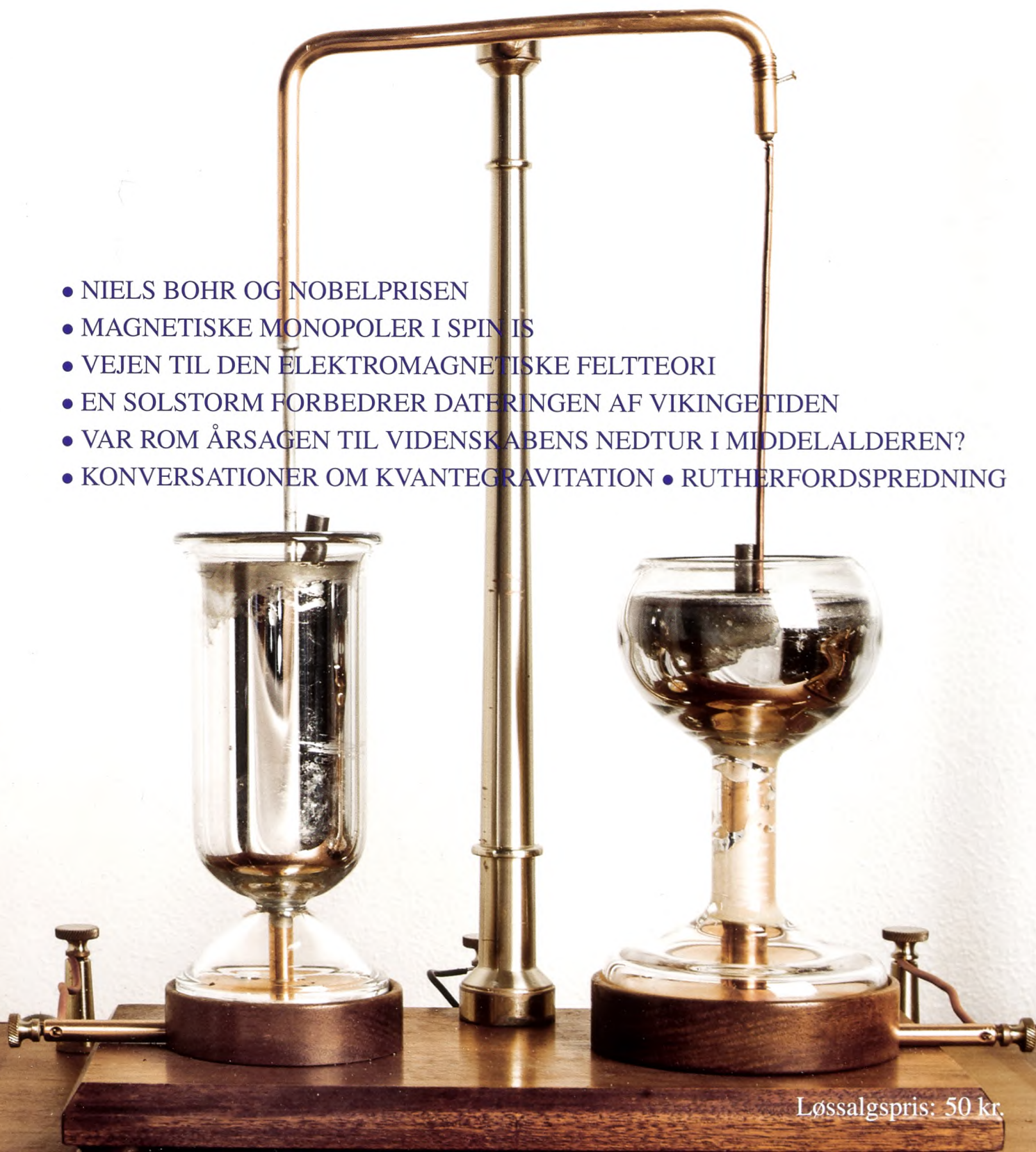

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 33. årgang

- NIELS BOHR OG NOBELPRISEN
- MAGNETISKE MONOPOLER I SPIN IS
- VEJEN TIL DEN ELEKTROMAGNETISKE FELTTEORI
- EN SOLSTORM FORBEDRER DATERINGEN AF VIKINGETIDEN
- VAR ROM ÅRSAGEN TIL VIDENSKABENS NEDTUR I MIDDELALDEREN?
- KONVERSATIONER OM KVANTEGRAVITATION • RUTHERFORDSPREDNING



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 Naturlærers 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 Rugb

Abonnementspris : 185 kr./år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-
lemsblad 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 reprojekteret
materiale i farver. Henvendelser om annon-
cer til redaktøren på: kvant@kvant.dk

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.

Oplag: 2.500.



Produktionsplan

Nr. 2-2022 udkommer ca. 15. juni

Nr. 3-2022 udkommer ca. 15. september

Deadline for mindre bidrag og annoncer
er ca. en måned før, længere artikler skal
modtages to måneder før.

Indhold:

Niels Bohr og Nobelprisen

Finn Aaserud 3

En solstorm forbedrer dateringen af Vikingetiden

Bente Philippsen og Jesper Olsen 6

Vejen til den elektromagnetiske feltteori

Hans Buhl 10

Nyt fra Astronomisk Selskab 17

Magnetiske monopoler i spin is

Bernhard Lind Schistad 18

Var Rom årsagen til videnskabens nedtur i middelalderen?

John Rosendal Nielsen 23

Konversationer om kvantegravitation

Michael Cramer Andersen 30

Rutherfordspredning – breddeopgave 95 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen 33

Spørg Kvant 34

Kommende foredrag 35

Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson Bagsiden



Billedet på forsiden viser en rekonstruktion af Faradays rotationsapparat fra 1821, som findes i Steno Museets samling. Til venstre ses enden af en magnet, hvis ene pol er fæstnet til bunden af et glas med kviksølv, mens den anden pol kan bevæge sig frit omkring ledningen. Til højre er det ledningen, der kan bevæge sig omkring en fast monteret magnet. Rotationsapparatet var verdens første elektromotor. Foto: Lise Balsby, AU Foto.

Læs mere i Hans Buhls artikel side 10 om vejen til den elektromagnetiske feltteori, som revolutionerede synet på naturen og lagde grunden for det 20. århundredes fysik.

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

Niels Bohr og Nobelprisen

Finn Aaserud, Niels Bohr Arkivet

Nobelprisen, etableret i begyndelsen af det 20. århundrede, er den mest ærefulde udmærkelse, en naturvidenskabsperson kan få. I det samme århundrede rangerer Niels Bohr, måske kun overgået af Albert Einstein, som den største fysiker og en af de største naturvidenskabspersoner overhovedet. Hvad var relationen mellem Nobelprisen og Niels Bohr. Hvordan påvirkede de hinandens udvikling?¹



Figur 1. Bohrs Nobelprisdiplom. Foto: Niels Bohr Arkivet.

Einstein og Bohr modtog hver sin Nobelpris i fysik samme år. Det var muligt, fordi tildelingen af et års Nobelpris kan udsættes et år, hvis ingen blev fundet værdig til prisen det foregående år. Således blev tildelingen af fysikprisen for 1921 udsat til 1922, da Einstein fik prisen for 1921 og Bohr prisen for 1922.

Tildelingen af de to priser i 1922 indebar en revolution mht. de kriterier, man benyttede for at give fysikprisen, idet Nobelkomitéen for Fysik hidtil havde lagt vægt på klassisk og anvendt fysik og nærmest overset den nye kvantefysik, hvis holdbarhed den mente slet ikke var bevist, og relativitetsteorien, som den anså som ren spekulation. Da Bohr første gang blev indstillet til prisen i 1917, regnede fysikkomitéen Bohr blandt den store gruppe kandidater, "der slutter sig til Plancks overordentlige frugtbare teoretiske undersøgelser angående den af ham opstillede hypotese om kvanter" der, i følge komitéen, stadig lider "af store vanskeligheder og ufuldkommenheder" [1]. Rigtig nok blev den udsatte 1918-pris givet til Planck i 1919, men året efter konkluderede komitéen på ny, at "de antagelser, på hvilke den bohrske atommodel er bygget, står i strid med

fysiske love, som endnu ikke vil kunne undværes" [2]. Det var i 1920, at Bohr indsendte sin første indstilling til Nobelprisen, nemlig af Einstein for relativitetsteorien, som komitéen stillede sig endnu mere negativ til end til kvanteteorien, hvilket var baggrunden for, at den svenske fysiker og Bohr-beundrer, Carl Wilhelm Oseen, i 1921 i stedet indstillede Einstein for hans opdagelse af loven for den fotoelektriske effekt. Dette arbejde blev imidlertid også afvist af Nobelkomitéen som uværdigt til en Nobelpris. Hvad Bohr angik, anså komitéen, at der ikke var nogen afgørende udvikling at notere, og ligesom forrige år ignorerede den Bohrs banebrydende arbejder fra 1918.

Hvad skyldtes fysikkomitéens veritable kovending i 1922? Selv om det nok kunne være svært at ignorere de elleve indstillinger af Bohr og de sytten af Einstein, var den væsentligste grund, at Oseen var indtrådt som midlertidigt medlem i komitéen efter et tidligere medlems dødsfald i maj 1922. I den egenskab blev Oseen bedt om at skrive rapporter om Einstein og Bohr. Ligesom året før valgte han at understrege Einsteins lov for den fotoelektriske effekt, som i følge Oseen var

¹Denne artikel er baseret på den mere omfattende F. Aaserud (2001) "Niels Bohr (1922): 'Jeg ved, hvor lidt jeg har fortjent dette ...'", *Nabo til Nobel: Historien om tretten danske Nobelpriser*. Aarhus Universitetsforlag, side 221–253.

et fundamentalt naturprincip, der ikke var baseret på, men understøttede, kvanteteorien. Efter dette kunstgreb fortsatte Oseen ved at hævde, at Bohrs atomteori var baseret på Einsteins empiriske lov og dermed heller ikke var i modstrid med den fysiske virkelighed. Fysikkomitéen tilsluttede sig Oseens begrundelse og nævnte for første gang Bohrs arbejder fra 1918 og gav samtidig ros til Bohrs 1921-teori for atomets struktur. I sin præsentationstale om Bohr refererede Nobelkomitéens formand, den fysiske kemiker Svante Arrhenius, der i øvrigt selv havde modtaget Nobelprisen i kemi tilbage i 1903, ligeledes til Bohrs seneste arbejder fra 1918 og 1921 [3]. I disse arbejder havde Bohr introduceret det revolutionerende korrespondensprincip, som bidrog yderligere til, at hans teori kunne forklare en række ellers uforklarlige eksperimentelle resultater. Det var dog teoriens evne til at bekræfte eksperimenter, der var specielt imponerende for de fleste fysikere, mens der var større tvivl om korrespondensprincippet. For eksempel omtalte den prominente fysiker Arnold Sommerfeld i München, som selv havde bidraget væsentligt til videreførelsen af Bohrs teori, korrespondensprincippet i spøgefulde vendinger som en "tryllestav" (*Zauberstab*), der kun fungerede i København [4].



Figur 2. Niels Bohr og Albert Einstein fotograferet af kollegaen Paul Ehrenfest i sidstnævntes hjem i Leiden, Holland. Foto: Niels Bohr Arkivet.

Det var dog ikke Bohrs videreudvikling af atomteorien fra hans første formulering 1913 og teoriens evne til at forudsige eksperimenter, men Nobelkomitéens ændrede syn på kvanteteorien i det hele taget, der var den væsentlige årsag til komitéens ændrede holdning. Fysikkomitéens indstilling blev accepteret i Det Svenske Videnskabsakademis fysikklasse og derefter i det samlede Akademi, som stod for den endelige afgørelse. Komitéens ændrede holdning til den nye kvantefysik blev forstærket, da Oseen blev varigt medlem sammen med fysikeren Manne Siegbahn efter et nyt dødsfald i komitéen. En ny æra for tildelingen af Nobelpriser i fysik var begyndt.

I sit gratulationsbrev til Einstein efter at priserne var blevet annonceret skrev Bohr, at han "har følt det

som en stor lykke, at ... det af Dem ydede bidrag på det mere specielle område, hvor jeg arbejder ... skulle blive anerkendt udadtil, før jeg blev draget i betragtning til en sådan ære" [5]. På dette tidspunkt var Einstein på en verdensomsejling, og var derfor forhindret fra at modtage sin Nobelpris i Stockholm. Han svarede Bohr i et brev skrevet på skibet S.S. "Haruna Maru" udenfor Singapore dateret 11. januar 1923: "Særlig betagende finder jeg Deres angst for, at De kunne få prisen før mig—det er ægte bohrsk" [6]. Bohrs udsagn var imidlertid ikke alene et udtryk for beskedenhed, men også for hans ønske om, at "det mere specielle område" omsider skulle få fuld anerkendelse, også i Nobelprissammenhæng. Som Oseen skrev til Arrhenius den 20. november 1922: "Jeg har haft den glæde, at Bohr såvel offentligt som til mig privat har udtrykt sin glæde over at Einstein har fået prisen, og netop for den del af sin virksomhed, som udgjorde en forberedelse for Bohrs. Bohr finder, at alle hans forgængere nu er blevet belønnet" [7]. I sin Nobelpristale gav Bohr udtryk for en tilsvarende omsorg for, at hans fag skulle blive anerkendt [8].

Selv om Bohr var en af de hidtil yngste Nobelpristagere i fysik, var han en etableret størrelse i 1922. I marts året forinden var et Institut for Teoretisk Fysik oprettet for ham ved Københavns Universitet, med et allerede fastlagt forskningsprogram i teoretisk og eksperimentel atomfysik. I juni 1922 var Bohr inviteret til at holde en forelæsningsrække om sine teorier, uformelt omtalt som *Bohr Festspiele*, ved det prestigefyldte Göttingen Universitet, der var et internationalt centrum, både teoretisk og eksperimentelt, for den nye fysik. I 1923 donerede det nyoprettede Rockefeller-støttede International Education Board sin første støtte overhovedet til Bohrs institut på basis af Bohrs uforlignelige status, også i forhold til andre Nobelpristagere. I et brev til Carlsbergfondet i september 1923, hvor to af Bohrs mest fremtrædende danske kolleger argumenterede for at Bohr skulle gives midler for at kunne anvende al sin tid til forskning, blev Nobelprisen ikke nævnt. I stedet skrev fysiologen Valdemar Henriques og matematikeren Johannes Hjelmslev, efter at Bohr var blevet tilbudt en attraktiv stilling i England, at en sådan støtte fra Carlsbergfondet ville "give sit vægtige Bidrag til, at vort Land i denne nationalt set ganske betydningsfulde Sag kunne hævde sig i Kappelstrid med et rigt og mægtigt Lands Bestræbelser for at højne og styrke sit videnskabelige Arbejde ved at drage Verdens bedste Kræfter ind under sin Fane" [9]. I dansk og udenlandsk presse var dækningen af Bohrs Nobelpris beskeden i forhold til andre af Bohrs bedrifter, både før og siden. Det synes klart, at Nobelprisen til Bohr (og Einstein) indebar et langt større brud for Nobelinstitutionen end for Niels Bohr og hans anseelse.

Efter 1922 var Bohr mere succesrig end de fleste andre fysikere mht. at indstille personer, der fik Nobelprisen i fysik. Blandt de tretten personer, som Bohr indstillede før Anden Verdenskrig, var der kun én der aldrig fik prisen. Blandt Bohrs indstillinger i efterkrigstiden, var det kun den i 1946 — da han foreslog Lise Meitner og Otto Robert Frisch — der var

helt resultatløs, i den forstand, at hans indstillinger i alle de andre år omfattede mindst én Nobelprisvinder. Alt i alt foreslog Bohr i sine fyrre år som indstiller nitten forskellige personer, som alle på nær fire modtog Nobelprisen [10]. På baggrund af statistisk materiale for perioden frem til 1939, kan det slutes, at ingen anden videnskabsperson, der indsendte lige så mange indstillinger som Bohr, kom blot i nærheden af hans "træfsikkerhed". Planck kommer nærmest, idet han indstillede sytten kandidater i samme periode, hvoraf elleve fik prisen [11]. Den eneste, der kun har indstillet fysikere, der senere fik Nobelprisen, er den japanske fysiker Hantaro Nagaoka, men han indstillede væsentlig færre fysikere end Bohr eller Planck [12].



Figur 3. Stående fra venstre: Wilhelm Oseen, Niels Bohr, James Franck, Oskar Klein. Siddende: Max Born. Göttingen, Tyskland. Foto: Niels Bohr Arkivet.

Det er et udtryk for Bohrs internationale orientering, at han aldrig indstillede en dansker til Nobelprisen. Der var hellere ingen danskere, der indstillede Bohr. Det betyder langt fra, at Bohr var eller følte sig isoleret i sit hjemland. Tværtimod følte han både forpligtigelse og glæde ved at forblive i sit fædreland, afslog de mange tilbud om stillinger i udlandet, og accepterede mange tillidshverv i Danmark, ikke mindst præsidentskabet i Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab fra 1939 til hans død i 1962.

I januar 1940 donerede Bohr sin Nobelmedalje til Finlandshjælpen under Vinterkrigen mellem Finland og Sovietunionen. Det samme gjorde den danske fysiolog August Krogh, der havde modtaget Nobelprisen for Fysiologi og Medicin to år før Bohr. Finlandshjælpen satte medaljerne på auktion, og de blev købt for et anseelig beløb af en anonym køber, der donerede medaljen til Det Nationalhistoriske Museum på Frederiksborg, hvor

den stadig findes. Nobelmedaljens skæbne viser Bohrs humanistiske holdning også i international politik, der senere kom til udtryk i hans indsats for en "Åben Verden" under og efter Anden Verdenskrig [13].

Kombinationen af Bohrs kulturelle nærhed til Danmark og hans internationale anseelse og udsyn bidrog utvivlsomt til Bohrs status inden for Nobelinstitutionen. Denne status understreges af, at han i 1929, som eneste ikke-svensker nogensinde, blev adspurgt om han ville sidde i Nobelkomitéen for Fysik. Selv om Nobelkomitéens forslag blev nedstemt i Det Svenske Videnskabsakademi, viser episoden, at Bohrs nære kontakt til og stærke indflydelse på Nobelinstitutionen var enestående.

Litteratur

- [1] Nobelkommitténs rapport, 19. september 1917, Kungl. [Svenska] Vetenskapsakademien Nobelarkiv, Stockholm.
- [2] Nobelkommitténs rapport, 22. september 1920, Kungl. [Svenska] Vetenskapsakademien Nobelarkiv, Stockholm.
- [3] www.nobelprize.org/prizes/physics/1922/ceremony-speech/.
- [4] H. Kragh (2012) Niels Bohr and the Quantum Atom: The Bohr Model of Atomic Structure 1913–1925. Oxford University Press.
- [5] Bohr til Einstein, 11. november 1922, Niels Bohrs videnskabelige korrespondance, Niels Bohr Arkivet.
- [6] Einstein til Bohr, 11. januar 1923, Niels Bohrs videnskabelige korrespondance, Niels Bohr Arkivet.
- [7] Oseen til Arrhenius, 20. november 1922, Svante Arrhenius Arkiv, El:18, Kungliga [Svenska] Vetenskapsakademien, Stockholm.
- [8] www.nobelprize.org/uploads/2018/06/bohr-lecture.pdf.
- [9] Henriques og Hjelmlev til Carlsbergfondet, 3. september 1923, Carlsbergfondets Arkiv, København.
- [10] www.nobelprize.org/nomination/archive/show_people.php?id=1118.
- [11] www.nobelprize.org/nomination/archive/show_people.php?id=7283.
- [12] www.nobelprize.org/nomination/archive/show_people.php?id=6592. En tak til professor Karl Grandin ved Centrum för vetenskapshistoria, Kungliga [Svenska] Vetenskapsakademien, for denne information.
- [13] F. Aaserud (2020) "Niels Bohr's Diplomatic Mission during and after World War Two", *Berichte der Wissenschaftsgeschichte*, bind 43, side 493–520.



Finn Aaserud er cand.real. i fysik fra Universitetet i Oslo og ph.d. i videnskabshistorie fra Johns Hopkins University, Baltimore. Fra 1985 til 1989 var han Associate Historian ved Center for History of Physics, American Institute of Physics, dengang i New York City, og fra 1989 til 2017 arkivleder ved Niels Bohr Arkivet. Han er nu emeritus ved Niels Bohr Institutet.

En solstorm forbedrer dateringen af Vikingetiden

Bente Philippsen, Museum Lolland-Falster, og Jesper Olsen, Aarhus AMS Center

En arkæologisk udgravning på en lille bygrund i Ribe har frembragt flere end 100.000 artefakter fra vikingetidens begyndelse. Mange råmaterialer, værktøjer og smykker blev importeret fra fjerne egne – fra det nordlige Norge, fra Vesteuropa og fra Mellemøsten. En solstorm i 775 e.Kr. har sat sine spor i Ribe, og blev til et fikspunkt i vores serie af 140 kulstof-14 dateringer. Det hjalp os til at opnå en præcision som aldrig før for arkæologiske jordlag – og en ny forståelse for årsagen til vikingetiden.

Gåden om Vikingetidens begyndelse

Gennem alle tider har mennesker rejst og handlet med hinanden. En stor udvidelse af handelsstrømmene sker dog i årene 750-1000 e.Kr. Her udløste det nye islamiske imperium i Mellemøsten et fænomen, nogle forskere kalder for "proto-globalisering". Et handelsnetværk omfattende næsten hele Afro-Eurasien blev dannet. Heller ikke i Danmark gik det upåagtet hen. Man kunne tænke sig, at strømmen af østens rigdomme i form sølvmønter og glasperler udløste ønsker om at være med på moden i Danmarks tidlige byer. Måske var det endda grunden til Vikingetidens begyndelse? Denne periode er præget af fjernhandel – nogle gange mere, andre gange mindre fredeligt – med sødygtige skibe. Nye stilarter opstår i det lokale håndværk, der bliver importeret varer fra fjerne egne, og fra ca. år 790 hører vi om de berygtede plyndringstogter.



Figur 1. Udgravningen i Ribe. Foto: Sydvestjyske Museer.

I den vestjyske by Ribe kan man følge hele denne udvikling. Under gaderne gemmer sig et arkiv af jordlag med rester af handel og håndværk. I byens centrum, i området nordøst for Ribe Å, har der været en handelsplads i den tidlige vikingetid. På begge sider af en vej lå parceller med huse, værksteder og sikkert også handelsboder ud til vejen. Husene havde lergulve. Når et hus blev renoveret eller revet ned, blev et nyt gulv lagt ovenpå det gamle. Imellem gulvene finder man smudslag og spor efter menneskenes aktiviteter: dråber af smeltet glas fra perle fremstillingen eller rester af rensdyrtak, som blev tilovers efter man havde snittet en kam. Også måltidsaffald og dagligdags ting er gemt

i jordlagenes arkiv, fx brændte kornkerner, dyreknogler eller keramikskår.



Figur 2. I udgravningens kant kan man se lagfølgen. Foto: Sydvestjyske Museer.

Ved hjælp af finansiering fra Carlsbergfondet havde vi en enestående mulighed for at lave en forskningsudgravning på en lille bygrund midt på vikingetidens handelsplads. Vi var et tværfagligt hold af arkæologer og fysikere fra Sydvestjyske Museer, Aarhus Universitetets grundforskningscenter UrbNet (Centre for Urban Network Evolutions) og Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. I over et år kunne vi udgrave arealet meget detaljeret. Hver eneste skovlfuld jord fra udgravningen blev ved hjælp af museets gode frivillige kræfter skyllet igennem sigter, så selv de mindste fund blev opsamlet.



Figur 3. Fund fra udgravningen, bl.a. kam af tak, smeltedigel, tenvægt og en miniature-økse af rav. Foto: Sydvestjyske Museer.

På denne måde blev der fundet ca. 3900 glasperler, der kan fortælle om datidens økonomi: først blev der produceret lokale perler, hvortil man havde importeret råmaterialet fra Vesteuropa. Senere blev de lokale perlemagere dog udkonkurreret af billigere perler fra Mellemøsten. Også fragmenter af andre råmaterialer fra forskellige dele af Europa blev fundet: Rensdyrtak, klæbersten og hvassesten af skifer fra Norge, keramikkar og kværnsten af en vulkansk bjergart fra Rhin-området. Der er altså rigelige indikationer på fjernhandel. Men hvorfor begyndte handelen i Ribe at blomstre lige i denne periode?



Figur 4. Glasperler fra udgravningen, sorteret i stratigrafisk rækkefølge (de ældste nederst). Foto: Sydvestjyske Museer.

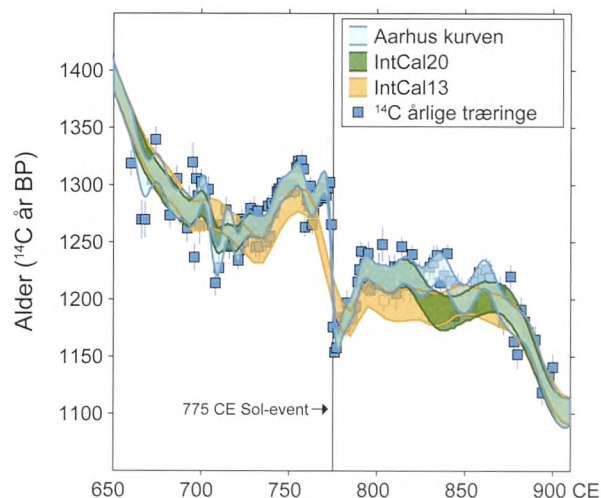
For at forstå, hvad der er årsag, og hvad der er virkning, er man nødt til at have en god forståelse af rækkefølgen af hændelser i tid – en god kronologi. Arkæologer bruger ofte kulstof-14 (^{14}C) dateringen til deres fund (se fx [1]). Frem til i dag var brugen af metoden dog meget begrænset, når det gjaldt yngre perioder som Vikingetiden, fordi den ikke var præcis nok. Med dateringsusikkerheder på flere årtier var ^{14}C -datering ikke så god som dateringer på baggrund af fx mønter eller artefakt-typer. Det er dog ved at ændre sig, og i de seneste år er der kommet en sand ^{14}C -revolution [2].

Kosmisk stråling, solaktivitet og træringe

Selvom vi daterer meget jordnære ting, skal vi ud på en tur til den øvre del af atmosfæren for at forstå baggrunden for den nye ^{14}C -revolution.

Her dannes ^{14}C -atomet ved, at en neutron kolliderer med et kvælstofatom. Neutroner dannes som sekundære partikler ved kernereaktioner mellem kosmisk stråling og atmosfærens atomer. Fluxen af kosmisk stråling afhænger af blandt andet Solens styrke, da størrelsen af Solens og Jordens magnetfelter skærmer mod den kosmiske stråling. Et svagt samlet magnetfelt vil øge ^{14}C -produktionen, hvorimod et stærkt magnetfelt vil mindske den. Så snart et ^{14}C -atom er dannet, oxideres det til CO_2 , hvorefter det via fotosyntese optages i træer og planter, og derfra videre til alle levende organismer. Ved en organismes død ophører vekselvirkningen med atmosfærens ^{14}C . Eftersom ^{14}C er radioaktivt vil ^{14}C -koncentrationen mindskes over tid. Da halveringstiden er kendt ($T_{1/2} = 5730$ år), kan man benytte henfaldsloven til at tidsbestemme dødstidspunktet for en organisme, såfremt man også kender begyndelses aktiviteten, A_0 .

Eftersom både Solens og Jordens magnetfelter varierer i tid og dermed produktionsraten af ^{14}C , så er det ikke ligetil at bestemme begyndelsesaktiviteten, A_0 , for et givent tidspunkt tilbage i tiden. Derfor defineres A_0 til at være den atmosfæriske ^{14}C -aktivitet i 1950. Man kan så ved at måle ^{14}C -aktivitet i en prøve udregne ^{14}C -alderen via henfaldsloven. Henfaldsloven giver altså prøvens alder i ^{14}C -år før 1950. For efterfølgende at omsætte et ^{14}C -år til kalender år har vi brug for en kalibreringskurve.



Figur 5. Kalibreringskurver til ^{14}C -datering. Den nyeste (IntCal20) er allerede mere detaljeret end den fra 2013 (IntCal13). Vi har suppleret med endnu flere træeringsmålinger (blå firkanter) og beregnet Aarhuskurven, som vi anvender i Ribe.

Over de sidste 30 år har forskere arbejdet på at udvikle og forfine ^{14}C -kalibreringskurver og ca. hvert femte år udkommer en ny kalibreringskurve (den seneste i 2020). For de sidste 14.000 år er kalibreringskurven udarbejdet på træstykker. Træ har den fordel, at man kan tælle og måle tykkelsen af årringene. Gode år giver brede årringe, og dårlige år giver smalle; kombinationen af smalle og brede årringe giver enhver tidsperiode et unikt mønster, som kan bruges til at overlape forskellige træstykker i tid. Denne metode kaldes dendrokronologi og anvendes til at datere årringene i kalenderår. Når man efterfølgende måler ^{14}C -i årringene, kan man

plotte kalenderår mod ^{14}C og dermed har man en kalibreringskurve (se figur 6).

Når en ukendt prøve er målt i ^{14}C -år kan de tilsvarende kalenderår findes ved skæringen med kalibreringskurven. Netop fordi ^{14}C -produktionsraten varierer i tid, er der ikke nødvendigvis en unik oversættelse mellem ^{14}C -år og kalenderår – ofte svarer et ^{14}C -år til mange kalenderårsintervaller. Eksempelvis udviser hele perioden fra cirka 800 til 870 omtrentligt den samme ^{14}C -alder. Det er blandt andet derfor at ^{14}C -metoden har haft ringe udbredelse for vikingetidens arkæologi.



Figur 6. Ribes handelsforbindelser og lagfølgen fra udgravningen.

I 2012 publicerede den japanske forsker Fusa Miyake et studie som revolutionerede vores syn på ^{14}C ved at vise en forøgelse af ^{14}C -produktionen på 20‰ i 775, altså indenfor ét år – et såkaldt Miyake-begivenhed. Hidtil havde vi anset en så stor ændring i ^{14}C -produktionsraten på så kort tid som noget nær en umulighed. Da klimaet og dermed Jordens kulstofkredsløb ikke udviser abrupte eller meget store udsving omkring 775 stod det hurtigt klart, at der måtte være en ekstraterrestrisk årsag til det påfaldende store og hurtige udsving – var det en

nærliggende supernova, en kvasar, et gamma burst eller noget andet?

Jagten gik ind på at forstå dette fænomen og mange ^{14}C -laboratorier verden over begyndte at måle ^{14}C med årlig opløsning. Hidtil havde man målt hvert tiende år, og derfor var disse Miyakebegivenheder blevet overset. I dag er 775 solbegivenheden fundet i træningsarkiver verden over på begge halvkugler. Ligeledes er den fundet som udslag i ^{10}Be og ^{36}Cl i iskerner på Antarktis. Konsensus i dag er, at 775-begivenheden skyldes en ekstraordinær solstorm som sendte en storm af protoner mod Jorden, som derved har givet anledning til en ^{14}C -produktionsrate forøgelse på 20‰. Adskillige andre solbegivenheder er efterfølgende fundet, men ingen er så ekstreme som 775-begivenheden. Til sammenligning kan en af de mest intense solstorme, nemlig Carringtonbegivenheden i 1859, ikke detekteres med ^{14}C . Carringtonbegivenheden gav anledning til nordlys på Cuba og Hawaii, og det kan derfor undre at der ikke findes historiske optegnelser af ekstraordinære himmelbegivenheder omkring 775. Men det er netop på grund af Fusa Miyakes opdagelse, at vi i dag har højopløselige kalibreringskurver, som kan hjælpe os med at datere Vikingetiden med ^{14}C -metoden.

Nye tider for Ribes vikinger

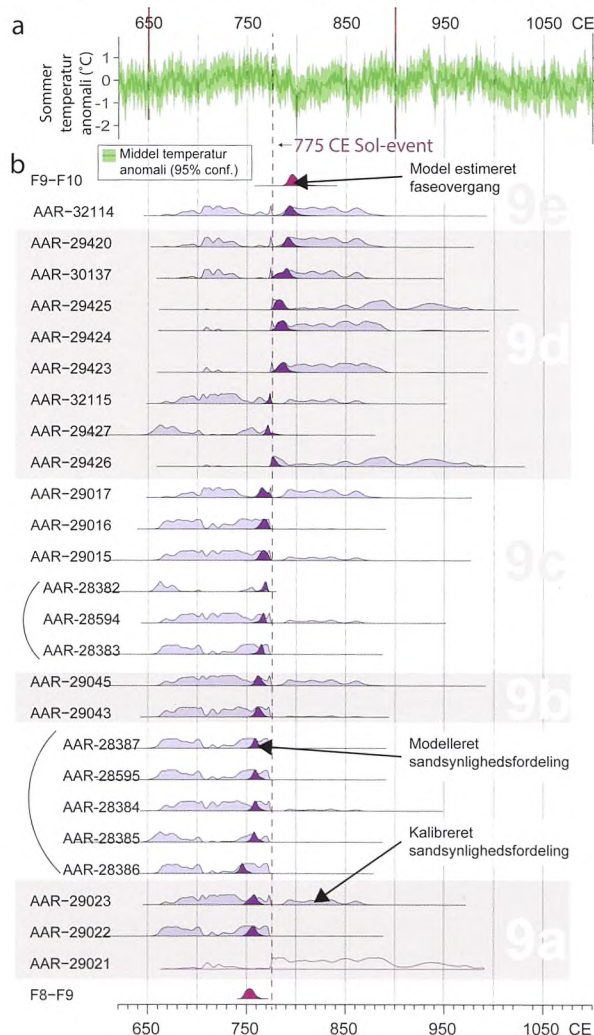
Der er allerede fundet Miyakebegivenheder i træringe fra forskellige udgravninger. Metoden blev fx brugt til at fastslå, hvornår der var vikinger i Nordamerika: forskere fandt en Miyakebegivenhed fra 993 e.Kr. i et stykke træ, og kunne tælle sig frem til, at træet blev fældet i 1021 e.Kr. [3].

Vi ville gerne have brugt samme metode for at datere forskellige hændelser i Ribe. Men desværre var der kun velbevaret træ i de allerdybeste lag. I de øvrige lag var der kun små rester af trækul, knogler eller trækul at datere – i hvert fald ikke noget, hvor man kunne tælle årringene. Til gengæld kunne vi tælle jordlagene næsten på samme måde som træringe (med den forskel, at lergulvene ikke blev fornyet årligt). Fra hvert lag daterede vi en eller flere prøver med ^{14}C -metoden. Resultaterne kunne vi så sammenligne med dem fra vores træningsmålinger. Dermed blev vores studie det første, der bruger en Miyakehændelse i en arkæologisk lagserrie. Vi fandt frem til det lergulv, folk gik rundt på i året 775, mens Solen sendte en stor mængde ladede partikler mod Jorden.

Miyakehændelsen kan derfor forankre hele vores serie af dateringer i tid. Nu kender vi alderen på de forskellige lag, og kan derfor sætte en alder på de artefakter, vi finder i lagene.

I de tidligste tider er der en lokal produktion af glasperler. Selve glasset bliver dog ikke lokalt fremstillet. I stedet for importerer perlemageren genbrugsglas fra de romerske prægede dele af vesteuropa. Det kunne være skår af drikkeglas eller også mosaiksten af glas. Hvilken rute genbrugsglasset har taget, kan vi se af andre handelsvarer. Vi finder nemlig også kværnsten lavet af en særlig type basalt, en vulkansk bjergart, der findes i Rhin-området. Også specielle typer af keramik kommer fra egnene omkring Rhinen. Handelen foregik

altså langs med denne flod, og så op igennem Nordsøen.



Figur 7. ^{14}C -dateringen af vikingetidens begyndelse (fase 9e). De lyse fordelinger er kalibreringer af enkelte dateringer. De mørke er resultater af en model, hvor man inddrager prøvernes placering i lagfølgen.

Allerede i 750 e.Kr. finder vi dog tegn på en ny dristighed i sejladsen. Ud over sejlads på floder og langs med kysten begynder folk at krydse det åbne hav. Importerede varer fra Norge viser, at ikke engang det farlige Skagerrak var en handelsbarriere. Der bliver importeret skifer til hvæssesten fra Norge, og rensdyrtak til kamfremstilling fra de nordligste egne. I Ribe har vi fundet spor efter kammagerens værksted, så vi er sikre på, at det var råmaterialerne, og ikke de færdige produkter, der kom med skibene fra Norge. Ved siden af kamfremstilling bliver der også støbt bronze og som allerede nævnt lavet glasperler. I de tidligste tider er Ribe altså lige så meget værksteds- som handelsplads. Nogle årtier senere, ansporet af den voksende handel, kommer der til at ske store ændringer for nogle erhverv, og ét håndværk bliver udkonkurreret af udenlandske billigvarer. Solstormen i år 775 e.Kr. er der, så vidt vi ved, ingen, der lægger mærke til.

Takket være den meget detaljerede udgravningsteknik kan vi se, at der sker afgørende forandringer i tiden kort efter solstormen. I perioden 785-810 e.Kr. begynder folk i Ribe at importere glasperler fra Mellemøsten, og samtidigt ophører den lokale perlefremstilling. I denne tid ændrer moden sig også i bronzeværkstedet.

Lokalt producerede metalsmykker i en særlig stil, der kaldes Berdal-stilen, bliver eksporteret til andre egne. Berdalstilen bliver set som en markør af vikingetidens begyndelse.

Som nævnt i indledningen var en af forklaringerne på vikingetidens begyndelse, at det nye islamiske rige i Mellemøsten lokkede med store mængder sølv og handelsperler. Vores nøjagtige ^{14}C -målinger kan tilbagevise denne hypotese. Sølv og perler fra det islamiske rige udløste ikke vikingetidens handelseventyr, men var en forstærkende faktor og en impuls til at vende blikket mod endnu fjernere horisonter. I Ribes lergulve kan vi følge en lang række oversøiske eventyr mod vest og nord, inden handelsnetværkene udbygges yderligere med kontakter til Mellemøsten, indtil store dele af Europa, Asien og Afrika er forbundet gennem vikingetidens handelsrejser.

Den nye metode gør det muligt at sammenligne udviklingen i forskellige regioner, uafhængigt af skriftsprog og historieskrivning. Også udviklinger i miljø og klima kan vi datere med ^{14}C og på denne måde sætte på samme tidsakse som den kulturelle udvikling. Forude venter mange nye opdagelser om relationerne mellem folk og omverdenen.

Litteratur

- [1] B. Philippsen (2008) Kulstof-14 datering af stenalderens keramik, *Kvant*, bind 19, nr. 4, side 13–16.
- [2] J.H. Barrett (2022). A radiocarbon revolution sheds light on the Vikings, *Nature*, bind 601, side 326–327.
- [3] M. Kuitens m.fl. (2021) Evidence for European presence in the Americas in AD 1021, *Nature*, bind 601, side 388–391.
- [4] B. Philippsen, C. Feveile, J. Olsen og S.M. Sindbæk (2021). Single-year radiocarbon dating anchors Viking Age trade cycles in time, *Nature*, bind 601, side 392–396.



Bente Philippsen er akademisk medarbejder på Museum Lolland-Falster i Nykøbing F.



Jesper Olsen er leder af Aarhus AMS Center (AARAMS), som primært arbejder med kulstof-14 dateringer. Jesper Olsen forsker blandt andet i at rekonstruere Solens variabilitet tilbage i tiden med højpræcisions kulstof-14 målinger på træringe.

Vejen til den elektromagnetiske feltteori

Hans Buhl, Steno Museet, Aarhus Universitet

H.C. Ørstedes opdagelse af elektromagnetismen førte til udviklingen af en lang række teorier om fænomenet i løbet af 1800-tallet. De kan overordnet deles op i to grupper: teorier, som tog udgangspunkt i det, der er og sker *inden* i ledninger og magneter, og teorier, som i stedet fokuserede på rummet *omkring* ledninger og magneter. Nogle af teorierne i sidstnævnte gruppe førte til Maxwells ligninger, som med deres feltteoretiske udtryk revolutionerede synet på naturen og lagde grunden for det 20. århundredes fysik.

“En uvejsom ørken”. Således karakteriserede den tyske fysiker og fysiolog Hermann von Helmholtz de mange elektrodynamiske teorier, der var fremkommet i løbet af 1800-tallet [1]. Ikke blot var der to fundamentalt forskellige forståelser af elektromagnetiske fænomener. Selv inden for de respektive paradigmer gav de forskellige teorier ikke altid de samme resultater. Mange af teorierne var også særdeles komplekse [2].

Udviklingen af de elektromagnetiske teorier var begyndt umiddelbart efter, at Ørsted i sommeren 1820 havde rundsendt sit latinske flyveskrift om elektricitets påvirkning af magnetnålen til et halvt hundrede lærde kolleger i Europa. Det fik en blandet modtagelse. De romantisk orienterede fysikere i Tyskland var begejstrede, hvorimod de franske fysikere, som var den tids førende, var dybt skeptiske. For Ørstedes opdagelse var i direkte modstrid med deres grundlæggende laplacienske paradigme.

Elektromagnetiske fjernvirkningsteorier

Inspireret af den indflydelsesrige franske matematiker og fysiker Pierre-Simon Laplace, betragtede hovedparten af fysikerne Newtons gravitationsteori som det store forbillede. De forestillede sig, at materien var opbygget af en form for partikler, som påvirkede hinanden gennem øjeblikkeligt virkende centralkræfter. Altså kræfter der – ligesom tyngdekraften – virkede langs forbindelseslinjen mellem partiklerne, og hvis styrke udelukkende afhang af afstanden imellem dem. Derfor var det en stor sejr for laplacierne, at det i 1780'erne var lykkedes den franske fysiker Charles-Augustin de Coulomb at måle, at kraften mellem ladede kugler havde samme matematiske struktur som tyngdekraften: Den var proportional med ladningerne og omvendt proportional med kvadratet på afstanden imellem dem. Siden havde man også fundet en tilsvarende variation af kraften mellem magnetpoler.

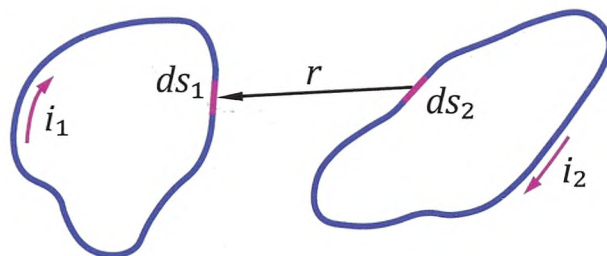
Det paradigme havde Ørsted nu sat et stort spørgsmålstegn ved. Ikke blot havde han påvist en vekselvirkning mellem elektricitet og magnetisme, som laplacierne ellers havde afvist enhver form for forbindelse imellem. Han havde oven i købt vist, at denne virkning foregik *på tværs* af en strømførende ledning.

Der opstod hurtigt forskellige teorier om, hvad der forårsagede den elektromagnetiske effekt. Fysikerne Jean-Baptiste Biot og Félix Savart mente, at elektriciteten på en eller anden måde gjorde ledningen magnetisk, og at det var derfor, den påvirkede en

magnetnål i nærheden. Gennem en serie af målinger kunne de vise, at kraften på en magnetnål fra en lige, lodret leder var omvendt proportional med afstanden imellem dem. Biot argumenterede for, at kraften på magneten var summen af den magnetiske kraft fra infinitesimale stykker af ledningen. Han kunne vise, at det svarede til, at kraften mellem magneten og sådan et lille stykke af ledningen varierede omvendt proportional med kvadratet på afstanden. Variationen var altså i overensstemmelse med det laplacienske paradigme, men teorien kunne stadig ikke forklare kraftens retning [3].

Ampère og kraften mellem strømme

En anden, der studerede elektromagnetismen med stor entusiasme, var matematikeren André-Marie Ampère. Som nævnt mente Biot og Savart, at fænomenet var magnetisk af natur. Men som det tidligere er blevet fint beskrevet her i bladet, argumenterede Ampère derimod for, at det grundlæggende var et elektrisk fænomen, og at al magnetisme skyldtes elektriske strømme [4]. Han antog, at der måtte løbe elektriske strømme inden i en permanent magnet. For at underbygge denne hypotese viste han, at en lang spole opførte sig som en magnet, når der løb strøm igennem den. I løbet af blot to uger lykkedes det ham også at vise, at to strømførende, parallelle ledninger påvirkede hinanden på samme måde som to magneter. Hermed havde Ampère skabt en helt ny teori om magnetisme. Til at karakterisere kraften mellem strømførende ledere opfandt han betegnelsen *elektrodynamik*.



Figur 1. For at finde kraften mellem to strømkredse tog Ampère udgangspunkt i centralkraften mellem infinitesimale strømelementer, ids .

Det næste skridt for Ampère var at beregne denne kraft. Ligesom Biot vidste han, at det kunne gøres ved at integrere kraften mellem infinitesimale strømelementer ($i_1 ds_1$ og $i_2 ds_2$) langs begge ledere. Som en god laplacier antog han endvidere, at kraften mellem

strømelementerne var en centralkraft, som varierede med det inverse afstandskvadrat ligesom tyngdekraften og den elektrostatiske kraft [3, s. 73f]. Derudover var han nødt til at tage højde for de to strømelementers retning i forhold til hinanden. Det gjorde Ampères udtryk for kraften noget mere komplekst end for fx gravitationskraften:

$$d^2 F_{12} = \frac{i_1 i_2 ds_1 ds_2}{r^2} (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \frac{1}{2} \cos \alpha \cos \beta)$$

hvor α , β og γ angiver vinklerne mellem strømelementerne. Men det havde stadig gode laplacienske træk, og kunne gøre rede for kraften og drejningsmomentet mellem lukkede strømkredse.

Takket være sin eminent eksperimenterkunst og skarpe matematiske analyse af fænomenet havde Ampère atter fået styr på den uorden, som Ørsteds opdagelse havde skabt i den etablerede fysiks opfattelse af, at verden består af små enheder, der påvirker hinanden med centrale kræfter.

De elektromagnetiske fænomener kunne imidlertid også forstås på en helt anden måde.

Faraday og den elektromagnetiske induktion

På den anden side af Den Engelske Kanal hørte den selvlærte kemiker Michael Faraday også om elektromagnetismen. Men han kikkede først nærmere på fænomenet, da han i sommeren 1821 blev bedt om at skrive en oversigtsartikel over de eksperimenter og teorier, der var fremkommet siden Ørsteds opdagelse. Blandt de forskellige teorier fandt han Ampères mest overbevisende, selvom han ikke var begejstret for reduktionen af alle fænomener til centralkræfter.



Figur 2. I Steno Museets samling findes der en rekonstruktion af Faradays rotationsapparat fra 1821. Til venstre ses enden af en magnet, hvis ene pol er fæstnet til bunden af et glas med kviksølv, mens den anden pol kan bevæge sig frit omkring ledningen. Til højre er det ledningen, der kan bevæge sig omkring en fast monteret magnet. Rotationsapparatet var verdens første elektromotor. Foto: Lise Balsby, AU Foto.

Han var mere tiltrukket af Ørsteds idé om, at den elektromagnetiske virkning var noget, som foregik rundt

om ledningen. Den antagelse blev kraftigt styrket, da det lykkedes ham at få den ene ende af en magnet til at rotere omkring en strømførende ledning, jf. figur 2. For dermed havde Faraday eksperimentelt vist, at der er en cirkulær kraft omkring en strømførende leder – og opfundet den første elektromotor.

I 1831 kastede Faraday sig atter over elektromagnetismen, hvilket førte til opdagelsen af den elektromagnetiske induktion. I tiden op til opdagelsen havde Faraday studeret klangplader og set, hvordan svingninger i en plade kunne få sandskorn til lægge sig i særlige mønstre. En dynamisk bølgebevægelse kunne altså skabe statiske strukturer.

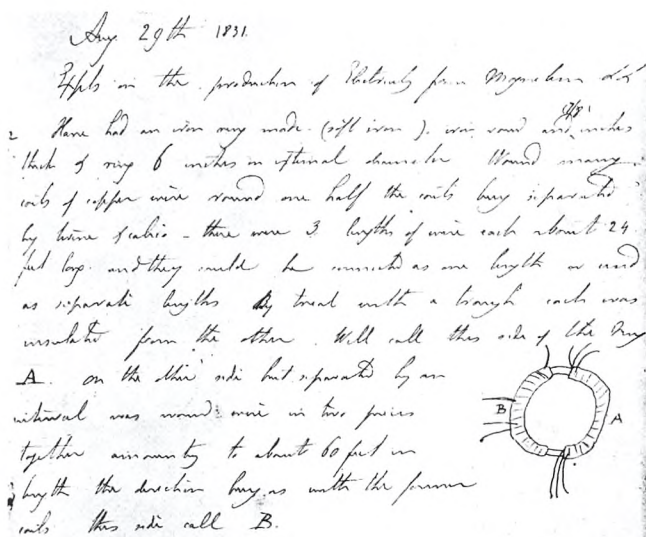


Figur 3. Faraday blev måske inspireret til opdagelsen af den elektromagnetiske induktion af såkaldte Chladni-mønstre svarende til det, forfatteren her har frembragt på en klangplade. Foto: Mary Marie Kromann.

Han var specielt fascineret af, at mønstre ved hjælp af resonans kunne dannes på én plade, ved at stryge på en tilsvarende plade i nærheden. Det gav ham den idé, at der måske blev dannet lignende magnetiske mønstre i en elektromagnet – og at de måske kunne påvirke en ledning i nærheden. For at undersøge det viklede han et par ledninger rundt om modsatte sider af en jernring (se figur 4) – og konstruerede derved verdens første transformator. Hans hypotese var, at når strømmen begyndte at flyde i den ene ledning, så ville der udbrede sig en slags magnetisk bølge gennem ringen og forårsage en eller anden elektrisk effekt på den modsatte side. Og ganske rigtigt: Da han sluttede ledningen på den ene side til et batteri, kom der udslag på det galvanometer, han havde forbundet til den anden ledning. Det samme skete, når han afbrød strømmen. Derimod var der ingen virkning, når strømmen var konstant. Der var altså tale om et dynamisk fænomen [5].

Faraday fortsatte sine eksperimenter og opdagede, at der også blev dannet forbigående strømme, når han bevægede en stangmagnet ind i og ud af en spole. Det var altså *ændring* af magnetismen, som forårsagede strømmen. Til at forklare, hvorfor der på denne måde blev induceret en elektrisk strøm, indførte Faraday begrebet magnetiske kurver. Dermed hentydede han til de linjer, som bliver synlige, når man drysser jernspåner på et stykke papir oven på en magnet. Han opfattede linjerne som en slags spændingslinjer i rummet omkring magneten. På baggrund af sine eksperimenter og denne idé om magnetiske kraftlinjer kunne Faraday nu

sammenfatte sin opdagelse i den lovmæssighed, at der i en leder, som skærer en magnetisk kurve, fremkaldes en kraft på tværs af bevægelsen, som driver en strøm igennem lederen.



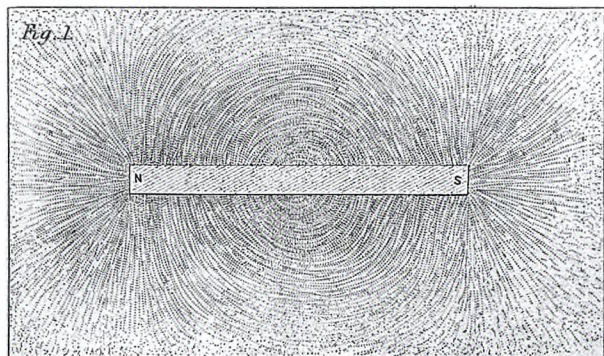
Figur 4. I sin dagbog beskrev Faraday grundigt den opstilling, hvormed han opdagede den elektromagnetiske induktion den 29. august 1831 [5].

Imponerende, at Faraday ikke blot opdagede induktionen, men med sine eksperimenter reelt opfandt både elektromotoren og dynamoen – og dermed i praksis lagde hovedhjørnестenen for vores moderne gennemelektrificerede samfund.

Feltbegrebets opståen

Med begrebet magnetisk kurve var Faraday også med til at etablere den forestilling om elektromagnetiske felter, som vi har i dag.

Oprindeligt var de magnetiske kurver nok primært et begrebmæssigt hjælpemiddel. Men med tiden begyndte Faraday at tillægge de magnetiske kraftlinjer, som han nu kaldte dem, mere og mere fysisk realitet. Efterhånden betragtede han kraftlinjerne som en selvstændig, veldefineret fysisk tilstand i rummet omkring en magnet eller en strømførende ledning, som var lige så essentiel som magneten eller ledningen selv.



Figur 5. Faradays illustration af, hvordan jernspåner gør de magnetiske kraftlinjer omkring en magnet synlige. Han mente, at kraftlinjerne var lige så reelle som magneten [6].

Denne opfattelse fik han yderligere bekræftet, da han i 1845 opdagede, at en lysstråles polarisationsplan blev

drejet, når den passerede gennem et stykke glas, som var anbragt imellem polerne på en kraftig elektromagnet. Han mente, at han derved havde magnetiseret lysstrålen og fået den til at illuminere de magnetiske kraftlinjer. Fra dette tidspunkt begyndte Faraday at bruge begrebet magnetfelt [7].

For Faraday var påvisningen af en forbindelse mellem lys og elektromagnetisme en bekræftelse af hans – og Ørstedes – romantiske enhedstanke om, at alle naturkræfter er forbundne og har en fælles oprindelse. Lys kunne påvirkes af magnetisme, der kunne omdannes til elektricitet, der kunne skabe kemiske reaktioner ved hjælp af elektrolyse og så videre.

Den elektromagnetiske induktion og fjernvirkningsteorierne

Faradays opdagelse af induktionen og ikke mindst hans rent kvalitative og billedlige forestilling om elektriske og magnetiske felter var en udfordring for de fysikere på kontinentet, som mente, at verden skulle forstås ud fra centrale fjernvirkningskræfter. Blandt dem var tyskeren Wilhelm Weber, som forsøgte at udvide Ampères teori til også at omfatte den elektromagnetiske induktion.

Weber tænkte overhovedet ikke i felter, men antog, at en elektrisk strøm består af modsat rettede strømninger af hhv. positive og negative elektriske partikler. Derfor mente han, at den kraft mellem strømelementer, som var beskrevet med Ampères kraftlov, måtte kunne udledes af den kraft, der virker mellem ladede partikler i bevægelse. Til det formål supplerede han Coulombs lov for kraften mellem ladede partikler med et led, som afhang af partiklernes indbyrdes hastighed ($\dot{r}$). Derudover tilføjede han et led, som tog højde for deres indbyrdes acceleration ($\ddot{r}$):

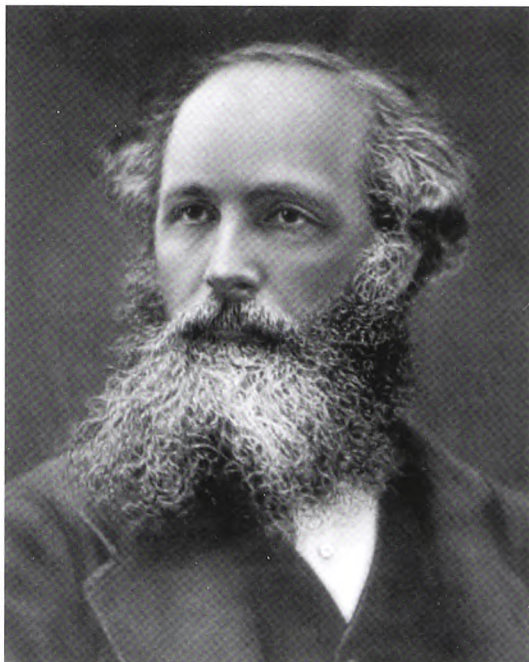
$$F_{12} = \frac{q_1 q_2 \hat{r}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left(1 - \frac{\dot{r}^2}{2c^2} + \frac{r\ddot{r}}{c^2} \right).$$

Ved hjælp af det sidste led kunne Weber også gøre rede for den elektromagnetiske induktion. På denne måde forenede han i 1846 elektrostikken og de to grundlæggende elektrodynamiske love i en og samme kraftlov. I de følgende årtier udvidede Weber og andre tyske fysikere teorien til også at kunne forklare visse nyopdagede elektromagnetiske fænomener. Fx videreudviklede Carl Neumann i 1858 Webers kraftlov, så den også kunne forklare den magnetiske drejning af lysets polarisation, som Faraday havde opdaget.

Selvom teorierne var matematisk komplicerede, var det en stor tilfredsstillelse for mange fysikere, at Webers kraftlov med passende antagelser og tilføjelser kunne forklare alle elektriske og magnetiske fænomener, ligesom Newtons gravitationslov forklarede planeternes bevægelse.

Maxwells elektromagnetiske lysteori

En væsentlig årsag til, at Faradays idéer om elektriske og magnetiske kraftlinjer ikke blev anerkendt, endsize brugt af fysikerne på kontinentet, er givetvis, at han aldrig havde lært matematik og derfor ikke var i stand til at fremføre sine idéer i en matematisk formulering.



Figur 6. James Clerk Maxwell (1831–1879) var den nok mest betydningsfulde teoretiske fysiker i det 19. århundrede. Han arbejdede bl.a. med gasteori, termodynamik, statistisk mekanik og udviklede den endegyldige teori for elektromagnetismen. På grund af dens betydning for udviklingen af relativitetsteorien mente Einstein, at Maxwells forståelse af feltbegrebet er, "det dybeste og mest frugtbare, fysikken har oplevet siden Newtons tid".

Det var der imidlertid andre britiske fysikere, som evnede. Den vigtigste var den unge skotte James Clerk Maxwell. For at kunne håndtere kraftlinjerne matematisk forestillede han sig en mekanisk analogi i form af en usammentrykkelig væske, der strømmede i et porøst medium. Så hvor Faraday havde tænkt på nogle diskrete kraftlinjer som tråde i rummet, forestillede Maxwell sig en kontinuert substans, som i ethvert punkt i rummet havde en vis strømningshastighed svarende til styrken af den elektriske eller magnetiske kraft lige der. Ud fra bevægelsesligningerne for sådanne væskestrømme, lykkedes det ham i 1855 i artiklen "On Faraday's lines of force" at udlede formler for alle statiske elektriske og magnetiske fænomener, som svarede til fjernvirkningsteoriernes udtryk. Ja, han kunne endda gøre rede for nogle effekter ved overgangen mellem forskellige materialer, som ikke kunne forklares med fjernvirkningsteoriene. På denne måde havde Maxwell transformeret Faradays uhåndgribelige kraftlinjer til et matematisk håndterbart feltbegreb, om end kun for statiske felter [8].

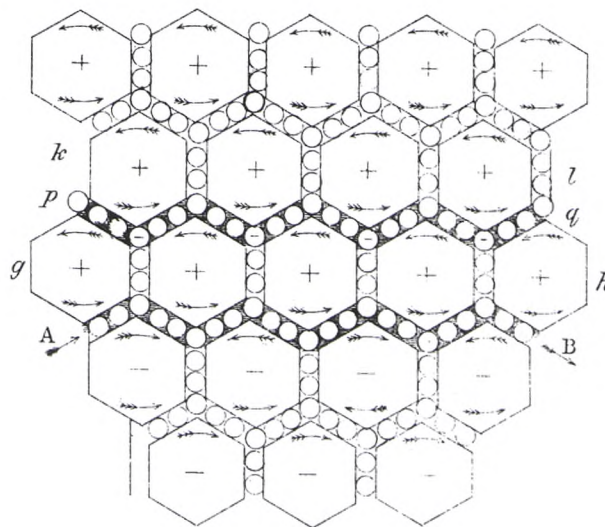
Det blev fysikeren William Thomson, den senere Lord Kelvin, som i 1856 fremsatte en idé, som gjorde det muligt for Maxwell at inkludere dynamiske fænomener, fx induktion, i sin feltteori. Thomson prøvede at forestille sig, hvordan de elektriske og magnetiske kraftlinjer manifesterede sig i den såkaldte æter, som var det hypotetiske, altgennemtrængende medium, som lys mentes at udbrede sig i. Hans idé var, at æteren bestod af nogle mikroskopiske dele, som roterede omkring de magnetiske feltlinjer. Han argumenterede derefter for, at disse hvirvler i æteren kunne påvirke lysbølger, som passerede dem. På den måde kunne han forklare den

drejning af lysets polarisationsplan, som Faraday havde observeret.

På baggrund af Thomsons hvirvelhypotese gik Maxwell i gang med at opstille en detaljeret mekanisk model for æteren, hvori felterne kunne opfattes som spændings- eller bevægelsestilstande:

Jeg foreslår nu at undersøge magnetiske fænomener fra et mekanisk synspunkt og at bestemme hvilke spændinger i eller bevægelser af et medium, der er i stand til at frembringe de observerede mekaniske fænomener. Hvis vi med denne hypotese kan forbinde magnetisk tiltrækning med elektromagnetiske fænomener såvel som inducerede strømme, vil vi have fundet en teori, som, hvis den ikke er sand, kun kan modbevises af eksperimenter, som i høj grad vil forøge vores viden om denne del af fysikken [9, Part I, 162].

Helt konkret forestillede Maxwell sig, at æteren bestod af nogle mikroskopiske celler, som kunne rotere, samt nogle endnu mindre partikler mellem cellerne, som kunne rulle (ligesom kuglerne i et kugleleje) og derved tillade naboceller at rotere samme vej. Cellernes rotation svarede til magnetfelter langs med rotationsaksen, mens partiklernes forskydning svarede til en elektrisk strøm. Tilsvarende repræsenterede cellernes massetæthed, μ , den magnetiske permeabilitet. Han lod altså mekaniske fænomener repræsentere elektriske eller magnetiske fænomener.



Figur 7. Maxwells illustration af den mekaniske hvirvelmodel for æteren. [9, Part II, Pl. V].

Ved hjælp af en stringent matematisk beskrivelse af de mekaniske relationer i æteren kunne Maxwell nu simulere alle de elektriske og magnetiske fænomener, som Ørsted, Ampère og Faraday m.fl. havde opdaget.

For også at kunne gøre rede for isolatorers egenskaber fandt Maxwell på at tildele den mekaniske ætermodel elasticitet, hvilket han gjorde ved at indføre en elasticitetskonstant ϵ . I den elektromagnetiske analogi af modellen svarede ϵ til permittiviteten. Tilføjelsen

af elasticitet til modellen havde overraskende konsekvenser. Hidtil havde de små partikler, som svarede til en elektrisk strøm, kun kunnet bevæge sig ved at cellerne roterede, men hvis cellerne var elastiske, kunne partiklerne også bevæges ved at deformere cellerne. Denne forskydning af partiklerne, som svarede til en strøm, gav dermed anledning til et ekstra bidrag til Ampères lov. Det er således de fysiske egenskaber ved Maxwells mekaniske ætermodel, som leder ham til den korrekte erkendelse af den såkaldte forskydningsstrøm. Med tilføjelsen af den kunne modellen forklare alle kendte elektromagnetiske fænomener.

Hvirvelmodellen rummede imidlertid en endnu større overraskelse. Fra den mekaniske fysik vidste Maxwell, at der i et elastisk medium kan udbrede sig en transversal bølge, hvis udbredelseshastighed er bestemt af mediets elasticitet og massetæthed:

$$v = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon\mu}}.$$

Disse to størrelser svarede som nævnt til permittiviteten og den magnetiske permeabilitet, og da begge disse størrelser for nyligt var blevet bestemt eksperimentelt, kunne han nemt beregne, hvor hurtigt en transversal bølge ville udbrede sig i æteren. Det gav en værdi, som lå meget tæt på lysets hastighed. Derfor var Maxwell nødt til at konkludere, at

Hastigheden af transversale bølgebevægelser i vort hypotetiske medium, beregnet fra d'Hr. Kohlrausch og Webers elektromagnetiske eksperimenter, stemmer så nøjagtigt overens med lysets hastighed, beregnet fra Hr. Fizeaus optiske eksperimenter, at vi næppe kan undgå den slutning, at *lyset består i transversale bølgebevægelser af det samme medium, som er årsagen til de elektriske og magnetiske fænomener* (Maxwells kursivering) [9, Part III, 22].

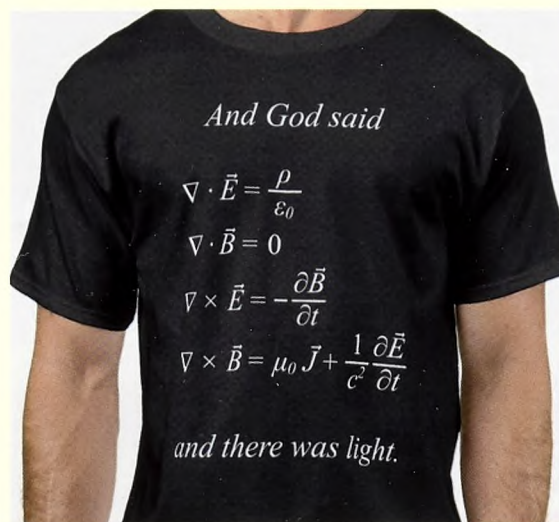
Maxwell præsenterede sin ætermodel og de deraf følgende resultater i artiklen "On Physical Lines of Force", som udkom i fire dele i 1861–62 [10]. Denne artikel regnes af mange blandt de mest betydningsfulde i fysikkens historie. Ud over erkendelsen af lys som et elektromagnetisk fænomen præsenterede artiklen også den første formulering af de relationer, som vi i dag kalder Maxwells ligninger. De var ganske vist spredt ud over artiklen, men gav ikke desto mindre Faradays billedlige feltbegreb en konsistent matematisk formulering, som indledte en helt ny æra i den klassiske elektrodynamik.

Maxwells ligninger

Maxwell hvilede ikke på laurbærerne, men blev ved med at forbedre sine elektromagnetiske teorier. Specielt ville han gerne undgå at gøre sig så konkrete forestillinger om, hvordan æteren var indrettet. Derfor begyndte han forfra og reformulerede hele teorien ved hjælp af Lagranges generaliserede mekanik. Det tillod ham at opstille bevægelsesligningerne for ætermodellen, uden

Maxwells ligninger

Maxwells ligninger er ikke blot centrale for forståelsen af elektromagnetismen. De er også blandt de få ligninger, som er vidt udbredt på t-shirts og kaffekopper.



Her ses de i moderne vektornotation. Den første ligning kaldes også Gauss' lov og udtrykker sammenhængen mellem et elektrisk felt ($\mathbf{E}$) og den elektriske ladning (ρ), der skaber det. Coulombs kraftlov kan udledes af denne ligning.

Den anden ligning kaldes Gauss' lov for magnetisme. Den udtrykker, at der ikke findes magnetiske ladninger, også kaldet magnetiske monopoler.

Den tredje ligning udtrykker Faradays induktionslov, idet den viser, at et magnetfelt ($\mathbf{B}$), som varierer over tid, skaber et elektrisk felt.

Den fjerde og sidste ligning viser, at et magnetfelt kan skabes på to måder: enten af en elektrisk strøm ($\mathbf{J}$), som Ampère sagde, eller ved at et elektrisk felt varierer over tid, hvilket skaber den såkaldte forskydningsstrøm, som Maxwell tilføjede.

Symmetrien i de to nederste ligninger giver mulighed for elektromagnetiske bølger: et varierende magnetfelt skaber et elektrisk felt og vice versa. Disse bølger udbreder sig med lysets hastighed, c , da de elektriske og magnetiske naturkonstanter ϵ_0 og μ_0 kan kombineres til at give lyshastigheden.

at han behøvede et detaljeret kendskab til de mekaniske koblinger mellem æterens dele. Derved kunne han flytte fokus fra de mekaniske analogier til felterne i sig selv i beskrivelsen af de elektromagnetiske fænomener.

De nye resultater blev publiceret i 1865 i den lange artikel "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", som bestod af hele syv dele [11; 12]. I tredje del, "General Equations of the Electromagnetic Field", præsenterede Maxwell teoriens 20 grundligninger i en

matematisk form, som minder om det, vi i dag kender som Maxwells ligninger.

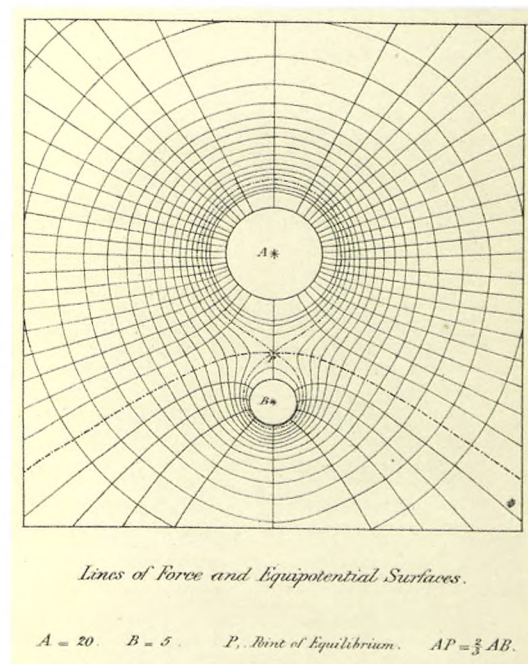
Her vil nogle læsere måske tænke, at det er alt for mange ligninger. Forklaringen på det høje antal er dels, at Maxwell havde separeret led, som i dag er integreret i én ligning, dels og især – at Maxwell ikke kendte den moderne vektornotation og derfor behandlede de tre rumlige koordinater hver for sig. Den moderne formulering af Maxwells ligninger i form af fire vektorielle differentiaalligninger blev foretaget af den engelske ingeniør og fysiker Oliver Heaviside i 1884.

Det er også i 1865-artiklen, at Maxwell bruger sin tilføjelse til Ampères kredsløbslov, forskydningsstrømmen, til at udlede den elektromagnetiske bølgeligning. Den overbeviser ham endegyldigt om, at lys er elektromagnetiske bølger, som udbreder sig i æteren med lysets hastighed:

... det ser ud til, at vi har stærk grund til at konkludere, at lys (inklusive strålevarme og anden form for stråling, hvis den findes) er en elektromagnetisk forstyrrelse i form af bølger, der forplanter sig gennem det elektromagnetiske felt i henhold til de elektromagnetiske love [13].

Ligesom Ørsted med sin opdagelse havde forenet elektricitet og magnetisme til ét samlet fænomen, havde Maxwell med sin teori et halvt århundrede senere forenet elektrodynamikken og optikken. Det var en monumental triumf, for med identifikationen af lys som elektromagnetisk stråling, havde Maxwell givet et solidt fysisk grundlag for bølgeteorien for lys, som kunne redegøre for fænomener som refleksion, brydning og polarisation. Med sin påstand om, at elektromagnetiske kræfter udbreder sig med en endelig hastighed, var Maxwells teori ydermere et stærkt argument imod fjernvirkningsteoriene med deres påstand om øjeblikkeligt virkende kræfter.

En oversigtsartikel som denne giver desværre kun plads til at skitsere udviklingens hovedlinjer. Det skal dog nævnes, at der i elektromagnetismens "uvejsomme ørken" også fremkom teorier, som ikke byggede på nogen af de ovennævnte positioner. Eksempelvis publicerede den danske fysiker Ludvig Lorenz i 1867 en elektromagnetisk lysteori, som hverken var baseret på fjernvirkningskræfter, feltbegrebet eller æteren, som han betragtede som en både uvidenskabelig og unødvendig ad hoc hypotese. I stedet tog han udgangspunkt i de elektriske og magnetiske potentialer fra hhv. ladninger og strømme. Herunder introducerede han begrebet retarderede potentialer for at tage højde for, at ændringer i potentialet bruger tid til at udbrede sig. Desuden antog han, at lysets svingninger var en form for elektriske strømme i det (næsten) tomme rum. På dette grundlag udviklede han – uden at kende Maxwells teori – en elektrodynamisk lysteori, som var matematisk ækvivalent med Maxwells, selvom dens fysiske grundlag var et helt andet. Lorenz' teori var kendt blandt fagfolk, men vandt aldrig indpas. Den såkaldte Lorenz gauge-betingelse, som han indførte, bruges dog stadig i avanceret elektrodynamik [14].



Figur 8. Maxwell videreudviklede og samlede alle sine elektromagnetiske teorier i tobindsværket *A Treatise on Electricity and Magnetism* fra 1873. Heri gav han blandt meget andet eksempler på kraftlinjer og ækvipotentiaflader omkring forskellige ladningskonfigurationer [15].

Den elektromagnetiske feltteoris gennembrud

I flere årtier var de elektromagnetiske bølger blot et teoretisk postulat, og det tog ganske lang tid, inden Maxwells feltteori slog igennem. Det skyldtes bl.a., at feltbegrebet var meget fremmedartet for mange klassisk skolede fysikere. Men i 1890'erne formåede den tyske fysiker Heinrich Hertz at påvise elektromagnetiske bølger eksperimentelt. Det bidrog til fysikernes udbredte accept af Maxwells ligninger. Påvisningen af de elektromagnetiske bølger førte også hurtigt til opfindelsen af den trådløse telegraf og senere radioen.

Det ændrede dog ikke på, at fysikerne stod med to stærke og fuldstændig forskellige teorier om elektromagnetismen: Webers teori, der indeholdt elektriske partikler, men ingen felter, og Maxwells teori, der indeholdt felter, men ingen elektriske partikler.

De kontinentale tilhængerne af Webers teori anførte, at den gav et klart billede af elektrisk ladning og strøm som hhv. ophobning og bevægelse af elektriske partikler. De britiske modstandere af teorien havde derimod svært ved at acceptere postulatet om kræfter, som virkede over afstand gennem et tomt og passivt rum. Tilsvarende havde de kontinentale fysikere svært ved at forlige sig med Maxwells udstrakte felter, der var fyldt med "elektricitet", som oven i købet kunne forskydes gennem æteren.

Det tilsyneladende paradoks mellem de to anskuesformer blev løst af den hollandske fysiker Hendrik A. Lorentz, der i 1890'erne udviklede en elektronteori, som han kombinerede med Maxwells feltteori. Derved blev det muligt at opfatte ladede partikler som kilder til felterne. Tilsvarende kunne felterne udøve en kraft på partiklerne. På denne måde kunne han integrere partikel- og feltperspektivet.

Kelvins to skyer

Selvom Maxwell i udviklingen af sin elektromagnetiske feltteori bevægede sig stadig længere væk fra konkrete forestillinger om æterens beskaffenhed, forlod han aldrig idéen om, at lyset nødvendigvis måtte udbrede sig i et eller andet.

Men æteren var en ubekvem substans, som fysikerne mod slutningen af 1800-tallet fik stadig vanskeligere ved at beskrive [16]. Efterhånden som de afslørede nye aspekter af naturen, var de gang på gang nødt til at justere æterens påståede egenskaber for at lave konsistente beskrivelser. Og flere af de nødvendige egenskaber var direkte selvmodsigende. Fx måtte æteren være en masseløs væske uden viskositet for ikke at bremse legemer, som bevægede sig i den, til eksempel Jorden og alt derpå. Samtidig vidste man, at transversale bølger, som lysbølger jo er, kun kan eksistere i faste stoffer. Ja, æteren var endda nødt til at være meget stivere end stål for at understøtte lysbølgenes høje frekvenser. Den skulle også være fuldstændig gennemsigtig, siden lyset fra selv de fjerneste stjerner ikke blev dæmpet – og sådan kunne man blive ved.

Det var endvidere en forudsætning for Maxwells ligninger, at æteren udgjorde en fast universel referenceramme. Derfor burde det være muligt at måle Jordens bevægelse igennem æteren, men det var aldrig lykkedes trods mange forsøg. Her kan specielt nævnes det berømte interferenseksperiment fra 1887, hvor Albert A. Michelson og Edward W. Morley ikke kunne måle nogen forskel i hastigheden af lysstråler som bevægede sig hhv. på tværs af og langs med Jordens bevægelse gennem æteren.

Problemet var så stort, at William Thomson – som nu var adlet til Lord Kelvin – i 1900 identificerede æteren som det ene af fysikkens to største problemer på det tidspunkt:

Skønheden og klarheden af den dynamiske teori, der betragter varme og lys som bevægelsesformer, er i øjeblikket sløret af to skyer. Den første opstod med bølge teorien for lys [...]; det involverede spørgsmålet om, hvordan Jorden kunne bevæge sig gennem et elastisk fast stof, sådan som lysæteren blev antaget at være? Den anden er Maxwell-Boltzmann-doktrinen om fordelingen af energi [17].

Efter at have diskuteret forskellige utilstrækkelige løsninger på æterproblemet konkluderede Kelvin tørt, at "Jeg er bange for, at vi fremdeles må betragte den første sky som meget tæt."

Einstein "afskaffer" æteren

Skyen blev først opløst i 1905, da Albert Einstein udgav sin epokegørende artikel "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", hvori han fremsatte den specielle relativitetsteori [18]. Ud over æterproblemet tog han, som titlen antyder, udgangspunkt i det forhold, at Maxwells feltteori førte til utilfredsstillende asymmetriske beskrivelser i forbindelse med bevægede legemer. Han nævner

således, at den detaljerede fysiske beskrivelse af, hvad der sker, når en ledning og en magnet bevæges i forhold til hinanden, afhænger af, om den ene eller den anden er i hvile, selvom den observerede virkning udelukkende afhænger af deres relative bevægelse.

Men Einstein var af den dybe overbevisning, at de fysiske love måtte have samme form i ethvert bevægelsessystem. Derudover antog han, at lyset i det tomme rum altid udbreder sig med en ganske bestemt hastighed uanset lyskildens hastighed. Uden at komme nærmere ind på hans argumentation her, førte disse antagelser til en erkendelse af, at lysæteren slet ikke var nødvendig for at konstruere en enkel og konsistent elektrodynamisk teori for bevægelige legemer på grundlag af den Maxwellske teori for legemer i hvile.

Populært sagt "afskaffede" Einstein altså den æter, som var udgangspunktet for Maxwells elektrodynamiske feltteori. Det varede dog længe, før den forsvandt fra fysikken. Men han afskaffede på ingen måde det feltteoretiske begrebsapparat. Tværtimod blev det en helt nødvendig forudsætning for hans bestræbelser i de følgende år på at inkludere gravitationen i relativitetsteorien. Det førte i 1915 til den generelle relativitetsteori, hvor Einstein også "afskaffede" tyngdekraften som en fjernvirkningskraft, der på besynderlig vis kan virke gennem et passivt rum. I stedet skabte han en feltteori, hvori en masse krummer rumtiden omkring sig og derved skaber et gravitationsfelt, som vekselvirker med enhver anden masse, som befinder sig i det.

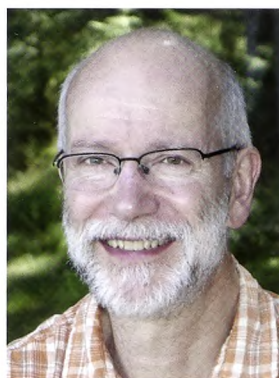
Einstein var meget bevidst om sin inspiration og lagde ikke skjul på, at han stod mere i gæld til Maxwell end til nogen anden, ganske enkelt fordi han med sin feltteori ændrede fysikkens syn på verden. Indtil da, havde man ikke kunnet forestille sig andet end mekaniske forklaringer på alle fænomener.

Så kom den store forandring, som til alle tider vil være forbundet med navnene Faraday, Maxwell og Hertz. Men hovedæren for denne revolution tilfaldt Maxwell. Han viste, at alt det, man dengang vidste om lys og elektromagnetiske fænomener, kom til udtryk i hans velkendte dobbeltsystem af differentialligninger, hvor de elektriske og magnetiske felter optræder som de afhængige variable. Maxwell forsøgte faktisk at forklare eller retfærdiggøre disse ligninger med intellektuelle konstruktioner. Men [...] ligningerne i sig selv fremstod som det væsentlige og felternes styrke som de basale størrelser, der ikke kan reduceres til noget andet [19].

Denne udvikling betød, at laplacionernes forestilling om, at verden består af partikler, som på uforklarlig vis påvirker hinanden på afstand, ikke kunne opretholdes. I stedet indførte Maxwell med sine feltteorier idéen om, at verdens fysiske realitet kan repræsenteres af kontinuerte felter, som ikke kan forklares mekanisk, men beskrives fuldstændigt med partielle differentialligninger. En idé som siden har vist sig uhyre effektiv til at beskrive materien og kræfterne i verden.

Litteratur

- [1] Han brugte udtrykket “unwegsamen Wüste” jf. H. Helmholtz (1894) “Vorwort” i H. Hertz, *Prinzipien der Mechanik*, Barth.
- [2] En god oversigt kan findes i O. Knudsen (1987) *Elektromagnetisme 1820–1900*, Steno Museets Venner.
- [3] A. Assis og J.P. Chaib (2015) *Ampère’s Electrodynamics*, Apeiron.
- [4] A. Skaar Jacobsen (2019) “Den første udforskning af elektromagnetismen: Ørsted og Ampère”, *Kvant*, bind 30, nr. 4, side 20–25.
- [5] L. Pearce Williams (1965) *Michael Faraday. A Biography*, Chapman and Hall.
- [6] M. Faraday (1852) “Experimental Researches in Electricity. – Twenty-Ninth Series”, *Philosophical Transactions*, bind 142, Plate IX.
- [7] L. Pearce Williams (1966) *The Origins of Field Theory*, Random House.
- [8] B. Mahon (2003) *The Man Who Changed Everything: The Life of James Clerk Maxwell*, Wiley.
- [9] J.C. Maxwell (1861–62) “On Physical Lines of Force”, *Philosophical Magazine*, bind 21 og 23.
- [10] Artiklen kan ses på https://en.wikisource.org/w/index.php?title=On_Physical_Lines_of_Force&oldid=2412587.
- [11] M. Longair (2015) “... a paper ... I hold to be great guns’: a commentary on Maxwell (1865) ‘A dynamical theory of the electromagnetic field’ ”, *Philosophical Transactions*, bind A 373, side 20140473.
- [12] Artiklen kan ses på https://en.wikisource.org/w/index.php?title=A_Dynamical_Theory_of_the_Electromagnetic_Field&oldid=11356624.
- [13] J.C. Maxwell (1865) “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”, *Philosophical Transactions*, bind 155, side 466.
- [14] H. Kragh (2018) “Ludvig Lorenz and His Non-Maxwellian Electrical Theory of Light”, *Phys. Perspect.*, bind 20, side 221–253.
- [15] J.C. Maxwell (1873) *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press.
- [16] B.G. Doran (1975) “Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth-Century Britain: From the Mechanical to the Electromagnetic View of Nature”, *Historical Studies in the Physical Sciences*, bind 6, side 133–260.
- [17] O. Passon (2021) “Kelvin’s clouds”, *American Journal of Physics*, bind 89, side 1037.
- [18] A. Einstein (1905) “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Annalen der Physik*, bind 17, side 891–921.
- [19] Albert Einstein (1934) “Clerk Maxwell’s Influence on the Evolution of the Idea of Physical Reality”, *Essays in Science*, Philosophical Library, side 43.



Hans Buhl er cand.scient. i musik og fysik samt ph.d. i teknologihistorie. Han arbejder som museumsinspektør for videnskabshistorie ved Steno Museet, som er en del af Science Museerne ved Aarhus Universitet.

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

Nyt fra Astronomisk Selskab



Den årlige generalforsamling i Astronomisk Selskab afholdes lørdag den 2. april 2022 kl. 11.00 i Niels Bohr Bygningen, Rådmandsgade 60, 2200 København.

Program:

Kl. 11.00–11.45: Foredrag om *Altings Endeligt* ved Jophiel Wiis
 Kl. 11.45–12.30: Frokost (Sandwich)
 Kl. 12.30–13.30: Generalforsamling

Tilmelding:

Alle medlemmer kan deltage i generalforsamlingen, men man bedes tilmelde sig senest fredag den 1. april 2022 inden kl. 12 via mail til Christina Toldbo på christina.toldbo@astronomisk.dk med “GF 2022” i emnefeltet. Har man allergier/ønsker i forbindelse med sandwich bedes dette oplyst i samme omgang.

Magnetiske monopoler i spin is

Bernhard Lind Schistad, Midtbyens Gymnasium, Mercantec

I klassisk elektromagnetisme findes der ingen magnetisk ladning. Dette udtrykkes i Maxwells ligninger ved at magnetfeltet er divergensfrit. Derfor har alle magneter to poler; der findes ikke magnetiske monopoler. Men i 1931 opdagede Paul A.M. Dirac, at Maxwells ligninger kunne gives en meget smuk symmetrisk form, hvis han introducerede begrebet magnetisk ladning. Ovenikøbet ville dette forklare, hvorfor elektrisk ladning er kvantiseret. Der findes også kosmologiske argumenter for eksistensen af magnetiske monopoler. Men hidtil har ingen observeret en magnetisk monopol og den har været henvist til fysikkens raritetskabinet som "Fysikkens enhjørning". Men for nylig har man observeret monopollignende strukturer i en magnetisk substans som kaldes spin is. Dette er ikke helt det samme som Diracs monopoler, men de opfører sig som magneter med kun en pol.

I klassisk elektromagnetisme findes der ingen magnetisk ladning. Alle magnetiske feltlinjer er lukkede kurver uden en begyndelse eller slutning. Matematisk er dette udtrykt i Gauss' lov for magnetisme, som er en af de fire Maxwell-ligninger:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1)$$

(hvor $\mathbf{B}$ er den magnetiske flukstæthed).

Det elektriske felt derimod udgår altid fra en elektrisk ladning, hvoraf der findes to slags (+ og -). Den tilsvarende ligning for det elektriske felt er:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon_0} \quad (2)$$

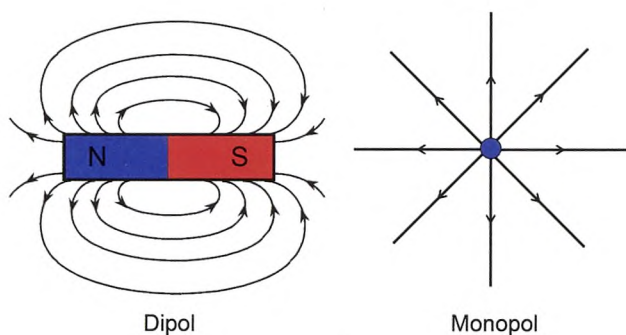
(hvor $\mathbf{E}$ er den elektriske feltstyrke, ρ_e er den elektriske ladningstæthed og ϵ_0 er permitiviteten for vakuum).

Hvis der derimod fandtes magnetisk ladning, ville feltet udgå radiale fra den magnetiske ladning, hvoraf der måtte findes to slags (nordpol og sydpol). I så fald ville Gauss' lov for magnetisme blive fuldstændig analog med den elektriske:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \mu_0 \rho_m \quad (3)$$

(hvor ρ_m er den magnetiske ladningstæthed og μ_0 er permeabiliteten for vakuum).

En sådan magnetisk ladning hvorfra magnetfeltet udgår radiale kaldes en magnetisk monopol. Magnetfeltet fra en magnetisk dipol og monopol er vist på figur 1.



Figur 1. Feltet fra en magnetisk dipol og monopol.

Den tredje af Maxwells ligninger (Faradays lov) kan også formuleres til at tage højde for magnetisk ladning:

$$-\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}_m \quad (4)$$

(hvor $\mathbf{J}_m$ er den magnetiske strøm).

Den fjerde Maxwell ligning (Ampères lov) påvirkes ikke af magnetisk ladning:

$$-\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}_e \quad (5)$$

(hvor $\mathbf{J}_e$ er den elektriske strøm).

Vi ser, at hvis der findes magnetisk ladning (magnetiske monopoler), så bliver Maxwells ligninger smukt symmetriske mellem det elektriske og det magnetiske felt.

Kvantisering af ladning

I 1931 gik det op for den engelske fysiker Paul A.M. Dirac, at der er en sammenhæng mellem Maxwells ligninger og kvantisering af elektrisk ladning under forudsætning af, at der findes magnetiske monopoler [1].

Dirac spekulerede over, hvorfor den elektriske ladning vi finder i naturen altid er et helt multiplum af en elementærladning. Han opdagede, at hvis der findes magnetiske monopoler må den elektriske ladning være kvantiseret. Faktisk er det nok, hvis der findes en enkelt monopol i hele universet. Dirac kunne vise, at hvis den magnetiske monopol har magnetisk ladning q_m , må den elektriske ladning q_e opfylde betingelsen:

$$q_e q_m = \frac{n \hbar c}{2}, \quad (6)$$

hvor n er et heltal og $\hbar$ er Plancks konstant. I SI-systemet ville enheden for magnetisk ladning være Am (Ampere meter).

Vi kan udlede denne formel på en lidt simplere måde end Dirac selv gjorde ved at anvende kvantisering af impulsmomentet. Vi vil betragte et system bestående af en stationær elektrisk ladning q_e og en stationær magnetisk ladning q_m separeret af en endelig afstand (en såkaldt Thomsondipol). Ifølge klassisk elektromagnetisk teori

har dette system en elektromagnetisk impulsmomentdensitet givet ved Poyntings vektor:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}. \quad (7)$$

Når vi integrerer op over rummet, giver dette et totalt elektromagnetisk impulsmoment for vores system på:

$$L = \frac{q_e q_m}{c}. \quad (8)$$

Men ifølge kvantemekanikken er impulsmoment kvantiseret således at:

$$L = n \frac{\hbar}{2}. \quad (9)$$

Derfor må

$$\frac{q_e q_m}{c} = n \frac{\hbar}{2}. \quad (10)$$

Dette giver Diracs kvantiseringsbetingelse for elektrisk ladning:

$$q_e q_m = \frac{n \hbar c}{2}. \quad (11)$$

Det er altså nok, hvis der findes en magnetisk monopol i universet, så må elektrisk ladning være kvantiseret.

Siden Diracs forudsigelse har man ledt efter en elementarpartikel, som er en magnetisk monopol. I princippet er en sådan partikel nem at detektere. Hvis en almindelig dipolmagnet løber igennem en spole, vil den ikke inducere nogen nettostrøm. Strømmen vil løbe den ene vej, når magneten nærmer sig, og den modsatte vej, når den fjerner sig. En magnetisk monopol, derimod vil give en nettostrøm i spolen. Hvis spolen er superledende, vil selv en enkelt magnetisk monopol kunne starte en vedvarende strøm. Man har søgt efter monopoler både i kosmisk stråling og ved acceleratorforsøg. Men hidtil har al søgen været forgæves. Rigtignok har mange forskergrupper rapporteret, at de har detekteret en magnetisk monopol, men hver gang har det vist sig, at observationerne har kunnet forklares med mindre eksotiske fænomener. Vi kan derfor betragte magnetiske monopoler som fysikkens enhjørning:

Den eksisterer i mytologien, men ingen har set den.

Magnetiske monopoler i kosmologien

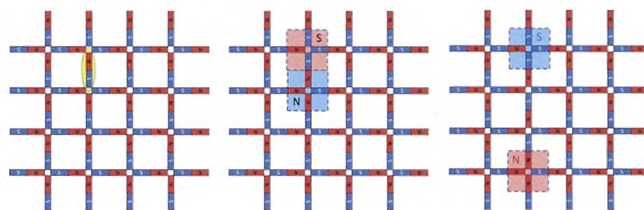
I kosmologien kan manglende observation af monopoler udgøre et problem. I flere teorier, for eksempel GUT (Grand Unified Theories, hvor den stærke vekselvirkning forenes med den elektromagnetiske og svage vekselvirkning ved ekstremt høje energier), vil der produceres et stort antal monopoler i det meget tidlige og ekstremt varme univers [2]. Disse monopoler skulle være meget stabile og ville have været en hovedbestanddel af det nuværende univers. Manglen på observationer i det nuværende univers medfører stærke restriktioner på densiteten af monopoler i det tidlige univers. Dette er medvirkende til, at disse teorier ikke er alment accepterede.

Tilhængere af disse eksotiske teorier argumenterer med, at densiteten af monopoler blev dramatisk reduceret i universets inflationsfase, hvor universet udvidede

sig med over 40 størrelsesordener. Dette har været anført som et "bevis" på, at inflationen virkelig har fundet sted. Men det er ikke et stærkt argument, at fraværet af hypotetiske partikler skyldes en hypotetisk fortynding ved en inflation, som vi ikke har nogen god teori for.

Inducerede monopoler

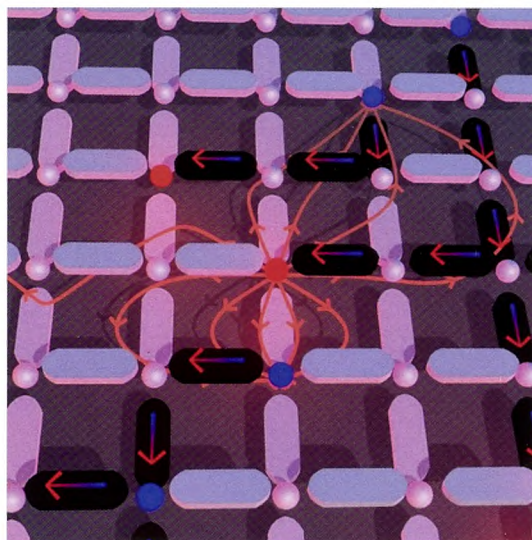
Selv om vi ikke kan skabe elementarpartikler, som er magnetiske monopoler, kan vi godt skabe noget, der opfører sig som monopoler. For at forklare princippet ser vi på et simpelt todimensionalt gitter af magneter. Vi kan forestille os, at de er normale stavmagneter (se figur 2). Dette system vil have den laveste energi, når der i hvert knudepunkt er to nordpoler og to sydpoler. I hvert knudepunkt er der et magnetfelt tæt på enden af stavmagneterne, men der stråler ikke noget magnetfelt ud i rummet fra knudepunktet.



Figur 2. Inducerede monopoler i magnetisk gitter.

Vi flipper nu en enkelt stavmagnet (markeret med gult i figuren til venstre). For at gøre dette skal vi tilføre en lille smule energi. Efter at magneten er vendt, har vi skabt to knudepunkter, som har overskud af henholdsvis nordpol N og sydpol S. De to knudepunkter er markeret i figuren i midten. Det ser ud til, at vi har skabt magnetisk ladning af type N og S i de to knudepunkter. Vi kan flytte en sådan magnetisk ladning uden at tilføre energi ved at flippe stavmagneten tilbage og i stedet flippe den næste magnet i gitteret (figuren til højre). Vi har nu flyttet den ene magnetiske ladning. Hvis vi bliver ved med at gøre det, har vi skabt en magnetisk strøm.

Hvis vi ser på magnetfeltet fra en sådan "magnetisk ladning" i tre dimensioner, ser vi at det ligner feltet fra en magnetisk monopol (figur 3).



Figur 3. Magnetfelt fra monopol-knudepunkt.

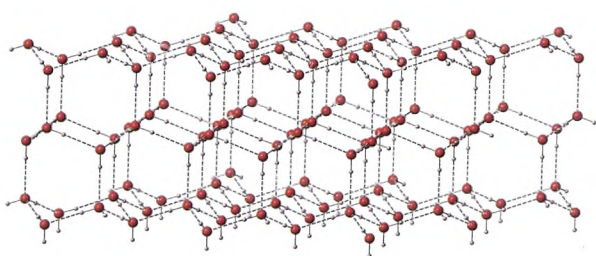
Ved at vende en enkelt stavmagnet i et sådant gitter har vi skabt et knudepunkt som opfører sig som en magnetisk monopol. Vi skal kun tilføre energi, når vi flipper den første magnet, men hvis vi kan koordinere at flippe magneterne parvis, kan vi flytte den magnetiske ladning og skabe en magnetisk strøm uden at tilføre yderligere energi.

Vi har skabt en magnetisk monopol i gitteret, men vi kan ikke få den ud af gitteret. Vi har derfor induceret en monopol, men ikke skabt nogen ny elementarpartikel.

Disse inducerede monopoler er ikke det samme som dem, Dirac foreslog i sin teori. Det er derfor ikke rumvæseners leg med stavmagneter som har medført, at elektrisk ladning er kvantificeret i universet.

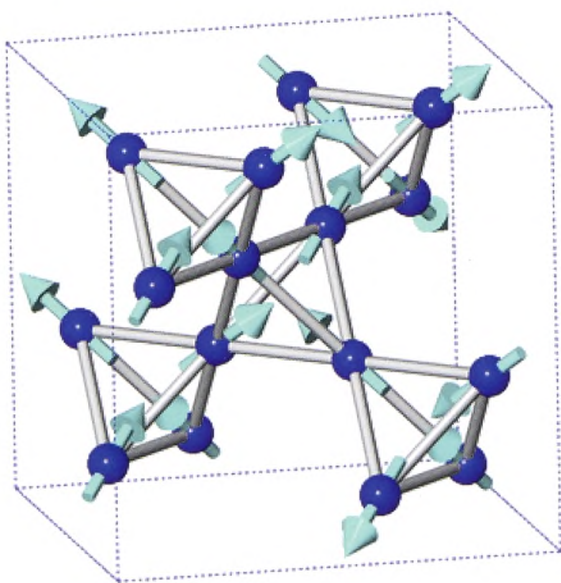
Spin is

I is sidder vandmolekylerne i et krystalgitter hvor iltatomerne danner hjørnerne i et tetraeder (figur 4).



Figur 4. Krystalgitter i vand.

For hvert iltatom er der fire nabobrintatomer, to er tæt på og tilhører samme molekyle, og to er længere væk, og tilhører nabomolekylet. Da antal kombinationer af "to nær, to fjern" stiger som en potensfunktion med størrelsen af krystallen, har is en høj grad af uorden (eller entropi), selv ved det absolutte nulpunkt.



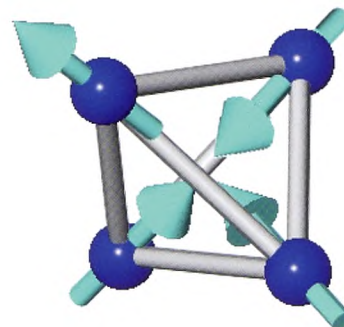
Figur 5. Orientering af spin tetraedre i spin is.

Spin is er materialer som består af regulære tetraedre af magnetiske ioner, som hver for sig har et magnetisk moment (forskellig fra nul), og som er forbundet

i hjørnerne. Dette magnetiske moment skyldes, at ionerne har elektrisk ladning samt et spin (som er den kvantemekaniske version af impulsmoment). Hvis disse ioner (og deres spin) tilfredsstiller en tilsvarende "to ind plus to ud"-regel som for is, kaldes en sådan krystal for spin is. Her er det altså tale om to ioner, hvis spin peger ind, mens de andre to har spin, som peger ud (figur 5).

Det mest populære materiale som kan danne spin is er Dysprosium-titanat $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, som er et uorganisk keramisk materiale af titanat-familien. Dette materiale vil danne spin is ved temperaturer på ca. 2 K.

I spin is kan vi danne inducerede magnetiske monopoler, ligesom vi gjorde i gitteret af stavmagneter ved at vende spintilstanden på en enkelt ion i tetraederet [3]. Når vi flipper spin på en enkelt ion, får vi dannet to nabotetraedre med henholdsvis "3 ind 1 ud" (figur 6) og "1 ind 3 ud". Vi har nu skabt et par af inducerede magnetiske monopoler med modsat magnetisk ladning. Vi skal tilføre en lille smule energi for at opnå dette, til gengæld kan vi skabe en magnetisk strøm uden at tilføre yderligere energi ved at flippe spin parvis lige som for stavmagnetene [4].

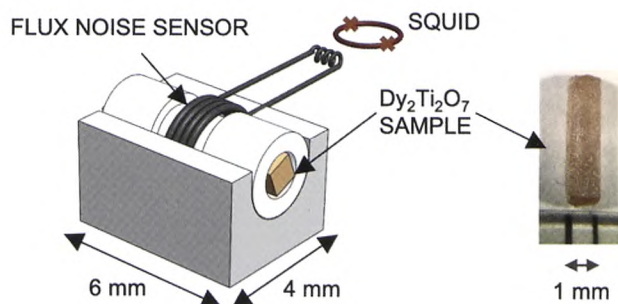


Figur 6. "3 ind 1 ud"-monopol.

Den første indirekte observation af magnetiske monopoler i spin is blev publiceret i 2008 [4]. Her blev der observeret mystiske faseovergange i spin is i et eksternt magnetfelt.

Direkte observation af monopoler

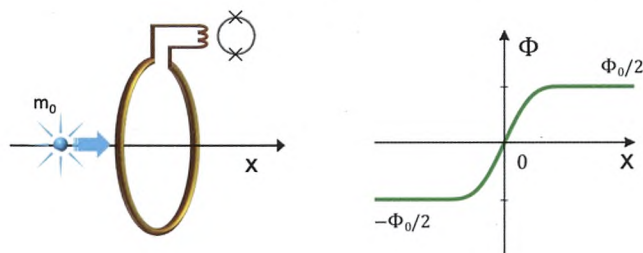
Som nævnt tidligere har magnetiske monopoler en karakteristisk signatur, når de passerer gennem en spole. Denne effekt er nu observeret direkte i et forsøg som anvender en SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) detektor [5]. I dette forsøg blev der anvendt en opstilling som vist i figur 7.



Figur 7. Detektor til direkte påvisning af magnetiske monopoler.

En krystal af Dysprosium-titanat er anbragt inde i en spole. En eventuel magnetisk fluks i spolen kan detekteres med en SQUID-detektor (fra firmaet Quantum Design). En sådan detektor kan måle en ekstremt lav magnetisk flukstæthed ned til 10^{-14} T. Hele opstillingen er omsluttet af en magnetisk afskærmning mod ydre magnetfelter (ikke vist på figuren), og kan køles ned til 1 K.

Hvis en enkelt magnetisk monopol bevæger sig gennem detektoren, ville det give en fluks som vist på figur 8. Dette ville give et entydigt signal i detektoren. Desværre kan vi ikke regne med, at dette sker i praksis, da vi ikke kan skabe og manipulere monopoler enkeltvis.

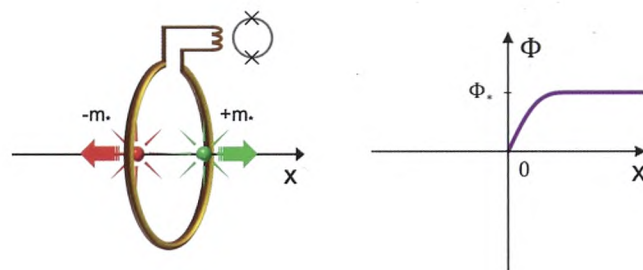


Figur 8. Magnetisk fluks fra enkelt monopol

Selv om man ikke kan skabe og manipulere monopoler enkeltvis, vil de opstå spontant ved kvantemekanisk tunnelling, når temperaturen er tilstrækkelig lav. Tilsvarende vil de bevæge sig ved spin flip i nabotetraedre. Vi skal huske, at monopoler altid dannes i par, men dette

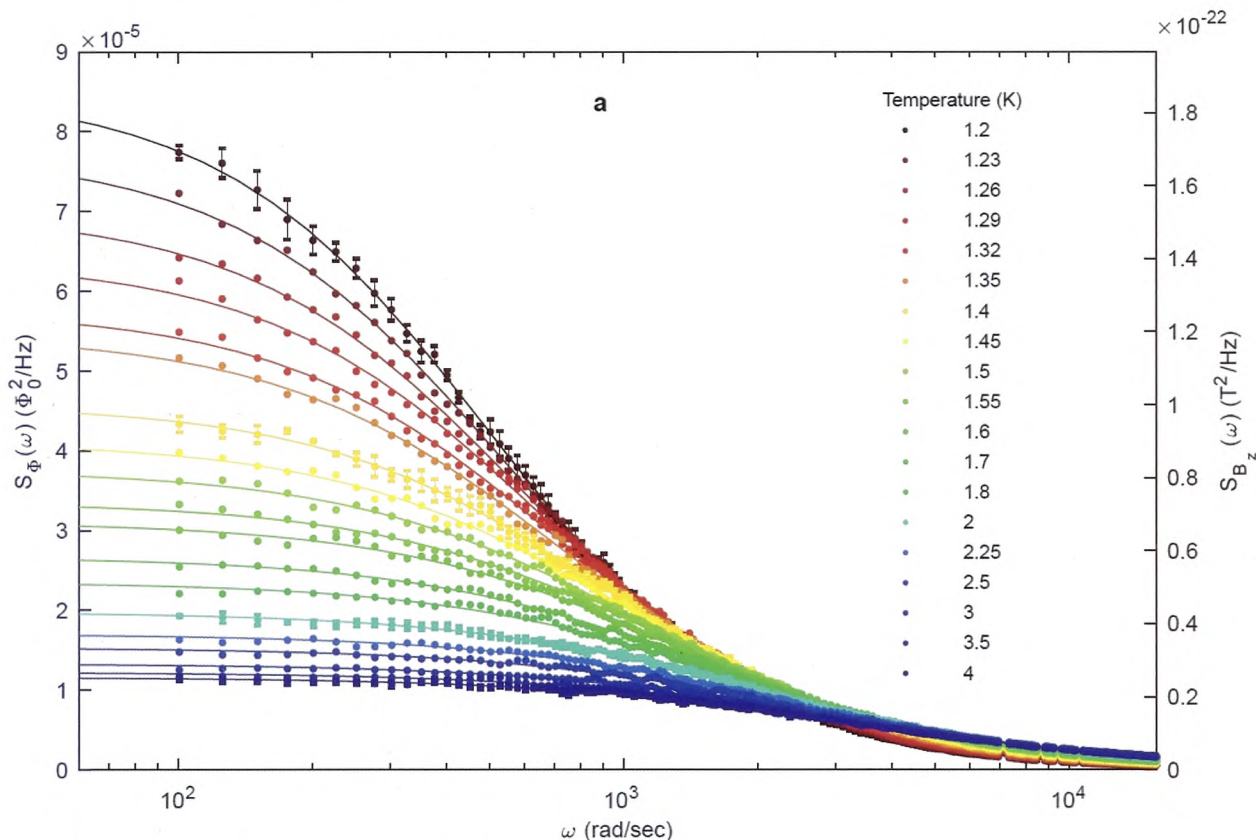
vil også give et magnetisk signal, hvis de bevæger sig bort fra hinanden figur 9.

Netto effekten af de magnetiske monopoler, som opstår spontant ved kvantemekanisk spin flip, vil være et støjsignal fra SQUID-detektoren. Det er lidt som at prøve at optage lyden af en regndråbe, men få lyden af et kraftig regnvejr. Dette støjsignal vil have et frekvensspektrum, som afviger fra spektret uden monopoler.



Figur 9. Magnetisk fluks fra monopolpar som bevæger sig fra hinanden.

Når temperaturen i spin is er tilstrækkelig lav, vil der hele tiden dannes par af magnetiske monopoler. De vil eksistere en karakteristisk tid $\tau(T)$ (Generations-Rekombinations tid) af størrelsesorden nogle millisekunder. Denne GR-tid vil være temperaturafhængig. Processen vil skabe en støj af magnetisk fluks som kan detekteres af SQUID-detektoren.



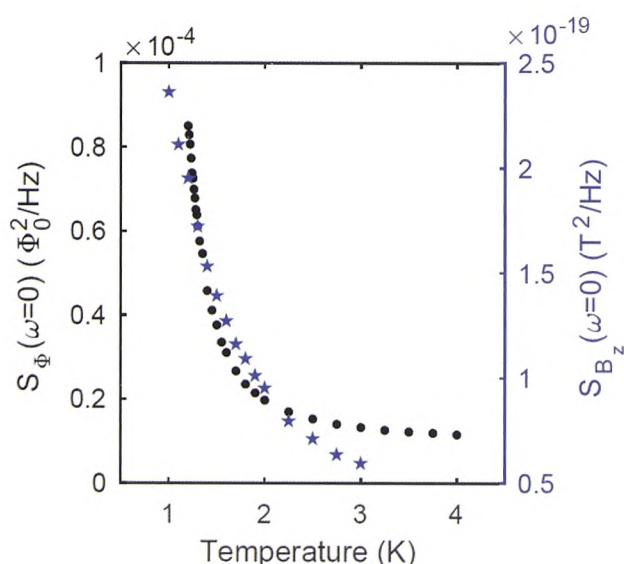
Figur 10. Magnetisk støj som funktion af frekvens og temperatur.

Teoretiske beregninger har vist, at hvis vi erstatter krystallen inde i spolen med en paramagnet (hvor vi kan inducere normale magnetiske dipoler, men ikke monopoler), vil detektoren registrere rød støj (støj med overvægt af lave frekvenser). Men hvis der er en krystal, som danner monopoler (som Dysprosium titanat), vil vi få lyserød støj. Støjen bliver mere pink (højere indhold af høje frekvenser), når temperaturen stiger.

Forsøget viste, at fluksstøjen og dens temperaturafhængighed nøjagtig følger de teoretiske beregninger for dannelse af magnetiske monopoler [6]. Ovenikøbet ligger frekvensspektret af støjen i det hørbare område (på grund af GR-tiden på nogle millisekunder). Dette gør, at man kan høre den karakteristiske lyserøde støj fra monopolerne og forskellen fra støjen fra paramagnetiske materialer.

Målingerne af den magnetiske støj $S_{\Phi}(\omega)$ som funktion af frekvensen (eller vinkelhastigheden (ω)) ved forskellige temperaturer er vist i figur 10.

Sammenhængen mellem magnetisk støj og temperatur er vist i figur 11.



Figur 11. Magnetisk støj som funktion af temperatur.

Som vi ser stiger støjen, når temperaturen falder mod 1 K. Dette skyldes, at monopolernes levetid (GR-tiden) forlænges når temperaturen falder. Tilsvarende ophører monopol dannelsen, når temperaturen stiger over 3 K. I figuren er den blå graf teoretiske beregninger, mens den sorte graf er de aktuelle målinger.

Mulige anvendelser

Dagens computersystemer indeholder elektronik, hvor alle logiske gates er baseret på at flytte elektrisk ladning i form af elektroner. Der findes en teoretisk grænse for, hvor lidt energi det koster at manipulere en bit i et elektronisk system. Denne grænse kaldes Landauers grænse og vil før eller senere begrænse, hvor tæt man kan pakke logiske gates i elektroniske chips. Hvis man

derimod laver logiske gates ved hjælp af spin flip i spin is, kan man manipulere bits med meget lavere energi end dagens halvlederteknologi. De første demonstrationer af magnetiske gates er udført [7] og man forventer at "magnetronics", hvor magnetiske strømme erstatter elektriske strømme, vil være en realitet om få år. Dette vil kunne gøre det nemmere at blive ved med at opfylde Moores lov i fremtiden.

Konklusion

Magnetiske monopoler blev foreslået i 1931 som en mulig forklaring på, at elektrisk ladning er kvantiseret. Oprindeligt forestillede man sig monopolerne som elementarpartikler med magnetisk ladning. Men sådanne partikler er aldrig observeret. Derimod er der nu påvist, at der i specielle strukturer af magnetiske ioner kaldet spin is kan induceres magnetiske monopol-lignende objekter ved at vende spin (og magnetisk moment) for en enkel ion i et tetraeder. Disse objekter opfører sig, som om de har magnetisk ladning, og kan give ophav til magnetiske strømme, som kan detekteres. Dette giver perspektiver til at anvende magnetiske strømme i stedet for elektriske strømme i fremtidige logiske kredse.

Litteratur

- [1] P. Dirac (1931) Quantised Singularities in the Electromagnetic Field, *Proc.Roy.Soc.* (London), bind **A 133**, side 60.
- [2] G. 't Hooft (1974) Magnetic monopoles in unified gauge theories, *Nuclear Physics*, bind **B 79**, side 276–284.
- [3] C. Castelnovo, R. Moessner og S.L. Sondhi (2008) Magnetic Monopoles in Spin Ice, *Nature*, bind **451**, side 42–45.
- [4] B. Tomasello, C. Castelnov, R. Moessner og J. Quintanill (2019) Correlated Quantum Tunnelling of Monopoles in Spin Ice, *Phys.Rev.Lett.*, bind **123**, side 067204.
- [5] B. Cabrera (1982) First Results from a Superconductive Detector for Moving Magnetic Monopoles, *Phys.Rev.Lett.*, bind **48**, side 1378.
- [6] R. Dusad, F. Kirschner, J. Hoke m.fl. (2019) Magnetic monopole noise, *Nature*, bind **571**, side 234–239.
- [7] F. Caravelli og C. Nisoli (2020) Logical gates embedding in artificial spin ice, *New J. Phys.*, bind **22**, side 103052.



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 ni år undervist i fysik og matematik på Viborg Tekniske Gymnasium.

Var Rom årsagen til videnskabens nedtur i middelalderen?

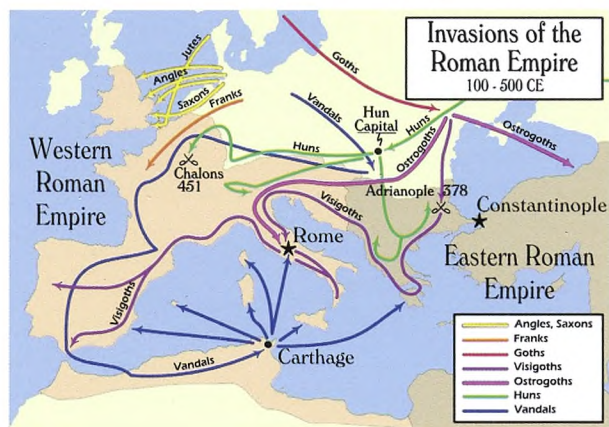
John Rosendal Nielsen, Aurehøj Gymnasium

Det kan næppe overraske nogen, at videnskaben har sine rødder i antikkens Grækenland, og at middelalderens Europa var afhængig af antikkens tanker. Nuvel der har været andre storslåede civilisationer såsom ægypterne og babylonierne, men grækerne udnyttede deres viden, som de forfinede, og de systematiserede den tidligere viden. Derudover gik grækerne ofte et skridt videre og lagde grundlaget for flere af de videnskaber, som vi kender i dag. Det er altså med god grund, at man spørger sig selv, hvorfor videnskaben gik ned ad bakke i middelalderen? Det er ikke usædvanligt at søge svaret i selve middelalderen og fra den voksende indflydelse fra kristendommen. I denne artikel prøver jeg at tage et skridt længere tilbage og spørge, om grunden til nedgangen i videnskaben i middelalderen skal findes i Romerrigets fald?

Romerriget

I år 476 endte Det Vestromerske Rige ved, at goterne erobrede Rom. Dette markerede afslutningen på antikken og starten på en tusindårig lang periode, som vi kender som middelalderen. Ved Roms fald havde Romerriget været igennem en lang historie, hvor det startede som en bystat ved Roms grundlæggelse i 753 f.Kr. til Romerriget, der strakte over en stor del af Europa, Mellemøsten og Nordafrika. Det skiftede styreform i flere omgange, hvor det startede med at være et lille kongerige, der blev til en demokratisk republik for at ende som et komplekst kejserrige.

Romerriget havde i flere omgange oplevet og overlevet indre revolter og borgerkrige såvel som ydre fjender såsom Kartago, grækerne og germanerne. De havde klaret udfordringerne med store omkostninger i befolkningen og økonomien, og det forekom som om, at imperiet ville eksistere for evigt.



Figur 1. Opdeling af det romerske imperium og invasionerne af forskellige stammesamfund.

Men intet varer evigt. Grundene til Romerrigets fald er diskuteret i flere værker (såsom Gibbons firbindsværk [1] og mere moderne analyser [2]). Inden Romerrigets sammenbrud havde flere kejsere forsøgt at få styr på det enorme rige, men de overlevede sjældent deres første regeringsår. Det var indtil at kejser Diocletian (242/245–311/312) erobrede magten i 284, hvor imperiet blev mere stabilt. På dette tidspunkt var imperiet i en så dårlig stand af de mange års borgerkrige og invasioner fra ydre

fjender, at kejser Diocletian allerede i 286 besluttede at dele imperiet op i et Vestromerrige og et Østromerrige.

Opdelingen af Romerriget

Opdelingen af Romerriget (se figur 1) fik stor betydning for videnskabens udvikling i Vesteuropa. I det overvejende latinsktalende vestromerske imperium var der få, der kunne læse græsk i modsætning til i det byzantiske imperium, der var overvejende græsktalende. Al videnskabelig litteratur var skrevet på græsk, hvilket betød, at Vesteuropa ikke havde nem adgang til de tidligere tiders tanker. Tidligere havde eliten i Rom hentet græske lærde slaver til at undervise dem i de græske filosofier og videnskab, men i kejsertiden var grækerne blevet en integreret del af det romerske imperium, og græske lærde slaver blev sjældnere med tiden. Uden undervisere i det græske sprog mistede romerne (i Vestromerriget) evnen til at forstå den græske litteratur. Der var selvfølgelig latinoversættelser til nogle af de græske værker, som romerne fandt tilstrækkelig vigtige.

Man kan undre sig over, at romerne ikke skabte lærdomsinstitutioner som vi kender dem fra Athen eller Alexandria, men romerne fandt aldrig et sådan behov. Grunden hertil skal formentligt findes i romernes ambivalente forhold til grækerne. På den ene side beundrede romerne grækernes præstationer indenfor filosofi og kultur, og de lånte meget gerne fra grækerne. På den anden side syntes romerne, at grækerne vil korrumpere dem med filosofi og kultur ([3, side 227–228]). Romerne værdsatte de ingeniørvidenskabelige præstationer, som fx deres veje og akvædukter, mens grækerne tænkte abstrakte (unyttige) tanker om universet og stoffets sammensætning. Sådan yndede romerne at opfatte grækerne og sig selv, men i virkeligheden var deres interesser nok lidt mere nuancerede. Det skeptiske forhold til de græske tanker blandt den brede befolkning kan måske være med til, at romerne ikke skabte akademier eller lignende.

Romerne var også interesseret i abstrakte videnskaber såsom astronomi og naturfilosofi, men studierne var begrænset til de få rige, der kunne tage på dannelsesrejse til Grækenland. De filosofiske studier i Grækenland var en del af den demokratiske proces, og man kiggede ikke

på mandens sociale klasse, når man skulle bedømme de filosofiske ræsonnementer. Selvom studierne i Athen ikke var for alle (kvinder var fx udelukket), så havde alle borgere fra Athen og andre byer i princippet adgang til akademierne og symposierne. Det er nok den væsentlige forskel fra det romerske aristokrati, der dyrkede filosofi og videnskab i selskab med en græsk slave.



Figur 2. Quintus Septimius Florens Tertulianus (Tertullian, omk. 160 – 225) er en af de grundlæggende kirkefædre til den katolske kirke, som vi kender den i dag. Han havde stor betydning for kristendommen, men mange af hans meninger var fanatiske og kompromisløse.

Tidlig kritik af filosofi og videnskab

Kristendommen, der har sin oprindelse i Romerriget, bliver ofte set som en modsætning til videnskab. Det ville derfor være oplagt at formode, at videnskaben blev undertrykt af udøverne af kristendommen. Det kunne være en forklaring på, hvorfor videnskaben havde så trange vilkår i middelalderen. Kirkefædrene, som man benævner de første tænkere og fortolkere indenfor kristendommen, var en sammensat flok af individer, der havde meget forskelligt syn på alt fra hverdagens problemstillinger til videnskaben. Nogle af kirkefædrene var direkte kritiske overfor videnskaben som for eksempel Tertullian (figur 2), der var en betydningsfuld teolog i sin tid. Han skrev:

Hvad har Athen og Jerusalem tilfælles?
Hvad har akademiet og kirken tilfælles?
Hvad tilfælles har kættere og kristne? ...
Hold op med at sammenflette kristendommen med stoiske, platoniske og dialektiske tanker! Vi ønsker ingen nysgerrig diskussion efter besiddelse af Jesus Kristus, ingen inkquisition efter at have nydt evangeliet!
Med vores tro ønsker vi ikke yderligere tro.¹

De tidlige kristne anså videnskaben som en del af den hellenske, hedenske tro og kultur, og det var rigtigt, at mange af videnskabsmændene typisk var tilhængere af

den hedenske tro. Grunden til at videnskabsfolkene var hedenske, er sværere at gisne om, men der er formentligt tale om flere årsager. Kristendom var godt nok accepteret som religion i det byzantinske rige, men det var stadig en underlig sekt med nogle vulgære ritualer.² De fleste videnskabsmænd var formentligt mere fortrolige med den græske religion, der ikke krævede meget at være en del af, og akademierne, som var grundlagt i den hellenske frit tænkende tradition, spillede en betydelig rolle for videnskabsfolk.

Tjenestepige-synspunktet

De fleste kirkefædre tillagde sig en mere pragmatisk holdning overfor videnskaben. De lagde op til, at så længe videnskaben tjente til at forstå kristendommen, så havde man ingen problemer med den græske videnskab. Dette syn på videnskaben blev kendt tjenestepige-synspunktet. Med denne holdning skal der ikke herske nogen tvivl om, at videnskaben var underordnet kristendommen, og så længe videnskabsfolkene ikke satte sig op imod de kristne dogmer, kunne de såmænd godt rode med tanker om universet og medicin.

Philo af Alexandria (25 f.Kr. – 50 e.Kr.) var formentligt den første til at formulere dette synspunkt. Som man måske nok kan regne ud, var Philo ikke kristen, men jødisk, og han formulerede holdningen til videnskaben med hensyn til de jødiske hellige skrifter. Der var en kraftig tilskyndelse til at studere verden, da de jødisk-kristne tekster beskrev, at Gud havde skabt verden, og et studie af verden ville ifølge Philo og ligesindede bringe én tættere på Gud og hans skaberværk.

Denne tjenestepige-tankegang passede godt med mange af de kristne kirkefædres opfattelser, og en af de allerførste, der tog tjenestepige-synspunktet til sig, var Justinus Martyr (ca. 100–165 e.Kr.). Han mente, at Sokrates og Abraham i virkeligheden var kristne, og at Platons skrifter og de bedre aspekter af græsk filosofi kunne bringes i overensstemmelse med kristendommen efter nogle enkelte tilpasninger. Som andre kirkefædre gik han så langt, at han mente, at de græske filosoffer havde lånt fra Det Gamle Testamente. Justinus anså sig selv som filosof og kristendommen var den bedste og sandeste filosofi.

De latinske kirkefædre

I perioden 300–600 var der flere kirkefædre, der skrev på latin, og beskæftigede sig med forholdet mellem filosofien (og videnskaben) og kristendommen. De er kendt som de latinske kirkefædre, og de kunne ofte ikke læse eller skrive græsk, hvilket betød, at de kun havde begrænset kendskab til de græske lærde og kirkefædre. De latinske kirkefædre fandt det også nødvendigt at overveje forholdet mellem filosofi og de kristne doktriner. Deres viden om den græske filosofi kom fra latinske kommenterede oversættelser af bl.a. Cicero og Seneca.

De vigtigste latinske kirkefædre er Augustin af Hippo (354–430) – også kendt som Sankt Augustinus – og

¹Løs engelsk oversættelse af forfatteren fra Grant, [3, side 104].

²Den kristne tro har (når man tænker over det) stadig nogle vulgære ritualer. De store anstødssten for antikkens mennesker var, at en korsfæstet mand, som var den romerske straf for de værste forbrydelser, skulle være Guds søn.

Anicius Manlius Severinus Boethius (477–524/525), hvor Augustin er den vigtigste, når det gælder senere teologers arbejde i middelalderen. Augustin overvejede ligeledes, om kristne skulle benytte hedensk videnskabelig og filosofisk litteratur, og han lændede sig op af tjenestepige-synspunktet ligesom de græske kirkefædre. Det er mig lidt uklart, om han selv uafhængigt kom frem til dette synspunkt, men det er nok mest oplagt, at han har kendt til Philo af Alexandrias tidlige synspunkt eller en af de senere græske kirkefædres arbejde.

Augustin erklærede at "hvis dem ... som bliver kaldt for filosoffer – frem for alt platonikerne, tilfældigvis har sagt noget, der er sandt og i overensstemmelse med vores tro, bør vi ikke være bange for dem, men vi bør endda kræve tilbage til vores brug, hvad de har sagt, fra dets uretfærdige besiddere".³ Det er tydeligt, at Augustin lagde sig tæt op ad de græske kirkefædre. Hvis filosofi og videnskab kunne tilpasses den kristne tro, så skulle det gøres til de kristnes egen filosofi og videnskab, og det skulle absorberes og befries fra uretmæssige besiddere (de hedenske tænkere).

Det var en direkte konsekvens af tjenestepige-synspunktet for Augustin, at troen skulle gå forud for forståelsen. Det kan derfor overraske, at Augustin var positivt indstillet overfor matematik og logik, men han mente, at disse discipliner var af stor betydning, når man skulle gå i dybden og løse problemer, der dukkede op i de hellige skrifter. Han advarede dog de kristne om, at de burde sikre sig, at de logiske slutninger på troen var sande. Augustin gav et eksempel, hvor man kunne komme til den logiske slutning, at opstandelse ikke var mulig, men det ville modsige den bibelske fortælling om Jesu genopstandelse. Derfor må der kunne forekomme genopstandelse. Biblens ord står over enhver form for rationale. Middelalderens filosoffer og teologer var stærkt påvirket af Augustin.

Neoplatonismen

Der opstod andre mysterie-religioner samtidigt med kristendommens opståen. I det store romerske imperium var folk – fx soldater – kommet i kontakt med mange forskellige kulturer og religiøse forestillinger. Blandt de mere populære kulturer var den Store Moder af Phrygia (eller Magna Mater), den persiske gud Mithras og den ægyptiske månegudskult Isis. Blandt disse mysteriereligioner var der en samling religiøse idéer og systemer, som var kendt som gnosticismen, hvis navn havde sin oprindelse i det græske ord *gnosis*, som betyder viden. Gnosticisme var en blanding af idéer fra andre mysteriereligioner, fra astrologi og fra diverse filosofier – blandt andet idéer fra Platon, pythagoræerne og stoikerne. Der indgik desuden tekster fra en kult, der tilbød Hermes Trismegistos.⁴ Disse tekster omhandlede alkymi, astrologi, fysik(!), botanik og medicin, hvor de fleste af dem gav overnaturlige forklaringer på naturlige fænomener.

Tilhængere af gnosticismen havde en klar opdeling

af den jordiske verden og den guddommelige verden, og de ringede den materielle verden. De anså verden som ond, og værdsatte fattigdom og cølibat. Gnostikerne troede desuden på, at en frelsesgud kunne redde dem fra deres synder og give dem evigt liv. Måske er der noget, der vækker minder om en vis religion, da flere af de gnostiske retninger antog, at Kristus var den, som skulle bringe dem den frelsende viden. Mysteriereligionerne var meget almindelige i det romerske imperium, og de delte mange egenskaber såsom genopstandelsen efter døden.

I perioden fra omkring 250 til omkring 650 tog filosofferne skridtet videre og forsøgte at sammenkoble tro og filosofi (og videnskab), hvilket resulterede i neoplatonismen. Denne filosofi fik stor betydning for kristendommen. Den neoplatoniske skole blev grundlagt af Plotin (Plotinos, ca. 204–270), der formentligt var født og studerede filosofi i Alexandria. Omkring 243 flyttede Plotin til Rom for at undervise, hvor han også menes at have skrevet sit værk, *Enneaderne*, der skulle blive grundlaget for neoplatonismen [4].

Centralt for platonisterne var en gud, der var et transcendent væsen kaldet *Det Ene*. Det var en gud, som lå uden for erkendelsens grænser og som ikke var beskæftiget med tanker og handlinger. Der var ikke tildelt nogle positive egenskaber til denne gud, da dette ville begrænse og præcisere guden. *Det Ene* var uforanderlig og allestedsnærværende. Der forekom en udstråling fra guden, der var sind eller tanker (kendt som *nous*), som var uendelige og evige i tid og rum. Fra disse sind eller tanker udstråler sjælen. Det minder om Platons sjæleverden, hvor vi kun oplever en skyggeverden af den virkelige verden.

Vi skal ikke gå i detaljer med neoplatonismen, men Plotin havde i det væsentlige konstrueret en religion. Der var ikke nogen religiøs praksis eller ritualer, og der blev heller ikke lagt op til bønner eller sakramenter, men filosofien var *de facto* en religion. Filosofen Porfyrius (Porphyrius, 232–305), der studerede i elleve år hos Plotin, lagde vægt på den religiøse side af filosofien, og som mange senere filosoffer mente han, at målet med filosofien var frelsen. Det kan derfor ikke være overraskende, at neoplatonismen fik stor betydning for religionerne, inklusive kristendommen.

Universets skabelse og astronomi

Lige så længe mennesket har været fascineret af himmelhvælvet, har det også ønsket at give en forklaring på himmelfænomenerne. Det gælder også for de ægyptiske, babyloniske og græske kulturer. Denne forklaring på himmelfænomenerne var ofte forankret i religiøse overvejelser. Den eneste undtagelse var de græske naturfilosoffer, som prøvede at give en rationel forklaring på kosmos. Når antikkens mennesker talte om kosmos, begrænsede det sig til solsystemet, hvor stjernerne fandtes yderst.

Den første rationelle forklaring kom omkring 600

³Oversat af forfatteren fra en engelsk oversættelse [3].

⁴Hermes Trismegistos er en græsk-ægyptisk gudeskikkelse, der havde sin oprindelse i den græske gud Hermes og den ægyptiske visdomsgud Toth. De anså de to guder som betegnelser for det samme væsen. Hermes Trismegistos havde stor betydning i den senere kejsertid – og videre op i historien – hvor den kom til at spille en rolle i flere filosofiske tekster fra Alexandria (Wikipedia).

f.Kr., hvor Thales af Milet (626/623–548/545 f.Kr.) postulerede, at alt bestod af vand, og at Jorden var en flad skive, som flød på vandet [5]. Derefter kom flere græske naturfilosoffer med forskellige forslag til verdensbilleder, der var mere eller mindre fantasifulde, men de byggede på logiske argumenter – i det mindste set ud fra deres optik. Med grækerne skete der en udvikling i beskrivelsen af kosmos, der blev fri for guder og guddommelig påvirkning, men flere af disse verdensbilleder – religiøse såvel som irreligiøse – kunne eksistere sideløbende.

Inspirationen til de græske naturfilosoffers tidligste verdensbilleder kom ofte fra de religiøse verdensbilleder. Det var sikkert ikke et tilfælde, at Thales' "grundstof" for alting var vand, når vand og verdenshavene spillede en stor rolle i skabelsen i den græske mytologi (og mange andre civilisationers verdensbilleder). I den græske klassiske periode var det ikke usædvanligt, at store naturfilosoffer kom op med forskellige idéer til verdensbilleder. De fleste modeller var geocentriske som for eksempel Aristoteles' verdensbillede med de fire elementer, der blev dominerende i den senere antikke periode og i middelalderen, men der var også enkelte naturfilosoffer, som vedkendte sig en heliocentrisk model. Aristarkos' (ca. 320-230 f.Kr.) model var formentligt det eneste eksempel herpå. Det vigtige i denne sammenhæng er, at idéer blev luftet og testet af observationer og eksperimenter, så godt som observationerne på dette tidspunkt kunne tillade det. I perioden efter år 100 f.Kr. er det sparsomt med nye modeller, og man fokuserede mere på de allerede kendte verdensbilleder, som man kritiserede og kommenterede. Derved kopierede man store dele af de tidligere værker, hvilket var vigtigt på et tidspunkt, hvor bogtrykningen ikke eksisterede.

Med kristendommens fremkomst fik det jødiske verdensbillede fornyet aktualitet i Det Gamle Testaments 1. Mosebog. Når man læser 1. Mosebog, får man fornemmelsen af, at da 1. Mosebog blev skrevet, var det ikke meningen, at man skulle tage denne skabelsesberetning bogstaveligt, men snarere som en poetisk beskrivelse. Men de tidlige kristne tog 1. Mosebog virkelig bogstaveligt, hvilket gav udfordringer med skabelsesberetningen. Den første filosof, der undersøgte problemerne i skabelsesberetningen, var den tidligere nævnte hellenistiske jøde Philo af Alexandria. I en heksameterafhandling⁵ diskuterede Philo filosofiske problemer, om hvorvidt verden havde en begyndelse. Han diskuterede desuden spørgsmål som [4]:

- Hvad er verden skabt af?
- Er verden skabt af allerede eksisterende stof eller af stof, som Gud også har skabt?
- Er alt skabt på seks dage eller er det hele skabt samtidigt?
- Hvornår blev tiden skabt?
- Hvorfor skabte Gud planter, urter og buske på tredjedagen, mens han først skabte Solen og Månen på fjerdedagen?

⁵Heksameter eller heksamera betyder seks dage og henviser til verdens skabelse på seks dage. En heksameterafhandling er en filosofisk kommentar til 1. Mosebog [3].

Det er bare nogle af de spørgsmål, som de senere kristne lærde måtte give sig i kast med for at få mening i en bogstavelig fortolkning af Bibelens skabelsesberetning. Nogle af spørgsmålene vidner om de mange selvmodsigelser der er i Bibelens beskrivelse af naturen, og som skyldes tekstens poetiske stil, hvor man har taget sig kunstneriske friheder.

Man kan på baggrund af denne diskussion af universet, godt antage, at astronomien tog et skridt tilbage til en dogmatisk religionsbaseret skabelse. Jeg vil også påstå, at astronomien mistede meget af den idérigdom, som de førsokratiske naturfilosoffer havde i deres kosmologi, da Platon og Aristoteles' kosmologi blev dominerende i slutningen af den hellenistiske periode. Det ser ud til, at de senere antikke naturfilosoffer ikke kunne videreudvikle de tidligere ideer eller frigøre sig fra Aristoteles, og de havde mere travlt med at lappe på hans model.

Matematik i slutningen af det romerske imperium

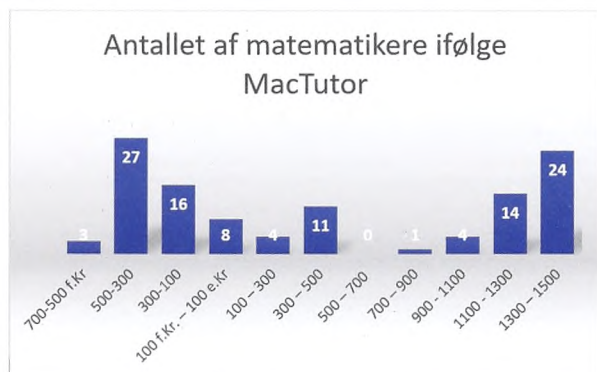
Matematik og matematikere skal i denne sammenhæng forstås meget bredt. Betegnelsen dækker også over personer, som beskæftigede sig med astronomi, geografi og fysik. Antikkens matematikere kunne udmærket beskæftige sig med mange forskellige grene af viden-skaben såsom filosofi, matematik og naturvidenskab. Man kendte ikke til den specialisering, der er normal praksis i dag.

Matematik og astronomi havde sin oprindelse i Ægypten og Mesopotamien med mere end tusind års historie. Det var dog først med grækerne, at matematikken blev systematiseret, hvorved man skabte præcise definitioner og sætninger, som skulle bevises. Et typisk eksempel herpå var Euklids værk Elementer, der blev skrevet i Alexandria i slutningen af den klassiske periode – omkring 300 f.Kr.

Euklids Elementer er en samling af den akkumulerede matematiske viden, og den markerede et højdepunkt i den græske geometri. Senere kom der tilføjelser, og de blev udgivet som kommentarer til Elementer. Det var generelt for alle videnskaber, at der skete en kopiering af de centrale værker med kommentarer eller tilføjelser. Det var vigtigt i en tid, hvor udbredelsen af værkerne afhang af en håndskreven kopiering, som var udfordrende og tidskrævende. Denne kopiering af tidligere værker skulle være nøjagtig og har formentligt sat sine begrænsninger på at udvikle nye idéer. Kritikken blev placeret som kommentarer. Samtidig havde geometriske beregninger nået deres begrænsninger. Husk på, at abstrakt algebra endnu ikke var udviklet. Hvis man ville beskrive kvadratet af en størrelse, beskrev man det med en tegning af et kvadrat med siden, der svarede til den størrelse.

Vi ved ikke, hvor mange der har beskæftiget sig med matematik og astronomi i Ægypten og Mesopotamien, men et kvalificeret gæt er omkring 10-20 personer ved de respektive hoffer. Det fortaber sig desværre, da det er meget få embedsmænd, der bliver nævnt i kilderne fra de to gamle civilisationer. Jeg har forsøgt

at bestemme, hvor mange nævneværdige græske og romerske matematikere, der har været i perioden fra 700 f.Kr. til 1500 e.Kr. ved en simpel optælling af matematikere fra MacTutors hjemmeside [6]. Med et kronologisk biografiindeks er matematikerne fordelt i perioder på 200 år:



Figur 3. Figuren viser antal matematikere i Europa fra antikken til den tidlige middelalder inddelt i perioder på 200 år. Efter opdelingen af Romerriget i to dele i år 285 er der overraskende nok en stigning i den efterfølgende periode (fra 4 til 11), men derefter et fald til næsten nul i de følgende 400 år. Data fra [6].

I optællingen er inkluderet antikken og middelalderens Europa, så en sammenligning mellem de to perioder er mulig. Der er udeladt matematikere fra Kina, Indien og Arabien, og der er en geografisk variation pga. at Romerrigets udstrækning ændres igennem tiden. For antiken er kun medtaget græske eller romerske matematikere.

Det bør påpeges, at denne statistiske undersøgelse har sine begrænsninger. For det første er det sandsynligt, at MacTutor har overset enkelte matematikere og selv hvis de skulle være heldige at have inkluderet alle kendte matematikere i listen, vil der være matematikere, som desværre er blevet glemt for eftertiden. For det andet er alle matematikere blevet placeret i den 200 årsperiode, hvor de er blevet født. Det har været nødvendigt, da vi ikke kender tidspunktet, hvor matematikerne var aktive. Det var formentlig 30-40 år efter deres fødsel, men det kunne sagtens være tidligere eller senere. Det er derfor fornuftigt ikke at inddele i mindre end 200-årsperioder. For det tredje er der en stor usikkerhed i dateringen af flere af matematikerne, da man flere gange må basere dateringen på, hvilke andre matematikere som den pågældende matematiker har henvist til.

Den sidste kommentar til den statistiske undersøgelse er, at den ikke giver nogen indikation om kvaliteten af matematikernes arbejde. Det er mit indtryk, at der var flere matematikere, der mere fokuserede på at skrive kommentarer eller håndbøger til tidligere matematikers matematik end at komme med ny matematisk forskning. Drivkraften til at søge viden for egen skyld mistede sin fremdrift under det empirielle Romerrige ([4, side 88]). Selv med de ovennævnte begrænsninger synes jeg, at man tydeligt kan se et mønster i statistikken. Der sker en nedgang i antallet af matematikere allerede i slutningen af den romerske republik, hvor Romerriget vokser sig stort og blev den dominerende faktor i

Middelhavsområdet. Antallet af matematikere vender først tilbage til niveauet før Romerrigets storhedstid i senmiddelalderen.

Hypatia

Matematikeren Hypatia af Alexandria (omkring år 370–415) bliver ofte brugt som et eksempel på, at kristendommen slog hårdt ned på videnskaben, når dens udøvere ikke ville makke ret, eller hvis de kristne følte sig intimideret af de hedenske videnskabsfolk. Vores viden om Hypatia er meget begrænset, da vi har meget lidt viden om hende fra hendes egen hånd eller fra hendes samtidige. Der er dog visse kendsgerninger, som vi ved [7]:

- Hun var datter af Theon, der underviste i matematik og astronomi på forskningsbiblioteket i Alexandria. Theon var formentlig det sidste medlem af institutionen, der var både bibliotek, museum og universitet.
- Hun underviste i filosofi på en neoplatonisk skole i Alexandria. Hun underviste både kristne og hedninge.
- Hun var hedensk og af en rig familie, og havde desuden kontakter til den romerske guvernør, som hun rådgav i flere politiske problemer.
- Hun var hverken den eneste kvinde eller den første kvinde indenfor antikkens matematik. Pandrosion af Alexandria, ved vi, levede tidligere end Hypatia, og hun har måske bidraget til matematikken. Vi ved desværre intet om Pandrosion eller om hendes arbejde – andet end at Pappus⁶ har nævnt hende i sine tekster.
- Hun blev myrdet af kristne fanatikere af årsager, der ikke er klare for os.



Figur 4. Rachel Weisz som Hypatia og Michael Lonsdale som hendes far, Theon af Alexandria, i filmen Agora. Lige som de tidligere nævnte personer har vi ingen (eller meget få) samtidige vidnesbyrd om deres udseende. Problemet med afbildning af Hypatia som ung kvinde da hun blev myrdet, er, at hun var et sted imellem 45 og 65 år gammel.

Resten af vores viden om Hypatia er baseret på selvmodsigende kilder og gætværk. Det har dog ikke afholdt folk fra at gøre Hypatia til et symbol for kvinder i videnskab og symbol for kristendommens undertrykkelse af videnskaben. Der er flere eksempler på videnskabsfolk og filosoffer – fx Arkimedes, Sokrates

⁶Pappus af Alexandria (290–350) regnes for den sidste store græske matematiker i antikken.

og Galilei, der er blevet en form for "martyrer" for videnskaben, selv om dette begreb oftest benyttes om undertrykkelse af religiøse.

Der er ingen tvivl om, at Hypatia blev myrdet af kristne fundamentalister, men motivet er blevet diskuteret sidenhen. Jeg mener, at der er tre mulige motiver til forbrydelsen:

1. Religiøse motiver.
2. Videnskabelige eller filosofiske motiver.
3. Politiske motiver.

Der findes fem kilder til Hypatias mord, hvor den tidligste kilde er fra 30 år efter mordet skete, og de senere låner informationer fra hinanden.⁷ De er både prokristne og antikristne, men ingen af kilderne har kunnet se bort fra, at Hypatia var blevet myrdet af kristne.

Det er bestemt ikke umuligt, at Hypatia blev myrdet, fordi hun var hedning. Det problematiske i dette motiv er, at hun havde undervist kristne, og havde flere kontakter blandt indflydelsesrige kristne. Selvom hun havde et dårligt forhold til fattige kristne, var det tvivlsomt, at de fattige kristne ville myrde en hedning af rig familie uden opbakning fra en med magt og indflydelse.

Forsøgene på at forklare Hypatias mord med videnskabelige eller filosofiske motiver har været meget lidt overbevisende. Hypatia underviste i den neoplatoniske filosofi, som de kristne ikke havde de store problemer med. Matematik og astronomi var heller ikke en anstødssten for de kristne. Hvis de kristne havde haft et problem med hendes verdensbillede, havde de prokristne kilder også nævnt det til at retfærdiggøre mordet, hvilket ikke er tilfældet.

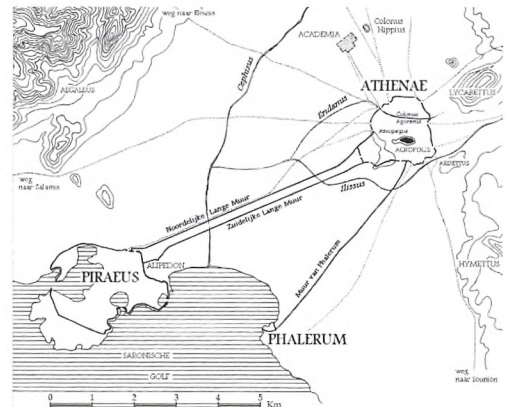
Et politisk motiv er nok den mest sandsynlige forklaring på mordet. Hypatia rådgav flere gange den romerske præfekt Orestes (som var kristen og levede omkring år 400), og det er meget sandsynligt, at hun havde blandet sig i den politiske strid mellem Orestes og biskoppen af Alexandria, Cyril (376–444). Dette motiv blev nævnt af Damascius i hans bog *Isidorus' liv*, der blev skrevet mellem år 458 og 538 – altså ca. 80 år senere end mordet [7]. Damascius var kritisk overfor kristendommen, og det er en mulighed, at han ønskede at nedgøre kristendommen yderligere ved at implicere Alexandrias biskop, der endte med at blive ophøjet til helgen. Cyrus var også kendt for at skabe splid blandt andre kristne sekter, og han kunne godt være bagmand til et mord. Men vi kommer nok ikke nærmere en forklaring på, hvorfor Hypatia blev myrdet i 415.

Lukning af Athens akademi

Et af de væsentlige kristne tiltag imod videnskaben var lukningen af det neoplatoniske akademi i Athen af kejser Justinian i år 529. Dette hæderkronede akademi blev oprettet af Platon i 387 f.Kr., som det første universitet, og det havde været et centrum for skeptisk akademisk filosofi. Akademiets geografiske placering udenfor Athen (figur 5) i en hellig olivenlund dedikeret til Athene – gudinden for filosofi og viden – har sikkert været med til at fastholde videnskabsfolk i en hedensk tro.

⁷Kilderne er oversat og gennemgået i detaljer i Booths bog [6].

I år 86 f.Kr. blev Platons akademi ødelagt, da den romerske diktator Lucius Corneliuss Sulla Felix (138–78 f.Kr.) belejrede og erobrede Athen. Der blev dog stadig undervist i en fysisk bygning ved akademiet i de følgende år. I 410 blev der oprettet et nyt neoplatonisk akademi, der havde meget lidt at gøre med det gamle akademi. Det er dette akademi, som kejser Justinian lukkede i sit andet regeringsår.

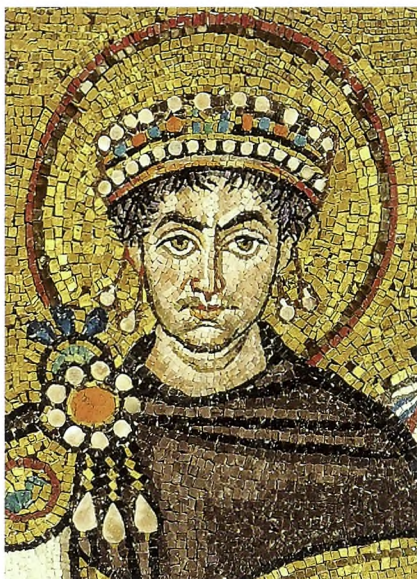


Figur 5. Athen og dens havneby Piraeus i antikken. Platons akademi lå nord for Athen uden for byens mure.

Begrundelsen for lukningen af akademiet fortæller sig desværre, da de historiske kilder beskæftiger sig med Justinians krige og moralske forfald. Senere historikere som Edward Gibbon [1] mente, at lukningen var et typisk tegn på kristendommens sejr over den frie (hellenistiske) videnskabelige tænkning og Justinian var bannerfører for en voksende anti-intellektualisme. Der er dog senere historikere som Lars Brownworth [8], der mener, at det snarere handlede om kontrol med videnskaben fra Justinians side. Universitetet i Konstantinopel, der blev oprettet af kejser Theodosius II (401–450) i år 425 med 31 stole indenfor jura, filosofi, medicin, aritmetik, geometri, astronomi, musik og mange andre fag, blev nemlig ikke lukket. Til gengæld blev juraskolen i Beirut lukket efter et belejligt jordskælv, hvilket også taler for Brownworths forslag om, at Justinian ønskede at kontrollere udøvelsen af videnskaben.

Historikere, såsom John W. Barker [8, side 98] har påpeget at Justinian var meget optaget af religiøse spørgsmål i sin tidlige periode som kejser. På dette tidspunkt var der flere retninger eller uafklarede spørgsmål indenfor kristendommen, som biblen efterlod ubesvaret. Dette havde skabt sekter indenfor kristendommen, og Justinian gjorde et forsøg på at ensrette kristendommen i en retning, der passede ham. Justinian er nok den kejser, der har haft størst indflydelse på fortolkningen af kristendommen. Hvor kejser Theodosius den Store gjorde kristendommen til Byzantiums officielle statsreligion, gik Justinian et skridt videre og forbød hedenske religioner. Det var ikke en særligt præcist defineret religion, og enkelte kristne retninger blev også ramt af dette forbud. Man skal måske se lukningen af det neoplatoniske akademi i denne sammenhæng, da de fleste af akademikerne var tro imod de græske guder. Lukningen af akademiet var altså et ufrivilligt offer i

Justinians udrensning af de hedenske institutioner. Det kan forklare, hvorfor Universitetet i Konstantinopel fik lov til at forsætte og hvorfor akademikerne ved det athenske akademi søgte andre græsgange i bl.a. Arabien end det østromerske imperium.



Figur 6. Mosaik af kejser Justinian (485–565).

Der var andre institutioner, som blev ramt af det romerske overherredømme og i den sidste ende af de kristne. Biblioteket i Alexandria blev grundlagt af Ptolemæus II Philadelphus (309–246 f.Kr.), der var søn af en af Alexander den Stores generaler. Bibliotekets beholdning af skriftruller blev forøget af hans efterkommeres aggressive kopieringspolitik, hvor alle bøger, som kom i nærheden af Alexandria blev kopieret. Man anslår, at biblioteket har haft mellem 40.000 og 400.000 skriftruller, hvilket svarede til 100.000 bøger – et svimlende antal på dette tidspunkt. Biblioteket blev brændt (delvist) ned af Julius Cæsar i borgerkrigen i 48 f.Kr., men biblioteket havde allerede oplevet en nedgang, da Ptolemæus VIII Physcon (184–116 f.Kr.) udrensede Alexandria for intellektuelle i 145 f.Kr.

Forskningen ved Mouseion-biblioteket i Alexandria flyttede omkring år 216 til nye bygninger under navnet Serapeum, men den videnskabelige aktivitet nåede ikke det samme omfang eller niveau som tidligere. Mouseion blev brændt ned efter ordre fra kejser Aurelian i år 272. Efter opdelingen af Romerriget i år 285 blev den videnskabelige aktivitet i Alexandria yderligere reduceret [10].

Videnskaben ved Romerrigets fald

Er dette en frikendelse af kristendommen? På ingen måde. Da kristendommen skulle etablere sig som religion, var der en stor iver efter at slå ned på hedningene. Det betød desværre en dræning af intellektuelle hedninge i det romerske imperium. Men de kristnes motiv var ikke at ramme videnskaben, som de havde et fornuftigt forhold til i kraft af tjenestepige-synspunktet. Deres motiv var snarere religiøs dominans.

Videnskaben og naturfilosofien havde oplevet en længere tids nedgang før kristendommen gjorde sit indtog. Det romerske imperium krævede intern ro og

fred, hvilket betød, at romerne administrerede efter devisen Status quo. Det betød, at man ikke skulle revolutionere eller lave store omvæltninger i militære, sociale, religiøse eller politiske forhold. Man kunne godt lave små ændringer eller tilpasninger, men brød man med status quo blev man sat på plads af det romerske system. Kristendommen forbrød sig mod status quo og i begyndelsen blev kristne udsat for religionsforfølgelse. Det er min formodning, at status quo-tankegangen bredte sig til flere aspekter af den romernes tankegang og dermed også til videnskaben og naturfilosofien.

Romerne havde adgang til videnskab, men de var mere interesserede i at bevare og systematisere den viden, som de var kommet i kontakt med, og der blev mindre vægt på at søge efter viden for den egens skyld. Romerne anså ikke dette som deres rolle i Romerriget, men som den romerske digter Vergil (70–19 f.Kr.) beskrev i Aeneide (6. sang, linje 847–853, [11]):

Andre, med blødere hænder, får bronze og ler til at ånde – det tror jeg gerne – og skaber portrætter i sten eller taler bedre for retten end vi, beregner planeternes vandring med deres passer og véd at fortælle om konstellationer: Dit kald, Romer, er det at lede og byde i verden – husk det, det er din kunst – at pålægge folkene freden, skåne enhver der bøjer sig for dig, og knuse den stejle.

Litteratur

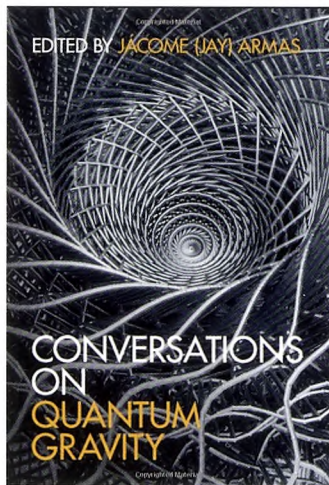
- [1] E. Gibbon (1963) *Det romerske riges forfald og undergang*, Bind 4, Rosenkilde og Bagger.
- [2] K. Harper (2019) *The Fate of Rome*, Princeton University Press.
- [3] J. D. Bernal (1969) *Videnskabens historie – bind 1: Videnskab opstår*, Pax.
- [4] E. Grant (2004) *Science & Religion 400 BC – AD 1550*, The Johns Hopkins University Press.
- [5] MacTutor, Thales, <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Thales/>
- [6] MacTutor, Chronological Biographies Index, <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/chronological/>
- [7] C. Booth (2017) *Hypatia*, Fonthill.
- [8] L. Brownworth, <https://larsbrownworth.com/blog/2011/07/12/why-did-justinian-close-the-platonic-academy/>
- [9] J.W. Barker (1966) *Justinian and the later Roman Empire*, The University of Wisconsin Press.
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Musaeum#Decline>.
- [11] Vergil, *Aeneide*. Oversat til dansk af O.S. Due, 2007, Gyldendal.



John Rosendal Nielsen er lektor ved Aurehøj Gymnasium, hvor han underviser i fysik. Han beskæftiger sig desuden med videnskabshistorie og kosmologi.

Konversationer om kvantegravitation

Michael Cramer Andersen, KVANT



Jácome (Jay) Armas, "Conversations on Quantum Gravity", 2021, Cambridge University Press, 708 sider, 365 kr (på saxo.dk).

Boganmeldelse

Denne bog er en omfattende samling af 37 interviews med forskere, der har bidraget indenfor feltet kvantegravitation. Det er en kæmpe udfordring at formulere en teori, der forener de to store teorier indenfor fysikken: kvantemekanikken, der beskriver de tre subatomare kræfter, og almen relativitetsteori, der beskriver tyngdekraften. Forventningerne til en sådan teori er store – den skal bl.a.:

- kunne forene alle fundamentale vekselvirkninger
- beskrive singulariteterne i Big Bang og i centrum af sorte huller
- være konsistent og kompatibel med standard fysik
- forklare partiklerne i Standardmodellen og styrken af koblingerne mellem dem
- kunne gøre forudsigelser som kan testes med eksperimenter
- beskrive hele vores univers på længdeskalaer fra Planck-længden til hele det synlige univers (61 størrelsesordener), inklusive mørkt stof og mørk energi.

Forfatteren har igennem flere år (2011–2020) interviewet en række forskere, der arbejder med forskellige tilgange til kvantegravitation. I den 10 sider lange introduktion beskrives mange af de spørgsmål, som forfatteren har stillet forskerne, og som de har besvaret i større eller mindre grad. Nogle interviews er således ret lange (30 sider) og har referencer til litteraturen, mens andre er korte (1 side). Nogle af de første interviews er blevet redigeret og opdateret i redaktionsprocessen.

De forskellige tilgange til kvantegravitation som berøres, er omtalt i introduktionen: strengteori, loop kvantegravitation, kausale dynamiske trianguleringer, kausale mængder, ikke-kommutativ geometri og Hořava-Lifshitz gravitation.

Bogen skal ikke ses som et resume af hele forskningsfeltet, men snarere som en diskussion af synspunkter på forskellige aspekter af kvantegravitation, og personerne er håndplukket af forfatteren. Bogen er blevet til mens forfatteren tog sin ph.d.-grad i Danmark ved Niels Bohr Institutet. I samme periode etablerede han "Science & Cocktails", der kombinerer videnskabelige foredrag med musik, kunst og iskolde drinks. Det startede på Christiania i Den Grå Hal og er siden rykket videre til DR Koncerthuset, og har filialer i Bruxelles, Amsterdam og Johannesburg. I dag arbejder Jay Armas med højere-dimensionale sorte braner i Amsterdam.

I det følgende refereres nogle enkelte af de 37 forskerinterviews.

Jan Ambjørn er en dansk teoretisk fysiker, og han forklarer sin tilgang, som er kausale dynamiske trianguleringer. Her simuleres rummets kvantegeometri numerisk. Det er endnu kun tomt rum uden partikler og kun et par størrelsesordener større end Planck-længden. Når alle de mulige geometrier summeres ifølge kvantefeltteorien, fås en gennemsnitlig geometri der har samme egenskaber som de Sitter-rummet. Der er desværre langt til at beskrive partikler og interaktioner. Ambjørn erkender, at hverken strengteori eller hans tilgang har ført til nogen vigtige opdagelser, der handler om den verden, vi kan måle.

Nima Arkani-Hamed arbejder med strengteori, og han argumenterer for, at rum og tid går i opløsning på skalaer mindre end Planck-længden og Planck-tiden. Hvis man vil undersøge mindre skalaer, dannes der sorte huller, som afskærer os fra at vide noget om de små skalaer. Det glatte rum og den glatte tid vi kender, må derfor være emergent, dvs. rum og tid opstår fra nogle andre mere fundamentale størrelser. Dette er opsigtsvækkende, da al fysik bygger på en anvendelse af rum og tid. Arkani-Hamed fortsætter med at diskutere observable, spredning af partikler og korrespondancen mellem anti-de Sitter-rum og konforme feltteorier (AdS/CFT-korrespondancen), der godt kan redegøre for rum, tyngdekraft og strenge, men ikke tiden. Han kritiserer det traditionelle billede af en forenet teori, hvor de fire fundamentale kræfter forenes som i et puslespil. Han mener at gaugeteorier og tyngdekraften er én og samme ting, men man mangler at finde forbindelsen mellem dem i form af en dualitet i den holografiske beskrivelse. Dette interview udmærker sig ved, at Nima Arkani-Hamed ikke bare formidler teori, men også forklarer nogle forskelle på tilgangene samt hvilke problemer, der er dybe og hvilke, der blot er tekniske problemer omkring formalisme.

Abhay Ashtekar er en af ophavsmændene til loop kvantegravitation (LQG). LQG tager udgangspunkt i, at geometrien er kvantiseret og både tid og rum opstår fra kvantegeometrien som emergente fænomener. Det kan dog gøres på forskellige måder, og derfor kræves det at

teorien giver almen relativitetsteori i grænsen for store afstande. For at forklare partikler og vekselvirkninger studeres excitationer af kvantegeometrien, men de skal ses i forhold til en kanonisk kvantetilstand, som kan beskrive en flad baggrund af rumtid (Minkowski-rumtiden). Så for overhovedet at kunne forstå de ting, som teorien forudsiger, skal man finde et fikspunkt, som er det tomme rum, og allerede dette er vanskeligt i en fluktuerende rumtid. Indtil videre er det mest spin-2-partikler, fx gravitonen, der er studeret. Andre partikler kan måske beskrives via andre excitationer, der tilsammen danner et spin-netværk. LQG er blevet anvendt med nogen succes indenfor kosmologi, hvor singulariteten i fx Big Bang opløses. Når krumningen nærmer sig Planck-skalaen, opstår der en frastødende kraft, der stammer fra kvantegeometrien. Denne model er mest naturlig, hvis universet er cyklisk, dvs. vores Big Bang er et resultat af et tidligere kollaps eller Big Crunch. Igen testes teorien ved om den leder til en klassisk glat rumtid, når rummet udvider sig. Der begynder også at komme forudsigelser om strukturerne i den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling. Ashtekar kritiserer strengteoretikernes fokus på AdS/CFT, der hviler på en negativ kosmologisk konstant, og som slet ikke giver noget, der ligner tyngdekraften, men han anser det for vigtigt, at der er en kommunikation mellem de to tilgange, og at man forholder sig åben overfor nye idéer.

Alain Connes er matematiker og kendt for at have udviklet den ikke-kommutative geometri. Han har også arbejdet på at forstå, hvad renormalisering betyder matematisk. Renormalisering er en teknik, der fjerner uendelighederne i kvantefeltteori, så teorien kan give endelige – og dermed meningsfulde – resultater. Teknikken giver nu også mening matematisk, og involverer bl.a. gruppeteori, algebra og Feynman-grafer. Connes mener, at det er naivt at tro, at universet er beskrevet af et rumtidskontinuum beskrevet ved geometri. Han ønsker at udlede geometrien fra Hilbertrummet, der blev indført i kvantemekanikken af John von Neumann til at beskrive både reelle variable og diskrete tilstande, der ikke kommuterer. Denne egenskab blev allerede indført af Heisenberg til beskrivelse af impuls- (P) og positionsoperatorerne (Q), der ikke opfylder den kommutative lov: $P \cdot Q \neq Q \cdot P$. Dirac udvidede impulsoperatoren til at omfatte partiklernes spin. Connes forklarer, at i Riemanns geometri kan afstande defineres lokalt af et infinitesimalt linieelement. Men dette skal erstattes af en infinitesimal operator i Hilbertrummet, og det fører til, at afstande defineres gennem de kræfter, der binder partikler sammen, ligesom man gør i kvantefeltteori. Positionsoperatoren Q blev udvidet af bl.a. Connes i 2014, så den var mere "fleksibel", dvs. beskrevet ved komplekse tal og matricer, der ikke nødvendigvis kommuterer. Ved at indføre ikke-kommutativitet, har Connes og kolleger udledt en Lagrange-funktion, der kobler tyngdekraften med standardmodellens subatomare vekselvirkninger i et firedimensionalt rumtidskontinuum, hvor partiklerne har spin. En konsekvens er, at volumen er kvantiseret i Planck-volumener. Hvis man udregner virkningen fra den nye Lagrange-funktion, finder man Einsteins feltligninger, Yang-Mills-teorien og andre

gauge-felter herunder Higgs-feltet. Den kosmologiske konstant forsvinder pga. det kvantiserede volumen. Teorien virker lovende, men den repræsenterer kun første kvantisering, og siger endnu ikke noget om, hvad der sker over Planck-skalaen.

David Gross har arbejdet med strengteori siden slutningen af 1960'erne, og er strengteoriens grand old man. Han beskriver mere strengteori som en "ramme" end en egentlig teori. Man kan i princippet finde uendelig mange modeller eller løsninger, og det kommer meget an på hvilke startantagelser, man putter ind i rammen. De fleste løsninger beskriver verdener, som er meget ustabile, men der findes også løsninger, der beskriver alle partiklerne i vores verden – og mere til. For at reducere antallet af dimensioner, skal der også være supersymmetri, som må være brudt, da man endnu ikke har observeret supersymmetriske partikler i Large Hadron Collider. Gross håber, at supersymmetri findes, da det er en smuk udvidelse af kvantefeltteori, og den hjælper til at forene styrken af de fundamentale vekselvirkninger under Planck-skalaen. Det er et stort spørgsmål, om der findes nogle principper, der definerer hvilke af de uendelig mange streng-modeller der findes i virkeligheden. Hvis man ikke kan finde sådanne principper, er man tvunget til enten at acceptere, at de uendelig mange streng-modeller eksisterer side om side i et multivers eller, at der kun findes det ene univers, som vi lever i, og det er udvalgt gennem det antropiske princip. Ingen af disse to muligheder er tilfredsstillende, da de ikke kan testes.

Gerard 't Hooft ser mere kritisk på strengteori. Den kan fx ikke forklare, hvordan der bliver netop tre generationer af kvarker og leptoner og en positiv kosmologisk konstant. Der skal også være en god forklaring på, hvordan de ekstra dimensioner som strengteorien kræver, er rullet sammen, så de ikke kan observeres, og hvordan supersymmetri er brudt. Han kritiserer også, at kvantemekanikken kun kan beskrive verden ved hjælp af sandsynligheder. Ligesom Einstein mener han ikke, at tilfældighed kan være med i en ultimativ teori for verden. Den ultimative underliggende teori kan godt være deterministisk, men for kompliceret til at vi kan regne med den i detaljer. Vi kan derfor være nødsaget til at bruge statistiske egenskaber og begreber som "partikler" og "felter" for at beskrive, hvad der sker. Vi skal bare ikke tage partiklerne og de egenskaber, vi tildeler dem, for alvorligt. Denne måde at opfatte kvantemekanikken på er tidligere kaldt for "skjulte variable", der dækker over en kompliceret, men deterministisk underliggende fysik. Gerard 't Hooft har fx vist, hvordan man formelt kan beskrive et kvantesystem med et endeligt antal tilstande som et deterministisk dynamisk system, hvor de stabile periodiske baner svarer til kvantetilstandene. Dette virker for små kvantesystemer fx et heliumatom, men det bliver naturligvis alt for kompliceret at beskrive samtlige vekselvirkninger mellem alle de ca. 10^{80} partikler i Universet på denne måde. Kvantemekanikken med dens indbyggede indeterminisme kan i visse tilfælde give en statistisk beskrivelse, der er simplere. Men i bund og grund kan verden stadig godt være deterministisk.

Juan Maldacena er kendt for at have opstillet AdS/CFT-korrespondancen. Han fik idéen, da han forsøgte at finde en løsning på informationsparadokset i strengteori. Efter opdagelsen af D-braner, som minder om sorte huller, og efter at entropien af D-braner blev beregnet, fik han den idé at sammenligne entropien af D-braner med entropien af sorte huller. Det viste sig, at der i nogle tilfælde var en overensstemmelse. Ved at studere hvad der sker, når noget falder ind i et sort hul, fandt han nogle bestemte symmetrier i løsningerne på overfladen af det sorte hul, som beskrev et anti-de Sitter rum (AdS), dvs. et de Sitter rum med negativ krumning svarende til hyperbolsk geometri. Derefter fandt han ud af, at D-branen kunne beskrives ved en konform feltteori (CFT) i det indre af det sorte hul, og at løsningerne til denne teori var bestemt af de samme symmetrier. Han postulerede at der var en korrespondance mellem beskrivelsen i AdS-rummet og CFT-teorien. Denne korrespondance er senere bevist i mange andre situationer, og er blevet en central forbindelse mellem kvantefeltteorier, der beskriver partikler, og feltteorier baseret på bestemte geometriske rum, der bl.a. beskriver tyngdekraften.

Roger Penrose er matematisk fysiker. Han er ikke tilfreds med nogle af de forskellige fortolkninger af kvantemekanikken. Københavnerfortolkningen behandler måleapparatet som klassisk, selvom det er opbygget af de samme kvantepartikler, som det system man måler på. Mangeverdenfortolkningen hævder at en kat kan være død og levende samtidig, og hvis man skal måle én af delene, må observatørens opmærksomhed blive splittet op i to "verdener", der begge er lige virkelige. Penrose mener at man bør inddrage tyngdekraften i beskrivelsen af bølgefunktionen. Fx er ækvivalensprincippet ikke konsistent med superposition af kvantetilstande, der i geometrier med krumning leder til to forskellige tidslinjer. Disse to principper må tilpasses hinanden for at kvantemekanikken kan overleve. Kvantefeltteorier må også tilpasses. Penrose er desuden skeptisk overfor AdS/CFT-korrespondancen, der forbinder to vidt forskellige ting på en underlig måde, og korrespondancen er ikke bevist i matematisk forstand. Han forklarer sin idé om konform cyklisk kosmologi: I den fjerne fremtid, hvor universet er næsten tomt, kan man ikke skelne mellem store og små afstande (eller densiteter), og så kan universet som helhed sammenlignes med Big Bang-begivenheden. Dette kan føre til et nyt univers, men ikke efterfulgt af et Big Crunch som i det sædvanlige cykliske univers. En forudsigelse er, at store sorte huller, der smelter sammen i én cyklus, kan give aftryk i den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling i form af cirkler på store skalaer. Dette finder Penrose nogen støtte for i observationerne fra WMAP (kosmologer er dog skeptiske overfor resultaterne). Penrose grundlagde i 1967 twistor-teorien som er en kompleks geometri, der er egnet til at beskrive masseløse partikler med spin fx fotoner og gluoner.

Erik Verlinde betragter tyngdekraften som en "entropisk kraft". Einsteins feltligninger ligner ligningerne i termodynamik og hydrodynamik. Disse to teorier

bygger på en mikrofysik (atomer), men man kvantiserer ikke de to teorier for at studere atomer. Man arbejder med statistiske begreber, der er en konsekvens af mange partiklers vekselvirkninger. Ved at betragte entropien, forstået som informationen i faserummet for det underliggende system, kan man beskrive den effektive kraft ud fra makroskopiske variable. Tyngdekraften er dermed et mål for al den information, vi glemmer om mikrofysikken. Dette kaster bl.a. nyt lys på mørkt stof og mørk energi.

Steven Weinberg døde i juli 2021, men interviewet fandt sted allerede i 2011. Han forklarer, at man godt kan skrive en effektiv feltteori ned, der inkluderer alle de fundamentale kræfter, men den indeholder uendelig mange led. I praksis foregår partikelkollisioner ved energier, der er meget lavere end Planck-energien, så man kan skære de fleste led væk, herunder de vekselvirkninger der involverer tyngdekraften, som er ubetydelige. Effekter af kvantegravitation optræder først ved kollisionsenergier tæt på Planck-energien. Kvantefeltteori forudsiger, at vakuumenergien burde være mange størrelsesordener (120) større end den værdi, astronomer har observeret. Weinberg skrev en oversigtsartikel om dette i 1989. Han fandt ikke, at der var noget fundamentalt princip, der krævede at konstanten var omkring 120 størrelsesordener mindre end teorien forudsiger. Det bedste bud er måske det antropiske princip, der blot siger, at vi lever i et univers hvor konstanten er tilpas lille, da vi ikke ville eksistere i et univers, hvor den var meget større, idet galakser (plus stjerner og liv) så ikke ville blive dannet.

I nogle interviews berøres noget af den kritik, der bliver rettet mod forskningen, fx at strengteorien dominerer den teoretiske fysik, så det er vanskeligt at få lov til at arbejde med alternative tilgange. Hele feltet kritiseres for ikke at komme med nogle forudsigelser, der kan testes i eksperimenter. Uden resultater bliver det sværere at argumentere for bevillinger til teoretisk fysik, der konkurrerer med andre felter, som leverer resultater med en kortere tidshorisont. Strengteoretikerne forsvare sig og kritiserer de andre tilgange for ikke at være fundamentale nok.

Det er en omfattende samling af interviews, der er meget spændende og fyldt med kritiske spørgsmål. Svarene er til tider morsomme. Forskernes forskelligartede bidrag giver et interessant billede af den aktuelle forskning, og der er mange eksempler på nogle af de brydninger, der er mellem forskellige tilgange. Forskningen er som en debat, der løber over mange år. De første interviews blev foretaget for godt ti år siden og er blevet redigeret med bl.a. tilføjelse af referencer.

Bogen henvender sig til både forskere og andre interesserede. De fleste interviews er på et ret højt niveau, og man får størst udbytte, hvis man har fulgt lidt med i forskningen. Der er stof nok til mange timers læsning. Hvis man har appetit til mere, kan man opsøge nogle af de mange referencer til den videnskabelige litteratur, hvor de omtalte teorier er beskrevet mere teknisk.

Rutherfordspredning

– breddeopgave 95 med didaktisk kommentar

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 to nye opgaver. Opgaven i sidste nummer af Kvant var denne breddeopgave (nr. 95 i rækken her i Kvant):

Breddeopgave 95. Rutherfordspredning

En α -partikel skydes, som vist på figuren, ind i nærheden af en tung atomkerne. Find ved en dimensionsanalyse den dimensionsløse størrelse, der bestemmer vinklen mellem retningerne, som α -partiklen bevæger sig i, før og efter afbøjningen ved passagen af atomkernen.



Løsning

Atomkernens positive ladning kaldes Ze , hvor Z er antallet af protoner i kernen, og e er hver protons ladning. α -partiklens ladning er $2e$. Da den også er positiv, frastøder atomkernen α -partiklen ved dens passage. Frastødningen under passagen er givet ved Coulombs lov $F = kr^{-2}$, hvor $k = 2Ze^2/(4\pi\epsilon_0)$. ϵ_0 er dielektricitetskonstanten i vakuum, og r den varierende afstand mellem kerne og α -partikel under passagen. Afbøjningsvinklen må afhænge af k . Større k , større vinkel. Afbøjningsvinklen må også afhænge af, hvor nær α -partiklen er skudt ind imod kernen. Det kan karakteriseres ved den såkaldte stødp parameter, b , som er den vinkelrette afstand mellem den retlinjede forlængelse af pilen på figuren og kernen. Større b , mindre vinkel. Ligeledes må afbøjningsvinklen afhænge af α -partiklens fart, v , og masse, m . Større fart, mindre afbøjning. Større masse, mindre afbøjning. Men så afhænger afbøjningen heller ikke af mere.

Vi skal altså finde en dimensionsløs kombination af k , b , v , og m . Fra $F = kr^{-2}$ findes dimensionen af k : $[k] = [F][r^2] = \text{M L T}^{-2} \text{L}^2 = \text{M L}^3 \text{T}^{-2}$. Og følgelig: $[k/m] = \text{L}^3 \text{T}^{-2}$. Og: $[k/(mv^2)] = \text{L}$. Således at

$$\frac{k}{mv^2b} = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 mv^2b} \quad (1)$$

er den dimensionsløse størrelse, der bestemmer vinkelafbøjningen af α -partiklen. Da alle potenser af en dimensionsløs størrelse også er dimensionsløse, og da

dimensionsanalysen efterlader os med en ukendt numerisk talfaktor, kan vi ikke påstå, at afbøjningsvinklen er givet ved (1). Men det ses af udledningen, at den entydigt er en funktion alene heraf.

Kommentar

Figuren kan også repræsentere en komet, der nærmer sig en tung stjerne. Modsat atomkernens frastødning af α -partiklen, tiltrækker stjernen kometen. Men ellers er situationen analog. Så lad os ved dimensionsanalyse finde, hvad der bestemmer kometens afbøjningsvinkel ved passagen af stjernen. Tiltrækningen under passagen er givet ved Newtons gravitationslov $F = kr^{-2}$, hvor $k = GMm$. G er den universelle gravitationskonstant, M stjernens masse, m kometens masse, og r den varierende afstand mellem stjerne og planet under passagen. Imidlertid afhænger afbøjningsvinklen nu ikke af k , svarende til den ovenstående analyse, men af $k/m = GM$. Det skyldes, at m i dette tilfælde indgår ens på begge sider af Newtons anden lov, og derfor udgår af en beregning. Men altså større GM , større afbøjning. Og afbøjningsvinklen må som før afhænge af b og v . Større b , mindre vinkel. Større v , mindre vinkel. Men så afhænger afbøjningen ikke af mere.

Hvis vi, svarende til opgaven om Rutherfordspredning, ved dimensionsanalyse vil finde den dimensionsløse størrelse, der bestemmer vinklen mellem retningerne, som kometen bevæger sig i, før og efter afbøjningen ved passagen af stjernen, skal vi altså lede efter en dimensionsløs kombination af GM , b og v . Da $[GM] = [F][r^2]/[m] = \text{M L T}^{-2} \text{L}^2/\text{M} = \text{L}^3 \text{T}^{-2}$ ses

$$\frac{GM}{v^2b} \quad (2)$$

at være den efterspurgte dimensionsløse størrelse.

Hvis vi inden for rammerne af Newtons mekanik antager, at lys har masse, findes lysets afbøjning ved passagen af en stjerne tilsvarende dimensionsanalytisk at være bestemt af

$$\frac{GM}{bc^2}, \quad (3)$$

hvor c er lysets hastighed. En beregning inden for rammerne af den generelle relativitetsteori giver en faktor 2 større afbøjningsvinkel end beregningen ifølge Newtons mekanik. Men det dimensionsanalytiske resultat (3)

gælder ligegodt her, da inputvariablene i begge tilfælde er de samme, GM , b og c .

Den største udfordring ved dimensionsanalyse er at afgøre hvilke inputvariable, der styrer et givet fænomen. Som en morsomhed siges det under tiden, at analysen kun lader sig gøre, hvis man i forvejen kender svaret på det stillede spørgsmål. Det mener jeg ikke er rigtigt. Men det er rigtigt, at man skal have nogle grundlæggende forståelser og begreber på plads i forvejen. Man kan derfor spørge til det hensigtsmæssige i at betjene sig af dimensionsanalyse, når der er tale om introducerende undervisning.

Med udledningen af de tre analoge udtryk (1), (2) og (3) for tre forskellige slags naturfænomener har jeg forsøgt at illustrere, hvorfor jeg synes, at netop dimensionsanalyse med dertil hørende udfordringer er en god ingrediens i introducerende undervisning. Det er afgørende i introducerende undervisning, at få skabt indledende nysgerrighed og begrebsforståelse hos de studerende, som forudsætning for det beregningstekniske, før det overskygger begrebsforståelsen. Og dimensionsanalysens efterspørgsel efter styrende inputvariable er netop velegnet til at holde fokus på overblik og begrebsforståelse.



Breddeopgave 96 og 97. Lodret frit fald

Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne overveje løsningerne til disse to opgaver fra breddekursen på RUC (fra eksamen januar 2008 og eksamen juni 2020, nr. 96 og 97 i rækken her i Kvant):

Ifølge Galilei skulle Aristoteles have ment, at en sten, tabt fra toppen af masten på et skib i fart, vil lande et stykke henne ad dækket, hvorimod Galilei var sikker på, at stenen lander for foden af masten. Er afstanden imellem de to formodede landingssteder til at konstatere? Begrund svaret.

På grund af Jordens rotation om sin egen akse falder en tabt sten fra det ca. 100 m høje rådhusårn i København ikke lodret ned til tårnets fod, selvom den ikke fik noget sidelæns skub, da den blev tabt. Hvorfor det? Kan det måles? Begrund svarene.

Løsninger og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Breddeopgaver løst og kommenteret i Kvant 2000–2021

I samarbejde med Kvant har vi nu på RUC udgivet IMFUFA tekst nr. 517, som indeholder mine løste og kommenterede breddeopgaver i Kvant fra marts 2000 til december 2021. Det drejer sig om 94 opgaver. I takt med, at der fremover bringes nye opgaver i Kvant, vil de løbende blive tilføjet til teksten.

Samlingen af Kvantartikler gennem årene er lavet til undervisningsbrug på RUC. Men andre er også velkomne til at læse med. For at læseren skal kunne lede efter løsning og didaktisk kommentar til en bestemt opgave, er opgaverne i indholdsfortegnelsen angivet hver for sig. Også i de tilfælde, hvor flere opgaver er behandlet i samme artikel.

Jeg er Finn Berg Rasmussen tak skyldig for de fleste af årene at have leveret opsætningen af artiklerne i Kvant. Ligeledes er jeg Bo Jakobsen med assistance af Mette C. Nielsen tak skyldige for at have stået for opsætningen af IMFUFA teksten.

Teksten findes på linket:
<http://thiele.ruc.dk/imfufatekster/pdf/517.pdf>.

IMFUFA tekst 504a og 504b indeholder den fulde samling af 830 breddeopgaver (på dansk og engelsk) til og med sommereksamen år 2020. Tilsvarende samlingen af Kvant artikler opdateres den løbende med nye eksamensopgaver fra *Problem Solving in Physics* (bredde)-kurset på RUC.

Spørg Kvant



Kvant imødekommer nu et læserønske om at få en brevkasse i bladet, og vi er glade for, at lektor emeritus Malte Olsen har indvilliget i at være bestyrer af brevkassen. Malte Olsen har arbejdet i Marsgruppen, lavtemperaturgruppen og acceleratorgruppen på Niels Bohr Institutet.

Dit spørgsmål skal handle om fysik, geofysik eller astronomi samt være kort og præcist. Send dit spørgsmål til: Spoergkvant@kvant.dk.

Udvalgte spørgsmål bliver bragt i Kvant. Vi besvarer ikke anonyme spørgsmål, så du skal angive navn og adresse, men du kan skrive, at du kun vil præsenteres med dine initialer, hvis dit spørgsmål bliver trykt.

Der kan gå nogen tid, inden du får svar, så brevkassen er ikke egnet til akutte tilfælde, hvor der fx er brug for hurtig hjælp til en skoleopgave.

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Apr 2022				
2/4		Generalforsamling i Astronomisk Selskab		
4/4	19.45	Hurtige radioglimt og hvordan de kan gøre det usynlige intergalaktiske stof synligt	Kasper Heintz	AS (Aarh)
4/4	19.30	Sten og skrot fra rummet Efter foredraget afholdes generalforsamling	Anja C. Andersen og Henning Haack	SNU
Maj 2022				
2/5	18.15	Molekyler i rummet mellem stjernerne	Liv Hornekær	AS (Kbh)
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
16/5	19.45	Molekyler i rummet mellem stjernerne	Liv Hornekær	AS (Aarh)
Sep 2022				
5/9	19.30	Kvanteinformation, kvantecomputere og kvanteinternettet	Anders Sørensen	SNU
26/9	19.30	Kvantemekanikken – atomernes vilde verden	Klaus Mølmer	SNU
Okt 2022				
24/10	19.30	Uddeling af Kirstine Meyers Mindelegat med foredrag af modtageren		SNU
Nov 2022				
14/11	19.30	“Kogt spaghetti i en jacuzzi” – om proteinkrystallografi	Johan Gotthardt Olsen	SNU
15/11 -16/11		Årsmøde i Dansk Fysisk Selskab på Hotel Nyborg Strand		DFS
Dec 2022				
5/12	19.30	Titel kommer senere. Efter foredraget uddeles H.C. Ørstedmedaljen til en inspirerende gymnasielærer		SNU

AS (Kbh): Astronomisk Selskab, City Campus, 1353 København K (astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astronomisk Selskab, Aarhus Universitet, Ny Munkegade 118, 8000 Aarhus C (bygning 1530., lokale G122).

DFS: Dansk Fysisk Selskab (dfs.nbi.dk).

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

Foredragsrække om Tycho Brahes Supernova

I 2022 fejrer vi 450 års jubilæet for Tycho Brahes opdagelse af en supernova i stjernebilledet Cassiopeia den 11. november 1572 fra Herrevad i Skåne. Til efterårets foredragsrække har Astronomisk Selskab derfor samlet en stjernehæfte af eksperter, der kan belyse omstændighederne omkring og betydningen af Tycho Brahes opdagelse. Vi vil se på, hvordan Tycho Brahes supernova ser ud idag samt belyse, hvad forskningen i disse såkaldt termonukleare supernovaer særligt er fokuseret på.

1) Professor emeritus Helge Kragh: Astronomien på

Tychos tid.

2) Bibliotekschef og lektor Bertil Dorch: “De Stella Nova” og Tycho Brahes andre bevarede skrifter.

3) Lektor Maximilian Stritzinger: Forskning i termonukleare supernovaer idag.

4) Seniorforsker Desiree Della Monica Ferreira: Supernovaresten efter Tychos supernova og andre supernovaresten observeret i Röntgenstråling.

5) Lektor Charles Steinhardt: Type Ia-supernovaer og kosmologien.

Tid og sted bliver annonceret i næste nummer af Kvant samt på www.astronomisk.dk/arrangementer/foredrag/

Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson, Kvant

Kvantekryptering i banken

KVANTEFYSIK. For første gang i Norden er det lykkedes forskere fra DTU Fysik sammen med konsulentfirmaet KPMG at overføre kvantekrypteret data sikkert mellem to computere hos Danske Bank.

Teknologien er dermed rykket fra laboratoriet og ud i den virkelige verden, hvilket ikke har været helt let. Det var en udfordring at integrere elektronik og optik, og sikre, at de optiske komponenter var uafhængige af temperaturen omkring dem. Desuden skal kvanteteknologien være kompatibel med det optiske fibernet.

Kvantekryptering går ud på at skabe en sikker og hemmelig nøgle mellem afsender (Alice) og modtager (Bob), som kun de to deler. Nøglen kan så bruges til at kryptere og aflæse beskeder sendt mellem Alice og Bob. De nøglen og dataoverførslen foregår kvantemekanisk kan det opdages, hvis en hacker (Eva) forsøger at aflytte dataoverførslen, da hun ved at gøre dette vil ændre kvantetilstanden af data, hvilket Alice og Bob kan konstatere. Det er kendt, at en måling i kvantemekanikken ændrer på partiklens kvantetilstand, og hvis Eva måler på flere partikler, vil hun introducere fejl i nøglen, hvilket Alice og Bob kan opdage, når de efterfølgende sammenligner tilfældigt udvalgte målinger. Det er heller ikke muligt for Eva at skabe en ny kvantemekanisk partikel med præcis de samme egenskaber, som den hun målte (dette kaldes *no cloning theorem*).

Kvantekryptering er beskyttet af kvantemekanikkens love og er derfor en sikker måde at overføre data på. Klassisk kryptering er baseret på sværhedsgraden ved at udregne matematisk komplicerede funktioner, og en klassisk kryptering kan derfor brydes af meget kraftfulde computere. Da computerne i dag bliver bedre og bedre er der et behov for kvantekryptering til at overføre data sikkert.

Forskerne har vist, at teknologien er klar til at komme ud af laboratoriet, men den skal nu udvikles, så den kan køre selv uden menneskelig indblanding. Kvantekryptering er før demonstreret bl.a. mellem en satellit og flere stationer i Kina og i Østrig i 2018.

Kilde: DTU nyheder, 23. februar 2022.

Ikke-newtonsk teori udfordret

ASTROFYSIK. Det er kendt, at stjernerne i galakser bevæger sig så hurtigt, at Newtons tyngdelov og Einsteins relativitetsteori ikke kan forklare hastigheden. Tyngdekraften fra det synlige stof kan ikke holde stjernerne på plads i deres baner med de observerede hastigheder, og den foretrukne teori er, at det er tyngdekraften fra mørkt stof, som får stjernerne til at bevæge sig med så høje hastigheder.



Mørkt stof er som bekendt endnu ikke observeret, og har givet plads til alternative forklaringer. En af disse er en modificering af Newtons tyngdelov kaldet MOND (MODified Newtonian Dynamics), som siger, at Newtons og Einsteins teori skal ændres for at beskrive galakserne. MOND-hypotesen er 40 år gammel, men var fokus i et studie fra 2016, der viste, at den kunne forklare rotationskurverne for en gruppe på 176 galakser.

Det studie har en gruppe fysikstuderende på SDU nu været med til at udfordre. Deres studie bygger på en metode til at skelne galakseres rotationskurver for mørkt stof-teorien fra MOND-hypotesen. De kunne nu vise, at MOND-hypotesens konsekvenser for stjernernes bevægelse i det inderste af galakserne ikke stemmer overens med målingerne af rotationskurverne. MOND-hypotesen efterlader nemlig et aftryk i de stjerner der er tættest på galaksernes centrum, men det aftryk findes ikke i de eksisterende data. De SDU-studerende mener derfor, at Newtons og Einsteins teori stadig gælder i galakser, og at der eksisterer en stor mængde mørkt stof, som påvirker stjerners bevægelse.

Kilde: M.H. Eriksen m.fl. (2021) "A cusp-core-like challenge for modified Newtonian dynamics", *Astronomy&Astrophysics*, bind 656, side A123