system, kan angulærmomentet kun ta diskrete verdier, og vi oppgir I i enheten \hbar (Plancks konstant h delt på 2π). Vi kan måle hvor mye I en kerne har, og for å gi litt følelse av typiske størrelser av angulærmomentet, så har ^{235}U $I = 5/2 \hbar$ i sin laveste energitilstand. I høyere energitilstander, derimot, kan kjernen rotere mye mer enn den gjør i grunntilstanden.

Vi har målt at ^{252}Cf i grunntilstanden har $I = 0 \hbar$ – det vil si, sånn grovt sett, at kjernen ikke roterer i det hele tatt når den er i sin laveste energitilstand. Derfor er det kanskje litt overraskende at da Wilhelmy et al. gjorde målinger for å regne gjennomsnittlig angulærmoment i fragmentene, fant de ut at hvert fragment dukker opp med mellom 7 og $9\hbar$! Det er som om man har en kule som ligger for seg selv på et bord, helt i ro, også ser man vekk et øyeblikk, for å så titte på bordet igjen og oppdage at den store ballen har blitt til to mindre baller, som nå roterer. Dette var mystisk. Om den store kulen hadde spunnet litt selv før den fisjonerte, så kunne man tenkt at rotasjonen til fragmentene kommer fra dette. Men vi vet at ^{252}Cf ligger helt stille, som betyr at alt angulærmomentet til fragmentene må på en eller annen måte bli generert gjennom fisjonsprosessen. Hva er det som skjer i fisjon som kan sette i gang denne snurringen hos fragmentene?

Siden denne oppdagelsen har det kommet en rekke teorier og forklaringer på hvordan disse

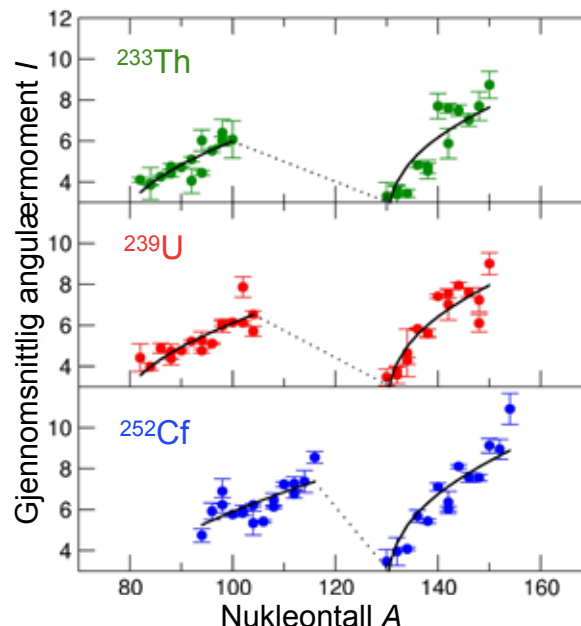
rotasjonene kan oppstå, og etterhvert etablerte det seg et allment akseptert bilde på fenomenet. Se for deg to kunstløpere som holder hender mens de står stille på isen. Disse representerer ^{252}Cf før den har fisjonert. Kunstløperne kan så dytte grasiøst fra hverandre, slik at de begynner å spinne. Tanken var altså at de to fisjonsfragmentene på en eller annen måte «dytter» fra hverandre, og ender opp med å rotere like mye i hver sin retning. Det er en forklaring på hvordan vi ender opp med å måle roterende fisjonsfragmenter fra en stillesittende kerne, og dessuten forutsier forklaringen at de to angulærmomentene er akkurat like store. Videre må de også være positivt korrelert; om det ene fragmentet dytter hardt ifra partneren sin, så føler partneren et stort dytt, og begge spinner fortere. Så om denne forklaringen er riktig, så må vi måle at om det ene fragmentet har høyere I , så har det andre fragmentet også det.

Så kan man kanskje lure på hvilken motivasjon som ligger bak iveren etter å forstå seg på akkurat dette fysikkmysteriet. En del av svaret på dette – som er en ofte brukt motivasjon når det kommer til fisjon – er kjernereaktorer. Det har seg nemlig slik at jo mer angulærmoment en kerne har, jo flere fotoner kommer den til å sende ut. Disse fotonene krysser lange avstander inne i reaktoren, og kan varme opp strukturer som ligger langt fra der fisjonene skjer. Det er derfor viktig for reaktorsimuleringer at man har skuring på hvor mange fotoner som blir sendt ut, slik at beregningene blir riktige. Men viktigheten strekker seg langt forbi reaktor-applikasjoner. Fisjon er et utrolig spennende system å studere, ettersom det er et kvantemekanisk mangepartikkel-system som er ufattelig komplisert å forstå seg på. Det å skjønne hvordan angulærmoment blir generert i



Figur 2. En illustrasjon av hvordan kjernefysisk fisjon foregår, hvor den tunge kjernen først strekkes, før den plutselig ryker. Man ender typisk opp med to fragmenter, ett tungt fragment og ett lett.

Figur 3. Figuren viser hvordan gjennomsnittlig angulærmoment I [hbar] blant en rekke fisjonsfragmenter varierer med fragment-nukleontallet A . Figuren er tilpasset fra referanse [3].



fisjonsfragmentene gir oss derfor ny innsikt i disse finulige kvantemekaniske systemene.

Mystiske eksperimentelle resultater

Vi hopper nå inn i historien igjen i 2018, da jeg var en nyvervet masterstudent, akkurat i gang med andre semester og utrolig nysgjerrig på det utpekte fagfeltet mitt - fisjon. På denne tiden ble det gjennomført flere fisjon-eksperimenter ved det som i dag heter IJCLab, som ligger i Orsay utenfor Paris. Sånne svære eksperimenter som disse kjører i mange uker og trenger oppsyn døgnet rundt, alle dager i uka – spennende fysikk bryr seg ikke om kontortider! Og det er altså her jeg kommer inn i fortellingen. Veilederen min, professor Sunniva Siem, har god kontakt med labben i Orsay, så jeg og en venninne fra kjernefysikk-gruppen fikk dra dit for å hjelpe til med å holde eksperimentet under oppsyn. I retrospekt tenker jeg det er så utrolig flaks at jeg fikk dra dit – så mye som hadde vært annerledes om jeg ikke hadde vært der! Men på det tidspunktet skjønnte jeg ikke så mye av fysikken de skulle studere – noe med kjernestruktur – og var bare glad for muligheten til å bli kjent med utenlandske kollegaer, samt oppglødd over mulighetene for sightseeing i Paris.

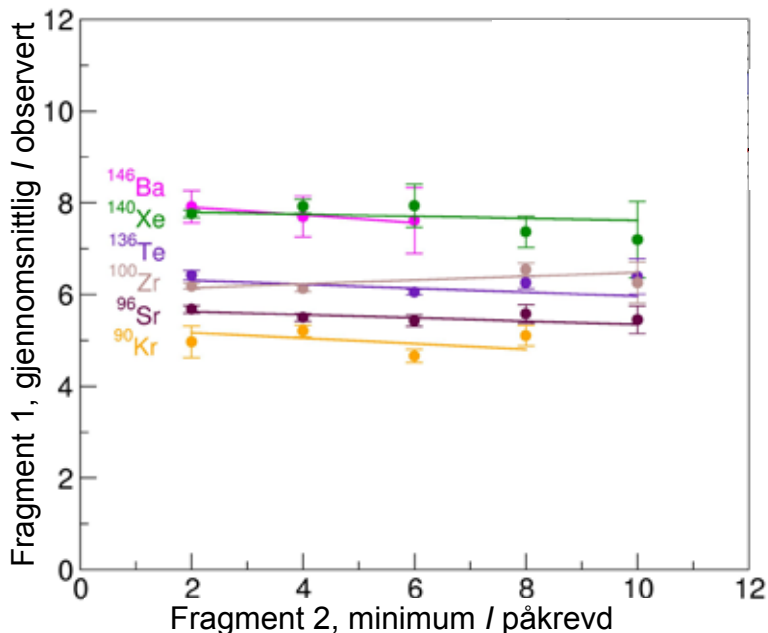
Ofte har det skjedd at den mest spennende fysikken ikke er den man leter etter, men den man tilfeldigvis snubler over mens man undersøker noe helt annet. Jeg nevnte at noe av motivasjonen for å gjøre disse lange eksperimentene var å studere strukturen til ulike kjerner. Dette gjør man ved å måle fotoner som blir sendt ut fra kjernen når den prøver å kvitte seg med ekstra energi, for da lærer man hvordan energinivåene i kjernen er bygd opp. Noen forskere i Orsay skulle gjøre nettopp dette

– de skulle se på ^{82}Ge (32 protoner, 50 nøytroner) og identifisere energinivåer i den. Germanium er blant de kjernene som blir produsert når uran eller californium fisjonerer, og i tillegg vet man at fisjonsfragmentene snurrer en del etter fisjon. Da de tittet i dataene, derimot, fikk de en overraskelse. Det var nesten ingen data fra energinivåene i ^{82}Ge hvor kjernen snurrer!

Lederen av eksperimentene i Orsay, Jonathan (Jon) Wilson, børstet da støv av en metode laget for å regne på gjennomsnittlig angulærmoment til fisjonsfragmenter [2]. Metoden viste det man allerede mistenkte: ^{82}Ge hadde et gjennomsnittlig totalt angulærmoment på rundt $4\hbar$, omtrent halvparten av det man forventet hos et fisjonsfragment. Dette var svært mystisk, og trengte definitivt å undersøkes grundigere. Forskningsteamet begynte derfor å sjekke gjennomsnittlig I for en rekke ulike fisjonsfragmenter av varierende størrelser (nukleoner). Og gradvis, gjennom mye arbeid, begynte et mønster å dukke opp.

Året er nå våren 2020, korona hadde akkurat sendt alle på hjemmekontor, og jeg var omtrent ett år ut i doktorgradstudiet med Jon Wilson som veileder. Jon hadde ymtet litt at eksperimentet jeg var med på i 2017 viste noe spennende og uventet, uten at han først sa noe mer - det måtte holdes hemmelig, tenk om noen andre får nyss om det og publiserer før oss! Men nå var han altså klar til å dele resultatene.

Dataene viste, uten tvil, at det totale angulærmomentet til kjernene varierer i et sagtann-mønster, som kan sees i Figur [3]. De aller letteste fragmentene, altså de med lavest nukleontall A , roterer svært lite. Deretter, for tyngre kjerner (høyere A) så øker det gjennomsnittlige spinnet, før den



Figur 4. Figuren viser korrelasjonen mellom minimum I påkrevd i dataene i fragment 2, og gjennomsnittlig I observert i partneren fragment 1. Figuren er tilpasset fra referanse [3].

plutselig faller igjen rundt $A = 30$. Så begynner det gjennomsnittlige angulærmomentet å stige igjen, og er opp mot $10\hbar$ rundt de tyngste kjernene som ble undersøkt. Dette mønsteret ble sett for fisjonsfragmenter i alle tre eksperimentene som hadde blitt gjennomført: både fisjon av ^{233}Th , ^{239}U , og ^{252}Cf , som alle har 0 eller nesten 0 angulærmoment når de fisjonerer. Dette sagtann-mønsteret var ved første øyekast veldig rart, og det var ingen av de eksisterende teoriene for angulærmomentgenerasjon som hadde forutsett det.

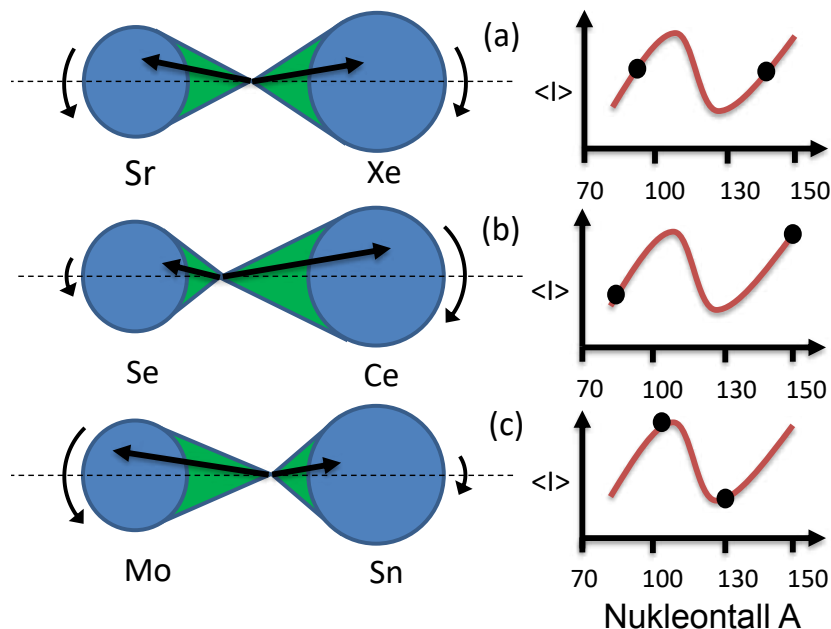
La oss nå ta en titt på betydningen av sagtannen. Siden det er et bestemt antall nukleoner i kjernen som fisjonerer, så hører fisjonsfragmentene sammen i par, to og to. For eksempel, om vi ser fisjonsfragmentet selenium-86 fra fisjon av ^{239}U og vi vet at det typisk blir sendt ut tre nøytroner rett etter fisjon, så er det $239 - 86 - 3 = 150$ nukleoner i partner-kjernen, som da blir cesium-150. Etter den «vanlige» forklaringen om fisjonsfragmenter som dytter på hverandre, så skulle altså ^{86}Se og ^{150}Ce derfor spinne like mye. Likevel viser sagtannen at gjennomsnittlig I for ^{86}Se er under $5\hbar$, mens det er rundt $9\hbar$ for ^{150}Ce , nesten dobbelt så mye! Dette stemmer ikke med dytte-forklaringen.

Videre, forklarte Jon ivrig, hadde de undersøkt korrelasjonen mellom angulærmomentet i de to fragmentene. Altså: hvis vi tar et fragment, f.eks. ^{140}Xe , og så ser på kun den delen av dataene hvor fragmentet hadde lav I , hva er da det gjennomsnittlige spinnnet i partneren ^{96}Sr ? Hva med hvis vi nå kun ser på delen av dataene hvor ^{140}Xe har høy I , endrer da det gjennomsnittlige spinnnet i partneren ^{96}Sr seg? Disse korrelasjonkurvene er vist i Figur [4]. Igjen så man noe helt uventet; i stedet for den positive korrelasjonen den gamle

forklaringen forutsa, var korrelasjon-linjene helt paddeflate; det var absolutt ingen korrelasjon mellom hvor mye de to fragmentene roterte. Som Jon beskrev det, i stedet for to kunstløpere som dytter pent fra hverandre og spinner, er det som om den ene skøyteløperen plutselig skulle begynne med breakdance i stedet!

Sagtannen Jon viste meg tirret noe i hukommelsen min. Jeg tok en titt i bokhyllen min, og i en gammel bok fra 1991 av C. Wagemans som heter *The Nuclear Fission Process* [4] (som jeg forsåvidt bare omtaler som Fisjonbibelen), så fant jeg det jeg lette etter. På 1970-tallet hadde både Armbruster et al. [5] og Pleasonton et al. [6] også regnet på angulærmomentet til noen fragmenter med ulik A , og sett antydningene til en sagtann. Uheldigvis var det veldig få kjerner de hadde undersøkt. Derfor, da Glässel et al. [7] på 1980-tallet undersøkte gjennomsnittlig I i langt flere fragmenter med en annen metode og da ikke så det samme mønsteret, så ble nok de gamle resultatene stemplet som «eksperimentell feil» og forkastet. Men med de nye eksperimentene kunne dette avviket også forklares: i Glässel et al. sin metode for å regne ut gjennomsnittlig I ble det antatt at det var en korrelasjon mellom angulærmomentene til de to fragmentene, og derfor ble det feil!

Plutselig, fra å ikke vite hva oppdagelsen var, fikk jeg lov til å bli med på diskusjonen rundt resultatene som etterhvert skulle sendes inn til den prestisjefulle journalen Nature. Det var fantastisk gøy og facinerende å bli med på prosessen med å lese andre vitenskapelige artikler på temaet, diskutere betydningene, formulere tekst til manuskriptet vårt, og endelig sende det inn – for å deretter klore oss fast gjennom fagfelle-vurderingen. Dette var nok en



Figur 5. Figuren viser hvordan fragmenter med mange «nakke»-nukleoner ender opp med høyt gjennomsnittlig angulærmoment, mens fragmenter med få «nakke»-nukleoner får lav I . Figuren er tilpasset fra referanse [3].

utfordrende tid for mannen min. Etter en dag med lesing og diskusjon kunne jeg plutselig forsvinne fra samtalen og langt inn i mine egne tanker, og bare stirre fraværende ut i lufta i lang tid. Men altså, etter flere runder frem og tilbake med referene og 27 sider med korrespondanse, samt et drøyt halvt år senere, så fikk vi endelig svaret – resultatene hadde blitt akseptert i Nature!

Ny forklaring

Noe av det mest spennende med disse eksperimentelle resultatene, er det jeg nevnte om at det ikke var noen teorier som forutså både de uavhengige angulærmomentene og sagtann-mønsteret. Vi ble derfor utfordret på om vi kunne foreslå en forklaring. Men for å forstå forklaringen vår av sagtannen, så må vi først introdusere litt mer kjernefysikk. Det har seg nemlig sånn at akkurat slik som elektronene fylles i elektron-skall som gir lite reaktive edelgasser når skallet er fullt, så ordner protonene og nøytronene i kjernen seg i skall hvor lukkede skall er ekstra stabile. Rundt $A = 130$ finner man et sånt lukket skall, og det samme rundt $A = 80$. De nukleonene som er en del av det lukkede skallet sitter godt fast; derimot de nukleonene som befinner seg utenfor det lukkede skallet er mye friere, og kan bevege seg rundt. Slik at når en kjerne holder på å fisjonere, så er det som om det dannes et hardt skall av nukleoner med $A = 130$ og et annet med $A = 80$. De nukleonene som er utenfor disse «proto-fragmentene» vil danne en nakke mellom dem, slik som er illustrert i Figur [5].

Nakken strekker seg helt til den plutselig ryker, og så havner noen av «nakke»-nukleonene på den ene siden, mens resten havner på den andre. Rett etter fisjon er de to fragmentene veldig strukket, og

akkurat som en strikk, så vil de starte å trekke seg sammen. Jo flere «nakke»-nukleoner det er i fragmentet, jo mer «kaos» blir det når fragmentet skal trekke seg sammen. Her kan man igjen tenke på en strikk som ryker: enden på strikken kan begynne å «blafre» frem og tilbake mens den strekker seg sammen, og jo lengre strikken er, jo mer blafring kan du få. Det er dette vi tenker at setter i gang rotasjonen til kjernen. (Dette er jo litt forenklet – vi presenterer også i artikkelen en forklaring som handler om at jo flere «nakke»-nukleoner kjernen har, jo flere måter kan disse innordne seg på, som gir høyere gjennomsnittlig angulærmoment). Denne strikk-beskrivelsen forklarer altså hvorfor angulærmomentet som funksjon av A har en sagtann-formasjon: for hvert nukleon man legger til utenfor $A = 80$, jo flere nukleoner blir det utenfor det lukkede skallet, som fører til at strikken blir lenger. Ved $A = 130$ dropper I plutselig, for da har man fylt skallet helt, og alle nukleonene sitter fast inni skallet, men så begynner det å stige igjen.

Selv om vi har kommet et godt stykke videre i forståelsen av angulærmoment i fisjonsfragmentene, så ender ikke mysteriet her. Modellen i artikkelen vår kan beskrive omtrent 85 % av variasjonen av angulærmoment med A – men det er altså en del av forklaringen som gjenstår. Vi venter også i spenning på om det kommer noen andre forklaringer av de eksperimentelle dataene, som kanskje til og med dekker flere aspekter av resultatene.

Selv er jeg så heldig at jeg får lov til å jobbe videre på dette temaet som en del av doktorgraden min. Slik som ellers i forskning, skapte denne oppdagelsen like mange spørsmål som den besvarte. Et eksempel er at i forklaringen vår så burde det ikke ha noe å si for angulærmomentet til et fisjonsfrag-

ment om den kom fra fisjon av uran eller californium – er fragmentet ^{96}Sr , så er det 16 «nakke»-nukleoner som genererer angulærmoment. Likevel er dette kanskje ikke hele sannheten; det kan virke som det er noe spennende som skjer med hvor stor andel av tilstander med høyt angulærmoment som blir målt i et fragment [8], avhengig av hvilken kjerne som fisjonerte ...

En ting er i alle fall sikkert – dette er spennende tider for fisjon-forskere! ■

Referanser

- [1] J.B. Wilhelmy, E. Cheifetz, R.C. Zared, S.G. Thompson, H.R. Bowman og O. Rasmussen. «Angular Momentum of Primary Products Formed in the Spontaneous Fission of ^{252}Cf ». Phys. Rev. C 5 (1972).
- [2] Y. Abdelrahman, J.L. Durell, W. Gelletly, W.R. Phillips, I. Ahmad, R. Holzmann, R.V.F. Janssens, T.L. Khoo, W.C. Ma og M.W. Drigert. «Average spins of primary fission fragments». Tech. Rep. 4 (1987).
- [3] J.N. Wilson og flere. «Angular momentum generation in nuclear fission». Nature 590, 566 (2021).
- [4] C. Wagemans. *The Nuclear Fission Process*. (CRC Press, 1991) s. 608.
- [5] P. Armbruster, H. Labus og K. Reichelt. «Investigation on the Primary Spins of the ^{235}U Fission Fragments». Zeitschrift für Naturforschung – Section A Journal of Physical Sciences 26, 512 (1971).
- [6] F. Pleasonton. «Fission of ^{233}U and ^{239}Pu ». Nucl. Phys. A 213, 413 (1973).
- [7] P. Glässel, R. Schmid-Fabian, D. Schwalm, D. Habs, og H. Helmolt. « ^{252}Cf fission revisited — new insights into the fission process». Nuclear Physics A 502, 315 (1989).
- [8] V. Rakopoulos og flere i EPJ Web of Conferences, Vol. 146 (2017) p. 4054.

Fysikere på frimerker

Ernst Abbe

Jeg vil i en serie artikler presentere fysikere avbildet på frimerker. De vil bli presentert i alfabetisk rekkefølge med en kort omtale av hvorfor de er blitt avbildet på det aktuelle frimerket.

Ernst Abbe ble tidlig kjent som en dyktig og kreativ eksperimentalfysiker innenfor området optikk. Han ble forskningsdirektør ved Zeiss Optische Werke i 1866. Dette firmaet ble etablert i 1846. Samtidig med at Abbe fortsatte å ha en ledende rolle i Zeiss ble han professor i fysikk ved Universitetet i Jena fra 1879. Han bidro til sosiale reformer i Tyskland og var en drivende kraft bak innføringen av åtte timers arbeidsdag der. Han etablerte i 1889 Carl Zeiss-stiftelsen til støtte for naturvitenskapelig forskning.

I 1871 konstruerte Abbe et refraktometer som er et instrument til å måle brytningsindeks, og i 1886 fant han opp en akromatisk linse. Han konstruerte det såkalte Abbetallet som er et mål på hvor stor evne et gjennomsiktig materiale har til å spre lys, dvs. på variasjonen av materialets brytningsindeks med bølgelengden.

Frimerket med portrett av Ernst Abbe er et av en serie på tre frimerker utgitt av DDR i 1956 for å markere 110-års jubileet for etableringen av Carl Zeiss Jena. Frimerket til høyre ble utgitt av Vest-Tyskland i 1968 i en serie på tre merker som markerte fremskritt i teknikk og vitenskap, for å markere hundreårsjubileet for Abbes konstruk-



sjon av det første «vitenskapelige mikroskopet». Nederst er et sammentrykk av tre frimerker utgitt av DDR i 1989 for å markere at det var hundre år siden Carl Zeiss-stiftelsen ble etablert. Til venstre vises et mikroskop og til høyre et apparat til å måle posisjon, begge bygget i Carl-Zeiss-Works.

Øyvind Grøn

Bokomtale:

Sunniva Rose: Vi er stjernestøv – Kjernefysikk for folk flest

Egmont Publishing, 2020

172 sider

Pris: 399 kr

Som det står i undertittelen: dette er en bok for folk som ikke har forkunnskaper i fysikk. Den kan leses av ungdomsskole elever, filologer, politikere og samfunnsdebattanter.

Boka er viktig, for Sunniva Rose tar opp et rekke misforståelser om strålingsfare og forurensning knyttet til atomkraftverk som det er gunstig å få oppklart, ikke minst hos de som er med på å planlegge samfunnets videre utvikling.

Boka er krevet i en lettfattelig stil og med enkelte personlige innslag innimellom. Den har også fokus på kvinner som har hatt stor betydning for utviklingen av kunnskaper om atomkjernens fysikk.

Kjernefysikken og strålingsfysikken omtalt i boka er kunnskaper som allerede har hatt stor praktisk betydning både på godt og vondt (kjernekraftverk og bomber), og som kan vise seg å være avgjørende for å løse menneskehetens energi-problem: å produsere tilstrekkelig med elektrisk energi til å dekke et stadig voksende behov uten å lage skadelige utslipp i form av radioaktivt avfall og CO₂, som øker drivhuseffekten. Boka rundes av med å nevne at det i over femti år har vært arbeidet med å konstruere fusjonskraftverk.

Ved siden av bokas hovedtekst er det en del rosa sider med fakta. Dette er et fint pedagogisk grep. Det er god plass på sidene, og noe som ville ha gjort formidlingen enda bedre, er om det hadde vært flere illustrasjoner av ting som omtales slik som Rutherford's eksperiment.

Første halvpart av boka fokuserer på stråling fra atomkjerner. Kapittel 1 har tittelen Tilfeldigheter, usynlig lys og kreftbehandling. Det innledes med underoverskriften «Da mamma fikk kreft». Sunniva Rose aktualiserer sine temaer dels med historier fra sitt eget liv og dels ved å skrive om personer som har bidratt til kjernefysikkens utvikling. Det er engasjerende fortalt, og jeg hadde hele tiden lyst til å lese videre. Her får vi blant annet vite hvordan Wilhelm Conrad Röntgen oppdaget røntgenstrålingen, og vi får se verdens første røntgenfoto – bildet av skjelettet i Röntgens egen hånd. Vi får vite at røntgenstråling er elektromagnetisk stråling som produseres av elektroner med stor fart som bremses ned når de treffer et materiale.

Kapittel 2 heter Om Tsjernobyl, Henri Becquerel



og hvorfor du trygt kan spise radioaktivt reinsdyrkjøtt. Den første faktaboksen her med tittelen «stråledose – sievert» er ikke helt vellykket. Det hadde vært i bokas ånd å fortelle at sievert er oppkalt etter den svenske forskeren Rolf Maximilian Sievert. Videre står det: «Stråledoser måles i sievert som forkortes Sv. Det er et mål på hvor mye energi som er blitt absorbert per kilo.» Her forveksles sievert med gray. Sievert er et mål for helsevirkningen av ioniserende stråling og gray er et mål for absorbert strålingsenergi per kilo. Gray måles i joule per kilo. En sievert representerer den biologiske virkningen av en absorbert strålingsdose på en gray. En sievert er lik en kvalitetsfaktor ganger en gray, der kvalitetsfaktoren avhenger av helsevirkningen en gray absorbert stråling har på et menneske. Men kapittelet er viktig og godt skrevet. Det bidrar blant annet til å fjerne en del misforståelser om betydningen av radioaktiv forurensning fra Tsjernobyl-ulykken.

Vi er nå kommet til side 50, og her kommer vi til kjernefysikken. Vi får vite hvordan Becquerel oppdaget radioaktiv stråling. På denne tiden, omkring år 1900, var strålingens opphav et mysterium. Marie Curie og hennes mann, Pierre Curie, fulgte opp med grundige undersøkelser av radioaktiv stråling, og i 1903 delte de tre forskerne nobelprisen i fysikk for sine resultater.

Det neste kapittelet innledes med hvordan Alexander Litvinenko ble drept ved å forgifte ham med polonium – det sterkt radioaktive stoffet som Marie Curie isolerte og oppkalte etter sitt opprinnelige hjemland.

Så, i kapittel 4, kommer vi til den New Zealandske fysikeren Ernest Rutherford, kjernefysikkens far som oppdaget atomkjernen. Neste kapittel dreier seg om atomberedskap og karbondatering. Det forklares tydelig hva ulike isotoper av samme grunnstoff er, og forfatteren forklarer prinsippet

bak karbon-14-datering.

Nøytronet og dets oppdagelse av den britiske fysikeren James Chadwick i 1932 er temaet for kapittel 6. Her stiller Sunniva Rose spørsmålet: «Hvordan er de tunge grunnstoffene blitt laget?». Så forteller hun om supernovaeksplosjoner av tunge stjerner som etterlater seg nøytronstjerner, og at setningen hun avsluttet sin prøveforelesning i mars 2017 med for doktorgraden var: «Jeg tror gullet i forlovelsesringen min ble laget da to nøytronstjerner kolliderte, ikke i en supernova.» Boka ble skrevet tre år senere, og Rose skriver: «17. august 2017 ble historisk i vår forståelse av hvor vi kommer fra. Da pekte nemlig forskere ved en tilfeldighet «teleskopet» rett mot to nøytronstjerner som kræsjet.» I dag ser ut til at hun hadde rett i den siste setningen på prøveforelesningen.

Det kommer ikke mye mer om dette senere i boka. Jeg hadde ønsket meg et kapittel om at 17. august hendelsen bidro til å vippe diskusjonen om hvordan de tunge grunnstoffene er dannet over i favør av kollisjoner mellom nøytronstjerner. I denne sammenhengen er det mye spennende kjernefysikk om hvordan nøytroner frigjøres og bidrar til å produsere gull i slike kollisjoner.

Historien er langt mer fascinerende enn man får inntrykk av i boka. Det var slett ikke tilfeldig at astronomene pekte teleskoper mot kolliderende nøytronstjerner, men et resultat av at LIGO/Virgo hadde registrert gravitasjonsbølger fra kollisjonen, og at kilden til bølgene og den elektromagnetiske strålingen fra hendelsen ble lokalisert i samarbeid med et stort antall teleskoper. Utviklingen av strålingen fra kollisjonens omgivelser ble fulgt i flere måneder og ga informasjon blant annet om nøytronenes rolle ved oppbyggingen av tunge grunnstoffer ved disse hendelsene.

I kapittel 7 fortelles om eksperimenter som viste at atomkjerner kan spaltes. Også dette er en fascinerende historie, og her spilte den kvinnelige jødiske fysikeren Lise Meitner en sentral rolle. Hun var den første som forsto hva som skjedde i eksperimentene til sin tyske samarbeidspartner Otto Hahn. Sunniva Rose forteller tidligere i boka at da nobelkomiteen ville gi nobelprisen i fysikk til Henri Becquerel og Pierre Curie, nektet de å ta imot prisen hvis ikke også Marie Curie fikk den. Dessverre greide nobelkomiteen også i 1944 å neglisjere en kvinne da Otto Hahn fikk den for oppdagelsen av kjernefysisk fisjon, mens hans medarbeider Lise Meitner som hadde tolket eksperimentene korrekt, ikke fikk den.

Kapittel 8 heter Syklotronen, bomben og kreftsvulsten. Kapitlet innledes med at foreldre får vite at deres ti år gamle datter har fått en ondartet hjernesvulst som ikke lar seg operere bort.

Den ligger slik til at ordinær strålebehandling vil skade så mange friske celler at det ikke er tilrådelig. Men i USA tilbys en bedre behandlingsform for denne typen kreft: protonterapi. Dette er strålebehandling med protoner opprinnelig utviklet av fysikeren Robert Wilson, som under krigen hadde arbeidet med å videreutvikle en protonakselerator kalt syklotronen. Protonbehandling mot kreft ble godkjent i USA i 1988, men er ennå ikke kommet til Norge. Sunniva Rose er en av mange som har argumentert sterkt for at denne typen behandling nå må bli tatt i bruk i Norge. Og det ser omsider ut til å kunne skje i 2023. For øvrig har protonterapi nylig blitt detaljert omtalt i en artikkel i *FFV* [1].

Kapittel 9 har tittelen «Kjernekraft – den tryggeste måten å lage energi på». Her omtales ulike forurensningsproblemer ved forskjellige måter å produsere elektrisk strøm på. Hun refererer til en rapport fra FNs klimapanel fra 2014 som konkluderer med at vindkraft, kjernekraft og vannkraft har de laveste CO₂-utslippene når man tar i betraktning både konstruksjon og drift av kraftverkene.

Boken rundes i kapittel 10 av med en omtale av thoriumkraftverk og fusjonskraftverk. Norge har betydelige forekomster av thorium, men India har mer. Sunniva Rose forteller at det skjer utviklingsarbeid India og Kina for å konstruere thoriumkraftverk og tipper at det er i et av disse landene at det første thoriumkraftverket vil se dagens lys. Det hadde vært fint om Norge kunne vært med i et samarbeid om dette for å utvikle kompetanse om det her i landet. Thoriumkraftverk kan bli en ren og sikker måte å produsere elektrisk strøm på.

Men den ultimate metoden er å etterlikne sola: Fusjonskraftverk er tingen. Det arbeides med dette i flere lang. Det største prosjektet foregår i Frankrike med deltagere fra mange land og heter ITER. Det foregår også utviklingsarbeid i Russland, Storbritannia og USA. Det amerikanske tokamakprosjektet er nylig omtalt i *FFV* [2].

Sunniva Rose sin bok om stråling og kjernefysikk er skrevet på en fengslende måte. Hun skriver med engasjement og argumenterer for at vi ikke må la oss blinde av fordommer når det gjelder anvendelser av kjernefysikk både i helsevesenet og kraftverk. Jeg opplever dette som en delikat, underholdende og viktig bok som jeg anbefaler både for folk flest og særlig for ungdom og folk som har innflytelse på samfunnets utvikling. Dette er god folkeopplysning!

Øyvind Grøn

Referanse

- [1] H.E.S. Pettersen og D. Röhrlich. «Kreftbehandling med protonterapi og proton CP». *FFV* nr. 4, s. 110 (2017).
- [2] Ø. Grøn. «Fusjonsenergi om 5 år?» *FFV* nr. 4, s. 68 (2020).



Olav Steinsvoll

90 år

Ein veteran i norsk fysikk fylte 90 år 12. mars 2021.

Olav Steinsvoll er fødd i Oslo med oppvekst på Tøyen hovudgård ved Botanisk Hage, der faren Søren Steinsvoll var avdelingsgartnar og seinare hovudgartnar. Både faren og mora var innflyttarar frå Nordvest-landet. Olav Steinsvoll sjøl samanliknar oppveksten sin med oppvekst på ein gard. Der var planter og vekstar av mange slag, og mange som budde der hadde husdyr som høns og hest og også grisar.

Fleire av Steinsvoll sine slektningar budde ofte kortare eller lengre tid hos dei på Tøyen under Oslo-opphold. Ein var ein onkel til Olav som var elektroingeniør, og som tok på seg reparasjonsoppdrag for radioar. Han blei ein viktig inspirator for Olav si framtidige interesse for teknikk og radioamatørskap.

Olav Steinsvoll budde heime både i gymnastida og seinare i studenttida ved Universitetet i Oslo. Etter matematikk, kjemi og fysikk bifag og pedagogikk 1950–1955 tok han Cand.mag.-eksamen i kjernefysikk og biofysikk. 1956–1957 var han student i Tyskland ved Max Plank Institut i Frankfurt. I 1959 fullførte han hovudfagseksamen ved Radiumhospitalet med framifrå resultat. Same år hadde han stipendiatengasjement ved Reaktorskolen ved Institutt for atomenergi (IFA), seinare Institutt for energiteknikk (IFE), på Kjeller, som opna for fast tilsetting som forskar knytt til reaktoren Jeep I, og etter 1965, Jeep II. Engasjementet ved IFA/IFE kom til å vare heile hans yrkesaktive tid, men med fleire avbrot under utanlandsopphold.

Uranreaktorane på Kjeller representerte eit nytt og kraftfullt forskingsverktøy for studiet av materialer og faste stoff, og Olav Steinsvoll blei

slik ein av pionerane for bruk av nøytronstrålar for materialforskning i Norge. Nøytronpartiklane er nøytrale og har god inntrengingsevne i dei fleste stoff, samtidig som dei er berarar av magnetiske moment og kan slik tjene som sondar for magnetiske materiale. Saman med gjesteforskarar frå m.a. Finland og Polen utvikla han instrumentering for det som blir kalla 'polariserte nøytronar' og tok dei i bruk for studiet av magnetiske materiale som jern Fe og nikkell Ni og magnetitt Fe_3O_4 . Då han i 1982 disputerte for dr.philos.-graden ved UiO, var arbeidet basert på bruken av polariserte nøytronar, både på Kjeller og ved Oak Ridge National Laboratory (1972) og ved Brookhaven National Laboratory (1974) i USA. Ved Brookhaven var han elles også gjesteforskar 1964–1966 og 1982–1983, og var også invitert forskar i 1971 til Dubna, USSR, for arbeid ved ein pulsa reaktor der.

Olav Steinsvoll var ein engasjert og aktiv deltakar både som forskar og som samfunnsborgar gjennom alle aktive år. Han skreiv over femti vitskapelege artiklar i anerkjende internasjonale tidsskrift, mellom dei arbeida som blei innarbeidde i dr.philos.-gradsarbeidet hans ved UiO frå 1982: «Studies of magnetic and critical Phenomena by versatile Use of Neutron Scattering Technique». Han var ein dugleg popularisator, og skreiv fagartiklar i aviser og tidsskrift og var ein god ambassadør for forskingsmiljøet på Kjeller, og har forfatta over tjue interne Kjeller-rapportar. I 1997 kom ein særst utfyllande og detaljert rapport: *The Physics Department at IFE, Kjeller 50 years. 39 + 24 sider*, der utstyr og viktige forskingsresultat med figurar og referansar blir beskrivne.

I over fem år, 1975–1980, var Steinsvoll eine-

redaktør for fysikktidsskriftet *Fra Fysikkens Verden*, utgitt av Norsk Fysisk Selskap. Etter 1980 har det alltid vore to samarbeidande redaktørar. Både før, under og etter redaktørtida var han ein ivrig bidragsytar til artiklar i bladet. I alt kan vi telle opp omlag 20 innslag i redaktørperioden, og 1985–1990 innslag totalt i bladet i perioden 1970–2007.

Mange av dei beskriv nytt frå Kjeller-miljøet og frå konferansar i inn- og utland som Steinsvoll hadde deltatt i, eller også viktige fysikkjubileum. I 1988 var det 100 år sidan trådløs signaloverføring blei påvist av Heinrich Hertz, og Steinsvoll skreiv då i *FFV* nr. 50 1988 s. 97–98 om «Et hundreårsjubileum 'von Hertzen geschrieben'» der han tar utgangspunkt i si eiga store interesse for internasjonal radioamatørskap.

Blant konferansar og møte med materialfysiske emne kan vi spesielt nemne dei internasjonale «Geilo-skolane», arrangert annakvart år frå 1971 til denne dag, og dei nasjonale «Rondablikk-møta» i fysikk og kjemi som blei skipa mellom 1987 og 1998. Olav Steinsvoll var fast deltakar og sentralt medlem av arrangementsstaben, på Geilo mellom anna som skiinstruktør for nybegynnarar frå utlandet. I 1999 blei han beæra med «Roald Amundsen-prisen» for heltemodig overleving under polare forhold då isen brast under kryssing på ski av ein djup bekk i fjellet. På Rondablikk var han likeeins aktiv på arrangørsida. I september 1991 fekk han hotellet til å slå av alle lys, og inviterte alle ut i haustmørket der han gav ei glimrande presentasjon for oss av stjernehimmlen og stjernebilda den minnerike kvelden.

Olav Steinsvoll var tidleg samfunnsengasjert. Som student deltok han i Ukestyre ved UiO, og



Jubilerande ektepar Liv og Olav Steinsvoll.

var sjølvstekt leiar for «Studentenes ukesender». Han var medlem av Lillestrøm Jazzklubb og av det lokale hagelaget. Politisk interesse kom til uttrykk gjennom medlemskap i Sosialistisk Venstreparti, og i to periodar, 1964–1968 og 1972–1976, var han innvalt medlem av Skedsmo kommunestyre. Det medførte mellom anna kommunalt komitéarbeid, som elverk og bibliotek og andre lokale komitéar.

Alt i 1959 stifta han familie og blei gift med Liv Tjønneland. Olav og Liv har i alle år budd på Lillestrøm, der Liv Steinsvoll også var engasjert i fysikk ved at ho var tilsett som realfaglærer ved Lillestrøm vgs. 16. mai i år var ho 85 år.

Paret fekk to døtrer, fire barnebarn og to oldebarn.

Fra Fysikkens Verden gratulerer Liv og Olav Steinsvoll med åremålsdagane i mars og i mai!

Emil J. Samuelsen og Arne T. Skjeltnor



Fredrik Kristoffer Mürer

NTNU

Fredrik Kristoffer Mürer forsvarte 9. april 2021 sin doktoravhandling, «Diffractive X-ray tomography of oriented mineralized structures in hierarchical materials».

Mürer har studert orienterte mineraliserte strukturer i bein, brusk og skifer. Disse materia- lene er såkalte *hierarkiske* materialer, som har til felles at de mekaniske egenskapene er bestemt av strukturer fordelt på flere lengdeskalaer. Den store spennvidden i størrelse gjør at disse materialene er vanskelige å forstå ved hjelp av standard teknik- ker som optisk mikroskopi og elektronmikroskopi, siden en som oftest må velge mellom å studere små områder i prøvene med høy oppløsning, eller store prøveområder med lav oppløsning. Røntgen- diffraksjon har siden begynnelsen av 1900-tallet blitt brukt til å studere krystallinske materialer, og gir unik informasjon om prøvesammensetning, og også om den romlige *orienteringen* til krystallinske faser i prøven. Nylig har røntgendiffraksjon blitt kombinert med tomografi (computed tomography; CT) i såkalt diffraksjonstomografi, som muliggjør material-spesifikk tredimensjonal avbildning. Diffraksjonstomografi er spesielt godt egnet til å studere hierarkiske materialer fordi lokale struk- turer ned mot nanometerskala kan måles selektivt for makroskopiske prøver.

I Mürers doktorarbeid har kvantitativ avbild- ning av den lokale orienteringen av mineraliserte strukturer ved hjelp av diffraksjonstomografi vært et sentralt tema. I bein bidrar kollagenfi- briller sammen med mineralet hydroksoapatitt

(HA) til å gi bein dets unike kombinasjon av lett vekt, stivhet og styrke. Orienteringen til HA er tett koblet til orienteringen av kollagenfibrillene, og røntgenspredningssignalet fra HA gir dermed informasjon også om orienteringen til kollagen. Ved hjelp av diffraksjonstomografi har Mürer studert de mineraliserte strukturerne i overgangen mellom bein og vekstbrusk i prøver fra svin, hvor det ble oppdaget nye distinkte mønstre i HA-ori- entering. Lignende metode ble anvendt på fossile beinprøver, hvor mineralorienteringen gir unik informasjon om muskelfestene i de ytre (kortikale) områdene av beinet – et tema av stor interesse innen paleontologi. Diffraksjonstomografi og koherent røntgenavbildning ble også brukt til å studere mineralsammensetning og orientering til leire i skiferstein. Skifer har en kompleks aniso- trop struktur med et porennettverk på nanoskala, og flere strukturelle detaljer er fortsatt ukjente. Skifer består hovedsakelig av kvarts, med mindre deler av ulike leireminerale og jernholdige mine- raler som pyritt. Med diffraksjonstomografi ble mineralogien i en skiferprøve kartlagt og studert i tre dimensjoner, og lokale variasjoner i oriente- ringen til leiremineralene ble kvantifisert.

Arbeidet ble utført ved Institutt for fysikk, NTNU, og ved European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) i Frankrike. Hovedveileder var professor Dag W. Breiby (NTNU), og medveiledere var professor Magnus B. Lilledahl (NTNU) og før- steamanuensis Kristin Olstad (Norges miljø- og biovitenskapelige universitet; NMBU).



Arnfinn Graue

(1926–2021)

Arnfinn Graue døde 28. februar i en alder av 94 år. Hans akademiske karriere var todelt. Den første delen var viet forskning innen kjernefysikk, den siste delen universitetsledelse på alle nivåer.

Arnfinn Graue begynte sitt forskningsarbeid innefor lavenergetisk kjernefysikk mens han var student ved Fysisk institutt ved Universitetet i Bergen (UiB). I tilknytning til instituttets Van de Graaff-akselerator bygget han sammen med bl.a. Arvid Erdal og Harald Enge en magnetisk spektrograf til bruk ved studier av kjernereaksjoner med lette ioner. Harald Enge ble senere professor ved Massachusetts Institute of Technology (MIT), der han konstruerte en mangevinkelspektrograf som var den første i sitt slag i verden. Graue opprettholdt samarbeidet med professor Enge, og Graues doktoravhandling i 1966 var basert på noen av de første eksperimenter som ble utført på dette instrumentet. Samarbeidet utviklet seg etter hvert til en omfattende serie av kjernestrukturstudier av nikkel- og telluriumisotoper ved hjelp av såkalte lavenergetiske direktoreaksjoner. Siden UiB og Norge ikke selv hadde ressurser til å etablere et stort kjernefysisk laboratorium, tok Graue initiativ til et internasjonalt samarbeid hvor eksperimenter ble utført ved eksterne laboratorier, og data ble analysert i Bergen. Det var mulig ved hjelp av en stor forskningsgruppe med mange hovedfagsstudenter som Graue ledet i 1960- og 1970-årene ved Fysisk institutt, UiB. Samarbeidet omfattet

foruten MIT, Niels Bohr Institutet i København, McMaster University i Canada, Rochester University i New York, Yale University i Connecticut med flere, og senere også det store Brookhaven National Laboratory på Long Island i USA.

Arnfinn Graue ble dosent ved UiB i 1961, og professor i 1971. I 1960- og 1970-årene hadde han sentrale verv på nasjonalt plan i norsk fysikk. Han var dekanus ved Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet, UiB i perioden 1978–1980, prorektor ved UiB 1981–1983 og rektor 1984–1989. I perioden 1987–1989 var han formann i Det det norske universitetsrådet. Graue var opptatt av å knytte universitetet tettere til samfunns- og næringsliv, og bidro sterkt til opprettelsen av Høyteknologisenteret på Møhlenpris. Også internasjonalt hadde han sentrale verv, bl.a. som norsk delegat til Rådet for CERN fra 1984 til 1997. I CERN var han også formann i Finanskomiteen fra 1988 til 1991. Han har mottatt flere æresbevisninger for akademisk lederskap, bl.a. ble han i 1991 utnevnt til Kommandør av St. Olavs orden.

Som person var Arnfinn Graue utadvendt og omgjengelig, og han var alltid tilgjengelig for kolleger og studenter. Vi minnes ham i dyp respekt.

*Jan R. Lien, Eivind Osnes,
Toralf Bernhard Skaali og Jan S. Vaagen*

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

Visepresident

Professor Sunniva Siem, Fysisk instiutt, UiO, Kjerne- og energifysikk
E-post: sunniva.siem@fys.uio.no

Styremedlemmer

Forsker Annett Thøgersen, SINTEF Oslo, kondenserte fasers fysikk og atomfysikk
Førsteamanuensis Magnus Borstad Lilledahl, NTNU, biofysikk
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

Vara

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

Adresse

Norsk Fysisk Selskap
Institutt for fysikk, NTNU
7491 Trondheim
Internettadresse: www.norskfysisk.no

Sekretær: Haakon Thømt Simensen
E-post: 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



UiO : Universitetet i Oslo

ISSN-0015-9247