

# Fra Fysikkens Verden

NR. 1 – 2020  
82. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP



**Fullerén- $C_{60}$ -molekylet  
som overrasket verden**

## Les også om:

■ Protonet

■ Stråleterapi

■ Hjernen

■ Gravitonet

# Nr. 1 – 2020

## 82. årgang

### Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap

### Redaktører:

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

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

### Redaksjonssekretær:

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

### Redaksjonskomité:

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

### Layout og sats:

Maria Hammerstrøm

### Trykkeri:

Oslo Sats, repro og montasje A/S

### Ekspedisjonens adresse:

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

### Abonnere:

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

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

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

### Retningslinjer for bidragsyttere

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

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

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

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

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

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

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

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

# Innhold

Fra redaktørene <i>Øyvind G. Grøn</i>	4
Nobelprisen for 1920 <i>Emil J. Samuelsen</i>	4
Nordic Physics Days 2020	5
Elektro-optikkmøte 10.–12. juni 2020	5

## Fysikknytt

Hvor stort er protonet? <i>Øyvind G. Grøn</i>	6
Planetbevegelser og galaksehoppers dynamikk gir øvre grenser for gravitonets masse <i>Øyvind G. Grøn</i>	7

## Artikler

Fullerén- $C_{60}$ -molekylet som overrasket verden <i>Unni Eikeseth</i>	10
Utforskning av hjernen med MR-avbildning <i>Richard Olsen</i>	14
Om stråleterapi og kjernekraft <i>Thormod Henriksen</i>	20

## Småstoff

Bokomtale: <i>Periodesystemet</i> <i>Øyvind G. Grøn</i>	23
---	----

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

Igjen dreier fysikknytt seg om å måle visse størrelser med større nøyaktighet enn tidligere. Protonets radius viser seg å ha litt forskjellig verdi avhengig av hvordan målingene utføres. Årsaken til dette er foreløpig ikke klarlagt.

Gravitasjon er litt av et mysterium. Den blir gitt en geometrisk beskrivelse i relativitetsteorien uten å ha karakter av en kraft, men den betraktes som en kraft formidlet av gravitoner ifølge kvantefysikken. Det trengs en kvantegravitasjonsteori for å oppnå en bedre forståelse av gravitasjon. I mellomtiden kartlegges egenskapene til gravitasjon, blant annet ved å måle gravitonets masse, noe som igjen bestemmer gravitasjonens rekkevidde.

Fysikkhistorie er viktig – og morsomt å lese om. Vi kan i dette nummeret glede oss over en artikkel om oppdagelsen av det såkalt «fotballmolekylet» –  $C_{60}$ -molekylet. Den er delvis hentet fra en underholdende bok, *Periodesystemet*, som vi gir en anmeldelse av.

Et hovedtema i dette nummeret av *FFV* er hvordan fysikken har bidratt til legevitenskapen når det gjelder å utvikle utstyr for å stille diagnoser. I en artikkel om utforskning av hjernen med MR-avbildning, får vi en innføring i fysikken bak MR-skanning av hjernen.

En av Norges fysikknestorer, Thormod Henriksen ville ha fylte 92 år 26. februar i år. Han døde 13. februar, like etter at artikkelen av ham i dette nummeret av *FFV* var fullført. Det var en stor glede å samarbeide med Thormod Henriksen. Han var en person som takket for forslag til endringer i sin artikkel. Thormod Henriksen har gjennom et langt fysikerliv rettet oppmerksomheten mot hvordan stråling påvirker mennesker. I sin artikkel skriver han blant annet om strålebehandling av kreftsvulster og temaet kjernekraft. Han anbefaler i sin artikkel at Norge oppretter en forskningsgruppe for å utvikle ekspertise i mulighetene som ligger i thorium atomkraftverk. *FFV* kommer tilbake med en nekrolog om Thormod Henriksen i neste nummer.



Øyvind G. Grøn

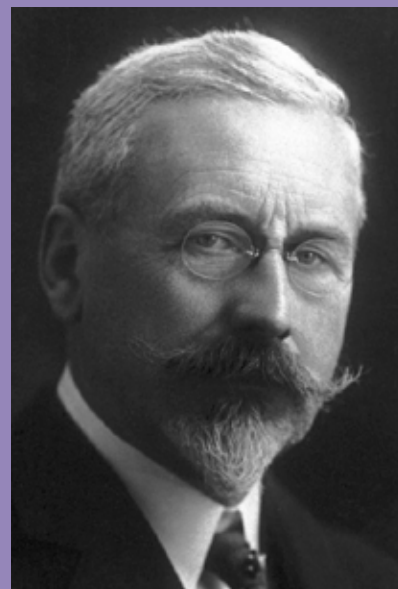


Emil J. Samuelsen

## Nobelprisen for 1920

Nobelfysikkprisen åra før og etter 1920 gjekk til kjendisar (1918: Max Planck; 1919: Johannes Stark; 1921: Albert Einstein; 1922: Niels Bohr), men sveitsaren Charles-Édouard Guillaume (1861–1938), som fekk prisen for 1920 er lite kjend i dag. Hans pris var for tekniske nyvinningar, nemleg for utvikling av stabile materiale til bruk i instrument som krev høg presisjon og repetabilitet, som klokker, kronometer, ventilar, støypeformer for mikromotordelar og anna. Spesielt viktig var utviklinga av jern-nikkel-legeringane Invar med 36 % nikkel og Elinvar med 36 % nikkel pluss 12 % krom. Invar har svært liten termisk utvidings-koeffisient, og Elinvar har elastisitets-koeffisient som er temperatur-uavhengig over eit stort temperaturområde. Arbeidet vart utført alt i 1896. «Invar» er forkorting av invariant.

Guillaume var elles aktiv i arbeid for internasjonal standardisering, og i åra 1915–1936 var han direktør for BIPM (Bureau International des Poids et Mesures i Paris). (Nordmannen Ole Jacob Broch hadde den funksjonen for 1879–1889).



Emil J. Samuelsen

Charles-Édouard Guillaume



UPPSALA  
UNIVERSITET



Welcome to

## Nordic Physics Days 2020

19-21 August, Uppsala, Sweden

THE CONFERENCE IS ORGANIZED by the National Physical Societies in the Nordic countries and hosted by the Department of Physics and Astronomy at Uppsala University. It will be held in Uppsala, at the University Main Building, 19-21 August 2020.

THE NORDIC PHYSICS DAYS is an international conference that welcomes students, researchers and teachers. The program includes plenary contributions from outstanding researchers and speakers, presenting exciting research findings in a variety of physics fields. In addition, parallel sessions will be dedicated to the meetings of the different sections of the Physical Societies. In special recognition of Uppsala University's contributions to Physics Education Research (PER), a symposium on PER is arranged within the Conference. THE PER focus will be on Representations in the teaching and learning of physics.

THIS CONFERENCE will also be the occasion to celebrate the 100-year jubilee of the Swedish Physical Society, founded in Uppsala in 1920.

[www.nordicphysicsdays2020.se](http://www.nordicphysicsdays2020.se)

## Elektro-optikkmøte 10.–12. juni 2020

Årets elektro-optikkmøte vil finne sted på Jægtvolden Fjordhotell ved Straumen på Inderøya, den 10.–12. juni. Møtet er organisert gjennom optikkgruppen i Norsk Fysisk Selskap. Frist for abstract/påmelding er 3. april. Mer informasjon finnes på konferansens hjemmeside ([www.electrooptics.no](http://www.electrooptics.no)).

Elektro-optikkmøtet er det viktigste norske forumet for vitenskapelig og teknisk optikk, og bringer sammen representanter for grunnleggende forskning, innovasjon og industrielle applikasjoner.

Organiserings- og programkomiteen består av:

- Astrid Aksnes (leder), Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
- Morten Kildemo (nestleder), Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
- Evelyn Honoré-Livermore, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet



- Magnus Breivik, Kongsberg Defence and Aerospace AS
- Jon Kristian Hagene, Norsk elektrooptikk AS
- Espen Lippert, Forsvarets forskningsinstitutt

## Hvor stort er protonet?

**Nye eksperimenter [1] der elektroner er sendt mot protoner, har gitt en presis verdi av protonets radius,  $r_p = (0,832 \pm 0,007_{\text{stat}} \pm 0,012_{\text{syst}}) \cdot 10^{-15}$  m. Dette er 2,7 standardavvik mindre enn resultatet av tidligere spredningseksperimenter, men i overensstemmelse med spektroskopiske målinger av Lambforskyvningen til stråling fra myon-hydrogen atomer.**

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Artikkelen [1] innledes med: «Protonet utgjør den dominerende komponenten av den synlige materien i universet. Følgelig er det å bestemme protonets grunnleggende egenskaper – slik som dets radius,  $r_p$ , – av interesse i seg selv. En nøyaktig kunnskap om størrelsen av  $r_p$  er også viktig for en presis bestemmelse av andre fundamentale konstanter slik som Rydbergs konstant. Verdien av  $r_p$  trengs også for å gjøre presise beregninger av energinivåene til hydrogenatomet.»

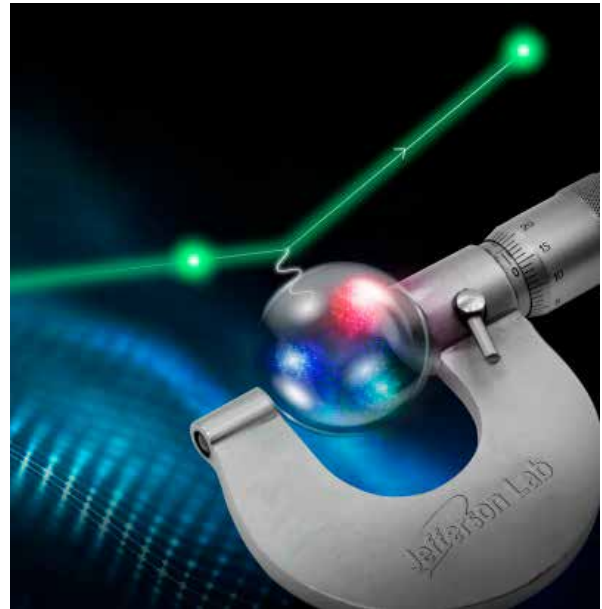
Å definere størrelsen av protonet er ingen enkel sak. Den 7. mars ble det publisert en 11 sider lang, teknisk artikkel [2] i *Physical Review C* med tittelen: «Defining the proton radius: A unified treatment» skrevet av Gerald A. Miller. Størrelsen av protonet er definert ut fra den såkalte formfaktoren av dens ladningsfordeling, som kan oppfattes som et mål for utstrekningen av protonets ladningsfordeling, og har sammenheng med hvordan protonet vekselvirker med ladde partikler. I det følgende vil vi derfor bruke uttrykket «protonets radius» om radien til dets ladningsfordeling.

### Protonradiusgåten

Frem til år 2010 var det utført to typer eksperimenter for å bestemme protonets radius. De er:

- I: Spredningseksperimenter der elektroner ble sendt mot protoner.
- II: Spektroskopiske målinger av Lambforskyvningen til stråling fra ordinære hydrogenatomer.

Lambforskyvningen er en liten forskyvning av en av spektrallinjene i strålingen fra et hydrogenatom i forhold til bølgelengden som følger fra Diracs likning. Den skyldes vekselvirkning mellom hydrogenatomet og den kvantemekaniske nullpunktsenergien som har med kvantemekaniske vakuum fluktuasjoner å gjøre. I vakuum dannes spontant partikkel-antipartikkelpar som smelter sammen igjen (annihilerer) så raskt at de ikke kan



**Figur 1.** Fysikere ved Jeffersonlaboratoriet i USA har målt protonets radius ved å sende elektroner mot protoner.

observeres ifølge Heisenbergs uskarphetsrelasjon. Dette gir opphav til en fluktuerende vakuumenergi som har en ørliten virkning på hydrogenatomets energinivåer og dermed forårsaker Lambforskyvningen. Størrelsen av denne forskyvningen avhenger av radien til protonet. Effekten ble først målt i 1947.

Resultatene fra målinger av type I og II frem til 2010 var i god overensstemmelse med hverandre. I 2008 publiserte The Committee on Data for Science and Technology (CODATA) en artikkel [3] i *Review of Modern Physics* der de oppga størrelsen av protonets radius til  $r_p = (0,877 \pm 0,007) \cdot 10^{-15}$  m.

Men i 2010 skjedde noe uventet. Det ble utført nye målinger av Lambforskyvningen til såkalte  $\mu\text{H}$ -atomer, dvs. hydrogenatomer der elektronet er erstattet av et myon. Siden myonet har omtrent 200 ganger større masse enn elektronet, er myonet avstand fra atomkjernen gjennomsnittlig omtrent 1/200 av elektronets avstand fra atomkjernen. Dermed blir Lambforskyvningen for slike atomer mye større enn for vanlig hydrogen. Dette gjør det mulig å måle protonets radius med større presisjon enn ved å bruke vanlige hydrogenatomer. Men den korte levetiden til myonet gir eksperimentelle utfordringer. Disse ble overvunnet i 2010 og 2013 av to grupper av fysikere som jobbet uavhengig av hverandre ([4], [5]).

Resultatet av de nye målingene var en ny verdi for protonets radius, nemlig fra [4],  $r_p = (0,84184 \pm 0,000036_{\text{stat}} \pm 0,000056_{\text{syst}}) \cdot 10^{-15}$  m. Forskerne gjør oppmerksom på at det nye måleresultatet er ti ganger mer presist enn de tidligere resultatene summert opp i [3], men at verdien er 5 standardavvik mindre. Denne forskjellen fra CODATA-verdien

av protonets radius i et mer presist eksperiment ble kalt «the proton radius puzzle», dvs. protonradiusgåten.

Resultatet fra [3] er  $r_p = (0,84087 \pm 0,000039) \cdot 10^{-15}$  m i overensstemmelse med resultatet fra [4]. Forskerne skriver: «Dette er ti ganger mer presist enn verdien av protonets radius gitt i CODATA, men 7 standardavvik mindre og forsterker dermed protonradiusgåten».

### Nye målinger

I en artikkel [1] publisert i *Nature* 7. november 2019 rapporterer W. Xiong og medarbeidere om et nytt spredningseksperiment med bedre presisjon enn tidligere eksperimenter av denne typen for å måle protonets radius. Resultatet av de nye målingene er  $r_p = (0,832 \pm 0,007_{\text{stat}} \pm 0,012_{\text{syst}}) \cdot 10^{-15}$  m, ikke så presist som de spektroskopiske Lambforskyvningsmålingene av myon-hydrogenatomet, men mer presist enn resultatene fra tidligere spredningsforsøk.

Forskerne skriver at protonradien de har funnet er 2,7 standardavvik mindre enn radien fra alle tidligere spredningsforsøk og støtter opp

under resultatene fra [3] og [4]. Det er tydelig at de nye måleresultatene går i favør av en mindre protonradius enn den som er gitt i CODATA i 2008. Men forskerne presiserer at ytterligere målinger bør utføres før man kan si at vi har en definitiv løsning av protonradiusgåten. ■

### Referanser

1. W. Xiong og medarbeidere. «A small proton charge radius from an electron-proton scattering experiment». *Nature* 575, s. 147–150 (2019).
2. G.A. Miller. «Defining the proton radius: A unified treatment». *Phys. Rev. C* 99, 035202 (2019).
3. P.J. Mohr og medarbeidere. «Recommended values of the fundamental physical constants». *Rev. Mod. Phys.* 80, s. 633–730 (2008).
4. R. Pohl og medarbeidere. «The size of the proton». *Nature* 466, s. 213–216 (2010).
5. A. Antognini og medarbeidere. «Proton structure from measurements of 2S-2P transition frequencies of muonic hydrogen». *Science* 339, s. 417–420 (2013).

## Planetbevegelser og galaksehoppers dynamikk gir øvre grenser for gravitonets masse

**Nye undersøkelser basert på studier av bevegelsene til planetene i solsystemet, har vist at den reduserte Compton-bølgelengden til gravitonet er  $\lambda_g > 1,8 \cdot 10^{13}$  km = 2,0 lysår. Det svarer til at gravitonets masse er  $m_g < 6,8 \cdot 10^{-23}$  eV/c<sup>2</sup> = 1,2 · 10<sup>-60</sup> kg som er 1,4 · 10<sup>-28</sup> av elektronets masse. En mer restriktiv grense er oppnådd ved å analysere galaksehopen Abell 1689. Det førte til  $m_g < 1,4 \cdot 10^{-29}$  eV/c<sup>2</sup> som svarer til  $\lambda_g > 9,1 \cdot 10^{19}$  km = 10 millioner lysår.**

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

### Sammenheng mellom en krafts rekkevidde og massen til kraftoverføringspartikkelen

Det kvantemekaniske bildet av hvordan partikler med ladning og masse virker på hverandre, er at kraftvirkningen skjer som en følge av at partiklene utveksler såkalte virtuelle fotoner og gravitoner. At en partikkel er virtuell betyr at den

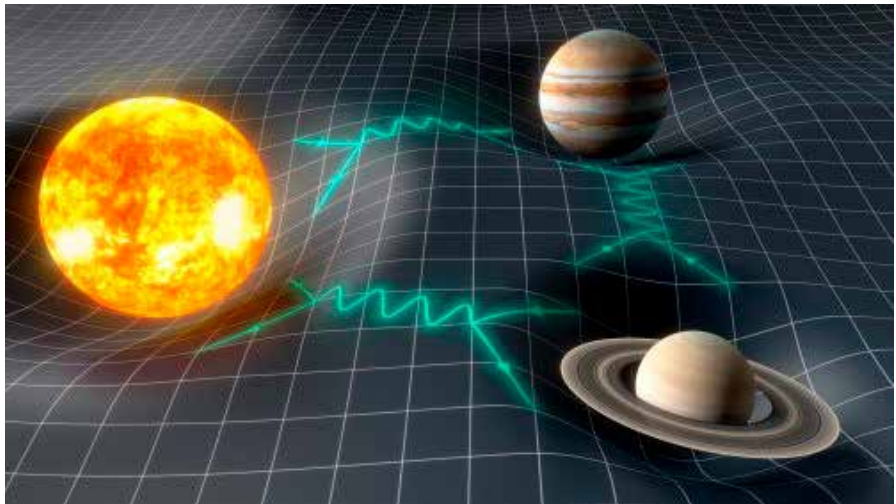
har en levetid begrenset av Heisenbergs uskarpheitsprinsipp. Det betyr at en virtuell partikkel ikke kan observeres.

Kreftene har en rekkevidde,  $\lambda$ , bestemt av Heisenbergs uskarpheitsprinsipp,  $E\Delta t = \hbar$ , der  $\hbar = h/2\pi$  hvor  $h$  er Plancks konstant, og  $\Delta t$  er levetiden til den virtuelle kraftoverføringspartikkelen. Kraftens rekkevidde kalles den reduserte Comptonbølgelengden, og er  $\lambda = c\Delta t$ . En partikkel med masse  $m$  har energien  $E = mc^2$ . Dermed fås  $\lambda = \hbar/mc$ .

Gravitasjon oppfattet som utveksling av virtuelle gravitoner med både partikkel- og bølgenatur, samt forestillingen fra generell relativitetsteori om at masse krummer rommet, er illustrert i figur 1.

Den teoretiske grensen for hvor liten masse det er mulig å måle, er  $m_{\text{min}} = \hbar/t_0c^2$ , der  $t_0$  er universets alder. Innsetting for Plancks konstant lyshastigheten og universets alder på 13,8 milliarder år gir  $m_{\text{min}} = 3,8 \cdot 10^{-69}$  kg. Den tilsvarende reduserte Comptonbølgelengden er  $ct_0$  som er den avstanden lyset fra big bang har beveget seg frem til vår tid – 13,8 milliarder lysår. ▶

**Figur 1.** Illustrasjon av gravitasjonsvekselvirkning mellom stjerne og planeter i bevegelse. (Illustrasjon: Y Gominet IMCCE/Observatoire de Paris/NASA)



Den japanske fysikeren Hideki Yukawa viste i 1935 hvordan en massiv kraftoverføringspartikkel modifierer det elektriske potensialet fra en punktpartikkel. I arbeidet med å sette en øvre grense for gravitonets masse innføres en tilsvarende modifiering av det Newtonske gravitasjonspotensialet. Det gravitasjonelle Yukawapotensialet har formen

$$U = -\frac{GM}{r} e^{-\frac{r}{\lambda_g}}, \quad (1)$$

der  $\lambda$  er gravitonets reduserte Comptonbølglengde. Ved å derivere finnes at den tilsvarende Yukawakraften på for eksempel en planet med masse  $m$  er

$$F = -\frac{dV}{dr} = -\frac{GMm}{r^2} \left(1 + \frac{r}{\lambda_g}\right) e^{-\frac{r}{\lambda_g}}. \quad (2)$$

**Øvre grense for gravitonets masse fra observasjoner av gravitasjonsbølger**

LIGO-teamet rapporterte sommeren 2017 om registrering av gravitasjonsbølger fra kollisjon av to svarte hull med omtrent 31 og 19 solmasser [1]. De brukte observasjonene blant annet til å beregne en øvre masse på gravitonet, og viste at  $m_g < 7,7 \cdot 10^{-23} \text{ eV}/c^2$ . Det svarer til en redusert Comptonbølglengde  $\lambda_g > 1,6 \cdot 10^{13} \text{ km} = 1,8 \text{ lysår}$ .

**Øvre grense for gravitonets masse fra observasjoner av planetbevegelser i solsystemet**

I vårt solsystem er de typiske avstandene bare opp til noen lystimer. Det viser at  $r/\lambda_g \ll 1$  i solsystemet. Vi kan derfor med god nøyaktighet bruke en rekkeutvikling av  $e^{-r/\lambda_g}$  til 2. orden i  $r/\lambda_g$ ,

$$e^{-\frac{r}{\lambda_g}} \approx 1 - \frac{r}{\lambda_g} + \frac{1}{2} \frac{r^2}{\lambda_g^2}. \quad (3)$$

Innsetting av denne tilnærmelsen i likning (2) gir

$$F \approx -\frac{GMm}{r^2} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{r^2}{\lambda_g^2}\right). \quad (4)$$

Vi ser at modifieringen av Newtons gravitasjonslov fra gravitonets masse har størst betydning for store avstander.

Kraftloven (4) fører til en modifiering av Keplers 3. lov. La oss betrakte en planet som går i nesten sirkulær bane langs en ellipse med lengste halvakse  $a$ . Planetens sentripetalakselerasjon er med god nøyaktighet  $v^2/a = (2\pi/T)^2 a$ , der  $T$  er omløpstiden til planeten. Ved å bruke kraftloven (4) i Newtons 2. lov fås da

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 a = \frac{GM}{a^2} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{a^2}{\lambda_g^2}\right). \quad (5)$$

Til 2. orden i  $a/\lambda$  er

$$\left(1 - \frac{1}{2} \frac{a^2}{\lambda_g^2}\right)^{-1} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{a^2}{\lambda_g^2}. \quad (6)$$

Dermed fås at en planet i en nesten sirkulær, elliptisk bane rundt sola vil ha en periode gitt ved

$$\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \approx \frac{a^3}{GM} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{a^2}{\lambda_g^2}\right). \quad (7)$$

Det siste leddet i parentesen gir avviket fra Keplers 3. lov. Observasjoner av planetenes bevegelser passer med at dette leddet er null eller svært nær null. Observasjoner gir en øvre grense for størrelsen av dette leddet, og dermed en nedre grense for den reduserte Comptonbølglengden til gravitonet.

Den 31. juli 2018 publisert journalen *Classical and Quantum Gravity* en artikkel [2] av Clifford Will med tittelen: «Solar system versus gravitational-wave bounds on the graviton mass». Der brukte han observasjoner av planetenes bevegelser i solsystemet i kombinasjon med likning (7) til å bestemme en nedre grense for gravitonets

Comptonbølgelengde. Han fant at den reduserte Comptonbølgelengden til gravitonet er større enn  $(1,2-2,2)10^{14}$  km, dvs. mellom 13 og 24 lysår.

Nå er det ikke fullt så enkelt å gjøre så nøyaktige beregninger som denne grensen indikerer, som det kan se ut til ovenfor. Det var også nødvendig å utvikle et dataprogram der man tok hensyn til gravitasjonskreftene mellom planetene når deres bevegelser skulle beregnes. Will skriver at i det programmet han brukte i denne delen av undersøkelsen, var virkningen av gravitonets masse på kraftvirkningen mellom planetene ikke inkludert. Dette introduserer en systematisk usikkerhet i bestemmelsen av en øvre grense for gravitonet som han valgte å neglisjere.

En fransk gruppe fysikere har utviklet et program for å beregne planetenes gravitasjonsvirkninger på hverandre, der en mulig masse for gravitonet er inkludert. Dette ledet til en ikke fullt så streng øvre grense for gravitonets masse som den Will kom frem til, men til gjengjeld mer pålitelig siden en kilde til systematisk usikkerhet er eliminert i stedet for neglisjert. Deres forskningsrapport [3] ble publisert i *Physical Review Letters* 18. oktober 2019. De fant at den reduserte Comptonbølgelengden for gravitonet ikke kan være mindre enn  $1,8 \cdot 10^{13}$  km eller 2,0 lysår. Det svarer til en øvre grense for gravitonets masse på  $6,8 \cdot 10^{-23}$  eV/c<sup>2</sup>.

### Øvre grense for gravitonets masse fra observasjoner av dynamikken til en galaksehopp

Den 3. februar 2018 ble det publisert en artikkel [4] i *Physics Letters B* av den indiske fysikeren Shantanu Desai med tittelen: «Limit on graviton mass from galaxy cluster Abell 1689». Galaksehopper er de mest massive gravitasjonelt bundne objektene i universet. De strengeste restriksjonene på den øvre grensen av gravitonets masse

vil derfor kunne oppnås ved å studere galaksehoppens dynamikk og bevegelser.

Desai brukte likning (2) i sammenheng med observasjoner og modeller av massefordelingen i galaksehopen til å utlede en øvre grense for gravitonets masse. Han konkluderer: «Vår estimerte grense for gravitonets masse er  $m_g < 1,4 \cdot 10^{-29}$  eV/c<sup>2</sup>, eller uttrykt ved gravitonets Comptonbølgelengde  $\lambda_g > 9,1 \cdot 10^{19}$  km med 90 % konfidensnivå. Dette svarer til at gravitasjon har en rekkevidde på minst 10 millioner lysår.

### Konklusjon

Etter disse undersøkelsene er det klart at gravitasjon har lang rekkevidde – minst av størrelsesorden 10 millioner lysår. Dette er en restriksjon alle som lager modifiserte gravitasjonsteorier må ta hensyn til. ■

### Referanser

1. P.B. Abbott og medarbeidere: «GW170104: Observation of a 50-Solar Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2». *Phys. Rev. Lett.* 118, 221101 (2017).
2. C.M. Will. «Solar system versus gravitational-wave bounds on the graviton mass». *Class. Quant. Grav.* 35, 17LT01 (2018).
3. L. Bernus og medarbeidere. «Constraining the Mass of the Graviton with Planetary Ephemeris». *Phys. Rev. Lett.* 123, 161103 (2019).
4. S. Desai. «Limit on graviton mass from galaxy cluster Abell 1689». *Physics Letters B* 778, s. 325–331 (2018).

# Fullerén- $C_{60}$ -molekylet som overrasket verden

**Epokegjørende resultater i et laboratorium ved Rice universitetet i USA i 1985 ga opphav til en ny klasse karbonstoffer med anvendelser i faste stoffers fysikk, og førte også til fascinerende astrofysiske oppdagelser.**

**Unni Eikese**th Institutt for lærerutdanning, NTNU

*Denne artikkelen er en bearbejdet versjon av et av kapitlene i boka [1]. Redaksjonen har lagt til et avsnitt om halvlederegenskapene til fulleréner.*

Når mellomstore stjerner dør, kolliderer de og kaster de ytre lagene ut i rommet som en sky av støv. Slike støvskyer eller tåker lyser ofte spøkelsesaktig vakkert i det svake lyset fra restvarmen fra den kollapsede stjernen, og de er fulle av interessant fysikk og kjemi. I 2010 var to forskerteam – uavhengig og uvitende om hverandre – i gang med å undersøke hvilke støvpartikler som fantes i slike planetariske tåker, ved hjelp av målinger med NASAs Spitzer-teleskop. Det ene teamet studerte en tåke i vår hjemlige galakse Melkeveien, det andre så på tåker i to galakser i utkanten av Melkeveien kalt De magellanske skyer. Begge gruppene oppdaget linjer i spektrene som tydet på funn av et helt spesielt molekyl som man hadde lett etter i rommet i 25 år, det såkalte fotballmolekylet. Men

i mellomtida var  $C_{60}$ -molekylet blitt framstilt og grundig studert her på jorda.

## **Fotballmolekylets tidlige historie**

Fotballmolekylets historie startet på en måte i det ytre rom. På slutten av 1960-tallet og utover 1970-tallet oppdaget astrofysikere at verdensrommet inneholder karbonholdige og nitrogenholdige molekyler. Forskerne fant blant annet molekyler som ammoniakk, metanol, karbonmonoksid, formaldehyd, etanol og hydrogencyanid. Alle disse utgjør byggesteiner for større biologiske molekyler, som igjen er en forutsetning for liv. Oppdagelsene åpnet derfor opp for muligheten for at livet kunne ha oppstått utenfor vårt solsystem.

Forskere var kjent med at det fantes mye karbon ute i verdensrommet – fordi karbonatomer er et resultat av kjernereaksjoner i stjerner. Når mellomstore stjerner som vår egen sol har brent opp det meste av hydrogenbrenselet i fusjonsprosessen, går de inn i siste fase av livet, der de eser opp til en såkalt rød kjempe, samtidig som de begynner å fusjonere heliumkjerner til karbon og oksygen og nitrogen. Derfor kunne man forvente at det var mye karbon i skyer rundt slike kollapsede stjerner. Men til nå hadde man ikke visst hvilken form dette karbonet var i. Hvor mange karbonmolekyler fantes der ute mellom stjernene, og hvor lange kunne karbonkjedene bli?

**Figur 1.** I 2010 ble fotballmolekylet oppdaget i rommet for første gang ved hjelp av Nasas Spitzer-teleskop. Molekylet er oppdaget i planetære tåker, slike som NGC 2440, som er avbildet i denne illustrasjonen.

I 1984 kom den britiske forskeren Harold Kroto over det perfekte instrumentet for å gjøre et slikt eksperiment, da han var på et besøk hos Robert Curl og Rick Smalley ved Rice University i Houston i USA. I laboratoriet til Rick Smalley studerte forskerne eksotiske former av silisium, som er en halvleder som er svært godt egnet som materiale i elektronikk. De nye silisiumforbindelsene ble produsert ved å bombardere en skive med silisium med pulser av laserstråler i et instrument som Smalley hadde bygd fra grunnen av, et såkalt «laser-supersonic cluster beam»-apparat. Der laserstrålene traff skiven, fordampet silisiumatomer til en varm damp med temperatur på flere titalls tusen grader, varmere enn overflaten til en stjerne av solas type. En overlydsgassvind av helium blåste deretter silisiumatomene innover i et kammer, og i gass-strømmen samlet atomene seg til nye molekyler, som til slutt ble blåst inn i et massespektrometer for analyse. Dette var akkurat det instrumentet man trengte for å gjenskape forholdene i en stjerne. Det var bare å bytte ut silisiumskiven med en skive av karbon.

### Det forunderlige $C_{60}$ -molekylet

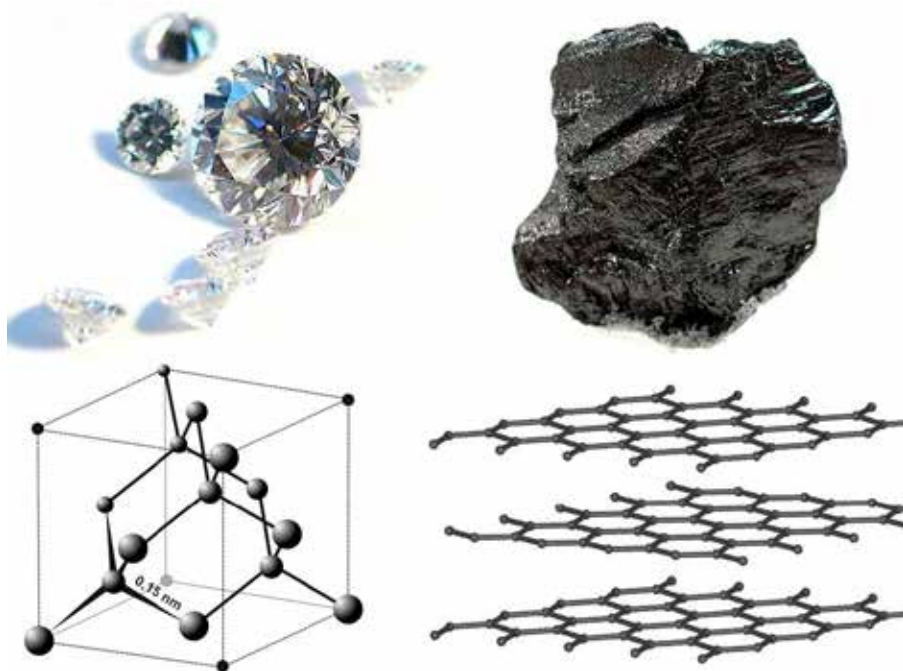
I september 1985 gikk de i gang med forsøkene [2]. Allerede i de første eksperimentene fant de karbonkjeder med lengde opp til ni karbonatomer, noe som var forventet. Men det dukket også opp noen uventede «gjester» i målingene: En grafisk fremstilling av måleresultatene viste en høy topp

som tilsvarte seksti karbonatomer, og en mindre topp ved sytti karbonatomer. De to toppene var der i alle eksperimentene. Toppen ved seksti karboner var alltid høyest, med toppen ved sytti karboner som et lite vedheng.

Forskerne begynte derfor å undersøke på hvilke måter man kunne sette sammen seksti karbonatomer. Det var naturlig å starte med de to mest vanlige formene for karbon i naturen: grafitt og diamant (figur 2).

I grafitt er hvert karbon bundet til tre andre karbonatomer i et todimensjonalt heksagonalt mønster som minner om hønsenetting. Slike ett atom tykke lag ligger over hverandre, noe som gjør at lagene lett kan slites av og legge igjen spor, slik det gjør hver gang vi skriver med en blyant på et papir. I diamant er hvert karbonatom bundet til fire andre i et tredimensjonalt nettverk der alt henger sammen med alt, slik at strukturen blir svært sterk og stiv.

Var klyngen med seksti karbonatomer bundet til hverandre som karbonatomene i diamant, eller hadde de å gjøre med et fragment av et nettinggitter som i grafitt? I begge tilfeller ville det være umulig å sette sammen seksti karboner uten å ende opp med dinglede ender uten avsluttende bindinger, noe som ville gjøre hele strukturen ustabil. I naturen ville ikke dette være noe problem, fordi endene straks ville bli okkupert av hydrogenatomer som alltid er tilgjengelig. Men i eksperimentet til Kroto og kolleger var ikke hydrogen til stede, så det var usannsynlig. En annen løsning forskerne begynte å diskutere, var om et flak av grafitt på en måte kunne ha foldet seg sammen, slik at det ikke var noen løse ender. I så tilfelle ville det kunne ha oppstått en lukket struktur, et slags bur av seks-



**Figur 2.** De to mest vanlige formene for grunnstoffet karbon; diamant og grafitt. (Illustrasjon: Itub/Materialscientist, Wikimedia Commons)



**Figur 3.** Buckminsterfullerenen,  $C_{60}$  eller fotballmolekylet. (Illustrasjon: Benjah-bmm27/ Wikimedia Commons)

kanter. Men hvordan ville et slikt molekyl kunne se ut?

Arkitekten Buckminster Fuller hadde spesialisert seg på å lage byggverk basert på sekskantete former. Han kalte dem geodetiske kupler. En slik bygning hadde blant annet vært hovedattraksjonen på USAs paviljong under verdensutstillingen i Montreal i 1967. Både Smalley og Kroto hadde besøkt utstillingen og vært på innsiden av kupelen, men det var nå nesten tjue år siden. Ingen av dem kunne husket hvilke mangekanter den var bygd opp av.

Rick Smalley fikk tak i ei bok om Buckminster Fuller slik at de kunne studere hvordan kuplene var bygd. Kroto kom til å tenke på en liten papirmodell av en stjernehimme med stjernetegn, som han hadde laget sammen med barna, og som fortsatt lå hjemme hos ham i Sussex. Han mente å huske at den hadde bestått av sekskanter med noen femkanter innimellom. Flere av forskerne forsøkte å bygge modeller. En av Smalleys doktorgradsstudenter forsøkte å sette sammen gummibjørner og tannpirkere i heksagoner, men byggverket falt sammen. Rick Smalley klypte ut sekskanter i papir og forsøkte å lime dem sammen. Han oppdaget at en struktur med bare sekskanter var umulig å folde sammen uten at det oppstod sprekker og rynker, men da han la inn noen femkanter innimellom sekskantene, kurvet strukturen seg perfekt sammen. Klokket tre på natten hadde han puslet sammen en perfekt papirball med nøyaktig seksti hjørner, som bestod av tolv femkanter og tjue sekskanter.

Da Smalley viste fram papirmodellen dagen etter, ble Kroto ekstatisk. Han kjente igjen stjernehim-

melmodellen han selv hadde puslet med sammen med barna sine. Strukturen var så vakker at den simpelthen måtte være riktig, var hans innskyttelse. Smalley ringte så og rådførte seg med matematikere på universitetet om hva slags geometrisk struktur dette var. Etter en stund ringte de tilbake og fortalte at det var mange måter å beskrive strukturen på, men den enkleste måten å si det på, var at de hadde en (europeisk) fotball (figur 3).

Bare tretten dager etter at forsøkene hadde begynt sendte forskerteamet inn en tosidert artikkel som beskrev funnet. To måneder senere kom artikkelen på trykk i Nature med 5 forfattere [3]. Fotballmolekylet ble gitt betegnelsen  $C_{60}$  og navnet buckminsterfulleren, etter arkitekten Buckminster Fuller, som satte dem på sporet etter strukturen.

### $C_{60}$ som halvleder

Hensikten med eksperimentene ble formulert i første setning av artikkelens sammendrag: «I løpet av eksperimenter med den hensikt å forstå mekanismen som danner lang-kjedete karbonmolekyler i det interstellare rommet ....». De kjente til eksistensen av lang-kjedete karbonmolekyler i planetariske tåker og ville prøve å forstå hvordan de var blitt dannet.

Men det har i ettertid vist seg at deres oppdagelse var starten på en forskning som også har store muligheter for anvendelser innen elektronikk, materialforskning og medisinsk forskning. Ved NTNU var man tidlig ute med å undersøke egenskapene til disse molekylene. Allerede i 1988 publiserte en forskergruppe ved Institutt for fysikalsk kjemi, NTH, under ledelse av professor Sven J. Cyvin, en artikkel hvor de rapporterte om kvanteteoretiske beregninger av vibrasjoner for fotballene-molekylene (som de kalte dem), noe som gjorde det mulig for dem blant annet å beregne frekvensen til fire spektrallinjer fra dem i den infrarøde delen av spekteret [3].

Betydningen av fulleren-molekylene oppdagelse ble tydeliggjort ved at W.H. Kroto, F. R. Curl og Smalley fikk Nobelprisen i kjemi i 1996 «for sin oppdagelse av fullerener».

I mellomtida hadde metoden for fulleren-ramstillingen blitt utviklet slik at det var bra tilgang på prøvemateriale. Alt før 1990 var millimeterstore krystaller framstilt ved fordamping av løsninger. Materialet har en fin rødfiolett farge. Strukturstudier med røntgen- og elektron-diffraksjon viste en kubisk struktur av tettpakkete  $C_{60}$ -molekyler med sidekant 1,417 nm, og IR-spektroskopi avslørte vibrasjonsspektrum i godt samsvar med beregningene. Hvert enkeltmolekyl har ytre diameter 1,018 nm, indre diameter 0,348 nm, og kan gi

plass i hulrommet til små atom. Krystallinsk  $C_{60}$  har halvlederegenskaper som elektron-akseptor, noe som er hovedgrunnen for bruk i elektronikk og supraleiding. [5].

### Forekommer fotballmolekyler naturlig?

At et slikt molekyl var blitt skapt i et laboratorium på jorda, var imidlertid ikke noe bevis for at det eksisterer naturlig, verken i rommet eller på jorda, selv om oppdagerne var temmelig sikre på at molekylet må være svært utbredt i universet. Det tok dessuten noe tid før forskere klarte å produsere nok av stoffet til å overbevise vitenskapssamfunnet om at  $C_{60}$  virkelig har form som et fotballmolekyl. I ettertid viste det seg faktisk at den japanske forskeren Eiji Osawa hadde forutsett en slik molekylform for karbon femten år tidligere, men dette var bare blitt publisert på japansk, og var derfor ikke kjent internasjonalt.

I løpet av de neste to ti-årene publiserte forskergrupper over hele verden tusenvis av artikler om  $C_{60}$  og dens familie av lignende store molekyler av form som kuler, hule karbonsylindrer eller karbonrør. De fikk alle samlebetegnelsen fulleren.  $C_{70}$  viste seg blant annet også å være en ball, med form som amerikansk fotball, bare ti karbonatomer større og litt mindre symmetrisk enn fotballmolekylet. I 1992 ble  $C_{60}$ -molekyl funnet i naturlige kilder på jorda, i det karbonrike mineralet shungitt, og i 2003 ble de påvist i materiale fra en meteoritt.

Medisinske forskere eksperimenterte med mulighetene for å laste medisinsk interessante molekyler inn i den hule  $C_{60}$ -strukturen for å kunne frakte dem til ønsket sted i kroppen. Et forskerteam var til og med i stand til å lage en slags bucky-flaske, der det var mulig å åpne strukturen, laste den med ett vannmolekyl, og siden sette på en kork!

25 år etter oppdagelsen var det fortsatt ingen bevis for at fotballmolekylet eller andre fullerener eksisterer i verdensrommet, der oppdagerne Kroto, Smalley og Curl først og fremst hadde forventet å finne dem.

### Fotballmolekyler i verdensrommet

I 2010 endret dette seg da to ulike forskergrupper – uavhengig av hverandre – studerte måledata fra infrarødt-spektrometeret IRS om bord i Spitzer-teleskopet. Jan Cami ved University of Western Ontario og kollegene hans var først ute og oppdaget to linjer som kunne tilskrives  $C_{60}$  og  $C_{70}$  i spekteret fra en nokså ung planetarisk tåke i Melkeveien, kalt Tc 1. Camis resultater kom på trykk i Science i september 2010.

Mens Cami og kollegene hans ennå ikke hadde publisert sine resultater, var astronomen Letizia

Stanghellini og et team forskere samlet i Madrid for å gå gjennom data for 150 planetariske tåker i De magellanske skyer. I spektrene oppdaget de noen linjer som ble gjenkjent som spektrallinjer for  $C_{60}$ .

Siden de hadde nøyaktige tall for avstandene til disse planetariske tåkene, kunne de også beregne ganske nøyaktig hvor mye  $C_{60}$  som var til stede. I den ene tåken viste massen av stoffet seg å tilsvare 15 ganger massen av vår måne, eller 20 prosent av jordas masse. Selv om det utgjorde bare en forsvinnende del av den totale massen av alt karbonet i tåken, ble det klart at det finnes enorme mengder fotballmolekyler ute i rommet – mellom stjernene.

Artikkelen fra Stanghellini og medarbeidere ble publisert i november 2010. Året etterpå fikk Harold Kroto se spektrene til Stanghellini ved et besøk på institusjonen hennes, National Optical Astronomy Observatory i Tucson, og han kunne da svært entusiastisk bekrefte at linjene de hadde funnet, virkelig kom fra  $C_{60}$ . ■

### Referanser

1. Unni Eikeseth og Anette Lykknes. «Periodesystemet – fra alkymi til kjernekjemi». Museumsforlaget (2019). <https://museumsforlaget.no/produkt/periodesystemet/>
2. R.E. Smalley. «Discovering the fullerenes». Nobel Lecture 7. desember 1996. Internettadresse: [www.nobelprize.org/uploads/2018/06/smalley-lecture.pdf](http://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/smalley-lecture.pdf)
3. W.H. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, F.R. Curl og R.E. Smalley. « $C_{60}$ : Buckminsterfullerene». *Nature* 318, s. 162–163 (1985).
4. S.J. Cyvin, E. Brendsdal, B.N. Cyvin og J. Brunvoll. «Molecular vibrations of footballene». *Chemical Physics Letters* 143 nr. 4, s. 377–380 (1988).
5. Artikkel i Wikipedia med tittel: Buckminsterfullerene. Internettadresse: <https://en.wikipedia.org/wiki/Buckminsterfullerene>

# Utforsking av hjernen med MR-avbildning

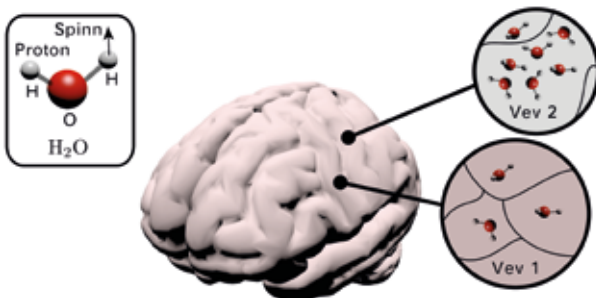
**Observasjon av ulike organer og strukturer i kroppen, uten kirurgiske inngrep, har medført en betraktelig forbedring av medisinske diagnoser, så vel som kirurgiske inngrep. MR (magnetisk resonans-avbildning) benytter sterke magnetfelt og radiobølger for å danne tredimensjonale bilder av kroppens indre strukturer, deriblant i den menneskelige hjernen. Dette innlegget beskriver hvordan MR kan benyttes til å måle diffusjon av væsker i hjernen, samt hvordan dette kan benyttes til å spore hjernens nervefibre.**

**Richard Olsen** NordicNeuroLab og UiB, Bergen

Grunnlaget for å benytte MR (magnetisk resonans-avbildning) til å generere bilder som består av kontrastforskjeller mellom materie med forskjellig protoninnhold ble publisert allerede i 1955 og 1956 [1, 2], mens det første tredimensjonale bildet, bestående av to væskefylte sylindre, ble publisert i *Nature* i 1973 [3].

Et tredimensjonalt MR-bilde av hodet består av en rekke enkeltbilder som ligger plassert over hverandre. For eksempel kan det første bildet være et snitt av halsen mens det siste bildet er et snitt av toppen på hodet. De andre bildene kan da være snitt som ligger fordelt med lik avstand mellom hals og topp av hodet. I dag er det ikke uvanlig å produsere fra 256 snittbilder med oppløsning på  $256^2$  punkter, altså  $256^3$  punkter i volumet,

**Figur 1.** Hjernen består av ulike strukturer, deriblant ulike vevstyper og blodårer. Disse inneholder vannmolekler ( $H_2O$ ), som består av oksygen (O) og hydrogen (H). Et hydrogenatom har en protonkjerne med et gitt spinn. Størrelsesorden på ett vannmolekyl er noen tidels nano-meter. Vannmolekyler vil ha ulik mobilitet og diffusjon, så vel som tetthet, i ulike strukturer. (Illustrasjon: basert på STL-fil av hjernen fra clara.io av Ben Houston)



opptil  $512^3$  punkter. Dette gir en oppløsning i hver retning på mellom 1 til 0,5 mm (antatt et skannet volum på 250 mm i hver retning). Dette er godt nok til å kunne skjelne mellom strukturer på størrelsesorden med nervefiberbunter.

En MR-sekvens definerer rekkefølge, samt utforming, av elektromagnetiske pulser og magnetiske gradienter som benyttes i en gitt type MR-opptak. Ved å utføre multiple MR-skann med magnetiske gradienter i ulike retninger, så vel som å benytte mer avanserte MR-sekvenser for de elektromagnetiske signalene som sendes ut, er det mulig å hente ut dynamisk informasjon om væskene i hjernen, slik som væskenes selvdifusjon. I det følgende vil en mer detaljert beskrivelse bli gitt av hvordan dette kan benyttes til å identifisere nervefibre i den menneskelige hjernen. Dernest vil ulike applikasjonsområder bli beskrevet.

## Grunnleggende MR fysikk

Vann ( $H_2O$ ) er en viktig bestanddel av menneskekroppen, deriblant hjernen, som er hovedfokus i det følgende. Vannet vil oppholde seg i forskjellige miljø, hvor hvert miljø gir betydelig endring i vannets oppførsel. Dette er illustrert i figur 1 for vannmolekyler innen ulike vev i hjernen. Både konsentrasjonen av vann og vannets selvdifusjon vil variere mellom ulike vevstyper og er av interesse innen MR. Vi vil derimot i det følgende fokusere på hvordan vannets selvdifusjon kan måles ved hjelp av MR og hvordan dette kan benyttes til å kartlegge hjernens nervefiberbunter.

Som illustrert i figur 1, har protonet i hydrogenatomene i vannmolekylene spinn. Vi begynner med å se på oppførsel for enkelspinn i vakuum i konstante magnetfelt. Spinn,  $S$ , det er snakk om her er en kvantemekanisk effekt og eksister derfor ikke som et klassisk fenomen. Spinn er derimot veldig likt sin klassiske motpart, dreieimpulset,  $J$ . Disse er begge vektorstørrelser og deler samme enhet. Videre vil oppførselen til forventningsverdien av kvantemekaniske spinn være analogt med en strømsløyfe (med en assosiert dreieimpuls for ladningene i sløyfen) som plasseres i et magnetfelt (se figur 2a). Både strømsløyfen og kvantemekaniske spinn vil gi opphav til et magnetisk moment,  $\mu$ . Et magnetisk moment,  $\mu$ , har retning normalt på strømsløyfen og forteller hvordan en strømsløyfe påvirkes av magnetfeltet,  $B$ . Vi kan da benytte strømsløyfen for å forstå hvordan  $\mu$  oppfører seg i magnetfeltet og derfor hvordan  $\mu$  oppfører seg for kvantemekaniske spinn [4]. Man finner da at  $\mu$  vil få en presesjon rundt det magnetiske feltet (i likhet med hvordan en snurrebass danner en presesjon rundt gravitasjonsfeltet, beskrevet av tyngde-

akselerasjonen,  $\mathbf{g}$ ). Strømsløyfes presesjon er illustrert i figur 2a. Dette blir referert til som Larmor-presesjon. En mer detaljert beskrivelse er gitt i boksen.

Det er selvfølgelig andre molekyler i hjernen, så vel som andre steder i kroppen, som inneholder hydrogenatom (for eksempel i fett) som også vil bli lokalisert på lik linje med hydrogen i vann, men hovedbestanddelen kommer fra vann. Ut fra det vi har sett fra det overforstående, så vil disse molekylene spinn, dvs. spinnets til molekylene hydrogenatomer, rette seg langs et påtrykt magnetfelt med en gitt presesjon. Et slikt magnetfelt vil være konstant til stede i en MR-skanner og vil i et normalt tilfelle være generert av en superledende permanentmagnet, nedkjølt av flytende helium. Det er derfor ikke et magnetfelt som slås av og på uten mye arbeid.

For å kunne videre manipulere spinnene som nå har en presesjon rundt det konstante magnetfeltet, benyttes ytterligere magnetfelt, men i form av radiobølger (som består av oscillerende elektriske og magnetiske bølger som er vinkelrett på hverandre). En radiobølge som brer seg i samme retning som  $\mathbf{B}$  vil da sette opp oscillerende magnetfelt (så vel som et elektriske felt) i planet som ligger vinkelrett på det permanente magnetfeltet,  $\mathbf{B}$ .

Vi kan tenke oss en radiobølge med en vinkel-frekvens  $\omega_{RF}$  som rettes langs  $\mathbf{B}$ , og  $\mathbf{B}$  er parallell med z-aksen, slik at radiobølgen sitt magnetiske felt,  $\mathbf{B}_{RF}(t)$ , er parallell med x-aksen. Videre kan vi forestille oss at vi er i et nytt koordinatsystem som roterer rundt z-aksen med presesjonsfrekvensen til  $\mu$ . I dette koordinatsystemet vil  $\mu$  stå i ro dersom  $\mathbf{B}_{RF}(t)$  fjernes (se figur 2b). Dersom  $\mathbf{B}_{RF}(t)$  er tilstede vil det oscillere langs x-aksen og vil derfor, i det rote-

### Utleddning av Bloch-ligningen for magnetiske moment

I det følgende vil den matematiske likheten mellom en strømsløyfes dreieimpuls og det kvantemekaniske spinnet benyttes for å si noe om hvordan en samling med kvantemekaniske spinn vil gjennomsnittlig bevege seg i et magnetfelt,  $\mathbf{B}$  [5].

Gitt en strømsløyfe, som vist i figur 2a, definert av radiusen,  $r$ , og strømmen,  $I$ , vil en finne en dreieimpuls, definert ved

$$\mathbf{J} = \mathbf{r} \times \mathbf{p},$$

hvor momentet,  $\mathbf{p}$ , er assosiert med ladningen som beveger seg i strømsløyfen. Det magnetiske momentet har samme retning som dreieimpulsen og de to størrelsene vil øke proporsjonalt, hvilket betyr at

$$\mu = \gamma \mathbf{J}. \quad (1)$$

Vi kan finne hvordan  $\mu$  utvikler seg over tid ved å finne den tidsderiverte. Dette gir, ved å benytte Newtons andre lov,

$$\frac{d\mu}{dt} = \gamma \mathbf{r} \times \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \gamma \mathbf{r} \times \mathbf{F} = \gamma \boldsymbol{\tau}, \quad (2)$$

hvor  $\mathbf{F}$  er kraften som virker på ladningene i strømsløyfen og  $\boldsymbol{\tau}$  er det assosierte kraftmomentet. Kraftmomentet kan beskrives ved å integrere opp del-kraftmoment langs den lukkede strømsløyfen. Dernest benyttes uttrykket for kraften som påvirker en gitt ladning i et magnetfelt. Da får vi [4,5]

$$\boldsymbol{\tau} = \oint d\boldsymbol{\tau} = \oint \mathbf{r} \times d\mathbf{F} = \oint \mathbf{r} \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})dq \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &= \oint \mathbf{r} \times (d\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \frac{dq}{dt} \\ &= I \oint [d\mathbf{l} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{B}) - \mathbf{B}(\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l})] \\ &= I \oint d\mathbf{l}(\mathbf{r} \cdot \mathbf{B}) = I \mathbf{a} \times \mathbf{B} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}, \end{aligned}$$

hvor  $d\mathbf{l}$  er et infinitesimalt linjesegment langs strømsløyfen og  $\mathbf{a}$  er vektorarealet av strømsløyfen. I beregningen ble likheten

$$\oint (\mathbf{C} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{l} = \mathbf{a} \times \mathbf{C},$$

for en vilkårlig vektor,  $\mathbf{C}$ , benyttet. Ved å kombinere ligning (2) og (3) får vi Bloch-ligningen for ett enkelt magnetisk moment,

$$\frac{d\mu}{dt} = \gamma \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}. \quad (4)$$

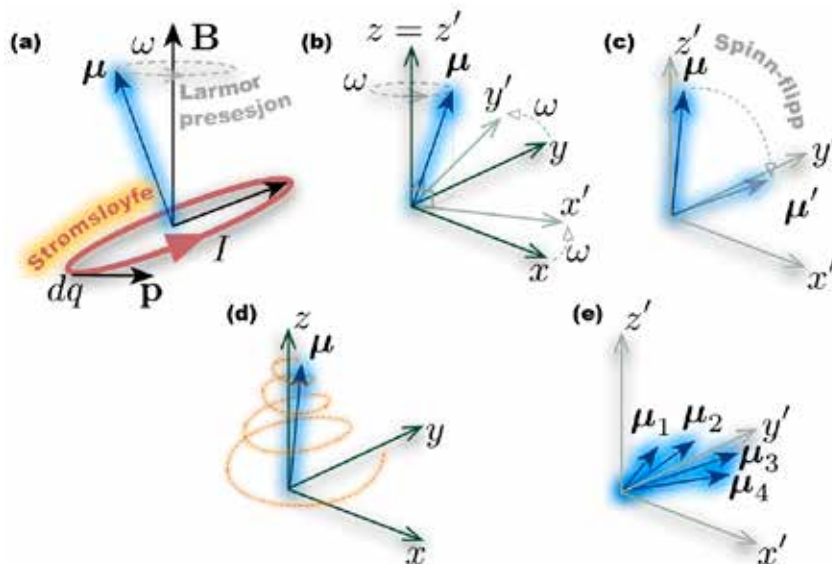
Hvilket betyr at den magnetiske momentvektoren,  $\boldsymbol{\mu}$ , vil bevege seg i en retning som er vinkelrett på planet som formes av den nåværende konfigurasjonen til  $\boldsymbol{\mu}$  og det magnetiske feltet,  $\mathbf{B}$ . Mer detaljert, så vil løsningen av differensialligningen være en magnetisk momentvektor med presesjon rundt  $\mathbf{B}$ , der vinkelfrekvensen er  $\omega = \gamma |\mathbf{B}|$ , hvor  $\gamma$  er ca. 42,6 MHz/T for hydrogen (det vil si ca. 42 millioner rotasjoner for hver økning av magnetfeltet  $\mathbf{B}$  sin styrke med én Tesla [6]).

For et kvantemekanisk spinn har vi at

$$\boldsymbol{\mu} = \gamma \mathbf{S},$$

hvilket, ved å sammenligne med  $\mathbf{J}$  i ligning (1), viser sammenhengen med den klassiske strømsløyfen.

**Figur 2.** (a) Strømsløyfe med presesjon rundt et magnetfelt. (b) Roterende koordinatsystem, merket med  $x'$ ,  $y'$  og  $z'$ . (c) Spinn-flipp i det roterende koordinatsystemet. (d) Spinn-flipp i laboratorie-koordinatsystemet. (e) Spinnvektorer i  $(x',y')$ -planet som er ute av fase, som medfører en spredning rundt  $y'$ .



rende koordinatsystemet, medføre en presesjon av  $\mu$  rundt  $x$ -aksen. Man kan intuitivt forestille seg at rotasjonen av  $\mu$  rundt  $x$ -aksen blir raskere dersom frekvensen til radiobølgen er lik Larmor-frekvensen (dvs. presesjonsfrekvensen). Da vil radiobølgens magnetfelt kunne «dytte»  $\mu$  på en mer effektiv måte. Dvs. vi oppnår resonans, på samme måte som om man prøver å dytte på en pendel.

Det er nå klart at radiobølger kan benyttes for å oppnå en rotasjon (dvs. presesjon) rundt en ønsket akse, i tillegg til den konstante presesjonen rundt  $\mathbf{B}$ . Videre kan vi bestemme oss for hvor mye vi ønsker å rotere  $\mu$  rundt den ønskede akse ved i stedet å sende ut en radiobølgepuls med korrekt varighet. En  $90^\circ$  rotasjon rundt  $x$ -aksen til det roterende koordinatsystemet blir kalt et  $90^\circ$  «spinn-flipp». Dette er illustrert i figur 2c for laboratorie-koordinatsystemet, så vel som i det roterende koordinatsystemet i figur 2d.

Til nå har vi kun sett på spinn i vakuum som ikke har vekselvirkning seg imellom. Magnetiseringsvektoren er definert som

$$\mathbf{M} = \frac{1}{V} \sum_i \mu_i,$$

hvor  $V$  er et volum og indeksen  $i$  løper over magnetiske moment i  $V$ . Magnetiseringsvektoren representerer da det gjennomsnittlige magnetiske momentet innen det gitte volumet. Ligning (4) tilsier da at

$$\frac{d\mathbf{M}(t)}{dt} = \gamma \mathbf{M}(t) \times \mathbf{B}.$$

Dette er Bloch ligningen uten vekselvirkning.

Magnetiseringsvektoren kan dekomponeres til en longitudinell del,  $\mathbf{M}_\parallel = M_z \hat{\mathbf{z}}$ , som har samme retning som det permanente magnetfeltet,  $\mathbf{B}$ , (hvor  $\mathbf{B}$  ligger parallelt med  $\hat{\mathbf{z}}$ ) og en transversell del,  $\mathbf{M}_\perp = M_x \hat{\mathbf{x}} + M_y \hat{\mathbf{y}}$ , som ligger i planet normalt

på  $\mathbf{B}$ . Dette medfører at Bloch-ligningen, uten vekselvirkninger, deles opp i to separate deler,

$$\frac{d\mathbf{M}_\parallel(t)}{dt} = \gamma \mathbf{M}_\parallel(t) \times \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

og

$$\frac{d\mathbf{M}_\perp(t)}{dt} = \gamma \mathbf{M}_\perp(t) \times \mathbf{B}. \quad (6)$$

Ligning (5) forteller oss at den longitudinelle magnetiseringen ikke endrer seg over tid. Dette endrer seg når en tar hensyn til vekselvirkning med omgivelsene. Det vil medføre at  $\mathbf{M}_\parallel$  vil endre seg proporsjonalt med avviket fra sin likevekts-verdi,  $\mathbf{M}_0$ , hvor likevektsverdien tilsvarer den laveste energitilstanden. Det er da klart at siden venstre side av den resulterende ligningen er på formen  $dM/dt$  og høyre side er på formen  $M$ , må proporsjonalitetskonstanten være på formen  $1/T$ , hvor  $T$  er en karakteristisk tid. Denne tiden blir kalt  $T_1$ . Den resulterende ligningen blir da

$$\frac{dM_z(t)}{dt} = \frac{1}{T_1} (M_0 - M_z),$$

hvilket tilsier at magnetiseringen endrer seg eksponentielt, som funksjon av tid, mot likevekts-magnetiseringen.

Den transverselle magnetiseringen fra ligning (6) vil bli påvirket av en superposisjon av det permanente magnetfeltet og magnetfeltene til nabospinn. Dette medfører lokale endringer i presesjonsfrekvensene til nærliggende spinn innen volumet,  $V$ , slik at disse spinner ut av fase i forhold til hverandre, hvilket gir en netto reduksjon i den transverselle magnetiseringsvektoren,  $\mathbf{M}_\perp$ . Desto større  $\mathbf{M}_\perp$  blir, desto større blir endringene i  $\mathbf{M}_\perp$ , som funksjon av tid. Derfor blir ligning (6) endret til

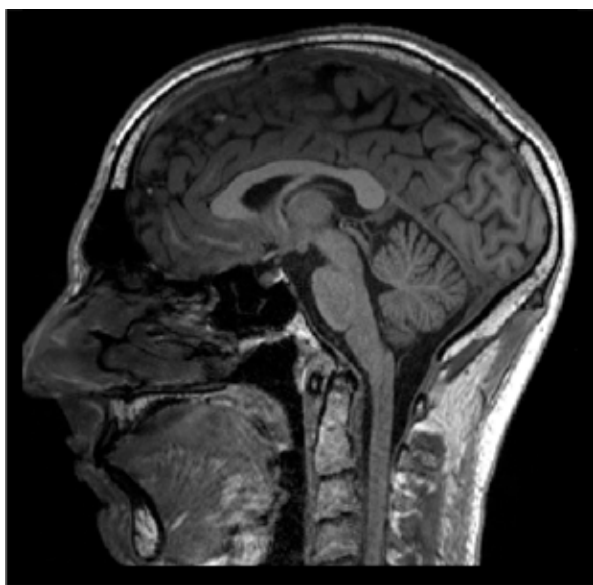
$$\frac{d\mathbf{M}_\perp(t)}{dt} = \gamma \mathbf{M}_\perp(t) \times \mathbf{B} - \frac{1}{T_2} \mathbf{M}_\perp(t),$$

hvor  $T_2$  er den karakteristiske tiden som er assosiert med spinn-spinn-vekselvirkning. Det kan også nevnes at lokale inhomogeniteter i det permanente magnetfeltet kan gi opphav til at spinn kommer ut av fase. Tiden assosiert med dette er referert til som  $T_2'$ .

Når magnetiseringsvektoren får en transversell komponent, vil den magnetiske fluksen assosiert med denne også få en presesjon tilsvarende magnetiseringsvektoren selv. Fra elektrodynamikken vet vi at en magnetisk fluksendring i en kabelspole gir opphav til en strøm i kabelspolen. Dette prinsippet benyttes i dynamoer i biler, kraftverk osv. for å produsere strøm (dvs. enten en permanentmagnet eller elektromagnet som roterer i en spole). På samme måte vil en MR-skanner benytte spoler for å registrere fluksendringer i magnetiseringsvektorene. Det er da klart at en samling med spinn som har blitt perturbert ved hjelp av en radiobølgepuls (RF-puls), og har fått en modifisert transversell magnetiseringsvektor, vil gi et annet signal i spolene enn en samling med spinn som er i sin laveste energitilstand. Ved å monitorere signalet som kommer fra spolene kontinuerlig vil en kunne måle hvordan protonene sine spinn endrer seg etter en påtrykt RF-puls.

### Det strukturelle bildet

De karakteristiske tidene  $T_1$  og  $T_2$  kan måles ved å benytte ulike RF-puls sekvenser. Her vil  $T_1$  være knyttet til den longitudinelle magnetiseringsvektoren, som igjen er knyttet til spinn-omgivelse vekselvirkninger. Tiden  $T_2$  er derimot knyttet til den transverselle magnetiseringsvektoren og derfor til spinn-spinn-vekselvirkninger. Målinger



**Figur 3.** Eksempel på MR-skann av et menneskehode, hvor man kan observere strukturer i hodet, så vel som i hjernen, ved hjelp av kontrastforskjellene.

av disse to parameterne vil derfor angi to ulike egenskaper ved materien som blir skannet.

Ulike strukturer i hjernen vil karakteriseres ved ulike verdier av  $T_1$  og  $T_2$ , som i tur kan konverteres til signalstyrker. Derfor vil en måling av disse parameterne, på posisjoner (volumelement) fordelt i et tredimensjonalt volum, kunne avbilde hjernens struktur. For å få til dette må vi kunne identifisere fra hvilken posisjon i volumet signalet kommer fra.

Svaret ligger i sammenhengen mellom Larmor-frekvensen,  $\omega$ , og styrken på magnetfeltet,  $\mathbf{B}$ , via den gyromagnetiske raten,  $\gamma$ , som kan beskrives som

$$\omega = \gamma \cdot |\mathbf{B}|.$$

Det vil si, for at radiobølgene skal ha maksimal effekt på spinnvektorene må de være i resonans med Larmor-frekvensen til protonene. Det er derfor mulig i stedet å benytte et inhomogent magnetfelt,  $\mathbf{B}(z)$ , som varierer langs en gitt akse,  $z$ . Da vil man kunne sende ut RF-pulser med ulik frekvens for å velge hvilket område langs  $z$ -aksen man ønsker å påvirke (dvs. vi velger ut et billedplan vi vil lese av), slik at man kan bygge opp et tredimensjonalt volum ved å lese av ett og ett bilde med gitt tykkelse langs  $z$ .

Prinsippet over kan også utvides til å kunne lokalisere signal fra en gitt voxel (volumelement) i tre dimensjoner. Dette blir gjort enklere, med tanke på behandling av signalene som kommer fra opptaksspolene i MR-skanneren, ved i stedet å behandle signalene i Fourier-rommet ( $k$ -rommet). Dette er mulig fordi signalet,  $s(t)$ , har formen

$$s(t) \sim \int M_1(\mathbf{r}, t) e^{i\phi(\mathbf{r}, t)} d^3r.$$

Magnetiseringen  $M_1$  er proporsjonal med spinn-tettheten,  $\rho(\mathbf{r})$ , mens et inhomogent magnetfelt som former en lineær gradient, medfører at  $\phi$  kan skrives med en linear avhengighet til  $\mathbf{r}$ . Dette betyr at det er mulig å skrive om uttrykket for signalet på formen

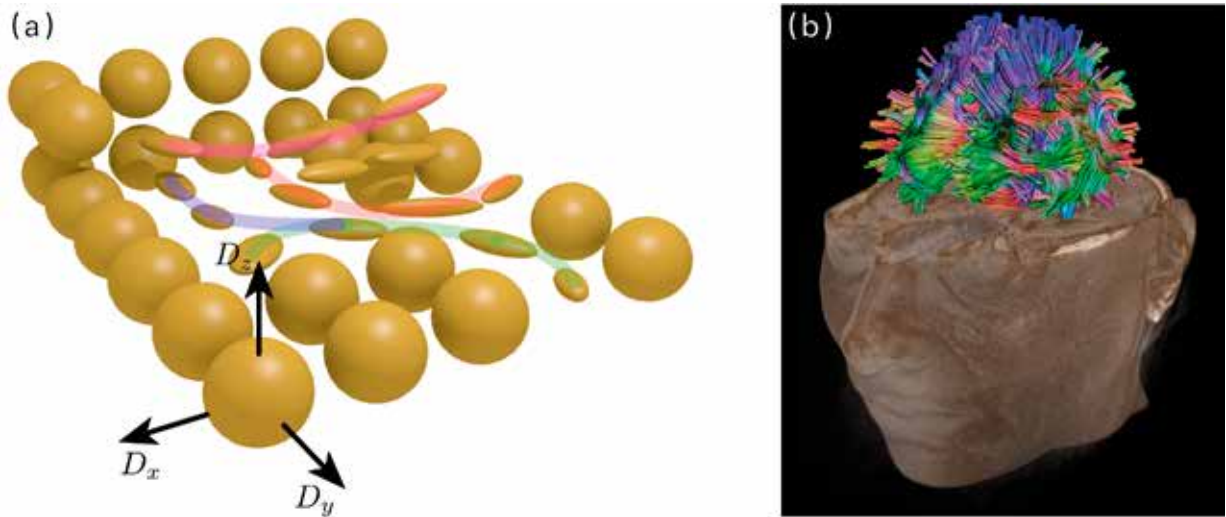
$$s(k) \sim \int \rho(\mathbf{r}, t) e^{-2\pi i \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} d^3r.$$

Dette kan gjenkjennes som Fourier-transformasjonen av spinn-tettheten. Da vet vi også at den inverse transformasjonen holder. Det vil si, spinn-tettheten i alle posisjoner,  $\mathbf{r}$ , kan finnes ved å Fourier-transformere signalet,  $s$ .

Et eksempel på et  $T_1$ -vektet strukturelt MR-bilde er vist i figur 3, hvor det er mulig å observere ulike strukturer i et menneskehode.

### Måling av diffusjon

Så langt har vi sett hvordan man kan benytte



**Figur 4.** (a) Diffusjon,  $D_x$ ,  $D_y$  og  $D_z$ , målt i tre retninger. Rød, blå og grønn linje antyder hvordan en algoritme kan spore nervefibre langs etter diffusjonsretningen til protoner (for det meste vannmolekyl). (b) Resultat fra et MR-skann, der strukturelle bilder fra MR-skanneren er satt sammen til volum som viser hodet til den som blir skannet. Sporing av hjernefibrene er vist som fargede tråder.

magnetfelt og RF-pulser til å studere hjernens strukturer ved å se på kontrastforskjeller mellom de ulike strukturene (dvs.  $T_1$ - og  $T_2$ -vektede bilder). Det er også mulig å måle diffusjon til vannmolekylene i hjernen.

Vi så tidligere at for en magnetiseringsvektor som har en ikke-forsvinnende transversell komponent, vil enkeltspinnene som bidrar til denne kunne komme ut av fase grunnet lokale variasjoner i magnetfeltet. Dermed vil den transverselle komponenten av magnetiseringen reduseres. Selv-diffusjon (grunnet Brownske bevegelser) av vannet medfører at enkeltspinn beveger seg i tilfeldige retninger, vekk fra utgangspunktet. Dermed vil enkeltspinn endre fase ettersom de beveger seg gjennom det ikke-uniforme magnetfeltet. Dette betyr at stor diffusjon vil gi en større reduksjon i magnetiseringen enn for lav diffusjon. Dette er prinsippet som benyttes for å måle diffusjon. Dette resulterer i en såkalt «diffusjonsvektet avbildning».

For å forstå prinsippet for hvordan diffusjon måles i en MR-skanner kan vi begynne med å studere et såkalt spinn-ekko. Dette er i utgangspunktet benyttet for å motvirke effekten av lokale gradienter i magnetfeltet. Man kan tenke seg et forenklet tilfelle der man kun har det permanente magnetfeltet  $\mathbf{B}$  og dernest sender ut en RF-puls for å oppnå et  $90^\circ$  spinn-flipp rundt  $x$ -aksen (lettast sett fra det roterende koordinatsystemet). I det roterende koordinatsystemet vil disse spinnene tippes ned i  $(x,y)$ -planet og ha retning langs  $y$ -aksen. Lokale gradienter, fra inhomogeniteter i det permanente magnetfeltet, gir en endring i ulike spins faser (dvs. en fasespredning). I det

roterende koordinatsystemet vil dette arte seg som spinn som har spredning rundt  $y$ -aksen, men fremdeles ligger i  $(x,y)$ -planet (se figur 2e). Dersom man nå påtrykker en RF-puls som medfører en  $180^\circ$  spinn-flipp rundt  $y$ -aksen på tidspunktet  $t = TE/2$ , hvor  $TE$  er tiden fra  $90^\circ$  spinn-flippet til spinnvektorenes fluksendringer måles, vil spinn som akkumulerer en positiv faseforskyvning (i deres posisjon i magnetfeltet) akkumulere en negativ faseforskyvning etter spinn-flippet (dersom vi antar at spinnene ikke beveger seg i rommet). Dersom en gjør målingene etter tiden  $TE$  (forkortning for ekko tid), og antar en konstant økning i faseforskyvning i tid, vil spinnene på dette tidspunktet være i fase igjen.

Dersom man i tillegg til forsøket over påtrykker magnetiske gradient pulser, superposisjonert på det permanente magnetfeltet, vil man naturligvis kunne øke effekten av lokale gradienter. Man vil til tross for dette kunne kansellere effekten av dette med spinn ekko. Derimot, hvis spinnene har en gitt diffusjon og flytter seg mellom varierende gradienter, har ikke hvert spinn lenger en konstant økning i faseforskyvning som funksjon av tid. Denne ikke-lineære endringen i faseforskyvning vil øke med økende diffusjon og vil medføre en økt netto faseforskyvning (og reduksjon av magnetisering, samt signal) ved tiden  $TE$ .

På lik linje med avlesning av  $T_1$ - og  $T_2$ -vektede bilder, så kan man finne selv-diffusjon for hvert punkt i et tredimensjonalt koordinatsystem ved å betrakte systemet i Fourier-rommet. Ved å utføre en slik sekvens i minimum seks retninger finner man protoners diffusjon i tre dimensjoner.

Hver diffusjonskoeffisient lagres som kontraster i et bilde. For eksempel, vil diffusjon i  $x$ -retningen,  $D_x$ , lagres i et tredimensjonalt rutemønster, hvor hvert punkt angir diffusjonskoeffisienten i  $x$ -retningen i dette punktet. Likeledes vil et nytt tredimensjonalt volum (dvs. bilde) bli lagret for diffusjonskoeffisienter i  $y$ -retningen og  $z$ -retningen. Den såkalte diffusjonstensoren inneholder ni diffusjonskoeffisienter, men er symmetrisk og vil derfor inneholde seks distinkte komponenter, hvilket forklarer hvorfor man må utføre diffusjonssekvenser i minimum seks retninger.

### Sporing av nervefibre

I hjernen eksisterer vevstyper som har ulik diffusjon i ulike retninger (dvs. ikke-isotropisk diffusjon). Dette kommer av at slike vevstyper inneholder cellemembran som gir opphav til selv-diffusjon i en karakteristisk retning. Nervefibrene i hjernen er av en slik art. Figur 4a illustrerer hvordan diffusjonskoeffisientene i tre ulike retninger kan benyttes for å spore nervefibre. En kan begynne sporingen av nervefibrene ved å starte i et tilfeldig punkt for deretter å bevege seg i retningen med høyest diffusjon og fortsette inn i punktet som ligger i denne retningen. Noe forenklet vil sporingen stoppe dersom man finner ut at neste punkt har isotrop diffusjon, dvs., når diffusjonen er lik i alle retninger. Antagelsen er da at det hovedsakelig er nervefibrene som har en ikke-isotrop diffusjon av vann.

Figur 4b er produsert ved å benytte programvaren nordicBrainEx fra NordicNeuroLab, der både strukturelle data, satt sammen til 3D-modell av hodet, og diffusjonsdata, produsert av en MR-skanner, er lastet inn. Programmet vil kalkulere retningsbestemte diffusjonskoeffisienter basert på diffusjonsdata fra seks eller flere retninger for deretter å spore nervefibrene. Det finnes mange måter å fargelegge fibrene på. En måte er kontinuerlig å endre farge basert på hvilken retning tangentvektoren til fibrene har i hvert punkt langs en fiber. Dette er gjort hovedsakelig for lettere å kunne identifisere bunter med fibre som går i samme retning.

### Bruk av nervefibersporing innen medisin

Et viktig bruksområde for nervefibersporing er som forberedelse av hjernekirurgi [7]. En hjernekirurg vil ha kjennskap til mange av de viktigste nervefibrene i hjernen og hvilken funksjon disse har. Dersom en pasient har en tumor lokalisert i nærheten av én eller flere viktige nervefibre, ønsker kirurgen å unngå disse. Selv om ulike nervefibre vanligvis er lokalisert i stort sett samme område hos ulike individer, kan en tumor endre

posisjonen på disse. Her kan nervefibersporing være til hjelp for kirurgen med å planlegge en operasjon for å unngå disse.

For mange nervesykdommer som har sin opprinnelse i hjernen, vil det være ødelagte eller kuttete nervefibre som er årsaken, der skadene er irreversible. Derfor kan nervefibersporing være et nyttig verktøy for å prøve å identifisere disse sykdommene. Dette til tross for at denne teknikken har sine begrensninger [7]. Det er blant annet vanskelig å vite nøyaktig når en skal avslutte sporingen av enkelte nervefibre. Videre er oppløsningen på MR-skannet endelig. Noe som gjør det vanskelig å identifisere kryssende fibre i hjernen.

### Konklusjon

Vi har her forklart hvordan det er mulig med dagens teknologi å få gode opplysninger om hjernens indre strukturer uten kirurgiske inngrep. Noe som kan være til stor hjelp for hjernekirurger, både til diagnostikk, så vel som for kirurgisk planlegging. Det er derimot en del begrensninger knyttet til for eksempel nervefibersporing, som medfører at man ikke kan være helt sikker på om de finere detaljene i strukturene man ser er virkelige eller ikke. Derfor er fremdeles MR, så vel som nervefibersporing, et aktivt forskningsområde der man prøver å forbedre teknikkene innenfor fagfeltet. ■

### Referanser

1. E. Odeblad og G. Lindstrom. «Some Preliminary Observations on the Proton Magnetic Resonance in Biologic Samples». *Acta radiol.* vol. 43, s. 469–476 (1955).
2. E. Odeblad, B.N. Bhar og G. Lindstrøm. «Proton magnetic resonance of human red blood cells in heavy-water exchange experiments». *Arch. Biochem. Biophys.* vol. 63, s. 221–225 (1956).
3. P.C. Lauterbur. «Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance». *Nature* vol. 242, s. 190–191 (1973).
4. D.J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*. New Jersey: Prentice Hall (1999).
5. R.W. Brown, Y.-C.N. Cheng, E.M. Haacke, M.R. Thompson og R. Venkatesan. *Magnetic Resonance Imaging*. New Jersey: Wiley (2014).
6. S. Currie, N. Hoggard, I.J. Craven, M. Hadjivassiliou og I.D. Wilkinson. «Understanding MRI: Basic MR physics for physicians». *Postgrad. Med. J.* vol. 89, s. 209–223 (2013).
7. K. Yamada, K. Sakai, K. Akazawa, S. Yuen og T. Nishimura. «MR Tractography: A Review of Its Clinical Applications». *Magn. Reson. Med. Sci.* vol. 8, s. 165–174 (2009).

# Om stråleterapi og kjernekraft

**Artikkelen beskriver behandling av maligne tumorer med ioniserende stråling, og evaluerer helserisiko ved stråling fra radioaktivt avfall fra kjernekraftreaktorer.**

**Thormod Henriksen** Fysisk institutt, UiO

Ioniserende stråling har blitt brukt og brukes fortsatt i betydelig grad innen kreftterapien. Radiumhospitalet, som ble bygd i 1932, er basert på 4 gram radium og det var strålingen som var grunnlaget for behandlingen. Nå står vi foran en ny type stråleterapi og vi vil starte med protonte-rapi basert på akselererte protoner.

Som avfall i kjernekraftreaktorer får vi radioaktive stoffer, og dem vil vi helst unngå. De har gjerne lange halveringstider og må derfor lagres lenge. Radioaktiviteten inneholder både alfa, beta og gammastråling. Den energi disse partiklene har når de sendes ut, blir avgitt til eksitasjoner og ionisasjoner av stoffet de treffer. Alfapartiklene skiller seg fra de andre siden de danner et sammenhengende spor av ioner i stoffet, mens beta og gamma samt røntgen gir en spredt fordeling av ioner. Ioniseringstettheten langs sporet til alfa-partikkelen danner det vi kaller en Bragg-kurve. (Denne Bragg-kurven må ikke forveksles med Bragg-kurver knyttet til diffraksjon). Den er ulik Bragg-kurver for ionedannelsen med gamma- og røntgenstråling. Vi skal diskutere Bragg-kurven i sammenheng med stråleterapi og lagring av avfall fra kjernekraftanlegg.

## Bragg-kurven

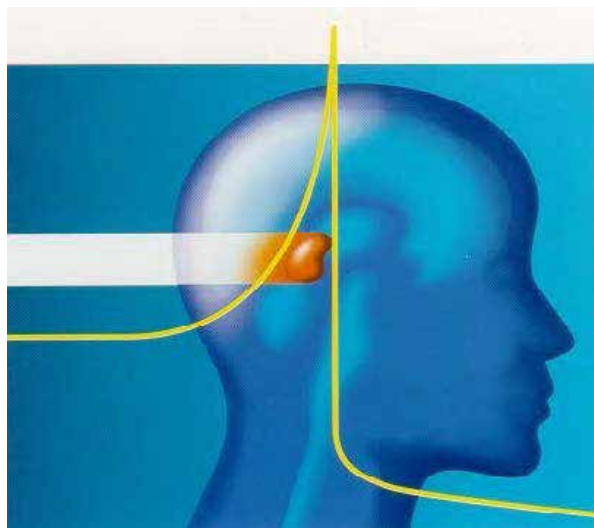
Alfapartikler som er dannet i kjernekraftreaktorer gir en absorpsjonskurve som kan beskrives

ved en Bragg-kurve (figur 1). Innen stråleterapi med ioner som protoner, heliumkjerne og karbonkjerne (det er ioner ned 6 plussladninger) har vi også partikler som kan beskrives med Bragg formalismen. De danner spor i det stoffet de trenger inn i og de stoppes helt og danner en såkalt «Bragg-topp». Innen terapi er poenget å få denne toppen til å passe med plasseringen av kreftsvulsten. Det var William Henry Bragg som i 1904 arbeidet med alfa-partikler og Hans Bethe som fastla og beskrev Braggkurven på 1930-tallet (figur 2).

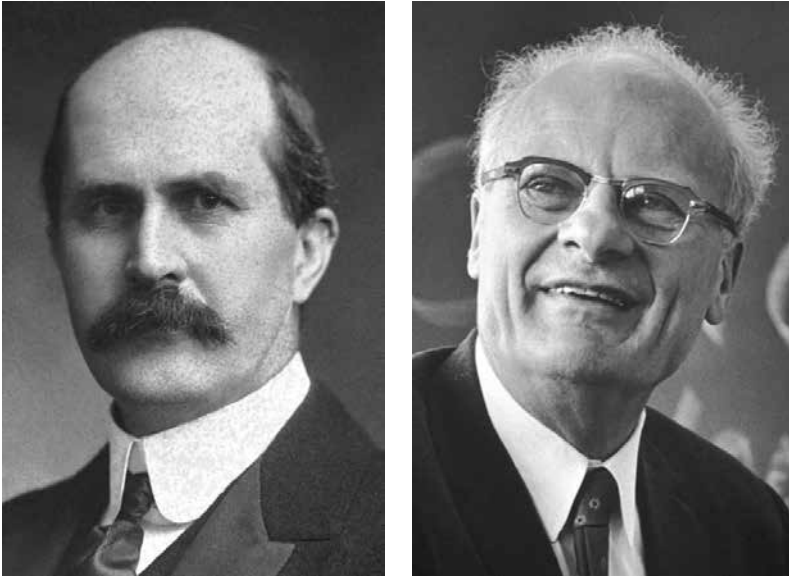
## Energiavsetningen i vev/vann

Vi mennesker består av vev som absorpsjonsmessig kan sammenlignes med vann. Braggkurven viser sporet til en partikkel i vann. Den gjelder for alfa-partikler og for alle ioniserende partikler som treffer. Partiklene kan gjerne være akselerert i en akselerator. Vi får et sammenhengende spor av ionisasjoner og eksitasjoner som ender med en topp der partikkelen stopper. Det er den velkjente Bragg-kurven som er vist i figuren. Her er det to ting som er avgjørende: 1) At partikkelen går en endelig og bestemt lengde i vev/vann før den stopper og 2) at det ender med et klart maksimum i energiavsetning.

Når det gjelder vanlige alfa-partikler kan vi fort slå fast at rekkevidden i vann (tilsvarer vev) er meget liten. Alfa-partikler fra radioaktive kilder har en startenergi på ca 5 til 10 MeV. Det betyr at de ikke vil trenge gjennom huden. Forsøk med vann viser at rekkevidden til alfa-partikler fra ulike kilder aldri blir mer enn ca. 8 mikrometer - eller 0,008 mm (hudtykkelsen er fra 0,4 til 4 mm). Det betyr at kjernekraftavfall som sender ut



**Figur 1.** Braggkurven viser hvordan en ladd partikkel avsetter energi langs sporet sitt ved eksitasjoner og ionisasjoner. Kurven har en endelig rekkevidde og ender med en stor energiavsetning mot slutten av sporet (Bragg-toppen). Kurveformen er også teoretisk beregnet av den tysk-amerikanske fysikeren Hans Bethe. Både Bragg og Bethe er vel kjente fysikere som fikk Nobelprisen i henholdsvis 1915 og 1967 på helt andre arbeider. Langs ordinaten (vertikalt) er energiavsetning per lengde d.v.s. dosen. Det overraskende er at dosen øker mot slutten av sporet. Det kommer frem fra Bethes beregninger. Bragg-toppens plassering i vevet (dermed strålingens rekkevidde) er bestemt av startenergien. Rekkevidden for alfa-partikler fra radioaktive kilder er for liten til at de kan gå gjennom huden. Bruker vi en akselerator kan vi imidlertid få den energi vi måtte ønske for stråleterapi.



**Figur 2.** William Henry Bragg (venstre) og Hans Bethe.

naturlige alfa-partikler er strålebiologisk uskyl-dige. Vi kan diskutere likheter og forskjeller på kjernekraftavfall som kommer fra både radium og thorium. Alfa-partiklene gir ingen strålebiolo-giske skader på grunn av liten startenergi og kort rekkevidde. Vi kan karakterisere denne strålingen slik det spøkefullt gjøres blant kjernefysikerne «du kan sitte på en kilde av alfa-partikler uten å svi deg i baken».

Hvis alfa-partikler av en eller annen grunn kommer inn i kroppen, er de derimot livsfarlige og kan gi en dødelig stråledose. Vi tror det var slik de tok livet av Aleksandr Litvinenko. Litvi-nenko var russisk avhopper i London, der han angivelig ble forgiftet av russiske agenter i 2006. Han hadde da fått britisk statsborgerskap. Så langt vi vet fikk Aleksandr Litvinenko tilført kroppen radioaktivt polonium i form av isotopen  $^{210}\text{Po}$ . Den er et sluttprodukt av radonnedbryttingen, men kan også lages kunstig i reaktor ved å bestråle vismut med nøytroner. Når den desinte-grerer, sender den ut alfa-partikler (halveringstid 138 dager). Utenfor kroppen betyr ikke disse alfa-partiklene noe spesielt, men har de først kommet inn i kroppen er de farlige. Attentatet besto i at  $^{210}\text{Po}$  kom inn i kroppen og da ble de medfølgende alfa-partikler livsfarlige. Litvinenko døde en akutt stråledød med betydelige smerter i løpet av tre uker.

### Stråleterapi

All stråleterapi er basert på å gi maksimal dose til en kreftsvulst mens en samtidig skåner mest mulig det omliggende friske vev. Det er en fin balansekunst en skal utøve. Innen stråleterapi har en lenge vært klar over at en kan oppnå gunstige stråleforhold hvis en går til stråling som absorberes via Bragg-kurven enn når en bruker

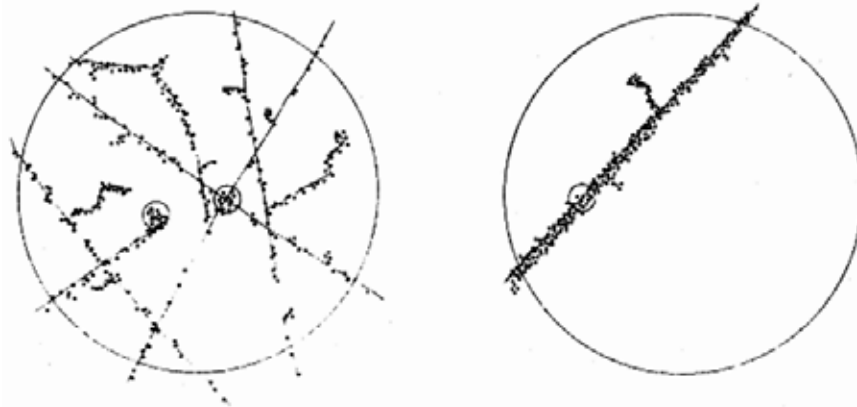
gammastråling eller røntgenstråling som ionise-rer helt tilfeldig.

Den første som tok i bruk tungt ioniserende partikler (alfa-partikler og andre strippede atom-kjerner) til strålebiologiske forsøk var Tor Brustad, som i mange år var sjef for stråleterapiavdelingen ved Radiumhospitalet. Så tidlig som i 1960 dro Brustad med stipend fra Landsforeningen mot kreft til Berkeley i California der de hadde en tungionemaskin. De brukte denne maskinen til å lage nye tunge grunnstoffer som nobelium og lawrencium.

Brustad fikk bruke akseleratoren en dag i uken til strålebiologiske studier. De partikler han kunne bruke og akselerere til en viss (men dog liten) energi var strippede ioner av grunnstoff med atomnummer opp til 18 (argon). Det var derfor et stort arsenal av ioner til rådighet, og det var mulig å øke partikkel-energien til 10,4 MeV per nucleon. Det betyr karbonioner med energi på 124 MeV eller oksygenkjerner med 166 MeV var tilgjengelig. Dette var altfor lite til at partiklene kunne gå gjennom huden vår, men Brustad kunne med fordel studere enzymer og virus. Eksperimentene viste at en kunne bruke ioniserende ioner innen stråleterapi den dagen en fikk akseleratorer som kunne gi ionene den nød-vendige startenergien. Det første en tenkte på var svulster på øyet, noe en begynte med omkring 1980 da en fikk større akseleratorer.

De første strålebiologiske forsøkene var viktige og var et nytt eksempel på stråleterapiens slagkraft. Idag er det flere steder i verden som har ionestyr til stråleterapi. Norge har hengt litt etter på området, men er nok snart inne i folden. Det skal bli en protonakselerator som vil gi en rekke nye muligheter.

**Figur 3.** Strålespor i vev etter  $\gamma$ -stråling (rette linjer) og  $\beta$ -stråling (begge i sirkel til venstre), og breiere spor etter  $\alpha$ -stråling (i sirkel til høyre).



### Kjernekraft

Den store fordelten med kjernekraft framfor andre energikilder er at den gir elektrisk energi uten samtidig å produsere CO<sub>2</sub>. Kjernekraft-reaktorene har en levetid som er omtrent det doble av vindmøller og/eller solenergi-anlegg. Dette er selvsagt noe en må ta med når en diskuterer elektrisk energiproduksjon og forurensning.

Når det gjelder kjernekraft er det i første rekke avfallet som er problematisk fordi det er radioaktivt. Det er for det første gamma og beta-aktiviteten, men i særlig grad alfa-aktiviteten fra de tunge grunnstoffene (figur 3). Disse tunge grunnstoffene har gjerne lange halveringstider (kan være mer enn tusen år).

Ifølge Bragg-kurven kan vi se bort fra radioaktivitet som gir alfa-partikler fordi disse partiklene ikke vil gå gjennom huden. Likevel skremmer den strålingen oss når vi vet (fra tilfellet Litvinenko) hvor ille det kan være hvis partiklene avgir dosen inne i kroppen. En kan si at Bragg-kurven reduserer problemet adskillig og at en «bare» må slite med gamma-strålingen og beta-partiklene. Denne strålingen kjenner vi fra Tsjernobyl og vi vet at Norge fikk et ganske betydelig nedfall. Videre har vi hatt alt nedfallet fra bombeprovvene ved Novaja Semlja helt fra 1950-tallet. Dette nedfallet kan fortsatt måles, men det er adskillig mindre enn i begynnelsen siden halveringstiden er ca 30 år. Til tross for all diskusjon rundt dette kan vi slå fast at dosene var meget små. Det er faktisk en diskusjon blant strålebiologer om dette nedfallet til og med kan være positivt for helsa vår (vi skal ikke gå inn i den debatten her).

Kjernekraft har det drawback at den gir grunnlag for kjernevåpen. Dette er alvorlig, men burde

kunne løses ved internasjonal inspeksjon. Avfallet blir idag lagret dypt ned i geologiske gruver, noe som er unødvendig fordi  $\alpha$ -partiklene har så kort rekkevidde.

La oss nevne at fremtidens reaktorer vil ha muligheten til å bruke thorium som energikilde. De stoffene som gir alfa-partikler har en noe kortere halveringstid enn de isotoper som stammer fra uran. Det er langt mer thorium på jorda enn uran og Norge er en stormakt med hensyn til thorium siden vi har det store Fensfeltet nær Ulefoss. Vi burde ha en aktiv forskergruppe på dette området. Bruk av thorium og saltsmelte (nye) reaktorer burde stå på oppgavelisten.

### Oppsummering

Frem til idag er det ingen reaktorer i virksomhet som er basert på thorium, men det er stor forskningsvirksomhet på området. For ganske mange år siden var det en såkalt «saltsmelte-reaktor» som gikk noen år i Oak Ridge. Det er idag stor interesse for å lage slike reaktorer, og det er forslag om å masseprodusere små reaktorer. Jeg vil også peke på at det er flere bruksområder for de små kjernekraftreaktorene, blant annet innen skipsfart.

Det kan tenkes at noen lesere fatter litt mer interesse for dette feltet. På Fysisk institutt, UiO er det skrevet både en bok om dette fagområdet og en større artikkel om radon og lungekreft. Boka ligger ute på nettet med følgende adresse:

[www.mn.uio.no/fysikk/tjenester/kunnskap/straling/radiation-and-health-2015.pdf](http://www.mn.uio.no/fysikk/tjenester/kunnskap/straling/radiation-and-health-2015.pdf) ■

## Bokomtale:

### **Periodesystemet** **Unni Eikeseth og** **Annette Lykknes**

163 sider

Museumsforlaget

2019

Pris: 350 kr.



Hadde bare noe av det som står i denne boka vært med i kjemitimene på skolen! Da hadde jeg kanskje blitt kjemiker. I hvert fall hadde kjemitimene vært morsommere.

Boka tar oss med på en vandring fra grekernes oppfatning av materien med de fire grunnleggende stoffene jord, luft, ild og vann gjennom middelalderens alkymisme og merkelige forestillinger om de vises stein og flogiston frem til dagens kjernekjemi.

Her får vi servert kjemiens historie som kulturhistorie. Vi får lese om hvordan det irske geniet Robert Boyle (1627–1691) allerede 1660-årene utfordret den gamle forståelsen av stoffenes natur der urstoffene var jord, luft, ild og vann. Boyle ville forklare stoffenes egenskaper ved hjelp av små partikler og deres form og bevegelse. Han var langt forut for sin tid. Det tok over 200 års innsats fra mange begavete forskere før en slik forståelse av materiens natur fikk gjennomslag.

På andre del av 1700-tallet arbeidet franskmannen Antoine Laurent Lavoisier (1742–1794) sammen med sin kone, Marie-Anne Pierrette Paultze, med å reformere kjemien. Han gjorde systematiske studier av luft og viste at luft består av flere stoffer som kunne inngå i kjemiske reaksjoner. Han viste også at vann kan fremstilles av to stoffer i luften som han kalte hydrogen og oksygen.

I England jobbet John Dalton (1766–1844) med å videreutvikle kjemien. I årene 1808–1827 utga han et stort verk om kjemi der han blant annet utviklet nye kjemiske symboler og en atomteori for stoffer.

I boka får vi også kjennskap til blant andre Dmitrij Ivanovitsj Mendelejevs arbeid med å utvikle det periodiske system.

Vi får vite at begrepet grunnstoff ble utviklet av Georg Brandt ved det svenske Bergkollegiet midt på 1700-tallet – 50 år før Lavoisiers arbeid med å reformere kjemien. I denne sammenheng omtales oppdagelsen av kobolt. Vi får en interessant avstikker til koboltgruvene i Modum og blir kjent med deres historikk.

Ferden går videre til Tyskland i mellomkrigstiden og vi blir kjent med Ida Tacke, senere Noddack, og Walter Noddack og deres møysommelige, målrettede og grundige arbeid som førte til oppdagelsen av grunnstoff 75 i det periodiske system – rhenium.

Så går reisen til trettiårenes Frankrike der bidragene fra Irène Curie og hennes mann Frédéric Joliot-Curie til utviklingen av kjernekjemi omtales. Samtidig får vi vite at Ida Noddack allerede i 1934 forutsa eksistensen av fisjon – at atomkjerner kan spaltes og gi opphav til lettere grunnstoffer.

Hvor kommer grunnstoffene fra? Svaret er at de i hovedsak har to forskjellige kilder. De to letteste, hydrogen og helium stammer fra prosesser helt i starten av universets historie, mens de tyngre grunnstoffene ble dannet i eksploderende stjerner og spredd utover i den interstellare materien i supernovaeksplosjoner.

Videre får vi lese om de forunderlige C<sub>60</sub>-molekylerne, fotballformete karbonmolekyler med 60 atomer kalt Buckyball-molekyler. De ble oppdaget i laboratorier utover i 1980-årene, og i 2010 ble de det funnet spektrallinjer fra dem i spektroskopiske undersøkelser av planetariske tåker (omtalt som «planetære tåker» i boka).

Vi får også vite hvilken rolle salter har i dannelsen av kvikkleire. Dette fortelles i sammenheng med den store rasulykken i Lærdal i 1894. Forskere ved NTNU har forslag til hvordan man kan omdanne kvikkleire til fast leire ved å injisere kalium i leira.

I dette kapittelet fungerer forfatterens fortellergrep ekstra godt. Fremstillingen gjøres fengslende ved å legge inn personlige hendelser – ofte relatert til forskere, gjerne kvinnelige forskere, som har gjort kjemiske nyvinninger – eller personer som har vært utsatt for dramatiske hendelser som kanskje kunne ha vært unngått med tilstrekkelige ressurser og kjemiske kunnskaper.

Vi får vite om betydningen av havets jerninnhold for klimaet, om titanets fortreffelige egenskaper som kan bidra til å minske CO<sub>2</sub>-utslipp fra fly, om norsk innsats for å produsere titan i industriell skala, og om troen på helsevirkningen av radioaktive kurbad. Blyforurensningens farer omtales også.

Boka rundes av med å fortelle om arbeidet med å produsere atomer med høyest mulig atomnummer. Til nå har man klart å lage atomer med 118 protoner i kjernen. Ingen vet hvor den øvre grensen er.

Jeg vil takke forfatterne for å ha skrevet en inspirerende bok. Den anbefales på det varmeste som inspirerende lesning der en har mulighet til å følge opp temaene i mange referanser bakerst i boka.

*Øyvind Grøn*

RETURADRESSE:

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

## Styret i Norsk Fysisk Selskap

### President

Professor Asle Sudbø, Institutt for fysikk, NTNU

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

### Visepresident

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

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

### Vara

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

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

### Styremedlemmer

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

Førsteamanuensis Magnus Borstad Lilledahl, NTNU, biofysikk

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

Professor Håvard Helstrup, HiB, subatomær fysikk og astrofysikk

Professor Jon Samseth, OsloMet, industri- og energifysikk

Professor Astrid Aksnes, NTNU, optikk

Lektor Kaja Nordby, Kongsbakken vgs., Norsk Fysikklærerforening

### Adresse

Norsk Fysisk Selskap

Institutt for fysikk, NTNU

7491 Trondheim

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

Sekretær: Haakon Thømt Simensen

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

Bankgiro: 7878.06.03258

Org.nr.: 940 340 829

### Bedriftsmedlemmer av NFS

Vi takker for støtten fra våre bedriftsmedlemmer:



UiT / NORGES ARKTISKE  
UNIVERSITET



 NTNU 



UiO : Universitetet i Oslo

ISSN-0015-9247