

KVANT Oktober 3 2021

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 32. årgang

- 
- NYT FRA G-2 EKSPERIMENTET
 - H.C. ØRSTED OG FARMACIHISTORIEN
 - CASIMIREFFEKTEN – KRAFTEN AF INGENTING
 - KVANTEMEKANISK SAMMENFILTRING – BAGGRUND
 - JAGTEN PÅ GRAVITATIONSBØLGER VED BRUG AF RADIOPULSARER
 - BREDDEOPGAVER • KVANTNYHEDER • AKTUELLE BØGER • “KIF AWARD”

Løssalgspris: 50 kr.

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o DTU Space, Centrifugevej 356
DK-2800 Kgs. Lyngby

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk
Facebook : [KVANT.fysiktidsskrift](https://www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift)
ISSN (trykt) : 0905-8893
ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

Astronomisk Selskab
Dansk Fysisk Selskab
Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),
DTU Space
Michael Cramer Andersen,
Christianshavns Gymnasium
Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-
redaktør), DTU Health Technology
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Dorte Olesen (SNU),
DTU Compute
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh

Abonnementspris : 180 kr./år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnement tegnes på www.kvant.dk.
Øvrige henvendelser vedr. abonnement til Christine Pepke Gunnarsson:
christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr., 1/2 side: 2300 kr.
1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale i farver. Henvendelser om annoncer til redaktøren på: kvant@kvant.dk

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 2.500.



Tryksag
5041 0826

Produktionsplan

Nr. 4-2021 udkommer ca. 15. december
Nr. 1-2022 udkommer ca. 15. marts
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Jagten på gravitationsbølger ved brug af radiopulsarer <i>Ann-Sofie Bak Nielsen</i>	3
Casimireffekten – kraften af ingenting <i>Bernhard Lind Schistad</i>	7
H.C. Ørsted og farmacihistorien <i>Poul R. Kruse</i>	12
Nyt fra G-2 eksperimentet <i>Bernhard Lind Schistad</i>	21
Kvantemekanisk sammenfiltring – baggrund <i>Jan Myrheim</i>	23
Bølgemodstand – breddeopgave 93 med didaktisk kommentar <i>Jens Højgaard Jensen</i>	29
KIF “Lifetime Achievement Award” <i>Kvinder i Fysik</i>	31
Kvant-nyheder <i>Christine Pepke Gunnarsson</i>	32
Kommende foredrag	34
Medaljenyheder	34
H.C. Ørsted – ånd og elektromagnetisme i dag <i>Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	35
H.C. Ørsted – ånd og elektromagnetisme <i>Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden viser stjernen AG Carinae (AG Car) i stjernebilledet Kølen på den sydlige himmelkugle. Stjernen er ca. 20.000 lysår borte og omgivet af en sky af materiale, der svarer til 15 solmasser, som stjernen har tabt for omkring 10.000 år siden. De røde farver viser stråling fra ioniseret brint og kvælstof, mens de blå farver viser fordelingen af støv, som lyser, fordi det reflekterer lyset fra stjernen. Den ekspanderende sky af gas og støv har en hastighed på 70 km/s, og påvirkes af kraftige stjernevinde, der kommer fra stjernen og bevæger sig med 2.000 km/s. Tågen er omkring 5 lysår bred, hvilket svarer til afstanden til vores nærmeste stjerne, Alfa Centauri (α Cen). Ringen ikke er perfekt sfærisk, hvilket indikerer, at stjernen ikke er alene, men har en ledsager (en binær stjerne). En alternativ – og enklere teori – er, at stjernen roterer meget hurtigt. Billedet er taget med Hubbleteleskopet og frigivet 13. september 2021.



Kvant udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle gymnasier, seminarier og HTX-kurser i Danmark, på Færøerne og i Grønland med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik, Kemi og Farmaci (SDU), DTU Fotonik, DTU Fysik samt Institut for Naturvidenskab og Miljø (RUC).

Kvant omdeles fra 2021 med PostNord. Såfremt bladet udebliver opfordres du til at kontakte PostNords kundeservice på telefon 70707030 samt orientere Kvant på e-mail kvant@kvant.dk.

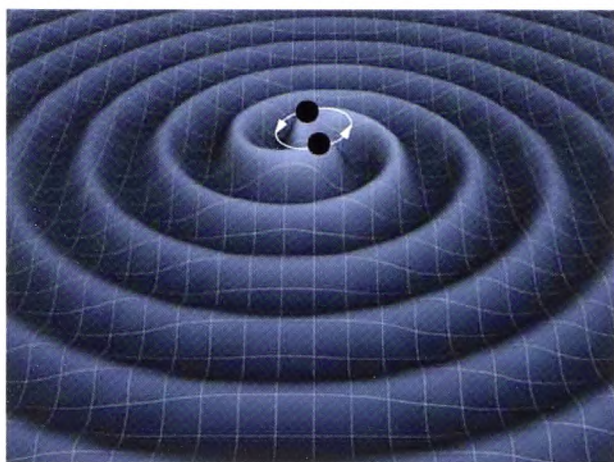
Jagten på gravitationsbølger ved brug af radiopulsarer

Ann-Sofie Bak Nielsen, Max Planck Institut for Radioastronomi, Bonn, Tyskland

Jagten på direkte observationer af gravitationsbølger har ført til flere forskellige detektorforslag. I 2015 var LIGO den første af disse til direkte at observere gravitationsbølger, men nu er der andre detektorer, der nærmer sig detektion. Det er "Pulsar Timing Arrays", som udnytter naturens egne præcise ure, radiopulsarer, til at observere de svage signaler fra gravitationsbølger.

Gravitationsbølger

I 1916 forudsagde Albert Einstein i sin generelle relativitetsteori eksistensen af gravitationsbølger. Godt 100 år efter, den 14. september 2015, observerede astronomer ved LIGO- (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) eksperimentet i USA for første gang direkte gravitationsbølger fra en kollisionen mellem to sorte huller [1, 2]. Gravitationsbølger kan bedst beskrives som krusninger, eller svage bølger, i rumtiden, der kan sammenlignes med ringe i vand (figur 1). Krusningerne dannes af flere forskellige fænomener bl.a. af sammenstød mellem supermassive sorte huller, inspiralling af kompakte objekter i et binært system, eller kataklysmiske begivenheder som supernovaer (figur 2). Med den viden om universet og den teknologi, der var tilgængelig i 1916, antog Einstein, at disse bølger ville være forsvindende svage, og derfor så godt som umulige at observere. De teknologiske fremskridt, der har været i løbet af det sidste århundrede, gjorde det muligt for LIGO at observere gravitationsbølger [1].



Figur 1. En kunstners indtryk af gravitationsbølger udsendt fra to sorte huller, der bevæger sig mod hinanden, og som ender med at kollidere. Dette er hvad LIGO kunne observere for første gang i 2015. Billede: T. Carnahan (NASA GSFC/LIGO).

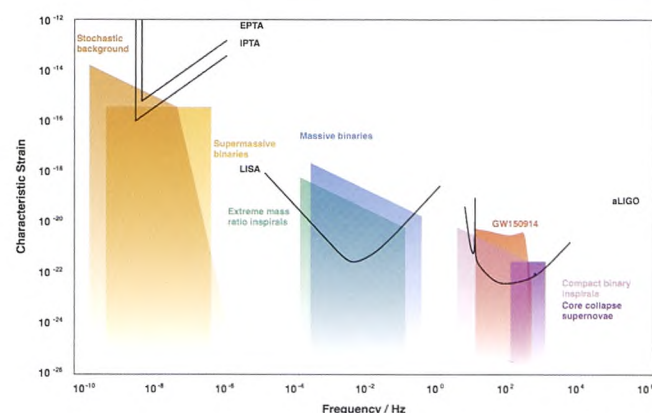
LIGO-detektoren var det første af de forslåede gravitationsbølgeeksperimenter, der direkte observerede gravitationsbølger. Det var dog ved brug af radiopulsarer og pulsartiming, at den første indirekte observation af gravitationsbølger blev foretaget.

R.A. Hulse og J.H. Taylor opdagede i 1974 et binært stjernesystem bestående af to neutronstjerner 21.000 lysår fra Jorden [3]. De to neutronstjerner, hvoraf den

ene er en radiopulsar, bevæger sig tættere og tættere på hinanden. Det betyder, at det binære system mister energi i form af gravitationsbølger. Denne opdagelse førte til at Hulse og Taylor modtog Nobelprisen i fysik i 1993.

Gravitationsbølgeeksperimenter

Gravitationsbølger kommer i forskellige bølgelængder, ligesom elektromagnetisk stråling. Der er derfor foreslået flere forskellige gravitationsbølgedetektorer. LIGO består af to laserinterferometre, hver med to 4 km lange arme i en L-form, én i Livingston og én i Hanford, USA [4]. I hver af de 4 km lange arme er der lasere, som måler små forskydninger i længden af armene. Forskydningerne skyldes gravitationsbølger, som strækker og sammenpresser Jorden. Siden den første detektion af gravitationsbølger, er en tredje detektor, VIRGO i Italien, også begyndt at observere. På nuværende tidspunkt er der observeret mere end 50 gravitationsbølgebegivenheder, bestående af både kollisioner mellem sorte huller, mellem to neutronstjerner og mellem et sorte hul og en neutronstjerne [5].



Figur 2. Gravitationsbølgespektrum hvor de forskellige detektorer er indikeret, viser hvilken frekvens de forskellige detektorer kan observere gravitationsbølger ved. Her ses det bl.a. at PTAs vil være i stand til at detektere gravitationsbølger i nHz-regimet fra den stokastiske baggrund og supermassive sorte huller. På figuren antages det, at omkring 20 pulsarer er inkluderet i EPTA, og 65 i IPTA. Billede: [6].

En anden gravitationsbølgedetektor er LISA (Laser Interferometer Space Antenna), der i modsætning til LIGO er et rumbaseret teleskop. LISA kommer til at bestå af tre satellitter, som kun er forbundet med

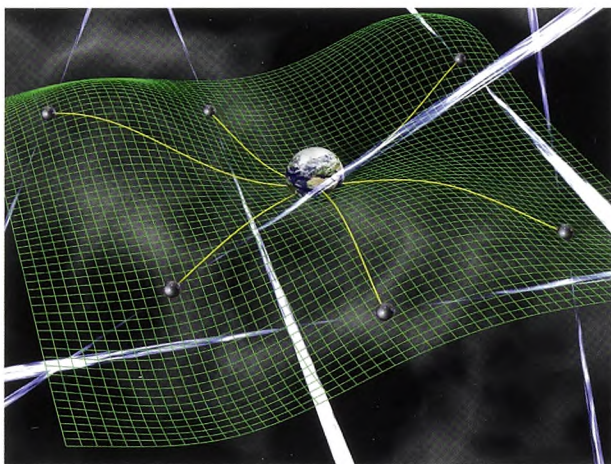
lasere mellem hver satellit. Laserne måler præcist afstanden mellem satellitterne. Ideen bag LISA minder om LIGO, her er det dog frekvensforskellen mellem laserne i satellitterne, man leder efter. Forskellene kan bl.a. skyldes dopplerforskydning, men der kan også være små forskelle fra ændringer i rumtiden, og altså fra gravitationsbølger. I 2015 blev LISA Pathfinder opsendt for at teste teknologien til LISA-missionen. LISA Pathfinder var en succes, og efter planen skal LISA opsendes i 2034 [7].

Pulsar Timing Arrays

Et andet gravitationsbølgeeksperiment er Pulsar Timing Arrays (PTAs), hvor man udnytter radiopulsarers utroligt stabile rotation. Pulsarer – og specielt millisekundpulsarer – er fantastiske værktøjer til at undersøge forskellige aspekter af fundamental fysik.

Radiopulsarer er neutronstjerner, som roterer meget hurtigt om deres egen akse, og som har et meget stærkt magnetfelt. Elektroner accelereres i magnetfeltet, og resulterer i radiostråling udsendt fra de magnetiske poler. Den magnetiske akse er drejet i forhold til rotationsaksen. Hver gang pulsaren roterer, rammer radiostrålingen Jorden, og man kan derved måle en puls fra pulsaren. Det kan sammenlignes med, hvordan et fyrtårn virker.

Millisekundpulsarer gør PTA-eksperimenter mulige med deres bemærkelsesværdige rotations- og derfor timing-stabilitet. PTA er baseret på systematisk at observere et netværk af millisekundpulsarer fordelt på himlen (se figur 3), hvilket effektivt bliver et teleskop på størrelse med Mælkevejen [8].

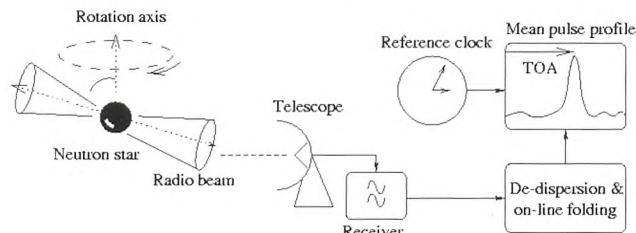


Figur 3. Ved brug af flere pulsarer jævnt fordelt på himlen, et såkaldt Pulsar Timing Array, kan man korrelere og observere forskellen i TOA-residualer (time-of-arrival) af signalet fra forskellige pulsarer, og derved detektere gravitationsbølger. Billede: David J. Champion, MPIfR.

Pulsar timing arrays kan detektere gravitationsbølger i nHz-regimet (se figur 2). Disse bølgers oprindelse er enten inspirallerende super-massive sorte huller (SMBHs), eller fra den stokastiske gravitationsbølgebaggrund.

PTAs er baseret på pulsar timing-teknikken [9]. Her kræves en præcis modellering af pulsarens rotation, binære omløbsbane (når relevant) og signaludbredelse i rummet. For hver observeret pulsar bliver meget præcise målinger af pulsens ankomsttid (time-of-arrival:

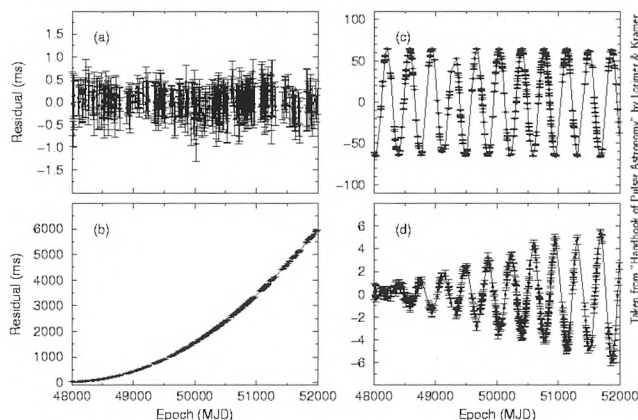
TOA) sammenlignet med en timingmodel. Forskellen på de målte og forudsagte TOAs er residualer, og alle effekter, der ikke indgår i timingmodellen, kan ses i disse residualer (se også figur 5). Modellen kan ændres som følge af de variationer, man kan se i residualerne.



Figur 4. Diagram der viser det fundamentale observationelle set-up af pulsartiming. Billede: [9].

Figur 4 viser en klassisk opsætning af et radioteleskop. Radiostrålingen observeres, hvorefter observationen bl.a. bliver foldet og sammenholdt med et referenceur på teleskopet og med pulsprofilen, for at kunne måle en såkaldt TOA af en puls fra pulsaren. Man folder signalet fra en pulsar for at forstærke det, og for at finde en middelpulsprofil, som er den alle observationer krydsrefereres med.

Undervejs bliver radiofrekvens-interferens (RFI), der stammer fra andre radiokilder, som mobiltelefoner, mikroovne etc, fjernet. De TOAs man finder, kan nu bruges til pulsar timing analyse.



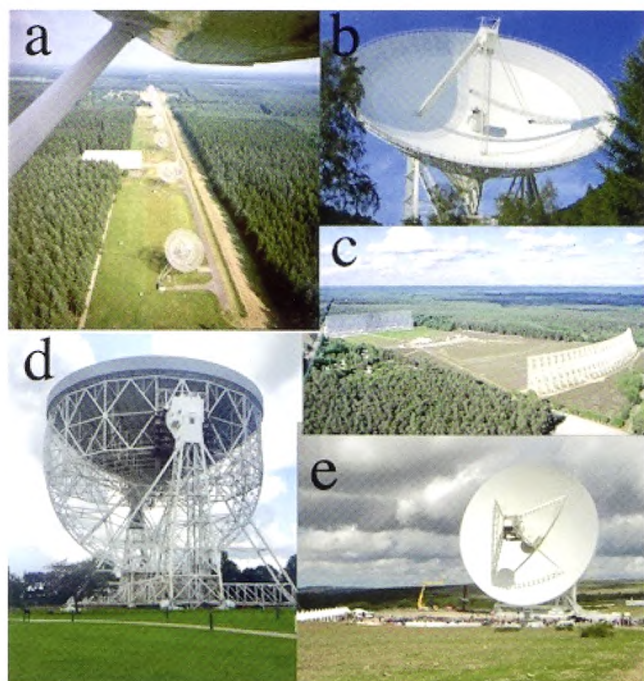
Figur 5. Forskelle mellem TOAs og timingmodellen er vist på figuren [9].

TOAs sammenholdes med en model for, hvordan forskerne tror, at pulsarens system ser ud, nemlig en timing model. Hvis denne model på en eller anden måde er forkert, eller systemet er påvirket af noget uforudset, kan det ses i TOA-residualer, som vist på figur 5. Figur 5a viser en perfekt model, hvor alle parametre, som påvirker pulsaren, er medregnet i modellen – alle TOAs er omkring nul. Figur 5b viser en model, hvor rotationsperiodens afledte er underestimeret. På figur 5c ses et off-set i position, hvilket producerer en sinusurve i residualer, og på figur 5d ses effekten af ikke at korrigere pulsarens egenbevægelse [9].

Der er nogle begrænsninger for timingmetoden og PTAs; selvom pulsarer er meget stabile rotorer i universet, kan de udvise forstyrrelser (støj), der er uforudsigelige. Det kan bl.a. være støj forårsaget af instrumenterne

på teleskopet, uret som bruges til at måle ankomsttiderne, uforudsete ændringer i signalet udsendt af selve pulsaren (glitches – pludselige ændringer eller accelerationer i pulsarens rotationsperiode) eller ændringer af signalet fra pulsaren som sker på dets vej fra pulsaren til Jorden. Forstyrrelserne forårsaget af individuelle gravitationsbølger er meget små, og kan på nuværende tidspunkt ikke måles direkte i signalet fra en pulsar.

Den store fordel ved PTAs er, at gravitationsbølger har en effekt på alle pulsarer på samme tid: der vil altså være et ekstra støjtryk i ankomsttiderne for pulsen fra hver pulsar, når en gravitationel bølge passerer pulsarene. Hvad forskerne bag PTAs derfor arbejder på, er at optimere observationerne og forståelsen af pulsarens adfærd, så den resterende støj bliver så lille, at støj forårsaget af gravitationsbølger kan skelnes fra den. Fordi gravitationsbølgesignalet er meget svagt, er man nødt til at krydskorrelere ankomsttiderne fra forskellige pulsarer med hinanden. Det betyder i praksis, at man sammenligner TOA-residualer fra en pulsar med andre PTA-pulsarer.



Figur 6. De fem store teleskoper der benyttes af EPTA er a) Westerbork radio synthesis-teleskop i Holland, b) Effelsberg radioteleskopet i Tyskland, c) Nançay radioteleskopet i Frankrig, d) Lovell teleskopet i England og e) Sardinia radioteleskopet i Italien. Billede: Fra de respektive teleskopers hjemmesider og privat foto af Lovell teleskopet.

European Pulsar Timing Array

European Pulsar Timing Array (EPTA) blev formelt grundlagt i slutningen af 2006, og består af flere forskningsgrupper i Europa, der alle forsker i pulsarer og gravitationsbølger. EPTA består derudover af fem europæiske radioteleskoper (i 100-meterklassen): Westerbork i Holland (figur 6a), Effelsberg-radioteleskopet nær Bonn i Tyskland (figur 6b), Nançay-radioteleskopet i Frankrig (figur 6c), Lovell-teleskopet i Jodrell Bank tæt på Manchester i England (figur 6d) og det nye radioteleskop på Sardinien i Italien (figur 6e) [10].

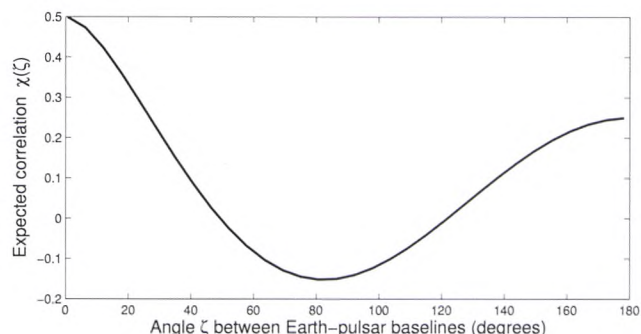
Ligesom de andre PTA-grupper er hovedformålet med EPTA-netværket at observere gravitationsbølger. Udover gravitationsbølger arbejdes der på at forbedre forståelsen af de forskellige påvirkninger, der kan være på radiopulsarer og deres signal. Fordelen ved at have flere teleskoper til rådighed er, at observationstiderne kan planlægges til at foregå på forskellige tidspunkter, og der fås et mere spredt dataset. Samtidige observationer på forskellige teleskoper kan dog også være gavnligt; dette giver uafhængige målinger, som fx kan bruges til at kontrollere stabiliteten af referenceurene ved teleskoperne. Derudover har de fleste teleskoper flere observationsfrekvenser til rådighed. En bredere spredning og bedre dækning af observationsfrekvenser er nyttig til at korrigere for frekvensafhængige påvirkninger på pulsarenes ankomsttider.

Detektion af gravitationsbølger med PTAs

For at få et klart gravitationsbølgesignal benyttes de mest præcise og stabile pulsarer. Det er anslået, at mindst 20 millisekund-pulsarer skal observeres i mindst 5 år, med en nøjagtighed på ca. 100 nanosekunder, for at detektere gravitationsbølger (EPTA observerer mere end 40 pulsarer) [11]. Dette hjælper med at mindske og forstå usikkerheder og variationer som enkelte pulsarer kan udvise.

Udover forståelsen af støjkluder, afhænger detektion af gravitationsbølger også af at pulsarene inkluderet i PTAs er jævnt fordelt på himlen.

For at opnå detektion af gravitationsbølger i den nærmeste fremtid arbejder flere grupper af astronomer hver især på observationer af pulsarer. Det er, udover EPTA, Australiens Parkes Pulsar Timing Array-gruppe (PPTA), den amerikansk-canadiske gruppe med det nordamerikanske Nanohertz-observatorium for gravitationsbølger (NANOGrav), det indiske Pulsar Timing Array (InPTA), samt grupper i Kina. Samarbejdet mellem disse grupper koordineres i det Internationale Pulsar Timing Array (IPTA), der kombinerer observationer fra den nordlige og sydlige halvkugle til et stort datasæt.



Figur 7. Hellings-Downs kurven viser den korrelation der er tilstede mellem pulsarer (y-aksen) og vinklen mellem pulsarer (x-aksen). Hvis denne kurve ses ved analyse af PTA data forventes det at man kan bekræfte at have observeret gravitationsbølger [13].

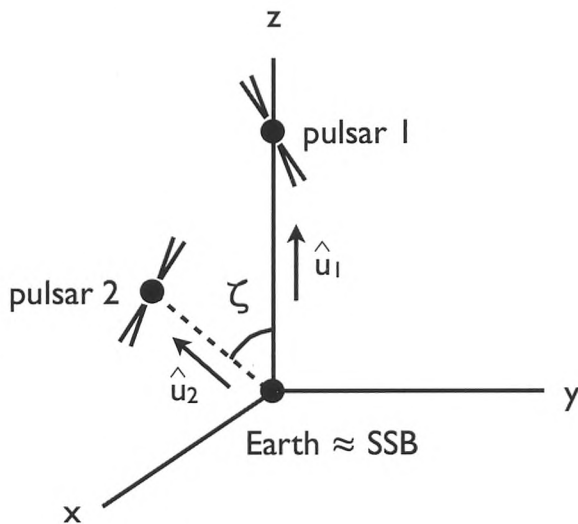
Astronomerne R.W. Hellings og G.S. Downs kiggede i begyndelsen af 1980'erne på ligningerne for korrelation af pulsarers tidsresidualer. De fandt ud af, at ved at antage, at de stokastiske gravitationsbølger kommer fra alle retninger (dvs. er isotrope), og

at kombinationen af baggrundsgravitationsbølger ikke længere bærer nogen polarisationsinformation, så ender krydskorrelationen af timingresidualer med at være en funktion af pulsarernes vinkelafstand [12]:

$$\alpha_{ij} = \frac{1 - \cos(\gamma_{ij})}{2} \times \ln\left(\frac{1 - \cos(\gamma_{ij})}{2}\right) - \frac{1}{6} \frac{1 - \cos(\gamma_{ij})}{2} + \frac{1}{3} \quad (1)$$

hvor α_{ij} er den resterende korrelation mellem to pulsarer (mærket i og j), og γ_{ij} er vinklen mellem de samme to pulsarer. Ved at plotte denne funktion over vinkelafstanden, fås Hellings og Downs-kurven (se figur 7) [12, 13].

Denne kurve viser ankomstidskorrelationen for PTA-pulsarer – og fortæller os præcis, hvad vi med statistisk signifikans bør se, når vi krydskorrelerer TOAs fra pulsarer i tilstedeværelse af en stokastisk gravitationsbølgebaggrund.



Figur 8. Et eksempel på geometrien bag udregningen af Hellings-Downskurven. Her ses to pulsarer og Jorden, som er lokaliseret i oprindelsespunktet af akserne. Jord-til-pulsarretningerne er givet ved vektorene $\hat{u}_1$ og $\hat{u}_2$, og vinklen mellem de to pulsarer er ζ . Ofte bruger man solsystemets barycentrum (SSB), som er solsystemets massecenter, for at have et fast referencepunkt i stedet for at bruge Jorden, som bevæger sig, som referencepunkt [13].

Hvor tæt på en detektion er Pulsar timing arrays?

Et nøgleelement i forbindelse med detektion af gravitationsbølger med PTAs er at forstå og reducere den støj, der påvirker det mulige gravitationsbølgesignal og pulsarsignalerne. Alle PTAs arbejder derfor konstant på at forbedre deres metode, forstå pulsarernes støj og eventuelle ændringer i pulsarsignalerne. Dette, og en længere periode med observationer, har gjort, at den øvre grænse for de gravitationsbølgefrekvenser, som

PTA'er er følsomme over for, er blevet sænket med mere end fire størrelsesordener siden 1980'erne. Derfor er der mange som mener, at den første direkte detektion af gravitationsbølger med PTAs sker i den nærmeste fremtid.

Litteratur

- [1] B.P. Abbott m.fl. (2016) Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Physical Review Letters*, bind **116**, side 061102.
- [2] J.O.P. Pedersen og M.C. Andersen (2016) Tyngdebølger observeret for første gang, *Kvant*, bind **27**, nr. 1, side 8–12.
- [3] R.A.Hulse og J.H. Taylor (1975) Discovery of a pulsar in a binary system, *AJ*, bind **195**, side 51–53.
- [4] <https://www.ligo.caltech.edu/>
- [5] R. Abbott m.fl. (2021) Population Properties of Compact Objects from the Second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog, *ApJL*, bind **913**, side L7.
- [6] C.J. Moore, R.H. Cole og C.P.L. Berry (2015) Gravitational-wave sensitivity curves, *Class. Quantum Grav.*, bind **32**, side 015014.
- [7] <https://www.elisascience.org/>
- [8] Foster, R. S., Backer, D. C.: Constructing a Pulsar Timing Array, *ApJ*, bind **361**, side 300–308 (1990).
- [9] D.R. Lorimer og M. Kramer (2012) Handbook of Pulsar Astronomy, Cambridge University Press.
- [10] <http://www.epta.eu.org/>
- [11] G. Desvignes m.fl.(2016) High-precision timing of 42 millisecond pulsars with the European Pulsar Timing Array, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind **458**, side 3341–3380.
- [12] R.W. Hellings og G.S. Downs (1993) Upper limits on the isotropic gravitational radiation background from pulsar timing analysis, *ApJL*, bind **265**, side 39–42.
- [13] F.A. Jenet og J.D. Romano (2015), Understanding the gravitational-wave Hellings and Downs curve for pulsar timing arrays in terms of sound and electromagnetic waves, *AmJP*, bind **83**, side 635–645.



Ann-Sofie Bak Nielsen er postdoc på Max Planck Institut for radioastronomi i Bonn. Hendes primære forskningsområde er timing af pulsarer, og hun er særligt interesseret i de lidt sjældnere systemer, som Black Widows og Redbacks. Ann-Sofie har også siden 2018 været en del af EPTA.

Casimireffekten – kraften af ingenting

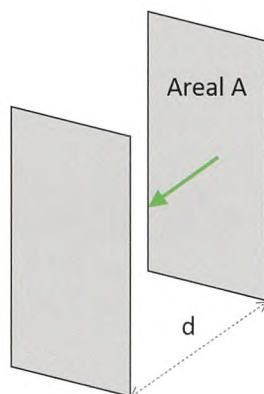
Bernhard Lind Schistad, Midtbyens Gymnasium, Mercantec

Når to elektrisk ledende plader anbringes tæt på hinanden i vakuum, vil der opstå en tiltrækkende kraft mellem dem. Denne effekt, som kaldes Casimireffekten, skyldes tilstedeværelsen af virtuelle partikler i vakuum, kaldet vakuum-polarisation. Dette er en makroskopisk effekt, som kan måles, men som skyldes rent kvantemekaniske mekanismer. For nylig er det også målt, at Casimireffekten kan skabe et drejningsmoment mellem asymmetriske objekter. Der ser også ud til, at der findes en sammenhæng mellem Casimireffekten og den vakuumenergi, som får universets udvidelse til at accelerere.

I 1948 offentliggjorde den hollandske fysiker Hendrik B. Casimir en artikel, som påviste, at to elektrisk ledende plader, der placeres tæt på hinanden i vakuum, vil blive tiltrukket af en gensidig kraft som skyldes vakuum-polarisation [1]. Denne kraft er proportional med arealet af pladerne og omvendt proportional med afstanden i fjerde potens. Casimir fandt at kraften er givet ved formelen:

$$F = \frac{\pi^2 \hbar c}{240} \frac{A}{d^4}, \quad (1)$$

hvor A er pladernes areal, d er afstanden, c er lyshastigheden og $\hbar$ er Plancks konstant divideret med 2π .



Figur 1. Casimirkraften.

For makroskopiske systemer er denne kraft ikke målbar, men når vi kommer ned i mikroskopiske systemer, fx i mekaniske mikrochips, er kraften reel og observerbar.

Meget forenklet er ophavet til denne kraft virtuelle partikler, som kortvarigt opstår i vakuum. Fordi afstanden mellem pladerne er lille, begrænser det antallet af vakuumtilstande, der kan eksistere mellem pladerne. Uden for pladerne kan der eksistere virtuelle partikler med alle mulige bølgelængder mellem nul og uendelig, mens den længste bølgelængde mellem pladerne er begrænset til afstanden mellem pladerne. Dette medfører at "trykket" af virtuelle partikler er større på ydersiden af pladerne, og dette vil give en kraft som presser pladerne sammen (se figur 2)

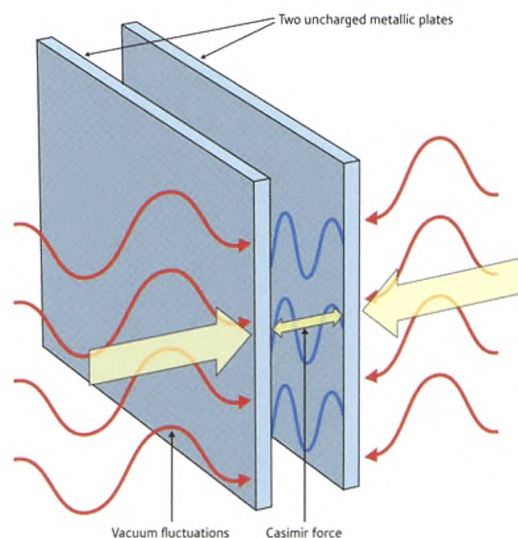
Vakuumfluktuationer

En karakteristisk egenskab ved kvantemekaniske systemer er, at de har en nulpunktsenergi. Dette skyldes, at de

adlyder Heisenbergs ubestemthedsrelation, som siger at usikkerheden på en partikels energi og tid skal opfylde uligheden:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2. \quad (2)$$

Dette medfører, at partiklen ikke kan have energi lig med nul og dermed også, at et lille rumfang ikke kan have energi lig med nul.



Figur 2. Vakuumfluktuationer.

I kvantefeltteori er rummet fyldt af et kvantefelt for hver type elementarpartikel. Da Heisenbergs ubestemthedsrelation skal være opfyldt, kan ikke alle disse felter være nul, når vi observerer over et kort tidsrum. Så vil hvert enkelt felt have en nulpunktsenergi svarende til længden af tidsrummet. Det vi sige, at selv om vi har absolut vakuum, vil der kortvarigt opstå virtuelle partikler. Dette giver ophav til vakuumenergi.

Casimireffekten opstår, når vi har to elektrisk ledende plader tæt på hinanden i vakuum. Da det elektriske felt inde i en leder er nul, betyder det, at der kun kan eksistere tilstande med et helt antal halve bølgelængder mellem pladerne. Det vil sige, at bølgelængder, der er længere end to gange afstanden, ikke kan eksistere i mellemrummet. Udenfor pladerne er der ingen begrænsning på bølgelængderne, og vakuumenergitætheden vil derfor være større udenfor pladerne. Dette er ophavet til Casimirkraften, som gør at pladerne tiltrækker hinanden.

Casimirkraften

Normalt udledes formelen for Casimirkraften (1) ved at finde bølgefunktionen for elektromagnetiske bølger mellem pladerne og bestemme trykforskellen mellem indersiden og ydersiden af pladerne. Denne udregning kan være ret kompliceret, men Peter W. Milloni har fundet en alternativ og meget simpel metode til at beregne Casimirkraften [2] og [3]. Vi vil her gennemgå hans udledning.

Vi ved at en simpel harmonisk oscillator i én dimension, har energiniveauer givet ved formelen:

$$E_n = (2n + 1) \cdot \frac{\hbar}{2} \omega. \quad (3)$$

Her er $n = 0, 1, 2, \dots$ antallet af halve bølger mellem væggene, og ω er vinkelhastigheden. Dette giver en nulpunktsenergi ($n = 0$) på:

$$E_0 = \frac{\hbar}{2} \omega. \quad (4)$$

Dette er nulpunktsenergien for en dipoloscillation i én dimension. For at finde nulpunktsenergien per volumen i tre dimensioner må vi multiplicere dette med antallet af vibrationstilstande per volumen.

For en dipoloscillation er antal vibrationstilstande i intervallet $[\omega, \omega + d\omega]$ givet ved [2]:

$$\frac{\omega^2}{2\pi^2 c^3} d\omega. \quad (5)$$

Vi multiplicerer med nulpunktsenergien for hver vibrationstilstand (3) og får energidensiteten:

$$\rho_0(\omega) = \frac{\hbar \omega^3}{2\pi^2 c^3} d\omega. \quad (6)$$

For at finde den totale vakuumenergi mellem vore to plader, må vi multiplicere med rumfanget og integrere over alle tilladte værdier for ω , svarende til en halvbølgelængde større end afstanden mellem pladerne. Hvis afstanden mellem pladerne er d og arealet er A , er nulpunktsenergien givet ved:

$$E = Ad \cdot \int_{\frac{\pi c \beta}{d}}^{\infty} \frac{\hbar \omega^3}{2\pi^2 c^3} d\omega. \quad (7)$$

Her har vi indført en dimensionsfaktor β i den nedre grænse i integralet for at kompensere for, at vi kun regner i én dimension ($\beta \approx 1/3$) [3].

Vi laver nu et trick ved at dele integralet i to intervaller:

$$E = Ad \cdot \int_0^{\infty} \frac{\hbar \omega^3}{2\pi^2 c^3} d\omega - Ad \cdot \int_0^{\frac{\pi c \beta}{d}} \frac{\hbar \omega^3}{2\pi^2 c^3} d\omega. \quad (8)$$

Det første integrale er kun proportionalt med rumfanget, og er uafhængig af geometrien. Det siger intet om afstanden mellem pladerne. Det kan derfor ikke give ophav til nogen kraft. Vi vil derfor ignorere det

og koncentrere os om vakuumenergien fra det andet integrale:

$$V(d) = -Ad \cdot \int_0^{\frac{\pi c \beta}{d}} \frac{\hbar \omega^3}{2\pi^2 c^3} d\omega \quad (9)$$

$$= -Ad \cdot \frac{\hbar}{8\pi^2 c^3} \left(\frac{\pi c \beta}{d} \right)^4 \quad (10)$$

$$= -A \frac{\hbar \pi^2 c \beta^4}{8d^3} \quad (11)$$

Vi kan nu bestemme kraften ved at differentiere energien med hensyn til d (arbejde = kraft $\times$ vej):

$$F = \frac{d}{dd} V(d) = A \frac{3\hbar \pi^2 c \beta^4}{8d^4}. \quad (12)$$

Da kraften virker på ydersiden af pladerne, ses denne formel tit med negativt fortegn.

Den nøjagtige værdi for dimensionsfaktoren β er 0,3247 [3]. Vi indsætter $\beta = 0,3247$ (tre dimensioner) og får Casimirs formel for kraften:

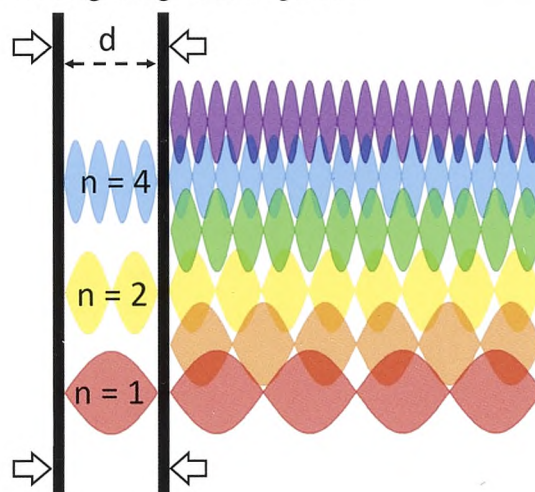
$$F = \frac{\hbar \pi^2 c \beta^4}{240} \frac{A}{d^4}. \quad (13)$$

Analogi med vandbølger

Der eksisterer en effekt, der svarer til Casimireffekten for vandbølger [4]. Når to parallelle plader nedsænkes i vand, som udsættes for kraftige kaotiske rystelser, vil vandbølger i mellemrummet mellem pladerne være begrænset til bølgelængder, der går op med et helt antal halvbølger mellem pladerne. Det vil sige, at hvis afstanden er d , skal bølgelængden for bølger mellem pladerne opfylde relationen:

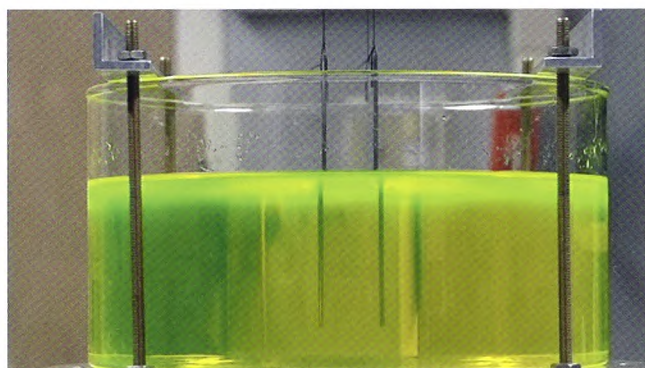
$$\lambda = 2n \cdot d, \text{ hvor } n = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

Denne restriktion gælder ikke uden for pladerne. Her kan alle bølgelængder optræde.

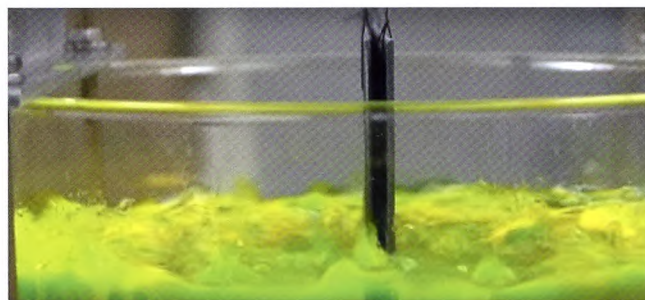


Figur 3. Tilladte bølgelængder.

Dette vil medføre, at ydersiderne af pladerne rammes af flere bølger end indersiderne, og pladerne presses sammen. Resultatet kan ses på figur 4, som viser to plader hængende i vand uden bølger. Hvis vi derimod ryster underlaget, så der opstår et kaos af bølger med alle mulige bølgelængder, vil pladerne presses sammen (figur 5).



Figur 4. Parallelle plader uden bølger.



Figur 5. Parallelle plader med kaotiske bølger.

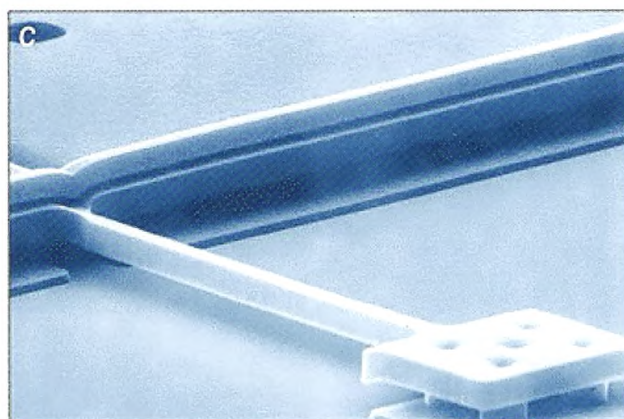
Måling af Casimireffekten

Under normale omstændigheder er Casimirkraften en meget lille kraft. Hvis vi har to plader på $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ i en afstand på $1\text{ }\mu\text{m}$, vil Casimirkraften være $0,13\text{ }\mu\text{N}$. Men allerede ved en afstand på 50 nm er trykket fra Casimireffekten lige stor som det atmosfæriske lufttryk.

Dette er alligevel nok til, at kraften kan måles. For mekaniske strukturer på chipniveau kan kraften komme til at påvirke funktionen. Forfatteren har set et eksempel på dette i forbindelse med brug af mikroskutterteknologi til billedannelse. I 1995 arbejdede en dansk virksomhed sammen med det schweitsiske CSEM-forskningsinstitut på at lave en mikrochip med flere tusinde små lukkere, som kunne åbne og lukke for lys fra en UV-lampe for at danne et billede på en trykplade. En enkelt lukker var udformet omtrent som vist på figur 6.

Det viste sig, at det var umuligt at operere denne chip pålideligt, da Casimirkraften kunne få den enkelte lukker til at sidde fast i åben tilstand, så mange pixler på trykpladen konstant blev belyst. Projektet måtte derfor opgives.

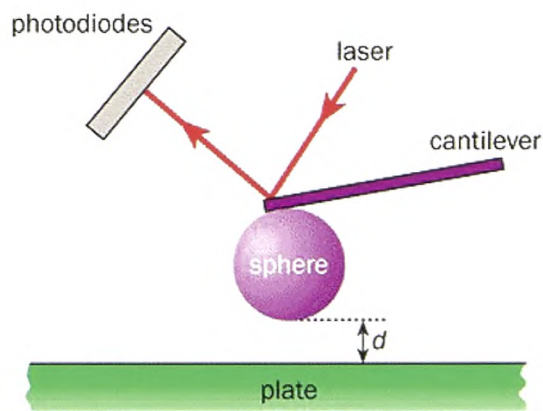
At fortage nøjagtige målinger af Casimireffekten er ikke helt nemt i praksis. Fx er det meget svært at fremstille parallelle bevægelige plader i mikroskopiske dimensioner. Man har derfor i stedet valgt at måle kraften mellem en mikroskopisk kugle og en plade. De første målinger blev foretaget af Marcus Sparnaay, en af Casimirs kolleger, i 1958 [5]. Han fandt en kraft på ca. 15% af de teoretiske forudsigelser, men den eksperimentelle usikkerhed var større end den målte effekt.



Figur 6. Mikroskutter.

Den første nøjagtige måling af Casimireffekten blev foretaget af Steve Lamoreaux i 1997 [6]. Han målte kraften mellem en sfærisk linse, belagt med kobber og guld, og en kvartsplade med samme belægning. Kuglen var ophængt i en tynd stang. En laserstråle registrerer kuglens position. Når kuglen nærmer sig pladen inden for nogle μm fra pladen, vil Casimirkraften skubbe kuglen tættere på pladen. Dette vil bøje udliggeren og laserstrålens vinkel påvirkes.

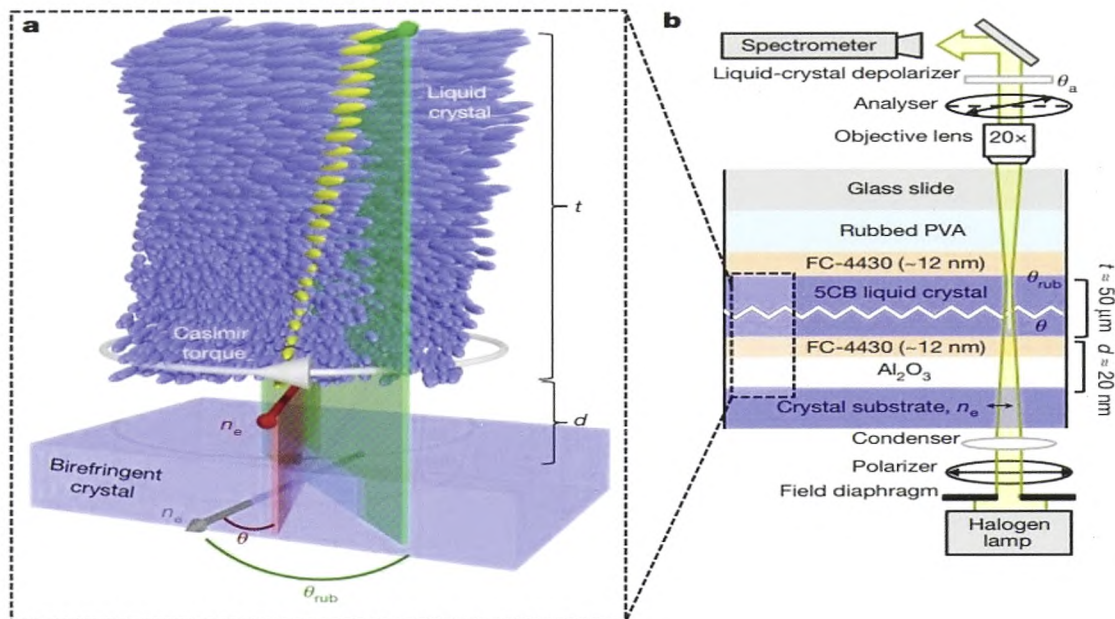
Med dette apparatur kunne Lamoreaux bestemme Casimirkraften, og fandt en overensstemmelse indenfor 5% af de teoretiske forudsigelser.



Figur 7. Lamoreauxs måleopstilling.

Casimirdrejningsmomentet

Lige som Casimireffekten kan frembringe en kraft, kan den også frembringe et drejningsmoment. Denne er lige blevet målt i et meget elegant eksperiment af en gruppe ved University of Maryland [7]. Et Casimirdrejningsmoment opstår fx, når en flydende krystal bringes tæt på en dobbeltbrydende krystal. Fordi materialerne er optisk anisotrope, vil der opstå forskellige brydningsindekser for forskellige polarisationsretninger af vakuumfluktuationerne. Dette vil medføre en kraft, som ændrer retning, når afstanden mellem den flydende krystal og den dobbeltbrydende krystal ændres. Dette medfører, at den flydende krystal drejer sig til positionen med lavest energi. Denne position vil ændre sig med afstanden. Forsøgsopstillingen er vist på figur 8.



Figur 8. Forsøgsopstilling til måling af Casimirdrejningsmoment.

Lys fra en halogenlampe polariseres, og passerer derefter gennem en dobbeltbrydende krystal og en flydende krystal. Opstillingen gør det mulig at måle drejningsmomentet ved at observere drejningsvinklen for krystallen (ved hjælp af det polariserede lys), som funktion af afstanden til den dobbeltbrydende krystal. Forsøget blev udført med fire forskellige krystaller (calcit CaCO_3 , litiumniobat LiNbO_3 , rutil TiO_2 og yttriumvanadat YVO_4).

Resultaterne er vist på figur 9, som viser moment per areal som funktion af afstanden. Kurvernes position og hældning afhænger af den dobbeltbrydende krystals egenskaber, men alle kurver viser en lineær sammenhæng mellem Casimirmoment og afstand. Dette er den første pålidelige måling af Casimirmoment, som er offentliggjort.

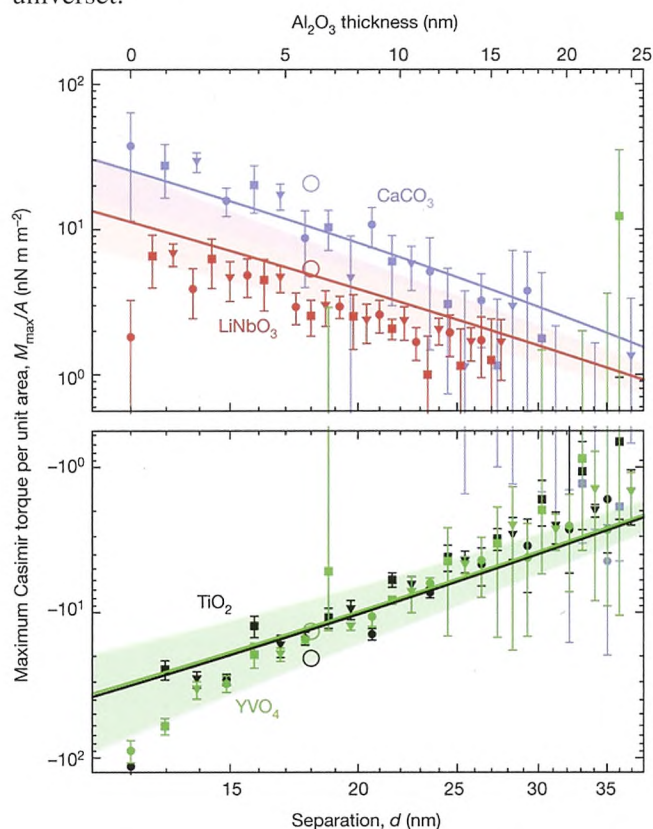
Det må forventes, at Casimirmomentet i fremtiden vil kunne udnyttes i nano- og mikromekaniske systemer, mikrofluidik og selvmontering af nanostrukturer, hvor effekten af kvantevakuumfluktuationer hidtil har været undervurderet.

Vakuumergergi og universets ekspansion

I kosmologien dukker der et begreb op, der kaldes mørk energi. Ophavet til den mørke energi er, at der er uoverensstemmelse mellem mængden af kendt stof i universet og universets overordnede geometri. Sammenhængen mellem universets ekspansion, universets densitet og rummets krumning er udtrykt i den første Freidmannligning [8], som er en løsning af Einsteins feltligninger for et ekspanderende univers.

Vi ved fra observationer, at universet er meget tæt på at have en euklidsk geometri (et fladt univers). Dette kan vi se ved at der ikke er nogen synlig forvrængning af meget fjerne galakser, som der ville være ved en sfærisk geometri eller en hyperbolsk geometri. Det vil sige, at hvis universet ikke er euklidsk, må krumningsradien være af størrelsesorden 100 milliarder lysår (eller me-

re). For at opnå dette må universets densitetsparameter Ω_Λ være meget tæt på den kritiske værdi, som giver euklidsk geometri [8]. Denne densitet svarer til ca. 5 brintatomer per m^3 . Men når vi summerer den målte densitet af ordinært stof (ca. 0,25 brint atomer per m^3) med den beregnede densitet af mørkt stof, udgør det kun ca. 20% af den kritiske densitet. Kosmologerne har derfor indført begrebet mørk energi som som forklaring på den manglende densitet. Mørk energi er en egenskab ved rummet, og den svarer til en vakuumenergi for hele universet.



Figur 9. Måleresultater for Casimirdrejningsmomentet.

Hvis vi prøver at beregne universets vakuumenergisdensitet på samme måde, som da vi beregnede Casimireffekten, støder vi ind i et alvorligt problem. Vi må summere nulpunktsenergien for alle felter, integreret over alle bølgelængder. Dette er divergente integraler, så summen bliver uendelig. Vi kan så argumentere for, at vi kun integrerer op til enten Planckenergien eller Higgsmassen, men i begge tilfælde får vi et resultat der er over 100 størrelsesordener for stort i forhold til den observerede værdi. Dette er fortsat et af de største uløste problemer i fysikken.

Men selv om vi ikke kan beregne densiteten af mørk energi, kan vi sagtens beregne den målte værdis indflydelse på universets ekspansion. For at gøre det skal vi betragte universets tilstandsligning [9]:

$$P = W \cdot \rho \quad (15)$$

hvor P er trykket, ρ er densiteten og W er en konstant som er afhængig af hvilken type energi, der dominerer universet. Denne konstant har ændret sig siden starten af big bang. I den tidlige fase, hvor temperaturen var høj, og fotonerne dominerede, var $W = -1$. Da universet var ca. 50.000 år gammelt, blev energidensiteten af stofpartikler større end densiteten af fotoner. Dette svarer til $W = 0$, det vil sige, at trykket er nul. Men efterhånden som densiteten af stof falder, kommer vakuumenergien til at spille en større rolle. Når den dominerer, er $W = -1$, og trykket er negativt. Dette medfører, at når universet ekspanderer, udfører det et negativt arbejde på rummet. Dette vil medføre en eksponentiel ekspansion. Det negative tryk skyldes, at når en "boks" af rummet udvider sig, vokser energien med mere end det arbejde, boksen udfører på omgivelserne.

Universets eksponentielle ekspansion blev opdaget i 1998 [10] og udløste nobelprisen i fysik i 2011.

Konklusion

Kvantemekaniske systemer har en nulpunktsenergi på grund af Heisenbergs ubestemthedsrelation. Denne vakuumenergi er ophav til Casimireffekten, som kan give både kræfter og drejningsmoment mellem elektrisk ledende objekter, der er tæt på hinanden. Disse kræfter påvirker mikromekaniske systemer og nanostrukturer, men vil i fremtiden også kunne udnyttes teknologisk i sådanne konstruktioner.

Det ser også ud til, at vakuumenergi skaber et negativt tryk, som er ophav til at universets udvidelse accelererer. Mens vi kan lave nøjagtige beregninger af de forskelle i vakuumenergi, der er ophav til Casimireffekten, er vi helt ude af stand til at beregne universets vakuumenergi, og dermed den kosmologiske konstant. Dette er en af de store udfordringer i fysikken.

Litteratur

- [1] H.B.G. Casimir (1948) Proceedings van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, bind 51, side 793.
- [2] P.W. Milloni (1994) The Quantum Vacuum, An Introduction to Quantum Electrodynamics, Academic Press Inc., side 9–17 og 253–271.
- [3] <https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/events/peter-milonni-casimir-effects>

- [4] B.C. Denardo, J.J. Puda og A. Larraza (2009) A water wave analog of the Casimir effect, American Journal of Physics, bind 77, side 1095.
- [5] M.J. Sparnaay (1958) Physica, bind 24, side 751.
- [6] S.K. Lamoreaux (1997) Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6 μm range, Phys.Rev.Lett., bind 78, side 5–8.
- [7] A.T. Somers, J.L. Garrett, K.J. Palm og J.N. Munday (2018) Measurement of the Casimir torque, Nature, bind 564, side 386–389.
- [8] A. Liddle (2015) An Introduction to Modern Cosmology, John Wiley & Sons Ltd.
- [9] B. Schistad (2018) Newton, Einstein og Universets ekspansion, LMFK bladet, nr. 1, side 41–48.
- [10] S. Perlmutter (2003) Supernovae, dark energy, and the accelerating universe, Physics Today, april, side 53.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han har i de sidste syv år undervist i fysik og matematik på Viborg Tekniske Gymnasium.

PFEIFFER VACUUM

Nyhed

**Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m³/t)
Ekstrem lyd- og vibrationssvag
pumpe med kompakt design**



Tlf. 3166 8708

Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

H.C. Ørsted og farmacihistorien

Poul R. Kruse

Hans Christian Ørsted, der var uddannet som farmaceut, har en fremtrædende plads i dansk farmacihistorie for sine initiativer til en reform af datidens farmaceutuddannelse. Under studieophold i udlandet havde Ørsted haft lejlighed til at se en opblomstrende industri, baseret på naturvidenskabelige undersøgelser. Efter Ørsteds opfattelse kunne et tilsvarende resultat opnås i Danmark ved forbedringer af undervisning og eksamen i naturvidenskaberne – for den farmaceutiske uddannelses vedkommende især i kemi. Efter flere initiativer fra Ørsteds side og senest tillige sammen med hans nære ven og medarbejder, William Christopher Zeise, blev der i 1828 indført en eksamensordning for den farmaceutiske kandidatuddannelse med fastlagte krav til art og omfang af de i eksamen indgående fag. Herved blev farmaceutuddannelsen, der hidtil havde været en apotekeruddannelse, både en apoteker- og en kemikeruddannelse. Denne uddannelsesprofil videreførtes efter oprettelsen af Den Farmaceutiske Læreanstalt i 1892 og blev en væsentlig forudsætning for opstart af en dansk lægemiddelindustri.¹

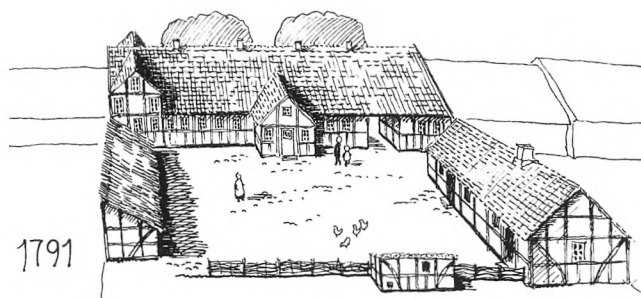
H.C. Ørsteds opvækst og skoleuddannelse

Hans Christian Ørsted blev født i Rudkøbing den 14. august 1777 som søn af apoteker Søren Christian Ørsted (1750-1822) og dennes hustru Karen Hermansen (1745-1793). Året efter, den 21. december 1778, fødtes lillebroderen Anders Sandøe Ørsted (1778-1860), hvilket blev af stor betydning, for de to brødre var gennem barndoms- og ungdomsårene uadskillelige og støttede hinanden i deres interesser og uddannelser [1, 2].



Figur 1. Statue af H.C. Ørsted placeret på Gaasetorvet i Rudkøbing ud for hans barndomshjem, Rudkøbing Apotek, der var beliggende i Brogade 15. Postkort fra 1954 (Det Kongelige Bibliotek).

I 1776 havde Søren Ørsted købt Rudkøbing Apotek på tvangsauktion. På dette tidspunkt var apoteksforholdene i Rudkøbing nærmest skandaløse. Efter det foreliggende var apotekergården “øde og forfalden”, apoteket “blottet for de nødvendigste Varer”, og klagerne fra publikum blevet “højere og højere”. Søren Ørsted måtte derfor begynde på stort set bar bund. Da Rudkøbing på denne tid var en lille by med ca. 850 indbyggere, og datidens lægemiddelforbrug, navnlig blandt landboerne, var ringe, er der ingen tvivl om, at Søren Ørsted i en årrække sad i vanskelige økonomiske kår. Hertil kom, at han gennem årene fik en stadig voksende familie at forsørge. Han var imidlertid en driftig mand og fik apoteket på fode.



Figur 2. Rudkøbing Apotek med sidebygninger set fra gårdsiden, 1791. Apotekets officin lå i hovedbygningen med indgang inde i porten. I sidebygningen til højre var der indrettet laboratorium, lagerrum og vaskehus. Tegning udført af Jens Kortermann Jauch [3] (Langlands Museum).

Hans Christian og Anders Sandøe fik en noget tilfældig skoleuddannelse. I sin selvbiografi skriver Hans Christian, at forældrene havde en temmelig omfattende husholdning, og da de ikke ville lade deres børn blive uregerlige under tjenestefolks opsyn, blev Hans Christian og Anders Sandøe hver dag sendt til en tysk parykmager, Christian Oldenburg, og hans kone, der boede i byen. Deres hjem blev de to børns første skole. Konen lærte dem at læse og skrive, og manden underviste dem i tysk og religion samt regning, dog kun i addition og subtraktion, da han ikke kunne andre regningsarter. Men en anden dreng, som tidligere havde gået i en skole, hvor undervisningen var bedre, lærte de to brødre at multiplicere, og en af byens præster lærte dem at dividere. Senere fik brødrene lejlighed til at lære fransk og engelsk af Rudkøbings byfoged.

I efteråret 1789, da Hans Christian var 12 år og Anders Sandøe knap 11 år, blev de taget ud af Oldenburgs skole for at blive apotekerdrenge i faderens apotek, men Anders Sandøe blev hurtigt ked af apoteksarbejdet og fik af faderen lov til at holde op.

H.C. Ørsteds farmaceutiske uddannelse

Det lovmæssige grundlag for uddannelse af farmaceuter og en hertil knyttet praksis, dengang H.C. Ørsted tiltrådte sin farmaceutiske uddannelse, kan beskrives som følger.

Som led i den offentlige regulering af apoteker-

¹ Artiklen er en redigeret og forkortet udgave af forfatterens artikel i tidsskriftet *Theriaca*, Hæfte 46 (2021).

væsenet blev der ved Christian V's medicinalordning af 1672, "Forordning om Medicis oc Apoteker etc.", indført bestemmelser om den farmaceutiske uddannelse for at sikre apotekernes forsyning med kvalificerede apotekere og apotekersvende. Den farmaceutiske uddannelse, der således var en apotekeruddannelse, omfattede en svendeuddannelse og en kandidatuddannelse [4].



Figur 3. Inventar fra Rudkøbing Apotek fra apoteker Søren Ørsted's tid (Det gamle Apotek, foto: Helle Ravn).

Uddannelsen til apotekersvend var henlagt til apotekerne. Betingelsen for at komme i apotekerlære var ifølge medicinalordningen, at man var dreng, som regel omkring fjorten år, og kunne forstå latin. Kravet om latinske kundskaber var selvfølgelig, da farmakopeerne og recepterne var skrevet på latin. Læretiden på apotek var en mesterlære med hovedvægten på det håndværksmæssige. I læretiden blev apotekerdrengen oplært i fremskaffelse, tilberedning, opbevaring og udlevering af lægemidler.

Om undervisningen bestemte medicinalordningen tillige, at apotekerdrengene om muligt skulle følge professoren i botanik ved Københavns Universitet, når han med sine studerende tog på botaniske ekskursioner. Efter fem til seks års læretid udstedte apotekeren, uden afholdelse af nogen eksamen, et svendebrev, hvorved apotekeren attesterede sin apotekerdrengs duelighed til at fungere som apotekersvend på ethvert apotek med jus practicandi, det vil sige med kompetence til at udføre alt fagligt apoteksarbejde selvstændigt og på eget ansvar.²

I henhold til medicinalordningen skulle en apotekersvend, der ønskede bevilling som apoteker eller stilling som apoteksbestyrer, erhverve sig den farmaceutiske kandidateksamen, Examen chemico-pharmaceuticum, som afholdtes af lægerne ved Det Medicinske Fakultet ved Københavns Universitet og apotekerne i København. Den farmaceutiske kandidateksamen var en mundtlig prøve, hvis omfang ikke var fastsat. Bestod

man denne eksamen, blev der udstedt et kandidateksamensbevis.

Apotekersvende, der ønskede at forberede sig til den farmaceutiske kandidateksamen, måtte finde ansættelse på velanskrevne apoteker i Danmark eller i udlandet og forøge deres praktiske viden gennem arbejdet her og supplere deres teoretiske viden gennem selvstudium eventuelt under vejledning af den pågældende apoteker. Endvidere blev det fra slutningen af 1700-tallet almindeligt, at apotekersvende fulgte forelæsninger i kemi ved Kirurgisk Akademi og Københavns Universitet og i botanik ved Universitetet, fordi der på dette tidspunkt blev oprettet selvstændige lærestole i disse for farmaceuterne vigtige fag. Indtil da havde disse videnskaber kun været doceret som bifag af Det Medicinske Fakultets professorer [2, 5].



Figur 4. Professor Ole Borch (1626-1690), Københavns Universitet, på botanisk ekskursion med sine studerende ca. 1680. Samtidig tegning [4].

Som nævnt blev H.C. Ørsted apotekerdreng på Rudkøbing Apotek i efteråret 1789 i en alder af 12 år, hvor han, som han skriver i sin selvbiografi, "fandt Smag i Apothekets chemiske Arbejder", læste kemiske skrifter og fik privat undervisning i de akademiske videnskaber af en student [6].

H.C. Ørsted's læretid varede til foråret 1794. Efterfølgende udstedte Søren Ørsted et svendebrev, hvori han ikke blot tilkendegav, at hans søn "besad den Duelighed, som man kan fordrø af en Apothekersvend", men tillige udtrykte sin glæde over, at sønnen både havde evner og lyst til at dyrke de videnskaber, især kemi og fysik, der står i nærmeste forbindelse med apotekerkunsten, og som i forening med det håndværksmæssige kan bringe apotekerkunsten til det ypperste [7].

I foråret 1794 drog de to Ørsted-brødre til København, hvor de begge – efter yderligere privatundervisning – bestod studentereksamen i efteråret 1794 med karakteren Laudabilis (rosværdig). Derefter studerede de til den akademiske adgangseksamen, filosofikum, som de begge bestod i 1795 ligeledes med karakteren Laudabilis. Ørstedbrødrene kunne dermed gå videre til de egentlige universitetsstudier.

H.C. Ørsted tog med stor iver fat på filosofi og naturvidenskaberne, herunder navnlig kemi, som han gjorde til sit hovedfag. Der fandtes på den tid ingen

² Apotekernes ret til selv at "gøre" apotekerdrengene til apotekersvende blev ophævet, da Danske Kancelli i 1811 indførte den farmaceutiske medhjælpereksamen som afslutning på læretiden på apotek. Denne eksamen blev afholdt af fysikus, den lokale embedslæge. Bestået eksamen gav ret til at fungere som apoteksmedhjælper med jus practicandi [4].

særlig eksamen for kemikere, og Ørsted havde da kun den udvej at erhverve sig den farmaceutiske kandidateksamen, Examen chemico-pharmaceuticum, som var den eneste, hvor kemi var et selvstændigt eksamensfag. Han forberedte sig til denne eksamen ved først at rejse hjem til faderen i Rudkøbing, hvor han i vinteren 1795-1796 overværede "de fornemste Laborationer" i apoteket. Efter sin tilbagekomst til København i foråret 1796 hørte han forelæsninger i kemi ved Kirurgisk Akademi og diverse forelæsninger ved Universitetet [7, 8].

H.C. Ørsted bestod den farmaceutiske kandidateksamen med karakteren *Laudabilis præ ceteris* (rosværdig frem for de øvrige) den 20. maj 1797 i en alder af 19 år. Den ene af eksaminatorerne, professor ved Det Medicinske Fakultet, Johan Clemens Tode (1736-1805), mente, at Ørsteds eksamenspræstation havde været så fremragende, at han ligefrem skyldte den unge farmaceut en offentlig omtale i den anledning. Det skete i Todes eget tidsskrift "Medicinisches-chirurgisches Bibliothek". Efter en rosende omtale af Ørsteds præstationer ved eksaminationen i de enkelte fag skriver Tode afslutningsvis [9, 8]:

"I rum Tid har vi ikke haft den Fornøjelse at blive stillet overfor en saa flink og samtidig saa ung Kandidat. Han vil dog vanskelig kunne ofre sig udelukkende for Farmacien, thi han er i Besiddelse af et saa overordentlig lykkeligt Geni og er født for Videnskaberne".

Disse udtalelser af Tode kom jo fuldt ud til at passe.

I 1799, to år efter erhvervelsen af den farmaceutiske kandidateksamen, blev Ørsted doktor i filosofi på en afhandling om naturmetafysik.

Hvad angår Anders Sandøe Ørsteds universitetsuddannelse, valgte han at studere jura. Han blev juridisk kandidat i 1799 og indledte fra 1801 en indflydelsesrig karriere i statens tjeneste som embedsmand, blandt andet beklædte han fra 1813 en chefstilling som deputeret i centraladministrationens højborg, Danske Kancelli, og fra 1825 til 1848 tillige embedet som generalprokurør³ samme sted.

Til Danske Kancellis ressortområde hørte Københavns Universitet, og i kraft af sin centrale stilling i Kancelliet blev det – som det skulle vise sig – A.S. Ørsted, der fik bragt en eksamensordning for den farmaceutiske kandidatuddannelse til gennemførelse i 1828.

H.C. Ørsted som apoteksbestyrer

I år 1800 fik H.C. Ørsted to midlertidige ansættelser. Indehaveren af Løve Apoteket i København, apoteker Johan Georg Ludvig Manthey (1769-1842), der tillige var lektor i kemi ved Kirurgisk Akademi og administrator ved Den Kongelige Porcelainsfabrik tiltrådte i året 1800 en etårig udenlandsrejse for at studere porcelænsfabrikation. Under Mantheys udenlandsrejse bestyrede H.C. Ørsted Løve Apoteket, ligesom han varetog Mantheys kemiske forelæsninger ved Kirurgisk Akademi.

København Løve Apotek var byens største apotek og beliggende i en ejendom på hjørnet af Amagertorv

og Hyskenstræde. Ved den store brand i København i 1795 nedbrændte apoteksejendommen, men den blev genopført i de følgende fire år, således at det var et helt nyindrettet apotek, som Ørsted blev bestyrer af.



Figur 5. København Løve Apoteks ejendom, opført 1796-1799, beliggende på hjørnet af Amagertorv og Hyskenstræde. Her boede H.C. Ørsted som bestyrer af apoteket i 1800-1801.

Ørsted fik nu ansvaret for Løve Apotekets drift og et personale på 12 personer, der alle – ligesom Ørsted – havde fri kost og logi på apoteket.

Hvad angår apotekets drift, måtte Ørsted sikre sig, at apotekersvendene og apotekerdrengene arbejdede sikkert og nøjagtigt i apotekets officin i forbindelse med ekspedition af de indleverede recepter og tilberedning af de ordinerede lægemidler.

Kravet om sikkert og nøjagtigt arbejde gjaldt også i apotekets laboratorium, hvor lægemidler til lagerhold blev fremstillet. For Ørsted gjaldt det også om at holde nøje kontrol med lagrenes status i apotekets materialkammer og materialkælder, hvor henholdsvis de "tørre" varer og de "våde" varer blev opbevaret.

Dengang havde apotekerne pligt til at lagerholde alle de råvarer og færdige præparater, der var optaget i den gældende farmakopé "Pharmacopoea Danica 1772", i alt 1.220 varer [10]. Lageret af råvarer som urter og kemikalier fra ind- og udland måtte fyldes op, inden vinteren satte ind, og isen lukkede farvandene, medens lageret af færdige præparater løbende måtte suppleres, så apoteket til stadighed havde det fornødne forråd heraf.

Det var også Ørsteds opgave at undervise apotekerdrengene. Visse aftenener var sat af til undervisning af drengene i botanik, naturhistorie og latin. Desuden

³Generalprokurøren var under enevælden en embedsmand, der var statens juridiske konsulent, og hvis vigtigste hverv var at afgive erklæringer i konkrete sager, inden regeringen traf sine afgørelser, og at fremkomme med forslag til nye love samt i det hele taget at påpege mangler i den eksisterende lovgivning.

læste han kemi med drengene som forberedelse til arbejdet i laboratoriet, ligesom han fortalte om selve præparationen og de redskaber, der skulle bruges hertil.



Figure 6. København Løve Apoteks officin fra 1799 [11].

H.C. Ørstedes initiativer til en reform af farmaceutuddannelsen

Samtidig med varetagelsen af de midlertidige hverv som bestyrer af Løve Apoteket og forelæser i kemi ved Kirurgisk Akademi fik H.C. Ørsted i året 1800 sin første lærerpost ved Københavns Universitet, nemlig som ulønnet farmaceutisk adjunkt ved Det Medicinske Fakultet, hvor han skulle undervise farmaceutiske kandidatstuderende i "Materia medica og Pharmaceutik" [6, 5].

Ørstedes virksomhed som adjunkt blev dog af kort varighed, for i årene 1801-1804 foretog han en studierejse for fondsmidler til Tyskland, Frankrig og Holland for at studere naturvidenskaberne – en dannelsesrejse, der skal ses i lyset af statens ønske om at bruge naturvidenskaberne til at fremme landets velfærd.

I 1700-tallet var den økonomiske politik i Danmark domineret af merkantilismen. Målet for den merkantilistiske politik var landets rigdom, og kilden til berigelse var blandt andet udenrigshandel. Man skulle eksportere så meget som muligt og importere så lidt som muligt af forarbejdede varer. Landet skulle så vidt muligt være selvforsynende eksempelvis ved produktion af varer i indenlandske manufakturer og fabrikker. For at opnå dette måtte staten gribe regulerende, kontrollerende og støttende ind i erhvervslivet i alle dets former.

Et karakteristisk træk ved merkantilismen var opfattelsen af naturvidenskaberne som værdifulde på grund

af deres nytte for landets økonomi. Denne opfattelse markerede sig blandt andet stærkt i kemien, hvor teknisk kemi havde langt større interesse end teoretiske og grundvidenskabelige overvejelser, idet dyrkning af teknisk kemi ville bringe manufakturer og fabrikker "i flor" [2].

Den økonomiske politik var domineret af de merkantilistiske ideer indtil omkring 1780, da liberalistiske tanker begyndte at gøre sig gældende, men det snævre nyttebetonede syn på naturvidenskaberne vedblev at spille en vigtig rolle indtil omkring 1840.

Under sin studierejse fik Ørsted lejlighed til at se eksempler på naturvidenskabernes praktiske anvendelse. I Tyskland mødte han repræsentanter for den fremvoksende tekniske kemi, der servicede minedrift, porcelænsfabrikker, bryggerier, tekstilindustri, farverier og blegier. Og under sit ophold i Paris så Ørsted – hvad han selv betegner – et inspirerende eksempel på, hvorledes kemisk forskning blev frugtbargjort i fabriksproduktion [12].

Efter hjemkomsten fra sin studierejse i 1804 genoptog Ørsted sin virksomhed som ulønnet farmaceutisk adjunkt ved Det Medicinske Fakultet, indtil han i 1806 fik en lønnet stilling ved Universitetet som ekstraordinær professor i fysik ved Det Filosofiske Fakultet blandt andet med pligt til at undervise lægestuderende og farmaceutiske kandidatstuderende i fysik og kemi. I 1817 blev han ordinær professor.

Som professor havde Ørsted mulighed for at gøre sig gældende på Universitetet, hvilket han straks benyttede sig af, idet han i 1806 til Universitetets direktion indsendte et "Forslag til en ny Organisation af det farmaceutiske Studium hos os" [5]. Forslaget var inspireret af hans iagttagelser og erhvervede viden under hans studierejse og havde specifikt den gældende preussiske apotekerforordning, "Revidierte Preußische Apotheker-Ordnung vom 1801" [13], som forbillede. Ørsted havde stiftet bekendtskab med denne forordning under sit ophold i Berlin i 1801-1802 hos apoteker og kemiker Sigismund Friedrich Hermbstädt (1760-1833), der var en indflydelsesrig person i Preussen, og som havde en "nicht geringen Anteil" i udarbejdelsen af forordningen [14, 15].

Ørstedes forslag havde til formål dels at skaffe landet en virkelig duelig apotekerstand, dels at dække behovet for kvalificerede kemikere for at opfylde det statslige ønske om nyttiggørelse af kemien i manufakturer og fabrikker.

Forslaget omfattede dels indførelse af en eksamensordning for den farmaceutiske kandidatuddannelse, således at den farmaceutiske kandidateksamen svarede til de kvalifikationskrav, der måtte stilles til en apoteker, dels indførelse af en særlig kemisk eksamen, hvortil farmaceuter, som havde opnået førstekaraktet ved den farmaceutiske kandidateksamen, kunne indstille sig og ved beståelse kunne kaldes Candidatus chemiæ. Ørsted nærede ingen tvivl om, at mange unge mænd ville benytte denne anledning til at skaffe sig flere kemiske kundskaber, end de behøvede som apotekere, og at dette ville være til fordel for staten [5].



Figur 7. Kongsberg Sølvverk og minebyen Kongsberg i Norge. Kobberstik fra 1696 (Det Kongelige Bibliotek).

“Staten vil saaledes beriges med en Classe af underviste Mennesker, hvis Duelighed kan have den mest afgjorte Indflydelse paa Fabrikers og Manufacturers Opkomst og Flor, paa Hyttevæsenets [Bjergværksdriftens] Forbedring i Norge, paa Landoeconomiens [Landbrugets] Forædling, kort, paa alt det, som har bragt Engelland og en Deel af Frankerige til en saa udmærket Grad af Velstand.”

Universitetets direktion sendte Ørstedes forslag til Det Medicinske Fakultet og Det Kongelige Sundhedskollegium, der var den centrale styrelse for sundhedsvæsenet, for at indhente deres udtalelser om forslaget. Endvidere fik apotekerne i København tilsendt forslaget til udtalelse af Fakultetet.

Ørstedes forslag vandt ikke gehør hos sagens parter. Fakultetet og Sundhedskollegiet så ingen grund til at indføre en højere eksamen i kemi for farmaceuter, og apotekerne fandt, “at den chemiske Examen meget vel kunde forenes med den pharmaceutiske”. Sagen blev herefter henlagt af Universitetets direktion [5].

I 1813 tog Ørsted sagen op på ny, men denne gang som led i en større plan i form af et forslag til studie- og eksamensreformer inden for de naturvidenskabelige uddannelser. Under en ny studierejse i Tyskland og Frankrig i 1812-1813 havde Ørsted haft lejlighed til at se en rigt opblomstrende industri, baseret på kemiske og fysiske videnskabsmænds undersøgelser. Skulle et tilsvarende resultat af de kemiske og fysiske videnskabs anvendelse i teknikens tjeneste opnås i Danmark, måtte der efter Ørstedes opfattelse skabes forbedringer af undervisning og eksamen i naturvidenskaberne – for

den farmaceutiske kandidatuddannelses vedkommende især i kemi. Der kom dog intet ud af forslaget. Samme år indtraf statsbankerotten, og landets situation var givetvis ikke til uddannelses- og eksamensreformer [5].

I 1826 kom der et tredje forslag til reform af den farmaceutiske kandidateksamen i form af en ansøgning til kongen. Denne gang var det ikke Ørsted selv, som var forslagsstiller, men hans nære ven og medarbejder, William Christopher Zeise (1789-1847), der var professor i kemi ved Københavns Universitet fra 1821 og ligesom Ørsted var farmaceut og havde erhvervet den filosofiske doktorgrad.

Zeises forslag var i det store og hele motiveret på samme måde og udarbejdet efter samme retningslinjer som Ørstedes forslag af 1806 og 1813. Forslaget omfattede en reform af den farmaceutiske kandidateksamen ved indførelse af blandt andet to eksamensniveauer, idet omfanget af kemi skulle være større ved den højere eksamen end ved den lavere eksamen, hvor pensum skulle svare til de kemiske kundskaber, man behøvede som apoteker.

Årsagen til, at det ikke var Ørsted selv, der fremsendte forslaget, er formentlig, at der med Universitetets ansættelse af Zeise som professor i kemi var kommet en selvstændig lærestol i dette fag, og at det derfor var naturligt, at det var professoren i kemi og ikke professoren i fysik, der var forslagsstiller. Men Ørsted havde på anden måde indflydelse på forslaget. Han var nemlig på dette tidspunkt Universitetets rektor og benyttede sin stilling til at uddybe Zeises forslag i et separatvotum, da han sendte sagen i cirkulation.

Zeises forslag blev i første omgang behandlet af Det Medicinske Fakultet og Det Kongelige Sundhedskollegium. Begge steder mødte forslaget megen modstand. Fakultetet anså det for aldeles urimeligt, at man af farmaceuterne skulle forlange flere kundskaber ved eksamen end den offentlige sikkerhed med hensyn til deres næringsvej kræver. Og Sundhedskollegiet stillede sig ganske ved Fakultetets side, idet Sundhedskollegiet blandt andet udtalte, at en dybere indsigt i den rene kemi, end den farmakologien og farmacien indeholder, behøver farmaceuterne ikke [5].



Figur 8. William Christopher Zeise (1789-1847). Maleri udført af Frederik Ferdinand Helsted (1809-1875) mellem 1842 og 1847. Foto: Lennart Larsen (Det Nationalhistoriske Museum på Frederiksborg Slot).

Da Zeises forslag var stilet til kongen, blev det nu Danske Kancellis opgave på grundlag af det foreliggende materiale at finde den rette løsning.

Sagen fandt sin afgørelse i Kancelliet efter voting blandt kancelliets deputerede, heriblandt Anders Sandøe Ørsted (1778-1860). A.S. Ørsted var som tidligere nævnt ikke alene deputeret i Kancelliet, men tillige generalprokurør samme sted, og hans mening blev den afgørende for Kancelliets stilling. A.S. Ørsted og ligeledes Kancelliet gik ind for en reform af den farmaceutiske kandidateksamen baseret på Zeises forslag, men kun på ét niveau. For kemiens vedkommende var niveauet beliggende mellem den af Zeise foreslåede lavere og højere eksamen, således at omfanget af kemi ved den farmaceutiske kandidateksamen alligevel ville blive større end nødvendigt for udøvelse af apoteksvirksomhed. Til Det Medicinske Fakultets og Sundhedskollegiets indvending, at man ikke kunne forlange, at apotekerne skulle bekoste en uddannelse udover den, deres fag absolut krævede, da de ikke var lønnede af staten, men måtte ernære sig ved egen flid og foretagsomhed, bemærkede A.S. Ørsted, at staten netop kunne kræve dette til gengæld for den eneret til lægemidlers fremstilling og forhandling, som apotekerne havde i kraft af deres privilegier.

Efter indstilling fra Kancelliet blev den nye eksamensordning for den farmaceutiske kandidatuddannelse med fastlagte krav til art og omfang af de i eksamen indgående fag og med anbefalede lærebøger indført ved kongelig forordning, "Forordning om den pharmaceutiske Examen", og en hertil knyttet resolution i 1828 [5]. Farmaceutuddannelsen blev herved både en apoteker- og en kemikeruddannelse.



Figur 9. Københavns Universitets ejendom, Nørregade 21, beliggende ved siden af Sankt Petri Kirke. På første sal var der indrettet en lejlighed, hvor H.C. Ørsted boede fra 1819 til 1824. Anden sal rummede Universitetets fysiklaboratorium og kemilaboratorium samt et auditorium. Tredje sal og kvistetage blev påbygget i 1844 [16] (Det Kongelige Bibliotek).

Oprettelsen af Den Farmaceutiske Lærestalt

Med oprettelsen af Den Farmaceutiske Lærestalt i 1892 fik farmaceutuddannelsen sit eget hus og en samlet studie- og eksamensordning. Læretiden på apotek blev fastsat til $3\frac{1}{2}$ år og afsluttedes med den farmaceutiske medhjælpereksamen, der blev afholdt af lærestaltens lærerstab. Bestået medhjælpereksamen gav adgang til optagelse på lærestalten som kandidatstuderende. Den farmaceutiske kandidatuddannelse blev normeret til $1\frac{1}{4}$ år, fra 1895 dog til $1\frac{1}{2}$ år [17].

Ved etableringen af en formaliseret farmaceutisk kandidatuddannelse ved lærestalten skete der ingen ændring af uddannelsens profil. Den forblev en apoteker- og kemikeruddannelse. Undervisningen i kemi udgjorde 61 % af den samlede undervisning i kandidatuddannelsen, botanik 13 %, farmakognosi 11 %, fysik 9 % og farmaci 6 %. Kemiundervisningens omfang var større end nødvendigt for udøvelse af apoteksvirksomhed. Herom vidner følgende udtalelse af direktør for lærestalten, professor i organisk kemi, dr.phil. Emil Koefoed (1858-1937), i hvilken han sammenligner undervisningen i kemi ved lærestalten med undervisningen i samme fag ved Københavns Universitet og Den Polytekniske Lærestalt, som de farmaceutiske kandidatstuderende tidligere fulgte [18]:

"Den [Undervisningen i Chemi] var ... ikke mere specielt pharmaceutisk end før, og Ansvar for, at der i saa Henseende ingen Ændring skete fra tidligere Tid falder overvejende paa mig. Jeg var opdraget i det gamle System, det der væsentlig var H.C. Ørsteds. Jeg

havde ... levet mig ind i hans Aand... Jeg syntes, at Systemet var godt og kendte ikke andet. For mig var det overvejende Hensynet til Eleverne det gjaldt. Det blev min Stolthed at kunne pege paa, hvad tydelig nok forelaa, at vore Elever havde faaet en Undervisning, der kunde bære dem. Enhver pharmaceutisk Kandidat kunde, enten hans Livsbane faldt paa et Apothek eller udenfor, leve af den Kundskabsmængde han havde faaet paa Læreanstalten, og jeg kunde med mine stærkt konservative Anlæg i mange Aar ikke faa fat paa, at der kunde være Grund til at søge Undervisningen gjort mere specielt pharmaceutisk.”



Figur 10. Den Farmaceutiske Lærestanstalt, Stockholmsgade 27-29, København. Fotografi fra 1917 (Dansk Farmacihistorisk Fond).

Farmaceuternes erhvervsmønster

Den ved eksamensordningen af 1828 skabte pharmaceutiske kandidatuddannelse som både en apoteker- og en kemikeruddannelse og videreførelsen af denne uddannelsesprofil efter oprettelsen af Den Farmaceutiske Lærestanstalt i 1892 afspejlede sig markant i erhvervsmønstret for farmaceuterne med apotek og kemisk virksomhed som de to hovedbeskæftigelsesområder.

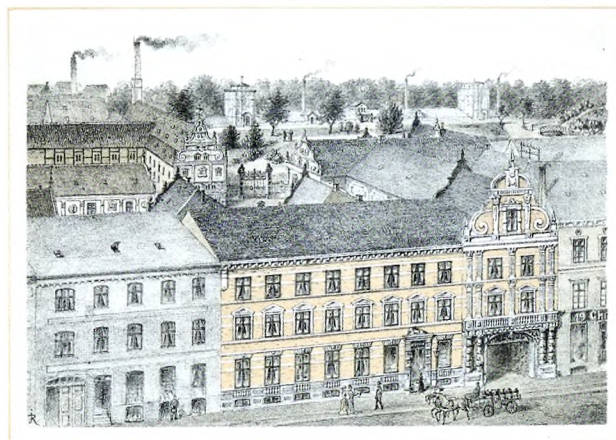
I perioden 1867-1916 blev der uddannet 1.815 pharmaceutiske kandidater. Heraf fik 21 % bevilling som apotekere, 32 % ansættelse som apoteksfarmaceuter og 23 % beskæftigelse ved kemisk virksomhed i Danmark.

Mange farmaceuter nedsatte sig som selvstændige materialister i København og en lang række provinsbyer. Materialhandel var et naturligt arbejdsområde for farmaceuter, der ikke ønskede eller havde mulighed for at blive apotekere, idet handel med droger til spisebrug og kemikalier til teknisk brug havde været en del af

apotekernes virksomhed siden apotekervæsenets etablering.

Den største aftager af farmaceuter inden for den kemiske branche var den fremvoksende biokemiske industri, herunder især nærings- og nydelsesmiddelindustrien: bryggerier, mineralvandsfabrikker, spritfabrikker, sukkervare- og chokoladefabrikker, krydderi-, senneps- og essensfabrikker samt sukkerfabrikker. Derimod var det kun et mindre antal farmaceuter, der fik ansættelse i den uorganisk-kemiske industri, der fremstillede basiskemikalier, glas, tændstikker m.v. De nye industriprodukter førte til etablering af analytiske handelslaboratorier, som var private laboratorier, der blandt andet kunne teste kvaliteten af et industriprodukt for køberen. Disse laboratorier blev ligeledes aftagere af et mindre antal farmaceuter.

På denne tid blev der også uddannet andre kemikere: fabriksingeniører, senere betegnet kemiingeniører, ved Den Polytekniske Lærestanstalt samt mag.scient.er i kemi og fra 1883 tillige cand.mag.er med kemi som bifag ved Københavns Universitet. Af disse kemisk uddannede personer blev der dimitteret 403 kemiingeniører i perioden 1856-1918, 19 mag.scient.er i perioden 1857-1906 og 117 cand.mag.er i perioden 1888-1906. Blandt disse var det med få undtagelser for de universitetsuddannede kemikeres vedkommende kun kemiingeniørerne, der fik ansættelse i den kemiske industri, endda kun en mindre del og hovedsagelig i den uorganisk-kemiske industri. Desuden fik et mindre antal kemiingeniører ansættelse ved analytiske handelslaboratorier [19].



Figur 11. Gustav Lotzes kemiske Fabrikker, Overgade, Odense, 1888 (Dansk Farmacihistorisk Fond).

Det har sin forklaring, at den biokemiske industri foretrak at ansætte farmaceuter frem for kemiingeniører. Kemiingeniører havde en bredere kemisk viden end farmaceuter, men manglede træning i denne videns praktiske implementering i et produktionsanlæg, hvilket ikke gjaldt for farmaceuter. Farmaceuter havde erhvervet sig fortrolighed med råvarer og var blevet oplært i håndtering og præparation af disse til færdigvarer under deres lange læretid på apotek. Da den tidlige biokemiske industri krævede højere grad af praktisk håndlag end stor kemisk viden, blev denne industri domineret af farmaceuter [20, 19]. Tilstedeværelsen af pharmaceutiske kandidater med nævnte kvalifikationer

var en væsentlig forudsætning for opstart af en dansk lægemiddelindustri. Blandt de farmaceutiske kandidater, der blev uddannet i perioden 1867-1916, fik 109 således beskæftigelse ved farmaceutisk engroshandel og industri i løbet af denne periode.

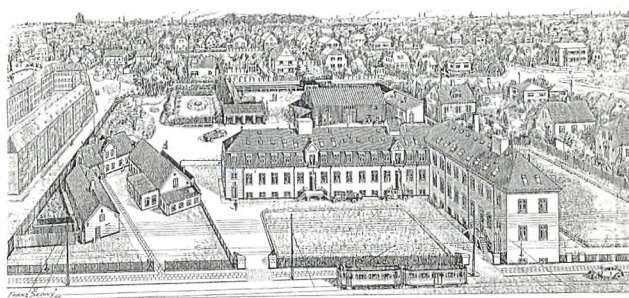


Figur 12. Digisolvin "Leo" (injektionsvæske) fra Løvens kemiske Fabrik. (LEO Pharma A/S, foto: Carsten Andersen).

Opstart af en dansk lægemiddelindustri

Etableringen af en dansk lægemiddelindustri blev påbegyndt i beskedent omfang i 1860'erne og var inspireret af den fremvoksende udenlandske lægemiddelindustri.

Apoteker Alfred Nicolai Benzon (1823-1884) på Svane Apoteket i København havde i 1849 etableret en engroshandel for droger og kemikalier til apotekere, materialister og købmænd. I 1863 købte han en fabriksbygning ved Kalvebod Strand, det nuværende Halmtorvet. Hertil flyttede han engroshandelen, ligesom han her indrettede en fabrik, Alfred Benzons kemiske Fabrik, til fremstilling af kemisk-tekniske artikler samt apotekslægemidler, som solgtes til apotekerne i bulk, hvis de ikke ønskede selv at fremstille dem.



Figur 13. Løvens kemiske Fabrik, Brønshøjvej, København, 1930'erne (LEO Pharma A/S).

I 1860 etablerede indehaveren af Løve Apoteket i Odense, Gustav Lotze (1825-1893), en tilsvarende virksomhed, Gustav Lotzes kemiske Fabrik, ved apoteket i Overgade.

Alfred Benzon markedsførte i 1893 de første danske fabriksfremstillede lægemidler i forbrugerpakning, de såkaldte "medicinske specialiteter", senere betegnet "farmaceutiske specialiteter". Det drejede sig om to skjoldbruskkirtelpræparater, der begge var udviklet i samarbejde med hospitalslæger og fremstillet af kirtler

fra kalve til behandling af myxødem. Det ene præparat var en ekstrakt af skjoldbruskkirtel, der fik navnet Thyreoidin, og det andet præparat bestod af tørret skjoldbruskkirtel i pilleform, *Pilulae glandulae thyreoideae siccatae* [21].

En lægemiddelindustri med egen forskning startede med oprettelsen af Løvens kemiske Fabrik i 1908 og etablering i tilknytning hertil af et bakteriologisk og et farmakologisk laboratorium i 1909. Firmaet blev stiftet af de to indehavere af Løve Apoteket i København, apoteker August Kongsted (1870-1939) og apoteker Anton Antons (1859-1920), og havde til huse i naboejendommen til apoteket ved hjørnet af Amagertorv og Hyskenstræde. Blandt de første forskningsopgaver var standardisering af udtræk af lægeplanten digitalis, som i 1917 førte til hjertepreparatet Digisolvin "Leo", der fik en stor udbredelse og blev en anelig eksportartikel.

I 1926 flyttede Løvens kemiske Fabrik til en fabriks-ejendom på Brønshøjvej.

I 1910'erne og 1920'erne kom der flere lægemiddelindustrivirksomheder til, heriblandt Det Danske Medicinal- & Kemikalie-Kompagni (Medicinalco), Ferrosan, Pharmacia, Nordisk Insulinlaboratorium, Dansk Chemo-Therapeutisk Selskab, Novo Therapeutisk Laboratorium og Gea.



Figur 14. Danmarks Farmaceutiske Højskoles H.C. Ørsted-medalje præget i aluminium i 1977 i anledning af 200-året for Ørstedes fødsel. Medaljen blev indstiftet af Højskolen i 1956 dels for at ære Ørsted for hans indsats for reformering af den farmaceutiske uddannelse, dels til anvendelse i en ny rektorkæde og som hæderspris til fortjente personer. Medaljen er udformet af Harald Salomon (1900-1990). Som motiv på medaljens forside ses den græske sundhedsgudinde Hygieias insignier, en skål med en lægende drik, som indtages af en slange. På skålen er anført tre årstal: 1672, der henviser til "Forordning om Medicis oc Apoteker etc.", som indførte bestemmelser om den farmaceutiske uddannelse, og 1828, der hentyder til "Forordning om den pharmaceutiske Examen", som indførte fastlagte krav til art og omfang af de i den farmaceutiske kandidateksamen indgående fag, samt 1892, der refererer til oprettelsen af en selvstændig farmaceutisk uddannelsesinstitution (Dansk Farmacihistorisk Fond).

Lægemiddelindustriens etablering og udvikling betød, at de medicinske specialiteter udgjorde en stigende del af lægemiddelmarkedet, men til forskel fra apotekslægemidlerne var de medicinske specialiteter ikke underlagt offentlig kontrol. Dette forhold blev ændret ved apotekerloven af 1932, som indførte følgende bestemmelse [22]:

"Medicinske Specialiteter er undergivet [Sundhedsstyrelsens] Kontrol saavel med Hensyn til deres Indhold og Sammensætning som med Hensyn til Navn, Pris og den Maade, paa hvilken Forhandling finder Sted."

Lægemiddelindustrien blev hermed officielt anerkendt som lægemiddelleverandør i Danmark.

At lægemiddelindustrien var blevet en betydelig aktør på lægemiddelmarkedet, kan illustreres ved følgende tal: I 1935 eksisterede der 39 lægemiddelfabrikanter i Danmark, som i alt havde markedsført 773 medicinske specialiteter og i alt beskæftigede 96 farmaceutiske kandidater.

Den ved eksamensordningen af 1828 skabte farmaceutuddannelse som både en apoteker- og kemikeruddannelse og videreførelsen af denne uddannelsesprofil efter oprettelsen af Den Farmaceutiske Lærestanstalt i 1892 havde således vist sin nytte.

Efterskrift

Den danske lægemiddelindustri er vokset kontinuerligt siden sin etablering med en stigende vækstrate siden 1950'erne, således at lægemidler nu er Danmarks vigtigste eksportvare. I 2019 udgjorde den danske lægemiddeleksport 127 mia. kr. svarende til over 17 % af den samlede danske vareeksport. Endvidere er farmaceuter fortsat stærkt repræsenteret i den farmaceutiske industri i Danmark. 65 % af de farmaceuter, der er uddannet på Københavns Universitet inden for de seneste 10 år, er ansat i lægemiddel- og biotekindustrien, 15 % arbejder på apotekerne, medens de resterende 20 % er offentligt ansatte. Herved er danske farmaceuters erhvervsmønster forskelligt fra erhvervsmønstret for farmaceuter i mange andre europæiske lande, hvor farmaceuter hovedsagelig arbejder på apotekerne.

Litteratur

- [1] E. Dam og A. Schæffer (1925) De Danske Apotekers Historie; vol 1. København: Levin & Munksgaards Forlag.
- [2] H. Kragh (2005) Dansk Naturvidenskabs Historie; vol 2. Aarhus: Aarhus Universitetsforlag.
- [3] P.R. Berg, O. Mortenssøn og H. Ravn (1948) Det gamle Apotek (Rudkøbing Apotek). Rudkøbing: Langelands Museum, side 3–6.
- [4] P.R. Kruse og N. Møller (2001) Apotekervæsenets historie i Danmark. København: Danmarks Apotekerforening.
- [5] A. Schæffer (1942) Et Kapitel af den farmaceutiske Uddannelses Historie i Danmark. Professorerne H.C. Ørsted og W.C. Zeises Reformforslag, *Dansk Tidsskrift for Farmaci*, bind 16, side 219–68.
- [6] A.S. Jacobsen og S. Larsen (red.) (2002) H.C. Ørsteds selvbiografi. Aarhus: Steno Museets Venner.
- [7] A. Schæffer (1951) H.C. Ørsteds farmaceutiske lære-brev, *Archiv for Pharmaci og Chemi*, bind 58, side 486–8.
- [8] A. Schæffer (1947) Om H.C. Ørsteds Uddannelse og farmaceutiske Eksamen, *Archiv for Pharmaci og Chemi*, bind 54, side 577–90.
- [9] K. Bærentsen og V.G. Jensen (1977) Om den unge H.C. Ørsted. I: Ørsted HC. Om Modervandets Oprindelse og Nytte, *Theriaca*, bind 18, side 11–20.
- [10] H.R. Zeuthen (1927) Danske Farmakopeer indtil 1925. Formelsamling og Oversigt. København: F. Bagges kgl. Hofbogtrykkeri, side 261.
- [11] F. Kruuse (1920) Løveapotheket i København 1620 – 12. September – 1920, København.
- [12] O. Bang (1986) Store Hans Christian. H.C. Ørsted 1777–1851. København: Rhodos.
- [13] A. Adlung og G. Urdang (1935) Grundriß der Geschichte der deutschen Pharmazie. Berlin: Verlag von Julius Springer, side 24 ff.
- [14] D.C. Christensen (2009) Naturens tankelæser. En biografi om Hans Christian Ørsted; bind 1. København: Museum Tusculanums Forlag, Københavns Universitet.
- [15] H.H. Müller: Auch vor Färbern hielt er Vorlesungen. Der Chemiker und Technologe Sigismund Friedrich Hermbstaedt (1760–1833). <https://berlingeschichte.de/bms/bmstxt00/0010pora.htm>.
- [16] H.H. Kjølse (1965) Fra Skidenstræde til H.C. Ørsted Institutet. København: Jul. Gjellerups Forlag, side 60–2.
- [17] P.R. Kruse og H. Kofod (red.) (1992) Danmarks Farmaceutiske Højskole 1892–1992. København: Danmarks Farmaceutiske Højskole, side 73.
- [18] E. Koefoed (1974) Direktør, professor, dr.phil. Emil Koefoeds erindringer, *Theriaca*, bind 17, side 61.
- [19] H.J.S. Petersen (1998) The Emergence of the Danish Chemical Industry: The Role Played by Chemists. I E. Homburg E, A.S. Travis og H.G. Schröter (red.) The Chemical Industry in Europe, 1850–1914: Industrial Growth, Pollution, and Professionalization. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- [20] A.K. Nielsen (2006) Kemi. I P.C. Kjærgaard (red.). Dansk Naturvidenskabs Historie; bind 3. Aarhus: Aarhus Universitetsforlag, side 139.
- [21] E. Gotfredsen (1949) Myxødem og Myxødembehandling i historisk Belysning, *Medicinsk Forum*, bind 2, side 23–36.
- [22] T. Spang-Hanssen og V.K. Permin (1936) Den danske Apotekerlovgivning 1935. København: Dansk Farmaceutforenings Forlag, side 38.



Poul R. Kruse er cand.pharm. 1967, lic.pharm. 1978 og dr.pharm. 1991 i farmaciens historie fra Danmarks Farmaceutiske Universitet (DFU). Ansat ved DFU 1970–2002. Leder af Dansk Farmaci-historisk Samling, Hillerød, 2002–2014. Adjungeret professor i farmaciens historie ved DFU 2002–2006 og Det Farmaceutiske Fakultet, KU, 2007–2012.

Nyt fra G-2 eksperimentet

Bernhard Lind Schistad, Midtbyens Gymnasium, Mercantec

I Kvant nr. 3 fra 2018 omtalte vi G-2-eksperimentet, hvor myonens magnetiske moment blev målt med en nøjagtighed på ti decimaler. Da målingerne afveg fra Standardmodellens teoretiske forudsigelser, blev det besluttet at flytte hele eksperimentet fra Brookhaven til Chicago, for at gentage målingerne med større præcision. Nu foreligger de første målinger fra Chicago, og de har vagt opsigt blandt fysikerne, selv om vi endnu ikke kan drage nogen endelig konklusion om, hvorvidt Standardmodellen er bekræftet eller modsagt.

Ifølge Diracligningen skulle myonen have et magnetisk dipolmoment på 2 Bohrmagnetoner ($2\mu_B$). Denne faktor kaldes G-faktoren. Men på grund af vakuumpolarisation, er G-faktoren en lille smule højere end 2. Derfor er det interessant at måle differencen G-2. Som nævnt måler G-2-eksperimentet myonens magnetiske moment med ekstremt høj præcision. Når dette er interessant, skyldes det, at det magnetiske moment påvirkes af alle kendte vekselvirkninger og elementarpartikler i Standardmodellen, og at det kan beregnes teoretisk med tilsvarende præcision. Enhver afvigelse vil derfor være en indikation på, at der findes fysiske processer, som bidrager til det magnetiske moment, men som ikke er en del af Standardmodellen.

Den sidste måling af G-2 for myonen blev udført ved Brookhaven National Laboratory. Her fandt man en afvigelse på tre standardafvigelser i forhold til de bedste teoretiske beregninger. Dette er interessant, men afvigelsen er ikke stor nok til, at det kan kaldes en opdagelse. Det blev derfor besluttet at flytte hele lagerringen, der blev brugt til at lagre myoner, til Fermilab ved Chicago. Her regnede man med at opnå en usikkerhed, der er en faktor fire bedre end målingerne fra Brookhaven.

Denne flytning er nu udført, og de første målinger fra Fermilab blev offentliggjort den 7. april i år. Vi vil nu gennemgå hvad, disse resultater viser.

Flytning til Fermilab

At flytte myonlagerringen fra Brookhaven til Fermilab har været en formidabel opgave. Da ringens superledende magneter var monteret i en fast ramme, måtte denne transporteres fuldstændig fladt og i ét stykke for at undgå at beskadige de superledende kabler. Denne transport forgik både til lands og til vands, se figur 1.



Figur 1. Transport af lagerringens magneter.

Efter ankomsten til Fermilab, blev lagerringen monteret og tilsluttet en partikelstråle fra laboratoriets myon-leveringsring, hvor π -mesoner produceret med protoner fra acceleratorkompleksets booster, henfalder til myoner, som opsamles i lagerringen. Hermed kunne man fylde ringen med ca. fire gange så mange myoner, som man kunne opnå i Brookhaven.

For at forbedre præcisionen af de nye målinger, blev magnetfeltet i ringen opmålt på ny med en nøjagtighed på 15 ppb [1].

De første resultater

G-2-eksperimentet har nu offentliggjort de første målinger fra den nye opstilling ved Fermilab [2]. Disse målinger er i god overensstemmelse med de tidligere målinger fra Brookhaven, og bekræfter derfor, at der er en uoverensstemmelse med de teoretiske beregninger fra Standardmodellen.

Vi minder om at myonens magnetiske moment er givet ved formelen

$$\vec{\mu}_e = -2(1 + a_\mu) \cdot \mu_B \cdot \frac{\vec{s}}{\hbar}, \quad (1)$$

hvor $\vec{s}$ er myonens spin ($\pm \frac{1}{2}\hbar$) og a_μ er det anomale magnetiske moment, som forsøget måler.

De gamle målinger som vi refererede i Kvant målte a_μ (Brookhaven) = $116592089 \cdot 10^{-11}$.

Da $g_s = 2a + 2$ giver dette en g -faktor på g_s (Brookhaven) = 2,0023318418.

De nye målinger er baseret på data fra de første 15 uger, og giver resultatet:

$$a_\mu \text{ (FNAL)} = 116592040(54) \cdot 10^{-11}.$$

Den tilsvarende g -faktor bliver

$$g_s \text{ (FNAL)} = 2,0023318408.$$

Dette er i meget god overensstemmelse med Brookhavens måling, og dette er betryggende, når vi tager hensyn til, at målingerne er udført af et helt andet hold af fysikere. Dette tyder på, at der er kun statistiske usikkerheder og ikke systematiske afvigelser. De to resultater kan derfor slås sammen og vi får:

$$a_\mu \text{ (EXP)} = 116592061(41) \cdot 10^{-11}.$$

$$g_s \text{ (EXP)} = 2,0023318412.$$

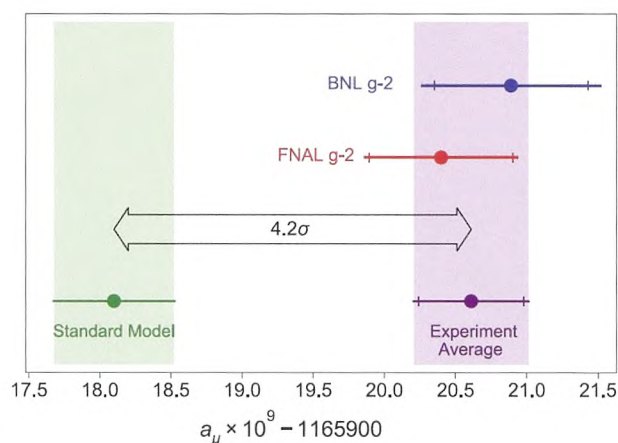
Teoretiske beregninger

Siden Brookhavens resultater forelå, har teoretikerne forfinet deres beregninger. Det seneste resultat fra "regnedrengene" baseret på Standardmodellen er [3]:

$$a_\mu \text{ (SM)} = 116591810(43) \cdot 10^{-11}.$$

Når vi sammenligner de to målinger, det kombinerede resultat og teorien, ser vi klar afvigelse på ca. fire standardafvigelser (figur 2).

Den foreløbige konklusion bliver derfor, at det ser ud til, at Standardmodellen ikke er i stand til at forklare myonens magnetiske moment, og at det derfor må eksistere ny fysik ud over Standardmodellen. Dette har givet overskrifter i dagspressen.



Figur 2. Sammenligning mellem teori og målinger af myonens anomale magnetiske moment.

Sten i skoen

Men samtidig med offentliggørelsen af de nye målinger har en anden gruppe af teoretikere regnet på det bidrag til myonens magnetiske moment, som kommer fra loopdiagrammer, hvor der indgår hadroner. Som vi så i den forrige artikel, giver disse diagrammer et lille bidrag fra den ottende decimal i g_s . Det er meget svært at regne på disse diagrammer, da de involverer partikler som består af kvark/antikvark par. De beregninger, som “regnedrengene” anvendte, kommer frem til, at loopdiagrammer af ledende orden med hadroner, giver et bidrag til a_μ -faktoren på a_μ (LO-HPV) = $693,9 \cdot 10^{-10}$. Disse beregninger er baseret på en gitter-approksimation af kvantekromodynamikken, hvor rumtiden deles op i diskrete punkter, og man derefter lader antal punkter gå mod uendelig.

Men lige som champagnepropperne skal til at springe, bringer en anden teorigruppe fra Budapest, Wuppertal og Marseille (BMW kollaborationen) en alternativ beregning af bidraget fra hadronerne i Nature [4]. De har baseret deres beregninger på computersimulationer af kvantekromodynamikken, og de kommer frem til, at bidraget fra ledende ordens vakuum polarisation med hadroner er a_μ (LO-HPV) = $708,7 \cdot 10^{-10}$. Dette giver total faktor på a_μ (BMW) = $116591978 \cdot 10^{-11}$ og $g_s = 2,0023318396$. Nu ligger den teoretiske værdi mindre end to standardafvigelser fra de nye målinger, og der er ikke længere nogen signifikant uoverensstemmelse.

Konklusion

Med de nye målinger står vi den paradoksale situation, at usikkerheden på de teoretiske beregninger af myonens magnetiske moment er større end usikkerheden af målingerne. De nye målinger fra Fermilab er i smuk overensstemmelse med de gamle fra Brookhaven. I løbet af de kommende par år vil vi få nye data baseret på mere statistik, og vil kunne forvente at få måleusikkerheden halveret. Endvidere er der ingen tegn på systematiske afvigelse mellem de to resultater. Vi kan derfor konkludere, at vi har meget gode måledata med smuk overensstemmelse mellem resultaterne fra to forskellige laboratorier.

Mere uoverskueligt ser det ud på teorisiden. Her er det bidraget fra vakuumpolarisation med hadroner, det vil sige partikler der indeholder kvarker, der driller. Vi har to beregninger foretaget af to forskellige kollaborationer med forskellige metoder, der afviger fra hinanden. Dette er systematiske afvigelser, der ikke kan forklares med afrundingsfejl og approksimationer.

Indtil vi får afklaret hvilken beregningsmetode der er den rigtige, kan vi ikke konkludere, om Standardmodellen modsiges af målingerne.

Hvis “regnedrengenes” beregninger er de rigtige, har eksperimentet ved Fermilab påvist at der findes ukendte fysiske effekter (elementarpartikler) som påvirker myonens magnetiske moment, og som ikke er en del af Standardmodellen

Litteratur

- [1] T. Albahri m.fl. (2021) Magnetic-field measurement and analysis for the Muon g-2 Experiment at Fermilab, *Phys.Rev. A*, bind **103**, side 042208.
- [2] B. Abi m.fl. (2021) Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm, *PPhys.Rev.Lett*, bind **126**, side 141801.
- [3] T. Aoyama m.fl. (2020) The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model, *Phys.Rep.*, bind **887**, side 1.
- [4] S. Borsanyi, S. Fodor, J.N. Guenther m.fl. (2021) Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD, *Nature*, bind **593**, side 51–55.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han har i de sidste syv år undervist i fysik og matematik på Viborg Tekniske Gymnasium.

Kvantemekanisk sammenfiltrering – baggrund

Jan Myrheim, Institutt for Fysikk, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet

Kvantemekanisk sammenfiltrering er gradvist blevet en slags samlebetegnelse, en overskrift over et stort forskningsfelt, der omfatter både grundforskning og anvendelser. Et par nøgleord er kvanteoptik, kvantekryptografi og kvantecomputere. Hele denne aktivitet startede med John Bell, der viste, hvordan kvanteteorien tillader korrelationer mellem dele af et sammensat system, der er stærkere end hvad den klassiske fysik tillader. Formålet med denne artikel¹ er ikke at give et overblik over et aktivt forskningsområde, men snarere at forsøge at give et indblik i baggrunden, især i Bells sætning eller Bells ulighed fra 1964, som viser, hvordan kvanteteorien bryder med dagligdagens forestillinger [1, 2].

Udtrykket *sammenfiltrering*, på engelsk *entanglement*, beskriver typiske kvantetilstande for et fysisk system bestående af to eller flere delsystemer. Erwin Schrödinger introducerede udtrykket i 1935 og kaldte det på tysk *Verschränkung* [3]. Han mente, at dette fænomen er den vigtigste forskel mellem kvantefysik og klassisk fysik.

Hvis vi præparerer et sammensat system i en ren kvantemekanisk tilstand, så kender vi fuldstændigt systemets tilstand som helhed. Hvis tilstanden ikke er sammenfiltret, så kender vi også den fuldstændige tilstand for hvert af delsystemerne. Det er den situation, der altid gælder i klassisk fysik, når vi har fuldstændige oplysninger om systemets tilstand.

Hvis tilstanden derimod er sammenfiltret, så kan vi have fuldstændige oplysninger om systemets tilstand som helhed, uden at vi har fuldstændige oplysninger om tilstanden for hvert delsystem for sig. I så fald findes der korrelationer mellem delsystemerne, så en måling på et delsystem giver oplysninger om de andre delsystemers tilstand. Korrelationer er særligt interessante, når delsystemerne er fysisk adskilte.

Lokalitet er et centralt begreb i fysikken. Vi har en stærk tro på, at fysikken skal være lokal. Det betyder fx, at hvis vi vil præparere et sammensat system i en sammenfiltret tilstand, så må vi bringe delsystemerne sammen ét sted, så de kan vekselvirke med hinanden. Men derefter kan vi adskille dem, og tilstanden kan fortsætte med at være sammenfiltret, selvom afstandene bliver store.

Et principielt spørgsmål, der melder sig, er, om det er muligt udnytte sammenfiltreringen til at overføre oplysninger. Måske endda til at overføre

oplysninger med overlyshastighed, eftersom vi kan måle ét delsystem og få information om de andre, tilsyneladende uden at noget fysisk signal overføres.



Figur 1. Werner Heisenberg (1901–1976).

Heisenbergs usikkerhedsrelation

Lad os starte med at repetere lidt kvantemekanik.

Et idealiseret eksperiment, som kvantemekanikken beskriver, foregår således: Vi har en partikel i en veldefineret kvantemekanisk tilstand, som vi kender præcist, fordi vi har præpareret den omhyggeligt. Det kan fx være en specifik energiegentilstand, hvor partiklens energi har en bestemt værdi. Derefter måler vi en fysisk størrelse, der også beskriver partiklens tilstand, fx positionen langs x -aksen eller impulsen langs x -aksen.

¹ Artiklen er en redigeret udgave af forfatterens artikel i Norsk Fysisk Selskabs tidsskrift "Fra Fysikkens Verden" (FFV) [4]. Bells ulighed og Aspekts eksperimenter har også været omtalt i FFV i en artikel af Jon Magne Leinaas i 1989 [5], ligesom Arnt Inge Vistnes har skrevet om sammenfiltrering af fotoner i FFV [6]. Oversat af Jens Olaf Pepke Pedersen.

Lad os sige, at vi præparerer den samme tilstand mange gange, så nøjagtigt, som vi er i stand til, og hver gang måler vi enten positionen eller impulsen langs x -aksen. Efter at vi har gentaget hele proceduren med præparering og måling mange gange, sidder vi med statistiske fordelinger af målte værdier med standardafvigelsen Δx for positionen x og Δp for impulsen p . Heisenbergs usikkerhedsrelation siger, at da må

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (1)$$

hvor $\hbar$ er Plancks konstant h divideret med 2π . Vi siger, at partiklens position langs en akse og impulsen langs den samme akse er *komplementære størrelser*. Det er i princippet muligt at præparere en kvantetilstand, hvor en af dem har vilkårlig lille usikkerhed, men da må den anden have en tilsvarende større usikkerhed i den tilstand.

Vi forudsætter, at Δx og Δp er spredningen på måleresultaterne, som ikke skyldes unøjagtigheden i hver enkelt måling. Vi kan aldrig måle med nul måleusikkerhed, men der er i princippet ingen grænse for, hvor nøjagtigt vi kan måle en position eller en impuls i et eksperiment. Vi kan altså antage, at vi måler så nøjagtigt, at måleusikkerhederne ikke bidrager væsentligt til Δx og Δp . Usikkerhedsrelationen giver i øvrigt blot en nedre grænse for produktet $\Delta x \Delta p$. For de fleste kvantetilstande er produktet meget større.

I den matematiske formalisme, som bruges i kvantemekanikken, er observable størrelser som x og p repræsenteret ved *operatorer*, som kan adderes og multipliceres. To operatorer A og B , som repræsenterer fysiske observable, siges at være *ombyttelige*, såfremt de kommuterer, dvs. at $AB = BA$.

At A og B er ombyttelige, har den fysiske betydning, at det er muligt at præparere fysiske tilstande, hvor begge observable har præcise værdier på samme tid. I en sådan tilstand vil en måling af A altid give en bestemt værdi a , som kan forudsiges på forhånd, og en måling af B vil altid give en bestemt værdi b . I denne tilstand kan vi først måle A og derefter B , eller først B og derefter A . I begge tilfælde får vi værdien a for A og b for B . Ombyttelige observable kan måles samtidigt, i den forstand at målingen af den ene ikke ødelægger målingen af den anden.

Vi definerer *kommutatoren* mellem A og B som

$$[A, B] = AB - BA. \quad (2)$$

A og B er ombyttelige observable, hvis $[A, B] = 0$. Positionen x og impulsen p langs en akse

er ikke ombyttelige, og de er i stedet *kanonisk konjugerede størrelser*, som opfylder den *kanoniske kommutatorrelation*

$$[x, p] = i\hbar. \quad (3)$$

Heisenbergs usikkerhedsrelation kan bevises matematisk ud fra denne relation.

Hvis vi som eksempel betragter en punktpartikel i tre dimensioner, så er koordinaterne x, y, z langs de tre ortogonale akser et eksempel på tre ombyttelige observable, som vi kan måle samtidigt. Dermed har vi skaffet os et fuldstændigt kendskab til tilstanden, som partiklen er i, hvis den ikke har andre målbare egenskaber (som fx spin) end positionen. De tre observable udgør tilsammen et *fuldstændigt sæt* af ombyttelige observable for en punktpartikel uden spin. Hvis vi kun betragter den ene koordinat x , er det en ufuldstændig observabel: for en given værdi af x findes der flere tilstande – endda uendeligt mange – som har den samme værdi. Dette fænomen kaldes *degeneration*.

Hvis en observabel A er ufuldstændig, findes der stadig et *komplet sæt tilstande* med veldefinerede værdier af A , således at enhver kvantetilstand kan beskrives som en superposition af sådanne tilstande. Hvis A og B er ombyttelige observable, så findes der et fuldstændigt sæt tilstande med veldefinerede værdier af A og B samtidig. Den generelle situationen er, at vi altid kan finde et fuldstændigt sæt af ombyttelige observable $A_1, A_2, \dots, A_n$ således, at når vi måler værdier $a_1, a_2, \dots, a_n$ for alle observable samtidigt, så har vi bestemt tilstanden entydigt. Den mest generelle kvantetilstand er en superposition af sådanne tilstande, som vi beskriver med en bølgefunktion

$$\psi(a_1, a_2, \dots, a_n). \quad (4)$$

Funktionsværdien $\psi(a_1, a_2, \dots, a_n)$ er et komplekst tal. Måler vi $A_1, A_2, \dots, A_n$ i denne tilstand, så finder vi værdierne $a_1, a_2, \dots, a_n$ med sandsynligheden

$$|\psi(a_1, a_2, \dots, a_n)|^2. \quad (5)$$

Tolkninger

Fra usikkerhedsrelationen kan vi umiddelbart uddrage den lære, at kvantemekanikken i en fundamental forstand er en *statistisk* teori. Eftersom ingen af de to standardafvigelser Δx og Δp kan blive uendeligt store, kan heller ingen af dem blive nul. Det er altså umulig at præparere en tilstand, hvor enten positionen x eller impulsen p har en helt veldefineret værdi, således at vi måler

nøjagtigt samme værdi, hver gang vi præparerer tilstanden og måler. Og vi kan aldrig helt nøjagtigt forudsige resultatet af en måling af x eller p , før vi måler.

Bemærk at denne konklusion gælder for x og p , fordi de er kontinuerte variable. Ifølge kvantemekanikken findes der også diskrete variable, som fx det angulære moment langs en akse eller energiniveauer i et atom. Teoretisk set kan vi præparere en tilstand, hvor en diskret fysisk størrelse har en helt veldefineret værdi, men da findes der altid mange andre fysiske størrelser, som ikke har veldefinerede værdier i den tilstand.

På et tidligt tidspunkt i kvantemekanikkens historie kunne Albert Einstein ikke lide teoriens statistiske elementet, og han indvendte, at "Gud kaster ikke med terninger". Dette citat blev så berømt, at blandt andet John Bell klagede over, at mange misforstod Einstein og troede, at det var hans største indvending mod kvantemekanik. Det var ikke. Han havde ikke store problemer med at acceptere en statistisk teori. Men han mente, at kvantemekanik var en *ufuldstændig* teori. At vi skulle forsøge at udlede kvantemekanik fra en mere komplet og grundlæggende teori, der godt kunne være deterministisk. I en deterministisk teori må vi antage sandsynligheder for at beskrive forhold, som vi har ufuldstændig viden om.

Mens kvantemekanik stadig var en ny teori under udformning, insisterede Niels Bohr på det, han kaldte *korrespondensprincippet*, at den nye teori skulle indeholde begreber, der ligner begreberne fra klassisk mekanik, såsom position og impuls. Blot måtte de gamle begreber få nyt indhold. Einstein ville have en mere radikal tilgang, han mente, at den nye teori skulle bygges på nye grundlæggende begreber. Hverken han eller andre havde imidlertid nogen konkrete idéer til, hvad de nye begreber skulle være, og dermed blev han efterladt ganske alene med sit synspunkt. Størstedelen af fysikere, med Niels Bohr og Werner Heisenberg i spidsen, accepterede kvantemekanikken, således som den efterhånden blev udformet.

Det store spørgsmål i diskussionen mellem Einstein og Bohr var, hvordan usikkerhedsrelationen skulle forstås. Einstein var realist, og han mente, at opgaven for en fysisk teori er at beskrive en objektiv virkelighed, der eksisterer uafhængigt af fysikere, der observerer den. Bohr insisterede på, hvad han kaldte *komplementaritetsprincippet*, at observatøren skal vælge mellem målinger, der er komplementære og uforenelige, og at valget er med til at bestemme, hvilken virkelighed der observeres. I en bestemt forstand

er virkeligheden således ikke længere objektiv.



Figur 2. Niels Bohr (1885–1962) og Albert Einstein (1879–1955) i Paul Ehrenfests (1880–1933) hjem i Leiden (december 1925).

Realisme

Klassisk mekanik er en realistisk teori, hvor vi forestiller os, at virkeligheden er objektiv og eksisterer, uanset om vi observerer den eller ej. Vi kan i princippet måle en partikels egenskaber så præcist, som vi ønsker, uden at forstyrre den mærkbart. Når vi måler en partikels position, antager vi, at den havde den samme position, før vi målte. Så kan vi måle impulsen og antage, at impulsen var den samme, selv før vi målte positionen. I princippet kan vi således måle position og impuls samtidig med ubegrænset nøjagtighed. En måling i klassisk mekanik er en konstatering af et faktum, som eksisterer både før og efter vi måler.

Det er anderledes i kvantemekanikken, hvor Heisenbergs usikkerhedrelation kan tolkes på forskellige måder. Hvis vi fx måler positionen af en partikel to gange hurtigt efter hinanden, får vi to gange den samme værdi. Dette må betyde, at den første måling præparerer partiklen i en tilstand, hvor den har en bestemt position inden for måleusikkerheden. Vi kender således partiklens position, lige efter at vi har målt positionen. Det store spørgsmål er, om partiklen havde den samme position, også før vi målte den. Einstein, der var realist og forestillede sig en objektiv virkelighed, mente ja. Bohr og Heisenberg mente nej – de fortolkede usikkerhedsrelationen mere radikalt.

Da vi ikke kan præparere en tilstand for en partikel, hvor den på samme tid har vilkårligt veldefinerede værdier for to komplementære

størrelser som position og impuls, så mente Bohr og Heisenberg, at vi må fortolke det således, at partiklen ikke har en bestemt position, før vi måler positionen, og den har heller ikke en bestemt impuls før vi måler impulsen. Så det giver meget lidt eller ingen mening at tale om en partikels position, før vi måler positionen, eller at tale om impulsen, før vi måler impulsen. Ifølge denne fortolkning er en veldefineret position eller en veldefineret impuls egenskaber, som partiklen får i det øjeblik, vi foretager en måling. Vi kan derfor ikke udsætte partiklen for en måling uden at ødelægge den tilstand, partiklen var i før målingen. Usikkerhedsrelationen er et udtryk for den minimale påvirkning, som en måling har på tilstanden.

En sådan fortolkning, at partiklen hverken har position eller impuls, før vi måler den ene eller den anden størrelse, må lyde mærkeligt for de uindviede eller for "manden på gaden". Einstein tog sig af manden på gaden, og spurgte lidt sarkastisk: Er Månen der, når jeg ikke ser på den? Men hvad der er mærkelige egenskaber ved en partikel, er helt naturlige egenskaber ved en bølge. Louis de Broglie foreslog i 1923, at stofpartikler opfører sig på samme måde som fotoner ifølge Einsteins fototeori fra 1905, som forklarede den fotoelektriske effekt.

Hvis vi tænker på partiklen som en bølge, så må vi definere impulsen som Plancks konstant divideret med bølgelængden, som Einstein gjorde for fotoner. En bølge har ingen veldefineret position. Og en bølge med en endelig udstrækning har heller ingen veldefineret bølgelængde. Position og bølgelængde er to komplementære egenskaber ved en bølge. En bølge med en helt veldefineret bølgelængde har en uendelig udstrækning i rummet. Omvendt må en bølge placeret i et lille område af rummet indeholde et bredt spektrum af bølgelængder.

Dette dobbeltbillede af lys som bølger og/eller partikler dukkede således op allerede i 1905, og det er lige problematisk, uanset om vi taler om fotoner eller stofpartikler. Begge opfører sig som bølger, når de fx går gennem en dobbeltspalte og skaber et interferensmønster. Usikkerhedsrelationen giver god mening for en bølge, men ikke for en partikel. I andre sammenhænge, fx i Comptoneffekten, hvor en foton og en elektron støder sammen, opfører begge sig som udelelige partikler og ikke som bølger spredt udover rummet. Vi må tænke på fotoner og stofpartikler som både partikler og bølger, eller som noget derimellem, men hverken som det ene eller det andet.

Einstein-Podolsky-Rosen-eksperimentet

Sammen med Boris Podolsky og Nathan Rosen beskrev Einstein i 1935 et tankeeksperiment, der skulle vise, at Bohr og Heisenberg tog fejl i deres fortolkning af usikkerhedsrelationen, der konkluderede, at en partikel ikke har en position, før den måles, og heller ikke har nogen impuls, før den måles [7]. Eksperimentet er blevet kendt som EPR-paradokset, men i så fald er det et paradoks for Bohr og Heisenberg, og ikke for Einstein.

Vi forestiller os, at vi har to partikler, som vi nummererer 1 og 2. Observable størrelser er da positionerne x_1 og x_2 og impulserne p_1 og p_2 langs x -aksen. De kanoniske kommutatorrelationer

$$[x_1, p_1] = [x_2, p_2] = i\hbar \quad (6)$$

gælder, mens alle andre par af observable er ombyttelige. Fx er

$$[x_1, p_2] = [x_2, p_1] = 0. \quad (7)$$

Nu er differensen $x_1 - x_2$ og summen $p_1 + p_2$ ombyttelige observable, og vi har at

$$\begin{aligned} [x_1 - x_2, p_1 + p_2] &= [x_1, p_1] + [x_1, p_2] \\ &\quad - [x_2, p_1] - [x_2, p_2] \\ &= i\hbar + 0 - 0 - i\hbar = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Det vil sige, at vi kan præparere en kvantetilstand til systemet bestående af to partikler, således at disse to observable på samme tid har veldefinerede værdier

$$x_1 - x_2 = x, \quad p_1 + p_2 = P. \quad (9)$$

Her er den relative position x og den totale impuls P størrelser, som vi bestemmer på forhånd, i princippet med vilkårlig nøjagtighed.

I denne specielle tilstand kan vi vælge at måle enten position eller impuls for hver af partiklerne. Vi kan fx måle x_1 og x_2 , og da vil vi altid finde, at $x_1 - x_2 = x$. Vi kan måle p_1 og p_2 , og da vil vi altid finde at $p_1 + p_2 = P$.

Et tredje alternativ er at måle x_1 og p_2 , der også er ombyttelige observable, således at en måling af den ene ikke ødelægger målingen af den anden. Derefter kender vi værdien af x_1 , men kender vi også værdien af p_1 ? Vi valgte at måle x_1 , og målingen af x_1 ødelægger muligheden af at måle p_1 . Men i det øjeblik vi måler p_2 , ved vi, hvilken værdi vi ville have fundet, hvis vi havde målt p_1 , nemlig $p_1 = P - p_2$.

I denne situationen, mente Einstein, Podolsky og Rosen, må det være tilladt at tale om, at impulsen p_1 har en bestemt værdi, selv om vi ikke måler den.

Bohr var hurtig til at svare på EPR-artiklen [8]. De fleste fysikere slog sig til tåls med svaret fra Bohr, og var ikke længere bekymret for fortolkningen af kvantemekanikken. Men nogle lod sig ikke overbevise, og de fandt svaret både uklart og svært at forstå. En af dem, der arbejdede videre med EPR-argumentet, var Bell. Han gjorde det meget klart, at han sympatiserede med Einstein, men han ønskede at skærpe argumenterne så meget, at hele diskussionen kunne afgøres eksperimentelt.

Han formulerede versioner af EPR-eksperimentet, hvor argumenterne, som Einstein, Podolsky og Rosen brugte, indebærer, at sandsynligheder, der kan måles, skal opfylde et sæt uligheder, de såkaldte Bell-uligheder. Disse uligheder brydes af nogle af de sandsynligheder, som kvantemekanikken forudsiger. Da de eksperimentelle målinger har vist sig at give det samme, som kvantemekanikken forudsiger, må vi konkludere, at EPR-argumentet ikke er holdbart. Eksperimenterne bekræfter kvantemekanikken, og modbeviser den slags teorier, som Einstein, Podolsky og Rosen argumenterede for.

Et korrelationseksperiment

Her vil vi udlede et eksempel på en Bellulighed i et eksperiment, som han foreslog. Det er et ganske almindeligt eksperiment, som ikke er fundamentalt forskelligt fra et eksperiment, der udføres hele tiden i fysiklaboratorier rundt om i verden. Vi skyder to protoner mod hinanden og opstiller to detektorer, der observerer dem, efter at de er kollideret, og har ændret bevægelsesretning. Vi nummererer detektorerne som 1 og 2, og proton 1 er det, vi observerer i detektor 1, mens proton 2 observeres i detektor 2.

Et proton drejer om sin egen akse og har spin $1/2$. Det betyder, at hvis vi måler spin-komponenten langs en hvilken som helst akse, for eksempel z -aksen i et givet koordinatsystem, finder vi altid en af to mulige værdier, enten $\hbar/2$ eller $-\hbar/2$. Måleenheden for spin er $\hbar$, Plancks konstant h divideret med 2π . Vi forenkler sproget, og siger, at spin-komponenten langs akse er enten $+$ eller $-$. Spinnet for en proton, eller en anden partikel med spin $1/2$, målt langs en akse, peger enten op eller ned.

Et fuldstændigt sæt af målinger vi kan udføre for at finde tilstanden til protonerne efter kollisionen, er fx positionerne $\vec{r}_1$ og $\vec{r}_2$ og spin-komponenterne s_1 og s_2 langs z -aksen. Både s_1 og s_2 har de mulige værdier $+$ og $-$. En generel kvantemekanisk tilstand beskriver vi med en

bølgefunktion

$$\psi(\vec{r}_1, s_1, \vec{r}_2, s_2) . \quad (10)$$

Den generelle tilstand er således, at protonerne ikke har bestemte værdier af hverken position eller spin. Absolutkvadratet af bølgefunktionen, $|\psi(\vec{r}_1, s_1, \vec{r}_2, s_2)|^2$, er et mål for sandsynligheden for, at en måling vil give værdierne $\vec{r}_1, s_1$ og $\vec{r}_2, s_2$.

Eftersom protonerne er fermioner, må bølgefunktionen for de to protoner være antisymmetrisk under ombytning af partiklene, det vil sige at

$$\psi(\vec{r}_1, s_1, \vec{r}_2, s_2) = -\psi(\vec{r}_2, s_2, \vec{r}_1, s_1) . \quad (11)$$

Nu kan vi antage, at bølgefunktionen efter kollisionen er et produkt af en rumbølgefunktion og en spinbølgefunktion,

$$\psi(\vec{r}_1, s_1, \vec{r}_2, s_2) = \psi_{\text{rum}}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \psi_{\text{spin}}(s_1, s_2) . \quad (12)$$

Dette forenkler vores ræsonnement. Mere generelt kunne vi have antaget en sum af sådanne produktbølgefunktioner. Om rumbølgefunktionen ved vi at den må være symmetrisk,

$$\psi_{\text{rum}}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \psi_{\text{rum}}(\vec{r}_2, \vec{r}_1) , \quad (13)$$

hvis vi gør energien tilstrækkelig lille, for ellers kommer de to protoner ikke tæt nok på hinanden til at kunne vekselvirke. Men når rumbølgefunktionen er symmetrisk, må spinbølgefunktionen efter kollisionen være antisymmetrisk,

$$\psi_{\text{spin}}(s_1, s_2) = -\psi_{\text{spin}}(s_2, s_1) , \quad (14)$$

for at den totale bølgefunktion kan blive antisymmetrisk.

Ligning (14) er udgangspunktet for Bell i hans ræsonnement. Teorien, som leder fram til ligningen, er standard kvantemekanik, som det vil føre for vidt at gå mere detaljeret ind på her.

Antisymmetrien af spinbølgefunktionen implicerer, at hvis $s_1 = s_2$, så må $\psi_{\text{spin}}(s_1, s_2) = 0$. Det betyder, at sandsynligheden er nul for at måle $s_1 = s_2 = +$ eller $s_1 = s_2 = -$,

$$|\psi_{\text{spin}}(+, +)|^2 = |\psi_{\text{spin}}(-, -)|^2 = 0 . \quad (15)$$

Vi måler altid enten $s_1 = -s_2 = +$ eller $s_1 = -s_2 = -$. Vi siger, at spin-komponenterne s_1 og s_2 til de to protoner efter kollisionen er fuldstændigt antikorrelerede.

Hvis vi gentager eksperimentet mange gange, og måler s_1 og s_2 hver gang, vil vi i gennemsnit måle de to mulige værdier $s_1 = +$ og $s_1 = -$ lige ofte, og ligeså de to værdier $s_2 = +$ og $s_2 = -$. Udfaldet af en enkelt måling på et protonpar er umuligt at forudsige, sandsynligheden er 50 %

for at måle $s_1 = +$ og $s_2 = -$, og 50 % for at måle $s_1 = -$ og $s_2 = +$. Men vi kan forudsige med 100 % sikkerhed, at vi kommer til at måle $s_1 = -s_2$.

Hvad er mysteriet?

At der er fuldstændig antikorrelation mellem spin i Bells eksperiment er både en teoretisk og en eksperimentel kendsgerning. Men korrelationer og antikorrelationer er et dagligdags fænomen, og der er ikke noget mystisk ved det. Her optræder de i et kvantemekanisk eksperiment, men der er ingen indlysende årsag til, at de ikke kan forstås inden for klassisk fysik. Pointen er, at de to protoner kolliderede lige før vi målte spin, og det er helt klart, at antikorrelationen opstår i kollisionen. Uden kollision, ingen antikorrelation.

Forklaringen på antikorrelationen kunne tænkes at være så simpel, at i det øjeblik protonerne kolliderer, fordeler de spinnene mellem sig, så det ene spin peger opad langs z -aksen og det andet peger nedad. Hvilken af protonerne, der får spin $+$ i denne proces, er helt tilfældigt. Spinnene af en fri bevægelig proton bevares, så begge protoner husker det spin, de blev tildelt ved kollisionen, og når spinnene måles, er de stadig antikorrelerede. Hvis denne forklaring er holdbar, er der ikke noget mysterium.

Antikorrelationen bliver kun noget, der ligner et mysterium, hvis vi holder fast i den ortodokse fortolkning af en måling, som Bohr og Heisenberg gik ind for, at spin af en proton langs en akse ikke har nogen værdi, hverken $+$ eller $-$, før vi måler det. Hvis ja, hvordan opstår antikorrelationen i så fald? Det kan se ud til, at vi er nødt til at postulere, at når begge protoners spin måles på samme tid, sendes et mystisk signal mellem de to detektorer, som sikrer, at de to målinger giver det modsatte resultat. Sådanne hypotetiske signaler, der skaber antikorrelation, og som måske endda skal bevæge sig med hastigheder, der er større end lysets hastighed, kaldte Einstein "spooky action at a distance", en spøgelsesagtig effekt på afstand. Han kunne ikke lide tanken.

John Bell giver et fornuftigt eksempel på, at antikorrelation i sig selv ikke er et mysterium [2]. Han bemærker, at hans gode ven og kollega Reinhold Bertlmann har den mærkelige vane altid at have strømper på med forskellige farver. Når du ser Bertlmann iført en lyserød strømpe, og kender Bertlmann, behøver du ikke se hans anden strømpe for at vide, at den ikke er lyserød. Få ville gå så langt som at kalde det et mysterium.

Hvis vi vil gøre antikorrelationen mellem protonernes spin til et mysterium, skal vi følge Bell og dykke dybere ned i kvantefysikken. Han kiggede på korrelationer, når spin-komposanterne i de to protoner måles langs deres respektive akser og udledte forskelle, som disse korrelationer skal opfylde, hvis de skal forklares så banalt som farverne på Bertlmanns strømper. Det er en pointe, at spin-komposanterne for en og samme partikel langs to forskellige akser ikke er ombyttelige observable, mens spin-komposanterne for to forskellige partikler langs deres respektive akser er ombyttelige observable.

Bells uligheder, som ikke respekteres af kvantemekanikken, er genstand for del II af denne artikel, som bringes i det næste nummer af Kvant.

Litteratur

- [1] J.S. Bell (1964) On the Einstein Podolsky Rosen Paradox, *Physics*, bind 1, side 195.
- [2] J.S. Bell (1981) Bertlmann's Socks and the Nature of Reality, *Journal de Physique Colloques*, bind 42 (C2), side C2-41–C2-62.
- [3] E. Schrödinger (1935) Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Die Naturwissenschaften*, bind 23, side 807, 823 og 844. Engelsk oversættelse (1980): *Proceedings of the American Philosophical Society*, bind 124, side 323.
- [4] J. Myrheim (2019) Kvantemekanisk sammenfiltrering. Del 1., *Fra Fysikkens Verden*, bind 81, nr. 1, side 18.
- [5] J.M. Leinaas (1989) EPR-paradokset, Bells teorem og Aspekts forsøk, *Fra Fysikkens Verden*, bind 51, nr. 2, side 36.
- [6] A.I. Vistnes (2008) Sammenfildrete fotoner og erkjennelsesmessige konsekvenser, *Fra Fysikkens Verden*, bind 70, nr. 3, side 75.
- [7] A. Einstein, B. Podolsky og N. Rosen (1935) Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?, *Physical Review*, bind 47, side 777.
- [8] N. Bohr (1935) Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?, *Physical Review*, bind 48, side 696.



Jan Myrheim er professor i fysik ved Norges Teknisk-Naturvidenskabelige Universitet (NTNU) i Trondheim. Han har været ansat ved Universitetet i Oslo og har været stipendiat ved Niels Bohr Institutet (1978–1981) og NORDITA (1981–1983). Siden 1985 har han arbejdet på NTNU.

Bølgeomodstand

- breddeopgave 93 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

Mit formål med artikelserien om breddeopgaver er – udover at gøre opmærksom på RUCs fysikuddannelse – dobbelt: Dels udvælger jeg opgaverne, så de kan have interesse som fysikproblemer i egen ret. Dels udvælger jeg dem med henblik på at kunne knytte didaktiske overvejelser til dem af interesse for fysikundervisere. I første omgang i forhold til universitetsundervisning. Men i anden omgang kunne der måske også trækkes paralleller til andre undervisningsniveauer.

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af Kvant var denne breddeopgave (nr. 93 i rækken her i Kvant):

Breddeopgave 93. Bølgeomodstand

Et overfladeskib, der sejler med jævn hastighed på dybt vand, danner bølger. Den del af modstanden imod skibets bevægelse, der skyldes bølgedannelsen, kaldes bølgeomodstanden. For at finde bølgeomodstanden ved modelforsøg i en prøvetank skal det såkaldte Froude tal være det samme ved modelforsøget som ved den modellerede sejlads. Hvad er formelen for Froude tallet? Begrund svaret.

Løsning

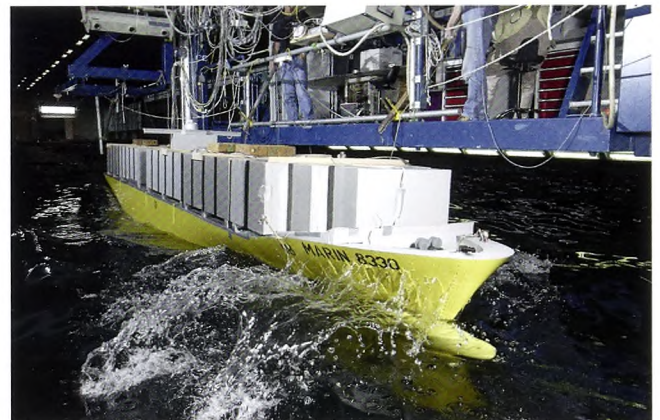
Bølgemønstrer omkring skibet afhænger af dets hastighed v . Og det afhænger af formen og størrelsen af delen af skibet under vandlinjen, som kan beskrives ved en karakteristisk længde l , sammen med en række vinkler og størrelsesforhold, altså sammen med en række dimensionsløse størrelser.

Da bølgerne er tyngdebølger, altså vandbevægelser i tyngdefeltet, afhænger bølgemønstrer også af tyngdefeltstyrken g . På en anden planet vil bølgemønstrer være et andet, alt andet lige, hvis et sådant findes. Det er umiddelbart mindre tænkeligt, at bølgemønstrer afhænger af vandets massefylde ρ , da størrelsen af masser normalt ikke har betydning for deres bevægelser i tyngdefelter. Den går ud i beregningen af bevægelser. Men størrelsen af masser har naturligvis betydning for både deres kinetiske og potentielle energi i tyngdefelterne. Da bølgeomodstandskraften gange skibets hastighed er lig med det arbejde per tid, som skibets motorer skal levere for at modvirke bølgeomodstanden, der igen er lig med den producerede bølgeenergi per tid, må vi derfor, ud over v , l og g , også inddrage ρ som bestemmende inputstørrelse i en bølgeomodstandsformel. Derimod har størrelsen af viskositeten af væsken, der sejles i, først og fremmest betydning for, hvor hurtigt kølvandet dør ud, og ikke for dets dannelse. Alt i alt må vi gå ud fra, at bølgeomodstanden K , afhænger af form, v , l , g og ρ .

Vi søger derfor en formel for bølgeomodstanden med udseendet:

$$K = k \cdot v^\alpha \cdot l^\beta \cdot g^\gamma \cdot \rho^\delta, \quad (1)$$

hvor eksponenterne skal vælges således, at dimensionen på begge sider af lighedstegnet er den samme, og hvor k i almindelighed er et dimensionsløst tal eller en dimensionsløs funktion af dimensionsløse størrelser eller dimensionsløse kombinationer af de indgående inputstørrelser.



Figur 1. Model af containerskibet Emma Mærsk under test i en prøvetank.

K er en kraft med dimensionen $M L T^{-2}$. Derfor skal produktet i ligning (1) også have denne dimension udtrykt ved basisdimensionerne: masse M , længde L og tid T . Da basisdimensionerne ikke kan afledes fra hinanden, skal ligning (1) dimensionsmæssigt stemme overens for hver basisdimension for sig:

$$M: 1 = \delta \quad (2)$$

$$L: 1 = \alpha + \beta + \gamma - 3\delta \quad (3)$$

$$T: -2 = -\alpha - 2\gamma. \quad (4)$$

Ligning (4) er opfyldt for $\gamma = 1 - \alpha/2$. Indsat i ligning (3) sammen med $\delta = 1$ er denne opfyldt for $\alpha = 3 - \alpha/2$. Alle formler af formen:

$$K = k \cdot v^\alpha \cdot l^{3-\alpha/2} \cdot g^{1-\alpha/2} \cdot \rho = k \left(\frac{v}{\sqrt{lg}} \right)^\alpha \rho l^3 g \quad (5)$$

lever derfor op til kravet om samme dimension på begge sider af lighedstegnet i ligning (1). Det gælder for alle værdier af α (3 ligninger med 4 ubekendte). Og også for alle linearkombinationer af led med forskellige værdier af α , da $v/\sqrt{lg}$ er dimensionsløs. Sammenfattende er bølgeomodstanden derfor givet ved:

$$K = f_1(\text{form}, F_r) \cdot \rho l^3 g, \quad (6)$$

hvor f_1 er en ukendt funktion af formen af skibsdelen under vandlinjen og af den dimensionsløse størrelse $F_r = v/\sqrt{lg}$, det såkaldte Froude tal.

Hvis man ved et modellforsøg med en prøvetank, på Jorden og med vand i, benytter samme form under vandlinjen og samme værdi af F_r som ved den sejlads, der ønskes modelleret, og dermed samme værdi af funktionen f_1 som ved sejladsen, viser ligning (6), at bølgemodstanden ved den fremtidige sejlads, K_s , er givet ved:

$$K_s = K_m \cdot (l_s/l_m)^3, \quad (7)$$

hvor K_m er bølgemodstanden målt ved modellforsøget og l_s og l_m den valgte karakteristiske længde for henholdsvis skib og skibsmodel. Svaret på opgaven er således, at $F_r = v/\sqrt{lg}$ ved modellforsøget skal have samme størrelse i prøvetanken som ved den modellerede sejlads. Hvis skibsmodellens lineære udstrækning er 100 gange mindre end skibets, gælder resultatet i formel (7) altså for det tilfælde, hvor skibets fart er 10 gange større end skibsmodellens fart.

Kommentarer

1. Ligningerne (2), (3) og (4) kan også bruges til at udtrykke α og β som funktioner af γ i stedet for γ og β som funktioner af α , som gjort ovenfor. Så fører dimensionsanalysen til formelen:

$$K = f_2(\text{form}, lg/v^2) \cdot \rho l^2 v^2 \quad (8)$$

i stedet for udtrykket for K i ligning (6). Forskellen mellem udtrykkene er imidlertid kun tilsyneladende. Da $F_r = v/\sqrt{lg}$, er fastholdelse af F_r , og dermed funktionsværdien af f_1 , ensbetydende med fastholdelse af lg/v^2 og med det funktionsværdien af f_2 . Og resultatet $K_s = K_m \cdot (l_s^2 v_s^2)/(l_m^2 v_m^2)$, afledt af ligning (8), er identisk med ligning (7), når $l_s g/v_s^2 = l_m g/v_m^2$. Hvis ligningerne (2), (3) og (4) bruges til at finde α og γ som funktioner af β , fører det på tilsvarende måde igen til ligning (7).

2. Når jeg forsøger at bidrage til markedsføringen af dimensionsanalyse som et vigtigt tænkeværktøj for fysikere m.fl., bliver jeg undertiden spurgt, om et udtryk af en art som ligning (1) er repræsentativt for alle formler. Kan der ikke optræde summer af led med samme dimension i fysiske formler? Jo, lad os antage, at der i en fysisk formel indgår en linearkombination $aA + bB$ af de to led A og B med samme dimension. Det kan imidlertid omskrives til $aA(1 + bB/aA)$, hvor parentesens dimension er dimensionsløs. Den kan derfor medregnes til k i formler som ligning (1). Så udtryk som ligning (1) er repræsentative. De dækker alle mulige formler, hvor symbolerne ikke repræsenterer tal, men fysiske størrelser med tilhørende krav om dimensionsmæssig homogenitet.

3. Måden, som jeg har valgt at vise løsningen af opgaven på, er, samtidigt med at være en løsning, også ment som en illustration af dimensionsanalyse. En kortere og mere indforstået løsning er: Blandt de dimensionsbærende inputvariable v , l , g og ρ , er det kun ρ , der har massedimension. Derfor må bølgemodstanden (en kraft) være proportional med ρ . Bølgemodstanden må altså være lig med ρ gange en funktion af v , l og g . Da disse kan kombineres til den dimensionsløse størrelse v^2/lg må der i denne funktion indgå en faktor, der på ukendt måde afhænger af $v^2/lg (= F_r^2)$, som derfor skal have samme værdi for skibet og for skibsmodellen.

4. Der findes betydeligt nemmere dimensionsanalytiske udfordringer end opgaven her. Men også da er det min erfaring, at mine studerende er pænt udfordret. Ikke så meget på grund af det algebraiske som på grund af vanskeligheden ved at identificere de styrende inputvariable på højre side af ligningen, der skal indgå i formelen til beregning af outputvariablen på venstre side. Altså i tilfældet her, at opstille ligning (1). Det er et ret almindeligt udsagn, at det er man først i stand til, når man ved, hvad resultatet skal blive. Men det mener jeg, er et helt forkert synspunkt. Det er rigtigt, at valget af inputvariable kræver fysisk forhåndsforståelse. Det kan man imidlertid sige om alle opgaveudfordringer, hvis ikke opgaverne først og fremmest inviterer til reproduktion af standardrutiner. I stedet for at mene, at man først skal have lært sig fysik på anden vis for at kunne magte dimensionsanalytiske argumenter, er arbejde med dimensionsanalyse, efter min mening, et meget velegnet middel til at tilegne sig dybere forståelser. Ved arbejdet med at udvælge de styrende inputvariable tvinges man netop til at orientere sig imod det essentielle i fænomenerne [1].

Breddeopgave 94. Brandslange

Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra samlingen af træningsopgaver fra opstarten af breddekurset i 1975, nr. 94 i rækken her i Kvant):

En brandslange er ført om et hushjørne. Der står en brandmand på hver side af hjørnet. Når vandet strømmer i slangen, skal brandmændene bruge kræfter for at undgå, at den retter sig ud. Hvor mange kræfter skal de bruge? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Litteratur

- [1] Se fx J.H. Jensen (2013) Introducing fluid dynamics using dimensional analysis, *Am. J. Phys.*, bind **81**, side 688–694.

KIF “Lifetime Achievement Award”

Kvinder i Fysik

Kvinder i Fysik (KIF) har på sit årsmøde den 13. oktober 2021 uddelt en “Lifetime Achievement Award” til Birgitta Nordström, lektor emerita ved Niels Bohr Institutet. Det er første gang, at prisen uddeles.

Birgitta Nordström er født i Sverige og studerede fysik og astronomi ved Stockholms Universitet, hvor hun blev ph.d. i 1970. Efter post.doc.-stillinger i Schweiz og Canada kom hun til Niels Bohr Institutet i 1972, hvor hun fortsat er tilknyttet. Hun har også haft flere gæsteprofessorater i USA (Center for Astrophysics, Cambridge) og i Europa (Lund, Paris, Kiel og Wien).

Birgittas forskning fokuserer på den kemiske og dynamiske udvikling af galakser med Mælkevejen som prototype. Hendes mest citerede artikel med mere end 1.380 citater er “*Geneva-Copenhagen Survey of the Solar Neighborhood*” fra 2004, der viste, at strukturen af Mælkevejen er meget mere kompleks og dynamisk end forventet. Observationerne til artiklen blev foretaget over mange år, og de talrige nætter, som Birgitta har brugt på bjergtoppe i Chile og på La Palma til observationer fortjener at blive anerkendt. Artiklen var den mest citerede artikel fra Københavns Universitet i 2004, og hendes artikler er citeret mere end 9.000 gange af andre forskere.

Nogle af de andre store forskningsprojekter, hun er involveret i, fokuserer på at studere sandsynlige rester af mindre dværggalaksefusioner, og at se på de ældste og mest metalfattige stjerner i Mælkevejen samt dannelsen af de kemiske elementer i det tidlige univers.

Birgitta har også i løbet af sin karriere viet en betydelig del af sin tid på at arbejde i de store internationale astronomiske organisationer som European Southern Observatory (ESO), European Space Agency (ESA), International Astronomical Union (IAU), samt været medlem af en lang række udvalg og kommissioner indenfor astronomi og rumforskning.

Udover at være en fremragende forsker med en enorm dedikation til forskningsfællesskabets opgaver, modtager Birgitta KIFs “Lifetime Achievement Award” for hendes engagement i KIF siden oprettelsen, og hendes meget vigtige funktion som rollemodel for kvinder inden for astronomi. Birgitta har været eksemplarisk med at hjælpe unge forskere, kvinder og mænd, ved at vejlede, opmuntre og hjælpe, når hun så en mulighed.

Hun har i løbet af de sidste 50 år påtaget sig den enorme opgave med konsekvent at skubbe på systemer og strukturer således, at de langsomt er blevet mindre åbenlyst forudindtagede over for kvinder. I løbet af sin egen karriere har hun oplevet en betydelig forskelsbehandling, og citatet fra Inge Lehmann: “Jeg har konkurreret mod mange middelmådige mænd og tabt”, er desværre også sandt for Birgitta. Men ligesom Inge Lehmann gjorde hendes kærlighed til forskning det muligt for hende at “forblive rolig og fortsætte”.



I forbindelse med prisen har KIF spurgt Birgitta, hvilke råd hun vil give til unge forskere:

“Som ung forsker bør du ikke lave for meget udvalgsarbejde i starten af din karriere, fordi det ikke bidrager meget til dit CV. Du bør dog bidrage med noget for at få oplevelsen. Det er fx at være referee på artikler, men hvis du tager alle de artikler, du bliver bedt om at bedømme, bruger du for meget tid på det, og dine egne projekter bliver skubbet i baggrunden. Du skal tænke på dit CV, og at der er en vis balance, og til dette har du muligvis også brug for lidt vejledning og hjælp. Jeg kender en forsker, der har påtaget sig at vejlede flere studerende, og hun påpeger dette hele tiden. Du skal tænke over din karriere, tænke over, hvad der er vigtigt for din fremtid. Derfor har jeg påtaget mig mere og mere udvalgsarbejde, efterhånden som jeg blev ældre, fordi mit CV ikke længere er så vigtigt for min fremtid. Jeg kan også bidrage med min lange erfaring.”

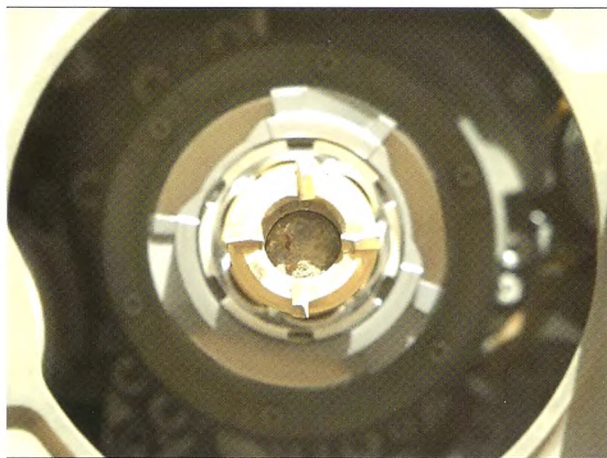
Birgitta var gift i næsten 50 år med Johannes Andersen, der døde sidste år. I mange år arbejdede de med de samme emner og ofte på de samme projekter. I den forbindelse fortæller hun, at “mange siger, at det ikke er en god idé at blive ved med at arbejde med sin partner, men det var det i vores tilfælde, fordi vi gjorde mange observationer, og skulle rejse meget. Fx har jeg været i Chile 35 gange, og min mand var i Chile 45 gange. Vi skiftedes til at være sammen med vores tre børn, og det fungerede meget godt. Han lavede selvfølgelig også mange andre ting udenfor vore forskningsprojekter, ligesom jeg selv blev ansat på en række europæiske projekter. Da Sovjetunionen fx stoppede med at have magt over de østeuropæiske lande, arbejdede jeg på at få disse lande med i det vesteuropæiske forskersamfund. Østlandene havde ikke så mange faciliteter, som vi havde, så målet var at forene hele Europa i astronomien, og få dem til at bygge instrumenter. Det var meget givende, og nu har jeg mange meget gode venner og samarbejdspartnere i Øst- og Sydøsteuropa.

Birgitta er mor til tre børn og bedstemor til seks børnebørn.

Update fra Mars

RUMFORSKNING. Det er lykkedes roveren Perseverance, der på nuværende tidspunkt udforsker Jezerokrateret på Mars, at opsamle to prøver fra et klippestykke. Prøverne stammer fra en klippe, der ser ud til at have været i kontakt med vand for længe siden.

Perseverance er udstyret med en 2 m lang robotarm, hvorpå der bl.a. er monteret en boremaskine, således at Perseverance kan bore og udtage en prøve fra klippesten. Prøven bliver herefter forseglet og opbevaret inde i roveren i en lufttæt titaniumbeholder. Perseverances udtagningsystem består af over 3.000 dele, og er det mest komplekse apparatur, der nogensinde er sendt ud i rummet.



Figur 1. Borekerneprøve i et af Perseverances prøvetagningsrør.

Perseverance forsøgte allerede i august at bore og udtage en prøve, men klippestenen var for blød, så prøven smuldrede. I starten af september lykkedes det med en anden klippesten, og Perseverance sendte billeder tilbage til Jorden af den udtagne prøve og af klippestenen, hvor man kan se de to huller, der er boret. Hver prøve er ca. en halv cm i diameter og 6 cm lang. Klippestenen, som der blev boret i, har fået navnet Rochette, og er en basaltisk sten, som muligvis stammer fra størket lava.

Hvis klippestenen har været udsat for vand i længere tid, kan der være beboelige nicher inde i klippestenen, hvor der kan have været mikrobielt liv. Forskerne leder særlig efter salt, da salt er et tegn på, at der har været vand, og da salt kan bevare tegn på liv. Saltminerale i klippestens kerne kan have indfanget små bobler af vand, der vil kunne fortælle forskerne, om der har været mikrobielt liv på Mars og give informationer om det fortidige klima.

Forskerne forventer, at Perseverance opsamler flere prøver i krateret, og den har plads til at opbevare 43 beholdere. Det er planen, at fremtidige missioner skal

tage prøverne med tilbage til Jorden, og NASA satser på at kunne hente dem omkring år 2030.

Perseverance kan køre ca. 100 m om dagen og har i alt rejst 1.200 m, siden den begyndte at køre i marts.

Forskerne vil ud fra hver prøve bestemme klippestens alder, og hver enkelt prøve vil derfor være en vigtig brik i puslespillet af kraterets historie og være med til at danne en tidslinje over begivenhederne.



Figur 2. Klippestenen Rochette hvor Perseverance har udtaget de to prøver kaldet Montdenier og Montagnac.

NASA har også lavet to online-aktiviteter, hvor man ved hjælp af Perseverance og software kan udforske Jezerokrateret. Den ene aktivitet hedder "Udforsk med Perseverance", og giver mulighed for at følge roveren, som om man selv var på Mars. Den anden aktivitet "Hvor er Perseverance?" viser lokationen af roveren og Ingenuityhelikopteren, og giver mulighed for at følge deres rejse.

Kilde: NASA.

Fysikstuderende løser matematisk problem

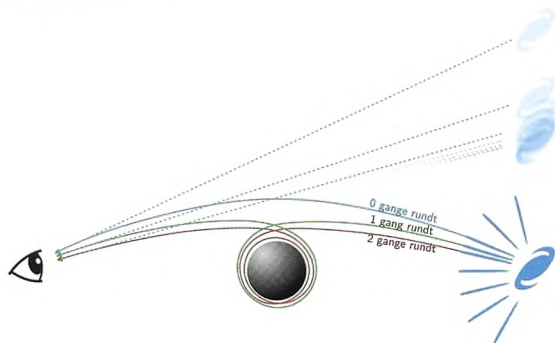
ASTROFYSIK. Når lys bevæger sig forbi et sort hul bliver det afbøjet, da rumtiden krummer omkring det sorte hul. Faktisk kan lysstrålerne blive så afbøjede, at de kan nå rundt om det sorte hul flere gange. Derfor vil man tæt på det sorte hul se flere billeder af det samme objekt, dog mere og mere forvrænget, hvor det ser ud som om hvert objekt befinder sig i den retning, som lysstrålen kommer fra (se figur 4).

For at se fra et billede af objektet til det næste billede, skal man kigge en faktor $e^{2\pi}$ tættere på det sorte hul. Dette resultat har været kendt længe, men det er først nu lykkedes en fysikstuderende ved Niels Bohr Institutet at bevise det ved at bruge nogle matematiske tricks. Faktoren $e^{2\pi}$ er et resultat af tyngdekraftens virkning tæt på sorte huller, og derfor kan løsningen bruges til at undersøge og teste tyngdekraften.



Figur 3. En skive af glødende gas hvirvler ned i det sorte hul “Gargantua” fra filmen Interstellar. Fordi rummet krummer omkring det sorte hul, kan man se om på dets bagside og se den del af gasskiven, som ellers ville være skjult af hullet.

Metoden kan generaliseres til også at kunne bruges til sorte huller, der roterer. Når det sorte hul roterer meget hurtigt, behøver man ikke længere at komme en faktor $e^{2\pi}$ (ca. en faktor 535) tættere på det sorte hul for at se det næste billede, men kun en faktor 50 eller 2 gange tættere på det sorte hul. Det betyder, at jo hurtigere det sorte hul roterer, jo nemmere bliver det at se billederne.



Figur 4. Lyset fra den bagvedliggende galakse snurrer rundt om et sort hul flere og flere gange, jo tættere det passerer hullet, og vi ser derfor den samme galakse i flere retninger (tegning: Peter Laursen).

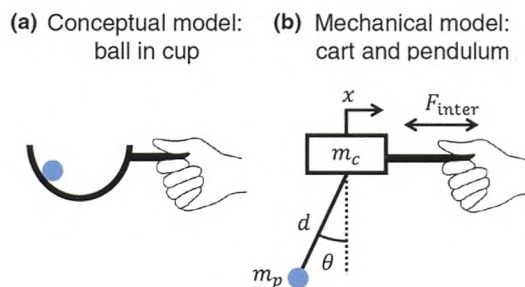
Når man skal kigge en faktor $e^{2\pi}$ tættere på det sorte hul for hvert nyt billede, bliver billederne hurtigt klemte sammen i et forvrænget og ringformet billede helt tæt på det sorte hul. Men når det sorte hul roterer, og man ikke skal kigge så tæt på for at se det næste billede, er der plads til ekstra billeder. Det giver mulighed for at vi lettere kan bekræfte teorien ved at observere roterende sorte huller. Vi kan også få viden om galakserne bag de sorte huller. Da rejsetiden for lyset stiger med antallet af gange som lyset skal bevæge sig rundt om det sorte hul bliver de efterfølgende billeder forsinket, hvilket giver os mulighed for at se begivenheder i de bagved liggende galakser, fx en supernovaeksplosion, igen og igen.

Kilde: Albert Sneppen, Divergent reflections around the photon sphere of a black hole, Scientific Reports (2021).

Komplekse kaffebærer-strategier

KOMPLEKS KONTROL. At gå med en varm kop kaffe eller te, er noget de fleste gør hver dag, uden at tænke mere over det, men det involverer en masse fysik, der – hvis man vælger den rette strategi – sørger for, at man ikke spilder.

En kop kaffe er et komplekst objekt med indre frihedsgrader, der vekselvirker med bæreren. Det er ikke let at studere interaktioner med komplekse objekter, selvom vi selv kan udføre dem. Men denne forståelse er vigtig, særligt for udviklingen af robotter. Forskerne bag studiet forventer at robotter i fremtiden vil blive brugt til kompleks kontrol af objekter, hvilket kræver den samme koordination og kontrol, som mennesker har. Her er variationen i frekvens vigtig. Hvis robotten fx skal gå et kort stykke, kan frekvensen godt variere en del, men hvis robotten skal gå et længere stykke, er det vigtigt at vælge gå-frekvensen omhyggeligt.



Figur 5. Kaffebærerstrategier.

Forskerne har undersøgt, hvordan mennesker bærer en kaffekop, i form af en skål med en bold i, og de har studeret, hvordan deltagerne håndterer dette komplekse objekt. Deltagerne bevægede skålen i en rytmisk bevægelse, hvor de havde mulighed for at ændre både kraft og frekvens for at sørge for, at bolden blev i skålen. Det viste sig, at deltagerne valgte enten en lavfrekvensstrategi eller en højfrekvensstrategi for den rytmiske bevægelse. Ved den lavfrekvente strategi var bevægelsen af skålen og bolden synkroniseret i fase, mens synkroniseringen ved den højfrekvente strategi var ude af fase. Da begge strategier var effektive, er det muligt at nogle deltagere undervejs skiftede strategi. Forskerne har derfor studeret overgangen mellem synkroniseringen i fase og ude af fase ved hjælp af en dynamisk model af et pendul fastgjort til en vogn i bevægelse, for at svare på hvordan en overgang sker fra at være i-fase-synkronisering til ude-af-fase-synkronisering, altså fra lavfrekvensstrategi til højfrekvensstrategi. De har fundet ud af, at afhængigt af den kraft, hvormed frekvensen ændres, sker faseovergangen enten ved resonansfrekvensen eller et sted mellem i-fase- og ude-af-fase-synkronisering.

Resultatet viser, at mennesker kan skifte brat og effektivt mellem høj- og lav frekvensstrategier, og denne mekanisme vil forskerne gerne kopiere og udnytte til at designe smarte robotter, der kan håndtere komplekse objekter. Måske bliver det i fremtiden muligt, ikke kun at få en kop kaffe serveret af en robot, men ligefrem også at vælge, med hvilken strategi robotten skal benytte for at undgå at spilde kaffen.

Kilde: Brent Wallace m.fl. (2021) Synchronous Transition in Complex Object Control, Physical Review Applied, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.034012.

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Okt 2021				
25/10	19.30	How to control electromagnetic waves by simple water-based devices (på engelsk) (Foredrag ved modtager af H.C. Ørsted Sølvmedaljen 2021, uddeles sammen med TICRA Fond)	Samel Arslanagic	SNU
Nov 2021				
15/11	19.30	Molecular modelling – fra pæne billeder til videnskab	Flemming Steen Jørgensen	SNU
Dec 2021				
6/12	19.30	Udvikling og forskning i vacciner i COVID-19 æraen Efter foredraget er der uddeling af H.C. Ørsted Gymnasielærermedaljen 2021 (sammen med energiselskabet Ørsted)	Camilla Foged	SNU
Feb 2022				
7/2	19.30	Niels Bohr Institutet, en dynamo for dansk forskning ved CERN	John Renner Hansen	SNU
28/2	19.30	Niels Bohr og Risø	Jørgen Kjems	SNU
Mrs 2022				
21/3	19.30	Einsteins bidrag til kvantemekanikken	Per Hedegaard	SNU
Apr 2022				
4/4	19.30	Sten og skrot fra rummet Efter foredraget afholdes generalforsamling	Anja C. Andersen og Henning Haack	SNU
Maj 2022				
9/5	19.30	The Copenhagen Spirit: A History of the Niels Bohr Institute (på engelsk) Efter foredraget uddeles H.C. Ørsted-medaljen til en inspirerende grundskolelærer (sammen med Haldor Topsøe)	Christian Joas	SNU

SNU: Aud. 1, H.C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (naturlæren.dk, facebook.com/SNU1824).

Medaljenyheder

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) indkalder nu indstillinger til H.C. Ørstedmedaljen i bronze i 2021 til en inspirerende gymnasielærer. Med medaljen følger et rejselegat til læreren på 25.000 kr. plus 50.000 kr. til et projekt på gymnasiet. Indstillingsfrist er den 28. oktober 2021. Scan QR koden for mere information.

SNU er glade for at kunne annoncere, at samarbejdet med Haldor Topsøe om at uddele H.C. Ørstedmedaljen i bronze til inspirerende grundskolelærere er blevet fornyet for perioden 2022–2024, altså frem til SNU's eget 200-års jubilæum.

SNU har nu også indgået et samarbejde med TICRA Fond om årligt at uddele H.C. Ørstedmedaljen i sølv i perioden 2021–2024. Uddelingen af de fire sølvmedaljer er tænkt som en serie med særligt henblik på fremragende formidlere på universiteterne og forskere samt

ingeniører i virksomheder, der yder en særlig indsats for at skabe synergi og samarbejde mellem virksomheder og universiteter, indenfor hele det fagspektrum, der ligger til grund for uddannelser og forskning i det elektrotekniske fagområde.



H.C. Ørsted – ånd og elektromagnetisme i dag

Jens Olaf Pepke Pedersen, Kvant

På Kvants bagside omtaler vi to nye bøger, nemlig en kommenteret udgave af H.C. Ørsteds "Aanden i Naturen" samt en lille bog med Ørsteds 1820-artikel om opdagelsen af elektromagnetismen. Carl Henrik Koch skriver i efterskriftet til "Aanden i Naturen", at bogen var lidt af en kulturel begivenhed i datiden, men også, at den i dag næppe læses meget mere. Ifølge Koch skyldes det, at "Naturforskere finder den for gammeldags formuleret og for metafysisk, filosoffer og idéhistorikere finder den for naturvidenskabeligt anlagt, og interessen hos litteraturforskerne går for tiden i en ganske anden retning end guldalderlitteratur".

Nyudgivelsen i et moderne og indbydende layout kan forhåbentlig blive en anledning for både naturvidenskabsfolk og humanister til atter at læse Ørsted.

I 1959 påpegede den britiske fysiker og forfatter C.P. Snow i en berømt forelæsning ved Cambridge University, at der eksisterer en kløft mellem den teknisk-videnskabelige og den klassisk-humanistiske kultur. Blandt flere eksempler nævnte han, at naturvidenskabsfolkene ligefrem var stolte over ikke at kunne citere Shakespeare, ligesom humanisterne ikke så det som et problem, at de havde et totalt ukendskab til termodynamikkens anden hovedsætning.

I dag er splittelsen mellem de to kulturer ikke blevet mindre, og derfor er det vigtigt, at Ørsted ikke kun huskes og læses for sin opdagelse af elektromagnetismen, men også som en brobygger mellem den naturvidenskabelige og den humanistiske kultur.

Fysikere kan måske bemærke, at Ørsteds filosofiske idé om en dyb sammenhæng mellem de forskellige naturfænomener også i dag er en ledetråd i fysikken. Ørsted så selv opdagelsen af elektromagnetismen som en bekræftelse på denne sammenhæng, og siden har det vist sig, at elektromagnetisme og den svage kernekraft også er to sider af samme sag, der matematisk kan forenes i den elektrosvage kraft. Det er også forventningen, at den elektrosvage kraft kan forenes med den stærke kernekraft, og mange fysikere har endda viet deres liv til at vise, at alle de kendte kræfter, dvs. også tyngdekraften, kan forenes i en form for urkraft. Måske fandtes denne urkraft i de første øjeblikke af Big Bang, og den er en del af den ultimative "Teori om Alting", men nøgternt set arbejder disse fysikere ud fra en filosofisk tilgang, om at naturen kan beskrives i en enhedsteori. Og på samme måde som Ørsted mente, at hans naturfilosofi indeholdt en æstetik, er forventningen også, at den endelige teori er i en eller anden forstand er smuk.

Carl Henrik Koch fremhæver også, at Ørsted i "Aanden i Naturen" grundlæggende ser optimistisk på fremtiden. Det kan vi også lade os inspirere af, for Ørsted var ikke i tvivl om, at både naturvidenskaben og den tekniske udvikling, ligesom samfundsudviklingen, vil gå i en retning, der gavner menneskeheden.

Vi kan også lade os inspirere af Ørsteds indsats med

at formidle naturvidenskab og opfinde nye danske ord. Det blev til omkring 2.000 ord, hvoraf mange fortsat bruges i dag. Det er en aktuel debat, i hvor høj grad engelsk skal indtage pladsen som undervisningssprog på universiteterne, og her kan man bemærke, at mange af Ørsteds nye ord betegnede naturvidenskabelige fænomener, netop fordi hans ønskede at gøre naturvidenskaben mere tilgængelig for den brede befolkning.

Ørsted fandt også på mange ord for dagligdags begreber, men mange blev ikke bemærket, fordi Ørsted brugte dem i skrifter af almen art. Et af de ord, han bruger i "Aanden i Naturen", men som desværre er gået i glemmebogen er ordet *samfoldighed*. Han bruger det i sin naturfilosofi som udtryk for de mange forskellige kræfter i naturen, der betinger tingenes væren eller natur: "*Naturlovene, hvorefter Alt foregaar i hver enkelt Gjenstand, udgjøre ikke blot en Mangfoldighed, men også en Samfoldighed*". I dag bruger vi kun ordet mangfoldighed, og typisk for at understrege forskelligheden mellem mennesker. Her kan samfoldigheden bruges som et udtryk for, at der trods alt er mere, der binder os sammen, end der skiller os ad.

Ørsted var meget optaget af naturvidenskabens anvendelser, og det var også hans motivation for at få oprettet Den Polytekniske Læreanstalt. Eftertiden har ofte hæftet sig ved, at hans opdagelse af elektromagnetismen, der er grundlaget for vores moderne verden, var et resultat af grundforskning. Ørsted er derfor jævnlige (og med rette) blevet brugt som argument for, at hvis "unyttig" grundforskning var blevet skåret væk, havde han ikke kunnet påvise sammenhængen mellem elektricitet og magnetisme. I 2010 skrev Claes Kastholm derfor i en kommentar i Berlingske Tidende, at hvis (daværende) videnskabsminister Charlotte Sahl-Madsen havde kunnet bestemme, var Ørsted blevet sat til at udvikle nye typer kakkellovne. Og i 2019 brugte Berlingskes kultureddaktør Anna Sophia Hermansen også Ørsted som argument for dannelse, og for at vi ikke skal belønne dem, der går direkte i gang med en uddannelse efter gymnasiet.

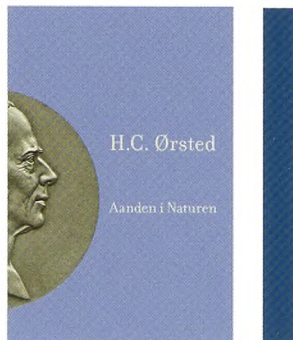
I vor tid er Ørsted endda blevet et symbol på den grønne omstilling efter at energiselskabet DONG har taget navnet til sig. I forbindelse med navneskiftet sagde bestyrelsesformand Thomas Thune Andersen, at Ørsted forbindes med elproduktion, og "grøn energi er noget, vi er rigtig gode til i Danmark". Med valget af navnet Ørsted lovede han, at selskabet vil gøre sit "yderste for at bringe ære til H.C. Ørsteds eftermæle. Nysgerighed, dedikation og interesse for naturen var nogle af H.C. Ørsteds mange kvaliteter (...) kvalitetstræk, som er nødvendige for, at den grønne transformation skal lykkes. Jeg tror på, at Ørsted er det rigtige navn for vores rejse fremad. Vi ønsker at skabe en ikonisk virksomhed, der er globalt anerkendt for dens lederskab inden for bæredygtig energi (...) navneskiftet til Ørsted markerer vores grønne transformation".

H.C. Ørsted – ånd og elektromagnetisme

Jens Olaf Pepke Pedersen, Kvant

Kvant har med en række artikler markeret 200-året for H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen, og de meget varierende emner for artiklerne har illustreret, hvordan Ørsted blev en af den danske guldalders hovedskikkelser, og var et menneske med mange interesser. I dette nummer af Kvant viser vi endnu en side af Ørsteds virke med en artikel af Poul R. Kruse om Ørsted og farmacihistorien.

Det Danske Sprog- og Litteraturselskab har også markeret Ørstedåret med to nye udgivelser: en kommenteret udgave af Ørsteds hovedværk "Aanden i Naturen", og en udgivelse af Ørsteds latinske artikel om opdagelsen i 1820, ledsaget af fem samtidige oversættelser.



The Discovery
of
Electromagnetism
Made in the Year 1820
by H. C. Ørsted



Society for Danish Language and Literature

H.C. Ørsted, "Aanden i Naturen", 2020, Det Danske Sprog- og Litteraturselskab, 458 sider, 250 kr.

"The Discovery of Electromagnetism Made in the Year 1820 by H.C. Ørsted", 2020, Det Danske Sprog- og Litteraturselskab, 67 sider, 150 kr.

Ørsteds hovedværk "Aanden i Naturen"

"Aanden i Naturen" udkom oprindeligt i to bind i 1849–50, kort før Ørsteds død i 1851, og her sammenfatter Ørsted sit naturfilosofiske verdensbillede. Det er en sammensat bog, hvor Ørsted skiftevis formidler sine tanker i lette dialoger og i mere faglige afhandlinger, ligesom den indeholder adskillige taler, som han har holdt ved forskellige lejligheder. Bogen samler mange af Ørsteds tanker om naturen og guddommen, og titlen henviser således til romantikkens forestilling om en identitet

mellem ånd og natur. Den grundlæggende og romantiske tankegang i Ørsteds naturfilosofi er, at vi skal forstå verden ved at forstå helheden, og denne helhed gennemstrømmes af en usynlig kraft, nemlig ånden i naturen, og som han skriver: *Alt er opfyldt med hemmelige Kredsløb, usynlige for det legemlige Øie, men klart fremgaaende for Aandens*. Guldalderens kulturelle ideal var en enhedskultur, en syntese af samfundsliv, æstetik, religion, filosof kunst, politik og videnskab.

Bogen er imidlertid også læseværdig i dag og ikke mindst takket være efterskriftet, som Carl Henrik Koch har skrevet, og som man med fordel kan læse inden bogen. Koch forklarer her, hvordan det var vigtigt for Ørsted, at den naturvidenskabelige forsker kunne udtrykke sig alment forståeligt, for ellers kunne naturvidenskaben aldrig blive den kulturelle og dannende faktor i samfundet, som Ørsted ønskede.

Opdagelsen af elektromagnetismen

Den anden udgivelse er en lille bog "The Discovery of Electromagnetism Made in the Year 1820 by H.C. Ørsted". Efter sin opdagelse i 1820 skyndte Ørsted sig at offentliggøre den i en afhandling på blot fire sider på latin. Snart efter udkom den også som artikel i forskellige tidsskrifter i oversættelser til fransk, italiensk, tysk, engelsk og dansk, og bogen rummer en fotografisk gengivelse af alle disse tekster. Søren Absalon Larsen, der var professor ved Polyteknisk Lærestalt (det nuværende DTU), udgav teksterne i faksimile i 1920, i 100-året for Ørsteds opdagelse.

Det er denne udgave fra 1920 som nu genudgives, og også denne bog er forsynet med et efterskrift (på engelsk) af Carl Henrik Koch. Den latinske titel "*Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*" blev på dansk til "*Forsøg over den elektriske Vexelkamps Indvirkning paa Magnetnaalen*".

Oversættelsen skyldtes ikke Ørsted selv, men ordet Vexelkamp brugte han allerede i 1805, og det er et eksempel på et af de ca. 2.000 nye danske ord som Ørsted fandt på.