

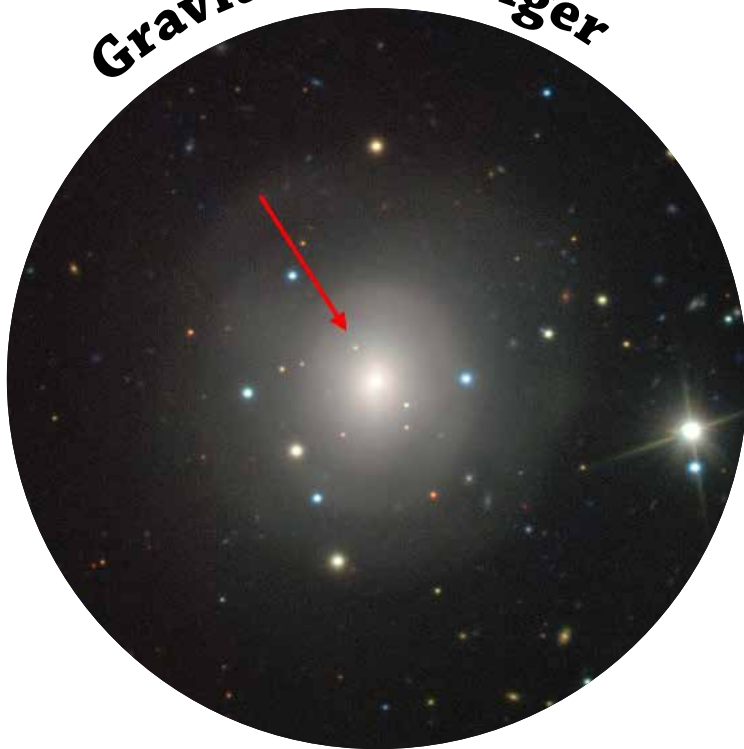
Fra Fysikkens Verden

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP

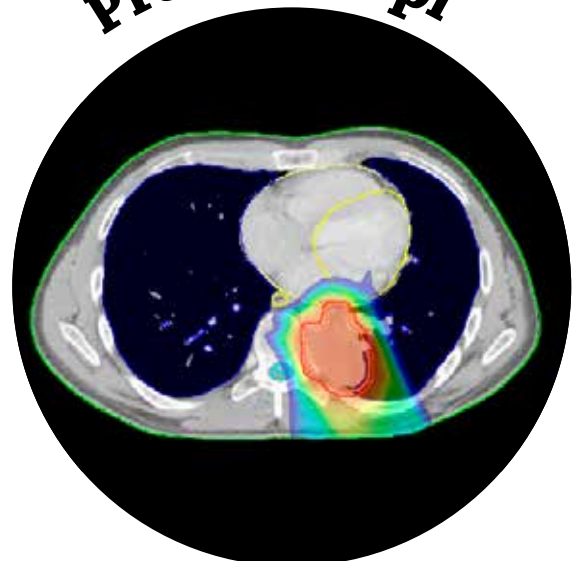


Kjernekraft

Gravitasjonsbølger



Protonterapi



Les også om:

- Ramanspektroskopi
- Opprinnelige svarte hull
- Fargesyn

Nr. 4 – 2017

79. årgang

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:

Professor Øyvind Grøn
Høgskolen i Oslo og Akershus, og
Fysisk institutt, UiO
E-post: oyvind.gron@hioa.no

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

Redaksjonssekretær:

Maria Hammerstrøm
Institutt for teoretisk astrofysikk, UiO
E-post: maria.hammerstrom@astro.uio.no

Redaksjonskomité:

Professor Odd-Erik Garcia, Institutt for fysikk, UiT
Professor Ellen K. Henriksen, Fysisk institutt, UiO
Professor Per Osland, Inst. for fysikk og teknologi, UiB

Layout og sats:

Maria Hammerstrøm

Trykkeri:

Oslo Sats, repro og montasje A/S

Ekspedisjonens adresse:

Fra Fysikkens Verden
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo
Tlf.: 22 85 64 28 / 22 85 56 68
Fax.: 22 85 64 22 / 22 85 56 71
Internettadresse: www.norskfysikk.no/nfs/

Abonnere:

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

E-post: nfs.styret@gmail.com

Fra Fysikkens Verden
c/o Inst. for fysikk og teknologi
UiT Norges Arktiske Universitet
Postboks 6050 Langnes, 9037 Tromsø

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 korrektur.

Innhold

Frå redaktørane *Emil J. Samuelsen*

97

Fysikknytt

Nobelprisen i fysikk 2017: Registrering av gravitasjonsbølger	<i>Øyvind G. Grøn</i>	98
Kilde til gravitasjonsbølge avbildet for første gang	<i>Maria Hammerstrøm</i>	100
Mulig sammenheng mellom opprinnelige svarte hull og tunge grunnstoffer	<i>Øyvind G. Grøn</i>	102

Artikler

Kjernekraft – historisk utvikling og fremtid	<i>Wolfgang Wiesenack</i>	104
Kreftbehandling med protonterapi og proton-CT	<i>H.E.S. Pettersen og D. Röhrig</i>	110
Nobelprisvinnar Raman skapte eit uunnverleg forskingsverktøy	<i>Emil J. Samuelsen</i>	114
Litt om fargesynets fysikk	<i>Per Thorvaldsen</i>	118
Konflikt mellom den kosmiske bakgrunnsstrålingen og Wiens forskyvningslov?	<i>C.-D. Abert</i>	121

Nye doktorer

Ken Vidar Falch	123
Njål Gulbrandsen	124
Unni Fuskeland	124

In memoriam

Sven Oluf A.K. Sørensen	<i>Ø. Grøn, H. Høgåsen og K.M. Danielsen</i>	125
Sven Lilledal Andersen	<i>C. Angell, T. Engeland, A. Isnes, E. Osnes og T.B. Skaali</i>	127
Arve Haug	<i>J.O. Eeg, E.O. Hole, H. Høgåsen og J.M. Leinaas</i>	128
Erik Eriksen	<i>Ø. Grøn, H. Høgåsen og J.M. Leinaas</i>	129

FRÅ REDAKTØRANE

Dette nummeret av *FFV* blir endå meir kosmologisk enn vanleg. Ikkje uventa vart nobelprisen i fysikk 2017 gitt for dei mykje omtalte LIGO-påvisingane i september 2015 og juni 2016 av gravitasjonsbølgjepulsar frå kosmos, eit teknologisk kunststykke. Det er mesta ufattelleg at måleinstrument-utslag av storleik 10^{-21} m har late seg filtrere ut frå alle tenkelege jordiske støykjelder til å kunne tolkast som pålitelege signal frå svartehol-kollisjonar meir enn ein milliard lysår borte! Omtrent samtidig med nobelpriskunngjeringa vart nye gravitasjonsbølger observert, og no vart også kjelda for signala observert i form av lysglimt, tolka som kollisjon mellom nøytronstjerner. Vi har også ei utgreiing i dette bladet om teori for korleis dei tyngste grunnstoffa kan ha blitt til i tilknytning til nøytronstjerner og svarte hol.

Kjernekraft blir av mange sett på som eit stort onde, men kjernekraft utviklar ikkje karbondioksid og utgjer ein viktig del av verda si energiforsyning. *FFV*-artikkelen av W. Wiesenack gir oversyn over utvikling og aktuell status for kjernekraft, mellom anna med eit grundig oversyn over aktuelle prosjekt og nye reaktortypar.

Protonstrålebehandling av kreft er ein nyare terapi- og avbildingsmetode som har betydelege fordelar over røntgenmetodar, og dette blir omtalt i ein detaljert artikkel.

FFV ser det som ei oppgåve å rapportere om nye doktorgradar og tilsettingar. Men bladet er også med på å heidre veteranar ved åremålsdagar, og også når dagane deira er over. Denne gongen er det fire veteranar frå UiO som skal minnst.



Øyvind G. Grøn



Emil J. Samuelsen

Nobelprisen i fysikk 2017: Registrering av gravitasjonsbølger

Nobelprisen i fysikk for 2017 er gitt til Reiner Weiss, Barry C. Barish og Kip Thorne for deres bidrag til registrering av gravitasjonsbølger.

Øyvind G. Grøn Høgskolen i Oslo og Akershus

Den 14. september 2015 ble gravitasjonsbølger direkte registrert for første gang. Det skjedde ved hjelp av to gravitasjonsbølge-detektorer LIGO i USA. En prinsippsskisse for detektoren er vist i Figur 1.

Detektoren

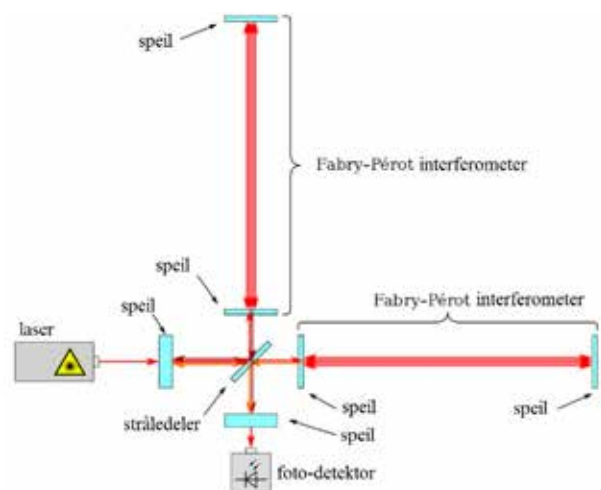
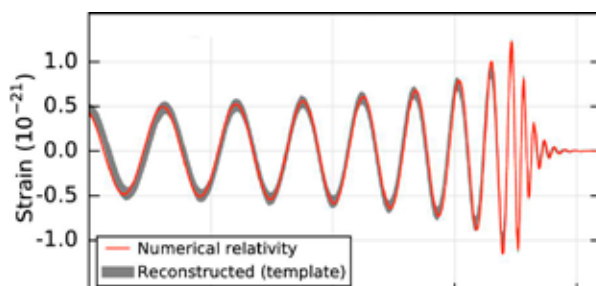
Lys sendes fra en laser, passerer et halvt gjennomtrengelig speil og treffer en stråledeler. En del av strålingen reflekteres og beveger seg en avstand A på tvers av den opprinnelige stråleretningen og en del beveger seg avstanden B rett frem. Begge reflekteres og møtes igjen. Da oppstår interferens. Apparaturen er konstruert slik at strålene normalt slukker hverandre ut. En mer detaljert omtale finnes i *FFV 1/16 s. 3*.

Når det passerer en gravitasjonsbølge endres avstandene A og B på forskjellig måte slik at interferensen mellom bølgene forandres, og stråling treffer foto-detektoren nederst på figuren. Dersom avstandene A og B endres av andre årsaker enn at en gravitasjonsbølge passerer detektoren, vil det også registreres et signal i fotodetektoren.

LIGO består av to slike detektorer, en i Hanford i staten Washington og en i Livingston i staten Louisiana. Det er 3000 km mellom detektorene, og lys bruker tiden 1/100 s på å passere denne avstanden. Kun signaler som treffer detektorene med en mindre tidsforskjell enn dette kan skyldes gravitasjonsbølger.

Fysikerne har beregnet hva slags signal som dukker opp hvis gravitasjonsbølger som skyldes at to svarte hull går i spiralbane rundt hverandre og så smelter sammen, passerer LIGO. Formen er vist i Figur 2.

Figur 2. Signalet som ifølge numeriske beregninger kommer til syne i LIGOs fotodetektorer hvis en gravitasjonsbølge som skyldes kolliderende svarte hull passerer LIGO.



Figur 1. Prinsippsskisse for en av de to LIGO-detektorene av gravitasjonsbølger.

Første registrering av gravitasjonsbølger

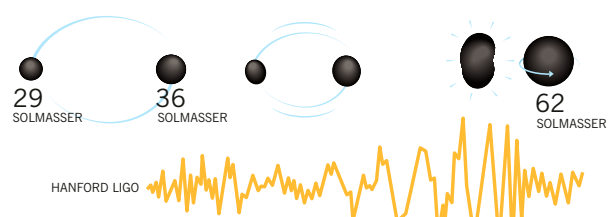
Den 14. september 2015 registrerte detektorene i Hanford og Livingston samtidige signaler av denne typen. Signalet registrert i Hanford er vist i Figur 3.

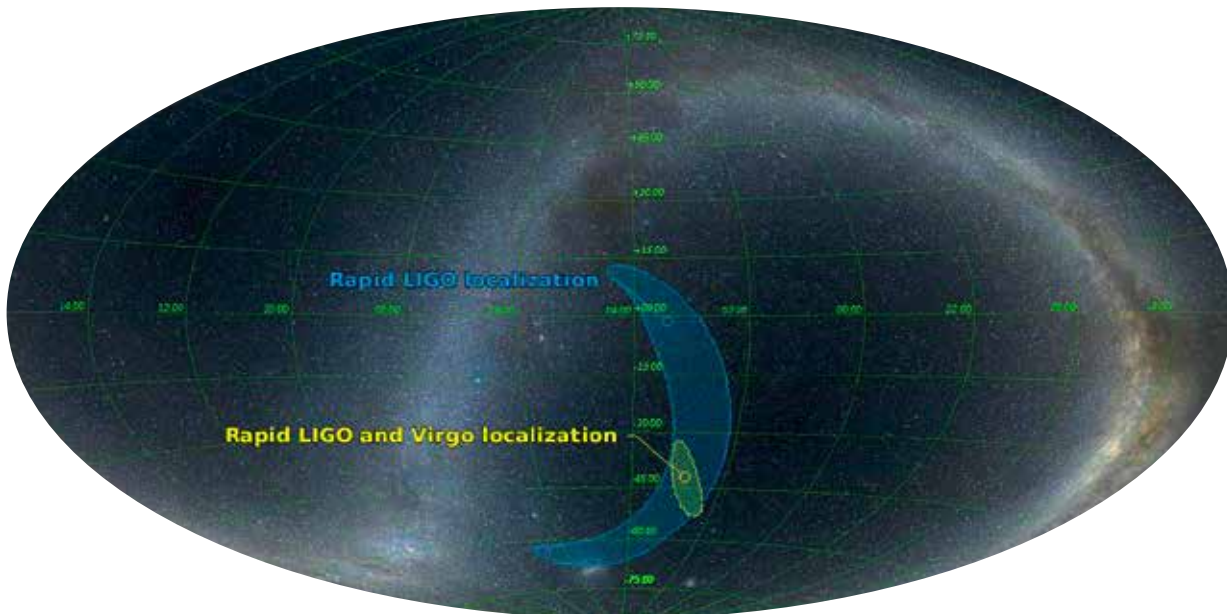
Ved å sammenlikne det observerte resultatet med en katalog av signaler beregnet numerisk med utgangspunkt i den generelle relativitetsteorien fant forskerne ut at gravitasjonsbølgene kom fra et system av to svarte hull, ett med 36 solmasser og ett med 29 solmasser, som beveget seg i spiralbane mot hverandre og så smeltet sammen til et svart hull med 62 solmasser. Det ble følgelig sendt ut en energi som svarer til at tre solmasser ble gjort om til energi ifølge formelen $E = mc^2$.

Et nytt vindu til universet

LIGO består som nevnt av to detektorer. En tredje, som befinner seg i Italia og kalles Virgo, ble operativ i november 2016. Den 14. august 2017 ble det første gravitasjonsbølgesignalet registrert samti-

Figur 3. Signalet registrert 14. september 2015 i LIGO gravitasjonsbølgedetektoren i Hanford. Det passer med at gravitasjonsbølgene kom fra to svarte hull som gikk i spiralbane mot hverandre og så smeltet sammen. Illustrasjon: Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences.





Figur 4. Det blå feltet viser lokaliseringen av gravitasjonsbølgekilten DW170814 dersom man bare bruker registreringene av gravitasjonsbølgesignalene med LIGO. Det grønne området når også Virgo-signalet brukes.

dig med LIGO og Virgo. Det viste seg å komme fra to kolliderende svarte hull, ett med 31 solmasser og ett med 25 solmasser. Kollisjonen skjedde 1,8 milliarder lysår fra jorda.

Med tre detektorer i stedet for bare to, var det mulig å bestemme lokaliseringen til de kolliderende svarte hullene med større nøyaktighet enn tidligere (Figur 4).

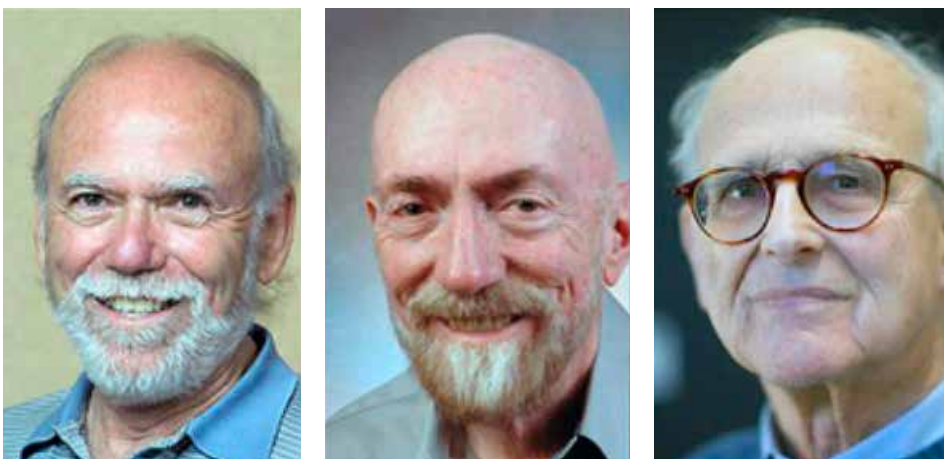
Etter hvert som flere detektorer blir operative, vil nøyaktigheten av posisjonsbestemmelsene til gravitasjonsbølgenes kilder øke så mye at man kan begynne å studere noen av universet egenskaper ved å bruke gravitasjonsbølger.

Med tre detektorer var det for første gang mulig å bestemme gravitasjonsbølgenes polarisasjon og sammenlikne med relativitetsteoriens forutsigelser. Nok en gang ble forutsigelsene fra relativitetsteorien bekreftet.

Prisvinnerne

Reiner Weiss, Barry C. Barish og Kip Thorne (Figur 5) er blitt tildelt Nobelprisen i fysikk for 2017. Reiss og Thorne fikk 6. september 2016 sammen med Ronald W.P. Drever Kavliprisen i astrofysikk for registreringen av gravitasjonsbølger (FFV 3/16 s. 72). Drever døde 7. mars 2017.

Weiss får halvparten av prisen. Han var en drivende kraft i planleggingen og byggingen av LIGO. Thorne og Barish deler halvparten av prisen. Thorne er teoretiker og bidro særlig med numeriske beregninger av hvordan signalene fra ulike fysiske kilder ville se ut. Barish ble leder av LIGO-prosjektet i 1997. Han skapte LIGO Scientific Collaboration som nå inkluderer over tusen forskere fra mange land. Hans innsats var avgjørende for at konstruksjonen av LIGO med, enorme krav til presisjon, kunne bli fullført slik at man etter 40 års innsats lyktes i å registrere gravitasjonsbølger. ■



Figur 5. Fra venstre: Barry C. Barish, Kip S. Thorne og Rainer Weiss.



Kilde til gravitasjonsbølge avbildet for første gang

For første gang er det observert gravitasjonsbølger og gammaglimt samtidig fra kolliderende nøytronstjerner. Observasjonen innebærer flere banebrytende funn.

Maria Hammerstrøm Universitetet i Oslo

Den 17. august 2017 registrerte de to LIGO-detektorene i USA og Virgo-detektoren i Italia gravitasjonsbølger som har fått navnet GW170817 [1]. Omtrent samtidig oppdaget NASAs romteleskop Fermi et gammaglimt innenfor området hvor gravitasjonsbølgene kom fra. Dette gjorde det mulig for de rundt 70 involverte bakkebaserte og rombaserte teleskopene å gjøre oppfølgingsobservasjoner for å se etter kilden til gravitasjonsbølgen. Det de fant var to kolliderende nøytronstjerner.

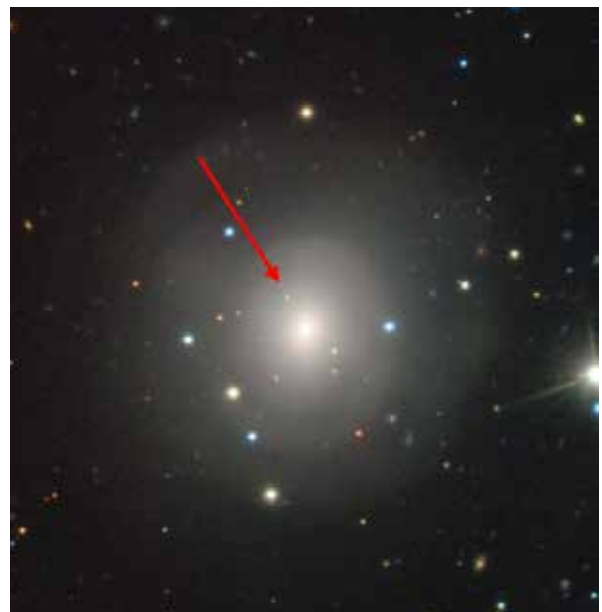
Bekreftelsen av nøytronstjernene

Forskerne kunne regne ut massen til de to objektene ut ifra gravitasjonsbølgesignalet, og fant $1,1M_{\odot}$ og $1,6M_{\odot}$, hvor M_{\odot} er solens masse. Dette er mindre enn massen til de binære sorte hullene som har gitt opphav til de observerte gravitasjonsbølgene tidligere, som omtalt i FFV [2]. Størrelsen av disse massene antydte at det var nøytronstjerner som var blitt observert, men gravitasjonsbølgene alene kunne ikke si dette med

sikkerhet. Deteksjonen var nødt til å kombineres med observasjoner av elektromagnetisk stråling.

Det ble gjort observasjoner i bølgelengdeområdene røntgen, ultrafiolett, optisk, infrarødt og radio. Lysspektrene som ble tatt av gammaglimtet stemte overens med spektrene som teoriene tilsa skulle komme fra en kollisjon mellom to nøytronstjerner.

At gravitasjonsbølger og elektromagnetisk stråling ble observert samtidig fra samme kilde, underbygger forutsigelsen fra Einsteins relativitetsteori om at gravitasjonsbølger beveger seg med lysets hastighet.



Figur 2. Gammaglimtet ble observert i galaksen NGC 4993. Bilde: Very Large Telescope, ESO

Figur 1. Kunstnerisk fremstilling av to nøytronstjerner like før de er i ferd med å slå seg sammen. Illustrasjon: ESO/L. Calçada/M. Kornmesser

Forklaringen på gammaglimt

Nøytronstjernene befinner seg omtrent 130 millioner lysår fra jorda, og de ble observert helt på slutten av sammenslåingsprosessen, fra da de var bare 300 km fra hverandre. Da de binære nøytronstjernene spiralisererte inn mot hverandre, sendte de ut gravitasjonsbølger som illustrert i Figur 1. Da de kolliderte, sendte de ut gammastråler i form av et gammaglimt. De kolliderende nøytronstjernene befant seg i galaksen NGC 4993, vist i Figur 2.

Gammaglimt har vært observert tidligere, men man har ikke hatt noe direkte bevis for hva som er opphavet til dem. At kolliderende nøytronstjerner kan være kilden til gammaglimt, har kun vært teoretisert – frem til nå. Det lysende materialet som kastes utover i rommet av kolliderende nøytronstjerner i et gammaglimt kalles en kilonova og er nå blitt observert for aller første gang. Figur 3 viser hvordan kilonovaen endret farge dramatisk over en periode på 12 dager.

Jakten på de tyngre grunnstoffene

Tunge grunnstoffer til og med jern kan dannes i kjernen av massive stjerner gjennom fusjon. Halvparten av grunnstoffene i universet tyngre enn jern skal bli dannet gjennom en form for nukleosyntese kalt r-prosessen [3], som frem til nå kun har vært teoretisert.

Observasjoner av kilonovaen i NGC 4993 gjort med flere teleskoper har ført til oppdagelsen av tunge grunnstoffer som gull og platina som er blitt

Nøytronstjerne: Den kollapsede kjernen til en massiv stjerne som fortsetter å kollapse helt til mesteparten av atomene er blitt gjort om til nøytroner.

spredt utover i universet av kilonovaen. De nye observasjonene viser at grunnstoffer tyngre enn jern kan dannes i nøytronstjerner og viser at r-prosessen virkelig foregår i universet [4].

En ny epoke for astronomien

Kombinasjonen av observasjoner gjort av gravitasjonsbølger og elektromagnetisk stråling for å forstå astronomiske fenomener, kalles *multi-messenger astronomy*, eller «flerkildet astronomi», et begrep som også kan innebære observasjoner gjort av nøytrinoer eller kosmisk stråling. Ved å kombinere ulike kilder kan nye, banebrytende funn gjøres. Observasjonene av de kolliderende nøytronstjernene har for alvor tatt oss inn i epoken for flerkildet astronomi. ■

Referanser:

1. B.P. Abbott og andre (LIGO Scientific Collaboration og Virgo Collaboration). «GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral». *Phys. Rev. Lett.* 119 (2017).
2. Ø. Grøn. «Gravitasjonsbølger, svarte hull og mørk materie». *Fra Fysikkens Verden* 2/2017 s. 52.
3. Ø. Grøn. «Mulig sammenheng mellom opprinnelige svarte hull og tunge grunnstoffer». *Fra Fysikkens Verden* 4/2017, s. 102.
4. E. Pian og andre. «Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron star merger». *Nature Letter* (2017) doi:10.1038.



Figur 3. Gammaglimtet endret farge dramatisk over en periode på 12 dager. Fargeendringene stemte med teoriene om en «blå kilonova». Bilder: VISTA-teleskopet/ESO

Mulig sammenheng mellom opprinnelige svarte hull og tunge grunnstoffer

De siste årene er det utviklet en teori som knytter sammen opprinnelige svarte hull dannet i universets Big Bang-tilblivelse og eksistensen av tunge grunnstoffer som gull og platina. Teorien gir samtidig svar på et astrofysisk problem: Mangelen på pulsarer i sentrum av Melkeveien.

Øyvind G. Grøn Høgskolen i Oslo og Akershus

Før universet var et minutt gammelt besto den kosmiske materien av et varmt hydrogenplasma. I løpet av det første kvarteret skjedde den kosmiske nukleosyntesen der nesten en fjerdedel av materien gikk over til helium og hvor det også ble dannet små mengder litium. Men så stoppet kjerneprosessene opp, og de neste hundre millioner årene besto den ordinære materien (dvs. ikke den mørke materien) bare av de tre letteste grunnstoffene.

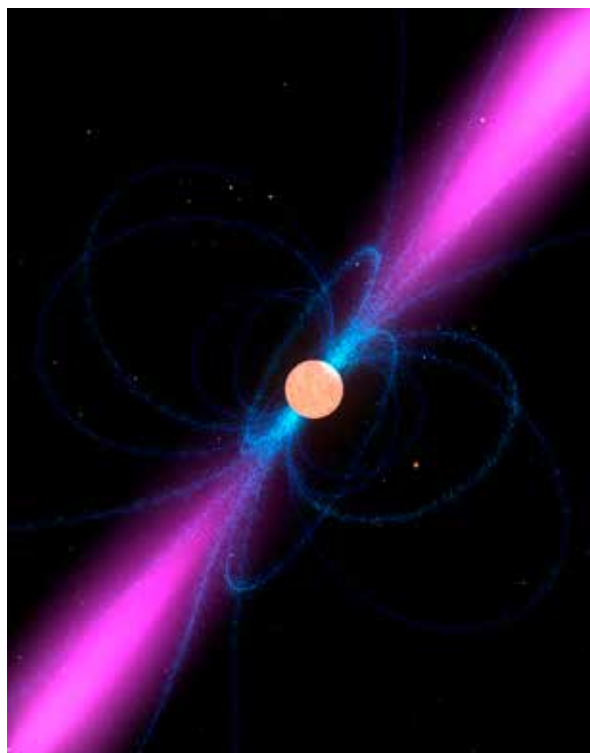
Fusjon i stjerner

I den mest stabile fasen av en stjernes eksistens fusjonerer hydrogen til helium. For en stjerne som sola kan denne fasen vare i ti milliarder år. Men forbrenningen går raskere for mer masserike stjerner, og for en stjerne med ti solmasser har den hydrogenforbrennende fasen en varighet på bare 32 millioner år. Mens de mindre massive stjernene ikke fusjonerer tyngre grunnstoffer enn helium og karbon, fusjonerer de mer massive stjernene helium i økende tempo og andre forbrenningsprodukter til tyngre grunnstoffer, helt opp til jern. Da stopper det opp fordi bare fusjon av grunnstoffer lettere enn jern frigjør atomenergi.

Produksjon av grunnstoffer tyngre enn jern krever tilførsel av energi. Når jernatomer er dannet i en stjerne, stopper derfor fusjonsprosessen, og tilførselen av atomenergi opphører. Dermed faller trykket i sentrum av stjernen slik at den kollapser. Da frigis gravitasjonsenergi. Tettheten og temperaturen stiger så mye at grunnstoffer tyngre enn jern dannes. Dette er begynnelsen av en supernovaeksplosjon som sørger for å berike den interstellare materien med tunge grunnstoffer.

Dannelse av grunnstoffer tyngre enn jern

Grunnstoffene tyngre enn jern dannes ikke ved fusjonsreaksjoner. Det er en annen mekanisme som er virksom: Innfangning av nøytroner som



Figur 1. Illustrasjon av en pulsar. Kilde: NASA

danner radioaktive nøytronrike atomkjerner. Når et nøytron i en slik atomkjerne spaltes i et elektron og et proton og elektronet sendes ut (radioaktiv β -stråling), øker antall protoner i kjernen med én, og dermed øker atomnummeret med én.

Astrofysikerne har identifisert to typer nøytroninnfangning: s-prosessen, der s står for *slow* («sakte» på norsk) er en langsom prosess, og r-prosessen, der r står for *rapid* («rask» på norsk), er en hurtig prosess. Omtrent halvparten av grunnstoffene mellom ^{26}Fe (jern med 26 protoner i atomkjernen) og ^{83}Bi (vismut med 83 protoner i atomkjernen) produseres ved hjelp av s-prosessen. Denne prosessen skjer i omgivelser med relativt lav tetthet av frie nøytroner, slik som i røde kjempestjerner som forbrenner helium. Slike stjerner ender aldri med å eksplodere som supernovaer. Dette betyr at mange grunnstoffer tyngre enn jern ikke produseres i supernovaeksplosjoner.

Resten av grunnstoffene tyngre enn jern dannes ved r-prosessen. Denne prosessen skjer i omgivelser med en enorm tetthet av nøytroner, mellom 10^{20} og 10^{24} antall nøytroner per cm^3 . Frem til omkring 2010 hadde man bare identifisert ett scenario der slike prosesser var viktige: I

supernovaeksplosjoner av type II, dvs. eksploderende stjerner med over 8 solmasser.

Kolliderende nøytronstjerner

Gull produseres ved hjelp av r -prosessen. I 2013 ble det foreslått at denne prosessen ikke bare skjer i supernovaeksplosjoner, men også når nøytronstjerner kolliderer og forårsaker et gammaglimt som bare varer i brøkdelen av et sekund. Da produseres opp til ti månemasser med gull. Kollisjoner mellom nøytronstjerner er ganske sjeldne: én kollisjon for hver 1000–2000 supernovaeksplosjoner. Beregninger har likevel vist at alt gullet som finnes kan ha blitt produsert i kollisjoner mellom nøytronstjerner.

Problemet med manglende pulsarer i Melkeveiens sentrum

Dette er et interessant problem som har vært diskutert i flere år: Det er tett med stjerner nær sentrum av Melkeveien. Astronomene forventet derfor å registrere noen titalls pulsarer (roterende nøytronstjerner som er rester etter supernovaeksplosjoner) i et bestemt område i sentrum av Melkeveien. Men det er bare funnet én.

Astronomenes konklusjon var at det må ha blitt dannet noen titalls pulsarer i det definerte området, men levetiden deres må ha vært så kort at det hele tiden bare er omtrent én pulsar i området. Dermed begynte astrofysikerne å tenke ut en eller flere mekanismer som kunne få pulsarer til å forsvinne.

Bramante og Linden kom da med en ny idé. De foreslo i en artikkel publiserte 3. november 2014 i *Physical Review Letters* [1] at i områder med klumper av mørk materie kunne den mørke materien danne et stort antall svarte hull med mye mindre masse og størrelse enn de stellare svarte hullene. For eksempel vil svarte hull med mellom 10^{-14} og 10^{-8} solmasser, dvs. med mellom $2 \cdot 10^{16}$ kg og $2 \cdot 10^{22}$ kg, ha radier mellom $6 \cdot 10^{-11}$ m og $6 \cdot 10^{-5}$ m. De minste av dem er på størrelse med et atom. Når et slikt svart hull treffer en nøytronstjerne vil det bevege seg inn i stjernen og ned til sentrum av den. Følgelig kan det befinne seg slike svarte hull i sentrum av nøytronstjerner.

Det svarte hullet i sentrum vil trekke til seg masse. Det spiser opp nøytronstjernen innenfra. Da aktiviseres r -prosessen, og det dannes tunge grunnstoffer. Forskerne konkluderte med at denne

mekanismen gir en forklaring på problemet med manglende pulsarer i Melkeveiens sentrum.

Nøytronstjerner og opprinnelige svarte hull

Den 7. august 2017 presenterte George Fuller og medarbeidere en artikkel i *Physical Review Letters* [2] der de fulgte opp Bramante og Lindens idéer. De fokuserte på å finne en akseptabel mekanisme for produksjon av universets tyngste grunnstoffer, slike som gull, platina og uran.

Utgangspunktet er en konsekvens av Big Bang-teorien for universets tilblivelse. Ifølge teorien ble det produsert såkalte opprinnelige svarte hull (PBH-er: primordial black holes) helt i starten av universets historie. De kunne ha masser fra 10^{-8} kg til tusener av solmasser. De som har masser under 10^{-11} kg, ville for lengst ha «fordampet» siden de sender ut såkalt Hawking-stråling (navn på stråling sendt ut fra svarte hull) med økende intensitet etter hvert som de taper masse på grunn av utstrålingen.

Fuller og medarbeidere fokuserte på PHB-er skapt under Big Bang, i stedet for å anta at svarte hull ble dannet ved kollaps av mørk materie. Dersom noen prosent av den mørke materien består av PBH-er med radier mellom $6 \cdot 10^{-11}$ m og $6 \cdot 10^{-5}$ m, vil det kunne befinne seg slike svarte hull i sentrum av en del nøytronstjerner.

De skriver nå at det svarte hullet i sentrum vil trekke til seg masse og spise opp nøytronstjernen innenfra. Fuller og medarbeidere argumenterer også for at r -prosessen aktiviseres når gravitasjonsenergi frigjøres i denne prosessen, og de utfører beregninger av produksjon av tunge grunnstoffer som gull, platina og uran i denne prosessen.

Resultatet er at de nye generasjonene av stjerner får innslag av disse stoffene, og forskerne viste at mekanismen de foreslo kan forklare de observerte mengdene av gull, platina og uran i stjernene. ■

Referanser

1. Joseph Bramante and Tim Linden. «Detecting Dark Matter with Imploding Pulsars in the Galactic Center». *Phys. Rev. Lett.* 113, 191301(2014).
2. George M. Fuller, Alexander Kusenko, and Volodymyr Takhistov. «Primordial Black Holes and r -Process Nucleosynthesis». *Phys. Rev. Lett.* 119, 061101 (2017).

Kjernekraft – historisk utvikling og fremtid

Ikke-militær utnyttelse av kjernekraft begynte med Shippingport-reaktoren i 1957 med 60 MW elektrisk effekt. Artikkelen beskriver utviklingen som førte til store lettvannsreaktorer med opp til 1600 MW, og dagens situasjon i spørsmål om nye anlegg. Den gir en oversikt over nye «Generation IV» reaktortyper, små modulære reaktorer, og konseptet for sluttforvaring av brukt brensel i Finland. Tallene om nybygg og utviklingsplaner tegner et variert bilde, men indikerer ikke at kjernekraft er ved veis ende.

Wolfgang Wiesenack fhv. forskningssjef ved IFE, Halden

Kjernekraft, teknologien som utvinner varme og elektrisitet ved spalting av atomkjerne, har vært med oss siden 1942 da den første kjedereaksjonen ble satt i gang av Enrico Fermi i «Chicago pile», og siden 1957 med den første storskala reaktoren for produksjon av elektrisitet – Shippingport reaktoren i USA. I Norge var Institutt for atomenergi (i dag IFE) tidlig ute med forskningsreaktorene JEEP i 1951 og HBWR i 1958. Sistnevnte, også kalt Halden-reaktoren, har bidratt betydelig til utvikling av brenselteknologi og reaktorsikkerhet.

Prinsippet for å lage strøm med kjernekraft er ganske enkelt. Ved spaltning av et tungt atom (uran, plutonium) blir det frigjort en stor mengde energi fordi bruddstykkene til sammen er litt lettere enn det opprinnelige atomet. Massedifferansen blir til energi etter Einsteins berømte formel $E = mc^2$.

Energien i form av damp eller het gass føres til en turbin og blir til strøm. Det blir også frigjort 2–3 nøytroner; ett av dem trengs for å opprettholde en kjedereaksjon av spaltningsprosesser, mens de overskytende blir absorbert av ikke-spaltbare atomer. Hvis denne absorpsjonen skjer i uran-238 eller thorium, dannes nye fissile atomer, henholdsvis plutonium og uran-233. Prosessen kalles «konvertering» (*conversion*) hvis flere fissile atomer blir brukt opp enn nye dannet, ellers «formering» (*breeding*).

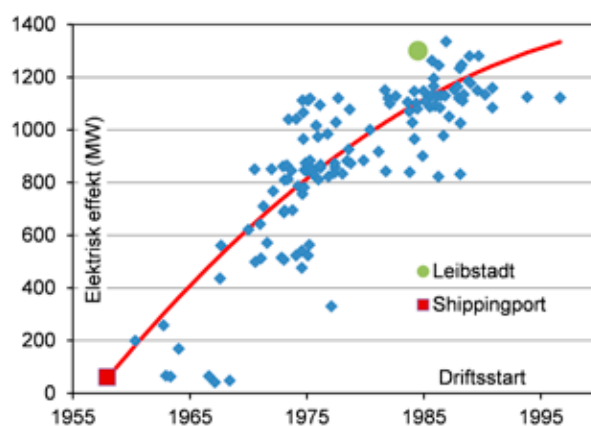


Figur 1. Fisjon av uran.

Dagens reaktorer

Reaktorene i kommersiell bruk i dag er nesten utelukkende basert på kjøling med vann. Det er såkalte termiske reaktorer fordi nøytronene blir brems ned (moderert) fra den høye energien som de har like etter at en kjerne blir spaltet, til en lav energi tilsvarende temperaturen til moderatoren som samtidig er kjølevann. Den lave energien øker sannsynligheten for at et nøytron kan bli fanget inn av en uran-235 atomkjerne, noe som ofte fører til at kjernen spaltes. De fleste reaktorer er trykkvannsreaktorer (*pressurized water reactor*, PWR, og den russiske typen VVER) og kokevannsreaktorer (*boiling water reactor*, BWR) som har brensel der uran-235 er anriket til maksimalt 5 % for å kunne opprettholde kontinuerlig drift. En annen, mindre utbredt type er Candu-reaktorer med såkalt tungtvann som moderator. Her kan man nøye seg med uran i naturlig isotopsammensetning som er 0,7 % uran-235 og 99,3 % uran-238.

Reaktorene er blitt større over tid. Figur 2 viser hvordan størrelsen (MW elektrisk) av PWR og BWR utviklet seg i USA fra 1956 til 1996. Deretter, som i mange andre land, ble det ikke bygget flere reaktorer.



Figur 2. Utvikling av reaktorstørrelse i USA.

Mens Shippingport-reaktoren nøyde seg med 60 MW, er en vanlig størrelse av nyere PWR og BWR 1300 MW elektrisk effekt. Det betyr at en slik reaktor produserer rundt 10 TWh per år som er nok til å dekke el-behovet til 500 000 eneboliger. EPR-reaktoren (European Pressurised Water Reactor), en videreutvikling av de franske N4 og de tyske Konvoi reaktorene, fortsetter trenden til større enheter. EPRene under oppføring på Olkiluoto i Finland og Flamanville i Frankrike kommer til å yte 1600 MW.

Slike kjernekraftverk tar lite plass. Figur 3 viser KKL Leibstadt i Sveits med 1275 MW og et inngjerdet område på omtrent 300 m × 500 m. Vindkraftanlegg på samme areal yter bare 3 MW.

Også brenselet i reaktorkjernen er blitt utviklet til å tåle stadig høyere utnyttelse. Mens



Figur 3. Kjernekraftverk Leibstadt ved elven Aare i Sveits [1].

de første reaktorene på seksti- og syttitallet hentet 720 000 kWh varmeenergi (tilsvarende 240 000 kWh elektrisk energi eller årsforbruk til 12 eneboliger) ut av ett kilogram brensel, får man i dag dobbelt så mye ut av hvert kilogram. Fordelen med denne økningen er lavere brenselkostnader og mindre brukt brensel som må forvares over lang tid.

Trykk- og kokevannsreaktorer er en velprøvd teknologi og er nesten enerådende. I antall deretter kommer CANDU-reaktorene (CANDU = CANadian Deuterium Uranium) utviklet i Canada. Moderator og kjølemiddel er tungtvann (D_2O), og reaktortypen nøyer seg derfor med uran i naturlig sammensetning, dvs. uten anrikning av det fissionable uran-235. Noen gasskjølte reaktorer er i kommersiell drift i Storbritannia. I denne reaktortypen blir nøytronene bremsset ned (moderert) med grafit.

Parallelt med utviklingen av trykk- og kokevannsreaktorene, også betegnet som lett vannsreaktorer fordi de bruker lett vann (dvs. vanlig vann, H_2O , i motsetning til tungtvann, D_2O), ble det også forsket på såkalte formeringsreaktorer (*fast breeder reactor*). En viktig begrunnelse var at lett vannsreaktorene utnyttet uranet for lite (omtrent 1 % av det opprinnelige uranet), mens formeringsreaktorene kunne spalte mer enn 60 % ved å omdanne ikke-spaltbart uran-238 til det lett spaltbare plutonium.

Bekymringen på 60- og 70-tallet var at man skulle gå tom for uran om noen tiår uten bruk av formeringsteknologien. Vi vet i dag at dette scenariet ikke inntraff – tvert imot, horisonten for når uran som kan utvinnes til en akseptabel pris, tar slutt, er utvidet til minst hundre år senere.

Det er i dag lite aktivitet hva angår kommersiell utnyttelse av formeringsteknologien i konkurranse med den veletablerte lett vannsreaktorteknologien. I tillegg kommer at formeringsteknologien trenger repressering for å ekstrahere plutoniumet fra brukt brensel – frykt for radioaktiv forurensning fra represseringsanlegg og misbruk av plutonium til våpenformål er medvirkende til skepsis overfor denne teknologien og dens mindre akseptanse.

Hva skjer i verden i spørsmål nye anlegg?

Utnyttelsen av kjernekraft i store kommersielle kraftverk er påvirket av tre alvorlige ulykker: Three Mile Island i 1979, Tsjernobyl i 1986, og Fukushima i 2011. Særlig i årene etter Tsjernobylulykken økte en kritisk holdning mot kjernekraft, men etter hvert utviklet det seg igjen en positiv innstilling. Dette stoppet brått opp som følge av ulykken i Fukushima, og Tyskland reagerte med beslutning om at den siste av de til da 17 reaktorer i drift vil

Nye reaktortyper: Generasjon IV

Lettvannsreaktorer er nesten enerådende i verden, både av eksisterende anlegg og de som planlegges bygget. Men det finnes mange ideer for nye reaktorkonsepser. Figur 4–9 (kilde: www.gen-4.org) viser seks reaktortyper som Generation IV International Forum (GIF) har valgt ut for videre internasjonal forskning og utvikling [4].

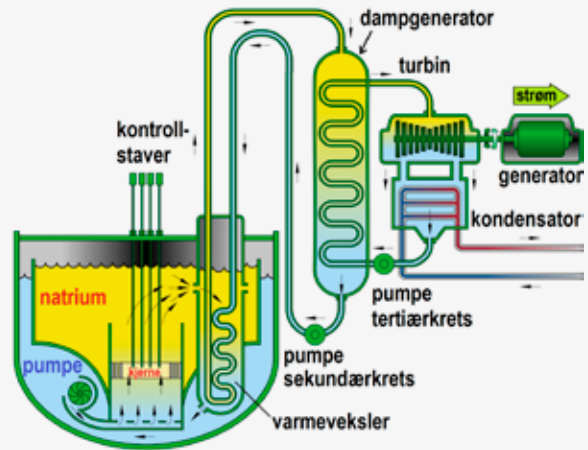
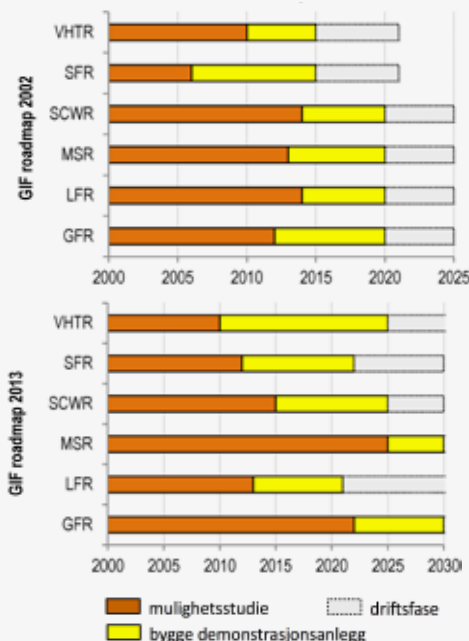
Alle disse reaktortypene har vesentlig høyere driftstemperatur enn de nåværende lettvannsreaktorene og dermed høyere termodynamisk virkningsgrad. Men høyere temperaturer stiller også høyere krav til egenskaper som materialfasthet, korrosjonsmotstand og slitasjestyrke i tillegg til at materialene må tåle strålingen i reaktorkjernen.

Med utviklingen av Generation IV-reaktorer skal det gjøres fremskritt i henhold til fire mål [4]:

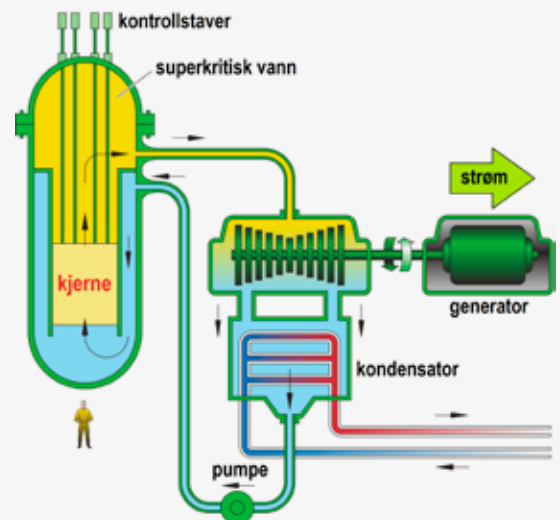
- bærekraft;
- sikkerhet og pålitelighet;
- økonomisk konkurransevne;
- spredningshindring og fysisk vern.

Men ting tar tid. Sammenligningen av tidslinjene tegnet i 2002 og revidert i 2013 (Figur 10) viser at de fleste planlagte demo-reaktorene er forsinket med minst fem år.

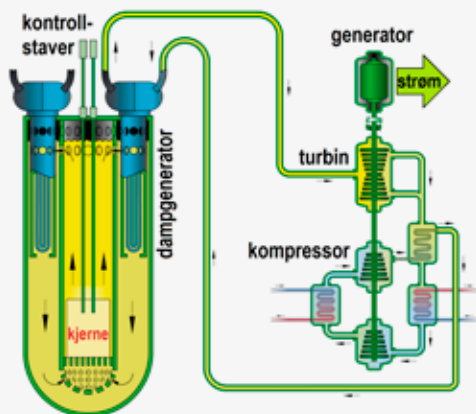
Figur 10. Tidslinjer for Gen IV utvikling som definert av GIF i 2002 og revidert i 2013 [4].



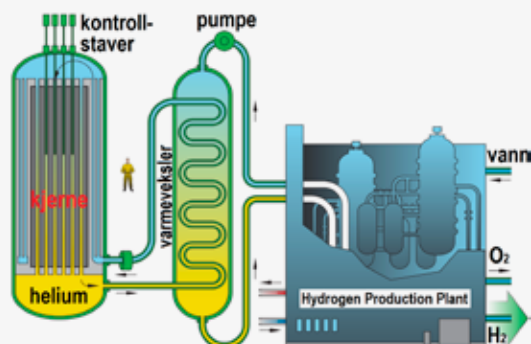
Figur 4. Natriumkjølt hurtigreaktor (*sodium-cooled fast reactor*) er en formeringsreaktor som bruker natrium (Na, eng. *sodium*) for å transportere varmen ut av reaktorkjernen. Teknologien støtter seg på erfaring med forskningsreaktorer og Superphénix i Frankrike. En av utfordringene er å hindre at det kjemisk svært reaktive natrium i kjernen og i sekundærkretsen kommer i kontakt med oksygen og med vann.



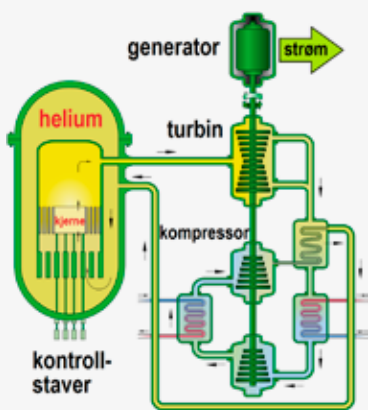
Figur 8. Reaktor kjølt med superkritisk vann (*supercritical-water-cooled reactor*) er en teknologi som forener erfaringen med PWR, BWR og konvensjonelle høytemperaturkraftverk. Driftstemperaturen ligger godt over det kritiske punktet for vann (374 °C, 221 bar) hvor det ikke lenger eksisterer separate faser av damp og væske, men bare en tett fase som går direkte til turbinen.



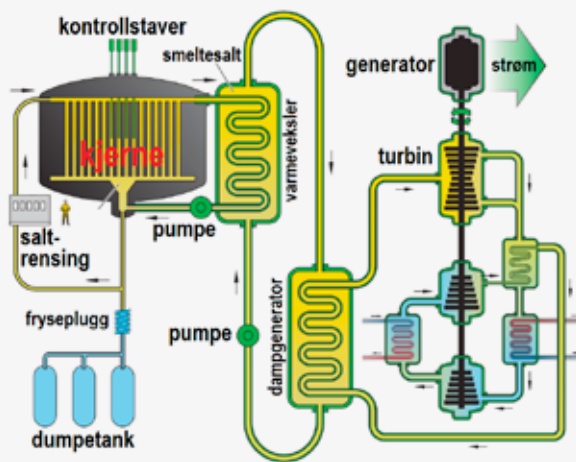
Figur 5. Blykjølt hurtigreaktor (*lead-cooled fast reactor*) er også en formeringsreaktor. Kjølemiddelet er bly (Pb, eng. *lead*) eller en eutektisk blanding (dvs. en sammensetning som gir lavest mulig smeltetemperatur) av bly og vismut (Bi) som smelter ved 123,5 °C. Disse metallene er kjemisk inert i kontakt med vann og luft. En ulempe med vismut er dannelse av det radioaktive polonium-210, en sterk alfastråler. Selve reaktoren har en enkel oppbygging og fungerer med naturlig sirkulasjon uten pumper.



Figur 6. Høytemperaturreaktor (*very-high-temperature reactor*) er en grafitt-moderert reaktor med helium som kjølemiddel. Som navnet sier, er driftstemperaturen veldig høy og skal ligge i området 750–950 °C. Formålet er ikke bare å lage strøm, men også å bruke energien som prosessvarme. Bildet viser for eksempel et anlegg for å lage hydrogen av vann i tilslutning til reaktoren. Hydrogenet kan så blant annet brukes i brenselceller i biler.



Figur 7. Gasskjølt hurtigreaktor (*gas-cooled fast reactor*) er også kjølt med helium, men har ingen moderator for å bremse ned nøytronene. Det er dermed en formeringsreaktor som kombinerer høy uranutnyttelse og høy termodynamisk effektivitet. Reaktortypen har noen teknologiske og sikkerhetstekniske utfordringer. En ulempe er for eksempel en rask oppvarming av kjernen dersom pumpene for sirkulasjon av helium stopper.



Figur 9. Saltsmeltereaktor (*molten salt reactor*) er et konsept som bruker kjemisk stabile fluoridsalter som kjølemiddel. Brenselet kan være separat i staver eller plater eller være løst opp i det smeltede saltet. I det siste tilfellet kan spaltningsproduktene, som ofte absorberer nøytroner, bli fjernet kontinuerlig, og nytt brensel kan bli satt til uten reaktorstans. Konseptet er godt egnet for å bruke thorium som brensel.

Artikkelen fortsetter på neste side

bli stengt i 2022. Også Sveits besluttet å fase ut kjernekraft, men uten å definere hvordan og når. I en folkeavstemning i november 2016 [2] stemte et flertall mot et forslag om å begrense driftstiden til 45 år og dermed avstengning av den siste sveitsiske reaktoren i 2029. Andre land i Europa inntar en mer avventende holdning slik som Sverige som tillater å bygge nye reaktorer der hvor gamle blir stengt, men det eksisterer ingen konkrete planer for det. Finland og Frankrike fortsetter med å bygge hver sin «Generation III+»-reaktor, og Storbritannia driver fram planer for det.

Ifølge IAEAs statistikk for 2016 [3] var 449 reaktorer med til sammen 392 GW elektrisk effekt i drift i 30 land, derav 129 i EU og 99 i USA. Antall reaktorer har forandret seg lite de siste 20 årene og har ligget mellom 440 og 450, mens installert effekt har økt fra 348 GW i 1996 til 392 GW i 2016. Permanent avstengning av noen reaktorer ble altså kompensert med nybygg, og økningen av totaleffekt skyldes oppgradering av reaktorer til høyere ytelse og at nye reaktorer er større enn de som blir nedlagt.

Hva med fremtiden? IAEAs statistikk opplyser også at 60 reaktorer er under oppføring. Men hvor skjer det? Knappt nok i Vest-Europa, selv om det bygges som nevnt i Finland og Frankrike. Nei, det skjer mer i Øst-Europa og Russland, det skjer mest i Øst-Asia – Kina, India og Korea. Den 15. mars i år begynte kommersiell drift av *Yangjiang-4*, Kinas 37. reaktor. 26 av landets reaktorer kom i drift etter 2010, og det er planlagt å øke Kinas 35 GW kjernekraft til 58 GW i 2020 og videre til 150–250 GW i 2030.

Og, kanskje mest bemerkelsesverdig, det skjer i De forente arabiske emirater – en ørkenstat med mye plass og olje og sol. Der har man kjøpt fire trykkvannsreaktorer som blir levert av koreanske firmaer. Samlet effekt er 4×1345 MW som ville være nok til å dekke en tredjedel av Norges elektrisitetsbehov. Ifølge planen skal reaktorene settes i drift en etter en fra 2017 til 2020. Emiratene ble i 2013 medlem av det internasjonale OECD Halden Reactor Project, som er ledet av Institutt for energiteknikk og som har forskning på reaktorsikkerhet som formål.

Små modulære reaktorer, SMR

Store reaktorer er billigere per kW installert effekt, men kapitalbehovet for å bygge dem er enormt. Prisen til EPR i Finland er nå estimert til 8,5 milliarder euro, og selv om nok en reaktor av samme type kan ligge nærmere de opprinnelig anslåtte 3 milliarder euro, er det snakk om store summer som må nedbetales over lang tid. En annen ulempe kan være at store reaktorer trenger et sterkt kraftnett for å ta imot 1000 MW eller mer, eller omvendt være i stand til å tåle at en så stor enhet plutselig faller ut.

«Small Modular Reactors» eller SMR [5], dvs. reaktorer med mindre enn 300 MW elektrisk effekt, blir utviklet for å unngå disse ulempene. «Modular» fordi de, slik som ferdighus, er tenkt satt sammen av prefabrikerte moduler som fraktes til der de skal brukes. Det ligger i konseptet at de skal bygges i store serier der alle reaktorene har en felles sikkerhetsgodkjenning.

SMR er blant annet tenkt å erstatte diesलगeneratorer eller mindre kullkraftverk (95 % av verdens kraftverk er på mindre enn 300 MW) og forsyne steder langt vekk fra store byer og uten kobling til store nett. En annen mulig anvendelse er desalinering, dvs. fremstilling av ferskvann fra saltvann. I mange år ble Galena, en liten landsby i Alaska med 500 innbyggere, omtalt som det første stedet som skulle få en SMR – Toshiba 4S (Super Safe, Small and Simple) med 10 MW elektrisk ytelse. Men Toshiba søkte aldri om sertifisering hos US Nuclear Regulatory Commission, og prosjektet er nå skrinlagt.

Men SMR-ideen lever. Det finnes 60 typer SMR på konseptstadium hvorav 10 til nå er valgt til å bli bygget som prototyp [5]. Enda fem er under oppføring i Argentina, India, Kina og Russland, og tre er i drift i India og Kina. Også her er det tydelig at Kina og India er land som satser sterkt på kjernekraft.

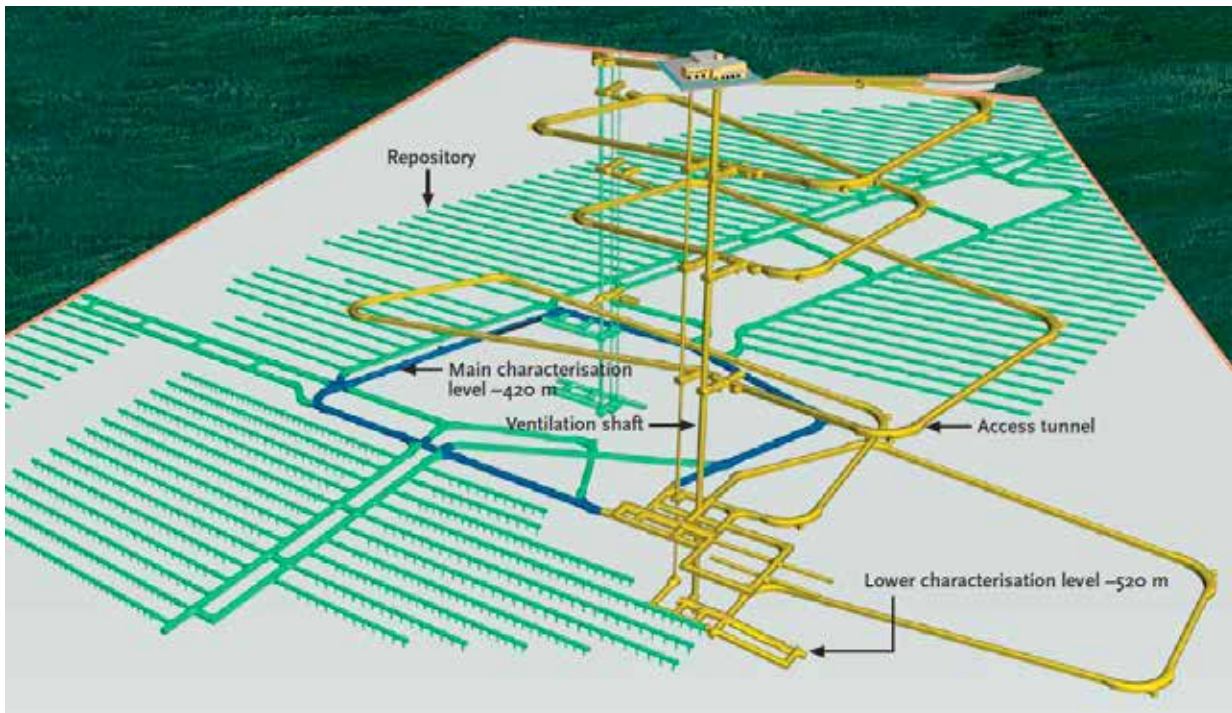
SMR har materialtekniske utfordringer på lik linje med Gen IV-reaktorene. Kjølemiddelet kan være letevann, tungtvann, gass, flytende metall eller saltsmelte. Sikring mot sabotasje og eventuell drift og overvåkning fra en fjernsentral er særegne problemstillinger som må løses.

Brukt brensel, deponering

Ved spalting av tunge atomer som uran og plutonium oppstår radioaktive bruddstykker. Radioaktive isotoper oppstår også ved at de tunge atomene absorberer nøytroner uten spalting. På denne måten dannes plutonium og enda tyngre atomer som americium og curium; alle disse sender ut alfastråling ved henfall. Brukt brensel må derfor håndteres og lagres slik at radioaktive stoffer ikke kommer ut i omgivelsen. Det finnes i hovedsak to framgangsmåter for behandling og sluttforvaring av brukt brensel [6].

Den mest «populære» løsningen er direkte sluttforvaring. Konseptet går ut på å lagre det brukte, radioaktive brenselet i stabile geologiske formasjoner som har eksistert i millioner av år. Det kan for eksempel være salt, leire eller granitt. Et deponi vil da ligge 500–1000 m under overflaten og være effektivt beskyttet mot ytre påvirkning.

I Skandinavia er steder for slike deponier pekt ut å ligge i Forsmark i Sverige [7] og Olkiluoto i Finland [8]. Figur 11 viser det finske deponiet hvor anleggsarbeidene har begynt, først ved å lage



Figur 11. Forskningsanlegget Onkalo og senere deponi for brukt brensel ved Olkiluoto i Finland (bilde: Posiva.fi).

forskningsanlegget Onkalo (gul og blå del) for å verifisere at berggrunnen er egnet. Det skal siden utvides med den grønne lagringsdelen. Fra de horisontale tunellene går det sjakter ned hvor brenselet, kapslet inn i jern- og kopperbeholdere, blir lagret. Til slutt blir sjaktene etterfylt med bentonitt. De første tiår skal brenselet bli overvåket med måleinstrumenter, men til slutt blir også tunellene etterfylt og hele anlegget forseglet. Det inngår ikke i konseptet å overvåke det i titusener av år.

En annen måte er repressering av brukt brensel. I denne prosessen blir brenselet oppløst kjemisk, og så blir de tunge atomene, især isotoper av uran og plutonium, separert fra de radioaktive reststoffene som ble dannet ved spalting. Denne resten blir overført til lagringsbestandig form ved såkalt glassifisering (*vitriification*). Plutonium kan bli brukt til nytt brensel, eller det og uran mellomlagres i påvente av bruk i formeringsreaktorer. I den vestlige verden er det nå bare Frankrike som forfølger denne veien. Den krever også et langtidslager, men det kan være mindre enn det som trengs for direkte lagring uten repressering.

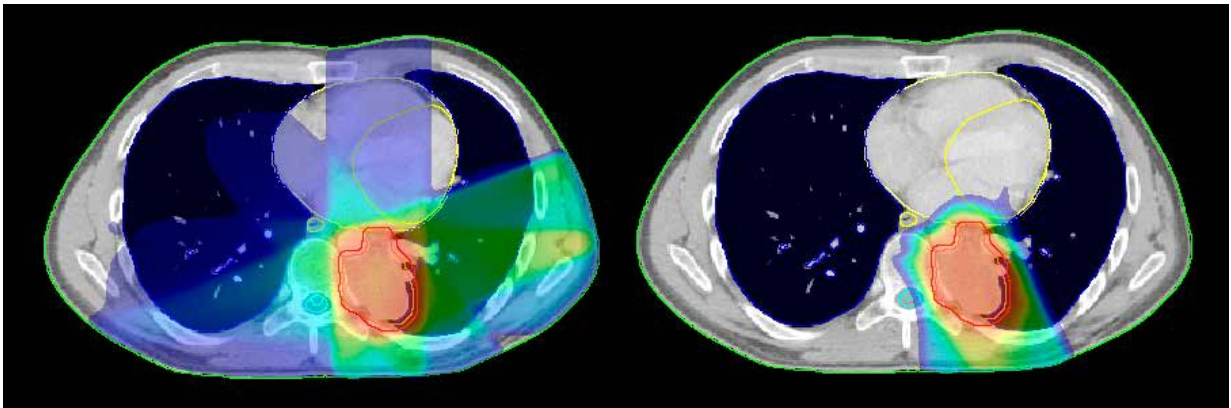
Har kjernekraft en fremtid?

I Europa kan det se ut som om kjernekraft har sett sine beste dager. Men er det sant generelt? Tallene tegner et variert bilde, men på verdensbasis indikerer de ikke at kjernekraft er ved veis ende. Interessen for kjernekraft er fremdeles stor totalt sett, og nye reaktortyper er tilgjengelig eller blir utviklet med sikkerhetsegenskaper som selv ved kjernesmelting

skal begrense miljøpåvirkningen til reaktorområdet. Det krever fremdeles mye forskning og utvikling, og store investeringer i kommersielle kraftverk med nedbetaling over mange tiår trenger politisk omforente, stabile rammebetingelser og forutsigbarhet. Da kan og burde kjernekraft bidra til å løse miljøproblemene som verden står overfor. ■

Referanser

1. Kernkraftwerk Leibstadt. «Pressebilder». 1. juni 2017. Internettadresse: www.kkl.ch/unternehmen/medien/pressebilder.html
2. Frankfurter Allgemeine. «Schweizer wollen Atomkraftwerke nicht schnell abschalten». 27. november 2016. Internettadresse: www.faz.net/aktuell/politik/ausland/volksabstimmung-schweizer-wollen-atomkraftwerke-nicht-schnell-abschalten-14547566.html
3. Power Reactor Information System PRIS, IAEA. Internettadresse: www.iaea.org/pris/
4. OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum. «Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems». (2014).
5. S. Buchholz med flere. «Safety and International Development of Small Modular Reactors (SMR) – A Study of GRS». *ATW – International Journal for Nuclear Power* (2015).
6. OECD. «The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle». NEA No. 7061 (2013).
7. Svensk Kärnbränslehantering AB. «Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark: Main report of the SR-Site project Volume III». *SKB Technical Report* (2011) TR-11-01.
8. Posiva. «Safety Case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Performance Assessment 2012». *Posiva Report 04* (2012).



Kreftbehandling med protonterapi og proton-CT

Partikkelterapi er en målrettet kreftbehandling som er under planlegging i Norge. Partikkelterapi setter store krav til nøyaktig diagnostikk – og i Bergen jobber en forskningsgruppe med å utvikle proton-tomografi, som vil bidra til en mer skånsom partikkelterapi.

Helge Egil Seime Pettersen Avdeling for kreftbehandling og medisinsk fysikk, Haukeland Universitetssykehus

Dieter Röhrich Institutt for Fysikk og Teknologi, UiB

Stråleterapi er en behandling som gis til om lag halvparten av alle kreftpasienter i Norge. Sykehus i Norge har tilbydd stråleterapi i form av høyenergetisk røntgen (og elektroner) siden Haukeland Sykehus fikk installert Odd Dahls van de Graaff-generator, også kjent som «Høyvolten», i 1942. Partiklenes vekselvirkninger ioniserer molekyler i pasienten, og de ladde molekylene («frie radikaler») kan brette opp DNA-strukturen i kreftcellene. God stråleterapi er å levere ioniserende stråling primært mot kreftsykdommen, og begrense uønsket bestråling av friskt vev.

De siste tiårene har det vært økning i bruk av protoner og tyngre ioner innen stråleterapi. Ideen om å bruke ioner stammer fra 1946, og mange eksperimentelle fysikklaboratorier har behandlet pasienter siden den gang. Første sykehus-baserte proton-senter ble bygget i 1990 ved Loma Linda utenfor Los Angeles i California. I dag finnes 69 sentre på verdensbasis, og over 140 000 pasienter har fått behandling med protoner og tyngre ioner. Sverige åpnet proton-senteret Skandionkliniken i Uppsala i 2015, og Dansk Center for Partikkelterapi i Aarhus satser på å behandle første pasient med protoner i 2018. I Norge utarbeider nå de fire helseregionene en plan for å bygge partikkelterapi.

Innen konvensjonell stråleterapi med høyenergetisk røntgenstråling leveres stråledose i en

eksponentielt fallende dosegradient gjennom pasienten: Det er den naturlige oppførselen til røntgenstråler som gradvis avsetter energi i vevet. Stråleterapeuter bestråler pasienten fra ulike vinkler: Da vil man oppnå et område i svulsten med høy dose, og et såkalt lavdose-bad til det friske vevet. I dag prøver en å erstatte røntgenbestråling med partikkelbestråling der det er mulig. Fordelen med partikkelterapi er at man begrenser strålebruken til det friske vevet, og reduserer risikoen for senskader. Figur 1 sammenlikner to behandlingsplaner, gitt med konvensjonell høyenergetisk røntgen og med protoner. Protonet er en positivt ladd partikkel med masse om lag som ett hydrogenatom på $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

Protonets dans mot svulsten

Under partikkelterapi bestråles pasienten med protoner (eller tyngre ioner) som gradvis bremses ned i vevet. Partiklene ioniserer molekyler i bein, fett og muskel: Jo lavere hastighet partiklene har, desto lengre tid har de på ioniseringsprosessen, og jo høyere er energitapet innover i vevet. Resultatet er et skarpt avgrenset område i svulsten med høy ioniseringskraft og dose, hvor alle protonene stopper helt opp. Effekten ble oppdaget i 1903 av W.H. Bragg, og høydose-området kalles for *Bragg peak* eller «Bragg-topp». Dypere enn Bragg-toppen avgis det praktisk talt ingen dose, siden primærstrålen har blitt bremsset ned (for tyngre ioner som karboner, derimot, kan prosjektilene brette opp i fragmenter med lengre rekkevidde, og da avgis det noe dose bak Bragg-toppen).

Denne prosessen er formulert i Bethe-likningen, som finner protonets stoppekraft S (her i ikke-relativistisk tilnærming):

$$S = \frac{4\pi n_e z^2}{m_e v^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I} \right],$$

Figur 1. To behandlingsplaner for å bestråle en svulst i lungen, rett under hjertet i lysegrått. Rød farge viser høy dose. *Venstre:* Konvensjonell stråleterapi med røntgen. Legg merke til «lavdose-badet» i lungene og hjertet. *Høyre:* Protonterapi: Protonstrålen stopper rett etter svulsten, og det blir gitt mindre dose til det omliggende friske vevet. Fra G.M. Engeseth ved Haukeland Universitetssykehus.

hvor n_e og I er henholdsvis vevets elektrontetthet og gjennomsnittlige ioniseringspotensiale. Videre er m_e elektronets masse, v og z er henholdsvis hastigheten og ladningen til prosjektilet, og e og ϵ_0 er konstantene for henholdsvis elektronladningen og vakuumpermittiviteten.

En av utfordringene innen partikkelterapi er å beregne hvordan man skal bestråle svulsten. Medisinske fysikere og doseplanleggere på sykehus må finne ikke bare den beste vinkelen å bestråle fra, men også hvilken energi partiklene må ha.

Vevets sammensetning

En protonstråle med en energi på 130 MeV stopper etter 13 cm i fett, 12 cm i muskel eller 7 cm i ben. Da er det viktig å vite hva som ligger mellom strålerøret og svulsten! En liten feilberegning kan føre til store mengder stråling til friskt vev, og en svulst som slipper unna. Skjelett kan komme inn i partikkelbanen ved pustebevegelser, pasienten kan ha gått ned en buksestørrelse siden doseplanen ble godkjent, eller svulsten kan ha krympet siden sist. Slike naturlige hendelser, som ikke endrer dose-nivået med mer enn få prosent under fotonterapi, spiller her en stor rolle.

For å kunne beregne nøyaktig hvor protonstrålen stopper i pasienten, trenger man et godt kart over protonets stoppekraft i pasienten. Protonets stoppekraft avhenger, i tillegg til energien, proporsjonalt av elektrontettheten og logaritmisk av ioniseringspotensialet i vevet. Det så vi gjennom den tidligere nevnte Bethe-likningen. Den er relativt enkel å beregne analytisk, men krever kjennskap til de to faktorene: Vanligvis leses ioniseringspotensialet ut fra en tabell: for bein, muskel, vann, luft, osv. Hvordan kan man så finne elektrontettheten? Magnetresonanstomografi (MRI) måler tettheten av protoner, mens røntgentomografi (eller røntgen-CT, forkortelse for *computed tomography*) måler dempningskoeffisienten for røntgenfotoner. Dempningskoeffisienten er den samlede effekten av fotoelektrisk absorpsjon, Rayleigh- og Compton-spredning, og signalet er sterkt avhengig av atomnummeret til materialet (røntgenfotoner har energier på mellom 20 og 140 keV).

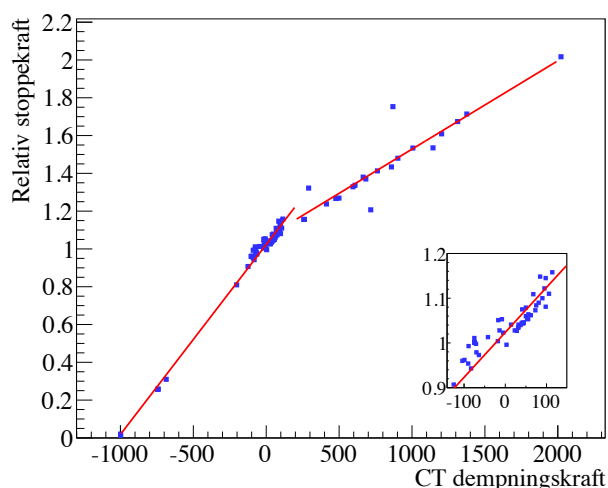
Røntgen-CT

En røntgen-CT fungerer ved å bestråle pasienten med en vifteformet røntgenstråle mens integrerende CMOS-detektorer måler den (varierende) gjenværende intensiteten strålen har etter å ha passert pasienten. Jo mer pasient, jo mindre gjenværende intensitet! Både detektor og røntgengenerator roterer rundt pasienten, og etter én rotasjon kan man danne et tynt snittbilde av pasienten (derav navnet tomografi, hvor greske *tomos* betyr «snitt»). Siden røntgenstråler følger rettlinjede baner blir bilderekonstruksjonen relativt enkel.

For å beregne protonets stoppekraft brukes slike snittbilder fra en røntgen-CT: En CT-skanner kalibreres til oppgaven ved å avbilde en 32 cm stor sylindrisk plastskive med ulike innsatser, alle i forskjellige tettheter og materialer med kjent elektrontetthet. Med Bethe-likningen kan man også beregne innsatsenes stoppekraft. Et slikt objekt kalles for et fantom, og er et vanlig verktøy for å karakterisere, kontrollere og kalibrere CT-maskiner. Ved å avbilde de ulike innsatsene kan man lage en kalibreringskurve mellom dempningskoeffisienten og stoppekraften. Dessverre har ikke denne kurven en enkel form, og det vanlig å anta at den består av stegvise rette linjer: Se Figur 2 for et eksempel på en slik kalibreringskurve. Merk at kurven bare gjelder maskinen (og innstillingen) den er kalibrert for, siden ulikheter i røntgenspektrum og detektorrespons kan påvirke kalibreringen.

Denne kalibreringskurven legges så inn i programvaren for behandlingsplanlegging, som omformer pasientens CT-bilder til stoppekraft, og rekkevidden til protoner kan beregnes enkelt. Resultatet av en slik kalibreringsprosess er en total usikkerhet i protonrekkevidden på 2–3 %.

Figur 2. Kalibreringskurven mellom protonets stoppekraft (relativ til vannets) og dempningskoeffisienten, dannet med målinger fra en røntgen-CT. Data fra U. Schneider et al., *Physics in Medicine and Biology* 41 (1):111 (1996).



Mesteparten av den usikkerheten kommer fra tabelloppslaget av ioniseringspotensialet.

Den kraftige gradienten til protonstrålen gjør at man i teorien kan bestråle volumer tett opptil kritiske organer som hjerte og synsnerve, men usikkerheten i protonrekkevidden krever økte *marginer*, det vil si at man øker området som bestråles slik at svulsten er garantert riktig stråledose selv med usikkerhet i beregningene. Det legger begrensninger på hvor tett opptil kritiske organer man kan behandle, og øker den totale dosen til friskt vev. En nøyaktig behandling krever nøyaktig diagnostikk!

Proton-CT

Ideen om å måle vevets sammensetning direkte med protoner har eksistert siden 50-tallet: Dersom en protonstråle har høy nok energi til å komme helt gjennom en pasient, er det også mulig å måle den gjenværende energien til protonene etter de har kommet ut igjen av pasienten. Da kan man regne ut den gjennomsnittlige stoppekraften langs den antatte protonbanen gjennom pasienten. Måler man mange nok ganger, og fra ulike vinkler, slik at de ulike protonbanene dekker hele pasienten kan man rekonstruere et nøyaktig volumkart over stoppekraften til pasienten. Nøyaktigheten øker drastisk i forhold til volumkartet som er beregnet fra røntgen-CT-bildene, og det blir mulig å redusere behandlingsmarginene og følgelig også pasientens senskader.

Et proton-CT opptak skjer separat fra selve strålebehandlingen, men siden protonene ikke stopper i pasienten, blir ikke stråledosen mye høyere enn fra en vanlig røntgen-CT: Bragg-toppen ender opp i detektoren.

I motsetning til de rettlinjede røntgenstrålene, vil protonene oppleve mange små avbøyninger i form av multippel Coulomb-spredning mens de flyr gjennom pasienten. For å rekonstruere den nå buede protonbanen må man måle posisjon og retning til hvert enkelt proton både før og etter pasienten. Dette krever et sett med posisjonsdetektorer med høy oppløsning og rask elektronikk. Energien til hvert enkelt proton må også måles, og flere detektorer er foreslått for denne oppgaven: Ulike typer scintillatorer, sammenkoblede ioniseringskamre og sporingskalorimetre.

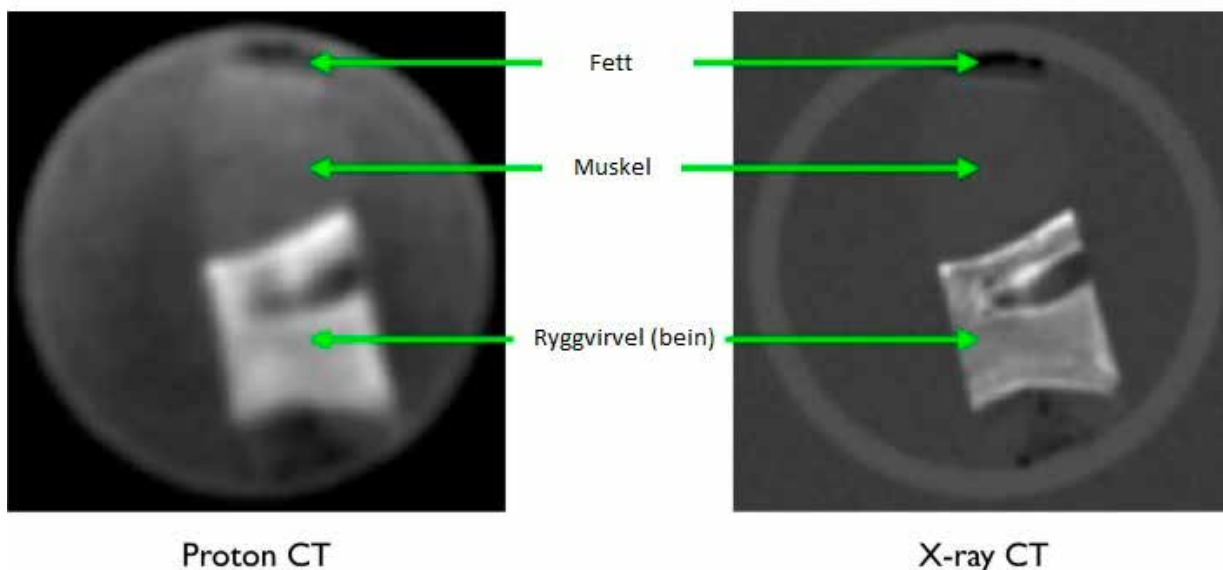
Flere forskningsgrupper har laget proton-CT-prototyper, og totalt har åtte ulike prototyper blitt konstruert på verdensbasis. Først ut var en gruppe ved Loma Linda, som i dag har publisert gode resultater for sin løsning. Den baserer seg på silisium-stripedetektorer for å spore protonene før og etter pasient, og en plastscintillator segmentert i dybden for å måle den gjenværende protonenergien etter pasienten. Se et eksempel på en rekonstruert lammekotelett i Figur 3.

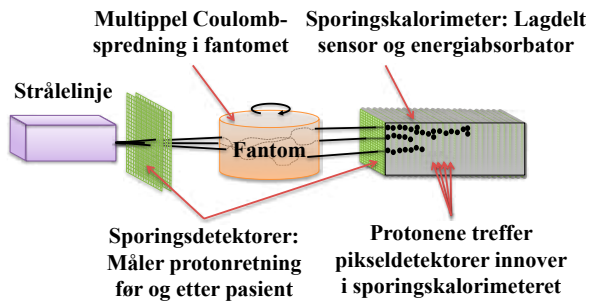
Proton-CT i Bergen

I Bergen foregår nå et samarbeidsprosjekt mellom UiB, Høgskulen på Vestlandet og Haukeland Universitetssykehus med mål om å utvikle et proton-CT-system basert på teknologi fra høyenergifysikk.

En lagdelt piksel-detektor som vist i Figur 4 skal kunne spore tusener av protonbaner samtidig. Den er basert på sampling-prinsippet, hvor partikler bremses ned ved hjelp av et absorbatormateriale mellom hvert sensorlag. Den ble opprinnelig utviklet som en prototype på et elektromagnetisk kalorimeter for å telle

Figur 3. Et proton-CT-bilde (venstre) og et konvensjonelt røntgen-CT-bilde (høyre) av en lammekotelett. Bilde: PRaVDA consortium.





Figur 4. Et tenkt oppsett for en proton-CT med sporingskalorimeter, som baserer seg på de forenklete eksperimentene som allerede er utført med det eksisterende sporingskalorimeteret.

partikler i foton- og elektrondusjer ved ALICE-eksperimentet ved CERN. Forskningsgruppen i Bergen ønsket å undersøke om sporingskalorimetre kan brukes i en proton-CT.

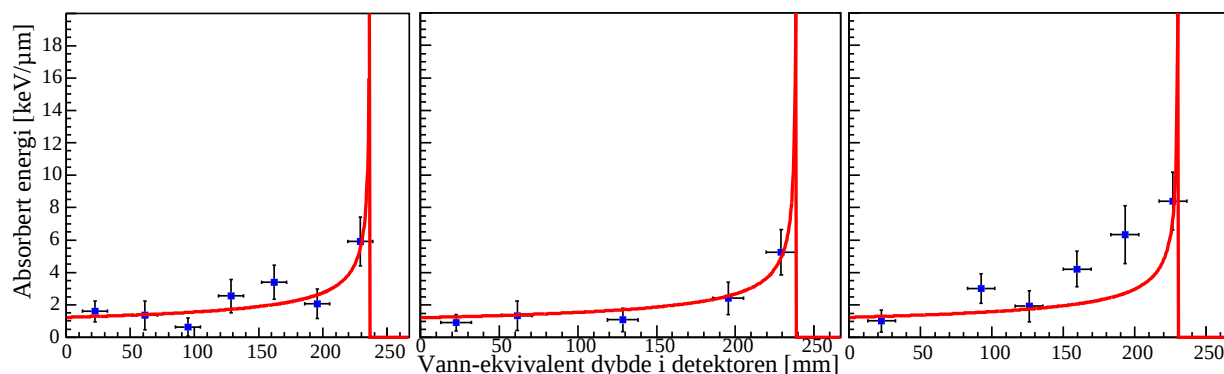
Ved å bruke data fra sporingskalorimeteret kan vi kombinere rekonstruksjon av samtidige protonbaner og modeller for protonets energiavsetning. Målet er å finne rekkevidden til hvert proton med høy nøyaktighet. Rekkevidden svarer til opprinnelig energi gjennom Bragg-Kleeman-forholdet

$$R [\text{cm}] \approx 0,022 E^{1,77},$$

hvor R er rekkevidden i vann og E er energi i MeV.

I Figur 5 vises energiavsetningen for én protonbane, som har blitt rekonstruert sammen med flere hundre andre protoner i én detektorutlesning. Gjennom studier av både eksperimentelle data målt ved KVI-CART i Groningen, Nederland og Monte Carlo-simuleringer, har vi funnet at prototypen på sporingskalorimeteret svarer til forventningene: En energioppløsning på 4 % av rekkevidden, samt muligheten for å måle 1 million protoner i sekundet.

Figur 5. Energiavsetningen til individuelle protonbaner, med forventet energi 188 MeV. Hvert datapunkt svarer til dybden hvor protonet har truffet et sensorlag. En modelltilpasning mot en forenklet Bethe-likning er vist ved den røde kurven: Det gir høyere rekkeviddenøyaktighet sammenliknet med å bruke dypeste «treff» i detektoren. Protonene stopper ved en synlig Bragg peak ved rundt 230 mm: Den dybden svarer til en opprinnelig energi på 187 MeV.



Veien mot klinikken

I den nære fremtid vil gruppen i Bergen samarbeide om å utvikle, konstruere og evaluere den neste prototypen av sporingskalorimeteret. Samarbeidet med ALICE fortsetter, og detektorbrikker fra ITS-detektoren skal bidra til at den neste prototypen får en meget hurtig og effektiv datautlesning og elektronikk. De ulike samarbeidspartnere er tildelt midler fra TOPPFORSK, Bergens forskningsstiftelse og Helse Vest, og ansetter flere doktor- og postdoktorstipendiater de neste årene med mål om å utvikle prototypen som et klinisk hjelpemiddel.

Når det første partikkelterapisenteret bygges i Norge (og kanskje Bergen) i løpet av de nærmeste årene, enten med protoner eller «fremtidsrettede» tyngre ioner, vil pasienten få tilgang til en skånsom, effektiv og utprøvd kreftbehandling. En proton-CT i behandlingsrommet vil øke treffsikkerheten til en allerede treffsikker behandling gjennom å redusere behovet for å «tippe» på pasientens vev.

Likevel – det er nesten umulig å si når nytt medisinsk utstyr når sitt endelige mål: Pasienten. ■

Videre lesning

1. G. Poludniowski, N.M. Allinson og P.M. Evans. «Proton Radiography and Tomography with Application to Proton Therapy». *The British Journal of Radiology* 88, no. 1053 (September 2015): 20150134. doi:10.1259/bjr.20150134.
2. H.E.S. Pettersen, J. Alme, A. Biegun, A. van den Brink, M. Chaar, D. Fehlker, I. Meric og andre. «Proton Tracking in a High-Granularity Digital Tracking Calorimeter for Proton CT Purposes». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 860C (2017): s. 51–61. doi:10.1016/j.nima.2017.02.007.

Nobelprisvinnar Raman skapte eit uunnverleg forskingsverktøy

I dag er ramanspektroskopi eit uunnverleg forskingsverktøy i mange greiner av naturvitskapen, like betydningsfull som bruk av røntgenstråling. Begge områda har fått namn etter oppdagaren av effekten, og begge oppdagarane har fått nobelpris i fysikk for innsatsen. Indaren C.V. Raman fekk fysikkprisen for 1930.

Emil J. Samuelsen Institutt for fysikk, NTNU

Chandrasekhara Venkata Raman vart fødd i 1888 som nummer to av i alt åtte barn i familien, i byen som i dag heiter Tiruchirappalli og ligg i den indiske staten Tamil Nadu. På den tida var India underlagt Storbritannia. Faren var gymnaslærer, og alt frå tidlege barneår synte den unge Chandrasekhara stor interesse for fysikk- og matematikkemne i faren sine skolebøker.

I 1902, 14 år gamal, vart han student ved Presidency College i Chennai (Madras) og tok studenteksamen i 1904, med medalje i faga fysikk og engelsk. Seinare vart det mastergraden ved same institusjon. Det heiter at han hadde god fagleg framgang og vart lagt merke til av professorane. Det er få som skriv vitskaplege avhandlingar alt som 18-åring, men det gjorde Raman, eit arbeid om lysdiffraksjon publisert i det britiske *Philosophical Magazine*. Mastergraden fekk han i 1907.

Så vart det ein 10-årsperiode at han var engasjert som tjenestemann i det Indiske Finansdepartementet med sete i Kolkata (Calcutta), men han dyrka fysikkinteressa på fritida, med betydelege arbeid knytt til akustikk i strengeinstrument og trommer. Det heiter at han gjennom det skapte nytt liv i organisasjonen Indian Association for Cultivation of Science (IACS), der han også heldt offentlege forelesingar om fysikkemne.

Denne innsatsen gjorde han kjend i vitskaplege kretsar i byen, og i 1917 vart han kalla til Palit

Professor i fysikk ved Universitetet i Calcutta. 100-årsjubileum for denne viktige hendinga i Ramans liv kan altså markerast i år, og den stillinga er bakgrunnen for at han 11 år seinare kunne publisere dei viktige arbeida som førte til nobelprisen i fysikk i 1930.

Akustikk og optikk

Raman si forskingsinteresse i den nye stillinga var knytt til lyd og akustikk, og til lys og optikk. Han hadde kontakt med lord Rayleigh (John William Strutt), som mellom anna hadde forklart blåfargen på himmelen ved at dei korte bølglengdene av lyset (som blått) blir spreidd meir enn dei lange (som raudt), ein prosess som blir kalla *Rayleigh-spreiing*. Rayleigh meinte også at overflater av vatn i havet fekk fargen sin berre som ei avspegling av himmelen. Det blir fortalt at på ei båtreise på Middelhavet til og frå England i 1921 studerte Raman desse fenomena frå skipet, og det inspirerte han til å konsentrere seg om lysspreiingsfenomenet i større detalj i laboratoriet i Calcutta, noko som førte til påvisinga av fenomenet som fekk namnet *Raman-spreiing*. Raman-spreiinga skil seg frå Rayleigh-spreiinga ved at ein observerer at bølglengda blir endra. I dag uttrykker vi det ved å seie at Rayleigh-spreiing skjer utan energiutveksling og er såleis *elastisk*, mens Raman-spreiinga er ein *uelastisk* prosess.

Dei nytta lys som var omtrent einsfarga (monokromatisk) ved hjelp av filter. Først brukte dei sola som lyskjelde; seinare vart kvikksølvlamper tatt i bruk. Spreiing frå gassar, væsker og faste stoff vart systematisk studert, og indikasjonane på fargeendringar vart registrert alt i 1921–1922. Ein hovudsamarbeidspartnar var Kariamanickam Srinivasa Krishnan.

Fargeendringa i spreingsprosessen kunne minne om fluorescens og effekten vart derfor for ei tid kalla *feeble fluorescence* («svak fluorescens» på norsk), jamvel om det spreidde lyset var observert å vere polarisert, og det passa ikkje på fluorescens. Men i samband med at Arthur Compton fekk nobelprisen i fysikk for 1927 for oppdaginga av den såkalla *Compton-effekten* i røntgenspreiing, vart Raman inspirert til å vurdere ein tilsvarande mekanisme for den nyoppdaga effekten. Compton-effekten inneber at bølglengda for røntgenstråling blir endra ved uelastisk kollisjon mellom røntgenkvanta og elektronsystemet i strålemålet.

Det store observasjonsmaterialet dei hadde, mellom anna data frå over 80 ulike væsker og frå

Figur 1. Chandrasekhara Venkata Raman. Bilde: Wikipedia commons



gassar som CO_2 og N_2O og nokre faste stoff som is og glass, vart analysert av Raman og Krishnan i lys av denne nye idéen, og konklusjonen var at dei hadde å gjere med eit nytt spreingsfenomen [1][2].

Faktisk vart sjølve verifiseringa av Raman-effekten tillagt ein bestemt dato: 28. februar 1928, og 28. februar blir no feira kvart år som ein National Science Day i India.

Nobelprisen

Påvisinga av Raman-effekten var ei viktig vitenskapleg nyvinning på slutten av 1920-åra, perioden då dei kvantefysiske begrepa vart formulerte, for effekten kan tolkast som ein kvantefysisk manifestasjon. Oppdaginga fortjente klart ein nobelpris.

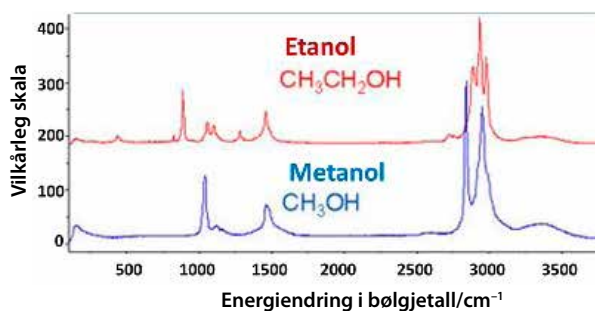
Det heiter at Raman venta i spenning på nobelkunjeringane i 1928 og 1929, til han altså vart tildelt prisen i 1930.

Denne tildelinga, som mange andre nobelpristildelingar gjennom åra, var ikkje fri for kontroversar. Kritikken gjaldt tre omstende: Mange meinte at prisen burde ha vore delt med samarbeidspartnaren i Calcutta, K.S. Krishnan, ettersom han var hovudpersonen bak det eksperimentelle arbeidet og sentral i analysen. Vidare vart det kritisert at ikkje austerrikaren Adolf Smekal var inne i bildet. Han hadde publisert eit teoretisk arbeid alt i 1923 som føresa effekten [3], og i tyskspråkleg litteratur vart effekten i mange år kalla *Smekal-Raman-effekten*. Men truleg var Raman ikkje kjent med arbeidet, og artikkelen til Smekal er dessutan forfatta i ein særst tunglesen tysk språkdrakt.

I juli 1928 publiserte russarane G. Landsberg og L. Mandelstam eit arbeid [4] om uelastisk spreining av lys frå krystallinsk kvarts, og hadde med det i realiteten påvist Raman-effekt frå krystallinsk stoff samtidig med Raman sitt arbeid. I sovjetisk litteratur vart effekten lenge kalla *kombinasjonsspreiing*.

Raman-effekten

Uelastisk spreining av lys blir rekna som ei manifestering av ein kvanteeffekt. Kvantemekanisk beskriv ein lys som ein straum av lyskvanta kalla *foton*, som kan vekselverke med vibrasjonskvanta i materialet. Lysstrålen kan enten overta energien i vibrasjonskvantet og såleis auke energien til kortare bølgjelengd, eller lysstrålen kan skape ein ny vibrasjon i materialet og ved det tape energi og få lengre bølgjelengd. Ved å måle energiforandringa kan ein såleis *observere* ener-



Figur 2. Raman-spektra for flytande etanol og metanol. Kvar spektrallinje svarar til vibrasjon i bindingane mellom atoma. Til dømes svarar signala rundt 3000 cm⁻¹ til C-H-vibrasjonar. Figuren illustrerer likskapar og ulikskapar mellom dei to alkoholane. Vertikal skala er vilkårleg, horisontal skala er cm⁻¹.

gien til den aktuelle vibrasjonen. Figur 2 viser Raman-spektret frå flytande metanol og etanol. Energiskalaen er gitt som differanse mellom inverse av innsendt bølgjelengd og spreidd bølgjelengd, $(1/\lambda_{\text{inn}} - 1/\lambda_{\text{spr}})$, i einingar cm⁻¹ som er vanleg i spektroskopi: $1 \text{ cm}^{-1} = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ eV} = 1,986 \cdot 10^{-23} \text{ J}$.

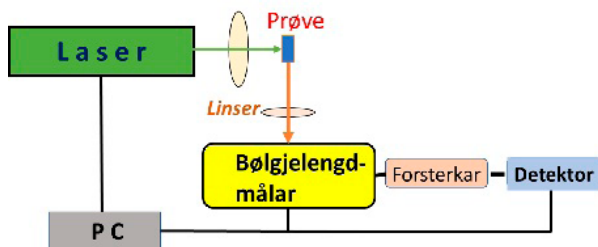
Raman-effekten er generelt sett ein heller veik effekt, der berre 10^{-4} – 10^{-6} av det innsendte lyset blir spreidd som Raman-signal. Derfor var effekten først mest eit kuriosum heller enn til noko nyttig, jamvel om det alt i 1930-åra vart gjort forsøkt å kartlegge molekylære vibrasjonsfrekvensar i enkelte materiale basert på Raman-målingar. På 1940-tallet vart infraraud absorpsjonsspektroskopi utvikla, som dels kan gi tilsvarende informasjon.

Men etter 1960-tallet fekk Raman-studiar ny vind i segla ved framkomsten av laseren, som fort viste seg å vere den ideelle lyskjelda for Raman-effekten. Raman-spektroskopi er derfor i dag eit særst utbreitt og uunnverleg forskingsverktøy på omtrent alle område av materialforskning.

Raman-spektroskopi

Fordelen med laserar som lyskjelde er betydeleg. Laseren har fleire faste og godt monokromatiske spektrallinjer, som kan veljast etter behov. Lyset er godt einsretta, og er ofte også polarisert, noko som gir tilleggsinformasjon om prøva. Enkelte moderne laserar finst også der bølgjelengda er kontinuerleg justerbar.

Prinsippet for Raman-spektrometer er vist i Figur 3. Monokromatisk laserlys blir fokusert med linser inn på prøva, og spreidd lys, ved for eksempel 90 gradars vinkel, blir sendt inn i ein bølgjelengdmålar. Her blir lyset analysert med omsyn på bølgjelengda ved hjelp av optiske gitter, og signala sendt mot detektoren, som blir styrt



Figur 3. Prinsipp for Raman-spektrometer.

frå ein PC, og data som Figur 2 blir resultatet. Det er eit viktig poeng at vanleg glass kan nyttast i Raman-utstyr. For eksempel blir væskeprøver studert i glasskyvetar.

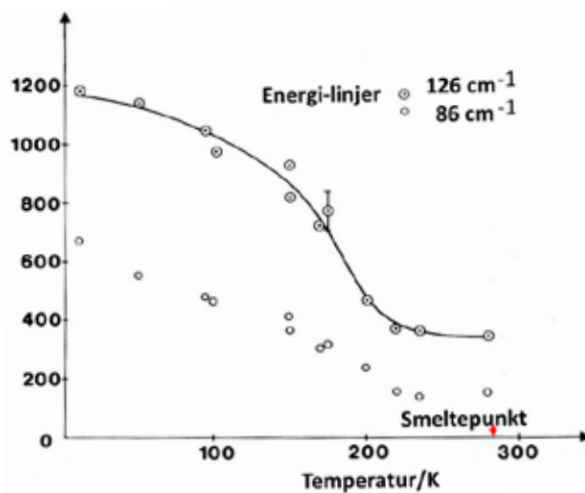
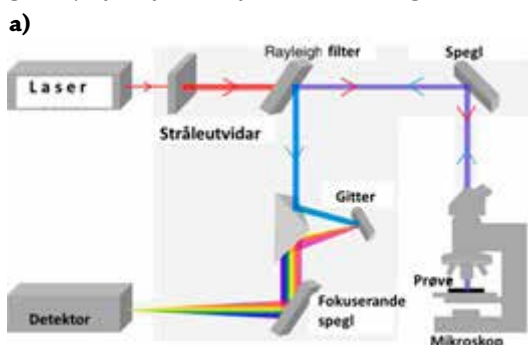
Raman-målingar er kjenneteikna ved at dei i dei fleste tilfelle ikkje krev omstendelige prøveprepareringar. For einkrystallinsk materiale er likevel orienteringa av prøva av betydning. For slike prøver kan polarisasjonen av laserstrålen, både inn og ut, gi tilleggsmålingar om symmetrien til dei eksitasjonane ein studerer.

Materialforskning

I løpet av åra har Raman-spekter blitt målt og katalogisert for titusentvis av ulike stoff, noko som har gjort Raman-spektroskopi til eit uunnverleg hjelpemiddel for identifisering og påvising av stoffsamansetning. Les lenger framme om mikroskopi basert på dette. For organiske materiale kan jamvel molekylgrupper identifiserast utifrå sine karakteristiske vibrasjonsfrekvensar, slik som $-\text{CH}_3$, $-\text{OH}$ og andre. Dette aspektet har lenge representert den mest utbreidde nytta av Raman-spektroskopi.

Men også molekylvibrasjonane i seg sjølv er ofte av betydeleg interesse å studere, og likeeins gittervibrasjonane for krystallinsk materiale. Også eksitasjonar i elektronsystemet og magnetiske eksitasjonar (spinnbølgjer) blir studert med Raman-spektroskopi. Lydbølgjer og lydfart kan likeeins bli studert med uelastisk lysspreiing, men dei krev ein noko annan teknikk fordi bølgjelengdeendringane blir ekstremt små for dette tilfellet. Teknikken her går under namnet Brillouin-spektroskopi.

Figur 5. a) Raman-mikroskop, prinsipp. b) Raman-mikroskopbilde av polymerblanding. Fargekoder: raudt: polystyrén (PS); grønt: polymetylmetakrylat (PMMA). Fargene er kodar, ikkje reelle. Feltet dekker $50 \mu \times 50 \mu$. (Etter WITec, Ulm)



Figur 4. Observert intensitet mot temperatur av to Raman-linjer for fast maursyre ved temperaturar under smeltepunktet [5]. Skalaen på vertikal akse er vilkårlig.

Materiale kan studerast ved varierende temperatur ved hjelp av kryostatlar og omnar, og ved varierende trykk ved trykkceller, og slik kan interessante fysiske fenomen som vibrasjonseffektar og faseforandringar følgjast i detalj. Som eit eksempel er temperaturavhengig signalstyrke for to Raman-linjer for fast maursyre (HCOOH) vist i Figur 4. Signalet avtar sterkt og flatar ut før smeltepunktet ved $8 \text{ }^\circ\text{C}$ (281 K), ei form for det som på engelsk blir kalla *premelting* («før-smelting», som inneber ein gradvis overgang frå krystallinsk til flytande fase) [5]. Målingane er utførte i kryostat.

At vindauga i trykkceller, omn og kryostat kan vere av glass eller kvarts, er ein stor fordel ved materialstudia. Eit slåande aktuelt eksempel [6] er studiet av muleg overgang frå molekylært til metallisk hydrogen under ultrahøge trykk. Her blir prosessen fulgt med Raman-spektroskopi gjennom trykkcella som er av kvarts.

Raman-mikroskopi

Prinsippsskisse av eit Raman-mikroskop er vist i Figur 5. Prøva er plassert på prøveposisjonen i eit optisk mikroskop. Laserstrålen går via ein spegl inn i mikroskopet, og tilbakespreidd lys går



same banen tilbake (180°-spreiing) og blir sendt ved hjelp av spegelen kalla Rayleigh-filter til det optiske gitteret som måler bølgjelengdene. Mikroskopeffekten kjem fram ved at det optiske gitteret blir stilla på ein gitt Raman-linje (jfr. Figur 2), og så blir prøva scanna sidevegs i prøveplanet mens styrken av linja blir registrert i detektoren. Dette blir gjentatt for alle Raman-linjene, og slik får ein fram bilde av fordelinga av ulike materiale i prøva.

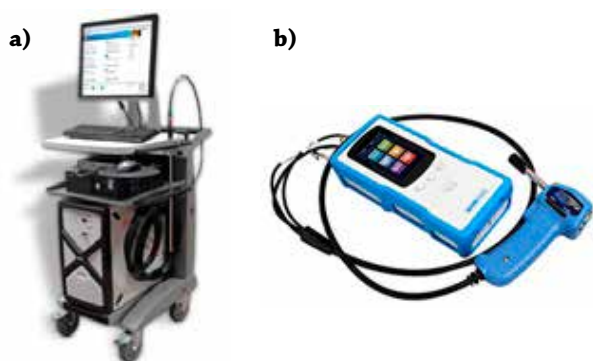
Fleire bruksområde

Den varianten som kan kallast «ordinær» Raman-spektroskopi er ikkje avhengig av kva for laserbølgjelengd ein nyttar, for det er berre bølgjelengdeendringane som tel. Men har prøva farge som er komplementær til fargen på laserlyset, kan lyset bli absorbert så mykje at prøva blir oppvarma eller også øydelagt.

Sterk absorpsjon kan vidare føre til forstyrrende fluorescensstråling frå prøva. I somme tilfelle kan studium under slike forhold likevel utnyttast, og går då under namnet *Resonans-Raman*, som kan vere nyttig ved studium av små materialmengder eller låge konsentrasjonar, til dømes av protein og andre makromolekyl. Metoden krev laserar med justerbar bølgjelengd.

Raman-spektroskopi kan også nyttast for studium av overflater. Prøvematerialet deponert på substrat av edelmetalla gull, sølv og koppar gir ofte mange tusen gongs forsterking av signalet, og metoden blir kalla *Surface Enhanced Raman Spectroscopy* (SERS). I slekt med SERS er *Tip-enhanced Raman Spectroscopy* (TERS), der særsmå prøvemengder plassert på spissen av metallnåler blir studert.

Enkelte Raman-metodar nyttar seg av *to* laserstrålar, til dømes *Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy* (CARS) der *to* laserstrålar blir fin-



Figur 6. a) Foto av eit moderne Raman-system av merket Kaiser Optical System. b) Foto av berbart Raman-utstyr for feltmålingar.

innstilt sånn at resonanseffekt gir betydeleg signalforsterking.

Om fleire spesialbruksområde av Raman-effekten kan ein lese i referanse [7].

Store og små instrument

Med store og robuste gasslaserar som strålekjelder, er instrumenteringa plasskrevande, og kan slik jamførast med større røntgenanlegg.

Men det er også utvikla mini- og mikroanlegg, til dømes for å kunne nyttast som feltinstrument. I Figur 6 viser vi foto av eit kompakt, flyttbart kommersielt Raman-system og eit handhalde instrument.

Nobelprisar i fysikk til India

Europeiske og nord-amerikanske vitskapsfolk har fått mesteparten av dei 110 nobelprisane i fysikk som har blitt gitt sidan den første tildelinga i 1901. Indiske forskarar har fått «to og ein halv»: I 1930 til C.V. Raman for oppdagelsen av Raman-effekten, og i 1990 til S. Chandrasekhar (1910–1995) for ein modell for utviklinga av stjerner. Mange meiner at S.N. Bose (1894–1974) også fortjente nobelpris for utviklinga av statistikk for partiklar med heiltallig spinn, kalla *boson* etter han. Han var foreslått fire gonger rundt 1960, men nådde altså ikkje opp. Både Bose og Raman sin innsats har sett varige spor i utviklinga av moderne naturvitskap. ■

Referansar

1. C.V. Raman. «A new radiation». *Indian Journal of Physics* 2 (1928) s. 368–398.
2. C.V. Raman og K.S. Krishnan. «A new Type of Secondary Radiation». *Nature* 121 (1928) s. 501–502.
3. A. Smekal. «Zur Quantentheorie der Dispersion». *Die Naturwissenschaften* 11 nr. 43 (1923) s. 873–875.
4. G. Landsberg og L. Mandelstam. «Eine neue Erscheinung bei der Lichtzerstreuung in Kristallen». *Die Naturwissenschaften* 16 nr. 28 (1928) s. 557–558.
5. J. Grip og E.J. Samuelsen. «Raman Spectroscopic Search for Phase Transition in Solid Formic Acid». *Physica Scripta* 24 (1981) s. 52–56.
6. M.I. Eremets og I.A. Troyan. «Conductive dense hydrogen». *Nature Materials* 10 (2011) s. 927–931; R.P. Dias og I.F. Silvera. «Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen». *Science* 10.1126/science.aal 159 (2017).
7. P. Vanderabeele. *Practical Raman Spectroscopy*. Wiley Ltd (2013); Engelsk Wikipedia: «Raman spectroscopy».



Litt om fargesynets fysikk

Det har kommet briller som skal gi oss med fargesynsdefekter fargene tilbake. Er det mulig? For å kunne svare på det spørsmålet, la oss ta et gjensyn med fargefysikk, fargepersepsjon og hvordan fargesynet kan testes.

Per Thorvaldsen Institutt for elektrofag, Høgskulen på Vestlandet

«Gutten er fargeblind». Dr. Ellingsen ser megetsigende på min mor. Selv prøver jeg fortvilt å se mønstre i de fargede prikkene foran meg. Jeg feiler fullstendig i Ishiharas test for fargeblindhet. Vi går hjemover og plukker blomster på veien. «Men mor, jeg ser jo farger». «Selvfølgelig! Du ser bare fargene litt annerledes enn de fleste andre. Bare gled deg over det du ser».

Hvorfor velger jeg nå femti år etter å stå frem med dette lille handikappet? Fordi defekten til slutt har gjort meg så nysgjerrig at jeg har prøvd å forstå mer om farger og fargesvekkelse. Når farger blir tema kommer det ofte fram kvasipsykologiske utsagn som at de er subjektive og ferdig med det. Heldigvis vet vi mye mer enn som så.

Ferden inn i fargenes fantastiske verden, startet med et nyhetsoppslag [1] om briller som skulle gi en bedre fargesyn. Det ville være for godt til å være sant. Da prisen på brillene var stiv, var det nok best å undersøke om dette kan være mulig. Ned fra hyllene kom Arne Valbergs *Lys Syn Farge* [2] og Arnt Inge Vistnes *Svingninger og bølger* [3], for å fylle kunnskapshullet med farge.

Figur 1. Absorpsjonsområdene for de tre tappene S, M og L. Vistnes [3] s. 300.

Fargesyn

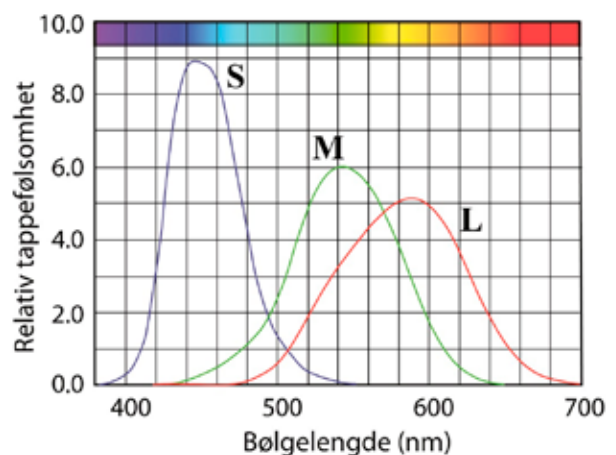
Synet er det viktigste sansorganet. 60 % av alle fibre fra et sansorgan til hjernen kommer fra øyet. I hjernebarken finnes det omtrent 800 000 nerveceller i hørselssenteret, mens det er omtrent 500 millioner i synssenteret. På øyets netthinne finnes det omtrent 100 millioner staver som skjelner mellom lys og mørke og seks millioner tapper som gjør at vi kan se farger. Stavene og tappene er celler som inneholder spesielle proteiner som oppfører seg som antenner og omsetter energien fra lyset til elektriske signaler som blir bearbeidet og sendt til hjernen.

En normalt seende har tre forskjellige typer tapper. De kalles *S* (Shortwave), *M* (Medium-wave) og *L* (Longwave), basert på bølgeområdet de er best til å absorbere lys på. *S* har maksimal absorpsjon av monokromatisk lys i det fiolette området, *M* i det gul-grønne og *L* i det oransje. Fargen en ser er summen av bidragene fra de tre ulike tappene basert på det lyset som kommer inn i øyet. Da denne summen kan bli lik for ulikt lys som kommer inn, kan en spesifikk fargeopplevelse produseres på mange ulike vis. Ulempen med det er at en ikke kan vite sammensetningen av lyset som når øyet, men det kan også brukes til vår fordel. Skjermen du leser på bruker f.eks. tre farger til å gjenskape en hvilken som helst farge.

Tappe-energiabsorpsjonen i for eksempel *M*-type tapper er gitt ved

$$M = K_M \int \varphi(\lambda) M(\lambda) d\lambda,$$

der $\varphi(\lambda)$ er den spektrale intensitetsfordelingen i det innkommende lys, og $M(\lambda)$ er den spektrale energifølsomheten for *M*-type tapper som angitt av *M*-kurven i Figur 1 og K_M en konstant. Dersom en for eksempel utsetter øyet for monokromatisk lys (bare en bølgelengde) på 570 nm pluss 420 nm vil det gi omtrent samme stimuli til de tre tappetyperne som om en heller bruker monokromatisk lys med 660, 500 og 410 nm. En må bare sørge for at



$$\begin{aligned}
M &= K_M [\varphi_1(570) M(570) + \varphi_1(420) M(420)] \\
&= K_M [\varphi_2(660) M(660) + \varphi_2(500) M(500) \\
&\quad + \varphi_2(410) M(410)],
\end{aligned}$$

og tilsvarende for de andre tappene L og S . Man får tre ligninger for henholdsvis S , M og L med tre ukjente, $\varphi_2(660)$, $\varphi_2(500)$ og $\varphi_2(410)$, når en antar at φ_1 er kjent. Denne vår manglende evne til å være et godt spektrometer kalles metameri. Det er årsaken til at vårt fargeinntrykk endrer seg med belysningen, og det blir benyttet til fulle i butikker for å få tomater til å fremstå som mer røde og andre ting mer innbydende enn de egentlig er. Totalt sett sendes følgende videre til prosessering til andre celler i øyet og hjernen:

$$\begin{aligned}
L &= K_L \int \varphi(\lambda) L(\lambda) d\lambda, \\
M &= K_M \int \varphi(\lambda) M(\lambda) d\lambda, \\
S &= K_S \int \varphi(\lambda) S(\lambda) d\lambda.
\end{aligned}$$

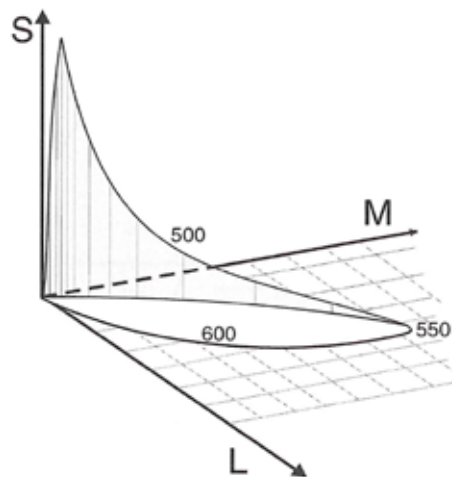
En kan tenke seg at S , M og L utspenner et tredimensjonalt fargeunivers, hvor en spesifikk farge er gitt som et punkt i rommet. Dette punktets plassering er bestemt av hvor mye henholdsvis S , M og L absorberer av det lyset som treffer øyet.

Figur 2 viser hvor monokromatisk lys havner i S , M og L rommet. I tillegg er projeksjonen ned i M og L planet gitt. Denne projeksjonen viser energiabsorpsjonen en som mangler S -type tapper vil ha. Dersom lys som treffer øyet, har en spektralfordeling forskjellig fra rent monokromatisk, vil en havne på det punkt i dette tredimensjonale rommet som gitt av energiabsorpsjonene i de tre tappene S , M og L .

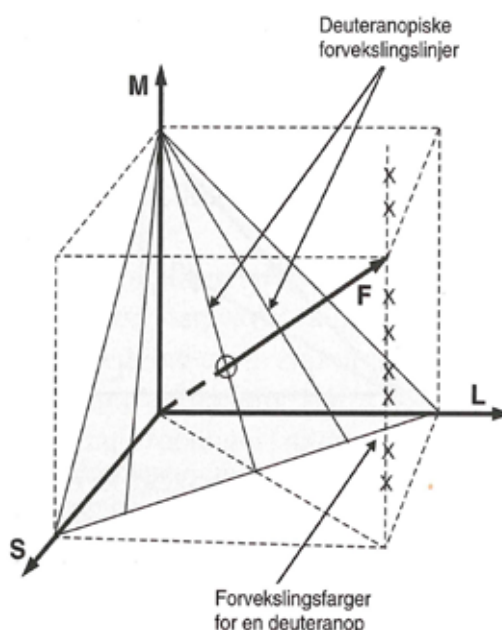
Det må rettes en liten advarsel her. Dette er en forenklet framstilling av fargesyn, men det er jo bedre med en forenklet forståelse enn ingen. Dersom en ønsker å gå mer i dybden, er referansene et godt sted å begynne.

Fargesvekkelse

Hvilke typer fargesvekkelse har vi? En person som bare har staver eller staver og en tappetype kalles for monokromat. Har en bare staver har man intet fargesyn, men med en tappetype i tillegg til staver har man et rudimentært fargesyn. Statistisk finnes det ca. 100 monokromater i Norge og det betyr at denne formen for svekket fargesyn er meget sjelden. Dikromater har to intakte tappetyper og det er den mest utbredte fargesynsdefekt. Den mest vanlige typen er såkalt «rød-grønn defekt». Hvorfor? Vel, da må en ta en titt på genene. Koden for de fiolette tappene S ligger langt unna koden for gul-grønne M og oransje L . Det gjør S mer robust mot mulige feil, mens M og L som ligger nær hverandre er mer utsatt for feil [4]. Hvorfor



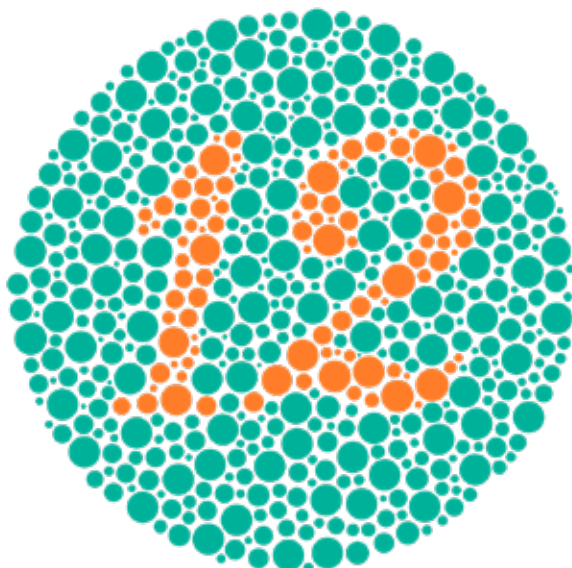
Figur 2. Linjen monokromatisk lys følger i S , M og L universet når lyset varieres gjennom det synlige spekter. Valberg [2] s. 160.



Figur 3. For en med «rød-grønn defekt» som mangler M -type tapper (Deuteranop) blir fargeuniverset utspent av S - og L -type tappene. Valberg [2] s. 186.

det er slik antar en skyldes evolusjon. Evnen til å skille mellom natt og dag og se blått var viktig tidlig i evolusjonsprosessen mens evne til å skille mellom rødt og grønt ble fordelaktig senere i utviklingen. Dette skulle Darwin ha visst da han med forundring i sin bok *Artenes opprinnelse* prøvde å forstå hvordan øyet som var et slikt perfekt organ, kunne utvikle seg fra noe enklere.

Dersom en har «rød-grønn defekt», vil det tredimensjonale S , M og L universet kollapse og bli todimensjonalt. Dersom en f.eks. mangler M -type tapper vil alle fargene i rommet bli projisert ned i S - og L -planet, se Figur 3, og alle de ulike fargene en med normalt fargesyn har ved å gå fra et punkt i S - og L -planet og utover i



Figur 4. Første Ishihara plansje som viser tallet 12. Wikipedia [5].

M -retning vil bli forvekslet av en med «rød-grønn defekt». Tyttebærtur er ingen favorittøvelse for en med «rød-grønn defekt».

Ta testene og prøv brillene

Har du en fargedefekt? Det er bare å finne frem Ishihara testen på hjemmesiden til produsenten av brillene (enchroma.com) som skal gi fargesynet tilbake. Det kan være lurt å ta testen på en del ulike skjermer. Min erfaring er at resultatene kan variere fra skjerm til skjerm. Har du for eksempel en «rød-grønn defekt» kan du først få påstanden om at det er M -type tappene som er svekket, mens du neste gang foran en annen datamaskin får vite at det L -type tappene som er problemet. Det er ikke du som er problemet, utfordringen er ulik fargegjengivelse på skjermer.

Ønsker du å gå grundigere til verks, kan du ta Ishihara-testen i papirvarianten. Der får du en rekke plansjer hvor du skal gjenkjenne mønstre, for eksempel tall, i prikker basert på farger og kontraster, vist i Figur 4. Testen gir en god indikasjon på om du er fargeutfordret og hvilken defekt du eventuelt har.

Det er også mulig å oppsøke forskningsmiljø i Norge og utsettes for enda bedre tester. Prøv å få tilgang til et anomaloskop. Det ser ut som et mikroskop og når du titter i det ser du to halvdel. Den ene halvdel er belyst med ulike kombinasjoner av spektralfarger i det rødgrønne området. Så skal en gul spektralfarge i den andre halvdel varieres i intensitet til du får lik farge i begge halvdel. Det er din metameri i det rødgrønne området som testes. Dersom du har defekter i enten M - eller L -type tappene, så vil dine valg av intensitet i den gule spektralfargen avsløre hvor problemet ligger.

Det må medgis at disse testene er slitsomme. Ta derfor en spyttprøve i tillegg slik at en kan se om det er samsvar mellom fargetestenes resultater og det som ligger i genene. I så tilfelle vil det bli vesentlig behageligere i fremtiden å få konstatert hvilken type fargedefekt en har, bare basert på en gentest alene.

Selv reiste jeg til Nasjonalt senter for optikk i Kongsberg og ble utsatt for en rekke tester hvor jeg feilet med stor suksess. Konklusjonen deres var at L -type tappene enten var fullstendig fraværende eller godt svekket.

Så var det brillene som skal gi fargesynet tilbake. Hvordan fungerer de? De tar hensyn til det faktum at maksimum for M - og L -type tappene er nærmere for dem med en «rød-grønn defekt» enn for de med normalt fargesyn. Brillene har et båndstoppfilter (notch-filter) i frekvensområdet mellom M og L som filtrerer bort deler av det innkommende spektrum, og på den måten gjør de M - og L -type tappenes energiabsorpsjon litt mer uavhengig enn de ellers ville vært for en med «rød-grønn defekt». Tanken er at det kan gjøre fargeopplevelsen for en med en «rød-grønn defekt» større [6]. Virker de? Etter å ha båret dem i ukesvis og brukt mye kvalitetstid i Musehagen i Bergen var resultatet nedslående. Jeg er fremdeles i mitt eget univers. Så kom gentesten. Fullstendig mangel av L -type tapper, og dermed er brillene fullstendig bortkastet for meg. Det er ikke mulig å gjenskape noe som ikke er der, men kanskje andre med litt mer intakte tapper kan ha glede av dem? Til høsten kommer det nye studenter. ■

Referanser

1. Science Alert. «Watch a Colour Blind Guy Freak Out When He Sees Full Colour For The First Time». 21. juli 2015. Internettadresse: www.sciencealert.com/watch-a-colourblind-guy-freak-out-when-he-sees-colour-for-the-first-time
2. A. Valberg (1998). *Lys Syn Farge*. Trondheim: Tapir forlag.
3. A.I. Vistnes (2016). *Svingninger og bølger*. Eget forlag. <http://folk.uio.no/arntvi/SBFbok.html>
4. J. Neitz & M. Neitz (2011). «The genetics of normal and defective color vision». *Vision Research* 51, s. 633–651.
5. Wikipedia. «Ishihara test». 2. juli 2017. Internettadresse: http://en.wikipedia.org/wiki/Ishihara_test
6. Google Patents. «Multi-band color vision filters and method by lp-optimization». 13. juli 2017. Internettadresse: www.google.com/patents/US20140233105

Konflikt mellom den kosmiske bakgrunnsstrålingen og Wiens forskyvningslov?

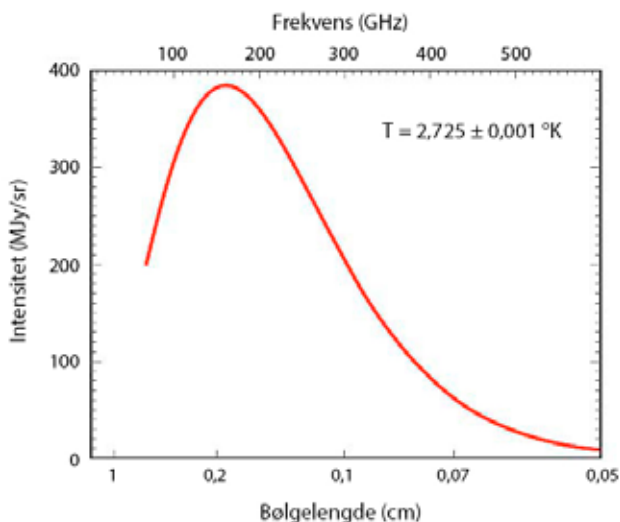
Spekteret til den kosmiske mikrobølgestrålingen målt av COBE-satellitten, ser ikke ut til å stemme med Wiens forskyvningslov. Når bølgelengden der den kosmiske mikrobølgestrålingen har størst intensitet beregnes ved å sette den deriverte av intensiteten lik null i Planck-fordelingen, er resultatet avhengig av om Planck-fordelingen gis som funksjon av frekvens eller bølgelengde. Bare i siste tilfelle stemmer resultatet med Wiens forskyvningslov. Her forklares hvilken sammenheng denne forskjellen har med måleprosedyrene.

Claus-Dieter Abert Lektor i fysikk ved Nes vgs., Årnes

Ofta finner man spekteret til den kosmiske mikrobølgebakgrunnsstrålingen slik det er målt med FIRAS-eksperimentet (Far IR Absolute Spectrophotometer) i satellitten COBE (COsmic Background Explorer) og presentert på deres hjemmeside [1], vist i Figur 1. Dette har til hensikt å vise blant annet at temperaturen i kosmos i dag er ganske nøyaktig 2,725 K med små variasjoner i ulike retninger.

Maksimum på Planck-kurven for COBE-spekteret i Figur 1 ligger ved ca. 1,87 mm. Men etter Wiens forskyvningslov forventes et maksi-

Figur 1. Denne figuren viser energispektret for den kosmiske mikrobølgebakgrunnen som følger av teorien fra Big Bang sammenlignet med det observerte energispektret. Måleseriene ble gjort av strålingsstyrken per frekvensenhet (I_f), ikke (I_λ) som er et intervall per bølgelengdeenhet. FIRAS-eksperimentet har målt spektret på 34 punkter med like store avstander mellom punktene langs strålingskurven for et svart legeme. Feilgrensene for de ulike punktene er så små at de ikke er synlige i forhold til den forventede kurven!



mum for strålingstettheten for et sort legeme med temperatur $T = 2,725$ K ved:

$$\lambda_{\text{topp}} T = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ mK},$$

$$\lambda_{\text{topp}} = \frac{2,90 \cdot 10^{-3} \text{ mK}}{2,725 \text{ K}} = 1,064 \text{ mm.} \quad (1)$$

Det ser ut til å være en konflikt mellom COBE-spekteret og Wiens forskyvningslov.

Planck-spekteret og Wiens forskyvningslov

Tidlig på 1900-tallet utledet Max Planck sin strålingsfordeling for hulrom med vegger i termodynamisk likevekt eller sorte legemer med absolutt temperatur T ut fra Rayleigh-Jeans-loven, Boltzmann-fordelingen og sin nye kvantehypotese $E_{\text{foton}} = hf$. Det førte til Plancks strålingslov på formene:

$$\frac{dE}{df} = u_f(T) = f^3 \frac{8\pi h}{c^3} \frac{1}{e^{hf/kT} - 1}, \quad (2)$$

og

$$\frac{dE}{d\lambda} = u_\lambda(T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}. \quad (3)$$

Formlene $u_f(T)$ og $u_\lambda(T)$ gir henholdsvis energitettheten per volumenhet i hulrommet per frekvensintervall df og bølgelengdeintervall $d\lambda$. Konstanten h er Plancks konstant, c er lyshastigheten og k Boltzmannkonstanten.

Wiens forskyvningslov tar utgangspunkt i strålingstetthetens avhengighet av bølgelengden λ , $u_\lambda(T)$, og har formen:

$$\lambda_{\text{topp}} T = a, \quad a = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ mK.} \quad (4)$$

Størst utstrålingstetthet får vi ved en bølgelengde λ_{topp} ved temperaturen T til et svart legeme. Men etter (1) stemmer dette tilsynelatende ikke overens med COBE-fremstillingen.

Omregningen mellom $u_f(T)$ og $u_\lambda(T)$

Energimengden i et frekvensintervall df kan beregnes etter likning (2) slik:

$$dE = u_f(T) df. \quad (5)$$

Skal man beregne energimengden i et tilsvarende bølgelengdeintervall, må det foretas et variabelskifte fra frekvens f til bølgelengde λ , dvs.

$$f(\lambda) = \frac{c}{\lambda}, \quad \left| \frac{df}{d\lambda} \right| = \frac{c}{\lambda^2}, \quad df = \frac{c}{\lambda^2} d\lambda. \quad (6) \blacktriangleright$$

Med det blir energimengden i bølglengdeintervallet $d\lambda$ like stor som i frekvensintervallet df og vi får:

$$dE = u_f(T) df = u_f(T) \frac{c}{\lambda^2} d\lambda = u_f(T) d\lambda, \quad (7)$$

$$\frac{dE}{d\lambda} = u_\lambda(T).$$

Hvordan løse konflikten?

På hjemmesiden til COBE står det (se bildetekst til Figur 1) at målingene ble utført i frekvensområder med like brede frekvensintervaller Δf , $u_f(T) df$. For at Wiens forskyvningslov:

$$\lambda_{\text{topp}} T = a, \quad a = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ mK},$$

skal kunne brukes, må målingene gjøres i bølglengdeområder med like brede bølglengdeintervaller $\Delta\lambda$, $u_\lambda(T) d\lambda$. Det betyr at for hver måling må energien fra et konstant bølglengdeintervall $\Delta\lambda$ virke på antenna. Men i målingene fra COBE/FIRAS virket energien fra konstante frekvensintervaller Δf på antenna. Her ligger kjernen til mysteriet.

Beregningen av maksima for Plancks strålingslov

For å bestemme bølglengden λ_{topp} for intensitetstoppen i Planck-loven med λ som variabel deriverer vi $u_\lambda(T)$ med hensyn på bølglengden λ og setter $(du_\lambda)/d\lambda = 0$. Det fører til

$$e^{-hc/kT\lambda_{\text{topp}}} = 1 - \frac{1}{5} \frac{hc}{kT\lambda_{\text{topp}}}. \quad (8)$$

Ved å sette inn verdiene av h , c og k , definere $T\lambda_{\text{topp}} = a$ og løse likningen numerisk, blir $a = 2,8979 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$. Dermed har vi Wiens forskyvningslov som gir oss den velkjente bølglengden $\lambda_{\text{topp}} = 1,063 \text{ mm}$ for et sort legeme ved en temperatur på $T = 2,725 \text{ K}$.

For å bestemme frekvensen f_{topp} for intensitetstoppen i Planck-loven, nå med frekvensen f som variabel, deriverer vi $u_f(T)$ med hensyn på frekvensen f og setter $(du_f)/df = 0$. Det fører til

$$e^{-hf_{\text{topp}}/kT} = 1 - \frac{1}{3} \frac{hf_{\text{topp}}}{kT}. \quad (9)$$

Defineres $f_{\text{topp}}/T = b$ viser det seg ved numerisk løsning at $b = 58,786 \text{ GHz/K}$. Dermed fås

$$f\lambda_{\text{topp}} = bT = 58,786 \text{ GHz/K} \cdot T. \quad (10)$$

Med dette blir frekvensen ved størst intensitet i mikrobølgebakgrunnen

$$f_{\text{topp}} = 58,786 \text{ GHz/K} \cdot 2,725 \text{ K} = 160,19 \text{ GHz} \quad (11)$$

ved $T = 2,725 \text{ K}$, og det er i overenstemmelse med grafen fra COBE i Figur 1. Regnes frekvensen om til en bølglengde får vi

$$\lambda_{f_{\text{topp}}} = \frac{c}{f_{\text{topp}}} = 1,8714 \text{ mm}. \quad (12)$$

Bølglengden for intensitetstoppen er altså et annet sted fordi i dette tilfellet måles energien fra bakgrunnsstrålingen innenfor jevnbrede frekvensintervaller df og ikke innenfor jevnbrede bølglengdeintervaller $d\lambda$ som Wiens strålingslov krever.

Endring i intensitetstopp av Planck-kurven med frekvens og bølglengde som variabel

Så er det interessant om det er et fast forhold mellom disse to bølglengdene $\lambda_{f_{\text{topp}}}$ og λ_{topp} . Med konstantene a og b får vi

$$\frac{\lambda_{f_{\text{topp}}}}{\lambda_{\text{topp}}} = \frac{\frac{c}{f_{\text{topp}}}}{\frac{a}{T}} = \frac{\frac{c}{bT}}{\frac{a}{T}} = \frac{c}{ab} = 1,7598. \quad (13)$$

Forholdet mellom de to «topp-bølglengdene» er altså en fast kvotient, *uavhengig av temperaturen* T . Det bekreftes av de målte verdiene: $1,87 \text{ mm}/1,06 \text{ mm} = 1,76$.

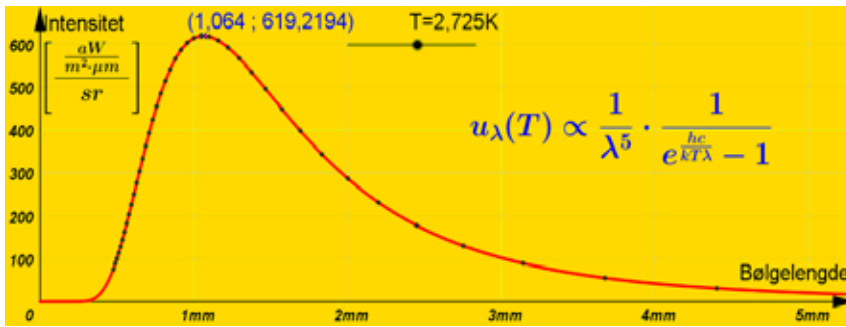
Årsaken til forvirringen er altså uklarehet i måleprosessen. Og det har konsekvenser for lovene som gjelder. Strålingstettheten er størst ved $1,87 \text{ mm}$ for måling av intensiteten i avhengighet av frekvensen f med faste frekvensintervaller Δf . Mens ved målinger i avhengighet av bølglengde λ med faste bølglengdeintervaller $\Delta\lambda$ blir $\lambda_{\text{topp}} = 1,06 \text{ mm}$.

Ulike måleprosedyrer for bølglengde og frekvens

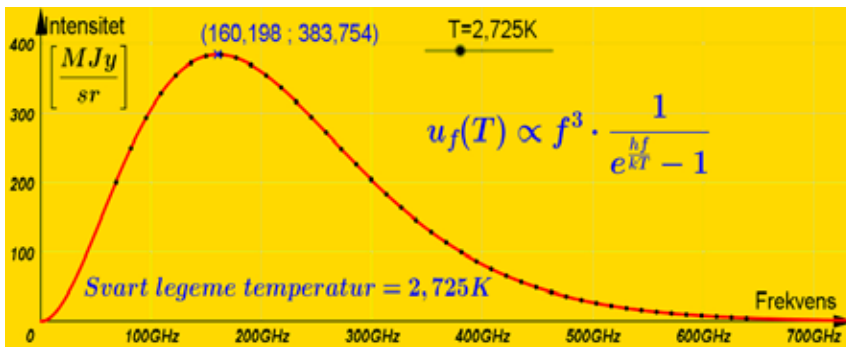
På nettsiden til NASA finnes også måleverdiene som er brukt til fremstilling av Figur 1, der som bølgetall, dvs. antall bølglengder per centimeter. Ønsker man å fremstille intensitetene, ikke i et diagram over frekvensene, men over bølglengdene, må man ta hensyn til omregningen fra frekvensintervallene df til $d\lambda$ som vist i avsnittet ovenfor.

Ved å multiplisere COBE-måleverdiene med faktoren c/λ^2 fra (6) tilpasset hvert punkt for å justere intervallene fra df til $d\lambda$, justeres tetthetsverdiene i henhold til endringen i måleintervallene. Nedenfor er det vist en slik fremstilling i Figur 2.

Avstanden mellom punktene endrer seg stadig over hele måleområdet. Årsaken er sammenhengen $\lambda = c/f$ som transformerer frekvens til bølglengde, og transformasjonene av de like brede frekvensmåleintervallene til like brede bølglengdeintervaller som i likning (6).



Figur 2. COBE-data fremstilt over bølgelengdene i millimeter. Avstandene mellom punktene varierer. Målingene er opprinnelig utført over konstante frekvensintervaller.



Figur 3. COBE-data, fremstilt slik de finnes i COBE-filen. Intensiteten er målt i megajansky per steradian.

1 Jansky = 10^{-26} W/(m² Hz).

I Figur 3 er COBE måleverdiene av FIRAS-eksperimentet fremstilt sammen med Planck-kurven. Som nevnt i teksten til Figur 1, er feilgrensene så små at de ikke ville vært synlige i grafen, selv om både punktene og grafen hadde blitt tegnet mye tynnere.

Energien måles ut fra et visst romvinkelområde. Måleenheten for en romvinkel er steradian (sr). Romvinkelen over retningene over en hel kule er definert som overflatearealet A av en kule dividert med radien til kula i andre potens: $A/r^2 = (4\pi r^2)/r^2 = 4\pi \approx 12,56$. 1 sr er ca. 1/12 av alle retninger som kan sees i rommet fra et sted, det vil si innenfor en kjegle med en åpningsvinkel på cirka 65°.

Konklusjon

Måleverdiene fra COBE/FIRAS-eksperimentet er ikke i konflikt med Wiens forskyvningslov. COBE måler strålingsintensiteten av den kosmiske bakgrunnstrålingen av energien fra konstante frekvensintervaller, mens Wiens forskyvningslov bygger på målinger av energispektrum fra konstante bølgelengdeintervaller. ■

Referanser

1. NASA. «Tests of Big Bang: The CMB». 9. mai 2016. Internettadresse: http://map.gsfc.nasa.gov/universe/bb_tests_cmb.html

NYE DOKTORER



Ken Vidar Falch

Ken Vidar Falch forsvarte avhandlingen «High-energy X-ray transmission microscopy based on compound refractive lenses» for ph.d.-graden ved NTNU 9. mai 2017. Falchs doktorarbeid inngår i et internasjonalt samarbeid om utvikling av et nytt synkrotronrøntgenmikroskop ved European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) i Grenoble. Instrumentet er under utvikling og testing, og er tenkt å stå ferdig når ESRF har gjennomført oppgradering av røntgenkilden (se FFV 2/2016 s. 43–48). Falchs doktorprosjekt er finansiert av Norges forskningsråd gjennom SYNKNØYTPRO-programmet.

I doktorarbeidet har Falch tatt for seg utvikling og implementering av ulike høyenergi lysfelt- ▶

mikroskopiteknikker basert på amplitude- og fasekontrast. En viktig del av arbeidet har vært å utvikle operasjonsmoder for relativt bredbåndet røntgenstråling uten for store kromatiske effekter. Hensikten med større båndbredde er å øke fluksen på prøven, og derved kunne kombinere høy romlig oppløsning med høy tidsoppløsning. Et slikt instrument vil kunne brukes til å studere dynamiske prosesser i materialer på mesoskopiske lengdeskalaer med tidsoppløsning som er bedre tilpasset den dynamikken man ønsker å forstå. Instrumentet vil ha et bredt nedslagsfelt innen nanovitenskap, kondenserte mediers fysikk og materialvitenskap. Under utviklingsarbeidet har mikroskopet blitt testet på mikrostrukturdannelse i metallegeringer og på studier av selvorganisering i kolloidsystemer.

Doktorstudiet er gjennomført ved Institutt for fysikk ved NTNU. Veileder har vært professor Ragnvald Mathiesen, med dr. Carsten Detlefs, dr. Marco Di Michiele, begge ved ESRF, og dr. Anatoly Snigirev fra Immanuel Kant Federal Baltic University i Kaliningrad, som medveiledere. ■



Njål Gulbrandsen

Njål Gulbrandsen forsvarte den 18. september 2017 sin doktoravhandling «Diagnostics of Ion Beam and Current Free Double Layer in Helicon Plasma Devices with Expanding Magnetic Field» ved UiT Norges Arktiske Universitet.

Gulbrandsen har studert en type plasma der en kan observere dannelsen av ionestråler som oppstår ved skarpe potensialfall ut fra plasmakilden, såkalte dobbeltlag. Han har spesielt arbeidet med sammenligning av to ulike diagnostiske metoder for å karakterisere ionestrålen. Den ene målemetoden består i å bruke en elektrostatisk probe (RFEA) som måler hastighetsfordelingen til ionene som treffer probens strømsensor. Ionene sorteres etter energi ved at en forspenning varieres på et gitter foran sensoren. I den andre målemetoden, kalt *Laser Induced Fluorescence* (LIF), brukes en laserstråle med regulerbar bølgelengde

til å eksitere metastabile ioner som finnes i plasmaet. Ved å variere bølgelengden på laserlyset, og måle lyset avgitt av ionene, vil en kunne finne hastighetsfordelingen til ionene langs laserstrålen ved hjelp av Doppler-prinsippet.

Mens en RFEA måler ionene etter at de har blitt akselerert gjennom plasmajiktet rundt proben, vil LIF måle ionehastighetsfordelingen i plasmaet direkte uten å forstyrre plasmaet. Gulbrandsen har utarbeidet en metode for sammenligne målingene ved å konvertere LIF-signalet til en teoretisk ekvivalent til RFEA-målingen. Denne metoden er så anvendt på målinger utført både ved Universitetet i Tromsø og ved Universitetet i West Virginia, USA. Ett av funnene er at mens RFEA-proben kan måle ionestråler som er for svake for å sees med LIF, vil LIF-målingene gi en bedre oppløsning spesielt av bakgrunnsfordelingen.

En metode for å bruke RFEA-prober til å måle høyenergetiske elektroner er også demonstrert. Ved hjelp av denne teknikken ble høyenergetiske elektroner i og rundt ionestrålen kartlagt. Spesielt ble det observert mye høyenergielectroner i området like utenfor ionestrålen, noe som indikerer at en god 2- eller helst 3-dimensional modell trenges for å beskrive fenomenet.

Doktorgradsarbeidet ble gjennomført ved Institutt for fysikk og teknologi, UiT Norges Arktiske Universitet, med professor Åshild Fredriksen som veileder. Deler av arbeidet ble også utført i løpet av ett års opphold ved Universitetet i West Virginia, Morgantown, USA, med professor Earl Scime som vert.

Gulbrandsen arbeider nå som postdoc på et prosjekt ved Tromsø Geofysiske Observatorium (TGO). ■



Unni Fuskeland

Unni Fuskeland forsvarte 6. juli 2017 sin avhandling med tittelen *Polarized foreground analysis for past and future CMB experiments*, for ph.d.-graden ved Institutt for teoretisk astrofysikk, Universitetet i Oslo. Hennes veiledere har vært

professor Hans Kristian Eriksen, professor Clive Dickinson og dr. Ingunn Kathrine Wehus.

Big Bang-modellen har en tidlig periode som kalles inflasjon. I inflasjonsperioden vokser universet ufattelig raskt, fra å være på størrelse med et atom til å være på størrelse med en appelsin i løpet av en bitteliten del av et sekund. Gjennom å lete etter spor av gravitasjonsbølgene som denne kraftige utvidelsen ifølge teoriene sendte ut, håper forskerne å finne bevis for at inflasjonsperioden faktisk har funnet sted. Den kosmiske bakgrunnstrålingen (CMB) er stråling som ble sendt ut da universet bare var 380 000 år gammelt, og det er her forskerne håper å finne spor etter gravitasjonsbølger.

Fuskeland har vært involvert i ulike prosjekter der det endelige målet er å finne spor etter gravitasjonsbølger. Forskerne leter etter et spesielt mønster (B-moder) i den polariserte bakgrunnstrålingen, og prøver å bestemme styrken på dette signalet. Signalet som det letes etter er så svakt at det er vanskelig å skille signal fra støy. Det trengs

ekstremt god kontroll på måletekniske detaljer og gode modeller av alle datakildene. En kilde til støy er forgrunner, som typisk er stråling fra vår egen galakse. Forgrunnene forårsaker også B-moder, og de maskerer B-modene som er laget av gravitasjonsbølger fra inflasjonsfasen. Ett av hovedresultatene i arbeidet handler om hvordan en spesiell type stråling fra vår galakse, synkrotronstråling, fordeler seg på himmelen. Dette er et resultat som er et viktig skritt i retning av å gjøre en korrekt identifisering av B-moder som skyldes støy i Melkeveien og B-moder som skyldes opprinnelige gravitasjonsbølger fra inflasjonsfasen.

I avhandlingen har Fuskeland brukt data fra satellittene WMAP og Planck og fra et eksperiment i Andesfjellene i Chile (QUIET). Hun har også vært med på å planlegge den neste generasjonen av instrumenter som skal brukes til å observere den kosmiske bakgrunnstrålingen. Hun har vært involvert i prosjekter med satellittene LiteBIRD og CORE, samt et eksperiment på Grønland (GreenPol). ■

IN MEMORIAM



Sven Oluf A.K. Sørensen

(1920–2017)

Sven Oluf Sørensen døde fredelig den 16. september 2017, 96 år gammel. Han var født 1920 i Paris.

Sørensen fikk i 1949 stipend for å forske på elementærpartikkelfysikk i den ledende gruppen til Cecil Powell (nobelpris 1950 for oppdagelsen av pi-mesonet) i Bristol i Storbritannia. Her lærte han eksperimentelle teknikker og analysemetoder som ble utviklet av datidens ledende elementærpartikkelforskere. Han ble kreert til doktor philos i 1952 etter å ha fullført en doktoravhandling med tittelen «On the emission of heavy fragments in

nuclear disintegrations». Sørensen var professor i fysikk ved Universitetet i Oslo fra 1961 til 1987.

Sørensen introduserte eksperimentell høyenergi kjernefysikk og elementærpartikkelfysikk ved Universitetet i Oslo i begynnelsen av 1950-årene. Sørensens vitenskapelige arbeid i 1950-, 60- og 70-årene var konsentrert om studiet av elementærpartikler og deres reaksjoner ved hjelp av fotografiske emulsjoner og boblekammerbilder.

Han var en av initiativtagerne til et nordisk samarbeidsprosjekt der kollisjoner mellom protoner ble studert ved hjelp av boblekammerdetektorer, etter hvert i kombinasjon med elektroniske detektorer, i forskningssenteret CERN i Genève. Dette samarbeidet fikk stor betydning for utviklingen av elementærpartikkelforskningen i Skandinavia. Det bidro også til å opprettholde en aktiv forskningsgruppe i Oslo med fokus på eksperimentell partikkelfysikk – en aktivitet som fortsatt er viktig i fysikkforskningsmiljøet i Oslo.

Sven Oluf Sørensen var også opptatt av om nye fundamentale prosesser opptrer hver gang man går opp noen størrelsesordener i energien av partikler som treffer en detektor. For å undersøke dette plasserte han detektorutstyr i fly og ►

på Gaustadtoppen i Telemark for å studere ultrahøyenergetiske prosesser. Han var en beskjeden og humoristisk person. Når han fortalte om disse eksperimentene sa han gjerne at han drev med «ikke-resultatorientert forskning». Ikke desto mindre produserte han og medarbeiderne resultater som ble rapportert i vitenskapelige artikler i internasjonale forskningstidsskrifter.

Han oppfordret fysikerne til i større grad å utforske den kosmiske strålingen og ønsket å se dypest mulig inn i materien ved å utnytte naturens mest energirike partikler. Dette var et gjennomgående tema for hans forskning.

Sørensen viste interesse for mørk materie – denne mystiske materien som er nødvendig for å lage sterkt nok gravitasjonsfelt til at de roterende galaksene ikke skal løse seg opp – teorier for hvordan universet har oppstått og for «de store spørsmål». I et «seminar» med Arne Næss, Sven Oluf Sørensen, Kristoffer Gjøtterud og Øyvind Grøn som gikk over en lang årrekke med ett møte per år hjemme hos Sørensen, var hans regel: «Ikke noe småsnakk!» Han kunne, 96 år gammel, innlede en telefonsamtale med: «Det er noe jeg må snakke med deg om. Det gjelder relativitetsteorien og dette med at tiden går langsommere langt nede i et tyngdefelt ...».

I 1992 kom Sørensen med en artikkel om Goethes fargelære inspirert av sin kollega Torger Holtsmarks bok om dette temaet. Han utvidet her perspektivet til å omfatte allmenne spørsmål av eksistensiell betydning. Han skrev: «Hvis man gjennom et liv har forsøkt å beskjeftige seg med moderne naturvitenskap og fysikk, så må før eller senere dette spørsmålet melde seg: Hva har disse studier og grublerier egentlig gitt en av dypere forståelse av virkeligheten, av naturen, og av meg selv?» Han fremhevet i denne artikkelen naturvitenskapens kulturelle dimensjon og skrev: «Det ville være et understatement å si at det moderne verdensbilde er et imponerende byggverk. Det faktiske forhold er vel at det er dette byggverk som er det tyvende århundredes kultur.»

Omkring 90-årsalderen skrev Sørensen en serie artikler som omhandlet atombombeprosjektene under annen verdenskrig. I andre artikler tok han opp kvantemekanikkens tolkning, og særlig den berømte diskusjonen mellom Bohr og Einstein. Dette var et tema som hadde interessert Sørensen fra han var 19 år, da han gjennom sin far ble kjent med Niels Bohr. Dagen før den tyske okkupasjonen av Norge 8. april 1940 var Niels Bohr i Oslo og inviterte da Sven Oluf Sørensen til en samtale hvor han tegnet og fortalte om sin diskusjon med Einstein. Gjennom resten av sitt liv bevarte Sørensen Bohrs

tegninger fra denne samtalen som en skatt. Før han døde deponerte han dem i Niels Bohr Arkivet i København hvor de er tilgjengelige for forskere.

I hele hans liv spilte kunsten en stor rolle for Sørensen. Allerede i tenårene var han en dyktig tegner, og han laget midt i 1930-årene lange tegneserier med motiver som å reise til Mars. Inspirert av sin far, Henrik Sørensen, og somrene med «malerkolonien» i Holmsbu, utviklet han sin egen malerkunst. Han laget vakre oljemalerier med motiver fra Holmsbu.

Sørensens far døde i 1962. Kort tid senere startet Sørensen arbeidet med å reise et galleri på Holmsbu for å ta vare på viktige malerier fra Holmsbukolonien. I en vakker og særpreget bygning av 'holmsbugranitt', tegnet av arkitekten Bjart Mohr, samlet han kunstverk av faren, Oluf Wold Torne og Thorvald Erichsen. Galleriet ble åpnet i 1973, og besøkende kunne her i over 30 år oppleve glitrende guiding av Svens Olufs gode venninne Solveig Myhre.

Sørensen har fortalt med humor og varme om miljøet som hadde eksistert i Holmsbu og om kunstnerpersonlighetene som hadde utfoldet seg her, og han følte at han hadde sine dypeste røtter her.

Gjennom et tidsrom på 40 år var Henrik Sørensen i perioder om sommeren i Smørklepp i Vinje i Telemark og malte – ofte sammen med sin venn Harald Kihle. Sven Oluf Sørensen fikk reist et flott galleri her, også det i granitt og tegnet av Bjart Mohr. Det ble åpnet i 1991. Her samlet han malerier av Harald Kihle og malerier med telemarkmotiver av Henrik Sørensen.

Sven Oluf Sørensen skrev i mange år på en biografi om sin far, Henrik Sørensens liv og kunst. Den kom ut i 2003 og er et kulturhistorisk verk på 400 fengslende sider. Det dokumenterer utviklingen innenfor norsk malerkunst i første halvdel av det tyvende århundret, knyttet til kretsen rundt Henrik Sørensen.

Sven Oluf Sørensen var en strålende foreleser med tydelig logisk sammenheng i det han sa. Forelesningene hans var en estetisk og retorisk nytelse. Å lære atomfysikk av Sørensen var en fest. Vi studenter gledet oss til hans forelesninger. Han hadde også en vakker håndskrift. Midt i en forelesning kunne han ta et kritt i sin venstre hånd og tegne en perfekt sirkel mens han fortsatte å skrive med høyre hånd. Ved hans 90-års dag skrev tidligere studenter i *Fra Fysikkens Verden*: «Kunstneren og estetikerens kom til syne gjennom dine forelesninger der alt var disponert og ordnet på forhånd. Tavlene var små kunstverk.»

Sven Oluf Sørensen satte varige spor etter seg som forsker, og ved at han fikk reist galleriene i

Holmsbu og Vinje og samlet kunsten der. Han var et «renessansemenneske», dypt involvert både i kunstens og naturvitenskapens verden, og han var et vennlig og fint menneske med et reservoar av kunnskaper med stor omsorg for sine kolleger,



Svenn Lilledal Andersen

(1926–2017)

Svenn Lilledal Andersen døde 30. juli 2017. Han var født 24. januar 1926 i Skien. Han ble cand. real. i 1954 og dr.philos. i 1965 ved UiO. Han var NTNf-stipendiat ved Fysisk institutt, UiO 1954–1966 og siden 1966 universitetslektor og førsteamanuensis. I perioden 1973–1974 var han bestyrer ved Fysisk institutt.

Andersens forskningsfelt var eksperimentell kjernefysikk, der han særlig studerte resonansinnfangning av protoner på lette og middelstunge atomkjerner. Eksperimentene ble utført på Van de Graaff-akseleratoren ved Fysisk institutt og på tilsvarende maskiner ved flere utenlandske laboratorier. Han var i en årrekke teknisk leder for Van de Graaff-maskinen og ledet gjenoppbyggingen av maskinen etter at den ble ødelagt av brann i 1961. I 1966 mottok han sammen med tre kolleger (Trygve Holtebekk, Ole Lønsjø og Rolf Nordhagen) Norsk Varekrigsforsikringspris for vitenskapelig innsats.

Andersen var en typisk eksperimentalfysiker som var kjent for sitt gode lag med instrumentene. Det gjaldt ikke bare ved Van de Graaff-laboratoriet, men overalt hvor han gjorde eksperimenter, bl.a. ved syklotronen i Stockholm.

Etter hvert begynte han å studere ione-implantasjon i faste stoffer og ikke minst elektroniske materialer, og han var også ansvarlig for en større internasjonal konferanse om temaet i Gausdal

studenter og venner. Han sådde frø som spiret. Sven Oluf inspirerte oss. Han fikk oss til å tenke, se sammenhenger – og gjorde oss glade.

*Øyvind Grøn, Hallstein Høgåsen
og Kjell Martin Danielsen*

i 1971. Senere knyttet han seg til arbeidet med å utvikle solfangere, og han benyttet solenergi bl.a. til høytørking i fjellstrøk.

Som bestyrer ved Fysisk institutt fikk han i 1974 i oppdrag å fremme forslaget om anskaffelse av syklotron overfor fakultetet og universitetet. Etter en – etter den tids målestokk – lang prosess ble syklotronen anskaffet og innviet i november 1979.

Andersen hadde mange hovedfagsstudenter gjennom sin lange karriere. Studentene hans lærte å kjenne et menneske som stilte krav, som brydde seg og som var omgjengelig på sin røffe måte.

Hans undervisningsinnsats var i hovedsak knyttet til laboratoriekursene. Her var han i sitt ess og fikk utløp for sin eksperimentelle kreativitet. Herfra går det nok en linje til skolelaboratoriet for fysikkundervisning som han tok initiativet til sammen med Otto Øgrim og Helmut Ormestad på begynnelsen av 1970-tallet, et tiltak som lever i beste velgående den dag i dag og som har gitt inspirasjon til tilsvarende laboratorier ved de andre universitetene.

Andersen arbeidet tett med Otto Øgrim om mange tiltak rettet mot skolen. Han var «fast inventar» i en årrekke på alle etterutdanningskursene på skolelaboratoriet for lærere. Han hadde en egen teft for å få forsøkene til å fungere. Sammen med Øgrim utarbeidet han en «kokebok» om fysikkforsøk i skolen med detaljerte beskrivelser av utstyr, forsøksoppsett og tips for å få til vellykkete demonstrasjoner og elevforsøk. Nevnes bør også faglig pedagogisk dag der han i en årrekke hadde populære og godt besøkte «fysikkshow» for lærere, og hans innsats i noen av TV-programmene «Fysikk på roterommet». I fysikkåret i 2005 utviklet han og Øgrim et hefte *Forsøk fra fysikk på roterommet* med 191 forsøk for barn, ungdom og lærere, et hefte som ble distribuert til alle landets skoler som en gave i anledning fysikkåret.

Vi minnes en kollega som ga av seg selv og stilte opp for Fysisk institutt og samfunnet utenfor langt ut over pensjonsalderen.

*Carl Angell, Torgeir Engeland, Anders Isnes,
Eivind Osnes og Toralf Bernhard Skaali*



Arve Haug
(1935–2017)

Arve Haug døydde brått 11. september 2017, 82 år gamal. Han vart fødd i Oslo den 15. april 1935 og voks opp i Bærum.

Ein markert personlegdom ved Fysisk Institutt i Oslo er borte. I 20–25 år var Arve ein lærar som alle (!) studentane møtte, i og med at han styrde den obligatoriske laboratorieundervisninga. Han passa perfekt i den rolla, kunnskapsrik som han var, og med ein ekstremt velutvikla ordenssans. Ikkje ei stikkontakt sto i når Arve bestemte at arbeidsdagen var slutt; og i tilfelle nokon ubede skulle kome innom det fredfulle undervisningslaboratoriet og sette i ei stikkontakt (og dermed forårsake brann eller øydelegge utstyr) så slo Arve for sikkerheits skuld også av hovudstraumbrytaren før han gjekk heim.

Humoren hans var av det barske slaget. Ikkje noko tull med han. Han brumma og var snill som eit lam. Han såg kvar enkelt student, han hugsa namna deira (70–80 studentar) etter berre ei veke og han nølte ikkje med å arrangere ekstraøvingar for dei som bad om det. Han døypte laboratoriet for «Den Himmelske freds plass», eit namn som framleis lever.

Han var av dei fyrste som fekk Fysisk Institutt's undervisningspris i 1988.

Tida hans før han vart sjef på labben er nå mindre kjent: Han var ein uvanleg flink student som agerte alkymist og tok hovudfagsoppgåve på Van de Graaff-generatoren, der han bombarderte aluminium med proton og laga magnesium saman med helium.

13. desember 1961 var han oppe til hovudfagseksamen der han fekk 1.2 på oppgåva, noko som ikkje var uventa. Men at han fekk 1.2 i det

munnlege pensumet viser at Egil Hylleraas som var eksaminator var imponert. Ja, så imponert var han, at det er fortalt at han tilsette Haug nærmast over eksamensbordet. Slik gjekk det til at Arve Haug gjekk inn i si tid som teoretikar. Utpå året 1962 vart han NORDITA stipendiat.

I København gjorde han godt inntrykk, ikkje berre på fagfellar, men også på Turid Cedervall som arbeidde ved Niels Bohr Instituttet. I 1964 vart ho kona hans. Dei fekk 53 gode år og to flinke søner saman.

På Universitetet i Oslo vart han i 1963 tilsett som midlertidig universitetslektor. Fast tilsetting kom 1. mai 1969.

I 1964 hadde han så eit lengre opphald i Stockholm der han arbeidde saman med Bertel Laurent. Etter dette gjekk han inn for undervisning i teoretisk fysikk, gruppeteori, kvantemekanikk og elementærpartikkelteori. I den tida vart den teorien som Arve arbeidde med ofte omtala som «analytisk S-matriseteori», og han rettleia fleire hovudfagsstudentar i dette feltet.

Dette skulle endre seg da Institutt for teoretisk fysikk vart slege saman med Fysisk Institutt og flytte frå Matematikkbygningen til Fysikkbygningen i 1977. Frå 1980 av fann Arve ut at arbeid på labben var det som passa han best. Han la stort arbeid inn i organiseringa av laboratorieundervisninga på Den Himmelske Freds Plass. Mange av øvingane som han laga er i bruk den dag i dag.

Han elska å få ting til å virke. Saman med ein av oss gjorde han våren 1995 eit eksperiment med sonoluminescense, der vi med forsterkaren til Realistforeningas råkkeband fekk generert lysande bobler i tungtvatn. Foton kom ut, men ikkje nøytron og vi viste derfor at fenomenet ikkje kunne brukast til fusjon. Dette hadde Haug stor moro av.

Andre ting han hadde glede av var båtliv på land og sjø. Med familien ferierte han ofte i båt. I Båttforeningen var han ein hjelpsam kar.

Han var god musikar og trombona hans var både eit teoretisk og praktisk objekt. Han var med i fleire orkester. På instituttet var han alltid med når vi hadde bruk for levande musikk.

Etter at han nådde aldersgrensa var det diverre sjeldan vi såg han. Vi saknar Arve. Men gler oss ennå over dei gode og muntre minna som vi har om han.

*Jan Olav Eeg, Eli Olaug Hole,
Hallstein Høgåsen og Jon Magne Leinaas*



Erik Eriksen
(1926–2017)

Erik Eriksen døde 6. oktober 2017, 91 år gammel. Han var født 26. januar 1926 i Vang i Hedmark og vokste opp i Hamar. Eriksen var dosent i fysikk ved Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo fra 1963 og professor samme sted fra 1985.

Eriksens arbeidsfelt var teoretisk fysikk, og hans forskning har spent over mange deler av fysikken. I begynnelsen var det kvantemekanikk og kvantefeltteori han arbeidet med, og under denne perioden oppholdt han seg som stipendiat ved CERN, som da hadde sin teoriavdeling i København. Senere ble det elektromagnetisme og relativitetsteori som sto i fokus for Eriksens faglige interesse.

Under sin København-periode arbeidet Eriksen med kvantefeltteoretiske spørsmål, spesielt vakuumpolarisasjonens effekt i proton-protonkollisjoner, og på denne tiden hadde han et fruktbart samarbeid med L.L. Foldy. Samarbeidet førte over i problemstillinger omkring transformasjoner på Diraclikningen, hvor elektroner i ytre felt kan beskrives ved en to-komponent-formalisme der bare positive energitilstander inngår. Dette omtales som Foldy Wouthuysen-transformasjoner, men kunne kanskje vel så gjerne kalles Eriksen-transformasjoner, siden Eriksen viste hvordan slike transformasjoner kunne føres over på en elegant, lukket form. Spesielt er dette vakkert i det viktige tilfellet med elektroner i magnetfelt.

Den klassiske fysikk, med analytisk mekanikk, relativitetsteori og elektromagnetisk strålingsteori, har vært i fokus for Eriksens arbeid over en årrekke. I første omgang var dette motivert av undervisningen, hvor Eriksen ga studentene en

innføring i disse sentrale deler av fysikken. Eriksens forelesninger av disse emnene var kjent for sitt presise og velformulerte innhold, og det er mange av hans tidligere studenter som har omtalt den inspirerende virkning Eriksens forelesninger har hatt på dem. Mange har omtalt ham som en av instituttets beste forelesere. Hans undervisning hadde alltid en estetisk side der Eriksen vektla den logiske oppbygningen av teorien og illustrerte den med lærerike anvendelser. En rekke av hans hovedfagsstudenter har gjennom årene nytt godt av Eriksens klare og analytiske tilnærming til fysikken og til de gode forslag til hovedoppgaver han har gitt sine studenter. Eriksen la vekt på ikke bare å regne seg dypere inn i fysikken, men å bringe klarhet i de fysiske fenomener ved å forenkle og anskueliggjøre dem.

Eriksens dype interesse for klassisk teoretisk fysikk gjorde at denne delen av fysikken også ble hans forskningsområde. Han har samarbeidet med sin kollega Kjell Vøyenli på en rekke problemer i klassisk fysikk, og i tretti år, fra rundt 1980 til 2010, var Øyvind Grøn hans hovedsamarbeidspartner. De publiserte over 20 vitenskapelige artikler sammen. Eriksen og Grøn forsket blant annet på om rotasjonsbevegelse er relativ ifølge den generelle relativitetsteorien, og en av deres forskningsartikler ble referert til på internett av katolske munkes som syntes det var stas at man kan oppfatte jorda som i ro, mens verden utenfor roterer rundt, noe som moret Eriksen. Et av spørsmålene som har vært sentrale i deres forskning, gjelder stråling fra akselererte ladninger i tyngdefelt. I denne sammenheng har en grundig analyse av strålingsfenomenet blant annet resultert i en serie av publikasjoner i *Annals of Physics*, som samlet utgjør mer enn 200 sider.

Eriksen var også et aktivt friluftsmenneske som i en lang årrekke både var med å arrangere og delta i Universitetets orienteringsløp.

*Øyvind Grøn, Hallstein Høgåsen
og Jon Magne Leinaas*

Fotografi tatt av Agnes Haug

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

Styret i Norsk Fysisk Selskap

President:

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

Visepresident:

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

Styremedlemmer:

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

Adresse:

Norsk Fysisk Selskap
c/o Inst. for fysikk og teknologi
UiT Norges Arktiske Universitet
Postboks 6050 Langnes, 9037 Tromsø

E-post: *nfs.styret@gmail.com*
Bankgiro: 7878.06.03258

www.norskfysikk.no/nfs/

ISSN-0015-9247