

KVANT December 4 2014

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 25. årgang

- FYSIK OG ARDUINO
- HANSEN OG MÅNEN
- BRORFELDE OPLEVELSESCENTER
- OLE RØMER OG DEN NATURVIDENSKABELIGE REVOLUTION
- EINSTEINS ODYSSÉ: FRA SPECIEL TIL ALMEN RELATIVITETSTEORI
- BREDDEOPGAVER OM FOTONSPREDNING OG PUCK KOLLISIONER
- H.C. ØRSTED MEDALJE TIL INSPIRERENDE GYMNASIELÆRER
- ÅBNING AF LYSETS INTERNATIONALE ÅR 2015
- KVANT-NYHEDER

Løssalgpris: 50 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

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,
Dansk Geofysisk Forening,
Selskabet for Naturlærens Udbredelse,

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.),
Christianshavns Gymnasium
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Jens Olaf Pepke Pedersen,
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh
Torben Westerberg (korrektur)

Abonnementspris : 180 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Henvendelser vedr. abonnement til Christine Pepke Pedersen: christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncer

1/1 side: 3600 kr, 1/2 side: 2400 kr
1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale i farver. Henvendelser om annoncer til redaktøren på: kvant@kvant.dk (tlf. 22 67 26 42).

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri ApS.
Oplag: 2200.

Produktionsplan

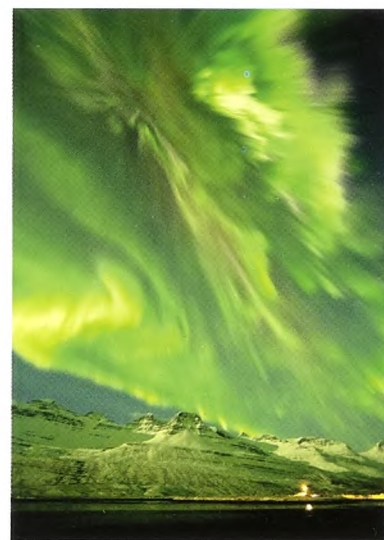
Nr. 1-15 udkommer ca. 15. marts
Nr. 2-15 udkommer ca. 15. maj
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Ole Rømer og 1600-tallets naturvidenskabelige revolution <i>Mads P. Macholm</i>	3
Hansen og Månen <i>René Michelsen</i>	9
Brorfelde Observatorium åbner som oplevelsescenter <i>Julie K.L. Bouchet og Mia B. Olsen</i>	15
Planetkalender for København 2015 <i>Martin Götz</i>	18
Foreningsnyt – foredrag i foråret 2015	19
Einsteins odysse: Fra speciel til almen relativitetsteori <i>Helge Kragh</i>	20
Elastisk fotonspredning på atomer og puck kollisioner – breddeopgave 61 og 62 med didaktisk kommentar <i>Jens Højgaard Jensen</i>	25
KVANT-nyheder <i>Sven Munk</i>	27
H.C. Ørsted medalje til inspirerende gymnasielærere <i>Hans Lindemann og Cecilie M.K. Pedersen</i>	29
Anmeldelse: Rummet – Vild med Viden <i>Michael Quaade</i>	29
Fysik og Arduino <i>Jan Boddum Larsen</i>	30
Besøg med klassen på Niels Bohr Institutet <i>Michael Quaade</i>	35
Åbning af Lysets Internationale År 2015 <i>Jørgen Schou</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden viser nordlys fotograferet på Island den 8. marts 2012 under en solstorm. Billedet blev anvendt i en nyhed fra NASA om solaktiviteten. Fotograf: Jónína G. Óskarsdóttir.

I dette nummer er der flere artikler om *videnskabshistoriske emner*. Først en artikel om Ole Rømers bidrag på instrumentområdet til den naturvidenskabelige revolution og derefter en fortælling om den danske astronom Peter Andreas Hansen. Næste år er det 100 år siden, at Einstein formulerede sin almene relativitetsteori. Vi tager forskud på dette jubilæum med en artikel om vejen fra den specielle til den almene relativitetsteori. Dette intellektuelt krævende arbejde var en sand odysse og gav Einstein mange grå hår i hovedet.



KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle landets gymnasier, seminarier og HTX-kurser med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik og Kemi (SDU), Institut for Fysik og Nanoteknologi (AAU), DTU Nanotech, DTU Fotonik og DTU Fysik.

Ole Rømer og 1600-tallets naturvidenskabelige revolution

Af Mads Peter Macholm, Gammel Hellerup Gymnasium

Den danske videnskabsmand og kongelige administrator Ole Rømer (1644-1710) levede i en tid med store brydninger i Europa. 1600-tallet er århundredet for religiøse stridigheder mellem katolikker og reformerte, enevældens indførelse og konsolidering, og ikke mindst den naturvidenskabelige revolution. Var Ole Rømer en del af den naturvidenskabelige revolution? Og kan vi komme tættere på videnskabsmanden Ole Rømer, ved at se ham i lyset af denne store omvæltning i menneskelig tænkning og videnskabelig praksis?

Ole Rømers liv i tre faser

De ydre omstændigheder omkring Ole Rømers liv ligner en dannelsesroman på formen hjem-ude-hjem. Første fase fandt sted i København, hvor han kom til fra Århus i 1662, 18 år gammel og klar til studier ved Københavns Universitet. I København blev han indlogeret hos hans vejleder Rasmus Bartholin (1625-1698), som var professor i matematik og astronomi, og blev dermed, som det var almindeligt på den tid, "domesticus" hos professoren. Sammen med Bartholin kom Rømer til at arbejde flere år på at få renskrevet og udgivet Tycho Brahes efterladte protokoller.

Samtidig var der fra det videnskabelige akademi i Paris, Académie royale des sciences, udgået en videnskabelig ekspedition mod Uraniborg på Hven med det formål at bestemme Tycho Brahes observatoriums nøjagtige position. Den franske astronom og geodæt Jean Picard (1620-1682) stod for opgaven. Rejsen gik over København, hvor Picard mødte Bartholin og Rømer. Den unge Ole Rømer deltog i arbejdet med at bestemme Uraniborgs position ved hjælp af triangulering og observationer af Jupiters inderste måne Io.

Senere anmodede Picard Bartholin om, at tage Rømer med sig tilbage til Paris, hvor han skulle fungere som Tycho Brahe-ekspert. Her startede anden fase af Rømers liv i 1672. I Paris blev han efter nogen tid optaget i akademiet, og han viste sig som et af dets flittigste medlemmer. Akademiets opgave var tredelt: Det skulle løse opgaver for kongemagten, kaste glans over samme, og arbejde med aktuelle videnskabelige problemer, særligt indenfor astronomi og mekanik. I Paris boede og arbejdede Ole Rømer i 9 år indtil han i 1681 blev "headhundet" tilbage til København af den danske konge, som havde hørt om Rømers meritter og havde brug for en vandforsyningsingeniør.

I København tilbragte Rømer tredje og sidste fase af sit liv. I dagtimerne løste han et hav af opgaver for den danske enevælde og varetog en række hverv, bl.a. rektor for Københavns Universitet, Borgmester i København og højesteretsdommer. I fritiden, dvs. primært om natten, plejede han sin hobby: Astronomien. Ole Rømer skabte sig en flot karriere i København og fik sat sit præg på enevældens modernisering af Danmark omkring 1700, mens de rent videnskabelige arbejder gled i baggrunden.



Figur 1. Ole Rømer (ø.tv.) og hans tre "læremestre". Bartholin (ø.th.) åbnede døren ind til matematikkens verden, Brahe til observationsastronomiens, og Picard indførte Rømer i tidens bedste astronomiske udstyr og teknikker.

Alt dette er der skrevet en del om, bl.a. i "Dansk naturvidenskabs historie"[1], og i en stor Ole Rømer udgivelse fra 2001 [2]. Men der mangler en større kontekst til billedet af Ole Rømer, og her er det værd at kigge på den naturvidenskabelige revolution. Den udgør nemlig en sådan kontekst, og ved at se Rømer i lyset af denne proces, får vi et klarere billede af ham som videnskabsmand. Det er derfor først nødvendigt, at definere hvad den naturvidenskabelige revolution var.

Tre fortolkninger af den naturvidenskabelige revolution

Den naturvidenskabelige revolution er et begreb, de fleste med interesse for naturvidenskab eller historie kender til, og det anvendes ofte til at beskrive en udvikling eller tidsperiode. I virkeligheden er begrebet dog langt fra nogen fast størrelse – videnskabshistorikere

diskuterer fortsat, hvad den naturvidenskabelige revolution handlede om. Jeg vil her skitsere tre forskellige fortolkninger af den naturvidenskabelige revolution, som jeg vil kalde version "1.0", "2.0" og "3.0". Først en "klassisk", idehistorisk, udgave af begrebet (1.0), dernæst en mere praksisorienteret udvidelse af dette begreb, hvor jeg vil fokusere på det videnskabelige instrument (2.0), og til sidst en aktuell nyfortolkning af begrebet (3.0).

Den naturvidenskabelige revolution 1.0 ("Classic")

Det var en fransk/russisk idehistoriker, der i midten af forrige århundrede lagde grunden til det, vi normalt forstår ved den naturvidenskabelige revolution. Hans navn var Alexandre Koyré og hans "fortælling" om den naturvidenskabelige revolution handlede om ideer. Han tog udgangspunkt i en "teoriernes kamp" mellem det gamle verdensbillede repræsenteret ved Aristoteles, og det nye repræsenteret ved bl.a. Galileo Galilei (1564-1642), René Descartes (1596-1650) og Isaac Newton (1673-1727). Koyré pointerede, at den videnskabelige revolution ikke "bare" var en proces, hvor store mængder ny viden kom til og erstattede den gamle. Selve rammen for vores viden, altså måden vi forstår verden på, blev udskiftet. Men Koyré gik videre end det, han opsatte et klart skel imellem teori og praksis. Han skrev i 1943:

"Good physics is made a priori. Theory precedes fact. Experience is useless because before any experience we are already in possession of the knowledge we are seeking for."

I Koyrés optik kom teori altså før eksperimentet. Sidstnævnte spillede en underordnet rolle, som efterprøvnings af de matematisk frembragte love. Den naturvidenskabelige revolution var altså en tankernes revolution, som fandt sted oppe i hovederne på et par store tænkere [3].

Udvidelsen af begrebet. Den naturvidenskabelige revolution 2.0

I kølvandet på Koyrés forskning kom en række videnskabshistorikere på banen med en række udvidelser af Koyrés "smalle" definition af den naturvidenskabelige revolution. Disse udvidelser bestod i, at man nu bl.a. inddrog eksperimentet, videnskabens popularisering (gennem udgivelser og de videnskabelige akademier), religionens rolle og samspillet mellem videnskab og samfund i beskrivelsen af den naturvidenskabelige revolution. I forlængelse af eksperimentet kom også det videnskabelige instrument i fokus.

Instrumentet gennemgik en voldsom udvikling i løbet af 1600-tallet. Det gik fra at være en kuriositet, man var utilbøjelig til at tage seriøst, til at blive en anerkendt del af al naturvidenskab. Samtidig var instrumentet ikke blot et værktøj til at teste teorier eller afprøve ideer. Den amerikanske videnskabshistoriker Albert van Helden udtrykker det sådan:

"Because instruments determine what can be done, they also determine to some extent what can be thought. Often the instrument provides a possibility; it is an initiator of investigation."

På den måde opstod en vekselvirkning mellem viden og eksperiment. Ideernes verden var ikke hævet over erfaringens. Før havde abstraktion i form af matematik og praksis i form af eksperimenter altid levet adskilt, men nu gjorde instrumentet det muligt at lukke kløften imellem dem. Med den naturvidenskabelige revolution 2.0 kom instrumentet på den måde til at spille en langt større rolle.

Siden van Helden's forskning [4] er en række andre aspekter af den naturvidenskabelige revolution blevet belyst, og som følge af dette er begrebet blevet noget udvandet. Det ville den hollandske videnskabshistoriker Floris Cohen gøre noget ved, og i 2010 udgav han, efter mange års research, en ny samlet fortolkning af den naturvidenskabelige revolution.

En ny fortolkning. Den naturvidenskabelige revolution 3.0

Cohen ønskede at skrive et nyt "narrativ", som kunne inddrage flere aspekter end Koyrés, men som samtidig formåede at holde fokus og evnen til at forklare en kompleks udvikling uden for mange hjælpehypoteser. I sit store værk søger Cohen svar på, hvordan man kan sige, at naturvidenskaben opstod i 1600-tallet, hvorfor den "overlevede fødslen" og ikke blev slået tilbage af reaktionen, samt hvorfor den opstod i Europa og ikke i Asien eller Mellemøsten [5].



Figur 2. Cohens "How modern science came into the world" findes også i en forkortet tysk udgave.

Bogens fundament er tre lærdomstraditioner, eller tilgange til naturerkendelse (skoler kunne man også kalde dem), og seks transformationer som disse gennemgik og som tilsammen udgjorde den naturvidenskabelige revolution. Transformationerne forløb sideløbende over to omgange: Tre i første halvdel af 1600-tallet og tre i århundredets sidste halvdel.

To af skolerne var opstået i antikken. Den ene, "Alexandria", var matematisk og fokuserede på beskrivelser. Den anden, "Athen", var naturfilosofisk (fysisk) og arbejdede med årsagsforklaringer. Den tredje skole

var empirisk og opstod først i 1500-tallet. Galilei var hovedmanden bag den første transformation, da han fik drejet “Alexandria” i en mere virkelighedsnær retning, hermed opstod “Alexandria Plus”. Descartes stod primært bag transformationen af den gamle naturfilosofi til en ny i “Athen Plus” og Francis Bacon (1551-1626) var arkitekten bag transformationen fra observation til “opdagende eksperiment”. Senere smeltede den matematiske og filosofiske tilgang sammen til en “matematisk mekanisk filosofi”, mens den filosofisk eksperimentelle tilgang blev til “det baconske bryg”. Den sidste transformation skete, da Newton lykkedes med at kombinere alle skolerne og deres resultater i én stor omfattende teori.



Figur 3. Cohens narrativ udtrykt som et diagram med årstal nederst og Cohens tre skoler yderst til venstre og de seks transformationer gående med pilene mod højre.

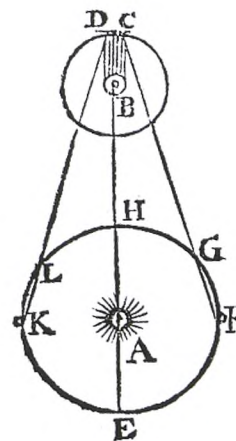
Cohens model er interessant, men den kan virke lidt firkantet og kunstig, med tendens til at sætte videnskabsmændene i bås. Men dette er svært at undgå, når man skal have et større narrativ til at hænge sammen. Til gengæld lykkes det Cohen at inddrage både videnskabelige netværk og politiske faktorer såsom trediveårskrigen i sin model.

Nu vender vi tilbage til Ole Rømer. Hvilken af de tre fortolkninger af den naturvidenskabelige revolution (forkortet “DNR”) er han en repræsentant for? Og hvilke(n) kan kaste nyt lys over Rømer som videnskabsmand?

Kampen om verdensbilledet (Rømer i DNR 1.0)

Ole Rømer er ikke levnet meget plads i den klassiske udgave af den naturvidenskabelige revolution. Koyré nævner ham ikke i sine større værker, og det er der en god forklaring på. For det første var Ole Rømer ikke teoretisk nok – han var mere praktiker end tænker – og for det andet formåede han nærmest ikke at publicere noget i sin levetid. Men Ole Rømer deltog faktisk i kampen om verdensbilledet, dog på en meget indirekte måde.

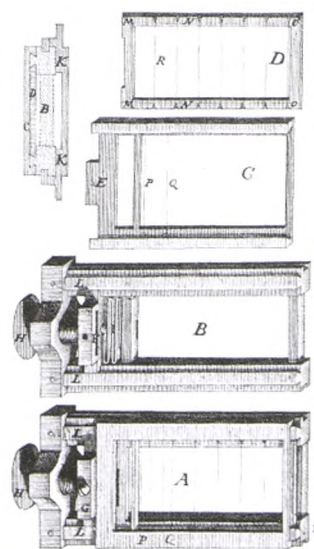
I hans opdagelse af “lysets tøyen” i 1676 (se figur 4) og i arbejdet med den årlige fiksstjernerparallakse bidrog Rømer nemlig til at stadfæste det kopernikanske verdensbillede. Men drog aldrig selv filosofiske slutninger af sine undersøgelser, og han undlod åbent at tilslutte sig Kopernikus’ system. Derfor passer han ikke ind i den klassiske idéhistoriske version af den naturvidenskabelige revolution. Den udvidede, praksisorienterede forståelse af den naturvidenskabelige revolution passer derimod bedre til Rømer.



Figur 4. Illustration fra Rømers afhandling om lysets tøyen. Solen (A) omkredset af Jorden (FGHLKE) med Jupiter i toppen (B) og Io (DC) i omløb. Fra Jorden måler man kortere omløbstider for Io, når Jorden nærmer sig Jupiter (FG), og længere omløbstider når Jorden bevæger sig væk fra Jupiter (LK).

Perfektionering af instrumenter (Rømer i DNR 2.0)

Ole Rømer var instrumentdesigner. Han tegnede og konstruerede talrige instrumenter, herunder teleskoper, vægte, mikroskoper, ure, tandhjul og termometre. Ser man på Rømers instrumenter og på hans videnskabelige arbejde i det hele taget, kan man hurtigt få et indtryk af vilkårlighed – han har arbejdet i øst og vest. Men nøglen til at forstå Rømers arbejde ligger i et arkiv tilhørende det franske akademi. Ved akademiets oprettelse i 1666 blev hollænderen Christiaan Huygens (1629-1695) sat til at udarbejde et arbejdsprogram, og punkt 6 i dette program lød: “At perfektionere kikkerter og mikroskoper”. “Perfektionering” betød først og fremmest forbedret præcision, og netop præcision var en vigtig del af Rømers virke – ikke mindst i instrumentkonstruktionen. Men i perfektionering ligger også et andet aspekt, nemlig at forbedre selve brugen af instrumenterne. Gøre dem lettere at håndtere og søge at undgå fejl. Lad os se på et par af Ole Rømers instrumenter.



Figur 5. Kobberstik af Ole Rømers mikrometer.

Mikrometret var et tilbehør, som gjorde det muligt at måle afstande gennem teleskopet. Det skulle indsættes i teleskopets brændplan og bestod af en ramme med en række vertikale silketråde, som kunne forskydes ved hjælp af en skrue med tilhørende måleskala. Med mikrometret fik man nogle sigtelinjer, som kunne flyttes og give en præcis aflæsning af himmellegemernes positioner og størrelser. Denne tilføjelse, samt trådkorset omdannede kikkerten fra et simpelt forstørrelsesglas til et præcisionsinstrument. Det var ikke Rømer, der opfandt mikrometret, men han forbedrede instrumentet både hvad angår præcision og praktisk brug.

De smukke planetmaskiner tjente andre formål. De fungerede både som illustration af Solsystemets indretning med de dengang kendte seks planeter, som en levende tabel – maskinerne kunne med en vis nøjagtighed gengive planeternes positioner 100 år tilbage i tiden og 100 år frem. Endelig fungerede de som “knaldeffekter”, der kunne promovere videnskaben ved bl.a. det franske og det danske hof.

Rømer var også med til at udvikle og forbedre penduluret. I sin tid ved akademiet i Paris kom han i kontakt med Huygens, pendulurets fader. Begge vidste, at et af observatoriets største problemer var urens gang. Godt nok var penduluret et stort spring fremad sammenlignet med tidligere tiders mekaniske ure, men når det gjaldt den højest mulige præcision, eksempelvis ved parallaksemålinger, slog urene ikke til. Et af hovedproblemerne var metallernes volumenændring under skiftende temperatur. Af denne grund fremstillede Rømer et termometer og som noget uset på den tid, brugte han vands fryse- og kogepunkt som fikspunkter på sin egen temperaturskala. Ved at måle temperaturen i observatoriet, kunne Rømer modregne den fejl, som metallers varmeudvidelse ville give på urens gang og instrumenternes skalaer. Termometeret var således også et af Ole Rømers præcisionsinstrumenter.



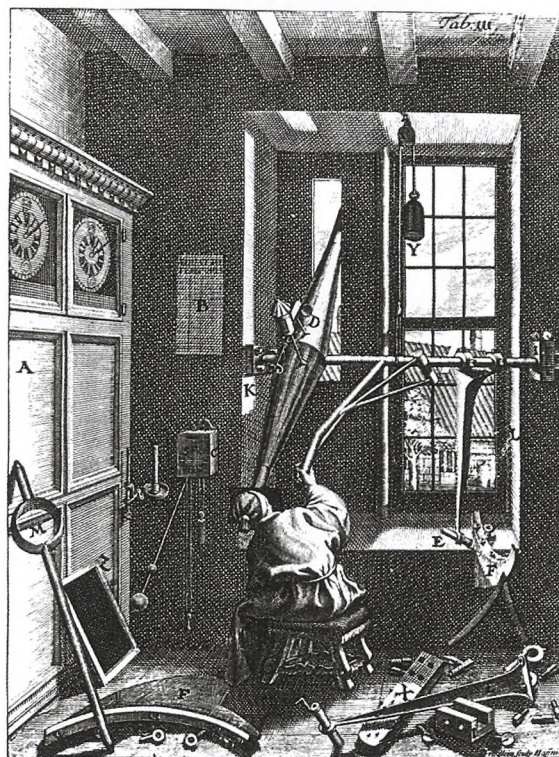
Figur 6. Til venstre en skitse af Rømers termometer fra hans notesbog “Adversaria”. I midten planetmaskinen som blev foræret til kong Christian V. Til højre det eneste eksisterende af Rømers pendulure, som hænger på Kroppedal Museum, hvor også planetmaskinen findes i kopi.

Anvendelsen af præcisionsinstrumenter indenfor astronomien og de forbedrede metoder, herunder fejlanalyse, var en vigtig del af den naturvidenskabelige

revolution. Med Albert van Heldens ord:

“This new practice was instituted by the younger generation of John Flamsteed, Jean Picard, and Ole Roemer. It was this revolution in astronomical accuracy, beginning around 1660, that finally made astronomers aware of the inadequacy of all previous observations, including those of Tycho Brahe.”

Ironisk nok var Ole Rømer således med til at undergrave sit forbilledes autoritet. Den nye “autoritet” var præcisionen. Kobbertrykket af Ole Rømer ved sit passageinstrument vidner om denne præcision. Astronomen selv er kun med på billedet for at vise, hvilken stilling, der er hensigtsmæssig at indtage under observation, det handler om instrumenter, ikke om astronomen. Dette instrument var lille og lethedterligt, og enkelt i den forstand, at det kun kunne dreje i det vertikale plan. Dermed var en potentiel fejlkilde ved bevægelse i horisontal retning elimineret, men passageinstrumentet var til gengæld afhængig af jævnt gående ure. På den måde kunne Rømer måle et himmellegemes højde og sammenhørende tid for passage over meridianen.



Figur 7. Ole Rømer siddende i professorboligen bag “husinstrumentet” iført nathue i stedet for tidens store paryk. Til venstre står to store pendulure og på væggen ved siden af endnu et ur beregnet til sekundtælling. Læg mærke til spalten i huset overfor. Den gjorde det muligt at måle et par grader mere i sydlig retning.

Arbejdet i statens tjeneste handlede også om “perfektionering”. Ole Rømers arbejde med mål og vægtransformen fra 1683, kalenderreformen fra 1700, opmålingen af landeveje og skibsmåling havde det til fælles, at Rømer ønskede høj præcision, men mindst lige så

vigtigt et enkelt konsistent system, som var til at forstå og anvende.

Den lille revolution i Vestskoven

Ole Rømer flyttede sit sidste og bedste observatorium ud på landet. Der var ikke forstyrrende lys eller larm, som i Rundetaarn og i professorboligen ved siden af. Og her var ingen hestevogne som ramlede forbi og kunne flytte på instrumenternes finmekanik.

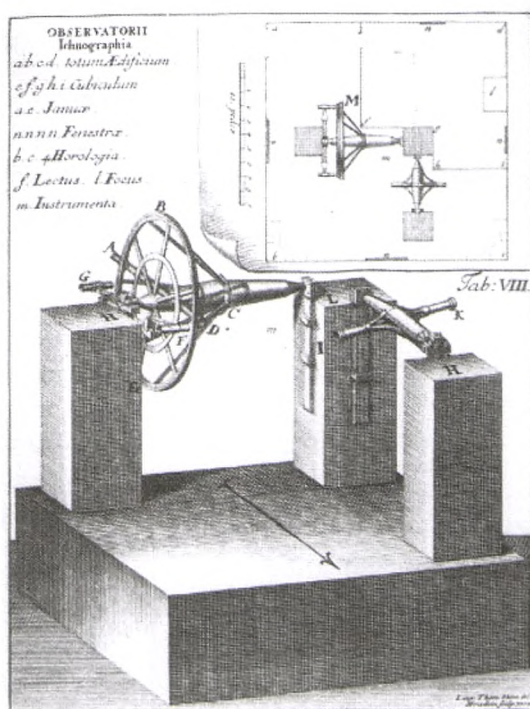
I et brev til Gottfried Leibniz (1646-1716) fra 1704 skrev Rømer:

“... jeg har taget (eller jeg skulle måske sige stjålet) denne ene sommer ud af hele mit liv for at indrette det observatorium, som jeg har ønsket mig i 30 år.”

Observatoriet var et simpelt lille hus, bygget for egne midler udelukkende med det formål at rumme hans nye opfindelse: Meridiankredsen.



Figur 8. C. Thykiers model af Observatorium Tusculanum (rekonstruktionsforsøg) med meridianspalte i husets venstre side.



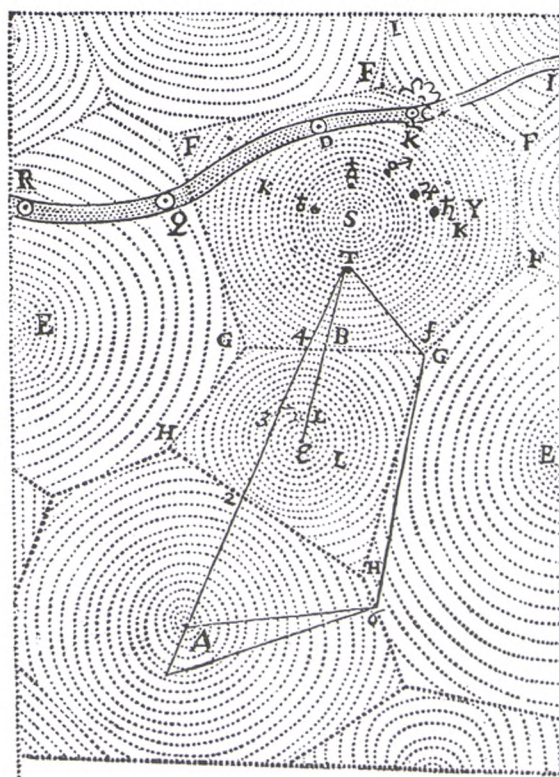
Figur 9. Meridiankredsen samt grundridset af observatoriet.

Dette passageinstrument drog fordel af nærmest alle de præcisionsforbedringer Rømer havde skabt, og det var så godt, at det med nogen forsinkelse blev standardudstyr i ethvert observatorium. Det var relativt lille og lethåndterligt, havde en fuld cirkel til vinkelaflesning, hvilket eliminerede fejlen ved varmeudvidelsen, og da der således var kortere mellem skalaens linjer, kunne mikroskoper (GF) indgå i aflæsningen. Teleskopet (AD) var forsynet med trådkors og mikrometer og i observatoriet fandtes flere ure, som både skulle måle stjerners rektascension og kontrollere andre ures nøjagtighed. Observatorium Tusculanum var kronen på Rømers astronomiske værk og kulminationen på revolutionen inden for præcisionsastronomien. En lille dansk astronomisk revolution på en mark nær Vridsløsemagle.

Ved at se Ole Rømer i lyset af den naturvidenskabelige revolution 2.0 bliver det altså både muligt at se, hvor Ole Rømer gjorde sig mest gældende, nemlig inden for præcisionsastronomien, samtidig med at Rømers arbejde fremstår mere som en helhed.

Den mekaniske empirist (Rømer i DNR 3.0)

Cohens fremstilling af den naturvidenskabelige revolutions tre tilgange, eller paradigmer, og deres smeltning, gør det muligt at diskutere, om Rømer kan tilknyttes en bestemt tilgang. Men som det ofte er med store teorier, svinder evnen til at få “rigtige mennesker” til at passe ind i takt med at teoriens detaljeringsgrad stiger. Derfor er det ikke muligt at knytte Ole Rømer entydigt til et paradigme, han “lånte” fra flere. Groft sagt var Ole Rømer 50 % empirist, 50 % mekanisk cartesianer.



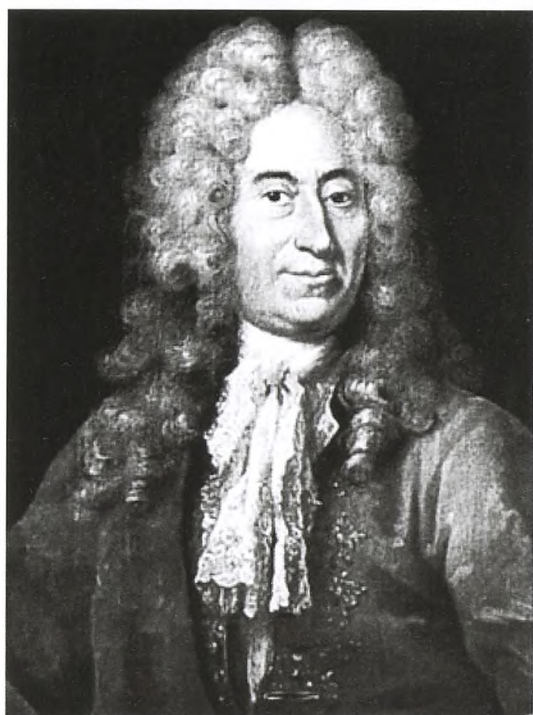
Figur 10. Descartes' rum fyldt af stof i bevægelse. De kosmiske hvirvler styrer planeterne i deres cirkelformede baner omkring Solen (S). Nedenfor ses andre stjerner (AE).

Empirismen finder man i Ole Rømers eksperimentelle arbejder, herunder regnes også astronomien. Rømer ville lade instrumenterne og observationerne "tale" i form af gode tabeller og præcise instrumentmanualer. Men han var ikke rendyrket empirist. Bag hans arbejde lå nemlig et system, en forståelsesramme. Denne forståelsesramme var Descartes mekaniske filosofi. Forestillingen om at alt i verden kunne forklares ved hjælp af stof og bevægelse, herunder verdensrummets kosmiske hvirvler, som man bl.a. hører omtalt i Rømers korrespondance med Huygens. Det var netop denne mekaniske verdensopfattelse, der tillod Rømer at lægge de filosofiske overvejelser til side og i stedet begynde at løse konkrete opgaver.

Tre nye indsigter i Ole Rømers liv

Den større kontekst i form af den naturvidenskabelige revolution giver en bedre forståelse af videnskabsmanden Ole Rømer. Uden tvivl har den naturvidenskabelige revolution 2.0, altså den udvidede, praksisorienterede version af begrebet, bidraget mest til denne forståelse. Jeg vil nævne tre ting.

For det første er Ole Rømer et godt eksempel på, hvordan videnskaben og arbejdet i statens tjeneste gik hånd i hånd i 1600-tallet. Det var ikke en ulempe for Rømer, at han havde en karriere i statens tjeneste, det var den, der skabte økonomi til hans videnskabelige studier. Derudover har det passeret godt til Ole Rømers temperament og evner, at skulle løse praktiske opgaver, ofte ved hjælp af videnskabelige metoder. Ole Rømer var, som den danske videnskabshistoriker Kirstine Meyer har udtrykt det "... en mand, der i videnskab er en praktiker, i praksis arbejder videnskabeligt. [6].



Figur 11. Ole Rømer på toppen af sin karriere. Maleri fra omkring 1700 (Rundetaarn).

For det andet var Ole Rømer på mange måder et geni, men ikke et ensomt geni. Hans videnskabelige arbejde fulgte i høj grad det franske akademis arbejdsprogram, også efter han vendte hjem til Danmark, samtidig med at Tycho Brahe var en varig inspiration og vejviser for ham. Det samme kan man sige om Jean Picard, og i mindre grad om flere af de andre medlemmer af akademiet. Det var samarbejde og konkurrence mellem medlemmerne imellem, som førte til de store fremskridt indenfor præcisionsastronomien fra 1660 og nogle årtier frem.

For det tredje handlede Ole Rømers astronomiske arbejde ikke om præcision for præcisionens skyld. Han søgte i årevis at løse to af astronomiens sværeste opgaver: At lave et nyt fiksstjerkatalog og måle fiksstjerneparallaxen. Disse opgaver krævede en hidtil uset præcision, ja faktisk mere end det. Datidens teknologi kunne simpelthen ikke løse opgaven. Det vidste Ole Rømer ikke, og en stor del af hans mangesidede virke sigtede mod disse opgavers løsning. Ole Rømer arbejdede ikke med vilkårlige videnskabelige problemer, hans arbejde havde et samlet formål: Perfektionering – både i statens og videnskabens tjeneste.

Litteratur

- [1] Pedersen, K.M. (2005), Ole Rømers mange talenter, i H. Kragh, red., Fra middelalderlærdom til den nye videnskab, 1000-1730. Dansk naturvidenskabs historie Bd 1, Aarhus Universitetsforlag, Aarhus, pp. 405-427.
- [2] Tortzen, C.G. og P. Friedrichsen, red. (2001), Ole Rømer – korrespondance og afhandlinger samt et udvalg af dokumenter, Det Danske Sprog-og Litteraturselskab C.A. Reitzels Forlag, København.
- [3] Koyré, A. (1957), From the Closed World to the Infinite Universe, The John Hopkins Press, Baltimore.
- [4] Van Helden, A. (1983), The birth of the modern scientific instrument, 1550-1700, i J.G. Burke, red., The Uses of Science in the Age of Newton, University of California Press, Los Angeles, pp. 49-84.
- [5] Cohen, H.F. (2010), How Modern Science Came into the World: Four Civilizations, One 17th-Century Breakthrough, Amsterdam University Press, Amsterdam.
- [6] Meyer, K. (1941), "Rømer, Ole", i P. Engelstoft, red., Dansk Biografisk Leksikon Bd 20, J.H. Schultz Forlag, København, pp. 392-400.



Mads Peter Macholm er cand.mag i historie med sidefag i fysik. Han skrev i 2013 speciale om Ole Rømer som repræsentant for den naturvidenskabelige revolution og har siden holdt flere foredrag om emnet. Han underviser i fysik og historie på Gammel Hellerup Gymnasium.

Hansen og Månen

Af René Michelsen

Med udgangspunkt i Danmark blev Peter Andreas Hansen (1795-1874) en af 1800-tallets vigtigste astronomer. Gennem næsten 50 år arbejdede han i Gotha og hans bidrag indenfor instrumentudvikling, gradmåling og landmåling var dengang legendariske. Det var dog hans matematiske snilde og ikke mindst teoretiske beregninger af Månens bevægelse, der særligt overleverer mindet om ham til vores tid. Vi skal her se nærmere på Hansens liv og arbejdsvilkår, og i detaljen dykke ned i, hvorfor Hansen og Månen sammen blev så skelsættende.

Indledning

Hansen var i det 19. århundrede en central skikkelse for europæisk astronomi og geodæsi. Han var yderst produktiv, medlem af henved 20 videnskabelige selskaber, fik Newton-medaljen to gange og blev dekoreret med ordener i flere lande. Hertil var han medgrundlægger af geodæsien som videnskab, præsident for den "permanente kommission for europæisk gradmåling", og var medlem af den tyske kommission til observation af Venuspassagen (for derigennem at bestemme afstande i Solsystemet) i 1874.



Figur 1. Peter Andreas Hansen i 1840, 45 år gammel. Maleri af Paul Emil Jacobs, original i Pulkovo-observatoriet (Skt. Petersborg), kopier i Kiel og Gotha (Wikipedia).

Født i Danmark, arbejdende fra Tyskland, betalt af englænderne og i tæt kontakt med København, har historien om Hansen både en god fortælling og en urkraft, der er stærk nok til at gøre ham til en legende, der er værd at bringe frem i lyset. Desværre er en fuldstændig biografi om ham aldrig blevet skrevet, og de sparsomme kilder efterlader flere åbne spørgsmål. Her vil vi fortælle legenden, rejse spørgsmålene, og samtidig begrænse os til hans centrale arbejde med Månens bevægelse.

Fra Tønder til Altona

Peter Andreas Hansen blev født i Tønder den 8. december 1795. Han var søn af en guldsmed, og viste tidligt interesse for selvstudier i musik og matematik og var tilmed fingersnild. Han klarede sig blandt de bedste i skolen, og var motiveret for at læse videre. Hans

far, som i øvrigt blev anset som velstillet, kunne ikke imødekomme ønsket om videre uddannelse pga. pengemangel, ikke mindst som følge af moderens tidlige bortgang. Hansen kom dog to år i såkaldt rektorklasse, og lærte grundlæggende fransk og latin.

Hansen blev bedt om at vælge sig et håndværk, og han kom i lære som urmager i Flensborg. Han viste gode evner for faget, men hans far modsatte sig hans drøm om at studere på universitetet. Da han var udlært i 1818 tog han tilbage til Tønder, og begav sig på vandretur, en tur der førte ham til Berlin hvor han blev et år, og gennem sin stilling hos en fransktalende urmagermester lærte han fransk til perfektion. I slutningen af 1819 drog han tilbage til Tønder og etablerede sig som urmager i sin fars hus.



Figur 2. Mindesten over Hansen i Tønder (privatfoto 2007).



Figur 3. Gadeskilt i Tønder, Hansens fødeby (privatfoto 2007).

En skelsættende tilfældighed indtraf kort herefter i 1820. Hansens 9-årige søster lå syg, og der blev derfor tilkaldt en læge, Dr. Peter Dirks. Dirks var selv interesseret i matematik og astronomi, og Dirks og Hansen må have haft lejlighed til at tale en del sammen, i hvert fald fik Dirks overtalte Hansens far til at lade Hansen rejse til København. Her havde Dirks nemlig en ven, H.C. Schumacher, professor i astronomi i København, og

ansvarlig for den danske gradmåling (dvs. bestemmelse af længde- og breddegrad for et punkt).

Hansen rejste til København, og kunne under sit ophold bo i Rundetårn. Han og Schumacher lærte hinanden godt at kende, og Hansens rejse til København blev indledningen til et livslangt venskab og kollegialt forhold mellem de to. Stillingen som assistent var imidlertid blevet besat. Hansen rejste efter aftale med Schumacher i august 1820¹ til Altona ved Hamborg for egen regning, for at deltage som frivillig i gradmålingen i Holsten. Han kom tilbage til København i januar 1821, og blev nu ansat som assistent på gradmålingen. Det er værd at bemærke, at 1821 netop var det år, hvor Schumacher påbegyndte oprettelsen af observatoriet i Altona (på trods af at han var professor i København) [3], og hvorfra han samme år begyndte udgivelsen af tidsskriftet *Astronomische Nachrichten* (AN).

I sommeren 1822 deltog Hansen i 11 ugers feltarbejde på Helgoland for sammen med en engelsk delegation at deltage i opmålinger af øen. Undervejs lærte Hansen engelsk, og samtidig måtte han udvikle en ny metode til beregning af geografisk bredde med et passageinstrument, da de skulle arbejde med transportable instrumenter.

Hansen blev ved observatoriet i Altona, der var under opbygning 1821-24. Det fremgår ikke af kilderne, hvor stor en andel han havde i opbygningen af observatoriet under Schumachers ledelse, men tilsyneladende har han haft rig mulighed for at observere med de nyindkøbte instrumenter, og arbejde med metoder til datareduktion. I Altona opnåede han ry som en ferm observatør. Hansen bistod også med udgivelsen af AN, i starten med anonyme bidrag, såsom baneberegninger, på bestilling af Schumacher. Fra 1823 begyndte han at publicere selvstændige artikler med egne observationer, baneberegninger m.m.

Observatoriet i Gotha-Seeberg

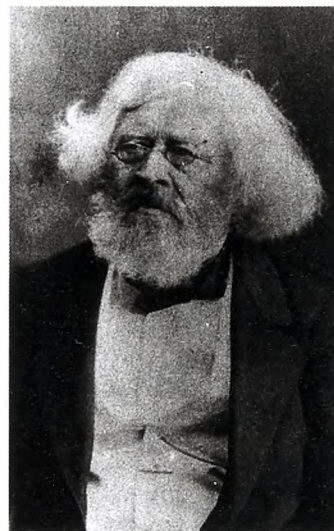
I 1825 valgte Johann Franz Encke at sige sin stilling op som direktør for observatoriet i Gotha, til fordel for en stilling i Berlin. Forinden, i 1822, havde Encke skrevet et memorandum og klaget over de primitive forhold ved observatoriet i Gotha, og ikke mindst over den ringe gage.

For at forstå hvad det egentlig var Encke forlod, må vi tage et lille sidespring. Gotha var dengang hovedsæde i hertugdømmet Sachsen-Gotha (i dag en del af Thüringen). De skiftende hertuger satte sig som mål at gøre Gotha til *videnskabernes by*. I 1786 blev Gotha-observatoriet oprettet på Seeberg, et bakket skovområde et par kilometer uden for byen, af hertug Ernst den 2., med Franz Xaver von Zach som den første direktør. Von Zach udgav i Gotha de første internationale geofysiske og astronomiske tidsskrifter fra 1798, (forløbere og inspiration for AN), ligesom han også i 1798 arrangerede verdens første konference for astronomer. Gotha var

dermed for astronomien et videnskabspolitisk centrum.

Gothas status var dog falmende. Allerede omkring 1810 var der skader på flere af observatoriets bygninger, der krævede en delvis nedrivning og genopbygning. Instrumentparken var måske heller ikke holdt helt ved lige. Udgivelsen af tidsskrifter fra observatoriet var ophørt i 1813 (og efterlod dermed plads til AN). Med til historien hører, at der ikke fandtes noget universitet i Gotha, og dermed heller ikke noget forskningscentrum. Universitetet i det nærliggende Erfurt var ligeledes blevet lukket i 1816². Af arbejdskraft på observatoriet var der en tjener. På lønningslisten stod også en unyttig kurator, der var ment som direktørens formelle foresatte, men som ikke deltog i arbejdet på observatoriet; dvs. ingen videnskabelige assistenter til at hjælpe med observationer eller beregninger. Og lønnen var, som Encke anførte, beskeden. Selvom Gotha-Seeberg havde et renommé, var status dog, at det var et lidet attraktivt sted.

På trods af dette var en stilling som direktør i Gotha stærkt attraktiv for Hansen. Han var ved Enckes fratræden 30 år gammel og ugift; hans baggrund var blot grundskolen, han havde ingen akademisk uddannelse og var overvejende autodidakt i sprog, matematik samt astronomisk og geodætisk instrumentering. Det må have været en ubeskrivelig stor glæde for ham at blive tilbudt stillingen i Gotha, og ikke mindst, at han uden at trodse sin fars holdninger kunne gå ind på den videnskabelige vej som han i mange år havde drømt om. At Hansen overhovedet blev ansat skyldtes endnu engang en bemærkelsesværdig situation: Encke havde forladt sin stilling uden at foreslå en efterfølger (hvilket tilsyneladende var kotume dengang; noget kunne tyde på at Encke smækkede med døren da han forlod Gotha). Schumacher anbefalede derfor Hansen til stillingen, og da prominente personer som Olbers, Gauss og Bessel også anbefalede Hansen³, så var sagen klar.



Figur 4. Peter Andreas Hansen i 1870. Originalt fotografi i Gotha (Wikipedia).

¹ Kilderne [1] og [2] er her ikke helt enige om kronologien.

² Genåbnet i 1994.

³ Det er uklart om Hansen allerede på dette tidspunkt havde personlig kontakt med disse personer; i arkiverne findes hans brevveksling med dem, men de kan være anakronistiske.

Hansen i Gotha

Hansen havde en særdeles aktiv karriere i Gotha helt frem til sin død 49 år senere. På trods af de, fra starten af, beskedne vilkår, må der have været noget, der gjorde Gotha specielt attraktivt; i løbet af hans karriere skortede det ikke på attraktive tilbud om stillinger i universitetsbyerne Helsinki, Dorpat (Tartu), Königsberg (efter Bessel), København og Berlin, men han takkede nej til tilbuddene. Svaret på, hvorfor han afviste disse tilbud ligger sandsynligvis gemt i resultaterne af hans eget arbejde, selvom kilderne også synes at antyde, at hans personlighed og baggrund har spillet en rolle.

Ved ankomsten i Seeberg må Hansen, som noget af det første, have sat sig ind i de komplekse finansielle forhold. Ifølge testamentet efter Ernst den 2., var der oprettet en fond på 20.000 daler til at sikre driften af observatoriet, hvoraf 4 % blev udbetalt årligt til direktøren for observatoriet, dvs. 800 daler. Heraf skulle dog fratrækkes lønnen til kuratoren, dvs. direktørens formelle overordnede, til den fastboende tjener, samt til en fratrådt opsynsmand, der efter en gammel aftale modtog et bidrag frem til sin død. Beløbet skulle desuden dække vedligeholdelsen af de forsømte bygninger og instrumenter. Alt i alt fik han knap 600 daler udbetalt om året.

I 1828 blev Hansen gift med Lina Braun, datter af en skovrider. De fik i tidens løb 7 børn. I 1838 indledte Hansen en brevveksling med statsministeriet, hvor han forklarede, at hans løn ikke rakte til at brødføde hans familie, at han ville foretrække at blive i Gotha (han havde på dette tidspunkt fortalt om tilbuddet om at komme til Helsinki), og han endte med at indgive sin afsked. Hansen blev i Gotha, da han fik forhøjet sin løn til 1200 daler. Dermed lykkedes det ham at forbedre den første præmie for at blive i Gotha, selvom det ganske vist tog 13 år fra hans ankomst.

Hansen kunne dernæst tage fat på at forbedre observatoriets fysiske rammer; han må tidligt have fornemmet, at det ville blive vanskeligt, og måske havde han heller ikke regnet med, hvor lang tid det ville ende med at tage. I 1839 fik han med hertugelig tilladelse lov til at flytte fra de faldefærdige bygninger i Seeberg, og byggede et hus i Gotha by. Huset indrettede han med et privatobservatorium i form af en meridiankreds (1842). Derfra kunne han fortsætte sit videnskabelige arbejde, men han må have haft en bagtanke; hertug Ernsts testamente indebar jo, at observatoriet i Seeberg skulle drives videre. Hansen argumenterede for, at omkostningerne med at renovere og vedligeholde de faldefærdige bygninger var for høje, og i 1847 foreslog han, at man oprettede et helt nyt observatorium på nabogrunden til hans hus. Dette kom han dog ikke igennem med, og man valgte i stedet for en nærliggende grund, og at byggemateriale fra de gamle Seeberg-bygninger skulle genbruges i de nye. Seeberg blev altså revet ned (en lille del står tilbage i dag og er lavet om til et spisested), og Hansen kunne sammen med en kommission planlægge det nye sted. Det fremgår desværre ikke af kilderne, hvordan denne begunstige-

pludselig kunne finde sted, eller hvor stort budgettet var, men der må have været en vis respekt for hertug Ernsts testamente, og også for Hansen. I 1859 var det nye observatorium klar til brug, dvs. 20 år efter Hansen forlod Seeberg, og 34 år efter hans ankomst til Gotha.



Figur 5. Hansen nye observatorium på Jägerstrasse i Gotha. Hansens eget hus med interim-observatoriet lå ca. 100 m tættere på Gotha station, i Bahnhofstrasse, og blev ødelagt under 2. verdenskrig (privatfoto 2014).

Indtrykket står tilbage, nemlig at det lykkes for Hansen at ændre de forhold, som Encke i sin tid var så utilfreds med. Det tog sin tid og uendelige mængder af tålmodighed og diplomati, uden garanti for succes, så hvorfor valgte han ikke en nemmere vej, og takkede ja til et af de tilbud han fik? Vi må huske at Hansen mestendels var autodidakt, og dermed må have opøvet en meget stærk viljestyrke uden tilbøjelighed til at give op. Dernæst var han en af Europas mest respekterede videnskabsmænd, dvs. på trods af kummerlige forhold var han i stand til at levere solid forskning. At flytte til et andet attraktivt observatorium ville have givet ham en bedre løn, men kunne ikke have gjort ham til en bedre videnskabsmand. Det må han have indset.

Kilderne [1] og [2] har nogle intrigante kommentarer vedrørende hans personlighed, som også forklarer, hvorfor han valgte det afsidesliggende Gotha. Hans manglende baggrund i universitetsverdenen og autodidakte tilgang til sprog bevirkede, at hans skriftlige formuleringer kunne virke bombastiske, uden at han dog havde til hensigt at støde nogen. I enkelte tilfælde kunne det føre til dybe forbistringer og stridigheder. En medvirkende faktor hertil var hans indgående kendskab til datidens matematik, hvor ikke alle evnede at følge hans argumentation; efter sigende skulle han senere i livet have været bedre til at uddybe og forklare sine beregninger. En anden faktor synes at være, at var han først selv overbevist om rigtigheden af en konklusion, var han mindre interesseret i, om andre havde samme forståelse. Alt dette insinuerer jo en kolerisk natur, og at Hansen bevidst valgte at isolere sig i Gotha. Disse betragtninger er dog ikke udelukkende objektive og er sikkert unuancerede.

Der er bestemt plads til yderligere forskning i Hansens liv og personlighed: I arkiver rundt om i Tyskland findes der ca. 1000 breve fra hans brevveksling med andre forskere; disse breve har endnu ikke været samlet,

analyseret og oversat, men mon ikke de kan bidrage til et mere fuldkomment billede af personen Hansen end gengivet ovenfor? Hansen døde den 28. marts 1874 og ligger ærefuldt begravet i Gotha.



Figur 6. Hansens gravmæle på Gotha Hauptfriedhof (privatfoto 2014).

Hansens forskning

I den periode hvor Hansen indledte sin karriere, foregik der en løbende udvikling af de astronomiske instrumenter og en tiltagende modenhed af matematikken. Der var et politisk ønske om at forbedre nøjagtigheden i bestemmelse af længdegrader, bl.a. for at forbedre navigationen til søs. Til brug herfor blev der arbejdet på mere nøjagtige ure, og forbedrede astronomiske tabeller, fx for Solen, planeterne og Månen, som igen krævede mere nøjagtige observationer og analytisk teori. Parallelt hermed var der øget fokus på landmåling, via triangulering i landskabet.

Hansens arbejde rummede hele denne udvikling: Han forstod sig på instrumentering, og udviklede nye metoder til statistisk databehandling og observations-teknik. Han udviklede de nødvendige analytiske metoder til beregning af tabeller for Solens og Månens bevægelse, og han beregnede tabellerne, sideløbende med at han medvirkede til at etablere geodæsen som en videnskab.

At han igennem ca. 50 år bar astronomien og geodæsen fremad, var årsagen til den store anerkendelse han fik. Blandt Hansens mange publikationer (ADS angiver 125 publikationer, Worldcat 138, hvoraf flere dog er meddelelser og observationsdata, og i øvrigt skrevet på skiftevis latin, tysk, fransk og engelsk) skal vi her begrænse os til løseligt at omtale hans arbejde vedrørende Månens bevægelse.

Hansen og Månen

Det synes i dag lettere odiøst at bruge kræfter på at studere Månens dynamik; den er lysstærk, tæt på os, ses som en skive, og vandrer tilsyneladende systematisk henover himlen; måske ser vi Månen så ofte, at vi slet ikke tænker over det. Sådan var det også for 200 år siden på Hansens tid. Netop derfor var Månens bevægelse som tidsreference interessant for navigation. Månens bevægelse er dog rent faktisk yderst kompliceret at beregne, og de analytiske metoder der er udviklet til

formålet er både omfattende, matematisk komplekse, og tunge at anvende numerisk.

Hansen udgiver i 1838 værket “Fundamenta Nova Investigationis Orbitae Verae Quam Luna Perlustrat” [4]. Over ca. 360 sider foretager han en række omskrivninger af bevægelsesligningerne for Månen (se figur 7). Hansens metode benytter sig af nogle alternative matematiske kneb til at omskrive ligningerne, hvilket gør den svær at følge. Den store fordel er, at den er praktisk anvendelig ift. at beregne tabeller for Månens bevægelse ud fra et sæt observerede startbetingelser. Efter flere besøg i England endte det med, at hans månetabeller (i øvrigt skrevet på fransk) blev udgivet i 1857 [5] i London for admiralitetet, og han modtog 1000 pund af den engelske regering for arbejdet. Denne udgivelse blev samtidig grundlaget for månetabellerne i den engelske *Nautical Almanac* gennem 60 år, i perioden fra 1862 til 1922, med enkelte korrektioner til tabellerne af Simon Newcomb i 1878.

40

$$\begin{aligned}
 (3) \dots \left\{ \begin{aligned} v &= \Pi(z, t) \\ Ir &= I'(z, t) + w \end{aligned} \right. \\
 \text{ubi } v, r, z \text{ et } w \text{ quantitates designant, in quas mutata } \tau \text{ in } t \text{ resp. } \lambda, \varphi, \\
 \xi \text{ et } \beta \text{ abeunt. Ideo } v, \text{ est quasi longitudo vera in orbita et } r \text{ radius} \\
 \text{vector temporis } t, \text{ indoles vero quantitatum } z \text{ et } w \text{ adhuc definita non est.} \\
 \text{Differentiatis aequationibus (2), tum secundum } \tau, \text{ tum secundum } t \text{ elicitur} \\
 \begin{aligned} \frac{dv}{d\tau} &= \Pi'(\xi, t) \frac{d\xi}{d\tau} \\ \frac{d\lambda}{dt} &= \Pi'(\xi, t) \frac{d\xi}{dt} + \Pi_\tau(\xi, t) \\ \frac{d\varphi}{d\tau} &= I'(\xi, t) \frac{d\xi}{d\tau} + \frac{d\beta}{d\tau} \\ \frac{d\varphi}{dt} &= I'(\xi, t) \frac{d\xi}{dt} + I_\tau(\xi, t) + \frac{d\beta}{dt} \end{aligned} \\
 \text{ubi } \Pi' \text{ et } I' \text{ resp. quotientes differentiales functionum } \Pi \text{ atque } I \text{ secundum } \xi, \text{ et } \Pi_\tau \text{ atque } I_\tau \text{ resp. quotientes differentiales earundem functionum secundum } t \text{ denotant. Eliminatis } \Pi'(\xi, t) \text{ atque } I'(\xi, t) \text{ ex aequationibus praecedentibus nanciscimur} \\
 \begin{aligned} \frac{d\lambda}{d\tau} \cdot \frac{d\xi}{dt} - \frac{d\lambda}{dt} \cdot \frac{d\xi}{d\tau} &= -\Pi_\tau(\xi, t) \frac{d\xi}{d\tau} \\ \frac{d\varphi}{d\tau} \cdot \frac{d\xi}{dt} - \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{d\xi}{d\tau} &= \frac{d\beta}{d\tau} \cdot \frac{d\xi}{dt} - \frac{d\beta}{dt} \cdot \frac{d\xi}{d\tau} - I_\tau(\xi, t) \frac{d\xi}{d\tau} \end{aligned} \\
 \text{unde} \\
 \begin{aligned} \left(\frac{d\xi}{dt} \right) &= \left(\frac{d\xi}{d\tau} \right) - \Pi_\tau(\xi, t) \frac{1}{\left(\frac{d\lambda}{d\tau} \right)} \\ (4) \dots \frac{d\beta}{dt} - \frac{d\beta}{d\tau} \left(\frac{d\xi}{d\tau} \right) &= \frac{\left(\frac{d\varphi}{d\tau} \right) \left(\frac{d\xi}{dt} \right) - \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \left(\frac{d\xi}{d\tau} \right)}{\left(\frac{d\lambda}{d\tau} \right)} + \Pi_\tau(\xi, t) \frac{\left(\frac{d\varphi}{d\tau} \right)}{\left(\frac{d\lambda}{d\tau} \right)} - I_\tau(\xi, t) \\ \text{attamen loco prioris harum aequationum differentiale eius, ut semper feci,} \\ \text{adhibebo hoc} \\
 (5) \dots \frac{d}{dt} \left(\frac{d\xi}{d\tau} \right) &= \frac{\left(\frac{d^2\lambda}{d\tau dt} \right) \left(\frac{d\xi}{d\tau} \right) - \left(\frac{d^2\lambda}{dt^2} \right) \left(\frac{d\xi}{d\tau} \right)}{\left(\frac{d\lambda}{d\tau} \right)^2} + \Pi_\tau(\xi, t) \frac{\left(\frac{d^2\lambda}{d\tau^2} \right)}{\left(\frac{d\lambda}{d\tau} \right)^2} - \Pi'_\tau(\xi, t) \frac{\left(\frac{d\xi}{d\tau} \right)}{\left(\frac{d\lambda}{d\tau} \right)} \end{aligned}
 \end{aligned}$$

Figur 7. Side 40 fra hovedteksten i Fundamenta [4], hvor Hansen starter med at udvikle ligningerne med tiden t og pseudo-tiden τ . Udover at være skrevet på latin er værket særdeles notationstungt, og indeholder en endeløs række af omskrivninger af ligningerne.

Som nævnt var Hansens arbejde med Månens bevægelse særegent; han fulgte ikke hovedstrømningerne som lå indenfor kanonisk perturbationsregning og eksplicitte løsninger for tidsvariationen af baneelementerne, som fx formuleret af de samtidige LeVerrier, Delaunay og Poincaré (se boksen). I stedet for er hans teori udtrykt i abstrakte variable med en pseudo-tid som uafhængig variabel, og er i sin første form kondenseret temmelig kraftigt.

Hansens Måneteori

For at få et indblik i Hansens beregninger for Månens bevægelse, så starter vi først med at beskrive den traditionelle tilgang. For systemet Måne-Jord-Sol kan energien H omskrives som

$$H = H_0 + H_1.$$

H_0 er den konstante energi for en ellipsebevægelse, fx Månens, mens H_1 er en forstyrrelse, eller perturbation, fx fra Solen. Dvs. at i stedet for at have en lukket keplerbevægelse, forårsager perturbationerne at banen varierer med tiden. Tidsvariationen i banen kan findes gennem de 6 banelementer, der siger noget om banens form (a : Den halve storakse, e : Excentriciteten), orientering (i : Inklinationen, Ω : Knudelængden, ω : Perifokusvinklen), samt den øjeblikkelige position af Månen (M : Middelanomalien).

H_1 kan rækkeudvikles til en uendelig trigonometrisk række på formen

$$H_1(e, i, \Omega, \omega, M) \simeq \sum_{n=0}^{\infty} X_n(e, i) \cos(B_n(\Omega, \omega, M)),$$

hvor X_n er en potensrække i e og i , og hvor B_n er funktioner af vinklerne på nær i . For hvert baneelement kan man opstille differentialligninger i tiden, fx for a :

$$\frac{da(t)}{dt} = D(a, e, i) \frac{\partial H_1}{\partial M}.$$

Denne ligning kan løses analytisk via forskellige approksimative og iterative metoder. En sådan fremgangsmåde blev anvendt af Hansens samtidige, LeVerrier for planeternes bevægelse, og Delaunay for Månens bevægelse, i nogle ganske digre værker. Udfordringen er at rækken H_1 kun konvergerer langsomt (og desuden ikke globalt i tid, som Poincaré viste), så de analytiske udtryk bliver ganske store.

Hansens metode har nogle andre grundtræk, og nogle andre variable. Her skal vi følge fremstillingen efter [10] og [11]: Lad $\mathbf{r}(t)$ være stedvektoren som funktion af tiden t for en planet P (dvs. Månen). Indfør nu en fiktiv planet P_1 , der bevæger sig i en konstant keplerbane i et andet baneplan, og lad denne planet have stedvektoren $\mathbf{R}(z)$, hvor z betegner en pseudo-tid forskellig fra t . Lad $\mathbf{Q}(t)$ være projektionen af $\mathbf{r}(t)$ på det fiktive baneplan, lad afstanden mellem P og baneplanet være $d(t)$, og lad $U(t)$ være en enhedsvektor, der er normal på det fiktive baneplan. Samtidig defineres $1 + \nu = \frac{Q}{R}$. Hansen opskriver da følgende bevægelsesligninger:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= \mathbf{Q}(t) + d(t)U(t) \\ \mathbf{Q}(t) &= (1 + \nu)\mathbf{R}(z). \end{aligned} \quad (1)$$

Vi ser altså, at Hansen regner direkte i stedvektorerne, og at han samtidig deler beregningerne op i en fast keplerbane og perturbationerne udtrykt gennem ν , U og ∂z (variationen af z), hvor den fiktive bane bliver valgt, så perturbationerne er tilpas små. Hansen bestemmer nu perturbationerne via funktionen $\bar{W}$ som er en rækkeudvikling i M_1 , der er middelanomalien for P_1 ; her er Hansen dog først nødt til at skelne mellem M_1 i perturbationerne og i keplerbevægelsen for P_1 , hvilket gøres i W . Undervejs dannes de såkaldte Hansen-koefficienter $X_{abcd}^{(n)}$, der kan sammenlignes med $X_n(e, i)$ ovenfor. $\frac{dW}{dt}$ er projektionen af perturbationerne på en variabel vektor, som vælges således at $\frac{dW}{dt}$ er integrabel. Fremgangsmåden går på, først at opskrive ligningerne for $\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}$, dele op i hovedkomponent og projektion, rækkeudvikle perturbationerne af projektionen, for at nå frem til bevægelsesligningerne for $\mathbf{r}(t)$, $U(t)$, $\nu(t)$ og for $\frac{dz}{dt}$ udtrykt gennem $\bar{W}$. Ligningerne integreres analytisk under approksimationer, og et passende sæt integrationskonstanter bestemmes.

Fordelen ved Hansens metode er, at den konvergerer hurtigt. Omvendt gør metoden brug af en fiktiv planet og en pseudo-tid, med passende approksimationer i de fiktive variable; mellemregningerne er temmelig vanskelige at følge.

Baneelementerne har meget ulige perioder, hvor fx M er kortperiodisk mens Ω er meget langperiodisk, men i Hansens metode udlignes forskellen i variationerne mellem de variable. Da Hansen havde ry for at have haft god numerisk forståelse, er det nok ikke noget tilfælde at han valgte netop denne fremgangsmåde, for at nå frem til den numerisk mest stabile metode.

Til sammenligning blev Delaunays metode med rækkeudvikling af baneelementerne aldrig brugt i praksis, hertil er ligningssystemerne ganske enkelt for store. Omvendt er Delaunays metode central for at forstå langtidodynamikken og kaosmekanismer, noget som Hansens metode ikke direkte egner sig til.

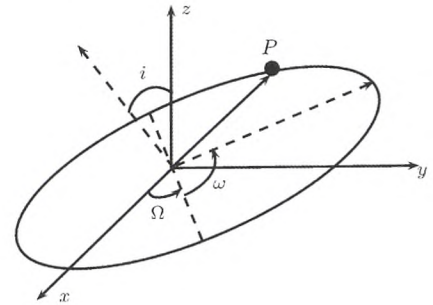
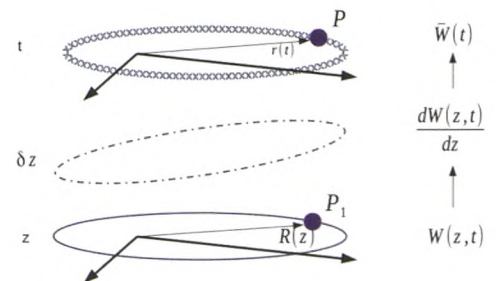


Illustration af baneelementerne. Middelanomalien M er ikke vist da den er defineret på en omskrevet cirkel således at M varierer lineært med tiden.



Opdelingen i den perturberede bane (øverst) i en fiktiv keplerbane (nederst) og perturbationerne (i midten). Til venstre er tidsangivelserne givet, til højre ses hvordan Hansen skifter mellem systemerne.

Som det biografiske materiale antyder (men som nævnt fortjener dette at blive belyst nærmere), må Hansens metode have forekommet aparte, måske mødte den ligefrem mangel på forståelse pga. det avancerede matematiske mønster; vi bemærker de ca. 20 år fra udgivelsen af teorien til tabellerne blev publiceret i London. Den unge Hansen i tiden før 1838 kan næppe have forudsagt, at hans måneteori ville få så stor gennemslagskraft, og at den ville skrive sig direkte ind i almanakkernes og astronomiens historie. Man kan derfor spekulere i (igen en påstand der bør undersøges nærmere), at succesen for teorien, men også behovet for at få den uddybet, samlet foranledigede ham til at uddybe detaljerne 24 år senere i to afhandlinger i hhv. 1862 og 1864 [6], denne gang på tysk. Med til historien hører, at han i 1854 udgav en artikel om Månens form, og konkluderede, at Månens massemidt punkt var forskudt 59 km væk fra Jorden ift. den geometriske form (den moderne værdi er kun 2 km og i den modsatte retning, dvs. tættere på Jorden).

Udover måneteorien, der behandler Månens bevægelse rundt om Jorden under forstyrrelse fra Solen, så behandlede Hansen også det beslægtede problem om Jordens bevægelse om Solen under forstyrrelse af de øvrige planeter; eller, matematisk set, Solens relative bevægelse ift. Jorden, og derigennem Solens bevægelse på himlen. Sammen med C.F.R. Olufsen i København udgav han i 1853 (på fransk) for Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab tabeller over Solens bevægelse, dækkende 3000 år, fra 800 f.Kr. til 2200 [7]. Olufsen bearbejdede forskelligt observationsmateriale, mens Hansen stod for den analytiske teori, herunder planetperturbationerne [3]. Nok så interessant er det, at brugen af tabellerne er grundigt forklaret, men også at Hansen fremstår som en ekvilibrist i generel perturbationsteori og numerisk analyse.

Slutteligt skal i samme boldgade nævnes hans afhandling, udgivet i 1831, om de gensidige perturbationer mellem Jupiter og Saturn; for denne prisopgave fik han i 1830 en guldmedalje fra akademiet i Berlin.

Den glemte legende

Hansen måneteori blev anvendt i almanakkerne i 60 år, hvorefter den blev afløst af Browns teori, der også blev anvendt i 60 år, inden den blev erstattet af de semi-numeriske metoder, der stadig anvendes og udvikles i dag. Hansens måneteori er dermed trådt ind i skyggen, ligesom hans ry som instrumentudvikler. Hans arbejde inden for geodæsin er vel i dag så alment, så heller ikke her støder man på ham i nyere bøger.

Med til den gode fortælling om Hansen hører derfor også, at hans arbejde for det meste er glemt i dag, men at hans historie er værd at tage frem i lyset; måske er der en dag en Hansen-forsker, der sætter sig for at gennemgå det arkivmateriale, der har overlevet til i dag, som kan svare på de spørgsmål, der omgærdede Hansen, og som kan skrive en langt bedre og endnu mere interessant historie om legenden Hansen.

Tak til Peter Brosche, Akadem. Gem. Wis. zu Erfurt, og Tønder Lokalhistoriske Arkiv.

Litteratur

- [1] Peter Brosche, Hans-Joachim Tucholke (Herausgeber): Peter Andreas Hansen (1795-1874). Sonderschriften der Akademie gemeinnütziger Wissenschaften zu Erfurt, Band 27 (1995). Udgivet i anledningen af 200-året for Hansens fødsel.
- [2] Allgemeine Deutsche Biographie, Band 10, Leipzig, 1880.
- [3] K. Gyldenkerne, P. B. Darnell: Dansk Astronomi Gennem Firehundrede år, Rhodos, 1990.
- [4] P.A. Hansen, Fundamenta Nova Investigationis Orbitae Verae Quam Luna Perlustrat, Gotha, 1838. Denne afhandling og flere andre er tilgængelige via <http://www.digitale-sammlungen.de>
- [5] P.A. Hansen, Tables de la Lune, London, 1857.
- [6] P.A. Hansen, Darlegung der Theoretischen Berechnung der in den Mondtafeln Angewandten Störungen, Leipzig. Erste Abhandlung 1862, Zweite Abhandlung 1864.
- [7] P.A. Hansen, C.F.R. Olufsen, Tables du Soleil, København, 1853.
- [8] Kaj Elkjær-Larsen, Astronom Peter Andreas Hansens liv og tid, Tønder Kommune, 1995.
- [9] Jürgen Ostwald, Von Tondern nach Gotha, Bund deutscher Nordschleswiger, 1995.
- [10] D. Brouwer, G. M. Clemence, Methods of celestial mechanics, 1963.
- [11] Peter Musen, Investigations in Hansen's planetary theory, NASA Technical Note TN D-4169, 1967.



René Michelsen er ph.d. i astronomi og har en baggrund i celestmekanik og dynamik, spektroskopi af jordnære asteroider og meteoritter, samt rumfartsindustrien. Han arbejder i dag som projektleder.

PFEIFFER VACUUM

PFEIFFER-adixen-TRINOS

samt vore partnere

VAT-COMVAT-GAMMA-HSR

TAKKER FOR I ÅR OG
ØNSKER ALLE VORE KUNDER

**Glædelig Jul
&
Godt nytår**

På gensyn i 2015

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
Erik.Fjeldgaard@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

Brorfelde Observatorium åbner som oplevelsescenter

Af Julie K.L. Bouchet og Mia B. Olsen, Brorfelde Observatorium

På toppen af de sjællandske alper og med udsigt over Lammefjorden troner Brorfelde Observatorium. I 60 år spillede Danmarks største observatorium en væsentlig rolle i den danske og internationale forståelse af astronomi, frem til forskningsenheden flyttede tilbage til København i 1996. I dag er bygningerne, som er tegnet af den anerkendte arkitekt Kaj Gottlob, og landskabet i Brorfelde fredet, ligesom det enestående mørke også er mørkefredet. En totalfredning, der ikke er set andre steder i Danmark. I disse fantastiske rammer er der fuld gang i udviklingen af et oplevelsescenter, der skal sætte fokus på alt mellem himmel og jord: Eller nærmere bestemt geologi, natur og astronomi til glæde for skoleklasser, familier og andre med lyst til at opleve og lære.

Historien om Brorfelde Observatorium

Brorfelde blev opført i perioden 1953-1964 af Københavns Universitet, der flyttede sit observatorium fra Østervold i København. De første overvejelser om at bygge et nyt og moderne observatorium uden for København blev gjort i starten af 1900-tallet, da lysforureningen allerede da var et støt stigende problem. Byens lys gjorde det vanskeligt at foretage astronomiske observationer. Men det var først, da astrofysikeren og astronomen Bengt Strömgren vendte hjem fra USA i 1938, at der blev sat skub i tingene. Han igangsatte detaljerede undersøgelser af mørke egne af Sjælland for at finde den bedste placering af det nye observatorium. Det viste sig dog, at lufturoen over Sjælland var forholdsvis konstant. Derfor forsøgte man i stedet at forudse, hvordan byudviklingen ville være – og her vandt Brorfelde som lokation.

I 1947 købte Københavns Universitet Brorfelde og de første bygninger blev indviet i 1953. Fra 1953-1996 var Brorfelde Observatorium en forskerby, hvor 35 ansatte havde deres daglige gang. Fra 1996 og frem til 2009 blev observatoriet brugt til feltture for de studerende. Derudover blev kuplerne brugt af to amatørastronomiske foreninger, Brorfeldes Vennekreds og Københavns Astronomiske Forening, som gjorde en aktiv indsats for at holde liv i bakkerne. I 2009 overtog Freja Ejendomme området, der blev sat til salg. Takket være lokale ildsjæle blev Brorfelde Bakkerne fredet i sommeren 2012. Brorfelde Observatorium blev landskendt i december 2012, hvor det var rammen om DR's julekalender "Julestjerner". Holbæk Kommune købte observatoriet i efteråret 2013 for at etablere et oplevelsescenter med fokus på astronomi, geologi og natur.



Figur 1. Brorfelde set fra oven. Foto: Ole Malling (2014).

Observator Gyldenkerne

Astrofysikeren Kjeld Gyldenkerne var hovedgrundlægger og leder af Brorfelde Observatorium – og er for mange synonym med Brorfelde Observatorium. Han var professor Bengt Strömgreens betroede medarbejder, og han var den første, der observerede på Brorfelde under primitive forhold. Han skrev gennem årene talrige artikler af faglig og historisk art i såvel udenlandske som indenlandske tidsskrifter. Til sin død boede han i én af fem tjenesteboliger på stedet. For at ære Kjeld Gyldenkerne har vejen op til observatoriet fået navnet Observator Gyldenkernes Vej. Asteroide 5030 Gyldenkerne (1988 VK4) er opkaldt efter ham.

Det mekaniske værksted

Den første bygning, der møder gæsten på Observator Gyldenkernes Vej, er værkstedsbygningen, som oprindeligt husede det mekaniske værksted med monteringshal. Bengt Strömgreen havde udformet en plan for Brorfeldes funktion, som omfattede tre hovedinstrumenter, der udnyttede den begrænsning, det danske vejr sætter. Disse omfattede meridiankredsen og to feltinstrumenter: en Schmidt-spejlkikkert og en linseastrograf, hvor de to sidstnævnte skulle bygges lokalt i værkstedet. Værkstedet blev ledet af den højt respekterede Poul Bechmann. Bygningen med installerede maskiner stod færdig i 1955, hvor man startede med at bygge en mindre Cassegrain-type kikkert med en effektiv brændvidde på 6,8m og et hovedspejl med en diameter på 50cm. Denne stod færdig i 1958 og blev brugt på Brorfelde Observatorium frem til 1969, hvorefter kikkerten blev flyttet og renoveret, inden den blev opstillet ved La Silla Observatoriet i Chile, hvor den var i brug frem til 1994. Der er blandt andet også bygget to teleskoper, der nu står på Ole Rømer-observatoriet i Aarhus – en 50cm og en 40cm kikkert, som blev bygget i henholdsvis 1961 og 1966.

Meridiankredsen bygges

Bygningen, der husede meridiankredsen, var den første, der blev bygget. I 1944 gav Carlsbergfonden de første penge til opbygningen af meridiankredsen i forbindelse med Ole Rømers 300-årsdag. Det første instrument i Brorfelde var meridiankredsen til "landmåling" af stjerner. I 30 år frem var den blandt verdens bedste. I 1983 blev meridiankredsen fra Brorfelde flyttet til observatoriet i La Palma.

Schmidt-teleskopet

Den største kikkert, der er blevet bygget i det mekaniske værksted, var det store 50cm Schmidt-teleskop. Det blev bygget i perioden 1963-1965 og taget i brug på Brorfelde i 1966 til fotografiske optagelser af store felter på himlen (5° i diameter eller 10 × fuldmånens udstrækning på himlen). Omkring 1980 blev det oprindelige, rent mekaniske styresystem erstattet af et simpelt, computerstyret kontrolsystem for både kikkerten og kuplen. Et par år efter blev brugen af de fotografiske

glasplader afløst af et mindre CCD-kamera med langt højere følsomhed. Herved kunne der dels observeres en større del af året, hvor himmelbaggrunden er lysere, og dels var CCD-kameraet mere velegnet til observation af bevægelige objekter, så som asteroider og småplaneter. Dette CCD-kamera blev i 1999 udskiftet til en nyere version. Selv efter Brorfelde Observatoriet blev nedlagt som forskningsenhed fortsatte denne aktivitet i adskillige år. Schmidt-teleskopet kan stadig ses på Brorfelde Observatorium, hvor det står som et billede på observatoriets storhedstid.

Linseastrografen

Det tredje hovedinstrument, linseastrografen blev aldrig bygget, da Danmark i 1967 blev medlem af ESO. Det blev besluttet at bygge et 1,54m teleskop efter Cassegrain-princippet. Dette teleskop er stadig i funktion på La Silla Observatoriet. Samtidig flyttede fokus for værkstedet sig fra bygning af kikkerter til vedligeholdelse af de eksisterende kikkerter samt bygning af biinstrumenter til montering på kikkerterne. Her i blandt fotoelektriske fotometre, fotografiske kameraer m.fl.

Administrationsbygningen

Udover værksted og kupler bestod Brorfelde Observatorium også af et Administrationshus og fem tjenesteboliger, som flere af de ansatte beboede. I Administrationsbygningen var der bibliotek, spisesal, kontorer og professorbolig for Bengt Strömgreen. Sidstnævntes værelser blev siden lavet til elektronisk værksted.



Figur 2. Arrangement ved teleskoperne. Foto: Ole Malling (2014).

Geologien omkring Brorfelde

Brorfelde Observatorium ligger i et smukt istidslandskab, som blev dannet under sidste istid (Weichsel-istiden), som begyndte for ca. 100.000 år siden. Der skal dog spoles adskillige tusinder af år frem, før det landskab, som ses på Brorfelde i dag, blev skabt. Under sidste istid oplevede Danmark mange isfremstød fra enten Baltikum eller Norge, hvorefter isskjoldet trak sig tilbage for en stund. De første tegn på liv omkring Brorfelde, er ca. 40.000 år gamle, hvilket 3 mammut tænder vidner om. De er blevet fundet i de lokale grusgrave og er efterfølgende dateret med kulstof-14

metoden. Landskabet på Brorfelde er endnu yngre. For ca. 21.000 år siden nåede det Skandinaviske Isskjold sin største udbredelse efter tre større isfremstød, som nåede frem til stilstandslinien, som i dag kan ses i det jyske landskab. Over Brorfelde lå kilometertykk is, og da klimaet blev en smule varmere, begyndte isen langsomt at smelte. Dette dannede søer i isen, som gradvist blev fyldt op af sand og grus, som blev aflejret i søerne. Da isen helt trak sig væk, efterlod det sig dødis, som kan ses ved den nærliggende Maglesø og de sandfyldte søer, hvor sandaflejringerne i dag ses som Brorfeldes bakker. Da isen forsvandt omkring søerne, faldt siderne sammen og giver i dag de bløde stukturer af bakkerne. Endnu et isfremstød bevægede sig hen over Brorfelde, før isen forsvandt, og aflejrede et lerlag på toppen af bakkerne, hvilket er baggrunden for de små mosehuller, som i dag ses på toppen af bakkerne ved observatoriet. Det er denne spændende historie, som gør geologien til et oplagt formidlingspunkt på fremtidens Brorfelde Observatorium. Det vil også trække tråde til Naturpark Åmosen og Geopark Odsherred.

Et oplevelsescenter bliver til

På Brorfelde Observatorium etableres der nu en attraktion med afsæt i astronomiens forunderlige verden, hvor udforskningen af universets hemmeligheder er en håndgribelig, meningsfuld og sjov oplevelse. Kombinationen af en markant oplevelsesprofil, et attraktivt overnatningstilbud i den gamle administrationsbygning og muligheden for at holde åbent uden for højsæsonen, er med til at differentiere Brorfelde fra det eksisterende oplevelsesudbud. I weekender og ferieperioder vil Brorfelde Observatorium være åbent for dagsbesøgende og overnattende børnefamilier, mens attraktionen i hverdagene vil være forbeholdt lejrskoler. I sommerferien vil der også være korte højskoleophold for familier og entusiaster. Når oplevelses- og formidlingscentret er realiseret, forventes det at tiltrække ca. 35.000 besøgende om året. Oplevelsescentret forventes at åbne i 2017 – indtil da vil der blive afholdt skoleforløb, forskellige arrangementer og også inviteres på forskellige midlertidige udstillinger. Flere fonde har bidraget til at Brorfelde Observatorium kan bevares. A.P. Møller og hustru Chastine Mc-Kinney Møllers Fond til almene Formaal og Nordea-fonden har hver støttet med 10 mio. kroner, og der er givet 1,4 mio. kroner i landdistriktsstøtte.



Figur 3. Arrangement ved teleskoperne. Foto: Ole Malling (2014).

Brug for hjælp

De første skridt mod etableringen af et naturvidenskabeligt oplevelsescenter på Brorfelde Observatorium er taget – og endnu flere er i vente. En del af arbejdet består i at indsamle fotos, historier, møbler og andet fra dengang, Brorfelde Observatorium var i funktion som forskningsenhed. Derfor vil leder af Brorfelde Observatorium, Julie K.L. Bouchet, opfordre alle, der ligger inde med minder, billeder eller andet fra Brorfelde Observatorium, til at kontakte hende på telefon 7236 2344 eller på mail jubou@brorfelde.dk.

Litteratur

- [1] Gyldenkerne, Keld (1986), Fyrre år i Brorfelde, *Astronomisk Tidsskrift*, Årg. 19, nr. 3.
- [2] Seising, L. (1980), The Dead-ice Area at Brorfelde, Northwestern-Zealand. Dansk geologisk Forening, Årsskrift for 1979, side 85-97.
- [3] Seising, L. (1982), Radiocarbon dating of a mammoth tusk fragment from Brorfelde, Denmark. *Bulletin geological Society of Denmark*, vol. 31, side 151-157.

Julie K.L. Bouchet er leder af Brorfelde Observatorium. Hun er uddannet i kommunikation ved Aalborg Universitet, hvor hun har forsket og undervist i oplevelsesdesign og kommunikation i en årrække. Hun er blandt andet medforfatter til bogen "Oplevelsesdesign" og har sideløbende brugt sine teorier i praksis gennem en række kulturprojekter, der har beskæftiget sig med at mangfoldiggøre kulturhistorien til en bred målgruppe.

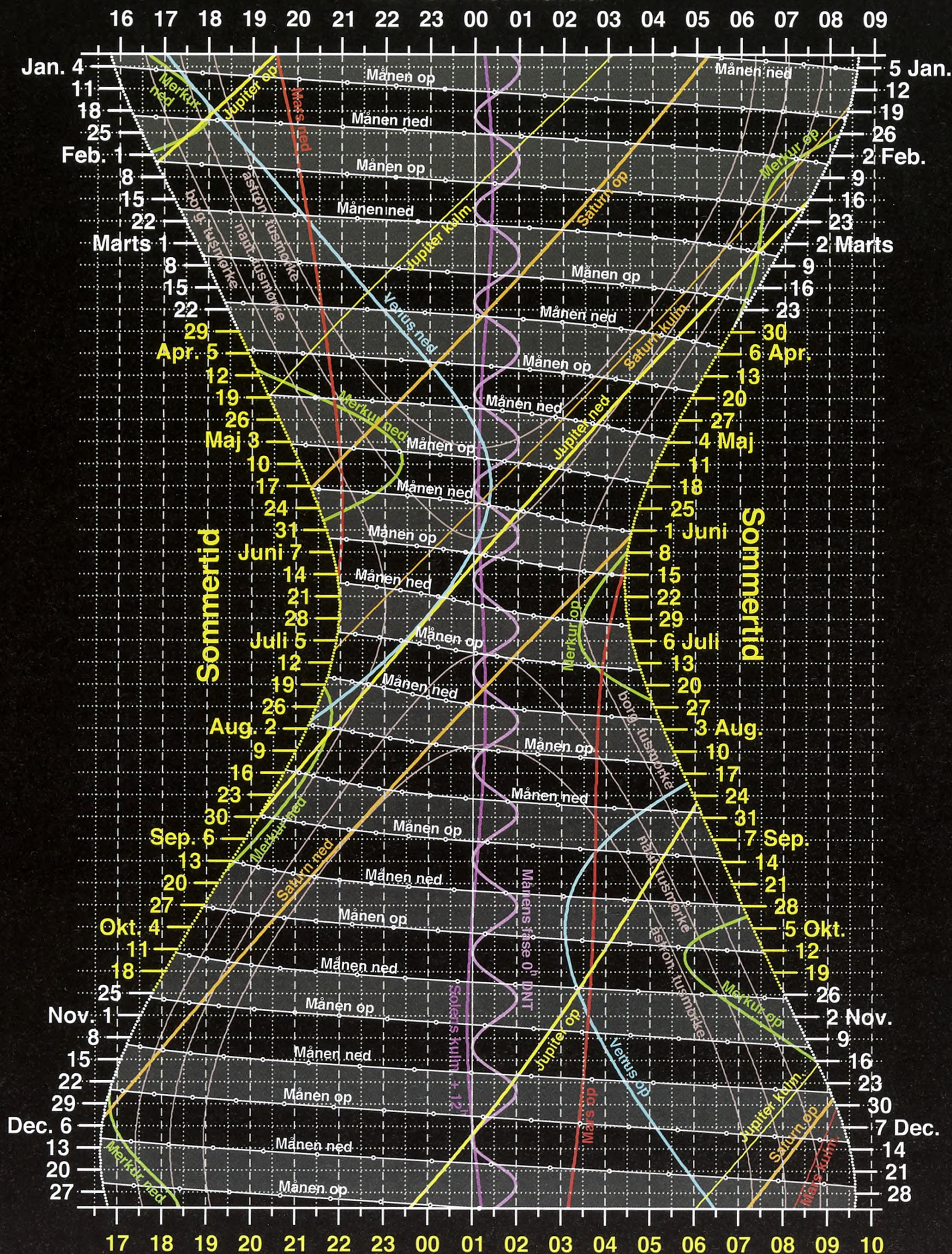


Mia B. Olsen er formidlingsansvarlig på Brorfelde Observatorium. Hun er uddannet geolog ved Københavns Universitet med en ph.d. i Jord- og Planetforskning. Hun har studeret meteoritter for at studere fødslen og de tidligste år af vores solsystem.



Planetkalender for København 2015

Dansk Normaltid



Foreningsnyt – foredrag i foråret 2015

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Jan.				
26/1	19.15	Den elektromagnetiske kraft	Ulrik Uggerhøj	AS (Kbh)
Feb.				
2/2	19.30	Den elektromagnetiske kraft	Ulrik Uggerhøj	AS (Aarh)
2/2	19.30	Fra nanoscience til nanoteknologi	Flemming Besenbacher	SNU
23/2	19.15	Den svage kernekraft	Steen Hannestad	AS (Kbh)
Mar.				
2/3	19.30	Den svage kernekraft	Steen Hannestad	AS (Aarh)
2/3	19.30	Mikro og nanomekaniske strukturer som sensorer	Anja Boisen	SNU
16/3	19.15	Den stærke kernekraft	Mads Toudal Frandsen	AS (Kbh)
23/3	19.30	Den stærke kernekraft	Mads Toudal Frandsen	AS (Aarh)
23/3	19.30	Nanosikkerhed – nanoteknologi og arbejdsmiljø	Ulla Vogel	SNU
Apr.				
13/4	19.15	Er der flere naturkræfter?	Ole Eggers Bjælde	AS (Kbh)
13/4	19.30	Observing nature with glasses that see at nanometer scale (på engelsk)	Susan Stipp	SNU
20/4	19.30	Er der flere naturkræfter?	Ole Eggers Bjælde	AS (Aarh)
Maj				
4/5	19.15	Tyngdekraften (foredrag på engelsk)	Niels Obers	AS (Kbh)
11/5	19.30	Afslutningsforedrag. Se nærmere på www.naturvidenskab.net	Jørgen Kjems	SNU
11/5	19.30	Tyngdekraften (foredrag på engelsk)	Niels Obers	AS (Aarh)

AS (Kbh): Astron. Selskab (København), Auditorium 4, H.C. Ørsted Instituttet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (www.astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarhus), Matematisk Inst., Aarhus Universitet, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, Auditorium D2, 8000 Aarhus C.

SNU: Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K (www.naturvidenskab.net).

Astronomisk Selskab

Foredragenes tema er Universets naturkræfter. Når planeter bevæger sig, stjerner lyser, galakser støder sammen, kvasarer udsender intens stråling og gravitationsbølger bevæger sig gennem Universet skyldes det de fire naturkræfter der hersker i Universet, nemlig:

- Den elektromagnetiske kraft
- Den svage kernekraft
- Den stærke kernekraft
- Tyngdekraften.

Tilsammen er de ansvarlige for alle fysiske vekselvirkninger, som finder sted i Universet helt fra processer, som holder bittesmå kvarker sammen i atomkerner til processer hvor gigantiske galaksehobe støder sammen. I foredragsrækken sættes fokus på de fire naturkræfter og deres betydning for Universet. Fem forskere fra danske universiteter fortæller om de nyeste opdagelser, som involverer naturkræfterne. Fire foredrag handler om hver af de fire naturkræfter, mens det femte foredrag stiller spørgsmålet: Kan der være en femte naturkraft? Foredragene afholdes i samarbejde mellem Astronomisk Selskab og Folkeuniversitetet i København og Aarhus. De er tilrettelagt af Johan Fynbo og Ole Bjælde, Astronomisk Selskab

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Temaet for foredragsrækken er den nyeste udvikling indenfor nanoscience og nanoteknologi og indledes med et oversigtsforedrag af Professor Flemming Besenbacher fra Carlsberg-fondet og Aarhus Universitet. Man behøver ikke at være medlem af SNU for at komme til foredragene. Alle er hjertelig velkomne!

Kontingentindbetaling for 2015 til Astronomisk Selskab

Kære medlemmer af Astronomisk Selskab. Det er nu blevet tid til at betale kontingent for at fortsætte dit medlemskab. Kontingentsatser for kalenderåret 2015 er:

- Almindeligt medlemskab: 350 kr.
- Ungdomsmedlemskab (18-26 år): 150 kr.
- Børn og unge under 18 år: gratis

Det relevante kontingentbeløb bedes indbetalt på Astronomisk Selskabs konto i **Danske Bank: reg. 1551, konto 8001081**.

Betaler du kontingent via netbank så **husk** at oplyse Navn(e) og Adresse(r) i kommentarfeltet, ellers kan kassereren ikke se hvem der er betalt for. Betaler du kontingent på posthus eller i et pengeinstitut skal du oplyse foreningens adresse:

Astronomisk Selskab, c/o Steen Traberg-Borup, Nørrebrogade 7A, 3.tv, DK-2200 København N.

Sidste frist for rettidig indbetaling er mandag d. 12. januar 2015. Ønsker du ikke at fortsætte dit medlemskab bedes du oplyse dette til foreningens medlemskontakt (undertegnede).

Medlemmer og familier ønskes en god jul og et godt nytår.

Steen Traberg-Borup, kasserer/medlemskontakt
steen@traberg-borup.dk (mobil: 2144 0612)

Einsteins odysse: Fra speciel til almen relativitetsteori

Af Helge Kragh, Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet

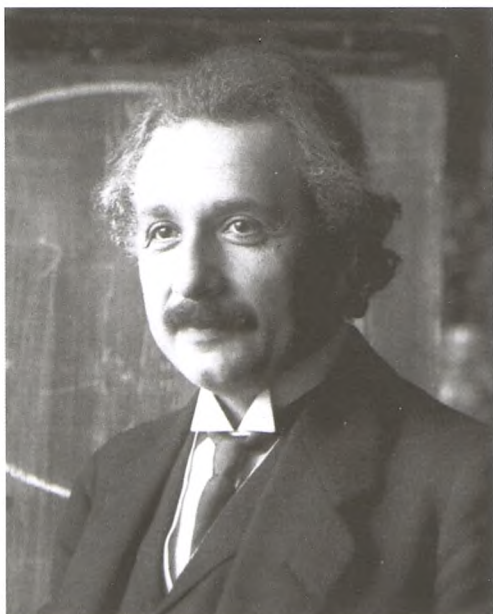
I november 1915 kunne Einstein efter mange års intenst arbejde fremlægge den endelige version af sin nye teori for tyngdekraften, der markerer et af videnskabens absolutte højdepunkter. Processen fra den specielle til den generelle teori var hård, til tider næsten en mental tortur. Lad os følge Einstein på hans rejse til den teori, der snart fylder 100 år.

1907-11: Ækvivalensprincippet

I årene efter Einsteins gennembrud i 1905 blev hans relativitetsteori – der endnu ikke var “speciel” – udviklet af især Max Planck og Hermann Minkowski. Sidstnævnte formulerede den i 1907 som en firedimensional teori for rumtiden, hvilket stadig er standardversionen i lærebøger. Derimod var Einstein oprindeligt modstander af den nye version. I Minkowskis formulering kan metrikken for rumtiden, dvs. afstanden ds mellem to nabopunkter, skrives som

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2, \quad (1)$$

hvor $x_4 = ict$ og c er lysets invariante hastighed i vakuum. Det stod hurtigt klart, at teorien intet havde at sige om gravitationsfænomener, hvilket man ellers ville forvente om en virkelig fundamental teori. Einstein forsøgte oprindeligt at indpasse gravitationen i den eksisterende relativitetsteoris rammer og først senere, da dette viste sig umuligt, at udvide teorien til en almen eller generel relativitetsteori. Hvordan denne end så ud, så måtte den have den oprindelige teori som grænsetilfælde for gravitationsfelter af forsvindende styrke. Dette korrespondenskrav var dog slet ikke nok til at give en ide om den endnu ukendte gravitationsteori.



Figur 1. Einstein i 1921.

Ideen til en generaliseret relativitetsteori fremkom i en artikel fra 1907, hvorom Einstein senere skrev:

“Jeg indså, at alle naturlovene, undtagen gravitationsloven kunne diskuteres inden for rammerne af den specielle relativitetsteori. Jeg ønskede at finde ud af grunden hertil, men det var svært for mig. ... Pludselig kom gennembruddet en dag. Jeg sad i en stol i mit patentkontor i Bern og pludselig slog en tanke ned i mig: Hvis et menneske falder frit, så føler han ikke sin egen vægt. Jeg var rystet. Dette simple tankeeksperiment gjorde et dybt indtryk på mig. Det førte til teorien for gravitationen.”

I 1919 beskrev han ideen som intet mindre end “den lykkeligste tanke i hele mit liv.” Pudsigt nok kom inspirationen til både Newtons og Einsteins gravitationsteori fra et fald: i Newtons tilfælde fra et frit faldende æble (hvis man skal tro traditionen) og i Einsteins tilfælde fra et frit faldende menneske.

Einsteins idé var på sin vis gammel, idet det siden 1700-tallet havde været anerkendt, at et legemes træge eller inertielle masse m_i er den samme som dets tunge eller gravitationelle masse m_g :

$$m_i = m_g \quad (2)$$

Førstnævnte størrelse er den masse, der indgår i Newtons kraftlov, hvor en ydre kraft F bibringer den en acceleration på $a = F/m_i$. Derimod udtrykkes m_g gennem gravitationsloven, som det sker ved vejning i et tyngdefelt. Allerede Newton havde i sin *Principia* fra 1687 vist, at dette såkaldte svage ækvivalensprincip var gyldigt ned til en nøjagtighed af 1 %, hvilket han gjorde ved at sammenligne svingningstiden af penduler lavet af træ og guld. Omkring 1905 var princippet bekræftet med langt større præcision af især den ungarske fysiker Roland Eötvös.

Men en ting er et empirisk faktum, noget andet er dets forklaring. Einstein var den første til at hævde, at (2) gælder eksakt og at ækvivalensen er et alment princip, der må kunne forstås ud fra en fundamental teori. Det afgørende i det svage ækvivalensprincip er, at ethvert mekanisk eksperiment, der foretages i et system i konstant acceleration, må give samme resultat som i et eksperiment i et system, der befinder sig i et homogent tyngdefelt med modsat rettet tyngdeacceleration. Hvad

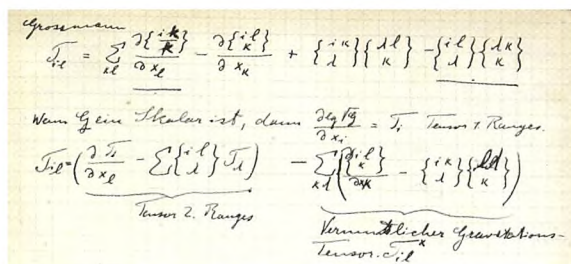
mere er, Einstein generaliserede princippet til en stærk version, der er gyldig for *ethvert* eksperiment, mekanisk eller ej.

Allerede i 1907 antydede Einstein to eksperimentelle konsekvenser af ækvivalensprincippet, men først i en artikel fra 1911 diskuterede han klart disse konsekvenser. Samtidig slog han fast, at ækvivalensprincippet ikke kan udledes af den specielle relativitetsteori, hvorfor han foreslog en første version af en udvidet teori på basis af princippet. Denne version var endnu baseret på ideen om et statisk gravitationsfelt og en plan rumtid som givet ved Minkowski-metrikken (1). Den førte til det ejendommelige resultat, at lysets hastighed afhang af gravitationspotentialet. Ikke desto mindre kunne han bruge resultatet til at beregne, hvordan lyset afbøjes i nærheden af en tung masse. Han fandt, at hvis en lysstråle nærmer sig massen M i den korteste afstand D , så vil den afbøjes med vinklen

$$\varphi = \frac{2GM}{Dc^2}, \quad (3)$$

hvor G er Newtons konstant. Einstein tog forudsigelsen alvorligt og opfordrede astronomerne til at gøre det samme, selv om afbøjningen for Solens vedkommende ville være ganske lille, nemlig $\varphi = 0,83''$.

I foråret 1912 blev Einstein endvidere klar over, at hvis lyset afbøjes af et massivt legeme, så vil en stjerne placeret på synslinjen mellem iagttageren på Jorden og en fjern lyskilde kunne fungere som en "gravitationslinse." Linsen vil levere et forstørret og dobbelt billede af kilden. Einstein skrev disse overvejelser ned i sin notesbog, hvorefter han glemte alt om dem, indtil han i 1936 skrev en artikel om emnet. I dag er den gravitationelle linseffekt af meget stor astronomisk og kosmologisk betydning. Den går altså tilbage til 1912, før Einstein havde formuleret sin generelle relativitetsteori.



Figur 2. Side fra Einsteins notesbog fra Zürich, 1912. Vejledt af Grossmann anvender han tensorer til sine ligninger for gravitationsfeltet.

Ud fra ækvivalensprincippet alene viste Einstein i 1911, at når lys med frekvens ν "falder" i et gravitationsfelt, hvor ændringen i potentiale er $\Delta\Phi$, da vil lysets frekvens ændres med $\Delta\nu/\nu = \Delta\Phi/c^2$. Hvis lys udsendes fra overfladen af en stjerne med masse M og radius R , og modtages på Jorden (m , r), vil resultatet blive en rødforskydning på

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \cong -\frac{G}{c^2} \left(\frac{M}{R} - \frac{m}{r} \right) \quad (4)$$

Teorien fra 1911 var interessant, men den viste sig hurtigt at være en blindgyde snarere end en vej frem mod en bedre teori.

1912-14: I relativitetens kviksand

Vejen ud ad blindgyden kom via matematikken. I efteråret 1912 indså Einstein, at den nye gravitationsteori måtte baseres på de ideer om ikke-euklidisk geometri, der går tilbage til Karl Friedrich Gauss og som hans landsmand Bernhard Riemann i midten af 1800-tallet havde generaliseret til en teori for, hvad der blev kendt som tensorer. Riemann indførte centrale begreber som krumningstensor og den metriske tensor til karakteristik af et rum af vilkårligt mange dimensioner.

Einstein var ikke oprindeligt opmærksom på differentialgeometriens relevans for sit projekt. Hans forståelse af de uvante matematiske metoder skyldtes i høj grad ungdomsvennen Marcel Grossmann, der var matematikprofessor i Zürich og med hvem Einstein indledte et samarbejde. Desuden forbedrede han sine kundskaber gennem en faglig korrespondance med den italienske matematiker Tullio Levi-Civita, der var en af fædrene til den moderne differentialgeometri og stærkt interesseret i Einsteins projekt.

Den abstrakte matematiks betydning kom som en overraskelse for ham. Som han i 1912 skrev til sin kollega i München, Arnold Sommerfeld: "I hele mit liv har jeg aldrig arbejdet så hårdt; jeg er blevet besjælet af en stor respekt for matematikken, hvis mere subtile dele jeg indtil nu, i min enfoldighed, havde anset for den rene luksus." Samarbejdet med Grossmann førte i 1913 til en vigtig artikel, hvori de to foreslog et nyt udkast (*Entwurf*) til gravitationsteorien baseret på brugen af tensorer og ikke-euklidisk rumtid. Einstein fortalte senere om, hvordan han blev ført på sporet af den nye og – skulle det vise sig – særdeles frugtbare begrebsramme. Udgangspunktet var igen ækvivalensprincippet:

"Hvis alle [accelererede] systemer er ækvivalente, så kan den euklidiske geometri ikke være gyldig i dem alle. At udelade geometrien og bibeholde de fysiske love svarer til at beskrive tanker uden ord. Vi må have ord, før vi kan udtrykke tanker. Hvad må vi søge efter i denne forbindelse? Problemet var uløseligt for mig indtil 1912, da jeg pludselig indså, at Gauss' teori for flader indeholdt den nøgle, der kunne åbne op for mysteriet. ... Jeg forstod, at geometriens grundlag havde fysisk betydning."

Artiklen fra 1913 bestod af to dele, en fysisk skrevet af Einstein og en matematisk skrevet af Grossmann, og karakteristisk nok blev den publiceret i *Zeitschrift für Mathematik und Physik*. Med *Entwurf*-teorien blev der for første gang udformet en teori, hvor rumtiden optræder som en dynamisk størrelse og ikke som en uforanderlig baggrund for fysiske hændelser. Det er netop en central pointe i den generelle relativitetsteori, at hændelser ikke foregår med en fastlagt rumtid som baggrund. Den scene, hændelserne udspiller sig på, er selv dynamisk og foranderlig.

I Riemanns teori var metrikken i almindelighed givet ved udtrykket

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu \quad (5)$$

hvor $g_{\mu\nu}$ er den såkaldte metriske tensor og der underforstås summering over de to indekser fra 1 til 4. Den simple Minkowski-metrik (1) kan karakteriseres ved diagonalelementerne $g_{\mu\mu} = (1, 1, 1, -c^2)$, mens $g_{\mu\nu} = 0$ for $\mu \neq \nu$. I den teori, Einstein og Grossmann fremlagde, svarede den symmetriske $g_{\mu\nu}$ tensor til Newtons gravitationspotentiale Φ , sådan som det indgår i Poissons ligning for et legeme med massefylden ρ :

$$\nabla^2 \Phi = -4\pi G \rho \quad (6)$$

Men mens Newton og Poisson kunne klare sig med et enkelt potentiale, var der nu 10 af dem:

$$ds^2 = g_{11} dx_1^2 + 2g_{12} dx_1 dx_2 + \dots + 2g_{34} dx_3 dx_4 + g_{44} dx_4^2 \quad (7)$$

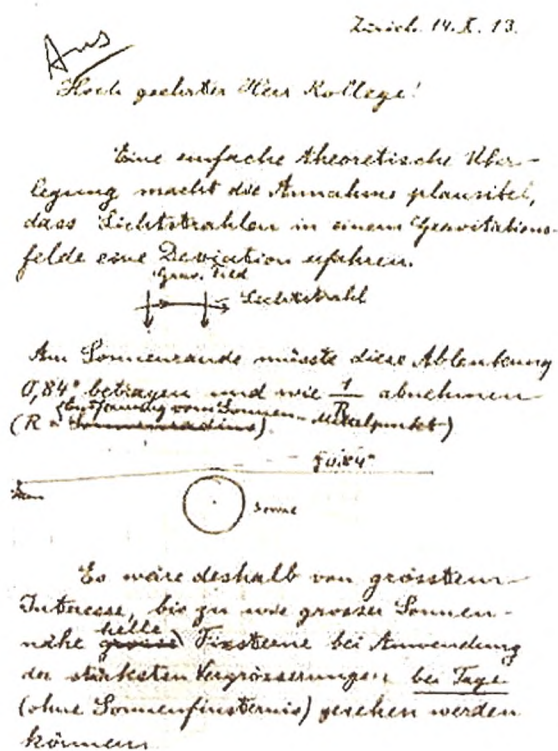
Som Einstein forklarede, så vil et legeme i et gravitationsfelt bevæge sig ad geodætiske baner svarende til, at det bevæger sig den kortest mulige afstand i den rumtid, der er krummet af gravitationen. I et euklidisk rum svarer den geodætiske bane til en ret linje, som ved inertiel bevægelse.

Problemerne med *Entwurf*-teorien var ikke så meget af matematisk som af fysisk art. Ifølge relativistisk tankegang har koordinater ingen virkelig eksistens i naturen, men er blot hjælpemidler til at beskrive den. I overensstemmelse hermed mente Einstein, at ligningerne for de fysiske love måtte have samme form i ethvert koordinatsystem, hvilket betegnes som kravet om generel kovarians. Ligningerne fra 1913 syntes imidlertid ikke at have denne egenskab. Eller rettere, hvis de blev bragt på kovariant form, så førte det til problemer med hensyn til klassiske dyder som kausalitet og determinisme, og ligningerne resulterede ikke længere i Newtons gravitationslov som en første tilnærmelse. Desuden overbeviste Einstein sig om, at de kovariante ligninger ikke entydigt kunne bestemme gravitationsfeltet i et stoffrit område af rummet. Dette "hulargument" og andre indvendinger af en fysisk art fik ham i første omgang til at opgive kravet om streng kovarians, ja endda til at opfatte manglen herpå som en nødvendighed.

I foråret 1913 var han fuld af optimisme og mente, at han nu havde løst gravitationens mysterier. Til vennen Paul Ehrenfest i Holland skrev han, at han havde en "indre følelse" af, at teorien var sand. Einsteins indre følelser viste sig ofte at være rigtige, men i dette tilfælde snød de ham. Et halvt år senere måtte han erkende, at optimismen var ubegrundet og at *Entwurf*-teorien ikke var konsistent. Han var tilbage i kviksandet og det tog mere end et år, før han fik kæmpet sig op af det.

Fordybte som Einstein var i den nye og abstrakte matematik, så glemte han ikke, at der var tale om en fysisk teori og at den derfor måtte have testbare konsekvenser. I udformningen fra 1913 ledte den til samme forudsigelser som den mere primitive version fra 1911, dvs. til gravitationel rødforskydning og afbøjning af lysstråler omkring tunge masser. I et brev

til den amerikanske astronom George Hale fra oktober 1913 gjorde Einstein ham opmærksom på forudsigelsen (3), der som konsekvens har, at "Ved Solens rand må afbøjningen være 0,84" og den vil aftage som $1/R$ (hvor R er afstanden til Solens midte)". Einstein ville gerne vide, om effekten kunne påvises også uden en solformørkelse, hvilket Hale dog benægtede. Hvis den overhovedet skal kunne iagttages, kræver det en total solformørkelse, sådan som det skete ved påvisningen i 1919. Da Einstein skrev brevet til Hale, var han også i færd med at undersøge, om gravitationsteorien kunne forklare Merkurs anomale bevægelse omkring Solen (se nedenfor). Det lykkedes dog ikke, for ganske vist kunne han i 1914 beregne det ekstra bidrag til Merkurs periheldrejning til 18" per 100 år, men det var mindre end halvdelen af den målte effekt.



Figur 3. Einsteins brev til Hale af 14. oktober 1913 vedrørende muligheden for at påvise stjernelysets afbøjning om Solen.

1915-16: Forløsning

Efter mange genvordigheder og et intenst arbejde lykkedes det i efteråret 1915 Einstein at bringe sit ambitiøse projekt på ret kurs, hvilket skete i form af fire meddelelser til det prøjsiske videnskabsakademi i Berlin, hvor de i november blev præsenteret med en uges mellemrum og kort efter forelå publiceret i akademiets *Sitzungsberichte*. Da det hele var slut og sejren hjemme, skrev han til Sommerfeld om denne hektiske periode af kreativ tænkning: "Den sidste måneds tid har været en af de mest spændende og anstrengende i hele mit liv, men også en af de mest succesrige." I sin meddelelse fra 11. november formulerede Einstein teorien i form af generelt kovariante ligninger og viste, i modsætning til hvad han tidligere havde troet, at de faktisk kunne

reduceres til Newtons lov. Han sagde nu endegyldigt farvel til *Entwurf*-teorien, som han erkendte var en fejltagelse.

Ugen efter kom så det virkelige gennembrud, idet han kunne vise, at lysafbøjningen omkring Solen måtte være ca. 1,7", altså det dobbelte af hvad han tidligere havde beregnet. Af endnu større betydning var det, at han nu for første gang kunne beregne en værdi for Merkurs præcession, der stemte med de astronomiske målinger. Resultatet gjorde et voldsomt indtryk på ham, for nu vidste han, at han havde ret. Det var, som om naturen havde talt til ham. "Mine vildeste drømme er blevet opfyldt," skrev han eksalteret i et brev. "I et par dage var jeg helt overvældet af ophidselse og lykke." Ved en anden lejlighed sagde han, at resultatet havde givet ham hjertebanken.

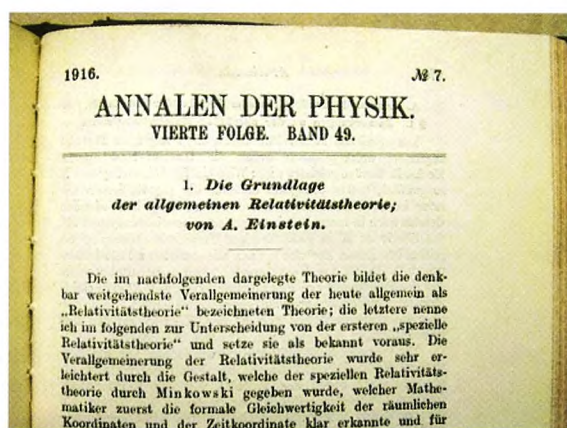
Den 25. november 1915 fremlagde Einstein så sine endelige ligninger for gravitationsfeltet – de ganske samme ligninger der benyttes i dag, om end udtrykt i en anden notation. Kvalitativt udtrykker ligningerne, at der er en bestemt relation mellem rumtidens geometri og indholdet af energi-impuls i form af bl.a. stof, tryk og elektriske ladninger. Rumtiden ændrer sig under indflydelse af stof og energi, og rumtidens krumning manifesterer sig som et gravitationsfelt. I den matematiske formulering er de relevante størrelser symmetriske 4×4 tensorer af anden rang. De 10 ligninger kan samlet skrives som

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}, \quad (8)$$

hvor venstresiden er geometrisk, mens den højre side er fysisk. Størrelsen $T_{\mu\nu}$ er energi-impuls-tensoren, mens $R_{\mu\nu}$ (kaldet Ricci-tensoren) og den skalare størrelse R , der er afledt af $g_{\mu\nu}$ og $R_{\mu\nu}$, angiver rumtidens krumning. Endelig er konstanten κ en gravitationskonstant, der er proportional med Newtons konstant:

$$\kappa = 8\pi G/c^2 \quad (9)$$

Einsteins ligninger tilfredsstiller bevarelse af energi-impuls, som matematisk udtrykkes ved, at divergensen af $T_{\mu\nu}$ forsvinder. I sin meddelelse af 25. november 1915 medtog Einstein denne bevarelseslov, men endnu uden at indse, at den faktisk følger af feltligningerne.



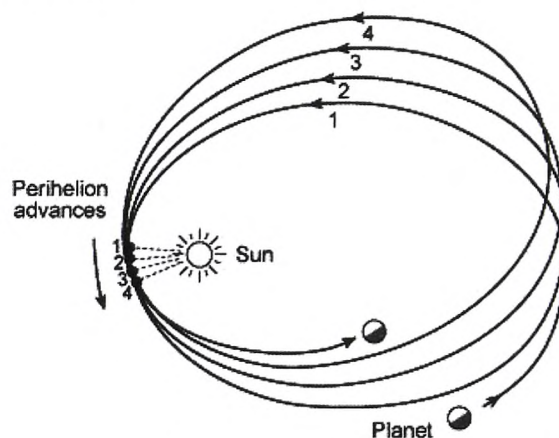
Figur 4. Einsteins artikel fra 1916 om den generelle relativitetsteori.

Selv om Einsteins færdige ligninger altså stammer fra 1915, kan man med en vis rimelighed hævde, at den generelle relativitetsteori stammer fra 1916. Det var nemlig først i en stor artikel i maj-nummeret af *Annalen der Physik*, at Einstein gav en samlet og omfattende fremstilling af teorien. Denne klassiske afhandling, der har titlen "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" (Den Almene Relativitetsteoris Grundlag) slutter med en kort og præcis gennemgang af teoriens forudsigelser i form af de tre tests. For almindelige læsere skrev Einstein i 1916 desuden en fremragende bog om den nye relativitetsteori, der året efter udkom på tysk og i 1920 i engelsk oversættelse.

I stedet for at hvile på sine laurbær, udvidede Einstein i 1917 sin gravitationsteori til en kosmologisk teori for det lukkede univers. Dette gjorde han ved at indføre et yderligere led i feltligningernes venstre side, der virkede som en frastødende kosmisk kraft. Han skrev det som $\Lambda g_{\mu\nu}$, hvor Λ snart blev kendt som den kosmologiske konstant. Det er ikke almindelig kendt, at størrelsen optræder hos Einstein før han overhovedet overvejede det kosmologiske spørgsmål. Gemt i en obskur fodnote i artiklen fra 1916 gør Einstein opmærksom på, at ligningerne vil blive mere generelle, hvis størrelsen $\Lambda g_{\mu\nu}$ tilføjes; men da han ikke kan finde en fysisk fortolkning for Λ , vælger han at ignorere ideen.

Merkurs periheldrejning

Blandt de tre tests for den generelle relativitetsteori var den gravitationelle rødforskydning strengt taget ikke en egentlig test, da den fulgte af ækvivalensprincippet alene. Desuden var der endnu ingen målinger, med hvilke den teoretiske forudsigelse kunne sammenlignes. Allerede i 1914 havde der været planer om at måle lysets mulige afbøjning om Solen, men krigen satte en stopper for dem. Først i 1919 kunne den af Einstein forudsagte effekt bekræftes gennem observationer af en solformørkelse i troperne, der blev foretaget af en engelsk ekspedition under ledelse af Arthur Eddington og Frank Dyson.



Figur 5. Merkur har en ret elliptisk bane ($e = 0,21$). Under planetens omløb om Solen vil hele ellipsen, og dermed også perihel (den nærmeste afstand til Solen), ganske langsomt flytte sig. Effekten skyldes primært tyngdepåvirkningen fra de øvrige planeter, men en mindre del kan kun forklares ud fra den generelle relativitetsteori.

Den sidste test, der vedrørte Merkurs banebevægelse, var den vigtigste for Einstein, også selv om der ikke var tale om en forudsigelse i sædvanlig forstand. Så tidligt som 1859 havde den franske astronom Urbain Leverrier nemlig vist, at den måde Merkurs perihel langsomt drejer om Solen, ikke stemmer med Newtons gravitationsteori. Den observerede periheldrejning på 570" i løbet af 100 år kunne i det store og hele forklares ud fra perturbationer fra de øvrige planeter (især fra Venus, Jorden og Jupiter), men Newtons teori gav kun en værdi på 527".

Problemet med de manglende 43" viste sig uforklarligt på trods af adskillige, ofte ret desperate forsøg på at løse det. Nogle astronomer manipulerede med Newtons gravitationslov, mens andre postulerede eksistensen af en planet inden for Merkurs bane. Lige meget hjalp det. Einsteins teori forudsagde ikke anomalien, men den forklarede den uden brug af hjælpehypoteser. Ifølge Einsteins teori fra november 1915 kunne den relativistiske periheldrejning for en planet i løbet af et baneomløb tilnærmet skrives som

$$\Delta\varepsilon = 24\pi^3 \frac{a^2}{T^2 c^2 (1 - e^2)}, \quad (10)$$

hvor T er omløbstiden, e excentriciteten og a den halve storakse. Efter at have indsat værdierne for Merkur, konkluderede han: "Beregnungen viser, at for planeten Merkur vil perihelbevægelsen øges med 43" i løbet af 100 år, mens astronomer angiver $45'' \pm 5''$ som den uforklarlige rest mellem observationer og Newtons teori. Der er altså en fuldstændig overensstemmelse." Einsteins udtryk var en tilnærmelse af anden orden, ikke en eksakt beregning ud fra grundligningerne. Den eksakte løsning blev først fundet af astronomen Karl Schwarzschild i februar 1916, kort før hans tragiske død.

I øvrigt var Einsteins løsning på problemet ikke helt overbevisende. Ganske vist havde han løst det for Merkurs vedkommende, men også de øvrige planeter foretager en ganske langsom periheldrejning, der skulle kunne forklares ud fra formlen (10). I slutningen af sin artikel henviste Einstein til, at mens hans teori for Jorden og Mars gav henholdsvis 4" og 1", så viste observationer omkring 11" og 9". Han valgte at bagatellisere uoverensstemmelsen, der da også har vist sig at skyldes dårlige observationer.

Einstein eller Hilbert?

Man kan mange steder læse, at den generelle relativitetsteori ikke skyldes Einstein alene, men at det afgørende ligningssystem (8) faktisk blev fundet af den fremragende tyske matematiker David Hilbert, kort før Einstein fremlagde sin teori for akademiet i Berlin. Hilberts artikel blev ganske vist først publiceret i *Göttingen* i marts 1916, men den blev indsendt 20. november 1915, altså fem dage før Einsteins. På den baggrund er det endda blevet foreslået, at man burde tale om "Hilbert-Einstein-ligningerne", og det er tilsvarende blevet antydnet, at Einstein på en eller anden måde

plagierede Hilbert i slutspurten mod den endelige teori. Takket været et omfattende videnskabshistorisk detektivarbejde ved vi dog i dag, at det ikke var tilfældet.



Figur 6. Hilbert i 1912.

Hilbert havde gennem flere år fordybet sig i teoretisk fysik, som han ønskede at formulere som et aksiomatisk system i matematikken. Han var især inspireret af en ambitiøs teori for stof og elektromagnetisme, som Gustav Mie havde udviklet og som Hilbert søgte at udvide til at dække også tyngdekraften. I sommeren 1915 satsede han på at skabe en "teori om alting" gennem en slags syntese af Mies teori og Einsteins endnu ufærdige generelle relativitetsteori. Han var fra den tid i hyppig brevkontakt med Einstein og de to udvekslede deres seneste tanker og publikationer.

Hilberts matematiske anstrengelser resulterede i et vigtigt arbejde om "Fysikkens Grundlag", der i sin trykte version indeholdt næsten de samme kovariante feltligninger, som Einstein kom frem til den 25. november. Det fremgår af Hilberts artikel i *Göttingen Nachrichten*, at den blev indsendt den 20. november, mens der intet står om senere revisioner. Imidlertid er den trykte version ganske forskellig fra den, Hilbert oprindeligt sendte til både tidsskriftet og til Einstein. Dette ved vi fra en korrektur af 6. december, der ikke indeholder noget, der blot minder om Einsteins feltligninger. Så alt tyder på, at Hilbert har indsat ligningerne i korrektoren *efter* at have læst Einsteins afhandling, der forelå på tryk den 2. december.

I øvrigt var Hilberts tilgang og formål væsentligt anderledes end Einsteins, idet førstnævnte primært var interesseret i en generalisation af Mies elektronteori. Den 18. november skrev Einstein et postkort til Hilbert, hvor han fortalte ham om sin succes med Merkurs periheldrejning. Dagen efter lykønskede Hilbert ham og tilføjede: "Hvis jeg kunne regne så hurtigt, som du kan, så måtte elektronen i mine ligninger kapitulere og samtidigt måtte brintatomet levere en undskyldning for, at det ikke udstråler energi." Hilbert søgte altså efter en fysisk forklaring på de stationære baner i Bohrs atomteori, idet elektroner i omløb om kernen jo efter klassisk fysik burde udsende energi. Bohr selv

mente derimod, at der ikke var nogen forklaring, for de stationære tilstande var et fundamentalt kvantepostulat. Hilbert havde endnu ikke taget kvanteteorien helt til sig.

For at gøre en lang historie kort, så tilhører prioriteten til de gravitationelle feltligninger Einstein. Hvis der i denne sag var tale om plagiat, så var det nærmere Hilbert, der uforvarende plagierede Einstein og ikke omvendt. Med nutidens standarder for forskningsetik ville Hilbert måske kunne kritiseres for videnskabelig uredelighed. I øvrigt gav sagen anledning til en kort privat kontrovers mellem de to store forskere, men efter et par uger blev den skrinlagt, uden at forholdet mellem dem led skade.

Litteratur

- [1] A. Pais (1982), 'Subtle is the Lord...': The Science and the Life of Albert Einstein, Oxford: Oxford University Press.
- [2] J. Renn, red. (2007), The Genesis of General Relativity, bd. 1-4, Berlin: Springer.

- [3] A. Einstein (1982), How I created the theory of relativity, *Phys. Today* **35**:8, 45-47.
- [4] A. Einstein m.fl. (1956), The Principle of Relativity, New York: Dover Publications.
- [5] A. Einstein (1987-2014), The Collected Papers of Albert Einstein, bd. 1-14, Princeton: Princeton University Press.
- [6] D. Rowe (2001), Einstein meets Hilbert, *Phys. Perspective* **3**, 379-425.



Helge Kragh er professor i videnskabshistorie ved Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet, og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie.

Elastisk fotonspredning på atomer og puck kollisioner - breddeopgave 61 og 62 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, NSM, 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 løsninger og kommentar til opgaverne fra forrige nummer samt to nye opgaver. Opgaverne i sidste nummer af KVANT var disse breddeopgaver (nr. 61 og 62 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 61 og 62. Elastisk fotonspredning på atomer og puck kollisioner

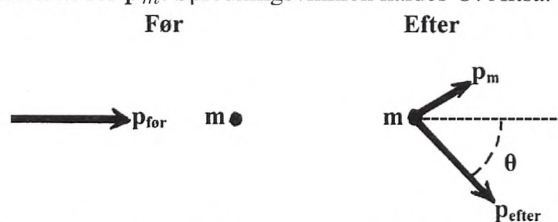
En foton spredes elastisk på et atom (atomet er i sin grundtilstand før og efter spredningen), således at fotonens bevægelsesretning efter spredningen danner en vinkel med den oprindelige. Hvordan afhænger forskellen mellem fotonens bølgelængde før og efter spredningen af spredningsvinklen? Begrund svaret.

En ishockey puck i fart på isen støder ind i en hvilende puck magen til. Puckerne kan være roterende før og efter sammenstødet, og der kan både ske ændringer af deres rotationsenergi og udvikles varme og indre svingninger i de to pucker. Hvordan afhænger vinklen imellem bevægelsesretningerne af de to pucker efter sammenstødet af, om den samlede translatoriske kinetiske energi er øget, uændret eller formindsket ved stødet? Begrund svaret.

Løsninger

61. Vi kalder impulsen (eller "bevægelsesmængden") af fotonen før spredningen med bølgelængden $\lambda_{\text{før}}$ for $\mathbf{p}_{\text{før}}$,

impulsen af fotonen efter spredningen med bølgelængden λ_{efter} for $\mathbf{p}_{\text{efter}}$ og impulsen efter spredningen af atomet med massen m for $\mathbf{p}_m$. Spredningsvinklen kaldes Θ . Altså:



Figur 1. Elastisk spredning af en foton på et atom.

Den samlede impuls er bevaret under spredningsprocessen:

$$\mathbf{p}_{\text{før}} = \mathbf{p}_{\text{efter}} + \mathbf{p}_m \quad (1)$$

Altså har vi (hvor $\bullet$ betyder skalarprodukt)

$$p_m^2 = (\mathbf{p}_{\text{før}} - \mathbf{p}_{\text{efter}})^2 = p_{\text{før}}^2 + p_{\text{efter}}^2 - 2\mathbf{p}_{\text{før}} \bullet \mathbf{p}_{\text{efter}} \quad (2)$$

Da spredningen forudsættes at ske elastisk, medfører energibevarelsen, idet der regnes relativistisk:

$$p_{\text{før}} \cdot c + mc^2 = p_{\text{efter}} \cdot c + (p_m^2 \cdot c^2 + m^2 c^4)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Ved rokering og kvadrering fås heraf:

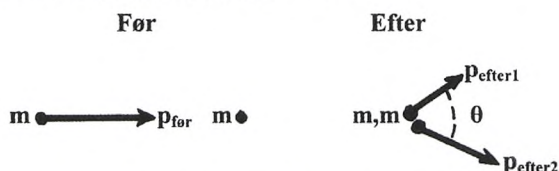
$$p_m^2 = p_{\text{før}}^2 + p_{\text{efter}}^2 - 2p_{\text{før}}p_{\text{efter}} + 2mc(p_{\text{før}} - p_{\text{efter}}) \quad (4)$$

Idet $\mathbf{p}_{\text{før}} \bullet \mathbf{p}_{\text{efter}} = p_{\text{før}} \cdot p_{\text{efter}} \cos \Theta$, giver sammenholdningen af ligning (2) med ligning (4) herefter: $p_{\text{før}} \cdot p_{\text{efter}} (1 - \cos \Theta) = mc(p_{\text{før}} - p_{\text{efter}})$, dvs. $1 - \cos \Theta = mc(p_{\text{før}}^{-1} - p_{\text{efter}}^{-1})$. Idet $\lambda_{\text{før}} = h/p_{\text{før}}$ og $\lambda_{\text{efter}} = h/p_{\text{efter}}$, hvor h er Plancks konstant, fås nu

$$\lambda_{\text{efter}} - \lambda_{\text{før}} = h(1 - \cos \Theta)/(mc) \quad (5)$$

som svar på opgaven.

62. Vi kalder impulsen af pucken i bevægelse før stødet for $\mathbf{p}_{\text{før}}$ og impulserne af de to pucker efter stødet for henholdsvis $\mathbf{p}_{\text{efter1}}$ og $\mathbf{p}_{\text{efter2}}$. Altså:



Figur 2. Elastisk spredning af en puck på en anden puck.

Θ er vinklen imellem bevægelsesretningerne af de to pucker efter stødet.

Da den samlede impuls er bevaret under stødet, altså:

$$\mathbf{p}_{\text{før}} = \mathbf{p}_{\text{efter1}} + \mathbf{p}_{\text{efter2}}, \quad (6)$$

har vi ved kvadrering

$$p_{\text{før}}^2 = p_{\text{efter1}}^2 + p_{\text{efter2}}^2 + 2p_{\text{efter1}}p_{\text{efter2}} \cos \Theta. \quad (7)$$

idet $\mathbf{p}_{\text{efter1}} \bullet \mathbf{p}_{\text{efter2}} = p_{\text{efter1}} \cdot p_{\text{efter2}} \cos \Theta$.

Ikke relativistisk er den samlede translatoriske energi før stødet $p_{\text{før}}^2/2m$ og efter stødet $p_{\text{efter1}}^2/2m + p_{\text{efter2}}^2/2m$, hvor m er massen af en enkelt puck. Ligning (7) viser derfor, at vinklen Θ er henholdsvis stump, 90 grader og spids, når den samlede translatoriske energi er henholdsvis øget, uændret og formindsket ved stødet.

Kommentar

I nummeret af KVANT fra maj 2005 illustrerede jeg ved eksempler forskellen på, hvad jeg kaldte *nomologiske* begrundelser og *kausale* begrundelser, ved fysisk problemløsning. De to opgaver her og deres besvarelser af mig her og af de studerende til eksamen kan tjene som yderligere eksempler.

Ved en nomologisk begrundelse (ordet *nomos* er fra græsk og betyder regel eller lov) af et svar på et problem består begrundelsen i at redegøre for, hvordan svaret på problemet er udtryk for gennemsætningen af et overordnet mønster eller en overordnet lovmæssighed under de foreliggende omstændigheder. Ved en kausal begrundelse (ordet *kausal* er fra latin og betyder årsagsbestemt) af et svar består begrundelsen i at udpege de dele af de foreliggende omstændigheder, der forårsager det, der skal forklares. For fysikunderviseren er nomologiske forklaringer essensen i fysik og målet for fysikundervisningen. Hvorimod fysikeleven ved problemløsning så langt som muligt vil forsøge at klare sig ved hjælp af kausale forklaringer. Kausale forklaringer er mindre abstrakte end nomologiske forklaringer. Kausale forklaringer er også en bedre kendt forklaringstype, både fra dagligdagen og de fleste andre fag, end nomologiske forklaringer.

Svaret ovenfor på opgave 61 er i udpræget grad begrundet nomologisk. Opgaven løses alene ved brug af bevarelses-sætningerne for impuls og energi som overordnede lovmæssigheder. Derfor er resultatet i ligning (5) jo også identisk

med formelen for Compton spredning af lys på elektroner, bortset fra at elektronmassen er udskiftet med atomets masse. Den trænedte fysiker vil med det samme besvare opgaven ved henvisning til formelen for Compton spredning. Det er derimod ikke oplagt, at fysikstuderende vil gøre det med samme selvfølgelighed. Det kræver, at man ikke hæfter sig ved forskellene imellem elektroner og atomer, men ved at der er tale om elastisk spredning i begge tilfælde.

Ved eksamen var der ingen af de få studerende, der deltog, som besvarede opgave 62 tilfredsstillende ved brug af impulsbevarelse, som gjort ovenstående. I den bedste af besvarelserne blev der gjort forsøg på at analysere, hvordan vekselvirkningskræfter imellem de to pucks under stødet fx kunne overføre rotationsenergi fra den ene puck til translationsenergi til den anden. Sådanne regnestykker kan godt lade sig gøre (se E.H. Hauge, "Puck collisions", *Eur. J. Phys.* **33** (2012) p.1333). Men de er teknisk komplicerede. Og den studerende kom ikke langt med analysen. I sammenhængen her er det, der er værd at hæfte sig ved, at den valgte løsningsstrategi var af kausal art. Hvordan påvirker de to sten hinanden via vekselvirkningskræfter under stødet? Hvorimod den teknisk nemme, men til gengæld abstrakte, nomologiske vej via impulsbevarelsen for stødet som helhed, ikke blev valgt.

Konklusionen på de fysikstuderendes større vanskeligheder med nomologiske forklaringer end med kausale forklaringer er ikke, at nomologiske forklaringer så vidt muligt bør erstattes med kausale forklaringer ved universitetsundervisning i fysik. Tværtimod er demonstrationen af nomologiske forklaringer et tilbud, som specielt faget fysik bør være forpligtiget til at levere. Det er fremfor andre fag, udover matematik, først og fremmest i fysik, at der kan sættes fokus på, at det at forstå ikke kun er et spørgsmål om at kende til mekanismer, men også at indse lovbundetheder. Den indsigt er ikke kun af betydning for de studerendes uddannelse til at blive fysikere. Den har også betydning for deres omverdensforståelse og deres selvforståelse.

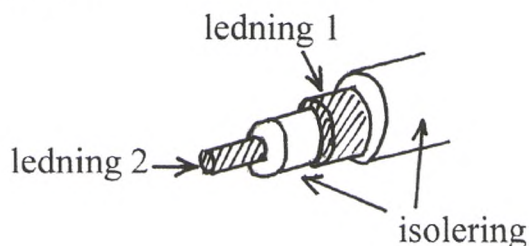
Men det er vigtigt, at såvel underviserne som deres studerende er opmærksomme på, at det måske netop er de nomologiske forklaringer, der gør fysik til et svært fag.

Breddeopgave 63 og 64. Bræt imod væg og selvinduktion i koaksialkabel

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen september 1987 og sommereksamen 2007, nr. 63 og 64 i rækken her i KVANT):

Ved hvilken hældning skrider et bræt, der er stillet skråt op af en forholdsvis glat væg? Begrund svaret.

I et elektrisk kredsløb indgår et stykke koaksialkabel (jf. figuren), hvor strømmene i dets to ledninger er lige store og modsat rettede.



Hvor meget bidrager kablet med til kredsløbets selvinduktionskoefficient (induktans)?

Løsninger og kommentar bringes i næste nummer.

KVANT-nyheder

Af Sven Munk, KVANT

Gravitationskonstanten måles igen

TYNGDEKRAFTSFYSIK. I 1797 søgte Cavendish at bestemme gravitationskonstanten, G , ved at lade to ophængte metalkugler påvirke hinanden. Han opnåede værdien: $G = 6,6 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$. Hans efterfølger C.V. Boys erstattede værdien 6,6 med 6,6576.

Fra Italien kommer en melding om en ny måde at bestemme G på. Den betegnes *atominterferometri*. Man må nu forestille sig en stor metalblok (516 kg wolfram) med to ansamlinger af rubidiumatomer anbragt henholdsvis over og under den store masse. Den kraft, som virker på de to atomansamlinger, er forskellig, fordi den ansamling, som er under massen påvirkes opad, medens ansamlingen over påvirkes nedad. Øverste ansamling har større potentiel energi end den nederste. Her er det, at kvantemekanikken dukker op, fordi bølgefunktionen for materielle partikler påvirkes af energiniveauet. Stor energi betyder lille bølgelængde og omvendt. Her skimtes begrundelsen for at tale om atominterferometri. Billedet viser måleopstillingen. Den store masse af wolfram, der har en densitet som guld, befinder sig midt i billedet.

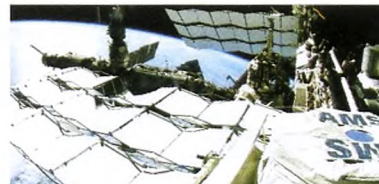


Principielt er målingen baseret på, hvordan enkeltatomer påvirkes. Rubidiumatomer inde i det lodrette rør afkøles til en temperatur tæt på 0 K ved hjælp af en laser. Herved mister de enkelte atomer deres identitet og bliver en del af et kvantemekanisk kollektiv. Forskerne skriver, at forskellen i tyngdekraft oppe og nede giver ændrede faserelationer mellem nogle energitilstande i atomerne. Denne faseforskel kan måles og dermed kan man sætte tal på gravitationskonstanten G . Forskerne angiver resultatet $G = 6,67191 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$. Dette afviger en lille smule fra det, som anses for standard.

Kilder: G. Rosi et al., Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms, *Nature* **510**, 518-521, 26. juni 2014, <http://doi.org/10.1038/nature13433>; <http://coldatoms.lens.unifi.it>; Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Firenze, <http://www.fisica.unifi.it/changelang-eng.html>.

Positroner fra mørkt stof?

PARTIKELFYSIK. Projektet AMS (Alpha Magnetic Detector) [1], som har udført målinger på Den Internationale Rumstation ISS, har givet resultater, som nu er blevet analyseret nøjere. De opfangede positroner, som har en meget stor energi, 275 GeV, kan muligvis stamme fra henfald af mørkt stof.



Det er tidligere klarlagt, at der var et "overskud" af positroner, som forskerne ikke kunne forklare. Man vidste, at pulsarer (neutronstjerner med kraftige magnetfelter) kan danne positroner, men fordi strømmen af positroner synes at have samme styrke i alle retninger, passer dette ikke med ideen om pulsarer som kilde. En statistisk analyse af måleresultaterne viser, at strømmen af positroner har et maksimum ved 275 GeV. Dette passer fint med annihilation af partikler af mørkt stof med en energi på 1000 GeV, fremfører AMS-forskerne. For at skabe større klarhed må forskerne dog undersøge om og hvordan en endnu højere energi påvirker positronstrømmen.

Kilder: KVANT-nyheder nr. 2, 2013; L. Accardo et al., High Statistics Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5-500 GeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 18, sept. 2014, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.121101>; AMS, <http://www.ams02.org>.

Jets fra protostjerner

ASTROFYSIK. Nær sorte huller, kvasarer eller protostjerner kan der ofte iagttages stråler af lysende materie, som kan nå flere lysår ud i rummet. Med en ny model har forskere søgt at vise, hvorledes magnetfelter spiller en vigtig rolle for dannelse af sådanne stråler, når nye stjerner dannes. Ideen var at danne et plasma, som "indespærres" af et kraftigt magnetfelt.

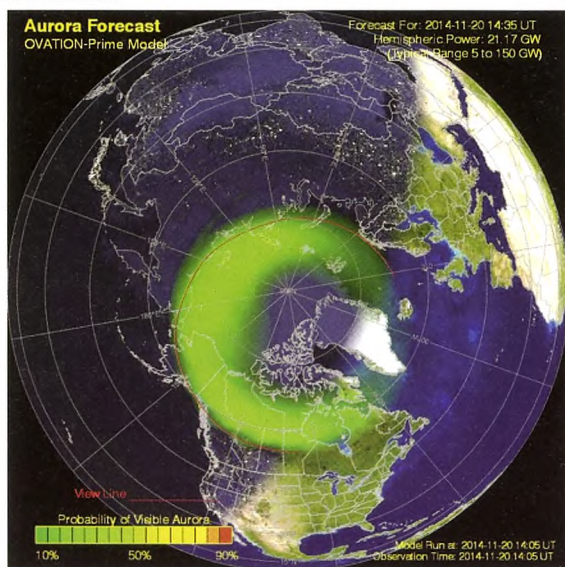


Plasmaet frembringes ved at sende en kraftig laserstråle ind i noget kunststof. Man skal forestille sig en elektrisk ledende sky, hvor ioner og elektroner hurtigt udbreder sig. Når en ny stjerne dannes sker noget tilsvarende. Når plasmaet bevæger sig, er det udsat for et pulserende magnetfelt. Herved koncentrerer det, så det bliver cylinderformet (smal stråle med et "hul" i midten). Plasmaet bevæger sig nu som en stødbølge. Et forløb som tager 20 ns i laboratoriet, vil ved en stjernedannelse vare 6 år. Forskerne har sammenholdt det i laboratoriet målte med faktiske astronomiske observationer – og finder god overensstemmelse.

Kilder: B. Albertazzi et al., Laboratory formation of a scaled protostellar jet by coaligned poloidal magnetic field, *Science* **346** no. 6207 pp. 325-328 17. okt. 2014, <http://doi.org/10.1126/science.1259694>; Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, École polytechnique, <http://www.luli.polytechnique.fr/jsp/accueil.jsp?CODE=95805642&-amp;LANGUAGE=1>

Aurora prognose

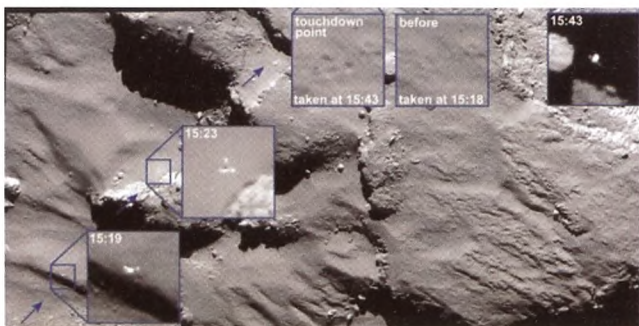
GEOFYSIK. Det er ganske vist sjældent, at der ses nordlys i Danmark, men et web-site kan øge sandsynligheden for at møde et sådant. Her tilbyder NASA med sin rumvejr-sprognose SWPC sin hjælp. Det kan måske være svært at se detaljerne på billedet. Symbolikken skulle dog ikke være til at fejlfortolke. Se også billedet af nordlys på forsiden af dette nummer.



Kilde: OVATION Aurora, <http://www.swpc.noaa.gov/ovation/index.html>

Rosettas Philae-lander

KOMETFYSIK. Onsdag den 12. november 2014 ventede hele verden i spænding, da Rosetta-rumsondens lander, *Philae*, fløj ned mod kometen 67 P/Churyumov-Gerasimenko. De harpuner, der skulle afskydes og forankre rumsonden til overfladen, virkede ikke, og *Philae* hoppede således et par gange, før den endte i skyggen bag en klippeformation.



Da batteriet kun holdt godt et døgn, og solcellerne ikke kunne oplade dem foreløbig, gik forskerne straks igang med at foretage boreprøver og målinger på overfladen. Alle instrumenter virkede og *Philae* nåede at sende alle data tilbage inden den gik i dvaletilstand. Tiden må vise, om batterierne bliver ladet op igen, når kometen kommer tættere på Solen de næste måneder. Rosetta vil fortsat studere kometen fra sit kredsløb om kometen.

Kilde: Tycho Brahe Planetarium Nyhed den 18. november 2014.

Sollys laver brint

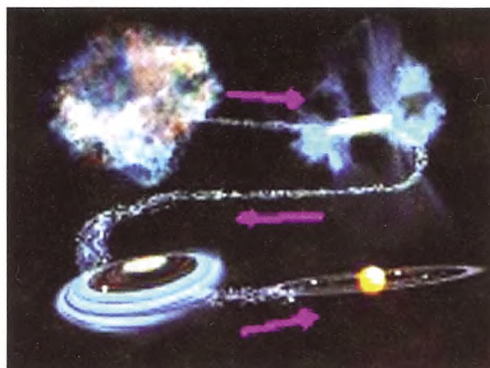
FASTSTOFFYSIK. En analyse viser, at det ikke er optimalt at bruge Si-solceller til at fremstille brint. En forskergruppe i Lausanne har set på en anden mulighed, nemlig at kombinere brugen af den såkaldte Perovskit-solcelle med katalysatorer af jern og nikkel. Sidstnævnte erstatter de relativt dyre katalysatorer af Platin eller Rutheniumoxid. Perovskit-cellen er

baseret på anvendelse af en lysaktiv, blyholdig salt (Methylammoniumblyhalid) og kræver en ret simpel fremstillingsproces. For at frembringe den, til elektrolysen nødvendige spænding på 2 V, skulle to af de nævnte celler serieforbindes. De to elektroder, hvis væsentlige bestanddel var Ni hhv. Fe, var effektive ved både brint- og iltproduktionen. For at øge vandets elektriske ledningsevne var der tilsat natriumhydroxid. En kunstig sol belyste solcellerne, så det var praktisk muligt at beregne systemets virkningsgrad. Energiindholdet i den producerede brint i forhold til den tilførte "solenergi" opgives til 12,3 %. Forskerne konstaterede, at brint-udbyttet faldt i løbet af nogle timer, så projektet kan ikke anses for afsluttet.

Kilder: J. Luo et al., Water photolysis at 12.3 % efficiency via perovskite photovoltaics and Earth-abundant catalysts, *Science* **345** no. 6204 pp. 1593-1596, 26. sept. 2014, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1258307>; Michael Grätzel, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, <http://lpi.epfl.ch/graetzel>.

Jordens vand ældre end Solen

PLANETFYSIK. Hvis Solsystemets vand hovedsageligt skulle være et resultat af lokale kemiske processer, som virkede mens Solen blev dannet, kunne vand-situationen være en helt anden i andre planeter. Der kunne andre betingelser have dannet langt mindre vand. Hvis en stor del af vandet stammer fra det interstellare rum, virker det sandsynligt, at det – sammen med andre præbiotiske molekyler – ville spille en rolle ved dannelsen af andre planeter. Billedet skal vise, hvorledes en kosmisk støvsky over tid kontraherer for til sidst at blive en del af Solsystemet.



Vand består som bekendt af ilt og brint, og brint har en isotop – deuterium – der kan afsløre noget om dannelsen af vandet. Interstellart vand opstår ved meget lave temperaturer, hvorfor det indeholder forholdsvis meget deuterium. Hidtil har det været uklart, hvor meget deuterium dette vand mistede pga. høje temperaturer ved Solens dannelse – for herefter at blive reetableret i det unge Solsystem.

Forskerne har omgået dette spørgsmål ved at undersøge mængden af deuterium, som kan opstå i en protoplanetarisk skive, når det interstellare vand er forsvundet helt. Svaret er klart, at det er utilstrækkeligt til at passe med de koncentrationer af deuterium, man nu finder i meteoriter, kometer og Jordens have.

Af dette følger videre, at mellem 30 og 50 % af Jordens vand og mellem 60 og 100 % af vandet i kometer stammer fra den intergalaktiske støvsky, som blev til Solsystemet.

Kilder: L.I. Cleaves et al., The ancient heritage of water ice in the solar system, *Science* **345** no. 6204 pp. 1590-1593, 26. sept. 2014, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1258055>; Conel Alexander, Carnegie Institution of Washington, <https://dtm.carnegiescience.edu/people/conel-m-d-alexander>.

H.C. Ørsted medalje til inspirerende gymnasielærere

Af Hans Lindemann og Cecilie M.K. Pedersen, Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) tildeler den 8. december 2014 H.C. Ørsted Medaljen i bronze for fremragende formidling af naturvidenskab til lektor Pia Halkjær Gommesen, Faaborg Gymnasium.

Efter foredraget den 8. december, i SNU's foredragsrække, finder selve uddelingen sted på Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, København K.

Om medaljemodtageren:

Pia Halkjær Gommesen blev ansat i pædagogikum i 2007 på Faaborg Gymnasium, hvor hun året efter blev fastansat med fagene biologi og kemi.

Foruden at være en dygtig og afholdt faglærer har Pia ydet en banebrydende indsats som medskaber af en lang række initiativer med områdets grundskoler under overskriften ScienceLab. Hvert år deltager 200-300 begejstrede folkeskoleelever på Faaborg Gymnasium i en ScienceCup, hvor de sammen med deres lærere stiller op med eksperimenter og forsøg, som bedømmes af et dommerpanel. Hun har derved skabt et meget stærkt naturfagsnetværk mellem lærerne og tilrettelagt fælles efteruddannelse for denne gruppe med anvendelse af gymnasiets apparater og ressourcer.



Figur 1. Pia Gommesen og hendes elever "in action".

Pia Gommesen forestår også sammen med kolleger besøg af folkeskoleklasser året igennem, hvor dele af folkeskolens pensum gennemgås under medvirken af naturvidenskabelige gymnasieklasser.

Sideløbende med de nævnte aktiviteter har Pia flere år i træk været med til at tilrettelægge Forskningens Døgn for Faaborg-Midtfyn Kommune i samarbejde med lokale institutioner og virksomheder.

I samarbejde med SDU har Pia Gommesen skabt en fynsk afdeling af Akademiet for Talentfulde Unge (ATU), hvor Faaborg Gymnasium nu er hovedsædet for ATU-Syd, omfattende Region Syddanmark. Hvert år i august afholdes her en ugelang talentcamp med ca. 300 overnattende deltagere.

SNU's præsident, professor, dr.scient. Dorte Olesen siger: "Pia Gommesen er en af de ildsjæle, der inspirerer næste generation til at sætte sig ind i de naturvidenskabelige fag, som står så centralt i nutidens globale samfundsudvikling, og det er en uhyre vigtig indsats, som vi er meget glade for at kunne belønne med en H.C. Ørsted Medalje."

Om H.C. Ørsted Medaljen i bronze til inspirerende gymnasielærere:

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) sætter 2012-2015 fokus på den vigtige formidling i gymnasiet. Vi vil i perioden årligt uddele H.C. Ørsted Medaljen i bronze til inspirerende gymnasielærere og fremragende formidlere i den gymnasiale verden inden for Selskabets fagkreds.

Tildelingen i 2014 sker på baggrund af indstillinger fra gymnasierektorer og elevråd over hele Danmark, som er blevet bedømt af et fagkyndigt bedømmelsesudvalg. I 2012 blev medaljen uddelt til rektor Jannik Johansen, Frederiksberg Gymnasium, og i 2013 til lektor Niels Hartling, Birkerød Gymnasium samt lektor Peter Arnborg Videsen, Viborg Gymnasium og HF. Se omtale i KVANT nr. 1, 2014.

Rummet – ny serie *Vild med Viden*

Forlaget Epsilon har siden 2012 udgivet fem serier, hver på 8 små hæfter, der formidler videnskab for børn. De udgives under det fælles navn *Vild med Viden*.

Den nyeste serie, der udkom i november 2014, handler om rummet – udvalgte astronomiske objekter og et enkelt hæfte om rumfart. Forfatterne er førende forskere, der til daglig arbejder på DARK Cosmology Centre ved Niels Bohr Institutet og på DTU Space.



Det er imponerende, hvor godt det er lykkedes forfatterne at løse den svære opgave det er, at formidle avanceret frontlinieforskning på en måde, der egner sig til børn. Bøgerne henvender sig på alle måder til børn, der lige har lært at læse. De er små og lette – hvert hæfte er i A6-format, vejer 34 gram og indeholder 16 sider tekst og billeder. De kan naturligvis også bruges til højtlesning – det har den yderligere fordel at mange forældre (dog næppe blandt Kvants læsere) også får et par oplysninger eller tre, som de ikke kendte i forvejen.

Forfattere og emner for de otte bøger er: Carol Anne Oxborrow: *Big Bang*, Kristoffer Leer: *Solsystemet*, Susanne Vennerstrøm: *Solen*, Sune Toft: *Stjerner*, Lise Christensen: *Galakser*, Anja C. Andersen: *Kometer*, Marianne Vestergaard: *Sorte huller* og Allan Hornstrup: *Rumfart*.

De forudgående fire serier handler om Danske fortidsdyr, Store vilde dyr, Skolehistorie og Vikingerne. Bøgerne sælges enkeltvis for 20 kr./stk. eller 120 kr. for alle otte i en serie.

De er en oplagt julegaveidé til videbegærlige børn. Hvis du læser dette tidsnok kan du endda overveje at anskaffe tre serier – det passer lige til en gave-julekalender, hvor hver enkelt kalendergave er fed på den fede måde og hverken bidrager til overvægt eller sukkersyge.

Se mere på <http://vildmedviden.com> og <http://forlagetepsilon.dk>.

Michael Quaade

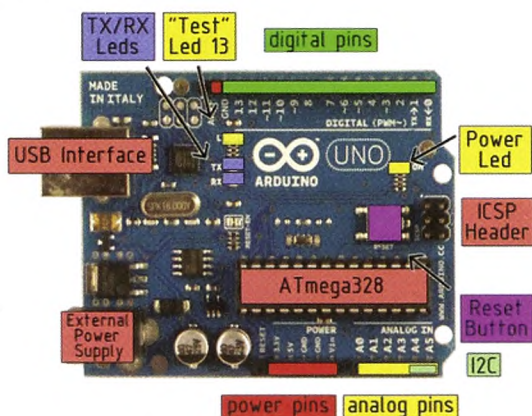
Fysik og Arduino

Af Jan Boddum Larsen, Teknisk Erhvervsskole Center, TEC, HTX-Lyngby

Denne artikel omhandler brug af mikroprocessorer i fysikundervisningen. Den vil kort omtale mikroprocessorens kodning og herefter sensorer og deres anvendelse. Til sidst vil der blive givet lidt inspiration til brug af mikroprocessoren i undervisningen. Det er ikke selve mikroprocessoren, der vil blive omtalt i denne artikel, men mere evalueringsboardet *Arduino* med en mikroprocessor på.

Indledning

Et Arduino evalueringsboard består af en lille printplade med en mikroprocessor og nogle elektroniske komponenter, der sørger for, at mikroprocessoren bliver nem at tilgå. Figur 1 viser boardet.



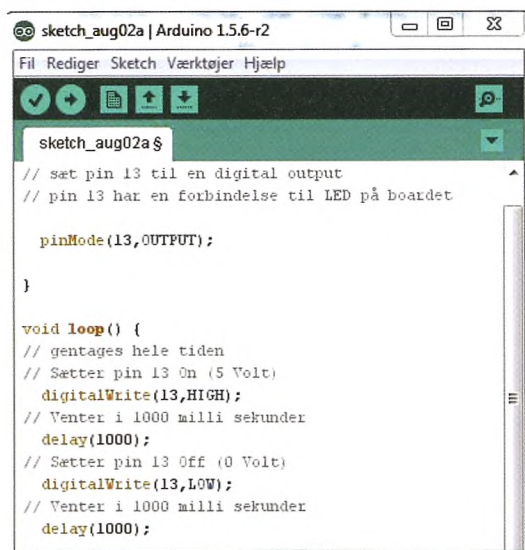
Figur 1. Arduino board.

Det ses af figuren, at der er nogle digitale og analoge pins, der kan benyttes til at læse data ind eller ud. Dette board kan man programmere via en PC. Det betyder, at der er mulighed for, at få boardet til at læse og skrive de ønskede data. I et medfølgende program skriver man noget kode, som man kompilerer (oversætter) og overfører til Arduinoen via USB-interfacet. Arduino fås i en del forskellige udgaver alt efter behovet. I det efterfølgende er det kun Arduino UNO, der er tale om. De andre typer kan benyttes på samme måde. Arduino UNO er billig og opfylder de fleste krav til brug i fysikundervisningen. Der findes en omfattende samling af add-on-prints med vidt forskellig funktionalitet.

Kodningen

For at kunne benytte Arduino er man nødt til at installere noget software og en driver på PC'en. Det kan gøres ved at gå ind på Arduinos hjemmeside [1] og følge instruktionen. På hjemmesiden findes også en del eksempler på kodning med mere, så kodningen vil kun lige blive berørt lidt her. Efter installation af software og nogle få indstillinger er man klar til at benytte Arduinoen, der bare skal tilsluttes via et USB-kabel. I det øjeblik man tilslutter USB-kablet til Arduinoen, vil denne få strøm, og hvis der er et program i hukommelsen på Arduinoen, startes det også. Første gang vil der naturligvis ikke være et program på Arduinoen.

På Arduinoen er der en intern LED (se figur 1, test LED), som man kan benytte til at teste med. Så nu vil vi prøve at få denne til at blinke. Der kodes i et C-lignende sprog, som er meget enkelt i sin syntaks. Figur 2 viser et eksempel på kode skrevet på PC'en til Arduinoen.



Figur 2. Program der får en lysdiode til at blinke.

Programmet er inddelt i to vigtige dele. Den første er "setup", som kun bliver kaldt én gang i det øjeblik man sætter strøm på eller genstarter Arduinoen. Her er det naturligt at have de ting, som kun skal kaldes én gang. Den anden er "loop" som gentager sig selv i det uendelige, når først "setup" er udført. Her kan man læse og skrive data til portene.

Mere viden om kodning kan findes på hjemmesiden [2], der også viser eksempler for opbygning af hardware.

Dataopsamling med Arduino

Man kan få tre typer sensorer (transducere)

- Type 1: opfører sig som en modstand, og modstanden ændrer sig når den påvirkes af en fysisk størrelse (fx Fotomodstand, LDR).
- Type 2: spændingen på udgangen afhænger af den fysiske størrelse (fx Temperatur, LM35).
- Type 3: digitale sensorer som sender et tal afhængigt af den fysiske størrelse (fx GPS EM-411 eller EM-406).

For at komme fra en måling af en fysisk værdi/størrelse, fx tryk, temperatur eller lysintensitet, til målingen er opsamlet og bliver vist på en PC-monitor

eller gemt på et MicroSD-kort, går man generelt igennem følgende trin:

1. Fysisk værdi
2. Sensor i elektrisk kredsløb
3. Analog til digital konvertering i Arduino
4. Display eller MicroSD

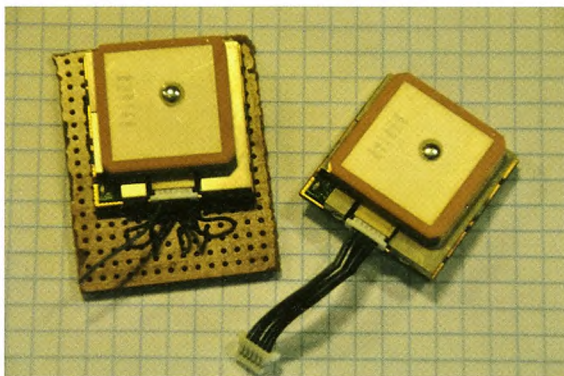
Tallene der gemmes på MicroSD-kortet, kan efterfølgende læses ind i et regneark og bearbejdes. Ofte vil der være behov for en kalibrering, da de rå målinger sjældent er et direkte udtryk for de ønskede fysiske størrelser.

Denne artikel omhandler mest dataopsamling fra analoge sensorer, men først lige et eksempel på en digital sensor, i dette tilfælde en GPS-sensor.

GPS-sensor og data

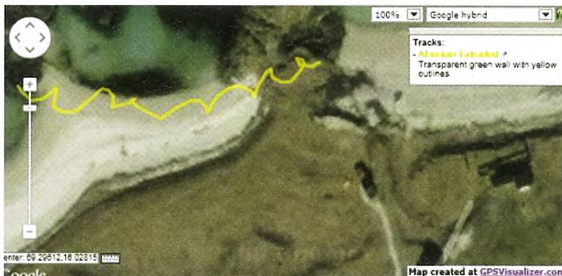
Der findes også et utal af digitale sensorer. Her er valgt kort at komme ind på GPS EM-411, se figur 3. På Arduinoen, kan GPS-data læses som en tekst.

GPS-enheden tilsluttes Arduinoen, hvor der er tre ben som skal forbindes: Spænding til spænding, jord til jord og Tx til Rx på Arduinoen. Tx står for transmit og Rx for receive. Du vil så efterfølgende kunne modtage GPS informationen på Arduinoen.



Figur 3. GPS EM-411.

Ved at udtrække den rigtige information vil man kunne opsamle mange forskellige oplysninger såsom tiden, positionen, antal satellitter mm. Positionsdata kan flyttes over i en XML-fil, og GPSVisualizer kan så indtegne ruten (figur 4).



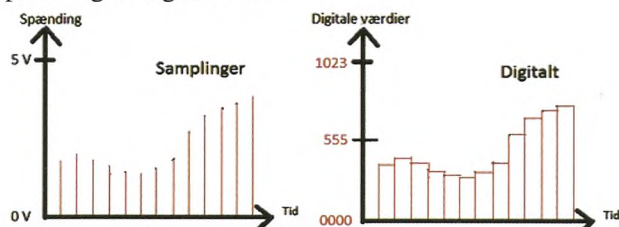
Figur 4. GPS-positionen indtegnet vha. GPSVisualizer (www.gpsvisualizer.com).

Det var meget kort om GPS. Det efterfølgende afsnit omhandler opsamling af analoge data.

Analoge Data

Arduinoen har et antal analoge indgange, se figur 1, som kan benyttes til aflæsning af en spænding. Analoge data kan komme fra mange sensorer, der måler fx tryk, temperatur, lys, afstand, lyd i en mikrofon, luftfugtighed el.lign.

Sensorerne indbygges i elektroniske kredsløb, således at udgangsspændingen varierer med den fysiske størrelse. I figur 5 er vist et eksempel, hvor en temperatur varierer med tiden og, hvordan variationen af spændingen registreres.

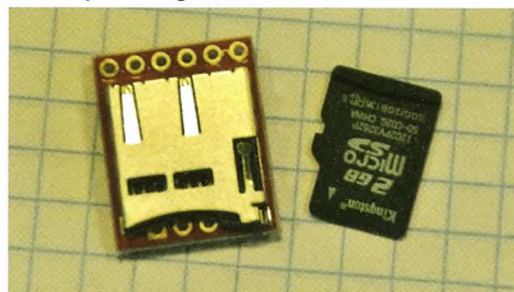


Figur 5. Venstre: Spændingen registreres ved bestemte tider. Højre: Hver registrering omsættes til en digital værdi i A/D-konverteren.

Arduinoens A/D converter omsætter et spændingsinput mellem 0 og 5 V til et heltal mellem 0 og 1023 ($2^{10}=1024$, dvs. 10 bit). En spænding måles således med en opløsning på $5 \text{ V}/1023 = 4,89 \text{ mV}$. Der er dog mulighed for at ændre på den analoge referencespænding, så det ikke nødvendigvis er 5 V, men en anden spænding, der arbejdes med.

Data kan samles op via PC'en igennem USB-porten; det er den mest enkle metode. Der er en seriel monitor i det udviklingsmiljø, der følger med softwaren. Hvis man har USB-kablet i PC'en, kan man direkte sende data til PC'en og få dem vist på skærmen.

I mange tilfælde er man interesseret i, at Arduinoen virker som et selvstændigt måleinstrument. Hvis man tilslutter et batteri (9 V) til Arduinoen og ønsker at gemme data, er man nødt til at have tilsluttet et lagermedie. Det er oplagt at benytte et microSD-kort. Her kan man benytte OpenlogDev-09530, som er en "opensource" datalogger, der kan lagre data på et microSD-kort med op til 32 Gbyte se figur 6.



Figur 6. Datalogger og microSD-kort.

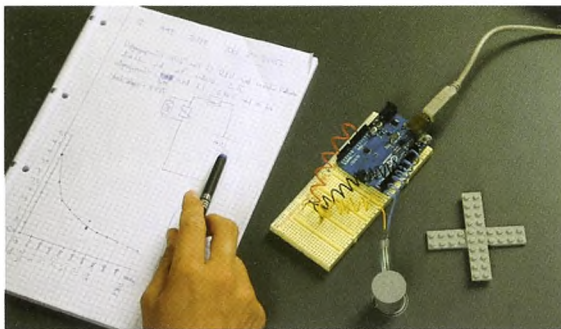
Loggeren har 6 pins:

GRN	Loggeren resettes når denne lægges lav
RXI	Serielle data skrives til Openlog
TXO	Serielle data læses fra Openlog
VCC	Forsyningsspænding (3,3-12 V)
GND	Jord 0 V
BLK	Jord 0 V

Hvis Tx på Arduino UNO er tilknyttet RXI og Rx er tilsluttet TXO, kan man skrive til Openlog ved hjælp af print() og println() kommandoen. Se mere information i databladet [3].

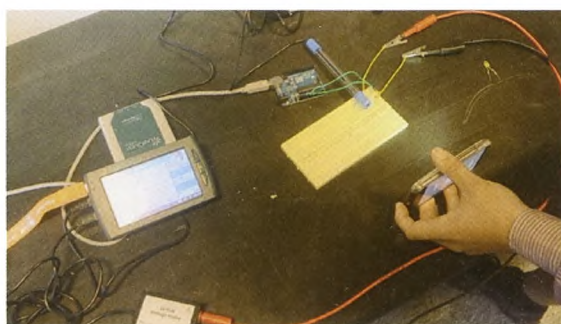
Bygning af måleinstrument med Arduino

Der er rigtig mange aspekter i at benytte Arduinoen. Den kan fint benyttes på fysik B-niveau. Her kan det fx være et måleinstrument eleverne bygger, og som kobles til en PC via USB-kablet. De vælger selv en sensor, typisk ud fra nogle der allerede er købt hjem. Det skal være en type, hvor modstanden ændres ved en fysisk påvirkning, fx af lys (LDR), temperatur (NTC og PTC), tryk, kraft eller nedbøjning. PTC-modstanden er normalt meget ikke-lineær, så den er mest egnet for de dygtige elever. På figur 7 ses en tryk- eller kraftsensor tilsluttet en Arduino.



Figur 7. Kraftsensor og Arduino anvendt i fysik B.

Først skal eleverne, ved en række fysikeksperimenter, finde ud af, hvordan karakteristikken er på modstanden. Efter de har fundet en sammenhæng mellem den fysiske størrelse og modstanden, skal de vælge en fornuftig seriemodstand og prøve at tilslutte kredsløbet til Arduinoen. Nu er der kun tilbage at omregne spændingen til den fysiske størrelse og vise den på PC-skærmen. Der vil igennem forløbet være mulighed for at komme ind på usikkerhedsberegning, måleområde, kalibrering og måleopstilling. På figur 8 udføres kalibrering af en lyssensor.



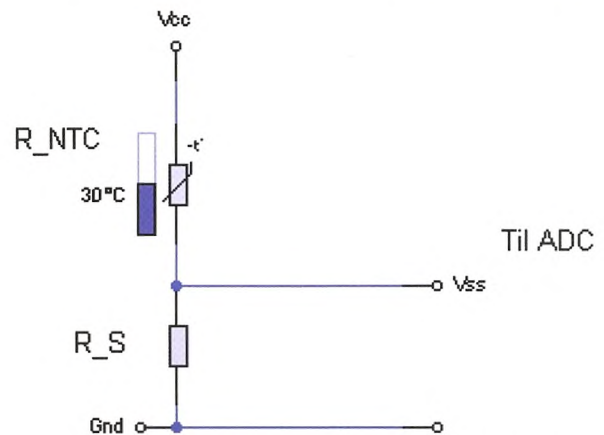
Figur 8. Kalibrering af lyssensor i fysik B.

Eksempel: En temperaturmåler

I det følgende eksempel bruges en sensor, hvis modstand afhænger af en fysisk størrelse dvs. en type 1-sensor. I eksemplet her arbejdes der med en NTC-modstand (Negative Temperature Coefficient resistor).

Dens modstand aftager med stigende temperatur. Type 1-sensorerne er rigtig gode i forbindelse med ellære, og de egner sig godt på fysik B-niveau. En sensor af denne type skal altid tilsluttes i en serieforbindelse med en anden modstand (det kan selvfølgelig gøres mere komplekst med en del mere elektronik).

I det følgende gennemgås, hvorledes man kan bygge et temperatur-måleinstrument og gennemføre de nødvendige teoretiske overvejelser. Der benyttes en NTC-modstand af typen RH16-50 kΩ. Vi ønsker, at instrumentet skal kunne måle mellem 0 og 30 °C og således, at spændingen stiger ved stigende temperatur. Det er nødvendigt at lave en spændingsdeling, da det ikke giver nogen mening bare at tilslutte sensoren mellem den analoge indgang på Arduinoen og 0 V. På figur 9 er der vist et el-diagram med NTC-modstanden tilsluttet.



Figur 9. Seriekobling med NTC-modstanden. ADC: A/D converter (Arduino).

Med denne tilslutning opnår vi, at jo mindre R_{NTC} er, desto større er spændingen V_{SS} . Ved hjælp af Ohms lov fås følgende sammenhæng (med figurens betegnelser):

$$V_{SS} = \frac{R_S}{R_{NTC} + R_S} \cdot V_{CC} \quad (1)$$

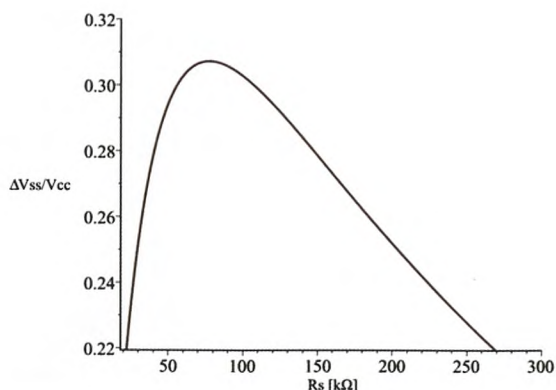
Det svære er at vælge modstanden R_S . Det ses også, at man ikke kan udnytte hele intervallet fra 0 V til forsyningsspændingen V_{CC} (5 V), med mindre NTC-modstanden kan blive 0 Ω.

Fra databladet fås følgende karakteristik for NTC-modstanden:

$$R_{NTC}(T) = (50 \text{ k}\Omega) \cdot e^{\left(\frac{3486 \text{ K}}{T} - \frac{3486}{298}\right)} \quad (2)$$

T er temperaturen i kelvin. Når temperaturen går fra 0 til 30 °C, vil NTC-modstanden gå fra $R_{NTC}(273 \text{ K}) = 146 \text{ k}\Omega$ til $R_{NTC}(303 \text{ K}) = 41 \text{ k}\Omega$, ifølge ligning (2).

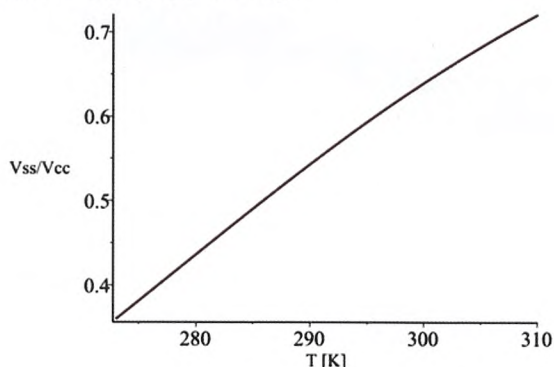
Da Arduinoen "måler" V_{SS} i skridt på ca. 5 mV, skal man nu vælge R_S således, at V_{SS} ændrer sig mest muligt mellem de to yderpunkter af temperatur. Udfra ligning (1) kan man finde forskellen $\Delta V_{SS} = V_{SS}(273 \text{ K}) - V_{SS}(303 \text{ K})$ udtrykt ved R_S . Figur 10 viser ΔV_{SS} (divideret med V_{CC}) som funktion af R_S , og man ser (af figuren eller ved beregning), at maksimum opnås omkring $R_S = 80 \text{ k}\Omega$.



Figur 10. Spændingsudsvinget ΔV_{SS} (divideret med V_{CC}) som funktion af seriemodstanden.

Med dette valg af R_S finder man fra ligning (1), at V_{SS} går fra 1,80 V ved 0 °C til 3,33 V ved 30 °C, altså en ændring på 1,53 V. Da Arduinoens spændingsopløsning (som beregnet tidligere) er 4,89 mV, bliver temperaturopløsningen $\Delta T = (30 \text{ °C}) \cdot 4,89 \text{ mV} / 1,53 \text{ V} = 0,096 \text{ °C}$.

Det kræver dog, at NTC-modstandens temperaturafhængighed opfører sig pænt imellem de to ydertemperaturer. Ved at afbilde spændingsforholdet V_{SS}/V_{CC} som funktion af temperaturen (figur 11), kan man se hvor god en linearitet der er i vores arbejdsinterval, formlerne (1) og (2) er brugt.



Figur 11. Undersøgelse af lineariteten af NTC-modstandens temperaturafhængighed.

Undersøgelse af grafen viser, at afvigelsen fra linearitet højst er 0,02, hvilket er under 5 %. Hvis man synes, at dette er godt nok, kan man opstille en ligning for temperaturen T som funktion af spændingen V_{SS} ud fra de to kendte punkter: temperaturen 0 °C svarer til spændingen 1,80 V og temperaturen 30 °C svarer til spændingen 3,33 V. Linjens ligning bliver:

$$T = (19,6 \text{ °C}) \cdot \frac{V_{SS}}{1V} - 35,3 \text{ °C} \quad (3)$$

Det kan selvfølgelig godt lade sig gøre at bygge et mere komplekst kredsløb, så man udnytter hele området fra 0 til 5 V.

Højdemåling med Arduino

I fysik A ville et forløb, hvor man samler data op på et SD-kort, være aktuelt. Man kunne lade eleverne sende Arduinoen op med en ballon (se figur 12) eller drone

og undervejs måle tryk, temperatur og registrere GPS-data. De kunne benytte data til at finde sammenhængen mellem tryk, temperatur og højde. Nedenfor er vist trykmålinger foretaget af nogle elever (op til ca. 300 m højde).

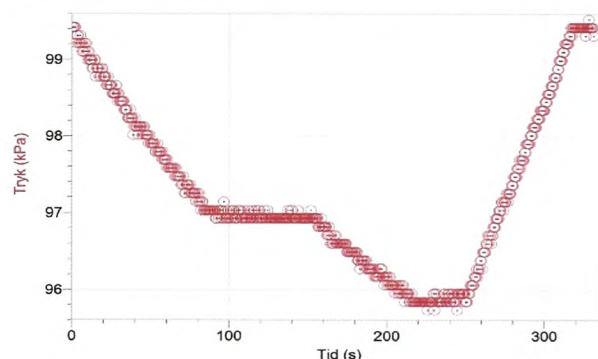


Figur 12. Opsendelse af Arduino med ballon.

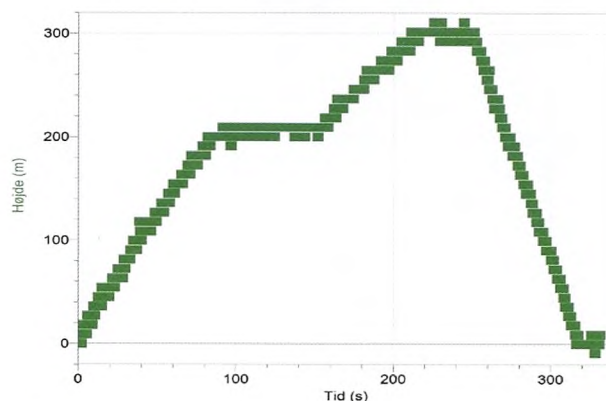
Tryksensoren skal forsynes med 5 V og giver så en udgangsspænding V_{maalt} . Ifølge sensorens datablad [8] varierer V_{maalt} lineært med trykket p efter formelen:

$$p = \frac{V_{maalt}}{0,045 \text{ V/kPa}} + 1,056 \text{ kPa} + p_{offset} \quad (4)$$

Figur 13 viser de beregnede tryk. Kalibreringen er foregået ved at måle trykket ved jordoverfladen og benytte det tilsvarende V_{maalt} til at beregne p_{offset} .



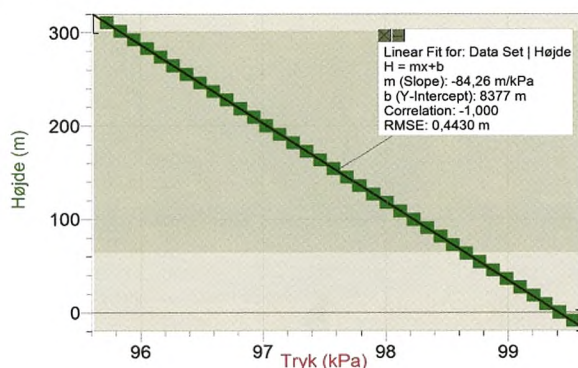
Figur 13. Målt tryk som funktion af tiden.



Figur 14. Højden som funktion af tiden.

Højden i figur 14 er beregnet ud fra formel (5). Det ses af figur 14, at ballonen kommer op i en højde på

omkring 300 m. Det passer godt med, at der var ca. 315 m snor i ballonen. Af figur 13 og 14 kan man også se "kvantiseringen" af målingerne, idet højden har en opløsning på ca. 9 m, hvilket man også kan udregne teoretisk (ikke gjort her).



Figur 15. Højden som funktion af trykket.

Højden kan findes vha. formlen (udledning er ikke gjort her):

$$h = \frac{T_1}{a} \left(\left(\frac{p}{p_1} \right)^{-aR/g_0} - 1 \right) + h_1 \quad (5)$$

Afbilder man højden som funktion af trykket (figur 15) ses noget, der ligner en ret linje, hvilket det dog ikke er.

h er højden; h_1 er starthøjden

p er trykket; p_1 er starttrykket ved højden h_1

T_1 er starttemperaturen ved højden h_1

g_0 er tyndeaccelerationen på $9,81 \text{ m/s}^2$

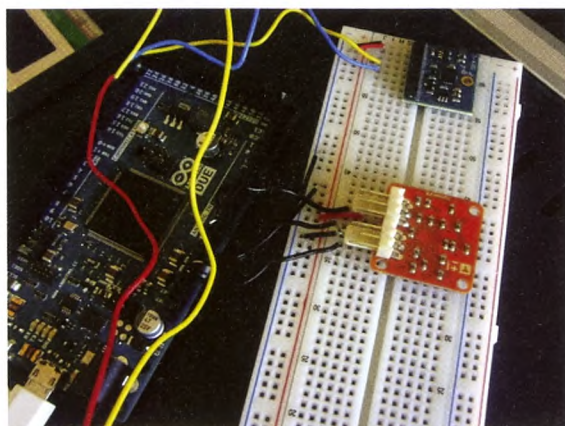
R er gaskonstanten på $287,06 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

a er højdetemperaturgradienten på $-0,0065 \text{ K/m}$

Med disse tal bliver potensen: $-aR/g_0 = 0,19$.

Flere muligheder i fysikundervisningen

Andre eksempler på brug af Arduino i fysik A, kunne være at lade eleverne bygge en ubåd og måle trykket og sigtbarheden ned gennem vandet i en sø. Eller brug af GPS-data til måling af acceleration eller hastighed i en bil eller karrusel. GPS-data kan efterfølgende læses ind i Google Maps så man kan se ruten direkte på et kort.



Figur 16. Arduino med en digital gyro og xyz-accelerationssensor til positionsmåling.

På figur 16 er vist et forsøg, hvor nogle elever forsøgte at foretage en positionsbestemmelse ud fra en

xyz-accelerationssensor samt en digital gyro til måling af vinkelhastigheden. De så en mulighed i at lave en robotarm. Der benyttes mange sensorer omkring os, blandt andet benyttes xyz-accelerationssensoren i smartphones, tablets og kameraer til at finde ud af om billedet vender korrekt.

Det vil også være muligt at bygge en vejrstation og få eleverne til at måle temperatur, luftfugtighed, tryk, vindhastighed og nedbør over et døgn. Der er mange muligheder i fysik A, og eleverne synes det er spændende, da de kan se brugbarheden af fysikken direkte. Med andre ord kan eleverne i høj grad relatere det til deres hverdag. En vejrstation ville nemt kunne indgå i et samarbejde mellem matematik, fysik og naturgeografi. Det er tit nødvendigt at finde datablade på de forskellige sensorer, så her er angivet nogle datablade for luftfugtighed [6], temperatur [7] og tryk [8]. Det er nogle gange også nødvendigt at være innovativ, når man eksempelvis skal måle vindhastighed til vejrstationen. Det er ganske vist muligt at købe en omdrejningstæller, men eleverne er nødt til selv at bygge en mølle og ud fra mølle og omdrejningstæller udvikle et anemometer (det kan også købes færdigt, men det er ikke nær så sjovt). Det samme gælder regnmåleren og fremstilling af denne. Til en rigtig vejrstation skal man måske også have en sender og modtager samt et display. Et eksempel på en trådløs sender kan være en XBee sender/modtager [9]. Der er lidt konfiguration af XBee, men den er forholdsvis nem at benytte. Det kan så være PC'en der modtager dataene, eller det kan være en anden Arduino med Xbee. Hvis det er en anden Arduino, vil det være nødvendigt med et display til udskrivning af data. Det er altid en god idé at lave nogle små beskrivelser af display og trådløs kommunikation mm. til eleverne. Vejrstationen kan også laves transportabel med en GPS-modtager indbygget, så den kan angive sin position, uanset hvor den befinder sig. Det kan være aktuelt, hvis man i naturgeografi vil indsamle data flere forskellige steder.

Det er også oplagt at benytte Arduinoen i forbindelse med studieretningsprojektet i 3.g, hvor den meget naturligt kan indgå i fagene matematik og fysik. I matematik vil Arduinoen kunne stå for dataopsamling og -behandling. Et eksempel kunne være, at eleverne skulle undersøge afkølingen af en kop kaffe. Her vil det være oplagt, at stille en del temperatursensorer op og prøve at finde ud af, hvordan varmen kommer væk fra koppen. Der vil naturligvis også være andre muligheder, da man også kan programmere algoritmer i selve Arduinoen. Det giver mange muligheder for at foretage styring ud fra data opsamlet igennem én eller flere sensorer. Det kan være en robot, der skal følge en linje, eller en parabol, der skal følge Solen, som vist i video [4]. Kombinationen af at kunne opsamle data, og benytte disse data til at udføre en handling, er rigtig vigtig i undervisningen, da det er meget motiverende.

Det vil også være muligt, at lave et tværfagligt forløb eksempelvis sammen med samfundsfag, hvor man måske kunne få en snak om alle de sensorer der omgiver

os, og hvilke data der bliver overført til internettet. Hele debatten omkring Big Data ville man kunne integrere.

Efterhånden som man får mere erfaring, er der også mulighed for at deltage i forskellige konkurrencer som Robocup eller Cansat [10]. Cansat er en rigtig spændende konkurrence, hvor man kommer al elektronikken ned i en dåse og sender den op med ballon eller raket. Man kan erhverve sig sådanne Cansat kit forskellige steder, blandt andet arbejder AUC med dem [11].

Konklusion

Der har været fokus på Arduinoen i denne artikel. Der findes naturligvis mange andre evalueringsboard til at eksperimentere med. Arduinoen er nu min foretrukne, når det drejer sig om fysik i gymnasiet, da den er simpel at gå til og billig i indkøb. Der er rigtig meget gratis software til den, som man direkte kan benytte. De der laver udviklingssoftwaren til Arduino laver også noget software, der hedder Processing, som nemt kan benyttes til databehandling [12]. Desuden fås Arduino også i en udgave "Arduino Yún", hvor der er net-forbindelse og indbygget tilgang til microSD-kort på boardet. Ved at bruge Arduinoen i fysikundervisningen kommer man ind på rigtig mange kompetencer i fysikken såsom databehandling, usikkerhedsovervejelser samt kalibrering og ikke mindst den eksperimentelle tilgang.

Mange elever synes også det er vældigt sjovt at arbejde med Arduinoen, da det bliver en del mere nørdet, og de kan i mange tilfælde se mulighederne i at lave et produkt, som ingen andre har. Det ville nemt kunne udvikles til mange tværfaglige projekter. For at komme i gang, skal man bare købe et startersæt, som typisk indeholder en Arduino, nogle sensorer, lidt ekstra komponenter, nogle ledninger og et fumlebræt.

Desuden er der ikke så langt til fx at lave en app til en smartphone, hvor man benytter de sensorer, som er indbygget i en smartphone. Det kunne også være en mulighed at lave et forløb i det.

Besøg med klassen på Niels Bohr Institutet

Af Michael Quaade

I mange år har mange af Niels Bohr Institutets forskergrupper taget mod besøg af gymnasieklasser. Sådanne besøg, der typisk indeholder foredrag, øvelser og/eller rundvisning, giver både lidt afveksling i den daglige undervisning og et værdifuldt fagligt udbytte fordi eleverne møder forskere, der er med helt fremme ved videnskabens frontlinje.

Fra 2014 har vi sat det mere i system, så vi kan præsentere en stor del af instituttets alsidige forskning og på den måde give de besøgende klasser noget at vælge mellem. Samtidig håber vi også at kunne fordele besøgene så belastningen på hver enkelt medarbejder og forskningsgruppe mindskes.

På webadressen <http://gymnasiebesoeg.nbi.ku.dk> findes en række foredrag og øvelser for de enkelte forskningsområder – astronomi, partikelfysik mv.

Fremgangsmåden er, at en lærer eller anden kontaktperson udfylder en webbaseret formular med oplysninger om antal, klassetrin, niveau mv. Disse oplysninger sendes videre til bl.a. de undervisere på instituttet, der kan varetage det

Litteratur

- [1] Download af software til Arduinoen samt installations guide: <http://arduino.cc/en/Guide/HomePage>
- [2] Eksempler på kode og tilslutning af sensorer: <http://arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>
- [3] Datasheet for Micro SD: <https://github.com/sparkfun/OpenLog/wiki/Datasheet>
- [4] Video fra en elevs SRP-projekt: <http://www.youtube.com/watch?v=CesORY1uspo>
- [5] Datasheet af GPS modtageren: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MPX4115.pdf>
- [6] Datasheet for en luftfugtighedssensor: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Weather/SEN-09569-HIH-4030-datasheet.pdf>
- [7] Datasheet for en temperaturføler: <https://www.sparkfun.com/datasheets/DevTools/Lily-Pad/MCP9700.pdf>
- [8] Datasheet for en trykmåler: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX4115.pdf
- [9] Trådløs kommunikations enhed til Arduino og PC: <http://arduino.cc/en/Guide/ArduinoXbeeShield>
- [10] Europæisk konkurrence for dåsesatellitter: <http://www.cansat.eu>
- [11] Ressource-hjemmeside af Jens Dalsgaard Nielsen på AUC til opbygning af dåsesatellitter: <http://www.control.auc.dk/~jdn/edu/cansat-kit/>
- [12] <https://www.processing.org>



Jan Boddum Larsen underviser på TEC, HTX-Lyngby, i fagene matematik, fysik, teknologi og teknikfag. Han er interesseret i rumteknologi, elektronik og 3D-teknologi og tilknyttet Center for Computerbaseret Matematikundervisning på Københavns Universitet.

ønskede foredrag eller øvelse, så de kan aftale indbyrdes hvem af dem, der kan medvirke ved den aktuelle lejlighed. Samtidig får instituttets medarbejdere kontaktoplysninger på gæsterne, så de eventuelt kan aftale om indhold mv. og der er samtidig mulighed for at aftale ændringer af tidspunkt eller lignende, som kan være nødvendigt for at gøre besøget muligt.

Samtidig starter en proces med bestilling af lokale til besøget, så vidt muligt på det sted, hvor de pågældende forskere holder til. Det kan dog ofte være nødvendigt, at flytte et besøg til en anden adresse i nærheden, hvis der ikke er ledige lokaler med tilstrækkelig plads.

Vi sørger så vidt muligt for, at der er flere medarbejdere, der kan varetage hvert enkelt emne således at det er muligt, at imødekomme ønsker selv om folk tit er på fx tjenesterejser.

Yderligere oplysninger fås hos Michael Quaade, på tlf. 2485 1378 eller e-mail mquaade@nbi.ku.dk.



Åbning af Lysets Internationale År 2015 den 22. jan. 2015 på Danmarks Tekniske Universitet



Den 22. januar

- 9.00 – 9.15 **Bred introduktion** til Lysets Internationale År – Kaffe
9.15 – 12.00 Generelle foredrag på dansk om emner med lys: LED- og Nobelprisen, solenergi, internet, lysterapi. For opdatering se hjemmesiden: www.dfs-lysets-aar.fotonik.dtu.dk
Her vil det nøjagtige program blive annonceret ca. 1 måned før.
Meddelelse om registrering vil ske over samme hjemmeside.

Den 22.-23. januar

- 12.30 – **Dansk Fysisk Selskab** åbner Lysets Internationale År ved sit årsmøde med nedennævnte foredragsholdere – alt vil være på engelsk. Årsmødet fortsætter til 23. januar om aftenen. Registrering kan foretages på www.dfs.nbi.dk, hvor det endelige program også vil blive offentliggjort



Sune Svanberg, mangeårig leder af Lund Laser Center, Sverige, og en veteran indenfor anvendelsen af lasere, holder foredrag om hvordan laseren har udviklet sig gennem de 50 år, den har eksisteret. Den har fundamentalt ændret vores syn på og muligheder for lys: "How the laser shed light on the world - the ongoing revolution"??

Ferenc Krausz, leder af Attosekund laboratoriet på Max Planck Institute of Quantum Optics i Garching og professor i eksperimental fysik ved Ludwig-Maximilians-Universität München. Han har været en af de drivende kræfter i at skabe et helt nyt laserfysik-område med ekstremt korte laser pulser: "State of art and future of ultra-short pulses".



Wolfgang Ketterle, professor ved MIT, Cambridge, Massachusetts. Fik **nobelprisen 2001** for ved ekstremt lave temperaturer at have frembragt Bose-Einstein condensatet: en ny tilstandsform, ingen troede kunne blive realiseret.

John Dudley, Professor ved Besancon Universitet, og den drivende kraft for at igangsætte Lysets Internationale År. Tidligere formand for det Europæiske Fysiske Selskab. Har præsteret vigtigt arbejde med ikke-linear optik i fotoniske krystal fibre.



Chris Barty er "Chief technology officer" for National Ignition Facility (NIF) and Photon Science ved Lawrence Livermore National Laboratory. NIF har verdens største lasersystem med op til 200 beam linier rettet mod et target for at skabe ekstreme betingelser, bl. a. for laser fusion, en mulig fremtidig energikilde.

Jennifer Herek, professor i Optical Science ved Twente Universitet, Holland med speciale i ulineære eksperimentelle teknikker til at studere plasmon nanostrukturer og ikke-radioaktiv molekylær billeddannelse af kræftmedicin.

