

KVANT December 4 2024

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 35. årgang

- KVANTEGRAVITATION
– HVORFOR ER DET SÅ SVÆRT?
- DEN INTERNATIONALE RUMSTATION OG DANMARK (DEL 3)
- ASTROMETRIENS UDVIKLING OG BRORFELDE OBSERVATORIUM
- AKTUELLE BØGER • BREDDEOPGAVER • LANDSKOORDINATERNE
- NOBELPRISEN I FYSIK • PLANETKALENDER • KVADRATROD PÅ KINESISK

Løssalgspris: 50 kr.

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : www.kvant.dk

E-mail : kvant@kvant.dk

Facebook  : [KVANT.fysiktidsskrift](https://www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift)

ISSN (trykt) : 0905-8893

ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

Astronomisk Selskab (AS)

Dansk Fysisk Selskab (DFS)

Selskabet for Naturlærens Udbredelse
(SNU)

Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),
DTU Space

Michael Cramer Andersen,

Christianshavns Gymnasium

Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-
redaktør), DTU Electro

Ole Mørk Lauridsen, SNU

Steen Lærke, AS

Maren Malling, DFS

John Rosendal Nielsen

Lars Occhionero, AS

Dorte Olesen, SNU

Finn Berg Rasmussen,

Niels Bohr Institutet, KU

Svend Erik Rugh

Abonnementspris : 185 kr./år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-
lemsblad for de udgivende selskaber.

Abonnement tegnes på www.kvant.dk.

Øvrige henvendelser vedr. abonnement til
Christine Pepke Gunnarsson:

christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

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

1/4 side: 1600 kr.

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

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.

Oplag: 2.500.



Produktionsplan

Nr. 1-2025 udkommer ca. 15. marts

Nr. 2-2025 udkommer ca. 15. juni

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

Indhold:

Den Internationale Rumstation og Danmark

– Tredje Del: Lynjægeren ASIM

Carol Anne Oxborrow 3

Kommende foredrag 7

Astrometriens udvikling og Brorfelde Observatorium

Erik Høg 8

Kvantegravitation – Hvorfor er det så svært?

Bernhard Lind Schistad 16

Kvadratrod på kinesisk

Peer Jespersen 22

Landskoordinaterne

Leif Kahl Kristensen 25

Overfladespænding - breddeopgave 112 og 113 med didaktiske kom-
mentarer

Jens Højgaard Jensen 28

Planetkalender 2025

Martin Götz 30

Aktuelle bøger

Finn Berg Rasmussen 31

Nobelprisen i fysik 2024: Kunstige neurale netværk og ChatGPT

Christine Pepke Gunnarsson 32

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

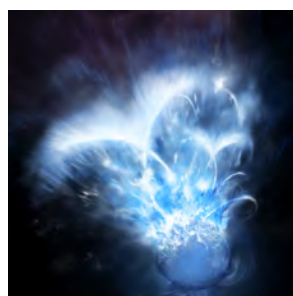
Maren Malling 34

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Cecilie Pedersen 35

Hauchs Fysiske Cabinet

Jens Olaf Pepke Pedersen Bagsiden



Forsidebilledet viser et voldsomt magne-
tisk udbrud fra en neutronstjerne. I et kort
tidsrum på få sekunder udsender stjernen
lys med ekstremt høj energi, som skyldes,
at stjernens magnetiske feltlinjer er ble-
vet viklet rundt om hinanden. Det svarer til
at tage en tyk elastik og trække i enderne,
indtil den går i stykker. Enderne flyver
hurtigt væk fra hinanden og resten vibrerer
i en kort periode derefter.

Læs mere i artiklen på næste side af Carol
Anne Oxborrow.

Billede: Birkeland Centre for Space Scien-
ce, Daniel Schmelling/Mount Visual.

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

Kvant omdeles med PostNord. Såfremt bladet udebliver, opfordres du til at
kontakte PostNords kundeservice på telefon 70 70 70 30 samt orientere Kvant
på e-mail kvant@kvant.dk, så vi kan sende et erstatningseksemplar.

Den Internationale Rumstation og Danmark

– Tredje Del: Lynjægeren ASIM

Carol Anne Oxborrow, DTU Space

I de første to dele af min artikel om Danmarks deltagelse i ISS, den Internationale Rumstation, gav jeg en kort beskrivelse af selve ISS'en og fortalte om nogle eksperimenter udført af Andreas Mogensen, som min forskningsgruppe og jeg selv har været med i. I denne tredje og sidste del fortæller jeg om en mangeårig dansk-ledet mission, der hedder ASIM – “Atmosphere/Space Interactions Monitor” – og som blev opsendt i april 2018.



Figur 1. ASIM i sin oprindelige nadir-observationsstilling, 2018.

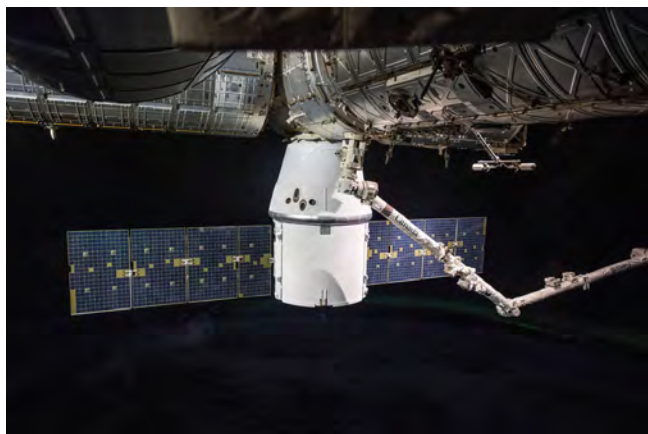
På DTU Space har vi i mange år haft en meget aktiv og verdenskendt forskningsgruppe ledet af Torsten Neubert og Olivier Chanrion, der undersøger elektriske begivenheder, der sker ovenover verdens kraftigste stormskyer. Disse energiske, elektriske udladninger hedder kollektivt “Transient Luminous Events” (TLE’er) – eller på dansk “kortvarige lysudsendende begivenheder”, eller bedre sagt “kæmpelyn”. Der er faktisk mange forskellige slags kæmpelyn: røde feer, der hænger over lynskyerne som et bundt gulerødder; de store blåstråler, der skyder fra skytoppene til ionosfæren; de små, blå flimrende lys, der danser rundt om toppene af de høje, tårnformede stormskyer; de sjældne, ringformede elver, og mest mystiske af dem alle sammen: “Terrestrial Gamma Flashes” (TGF’er), eller jordlige gammastråleglimt. TGF’erne har energi nok til at udsende gammastråling, som er den mest energirige form for lys.

Indtil 2018 havde DTU’s Atmosfæriske Elektricitetsgruppe undersøgt disse forskellige fænomener fra Jordens overflade ved at oprette automatiske kamera-

systemer på høje bjerge, hvorfra de kunne overvåge området ovenover stormsystemer, der samlede sig over det lavereliggende landskab omkring bjergene. Olivier Chanrion er gruppens kameraspecialist og har bygget adskillige automatiske kamerasystemer for at forstå de røde feer over Frankrig og Middelhavet. Men denne teknik er problematisk, hvis man vil undersøge det mindst forståede fænomen af dem alle sammen – TGF’en. Gammastråling bliver stærkt absorberet af atmosfæren (heldigvis for menneskeheden), og derfor kan de ikke ses fra bjergtoppen, hvor et kæmpelyn kan være 100 km eller mere fra kameraet.

Omkring 2005 besluttede gruppen derfor at kombinere to af DTU Spaces spidskompetencer: kæmpelynobservere og røntgen- og gammastrålingsinstrumentering, som er brugt på JEM-X-instrumenterne på ESA’s Integralsatellit-observatorium. I stedet for at kigge ud i rummet for at opdage neutronstjerner, sorte huller, og kosmiske gammaglimt, ville det nye observatorium kigge ned på Jorden og opdage mystiske, jordlige

gammaglimt fra stormskyer. ASIM fik sit navn, fordi vi ville studere de øverste lag af Jordens atmosfære, der hvor Jorden møder rummet.



Figur 2. Space-X Drage-kapslen sættes på plads af “Canada-armen”. Foto: NASA/ESA/DTU Space.

Projektet ledes af DTU Space i samarbejde med partnere fra Norge og Spanien. Birkeland Centre for Space Science hos Bergens Universitet byggede højenergi-detektorerne og billedbehandlings-laboratoriet på Valencias Universitet bidrog med kodetmaske-teknologi til at lave røntgenstrålingsbilleder. Figur 3 i Del 2 af “Den Internationale Rumstation og Danmark” viser, hvordan ASIMs røntgenkodede maske ser ud. En detaljeret beskrivelse af denne teknik, og hvordan MLH-billeder dannes, findes i [3].

De færdiglavede ASIM-instrumenter blev opsendt i april 2018 i en Drage-kapsel med en Space-X Falcon-9-raket. Den ubemandede kapsel blev ført til sin dockningsplads af den store robotarm “Canada-arm”, som vist i figur 2.

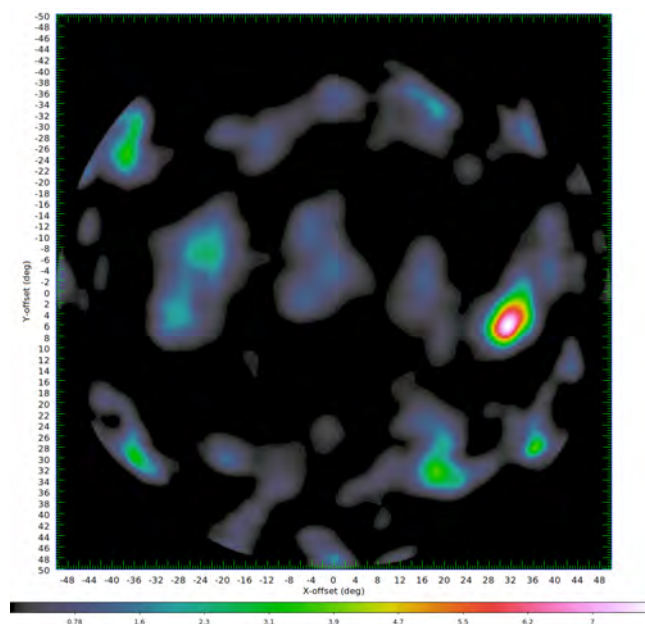


Figur 3. ASIM i horisont-observationsstilling 2022. Foto: NASA/ESA/DTU Space.

På det tidspunkt var ASIM i den nederste del af kapslen, som er åben til rummet, således at luft og damp i instrumenter, der placeres udenfor ISS, kan fordampe inden de startes. Den øverste kegleformede del af kapslen har lufttryk på til alt udstyr, der skal ind i ISS og ikke kan tåle vakuum. Bare at fortælle om alle de indviklede processer og spændende begivenheder omkring opsendelsen og dockningen kunne være en artikel i sig selv, men her holder jeg mig mest til ASIM’s forskningsresultater.

Efter 10 dage i kapslen blev ASIM sat fast på et stativ for enden af Columbusmodul, således at ASIM kunne kigge direkte ned til Jorden, altså i “nadir”-retning som vist i figur 1. Instrumenterne kan se et område, der svarer til omkring 400 km gange 400 km på Jordens overflade direkte under ISS, og vi kan monitorere atmosfæren mellem breddegraderne 51 grader nord til 51 grader syd [1].

ASIM-instrumenterne består af to optiske videokameraer, der filmer ved henholdsvis røde (777 nm) og blå (337 nm) bølgelængder. Den første bølgelængde er typisk for selve lyn-kanalen, der fører strøm fra sky til jord eller fra sky til sky, og kaldes for “leder” (leader), mens det blå lys er typisk for små flimrende lyn-kanaler omkring lederens spids, der hjælper med at forlænge lederen. De kaldes for “strømmere” (streamers). De to bølgelængder kan også skelne mellem røde feer og blåstråler. Ved siden af de to kameraer, der kan danne 12 billeder i sekundet, har vi tre fotometre. Disse instrumenter samler fotoner uden at danne billeder. De registrerer derfor ikke, hvor fotonerne stammer fra i synsfeltet, men til gengæld har de meget fin tidsopløsning, da de udlæses 100.000 gange i sekundet. De tre fotometre måler i blå og rødt lys ligesom kameraerne, og også i UV-lys (240 nm), som kan registrere andre fænomener som fx elvere. Disse optiske kameraer og fotometre hedder tilsammen MMIA (Modular Multispectral Imaging Array) og bruges til at identificere adskillige former for TLE’er. I figur 3 ser man ASIM, efter at den blev flyttet til Horisont-observationsstillingen, og MMIA-instrumenterne kan ses nederst til højre – tre små, sorte cirkler og to lidt større [2].



Figur 4. Et røntgen-sandsynlighedsbillede af en TGF observeret med MXGS. Billede: Paul Connell, IPL, University of Valencia.

Ved siden af MMIA ses den store, firkantede solskærm, der dækker MXGS-instrumenterne (“Modular X- and Gamma-Ray Sensors”), der består af to detektorer – en til røntgenstråling (50–400 keV) og en til gammastråling (300 keV – 40 MeV).

Ligesom fotometrene kan gammastrålingsdetektoren tælle fotoner meget hurtigt, men kan ikke danne billeder. Til gengæld kan røntgendektoren lave en slags billede kaldet et Maximum Likelihood Image (maksimalt sandsynlighedsbillede), der har ganske grov vinkelopløsning, men kan lokalisere en TGFs position indenfor synsfeltet [3].

Figur 4 viser et typisk sandsynlighedsbillede af en TGF observeret af MXGS. Det er ikke et portræt af begivenheden – det viser bare, hvor sandsynligt det er, at de 37 målte røntgenfotoner stammer fra hvert område i synsfeltet. Den store hvide plet viser, hvor det er mest sandsynligt, og med denne oplysning kan vi sammenligne vores TGF-aktivitet med samtidig lynaktivitet på samme sted som set med jordbaseret lynnetværk. De 37 fotoner giver et flot resultat med et TGF-signal 5,9 gange stærkere end baggrundssignalet. Valencia-holdet har dog fundet langt mindre sikre resultater med færre fotoner, men teknikken er begrænset til TGF'er, der er stærke nok til at lande et par snese fotoner på MXGS's detektor.

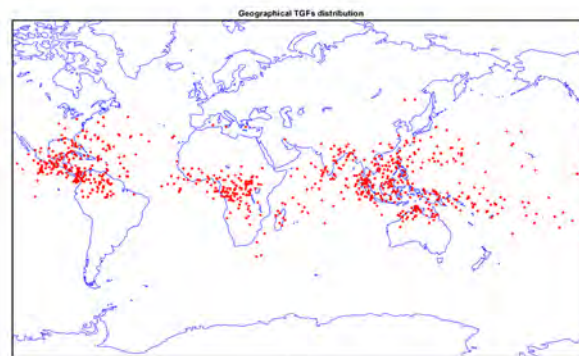


Figur 5. ASIM Science Data Centre's hjemmeside. Billede: ASDC/DTU Space.

Vores samarbejdspartnere i Bergen bidrager også med dataanalyse ved at gennemgå alle vore data for at finde og karakterisere TGF'er, og deres resultater udgives hver måned i et katalog på ASIM Science Data Centres (ASDC) webside: https://asdc.space.dtu.dk/tgf_catalogue/, der kan bruges af ASDCs registrerede brugere.

ASDC er placeret på DTU Space, og det er her, ASIM-data behandles og udgives til verdens kæmpelynforskere. For at downloade selve de videnskabelige data, skal man have et godkendt lynforskningsprojekt. Men der er flere sider på ASDC-websitet, som er tilgængelige for alle, såsom nyhederne [4] og publikationerne [5]. På den sidstnævnte side kan man finde alle referencerne fra denne artikel.

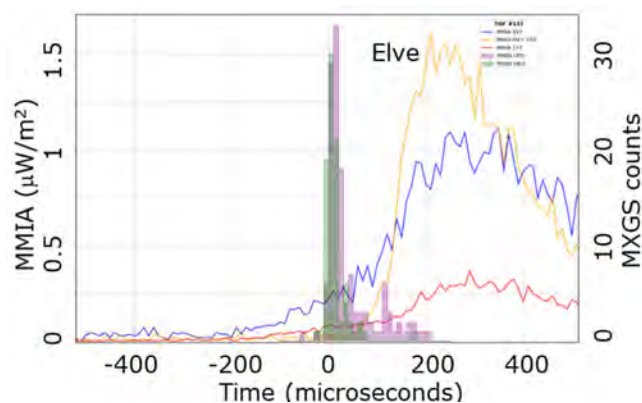
Siden 2018 har ASIM observeret over 1700 TGF'er med sikre positioner og data målt i 5 bølgelængder. Det er en sand skattekasse af data om et fænomen, der først blev opdaget ved en tilfældighed i 1990. ASIM er det første eksperiment, der målrettet er gået på jagt efter TGF'er. Et verdenskort over vores målte TGF'er viser klart, at disse enormt energirige begivenheder forekommer i verdensdelene med de mest voldsomme uvejr, se figur 6.



Figur 6. Verdenskort over jordiske gammaglimt målt af MXGS mellem 2018 og 2022. Figur: Nikolai Østgaard, University of Bergen.

De tre områder, hvor TGF'erne samler sig, dækker områder, der kaldes for Jordens "lynkorstene" – de tre steder i verden med de fleste og mest energirige uvejr: midt/centralamerika, centralafrika og det sydøstlige Asien. Der er dog et område, hvor der skulle være en rigdom af TGF-data, som vi desværre ikke kan måle: det østlige Brasilien ligger tæt på et område kaldet "South Atlantic Anomaly" (SAA), hvor partikelstråling fra Jordens strålingsbælte er usædvanligt stærk, især omkring ISS's bane på 400 kilometers højde. Her er vi nødt til at slukke for instrumenterne for at beskytte dem fra, ironisk nok, elektriske overslag forårsaget af de ladede partikler fra Solen. Vi kan dog måle TGF'er over Venezuela, der er kendt for hyppigheden af uvejr omkring Lake Maracaibo, der er geografisk placeret til at maksimere lyndannelse. Her har vi set en TGF med kælenavnet "Uhyret".

For at forstå, hvordan målinger i alle 5 bølgelængder er vigtige for en dybere forståelse af processerne, der fører til TGF'er, skal man kigge på figur 7, der viser de 5 lyskurver fra en stærk TGF set tæt på Indien. Lyskurverne viser, hvor meget energi eller hvor mange fotoner, der måles af de 5 typer lys, efterhånden som tiden går – men selv uden billeder kan man forstå en hel del, hvis tidsopløsning er fin nok. I denne figur er alle tider givet i forhold til ankomsttiden for de første røntgenstrålingsfotoner.



Figur 7. Lyskurver i 5 bølgelængder fra lyn, en TGF og efterfølgende elver: Blå (337 nm, blå lys; Rød (777 nm, rødt lys); Gul (240 nm, UV lys); Grøn (gammastråling); Lilla (røntgenstråling). Figur: Matthias Heumesser/DTU Space.

I figur 7 kan vi se et kompliceret drama, der udfolder sig og forsvinder igen på under to millisekunder. De røde og blå linjer følges ad og viser, hvordan et almindeligt lyn højt oppe i skyen udvikler sig fra omkring 200 mikrosekunder, før TGF'en indtræffer. Der er faktisk to ledere her: en negativ én, der bevæger sig opad imod den positive leder, der søger nedad. På et tidspunkt ($t=0$) nærmer spidserne sig således, at der er et kort øjeblik, hvor et stærkt elektrisk felt mellem de to ledere voldsomt accelererer frie elektroner. De hurtige elektroner bremses af atomerne i den tynde atmosfære, og dermed udsendes gammastråling, der hurtigt absorberes og spredes af andre molekyler og genudsendes som røntgenstråling. Elektronlavinen, der skabes under disse sammenstød, udsender en radiobølgepuls, kaldet en EMP (Elektromagnetisk Puls), der ikke kan ses direkte af ASIMs instrumenter, men som ses som UV-lys fra en elver, når denne puls rammer ionosfæren ($t \sim 200 \mu\text{s}$). Disse processer foregår så hurtigt, at de er overstået, inden det oprindelige lyn, der forårsagede det hele, når sin højeste aktivitet. Et almindeligt lynnedslag varer omkring et halv sekund, mens en TGF som denne varer i mindre end 0.2 millisekunder [7].

Denne forklaring af de mystiske TGF'er og deres mikroskopiske processor blev publiceret i Science og kom på forsiden takket være vores norske partnere, der fik lavet en animation, der viser disse begivenheder – det voksende lynnedslag, EMP, elven og gammastråling, som er vist med lyserøde partikler. Videoen kan ses på Vimeo <https://vimeo.com/384767040>, og billedet fra filmen på Sciences forside vises i figur 8. Det må understreges, at billedet er en animationkunstners fortolkning af ASIMs data, ikke selve data.



Figur 8. En kunstners fortolkning af TGF-processerne set med ASIM, som vist på forsiden af tidsskriftet Science, januar 2020. Billede: Birkeland Centre for Space Science, Daniel Schmelling/Mount Visual.

Siden 2018 har ASIMs data og forskere oplyst mange andre lynbeslægtede fænomener: blå korona-begivenheder, elektronstråler, overskydende skytopper,

rollen af kyster og bjerge i TGF-dannelse, ELVE-dannelse, leder- og strømmer-dannelse, smalle bipolar begivenheder osv. Men den mest uventede kilde for ASIMs detektorer var en særlig slags neutronstjerne med et enormt stærkt magnetfelt, en såkaldt magnetar. Gammastrålingssignalet fra stjernen dukkede op, fordi gammastråling kan gå igennem ISS og ASIM og ramme ASIMs BGO-detektor fra rummet, selv når instrumentet kigger ned mod Jorden. Denne 2-sekunders puls af ekstremt højenergi lys stammer fra en magnetar, der havde et voldsomt magnetisk udbrud. Så stor en puls blev set af adskillige astronomiske satellitter, f.eks. Fermi, der er på jagt efter netop denne slags. Men disse røntgen- og gammastrålingsobservatorier havde et problem med at se GRB 200415 (den første kosmiske Gamma Ray Burst den 15. april 2020) – den var for lysstærk, således at dens top blev overeksponeret. MXGS kan dog behandle mere end 100 fotoner i en brøkdel af et millisekund. Så selvom MXGS ikke kunne lokalisere denne GRB som de astronomiske instrumenter, kunne det i hvert fald se detaljerne i pulsen såsom vibrationer ved 2.132 Hz og 4.250 Hz. Den primære puls varede kun 3,2 millisekunder – men det er langt i forhold til ASIMs sædvanlige mål [8].



Figur 9. En kunstners forestilling af GRB200415 set med MXGS. Billede: Birkeland Centre for Space Science, Daniel Schmelling/Mount Visual.

En magnetar som den, der dannede GRB200415, har et magnetfelt, der er op til 2×10^{15} gange stærkere end Jordens. Når feltlinjerne bliver viklet rundt om hinanden, er det som at tage en tyk elastik og trække i enderne, indtil den går i stykker. Enderne flyver hurtigt væk fra hinanden og resten vibrerer i en kort periode derefter. I GRB200415's tilfælde kunne man beregne, at neutronstjernen har en masse omkring 1,4 gange Solens masse og en diameter på omkring 20 km. At studere disse magnetiske udbrud er meget vigtigt, hvis man vil forstå neutronstjerner, fordi det er ikke alle, der har så stærkt et magnetfelt – nogle er "bare" 10^{12} gange stærkere end Jordens magnetfelt. Det afgørende spørgsmål er, om alle neutronstjerner fødes med et hyperstærkt magnetfelt, der falder med tiden ved

at udsende deres energi i udbrud som GRB 200415. Hvis det er tilfældet, kan vi finde en neutronstjernes alder ved at måle dens magnetfelt. Udfra ASIM's måling, udsendte udbruddet kaldet GRB 200415 samme mængde energi, som Solen udsender på 100.000 år – sikkert nok til at svække en lille neutronstjerne. Heldigvis kan vi opleve noget af denne enestående begivenhed, fordi ASDC-gruppen i Bergen igen har fået lavet en kunstners forestilling, baseret på ASIMs 3,2 ms data, som set i figur 9. Bemærk, at den ekstremt lysstærke neutronstjerne virker mørk i forhold til det magnetiske udbrud.

ASIM har været en meget produktiv mission, og jeg har kun fortalt om et par af de videnskabelige højdepunkter. Der er langt mere at fortælle, men de interesserede kan finde det hele på ASDCs webside 4,5]. Seks og et halvt år efter opsendelsen venter vi på at høre, om missionen kan forlænges efter marts 2025 eller ej. Som altid med rummissioner ved man aldrig, hvad der kan ske i morgen.

Litteratur

[1] T. Neubert, N. Østgaard, V. Reglero, E. Blanc, O. Chanrion, C. A. Oxborrow m.fl. (2019) “The ASIM Mission on the International Space Station”, *Space Science Review*, bind **215**, 26.

[2] O. Chanrion, T. Neubert, I. Rasmussen, C. Stoltze, D. Tcherniak, N.C. Jessen, J. Polny, P. Brauer m.fl. (2019) “The Modular Multispectral Imaging Array (MMIA) of the ASIM Payload on the International Space Station”, *Space Science Review*, bind **215**, 28.

[3] N. Østgaard, J.E. Balling, T. Bjørnsen, P. Brauer, C. Budtz-Jørgensen, W. Bujwan, B. Carlson, F. Christiansen m.fl. (2019) “The Modular X- and Gamma-Ray Sensor (MXGS) of the ASIM Payload on the International Space Station”, *Space Science Review*, bind **215**, 23.

[4] https://asdc.space.dtu.dk/newsfeed/news_list/

[5] <https://asdc.space.dtu.dk/publications/>

[6] A. Castro-Tirado, N. Østgaard, E. Göğüş, C. Sánchez-Gil, J. Pascual-Granado, V. Reglero, A. Mezentssev, M. Gabler m.fl. (2021) “Very-high-frequency oscillations in the main peak of a magnetar giant flare”, *Nature*, bind **600**, side 621–624.

[7] T. Neubert, N. Østgaard, V. Reglero, O. Chanrion, M. Heumesser, K. Dimitriadou, F. Christiansen, C. Budtz-Jørgensen m.fl. (2020) “A terrestrial gamma-ray flash and ionospheric ultraviolet emissions powered by lightning”, *Science*, bind **367**, side 183–186.



Carol Anne Oxborrow er fysiker, ph.d. Hun har arbejdet på DTU Space i 26 år med adskillige rummissioner: INTEGRAL, Planck, ASIM, MIRI på JWST og nu ATHENA WFI, der skal opsendes i 2038. Carol Anne er leder af ASIM Science Data Centre og forskningsgruppen for Atmosfærisk Elektricitet på DTU Space, samt viceleder af Afdelingen for Astrofysik og Atmosfærens Fysik.

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Februar 2025				
4/2	18.15	Stjerneudvikling frem til kompakte objekter	Anja Andersen	AS (Kbh.)
11/2	18.15	Neutronstjerner (på engelsk)	Irene Tamborra	AS (Kbh.)
18/2	18.15	Novaer og hvide dværge (på engelsk)	Luca Izzo	AS (Kbh.)
25/2	18.15	X-ray binaries	Jérôme Chenevez	AS (Kbh.)
Marts 2025				
4/3	18.15	Neutronstjerner og kilonovaer	Rasmus Damgaard Nielsen	AS (Kbh.)
Maj 2025				
14-15/5		DFS Årsmøde	Afholdes på DTU	DFS

AS (Kbh.): CSS, Gammeltoftsgade 15, 1355 København K. Lokale: 35.-1.05 (astronomisk.dk).

Medlemmer af AS får tilsendt et nyhedsbrev, før foredragsrækken går i gang med information om tilmelding. Andre interesserede kan tilmelde sig foredragsrækken “Neutronstjerner og hvide dværge” via Folkeuniversitetet i København.

SNU: Annoncering af SNU’s foredrag kan ses på hjemmesiden www.snu.dk i løbet af foråret 2025. Også i 2025 vil foredragene blive optaget på video og lagt ud på SNU’s YouTubekanal.

Wieth-Knudsen Observatoriet, Margot Nyholms Vej 1, 3220 Tisvildeleje, har åbent hus-arrangementer med gratis adgang to lørdage om måneden. De kommende datoer er 11/1, 25/1, 8/2, 22/2, 8/3, 29/3 og 12/4. Se nærmere på astronomisk.dk/wieth-knudsen-observatoriet.

Astrometriens udvikling og Brorfelde Observatorium

Erik Høg, Niels Bohr Institutet

Vi kender i dag positioner, bevægelser og spektre for næsten to milliarder stjerner fra observationer med to store ESA-satellitter Hipparcos og Gaia. I den udvikling spillede det astronomiske observatorium i Brorfelde en betydelig rolle, som fortælles her – med en forbindelse til de voldsomme begivenheder i Kina i 1989.¹

Brorfelde Observatorium

Et nyt dansk astronomisk observatorium åbnede i 1953, og det var begyndelsen til en ny epoke i dansk astronomi. Dengang havde Københavns Universitets Observatorium på Østervold en stab, der ses på figur 1. To astronomer er fraværende, professor Bengt Strömgren (1908-87), og dr. phil. Peter Naur (1928-2016), der arbejdede i Brorfelde. Professoren opholdt sig det meste af året i USA som direktør for to store observatorier, og den daglige ledelse i Danmark blev gennem brevveksling varetaget af observator Julie Vinter Hansen (1890-1960). Astronomi blev etableret ved Aarhus Universitet i 1950'erne, og der er nu over 120 astronomer i Danmark. Observator Julie Vinter Hansen er blevet hædret ved, at en stor, smuk gårdhave i den nye Niels Bohr Bygning på Jagtvej 155 bærer hendes navn, se [1].



Figur 1. Astronomisk Observatorium på Østervold med personale 1958. Fra venstre ses: Magister K. A. Thernøe, pedel Jensen, sekretær Lilly Rifbjerg, sekretær Yvonne Pedersen, observator Julie Vinter Hansen, værkstedsleder Poul Bechmann, magister Erik Høg og cand.mag. Svend Laustsen. Fotograf ukendt.

På en bakketop ved landsbyen Brorfelde, 13 km syd for Holbæk, blev der i 1953 opstillet et nyt instrument, der skulle være observatoriets hovedinstrument. Det var en meridiankreds, som dengang var det nøjagtigste instrument til måling af stjerners position på himlen. Den slags målinger kaldes astrometri til forskel fra astrofysik, der drejer sig om stjerner, planeter osv. som fysiske objekter. Positionerne er vigtige for at bestemme stjernernes bevægelser og dermed Mælkevejens opbygning.



Figur 2. Udsigt i 1955 over husene, hvor astronomerne skulle bo, og hvor byggeriet er i gang. Det er set fra toppen af meridiankredsbygningen, som er indsat. Foto: Erik Høg.

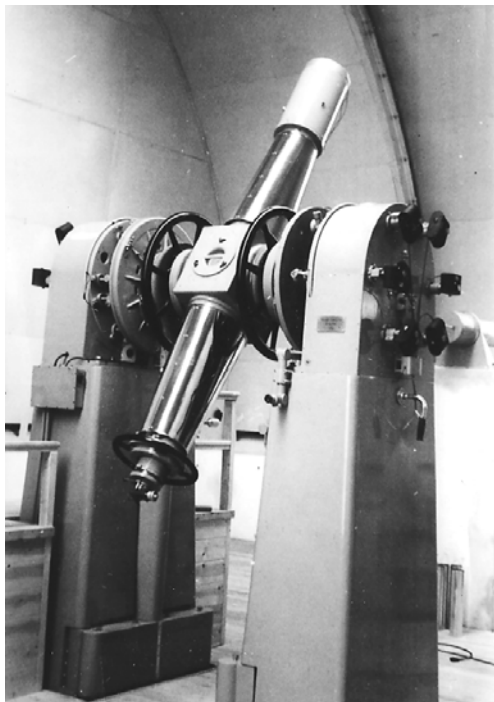
Artiklen her skal især handle om den rolle, Brorfelde Observatorium kom til at spille i udviklingen af astrometrien, dog mest i det omfang, jeg var med i arbejdet. Jeg kan kun nå ganske kort at nævne de mange store bidrag fra hundreder af europæiske astronomer og ingeniører. Herom i KVANT [2] og mere udførligt i [3].

Brorfelde Observatorium voksede til en "forskerby" med op til 35 ansatte medarbejdere. I de fremragende mekaniske og elektroniske værksteder blev der bygget teleskoper og udstyr til danske og flere udenlandske observatorier. Studenter blev trænet i brug af instrumenter i Brorfelde, inden de kunne rejse til fx La Palma eller Chile for at observere med store teleskoper. I takt med den tekniske udvikling flyttede afdelingen i Brorfelde til København, da den i 1996 sammen med afdelingen på Østervold blev huset i en nyistandsat bygning nær Rigshospitalet.

Siden er astronomi, geofysik og fysik blevet samlet under navnet NBI, Niels Bohr Institutet, og har til huse i Niels Bohr Bygningen på Jagtvej 155. Så der er faktisk ikke længere noget, der hedder Astronomisk Observatorium ved Københavns Universitet. Dermed sluttede i 2005 en 363-års epoke, der begyndte i 1642 med indvielsen af Observatoriet på Rundetårn. Før det virkede vores mest berømte astronom, Tycho Brahe (1546-1601). Han hørte direkte under kongen og havde ingen tilknytning til Universitetet, der dengang var temmelig forbenet, mens Tychos observatorium på

¹En stor tak skylder jeg Jørgen Christensen-Dalsgaard, Claus Fabricius, Leif Helmer, David Hobbs, Aase Høg, Svend Laustsen, Lars Occhionero, Jens Olaf Pepke Pedersen og Jørgen Otzen Petersen for oplysninger og for kommentarer til udkast.

Hven var det mest moderne, der overhovedet fandtes, hvor man målte stjerners og planeters positioner med hidtil uset nøjagtighed. Se [4] om dansk astrometri efter Tycho Brahe. Astronomi er fysik, siger man nu, så sammenlægningen med Niels Bohr er meget rigtigt.



Figur 3. Meridiankredsen i 1954. Det er en kikkert, der kun kan drejes om en øst-vestakse, hvor man observerer en stjerne, mens den passerer meridianen. Man registrerer tidspunktet for passagen og kikkertens vinkel om akse ved aflæsning af en nøjagtig delekreds. Foto: Erik Høg.

Ved Aarhus Universitet fandt en lignende sammenlægning sted i 1992, da Institut for Fysik og Astronomi blev dannet. Astronomi var blevet indført ved udnævnelsen af den første professor i 1957, Mogens Rudkjøbing (1915-2007).

I 2013 købte Holbæk Kommune stedet i Brorfelde bakker, og der er indrettet et oplevelsescenter med fokus på alt mellem himmel og jord: Eller nærmere bestemt geologi, natur og astronomi. Mere om hele observatoriets historie siden 1953 kan læses i [5], hvor der er henvisning til Kjeld Gyldenkeres omfattende artikel fra 1986 om Brorfelde med billeder af alle observatoriets medarbejdere med navne.

Meridiankredsens udvikling

Det blev min opgave som student fra 1954 at observere med den nye meridiankreds. Jeg blev fascineret af instrumentet og af den betydning, som astrometriske målinger har for hele astronomien ved at levere positioner, bevægelser og afstande til stjernerne. Astrometri blev faktisk min livsopgave, hvad jeg selvfølgelig ikke anede dengang, og endnu mindre at jeg skulle bidrage til en utrolig udvikling af astrometrien med to store satellitter. Nøjagtighed og antallet af stjerner blev forøget med over et tusind gange, og astrometrien har fået direkte betydning i alle grene af astronomi og astrofysik.

Ganske særlig betydning for min videnskabelige udvikling fik Peter Naur, som blev min vejleder i 1953.

Vi delte arbejdsværelse et par år på Østervold, hvor vi ikke kun talte om astronomi, men også tit om teknik og især computere, dengang noget ganske nyt, som blev kaldt elektroniske regnemaskiner, senere datamaskiner. Den første computer i Danmark var DASK, som blev bygget på Regnecentralen i København, og som blev driftsklar i februar 1958. Dengang troede man helt alvorligt, at en eneste computer ville kunne klare alle Danmarks beregninger, så hurtig som den jo var!

Naur var flyttet til Brorfelde i august 1955. Jeg arbejdede sammen med Naur i Brorfelde fra sept. 1956 til aug. 1958, mens jeg boede i hovedbygningen. Vi arbejdede på udvikling af elektronik til anvendelse af fotografisk teknik ved meridiankredsen, og jeg fandt på en ny metode til bestemmelse af fejl på delekredsens inddelinger, en metode der snart efter blev anvendt i Brorfelde og ved alle andre meridiankredse. I den anledning fik vi løst et ligningssystem på DASK med otte ubekendte, og det var ganske stort for den tid.

Peter Naur havde stor betydning for mig ved at lære mig bygning af den tids elektronik i praksis med radorør og lodning af ledninger, og han ledte mine tanker i retning af den senere udvikling med digitalisering af meridiankredsen i Hamborg. I 1958 sagde Naur, at jeg skulle en tid til udlandet, og jeg fik et stipendium til 10 måneder ved Hamborg Observatorium. Det blev imidlertid til 15 år, fordi jeg havde nye ideer, som man lige havde brug for dernede, hvad jeg kommer tilbage til. Snart blev jeg tysk tjenestemand på livstid.

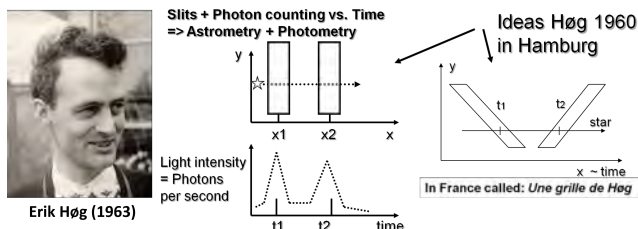
Peter Naur forlod helt astronomien i 1959 og blev snart Danmarks første professor i datalogi. Det var et stort tab for observatoriet, at Naur forlod det, men gennem sit arbejde med datalogi fik han langt større videnskabelig betydning, end han kunne have fået ved udvikling af fotografisk teknik til meridiankredsen. Han blev i 2005 belønnet med Turing-prisen, nobelprisen for datalogi.



Figur 4. Peter Naur var min vejleder i astronomi, men også i elektronik og computerteknik, som var noget helt nyt dengang. Vi mødtes til mit foredrag i 2010, hvor jeg havde inviteret ham. Foto: Poul-Henning Kamp.

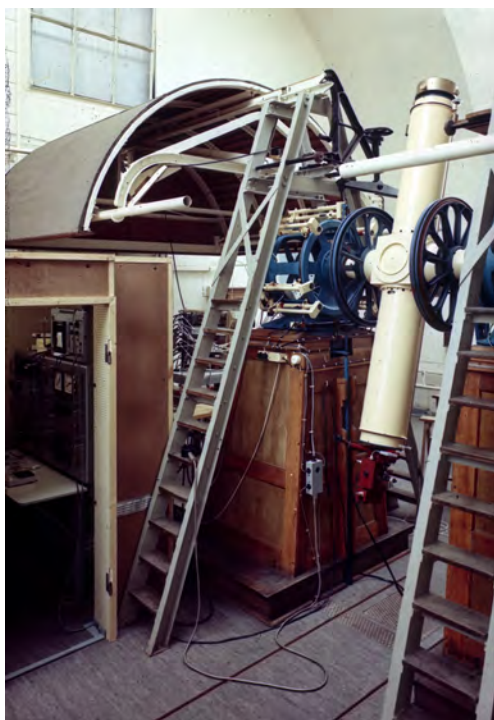
I mange år havde jeg ingen forbindelse med Naur, først i hans sidste år mødtes vi igen, og vi fik et meget positivt forhold. "Det er utroligt hvad du har nået, Høg!" sagde han efter mit foredrag i 2010, se figur 4, og han fik stor respekt for den nye astrometri. I et stort interview, se [7] i 2009 med historikeren Thore Bjørnvig siger han om

arbejdet i Brorfelde i 1950'erne: "... Der er ikke noget som udfordring i bare at [observere] - det er fuldkommen rutine. Der er ikke for fem øre videnskabelighed i det, det er ligesom landmålerarbejde [på himlen] ... den eneste interesse der kunne være ved det, ... altså videnskabelig interesse, det var at forbedre teknikken."



Figur 5. Skitse af den nye metode til astrometri ved tælling af fotonerne. Tegning: Erik Høg.

Egentlig er jeg enig med Peter Naur, nu da jeg har fået adgang til selve teksten fra interviewet, for i 1950'erne og også senere var det en selvfølge, at man med en meridiankreds observerede stjernerne én efter én. Men i 2010 fik det mig til at bruge titlen: "En landmåler i himlen" til min artikel i KVANT [2], for astrometri var jo blevet mit himmerige. Jeg havde i Hamborg fået lejlighed til gøre observationerne halvautomatiske ved meridiankredsen, se figur 6. Og det var kun en begyndelse.



Figur 6. Den digitaliserede, halvautomatiske meridiankreds i Bergedorf, den første i sin art. En person i hytten til venstre passerede apparaturet og sagde til observatøren ved kikkerten, hvordan han skulle dreje denne manuelt, så den ønskede stjerne kom ind i synsfeltet. Derefter blev fotonerne talt og registreret digitalt. Delekredsen, som ses til venstre på akse, blev samtidig målt gennem mikroskoper og også registreret på hulstrimmel. Foto: Wilhelm Dieckvoss.

Ved Hamborg Observatorium i Bergedorf ville jeg være astrofysiker, for jeg havde efterhånden mærket, at astrometri blev anset for at være gammeldags blandt

astronomer. Så jeg arbejdede en tid på et projekt med måling af spektre fra den store Schmidt-kikkert i Bergedorf, og jeg udrustede måleapparatet med registrering på hulkort. Elektronikken kunne jeg selv bygge, og en sådan digitalisering var noget ganske nyt i Bergedorf.

Men i 1960 fandt jeg på en helt ny målemetode til astrometri, idet jeg foreslog at tælle fotonerne, mens en stjerne går hen over spalter i kikkerten på en meridiankreds, figur 5. Disse tællinger skulle registreres på en hulstrimmel og senere behandles i en computer.

Disse ideer faldt i god jord, fordi man havde planer om at sende meridiankredsen i Bergedorf til Perth i Vesta Australien for at observere 25.000 stjerner på sydhimlen som led i et stort internationalt samarbejde. Direktøren, professor Otto Heckmann, gik ind for sagen og havde tillid til mig, han havde jo netop set mit arbejde med digitalisering. Man troede først, at det nødvendige apparatur (figur 6) kunne bygges på et par år, men det tog faktisk syv år, inden det kunne sendes til Australien.

Det blev til en ekspedition, der varede fem år, og hvor op til ti observatører var i sving. To personer observerede godt 100 stjerner på en nat, og de samme to lavede kort efter beregningerne om dagen. Computeren til formålet var den danskbyggede GIER, der viste sig at være den eneste, der var hurtig nok. Den var 10 gange hurtigere end den bedste af de andre computere, vi havde råd til at købe. Peter Naurs ALGOL60 var heldigvis netop blev klar til brug ved programmeringen, da vi købte computeren til Hamborg i 1964. Det var den første computer på observatoriet, og den blev brugt flittigt af alle astronomer i de tre år, indtil den skulle til Australien. Resultatet var et katalog med alle stjernerne, og nøjagtigheden overgik de andre i det internationale samarbejde.

Den fotografiske teknik til meridiankredsen i Brorfelde, som blev iværksat af Bengt Strömgren og Peter Naur, blev videreudviklet af Svend Laustsen, og kunne tages i brug i 1962. Men den nødvendige udmåling af de fotografiske plader viste sig at være en flaskehals i processen, og man blev klar over, at der ikke var fremtid i den fotografiske metode.

Svend Laustsen, der boede i Brorfelde fra januar 1959 til juli 1968, sagde til mig for nogle år siden, at han godt kunne se dengang, at den fotoelektriske metode til observation af stjerner, som jeg samtidig udviklede i Hamborg, måtte være fremtiden, men på det tidspunkt var han naturligvis nødt til at fortsætte med den fotografiske metode. Han udviklede også en metode til registrering af delekrederen på hulstrimler, ganske som vi gjorde i Hamborg, og det var et kæmpe fremskridt.

Faktisk blev jeg hentet hjem fra Hamborg i 1973, hvor jeg for længst havde fået en livstidsstilling som tysk tjenestemand, og hvor jeg havde hus og hjem med en dansk kone og tre børn. På Hamborg Observatorium var betingelserne for astrometri blevet meget ugunstige fra ledelsens side, så det var mit held, at jeg blev hentet væk på det tidspunkt. I Brorfelde var der et velfungerende videnskabeligt og teknisk miljø, skabt ved professor Anders Reiz' (1915-2000) talent for at udnytte de "gyldne tressere" til en stor udvidelse af hele observatoriet.

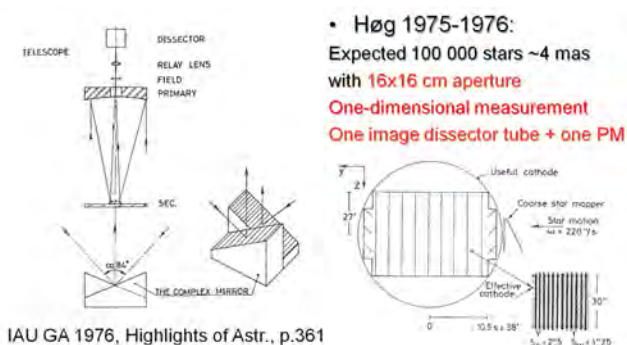


Pierre Lacroute 1978 Jean Kovalevsky 2010 Catherine Turon 1978

Figur 7. Tre franske astronomer med ledende roller i Hipparcos-missionen. Fotos fra nettet og fra Catherine Turon.

Hipparcos-satellitten

Nu tilbage til mit forslag i 1960 om en ny målemetode til astrometri. Der var interesse, og ganske særlig betydning fik det, at professor Pierre Lacroute tog ideen op. Han var direktør for observatoriet i Strasbourg og havde den store vision at måle astrometri fra en satellit i kredsløb om Jorden. Derude ville målingerne være fri for atmosfærens forstyrrelse, og instrumentet ville ikke være påvirket af tyngdekraften. Lacroute begyndte allerede i 1963 at arbejde med disse tanker og lavede flere forslag til et instrument, som han også publicerede. Men jeg selv og flere andre syntes, at forslagene var ganske urealistiske.

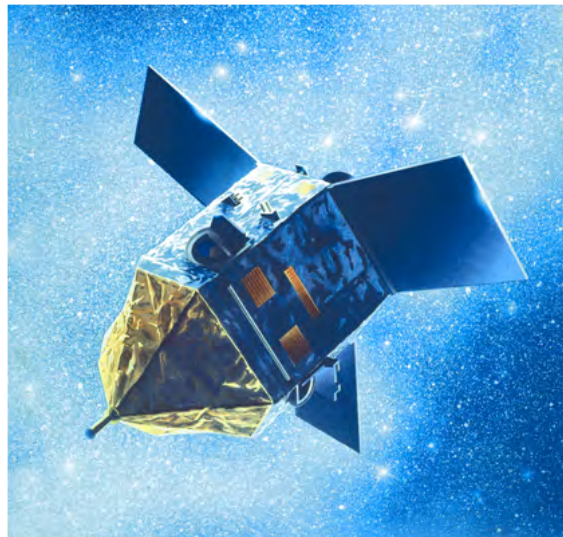


Figur 8. Forslag til en astrometrisk satellit. Lacroutes ideer er bibeholdt med en satellit, der skanner hele himlen mange gange, idet den roterer, og med et spejl, der reflekterer to felter ind i kikkerten. Mange andre ting er dog anderledes end hos Lacroute, se [2,3].

I Frankrig kom andre med i arbejdet, se figur 7, men kun der, og det var faktisk et rent fransk projekt. Omkring 1973 blev det imidlertid besluttet, at Frankrig ikke mere skulle opsende egne satellitter, men kun inden for ESA. Professor Jean Kovalevsky, direktør for et astrometrisk observatorium i Sydfrankrig, så de store muligheder i Lacroutes vision, og han var den drivende kraft i at få det ind i ESA. I 1975 blev jeg opfordret af ESA til være med i en studiegruppe om rumastrometri. Det gik jeg med til trods min skepsis, og ved det første møde i oktober forstod jeg, at vi kunne tage det helt fra grunden og bruge rumteknologien til vores videnskab uden særligt hensyn til Lacroutes forslag. Så kunne jeg tænke frit og kom på seks uger med forslag til en satellit, der så realistisk ud, det blev meget positivt modtaget. Ralph Florentin i Brorfelde hjalp mig, da jeg

lavede det nye design, især med den nye detektor, en Image Dissector Tube, IDT, der gjorde satellitten 100 gange så effektiv som hos Lacroute, der kun brugte photomultiplikatorer.

Nogle måneder senere kunne jeg tegne figur 8. Med disse principper blev Hipparcos-satellitten udviklet af ESA og industrien i samarbejde med astronomer, vedtaget af ESA i 1980 og sendt op i 1989, figur 9.



Figur 9. Hipparcos-satellitten opsendt af ESA i 1989, og som observerede i tre år. I alt 120.000 stjerner blev målt med meget stor nøjagtighed, og 2,5 millioner blev målt med noget mindre nøjagtighed i det såkaldte Tychoeksperiment, som jeg foreslog i 1981.

Brorfeldes meridiankreds

Under arbejdet med Hipparcos gik udviklingen videre i Brorfelde imod en automatisk meridiankreds, som skulle styres af en computer, der sigtede kikkerten mod den ene stjerne efter den anden. Målingerne skulle samles af denne computer og behandles videre af den.

Fra 1973 arbejdede jeg i Brorfelde på bygning af et nyt fotoelektrisk mikrometer, mere raffineret end det vi havde sendt til Perth, og en forudsætning for den efterfølgende succes med den automatiske meridiankreds. Her må jeg, især hvad det tekniske angår, nævne lederen af det mekaniske værksted, Poul Bechmann (f. 1916, pens. 1986), og lederen af det elektroniske værksted, Ralph Florentin Nielsen (1940-95), som begge spillede en meget stor rolle for mit arbejde. Bechmann kunne designe mekanik meget bedre, end jeg havde kendt i Hamborg, og det var en vigtig forudsætning for det nye mikrometer. Fra 1980 stod de to ildsjæle Leif Helmer og Claus Fabricius for arbejdet, og førte det videre gennem mange år til stor succes. Jeg havde fået andre jern i ilden med Hipparcos og med en helt ny type meridiankreds.

Efter at Svend Laustsen havde forladt Brorfelde i 1968, blev arbejdet med det fotografiske mikrometer ført videre af Hans Jørn Fogh Olsen (1943-2023), og han var en af de drivende kræfter i etablering af det samarbejde med England og Spanien, som nu skal omtales. Omkring 1976 var der kontakt med Royal Greenwich Observatory, RGO, i England om et samarbejde, hvor vores automatiske instrument skulle opstilles på La Palma, en af de Kanariske Øer. På en

bjergtop, Roque de los Muchachos, blev i de følgende år bygget et stort observatorium, som stadig er i drift og som nyder godt af en klar himmel langt de fleste nætter. Ved RGO var der en lang tradition for astrometri med meridiankredse, hvor man stadig observerede visuelt, og staben ønskede bedre videnskabelige muligheder. Et samvirke blev vedtaget, hvor også en spansk gruppe fra observatoriet i San Fernando kom med.



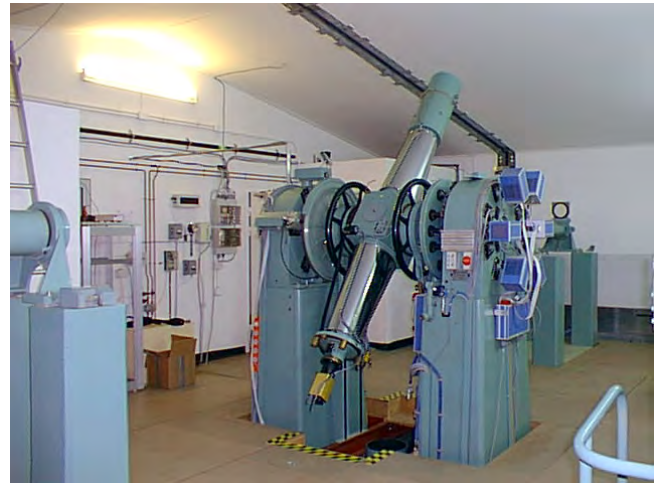
Figur 10. Fra et møde i august 1980 i Brorfelde om det fælles projekt med flytning af meridiankredsen fra bakken i Brorfelde til en bjergtop på La Palma i de Kanariske Øer. Personerne er fra de tre deltagende lande: nr. 3 og 5: L.V. Morrison og R.H. Tucker fra UK, nr. 2: L. Quijano fra Spanien, nr. 1, 4 og 6: L. Helmer, C. Fabricius og J.V. Clausen fra Danmark. Foto modtaget fra Claus Fabricius.

Leif Helmer, se figur 10, arbejdede ved meridiankredsen fra 1969 og var leder fra 1979. Han og jeg stod i 1974-76 for udgivelsen af kataloget med 25.000 stjerner fra observationerne med Hamborg-meridiankredsen i Australien. Leif arbejdede faktisk indtil 2004 med observationer og udgivelse af de sidste kataloger fra La Palma på CD-rom. Lige efter at vi var flyttet til København i 1996, udviklede han programmet på La Palma, så man kunne styre kikkerten med fjernkontrol via internettet og udvikle videre på softwaren samt hente alle data hjem til de tre respektive lande, har han fortalt mig. I 2005 overtog Spanien instrumentet på La Palma.

Claus Fabricius arbejdede ved meridiankredsen 1980-94, se figur 10 og 12. Claus begyndte allerede som student og fortsatte som en bærende kraft under hele udviklingen og flytningen til La Palma. Her blev opnået en hidtil uset produktivitet for en meridiankreds på 100.000 nøjagtige observationer om året.

Cook-meridiankredsen fra Royal Greenwich Observatory i Herstmonceux blev installeret i meridiankredskuplen i Brorfelde i begyndelsen af 1990'erne og brugt ved afprøvningen af CCD-mikrometre til måling af stjernen og til aflæsning af delekredsen, inden de blev sendt til La Palma. Den blev senere overført til National Maritime Museum i Greenwich. I 1996 blev de nye mikrometre taget i brug på La Palma efter bygning i Brorfelde. De anvendte CCD-detektorer i stedet for at bruge fotontælling, så man nu kunne observere langt flere og meget svagere stjerner med større nøjagtighed.

Carlsberg-meridiankredsen overgik alle andre, men sluttede, idet meridiankredse faktisk var blevet forældet gennem observationerne med Hipparcos-satellitten.



Figur 11. Carlsberg Automatic Meridian Circle på La Palma fra 1984 efter udvikling i Brorfelde. Instrumentet leverede 100.000 observationer af stjerner om året som planlagt og meget mere efter 1998, da CCD-detektorer var blevet installeret. Carlsbergfondet har givet midler til instrumentet lige fra anskaffelsen i 1940'erne og til hele udviklingen. Foto: Dafydd Wyn Evans.

Glasmeridiankredsen, en ny type meridiankreds

I mange år havde man tanker om en ny type meridiankreds fx i USSR, USA, Canada og Portugal, og jeg fik mine første idéer herom i 1967. Det skulle være et horisontalt liggende instrument uden en lang kikkert, der skulle rettes op mod stjernen. Man mente, at bøjning af det tunge kikkertør som følge af tyngdekraften ændrede sigteretningen i forhold til den delekreds, hvor kikkertens hældning blev aflæst, og som skal give stjernens "deklinations" på himlen. Denne nedbøjning af kikkertørret (tube flexure, "rørbøjning") ville give systematiske fejl i deklinationen, som havde været kendt siden omkring 1900. Men man havde ikke noget bevis for, at rørbøjning virkelig var årsagen, det var kun den almindelige mening om dette "klassiske" problem.

Gennem de mange års udvikling af mit instrument, glasmeridiankredsen, GMC for Glass Meridian Circle, fandt jeg ganske uventet den virkelige årsag til problemet, og vi var i stand til at fjerne fejlen med et simpelt udstyr skruet på instrumentet på La Palma [6]. Den opdagelse, er jeg lige så glad for, som for de andre astrometriske forbedringer, jeg har fundet på, skønt den ikke fik nogen stor betydning, fordi meridiankredsen på det tidspunkt var forældet. Det var så fundamentalt, og løsningen så simpel, og dog tog det mig henved 20 år.

Den virkelige årsag til det, man kaldte rørbøjningen, var ikke en bøjning af kikkertørret, men skyldtes en refraction inde i røret, fordi luften derinde har en lodret gradient, temperaturen er lidt højere ved oversiden af røret end forneden, og det giver en afbøjning af lyset afhængig af gradientens størrelse. Det problem var jeg faktisk klar over, lige siden jeg begyndte med ideen om en horisontal meridiankreds i 1967, men først i 1980 blev jeg i stand til at måle størrelsen med et nyt elektronisk termometer ved et eksperiment i Brorfelde, jeg fandt

nogle tiendedele grader. Først da fik jeg den tanke, at det samme måtte ske inde i en sædvanlig meridiankreds.

Denne gradient kunne fjernes ved en langsom rotation af luften omkring den optiske akse, og det kunne ske ved at blæse luft ind i røret tangentielt og således holde rotationen i gang. Det blev installeret på La Palma i 1985 og viste sig at virke godt. Det førte samtidig, ganske uventet, til en forbedring af målingen af refraktionen i atmosfæren, som man samtidig foretager ud fra observationerne af stjernerne. [6].



Figur 12. En model (1:1) af Glasmeridiankredsen ved værkstedet i Brorfelde i august 1980. Seks meridianastronomer fra tre lande: nr. 1 og 3: L.V. Morrison og R.H. Tucker fra UK, nr. 2 og 6: J.L. Muñoz og L. Quijano fra Spanien, nr. 4 og 5: C. Fabricius og E. Høg fra Danmark. De benytter et møde om deres fælles projekt på La Palma til at se på et projekt for fremtiden. Foto modtaget fra Claus Fabricius.

Kinesere i Brorfelde

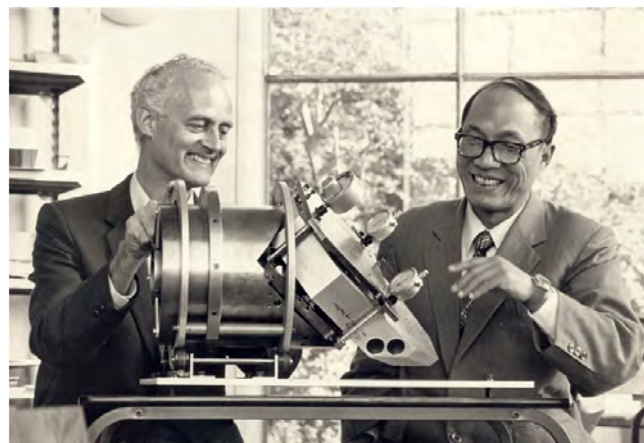
Ideerne om Glasmeridiankredsen tog form for mig omkring 1967, og jeg holdt mange foredrag om den ved internationale møder. I 1973 blev en Study Group for Horizontal Meridian Circles oprettet under IAU (International Astronomical Union), og jeg var formand indtil 1991. I 1978 traf jeg ved IAU-kongressen i Montreal professor Ye Shuhua, som var “the grand lady of Chinese astronomy”. Senere traf jeg hende igen ved næsten alle mine besøg i Kina, og en sidste gang i 2019 ved IAU i Wien, hvor vi snakkede om Gaia og den efterfølger for Gaia, der kommer om tyve år, som vi arbejder på i ESA.

Ye Shuhua sendte mig i juli 1980 en invitation til et lille møde i Shanghai i september, hvor jeg først blev sendt på en rejse rundt i Kina ledsaget af en tolk. Rejsen gik fra Hongkong og Guangzhou til Xian i Shaanxi-provinsen, hvor jeg besøgte Shaanxi Astronomical Observatory (SAO) i Lintong, åbenbart et hovedmål for rejsen, hvad jeg ikke vidste på forhånd. Derfra gik det til Beijing, Hangzhou og Suzhou. I Shanghai blev der holdt et lille møde om astrometri med kun to andre udenlandske astronomer: Paul Couteau fra Nice og Walter Fricke fra Heidelberg. Jeg holdt foredrag om Hipparcos-projektet, der netop var blevet vedtaget af ESA, og om Glasmeridiankredsen på observatorierne i Shaanxi, Beijing og Shanghai.



Figur 13. Den første aften i Xian i september 1980 gik jeg ud på gaden foran hotellet og snakkede med folk, de fleste klædt i blåt Mao Zedong tøj. Den næsten aften gik jeg over gaden ind mellem husene og ventede lidt ved en lille plads. Da kiggede den unge pige ved min venstre side ud ad døren, jeg sagde “god aften, jeg er fra Danmark, jeg taler kun meget lidt kinesisk”. Hun sagde, at jeg talte rigtig godt og kom et øjeblik efter ud med en lav stol, jeg skulle sætte mig på, jeg fik en kop te på den lille skammel. Så dukkede børnene op, jeg viste dem nogle fotos fra Australien og Danmark, og vi snakkede i to timer, kun kinesisk. Foto: Erik Høg.

I de følgende år besøgte jeg Kina mange gange, og jeg havde inden den første rejse lært at tale en smule kinesisk, en time hver dag i de seks uger inden rejsen, hvad der var til stor nytte og fornøjelse, se figur 13. Mine værter var altid meget opmærksomme på, at der blev tid til både arbejde, hvile og socialt samvær. Vi besøgte Kinas skønne natur og utrolige og ældgamle arkæologiske og kunstneriske seværdigheder fra Kunming til den store mur, og ved besøgene i 1988 og 1991 var min kone Aase også gæst med mig.

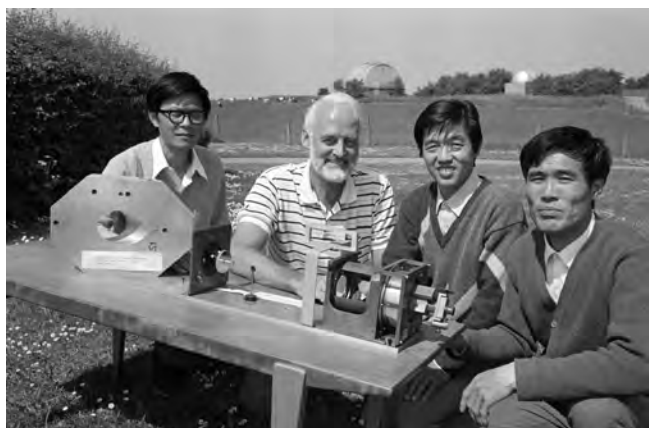


Figur 14. Erik Høg med Dr. Hu Ningsheng ved Glasmeridiankredsen under besøget i Brorfelde 1981. Foto: Politiken.

I 1981 besøgte Dr. Hu Ningsheng, direktør for Nanjing Astronomical Instrument Factory (NAIF), Brorfelde, se figur 14. I juni 1982 arrangerede Dr. Hu en workshop på observatoriet i Shaanxi om Glasmeridiankredsen med deltagere fra fem institutter i Kina, hvortil jeg ankom på hjemrejsen fra Japan efter en måneds ophold som gæst ved Tokyo observatoriet. Der installerede man netop en ny meridiankreds med fotoelektrisk mikrometer bygget af Zeiss i Tyskland. Jeg holdt foredrag om ideerne til instrumentet og om

Hipparcos/Tycho-missionen. Man besluttede i samråd at gå videre med instrumentet som et teknisk udviklingsprojekt, idet man ikke kunne garantere, at det ville lykkes.

Fra maj 1984 kom mange gæster fra Kina på længere ophold, hvor de boede i Brorfelde i det hus, jeg selv boede i med min familie i 1973-74. Det var blevet indrettet som gæstehus i 1976. Først kom Dr. Li Zhigang, astronom fra SAO, og kort efter Yao Qingqu, ingeniør fra NAIF. Den første boede der et år og den anden i to år, mens de arbejdede med mig på udvikling af Glasmeridiankredsen. Jeg besøgte Brorfelde som regel en dag om ugen for at arbejde med mine gæster, idet jeg fra juli 1980 havde mit kontor i Observatoriet på Østervold.



Figur 15. Dansk kikkert til Kina, Erik Høg med tre kinesiske ingeniører i Brorfelde. Fra venstre: Hu Qiquan, Erik Høg, Li Huanxin og Fang Fusheng. Foto: Lars Hansen, Ritzaus Bureau.

Alt dette blev fulgt tæt af Holbæk Amts Venstreblad og det lokale TV og et par gange af Politiken. Planen var Danish Chinese Meridian Telescope, som skulle udvikles i fællesskab og derefter bygges på fabrikken i Nanjing til opstilling ved observatoriet nær Xian i Shaanxi.

Mørke udsigter



Figur 16. Mørke udsigter. Astronomen i stribet trøje genkendes fra figur 15. Dagens tegning i Politiken den 15. juni 1989.

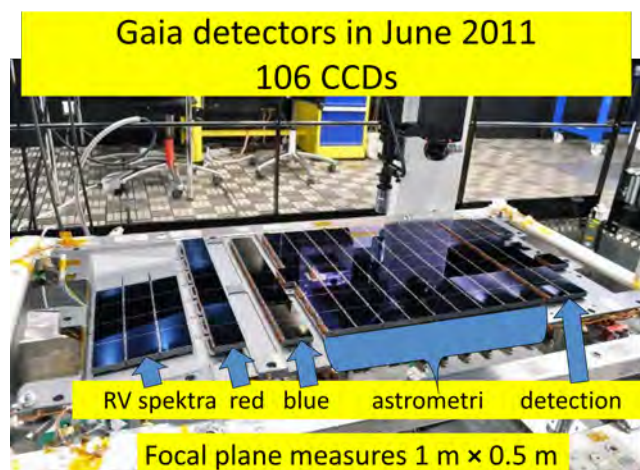
Min kollega lektor Johannes Andersen (1943-2020) fra Brorfelde besøgte i den anledning Kina en uges tid i

april 1986 på vegne af Københavns Observatorium. En delegation på tre VIPer, præsidenten for Shaanxi Viden-skabernes Selskab og to fra SAO, besøgte Danmark i 1987, herunder Brorfelde, Østervold og Nordisk Optisk Teleskop, som stod næsten færdig i Helsingør.

I Brorfelde boede i vekslende tidsrum fire ingeniører fra SAO og NAIF med samme formål indtil juni 1989. Xu Xinqi, elektronikingeniør fra NAIF, boede der i henved tre år fra 1986. I 1989 var tre ingeniører nogle uger i Brorfelde, se figur 15 og 16. Det var samtidig med de voldsomme begivenheder i Beijing. Deres eneste kommentar var: "It is very dangerous", og jeg tror ikke, de havde nogen tanker om demokrati.

Vi var dengang i pressen vidne til en opstand for demokrati i Kina, som kulminerede, da vi den 5. juni så en enlig demonstrant standse en kolonne af fremrykkende tanks på Den Himmelske Freds Plads i Beijing, men derefter blev opstanden slået ned med mange tusind dræbte.

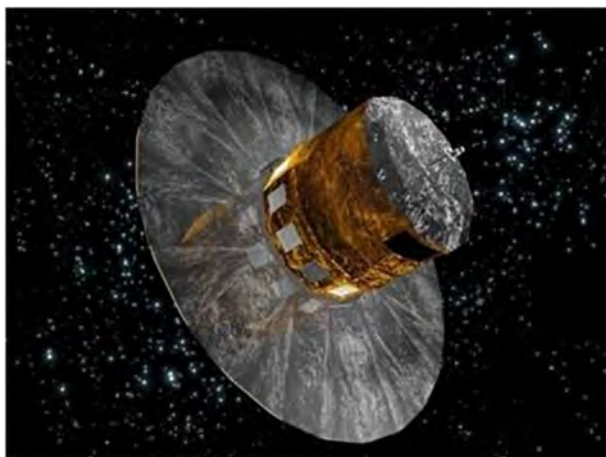
I 1991 besøgte jeg igen Kina, men projektet stand-sede, da Hipparcos-satellitten var blevet en succes og derved havde gjort meridiankredse forældet.



Figur 17. De 106 CCDer på Gaia. Stjernerne bevæger sig fra højre mod venstre takket være satellittens langsomme rotation, og der måles samtidigt på tusindvis af stjerner. Det var det største areal med CCDer på nogen videnskabelig satellit ved opsendelsen i 2013. Det er næsten samme slags CCDer som i et digitalt kamera, men her observerer en milliard pixel samtidig, næsten et tusind gange så mange som i et almindeligt kamera. Figur: ESA.

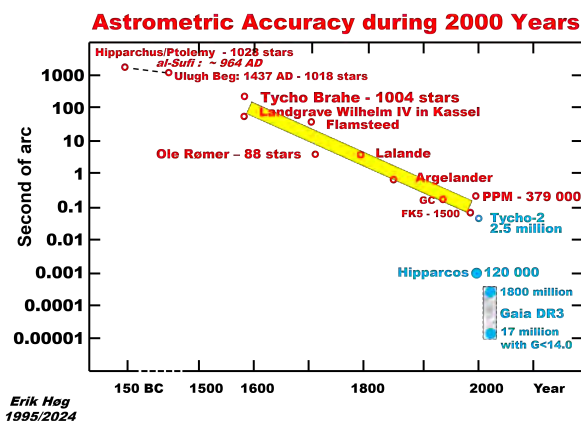
ESAs Gaia-satellit til astrometri

Mens Hipparcos observerede, var jeg i gang med tanker om en efterfølger, der skulle være meget mere nøjagtig og observere mange flere og meget svagere stjerner. Den ide drøftede jeg især med kolleger i USSR og med min kollega Lennart Lindegren i Lund, og i 1992 var jeg klar over, at CCD, Charge Coupled Device, var den oplagte detektor. Den er ti gange så lysfølsom som detektorerne i Hipparcos, og en enkelt CCD rummer millioner af enkelte sensorer kaldet pixels. Astronomer brugte allerede CCDer, men ikke til astrometri, og der var tvivl om den mekaniske stabilitet til dette formål.



Figur 18. Gaia-satellitten blev i 2013 sendt op til en position 1,5 millioner km fra Jorden i retning væk fra Solen. Det store panel med solceller til venstre har ti meter diameter og giver skygge, så direkte lys fra Solen, Månen eller Jorden aldrig rammer teltet med optik og elektronik. Derved holdes temperaturen meget konstant for at sikre den stabilitet, der kræves for at nå den store astrometriske nøjagtighed. Den rektangulære åbning for den ene af de to kikkerter ses sort til højre, de to spejle måler 1,45x0,5 m², 22 gange større areal end i Hipparcos. Figur: ESA.

Ralph Florentin i Brorfelde var en vigtig rådgiver, og af ham lærte jeg på første hånd om CCDens egenskaber, et helt nyt område for mig. I 1992 kunne jeg ved en kongres i Shanghai forelægge et design kaldet Roemer, som kunne måle 500 millioner stjerner med ti gange større nøjagtighed end Hipparcos. Hele udviklingen af Gaia, som den kaldes, er skildret i [3], ganske kort: ESA vedtog missionen i 2000, den (figur 17 og 18) blev opsendt i 2013, og den har nu observeret i over ti år, idet observationerne indstilles 15. januar 2025. Egenbevægelserne bliver således meget nøjagtigere end med de forudsete fem års observationer, og antallet af nye exoplaneter med lange perioder bliver mangedoblet.



Figur 19. Astrometrisk nøjagtighed gennem 2000 år. Figur: Erik Høg.

De store spring

Resultater fra Gaia for 1,8 milliarder stjerner fra de første tre års observationer er publiceret på nettet i juni 2022 og har revolutioneret brugen af astrometri i alle grene af astronomien. Gaia har målt spektre for stjernerne, inklusiv i de første tre år mere end en million

kvasarer og andre ekstragalaktiske punktformede objekter, radialhastigheder for 33 millioner stjerner, desuden nøjagtige positioner for 158.000 asteroider og 31 måner til planeter.

Figur 19 viser udviklingen i astrometrisk nøjagtighed gennem over 2000 år. Kort før år 1600 blev nøjagtigheden meget forbedret af landgreve Wilhelm IV i Kassel og af Tycho Brahe i Danmark. De følgende 400 år bragte gradvist endnu større forbedringer, indtil rumteknologien startede en ny æra for astrometri. Med de to ESA-satellitter er der sket to spring i nøjagtighed på tilsammen ti tusind gange - indtil år 2022.

I 2013 åbnede ESA for nye missioner. Jeg sendte et forslag om en efterfølger til Gaia, som blev behandlet af ESA sammen med mange andre forslag. Denne proces og det videnskabelige formål for en efterfølger beskrives i [3], hvor figur 21 fra 2017 viser et design udført af ESA. En international gruppe af forskere arbejder på dette projekt kaldet GaiaNIR, koordineret af David Hobbs, Lund Observatorium. En ny detektor er under udvikling med passende størrelse, hastighed og støj og med følsomhed også i det nære infrarøde ud over CCDens 1000 nm. Hos ESA ventes en ny fase i planlægning af missioner at begynde i 2026, og en opsendelse i 2045 er en mulighed, hvis projektet vedtages.

Litteratur

- [1] E. Høg, S. Laustsen og J. Otzen Petersen (2024) "Julie Vinter Hansen Event". <https://zenodo.org/records/13744520>.
- [2] E. Høg (2010) "En landmåler i himlen," *Kvant*, bind 21, nr. 3, side 3–8.
- [3] E. Høg (2024) "A review of 70 years with astrometry". Research Memoir. Invited review for Astrophysics and Space Science, 32 sider, kun online: <https://rdcu.be/dzp2o> eller <https://arxiv.org/abs/2402.10996> til download.
- [4] E. Høg (2022) "Om dansk astrometri efter Tycho Brahe", *Kvant*, bind 22, nr. 2, side 32–35.
- [5] J.K.L. Bouchet og M.B. Olsen (2014) "Brorfelde Observatorium åbner som oplevelsescenter," *Kvant*, bind 25, nr. 4, side 14–17.
- [6] E. Høg og C. Fabricius (1988) "Atmospheric and internal refraction in meridian Observations". *Astron. Astrophys.*, bind 196, side 301–312.
- [7] T. Bjørnvig og K. Tybjerg (2010) "Dansk astrometri fra 1950 til i dag: Metoder, mål og midler". Baseret på talrige interviews. <https://zenodo.org/records/14252551>, som vil blive opdateret.



Erik Høg er dr.scient. i astro-nomi. Han har arbejdet ved Hamborg Observatoriet 1958–73 og ved Københavns Universitet 1953–58 og 1973–2002, hvor han gik på pension. Han har især arbejdet med måling af positioner, bevægelser og afstande af stjerner med højest mulig præcision, fra Jorden og med to satellitter, Hipparcos og Roemer/Gaia. En efterfølger til Gaia til opsendelse i 2045 er på vej.

Kvantegravitation – Hvorfor er det så svært?

Bernhard Lind Schistad, Midtbyens Gymnasium, Mercantec

I over 70 år har fysikerne forsøgt at forene den generelle relativitetsteori med kvantemekanikken. Men det er ikke lykkedes at formulere en konsistent teori, som omfatter både kosmos og den subatomare verden. Vi vil her se lidt på, hvorfor det er så svært, og diskutere, hvorvidt det overhovedet giver mening. Vi vil også se på, hvad konsekvenserne vil være, dersom det ikke lader sig gøre.

De fire vekselvirkninger

I fysikken regner vi med, at alle fysiske processer i universet styres af fire vekselvirkninger:

- Den elektromagnetiske vekselvirkning, som er ophav til elektricitet og magnetisme
- Den svage vekselvirkning, som er ophav til radioaktivt betahenfald
- Den stærke vekselvirkning, som er ophav til kernekrafterne og holder kvarkerne sammen i protoner og neutroner
- Gravitationen, som er ophav til tyngdekraften

I det 20. århundrede har fysikken frembragt to fundamentalt nye teorier, som supplerer den ældre mekanik, termodynamik og elektromagnetisme. Det drejer sig om relativitetsteorien (den specielle fra 1905 og den generelle fra 1915) og kvantemekanikken.

Men den oprindelige formulering af kvantemekanikken (fra Bohr, Heisenberg, Schrödinger og mange flere) var ikke i overensstemmelse med relativitetsteorien. Det er senere lykkedes at forene kvantemekanikken med den specielle relativitetsteori i form af Diracligningen (som beskriver bølgefunktionen for fermioner) og kvantefeltteori, som beskriver, hvorledes elementarpartiklerne vekselvirker ved at udsende og absorbere kvanter af et felt. I forbindelse med denne forening af teorierne blev antipartiklerne opdaget teoretisk, da Diracligningen havde løsninger med negativ energi.

Dette førte frem til dagens situation, hvor materiens fundamentale bestanddele og deres vekselvirkning er beskrevet af Standardmodellen.

Standardmodellen indeholder tre slags partikler (figur 1):

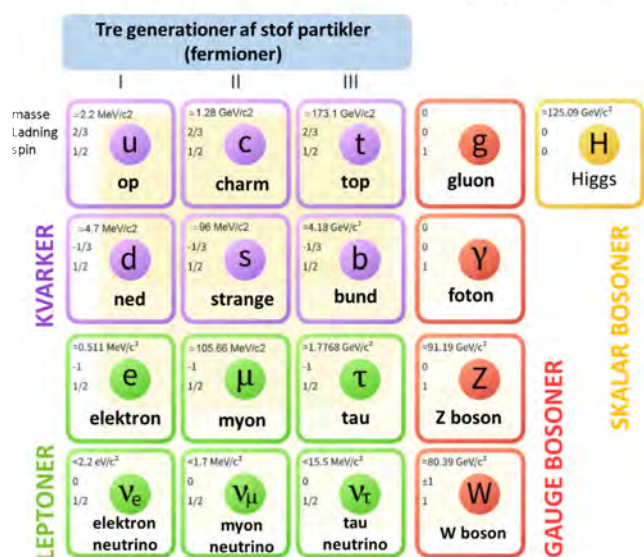
- Stofpartikler, som opbygger al materie,
- Gaugebosoner, som er kvanter for felterne, og som giver vekselvirkninger mellem stofpartiklerne,
- En skalarboson, som er kvant for feltet, og som giver partiklerne masse.

I standardmodellen er der tre fundamentale vekselvirkninger:

- Den elektromagnetiske vekselvirkning påvirker partikler med elektrisk ladning (kvarker, elektroner, myoner og tau-leptoner). Kvantet for dette felt er fotonen.

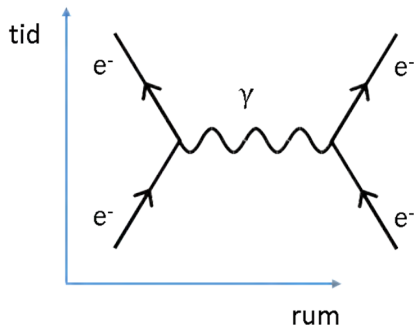
- Den svage vekselvirkning påvirker alle stofpartiklerne (hvis de er venstrehåndede) og kan få en kvark til at ændre type eller forvandle en elektron til en neutrino. Kvantet for den svage vekselvirkning er vektorbosonerne W^+ , W^- og Z_0 .
- Den stærke vekselvirkning påvirker kun kvarkerne. Den er ansvarlig for at holde kvarkerne bundet i protoner og neutroner. Kvantet for dette felt er gluonerne, og der findes otte forskellige gluoner. De kan udsendes og absorberes af partikler, som har farveladning (en ladning som er analog til + og – for elektrisk ladning, men findes i tre værdier: rød, grøn og blå).

Standardmodellen for elementarpartiklerne



Figur 1. Partiklerne i Standardmodellen.

Vekselvirkningerne kan illustreres i simple Feynmandiagrammer med tilhørende regneregler. Hvert diagram bidrager med en amplitude, men for at udregne den totale reaktionshastighed for et bestemt udfald, må vi summere amplituderne fra alle diagrammer, som forbinder starttilstand med slutttilstand. Reaktionshastigheden er proportional med absolutværdien af den totale amplitude i anden potens. Et førsteordensdiagram for frastødningen mellem to elektroner er vist på figur 2. Elektronerne frastøder hinanden ved at udveksle en foton.



Figur 2. Førsteordensdiagram for vekselvirkning mellem to elektroner.

Det er karakteristisk for kvantemekanikken, at den ikke forudsiger et bestemt resultat af en vekselvirkning, men giver mulighed for at udregne sandsynligheden for et bestemt udfald. Når vi skal beregne sandsynligheden for en sluttilstand, må vi summere bidragene fra alle mulige processer, som kan lede fra begyndelsestilstand til sluttilstand. I kvantefeltteori gør vi dette ved at summere bidragene fra alle mulige Feynmandiagrammer, som forbinder tilstandene, og integrere over alle mulige interne variable.

Men gravitationen er ikke med i Standardmodellen. Vi har ikke en feltteori for gravitation, og vi har ikke noget kvant for tyngdefeltet.

Spin

Alle elementarpartiklerne i Standardmodellen har et spinkvantetal. Dette kvantetal er analogt med impulsmomentet i klassisk fysik. I kvantemekanikken er en partikels spin kvantiseret, det vil sige, at det kun kan have visse bestemte værdier. I klassisk fysik er spin forårsaget af partiklers rotation om deres egen akse (som en snurretop), men i kvantemekanikken er det en mere abstrakt størrelse. Spin manifesterer sig ved det magnetiske moment for ladede partikler og ved bølgefunktionens symmetriegenskaber. Spin er altid bevaret i alle partikelreaktioner.

I kvantemekanikken kan vi ikke kende hele spinvektoren $\vec{s}$ på grund af Heisenbergs usikkerhedsrelation. Vi kan kun kende absolutværdien for spinkvantetallet s . Denne kan kun antage bestemte værdier:

$$s = (0, 1, 2, 3, \dots) \text{ for bosoner og}$$

$$s = (\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots) \text{ for fermioner.}$$

For et givet spinkvantetal s er spinnets rumlige orientering kun veldefineret langs den ene akse. Dette angives ved det sekundære spinkvantetal m_s og kan antage alle lovlige værdier mellem $-s$ og $+s$. For halvtalligt spin ($s = \frac{1}{2}$) giver det to orienteringer, mens det for heltalligt spin ($s = 1$) giver tre orienteringer.

I Standardmodellen er alle stofpartikler fermioner, mens alle partikler, som formidler vekselvirkninger, er bosoner.

At partiklerne, som formidler vekselvirkninger, er bosoner, kan vi se af, at spin altid er bevaret. Når en elektron udsender en foton, kan den skifte mellem de to spintilstande $\pm \frac{1}{2}$, men ikke et helt tal. Derfor må fotonen have spin $s=1$. Det samme gælder for gluonen og vektorbosonerne.

Fotonens spin er ophav til polarisation af lys, men da fotonen er masseløs og bevæger sig med lyshastigheden, kan den ikke have nogen spinkomponent i bevægelsesretningen. Den har derfor kun to lovlige polarisationstilstande.

Gravitationen i den generelle relativitetsteori

I modsætning til kvantemekanikken fortæller den generelle relativitetsteori intet om fremtiden. Den fortæller derimod om nutiden, eller mere præcist hvorledes rumtiden ser ud. I denne teori har vi erstattet det euklidiske tredimensionale rum, som vi er vant til at regne med i Newtons fysik, med en firedimensional rumtid, hvor vi har medtaget tiden som en fjerde koordinat. Mens vi er vant til at angive et punkts position med tre koordinater (x, y, z) , angiver vi her fire koordinater (x^0, x^1, x^2, x^3) . Det er almindeligt at lade x^0 betegne tiden, mens x^1, x^2, x^3 er rumkoordinaterne.

Både Newtons mekanik, Maxwells elektromagnetisme og kvantemekanikken antager, at rummet er euklidisk, dvs. at det opfylder Euklids postulater. I dette rum vil to parallelle linjer aldrig skære hinanden, og summen af vinklerne i en trekant er 180° . Vi kalder også dette for et "fladt" rum, da det ikke har nogen krumning.

Men i den generelle relativitetsteori er rumtiden ikke euklidisk, men derimod en Riemann-mangfoldighed. Dette er udtrykt i Einsteins feltligninger, som siger, at tilstedeværelsen af masse og energi vil krumme rumtiden således at [1]:

Deformationen af rumtiden (hvor meget det afviger fra et euklidisk rum) omkring et objekt er proportional med tætheden af masse omkring objektet multipliceret med lyshastigheden i anden plus tre gange trykket af stof omkring objektet.

Løsningerne til Einsteins feltligning er en metrik, som angiver, hvorledes længde og tid afhænger af position. Vi kan formulere dette på følgende måde:

- Massen fortæller rumtiden, hvor meget den skal krumme, og
- Rumtiden fortæller objekter, hvorledes de skal bevæge sig.

I feltligningen indgår også trykket, men da massen er multipliceret med lyshastigheden i anden, giver den langt det største bidrag til rummets krumning.

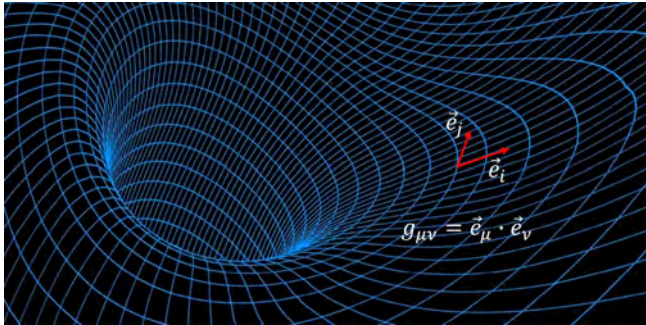
Metrikken

Geometrien af rumtiden i Einsteins feltligninger er beskrevet med to tensorer. En tensor er en matematisk mangfoldighed, som er en generalisering af vektorbegrebet til mange dimensioner og er invariant under koordinattransformationer. De to tensorer, der indgår i Einsteins feltligning, er:

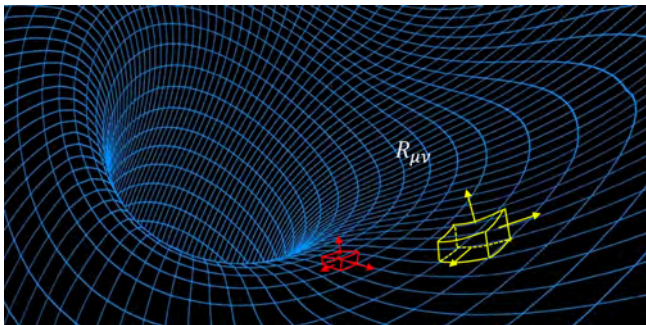
- Den metriske tensor $g_{\mu\nu}$ angiver, hvorledes enhedsvektorerne varierer i rummet og bruges til

beregning af afstande mellem punkter. Det er en tensor af rang 2 (det vil sige, at den har to indekser), og repræsenteres med en 4×4 -matrix, hvor komponenterne er skalarproduktet af to enhedsvektorer (figur 3). I relativitetsteoriens rumtid drejer det sig om enhedsvektorerne for tidsaksen og de tre rumakser ($\vec{e}_0, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$). Derfor er komponenterne i den metriske tensor givet ved $g_{\mu\nu} = \vec{e}_\mu \cdot \vec{e}_\nu$, hvor $\mu = 0, 1, 2, 3$ og $\nu = 0, 1, 2, 3$

- Riccitensoren $R_{\mu\nu}$ angiver, hvorledes rumfanget af enhedsboks i et Riemannrum ændrer sig i forskellige retninger



Figur 3. Den metriske tensor.



Figur 4. Riccitensoren.

Når vi kender den metriske tensor, kan vi beregne afstanden mellem to nærliggende punkter i rumtiden. Den er givet ved:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad (1)$$

hvor dx^μ er en infinitesimal afstand i hver koordinat (dx^0, dx^1, dx^2, dx^3).

Her har vi anvendt Einsteins notation for summering: Hvis et indeks gentages, enten som sænket eller hævet indeks, skal det summeres over alle værdier. Når vi skriver det hele ud, får vi:

$$ds^2 = g_{00}dx^0dx^0 + g_{10}dx^1dx^0 + g_{20}dx^2dx^0 + g_{30}dx^3dx^0 + g_{01}dx^0dx^1 + g_{11}dx^1dx^1 + \dots \quad (2)$$

I et euklidisk rum er den metriske tensor (i kartesiske koordinater) simpel:

$$g_{\mu\nu} = \delta_{\mu\nu} \quad (3)$$

Det vil sige, at

$$g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1 \quad (4)$$

og

$$g_{12} = g_{21} = g_{13} = g_{31} = g_{23} = g_{32} = 0 \quad (5)$$

I et euklidisk rum har vi ikke tiden med, så g_{00} findes ikke.

Så bliver afstandsformelen til Pythagoras' ligning i planet!

Gravitation er ikke en kraft

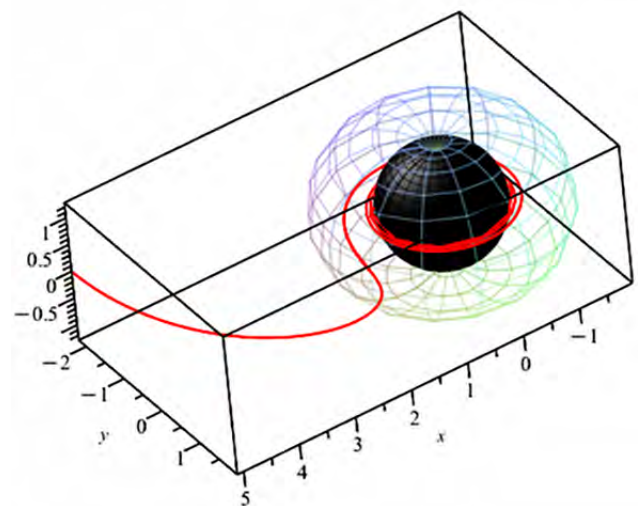
I den generelle relativitetsteori er gravitationen ikke en kraft, men en geometrisk egenskab. Når et objekt bevæger sig gennem rumtiden, vil det følge en geodætisk linje, som bestemmes af den metriske tensor. Denne bane kan bestemmes ud fra det mindste virkningsprincip:

Et objekt vil altid følge den bane mellem to punkter, som giver den mindste virkning

Virkningen for et objekt, som bevæger sig fra punkt P til punkt Q i den generelle relativitetsteori, er givet ved:

$$A = mc \int_P^Q g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (6)$$

Når en partikel bevæger sig langs en bane, vil den altid vælge den vej, hvor denne virkning har sin minimumsværdi. For at bestemme banen, skal vi ikke anvende kræfter og Newtons 2. lov, men finde den geodætiske kurve, hvor A har sin minimumsværdi. Et eksempel på en sådan kurve i rumtiden omkring en masse er vist på figur 5.



Figur 5. Geodætisk kurve for bevægelse omkring et astronomisk objekt.

Kvantegravitation

Vi har nu beskrevet, hvorledes gravitation i den generelle relativitetsteori kommer fra rumtidens egenskaber, og ikke fra kvanter i et felt. Men kan det også lade sig gøre at beskrive gravitation med kvanter?

Hvis vi skal lave en kvantefeltteori for gravitation, må der findes kvanter for gravitationsfeltet. Det har man selvfølgelig forsøgt, og disse kvanter har fået navnet gravitoner. De har også heltalligt spin, ligesom kvanterne i Standardmodellen, men gravitonerne kan ikke have spin 1, men derimod spin 2. Dette har to årsager:

- I modsætning til de tre vekselvirkninger i Standardmodellen, er gravitationen altid en tiltrækkende kraft. Vi har aldrig set to masser frastøde hinanden. Dette kræver, at kvanterne har spin $S=2$.
- I grænsetilfældet ved store afstande, bør teorien gå over i den generelle relativitetsteori. Men den er beskrevet med tensorer af rang 2 (med to indekser). Dette kræver, at gravitonen har spin 2.

Vi ved også, at gravitonerne har en rækkevidde, som omfatter hele universet. Dette kræver, at de er masseløse, da kvanter med masse har kort rækkevidde på grund af Heisenbergs usikkerhedsrelation:

$$\Delta x \cdot \delta p \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (7)$$

(En partikel med masse har også en usikkerhed i impuls).

Men hvis vi sætter et sådant kvant ind i formalismen for en feltteori, støder vi på et uoverstigeligt problem. *Teorien kan ikke re-normaliseres, det vil sige, at alle de sandsynligheder, vi udregner, bliver uendelige!* [3].

En sådan teori er uanvendeligt nonsens, og alle forsøg på at omgå disse uendeligheder har været forgæves.

Alternativer til kvantegravitation

Da det gik op for fysikerne, at den velkendte kvantefeltteori ikke kunne anvendes på gravitationen, begyndte man at søge efter alternative teorier. De to mest kendte kandidater til at være dette alternativ er:

- Superstrengteori, og
- Loop Quantum Gravity.

Superstrengteori

I superstrengteori består alle elementarpartiklerne af vibrerende strenge med en radius af størrelsesordenen som Plancklængden (10^{-35} m). Partiklerne i Standardmodellen er vibrationstilstande af sådanne strenge. Spændingen af strengen er af samme størrelsesorden som Planckkraften (10^{44} N). Gravitonen bliver her en streng med amplitude nul.

Desværre viser det sig, at for at strengteorien skal være konsistent, kræves der mindst 10 dimensioner (3 rumlige, tiden og 6 hyperrumdimensioner). De ekstra 6 dimensioner er "pakket sammen" i form af en Calabi–Yau manifold [4]. Et eksempel på en sådan er vist i figur 6, som viser 6 dimensioner pakket sammen til 2 dimensioner.

Der findes et meget stort antal sådanne strengteorier med alt fra 10 til 26 dimensioner. Desværre er teorierne

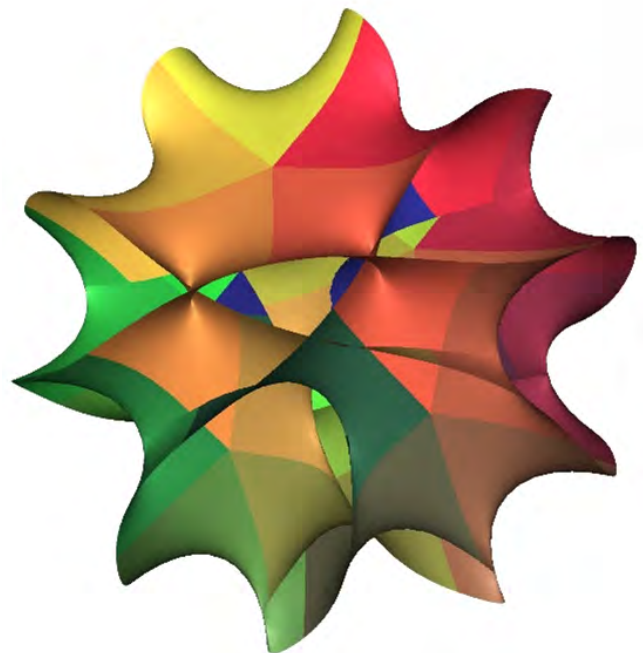
meget komplicerede, og det har været mere end svært at få testbare forudsigelser ud af dem. Derfor er deres popularitet som forklaringsmodel for partikler og vekselvirkninger stærkt aftagende.

Loop Quantum Gravity

Loop Quantum Gravity-teorien bygger på to fundamentale antagelser. Disse antagelser er, at rumtiden må opfylde følgende betingelser [5]:

- Baggrundsinvarians, dvs. at teoriens ligninger er uafhængige af rumtidens geometriske form og værdien af de forskellige felter, som fylder den, og
- Den må være Diffeomorft-invariant, dvs. at det, der foregår i et punkt i rumtiden, kun afhænger af, hvad der findes i dette punkt, og ikke af, hvor dette punkt befinder sig, eller hvad der sker i andre punkter.

Det viser sig, at disse to betingelser medfører, at rum og tid ikke er kontinuerte, som i både Newtons mekanik og relativitetsteorien, men kvantiseret, dvs. at den er delt op i kvanta af en fundamental længde (10^{-35} m) og et fundamentalt tidsinterval (10^{-43} s). Dette medfører, at der også er et fundamentalt mindste rumfang på 10^{-105} m³.



Figur 6. Seks dimensioner pakket sammen til to dimensioner.

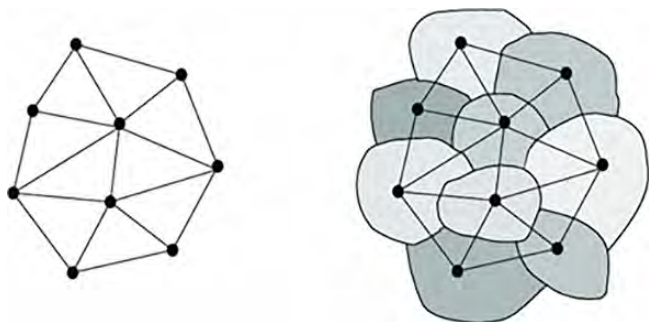
I Loop Quantum Theory består rummet af små rumelementer. Et rumelement består af en eller flere "pixels" af elementer af det mindste rumfang. Ligeledes består et tidsinterval af et eller flere fundamentale tidselementer. I teorien ses rumtiden som diskrete loops med tilhørende noder, som forbinder dem. I hver node sidder et antal kvanta af fundamentale rumelementer. De loops, som forbinder noderne, er todimensionale og kaldes spin-netværk (figur 7).

Rummet er så defineret som geometrien af spin-netværket, og tiden er de bevægelser, som reorganiserer spin-netværket.

I praksis har Loop Quantum Gravity vist sig at være svær at regne på, og teorien er endnu ikke kommet med konkrete forudsigelser som kan testes eksperimentelt.

Bohrs og Dysons argument

Men giver det overhovedet mening at kvantisere gravitationen? Lad os gå tilbage til et gammelt argument, som Niels Bohr brugte til at begrunde, at elektromagnetismen må være kvantiseret. I en berømt artikel fra 1933 [6] påviste Bohr og Rosenfeld, at kravet om, at det elektromagnetiske felt skal kunne måles, medfører, at feltet selv må være kvantiseret for at kunne opfylde Heisenbergs usikkerhedsrelation for position og impuls af de ladninger, som er ophav til feltet. Derfor må der findes fotoner.



Figur 7. Spin-netværk.

Freeman Dyson har påpeget, at hvis vi anvender det samme argument for gravitationen, kommer vi ud i problemer [7]. Hvis gravitation er kvantiseret, må der være målbare gravitoner associeret med tyngdebølger. Men hvis vi skulle bygge en detektor, der kan påvise gravitonerne fra de tyngdebølger, der blev påvist af Ligo-detektoren (Nobelprisen i fysik i 2017), ville den blive så stor, at den selv ville blive et sort hul! Måske forsøger naturen at give os et hint:

Hvis der ikke eksisterer et målbart kvant for gravitationen, kan kvantegravitation ikke give mening.

Hvad hvis kvantegravitation ikke eksisterer

Blandt argumenterne for, at gravitationen må forenes med kvantemekanikken, har specielt tre argumenter været fremhævet:

- En accelereret masse udsender tyngdebølger, derfor vil en elektron i sin bane omkring atomkernen tabe energi, og atomet ville kollapse.
- I kvantemekanikken kan en partikel befinde sig flere steder samtidig. Hvilken af disse positioner er det, der deformerer rumtiden?
- I centrum af sorte huller finder vi en matematisk singularitet. Det samme gælder i starten af Big Bang. Hvis vi har en kvanteteori for gravitationen, kan vi erstatte dem med meningsfyldt fysik.

Vi vil se lidt mere detaljeret på disse argumenter.

Atomar stabilitet

Vi starter med at se på kollaps af atomer på grund af udsendelse af tyngdebølger i form af gravitoner. Da vi ikke har en teori for gravitation på det atomare niveau, vil vi prøve at anvende formlen for udsendelse af tyngdebølger fra astronomiske objekter. To massive legemer med masser m_1 og m_2 , som roterer omkring hinanden i en cirkulær bane med radius r , udsender tyngdebølger. Det giver et energitab (udstrålet effekt) på [8]:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{32G^4}{5c^5 r^5} (m_1 m_2) (m_1 + m_2), \quad (8)$$

hvor G er Newtons gravitationskonstant.

Dette fører til, at systemet kolliderer efter en tid givet ved:

$$t = \frac{5}{256} \frac{c^5}{G^3} \frac{r^4}{(m_1 m_2) (m_1 + m_2)} \quad (9)$$

Hvis vi indsætter masser og radius for brintatomet i grundtilstanden, får vi en levetid på 2×10^{106} år.

Igen ser det ud til at naturen forsøger at fortælle os noget!

Usikkerhed i position

Hvis vi ser på problemet med, hvorledes usikkerheden i en partikels position påvirker deformation af rumtiden, kan vi spørge om dette virkelig er et problem i praksis. Elektronens masse er af størrelsesorden 10^{-30} kg. Det giver en Schwarzschildradius på 10^{-57} m. Forholdet mellem den elektromagnetiske kraft og tyngdekraften mellem to elektroner i en afstand af en atomdiameter (10^{-10} m) er over 42 størrelsesordener. Det virker fuldstændig urealistisk, at vi nogensinde skal kunne adskille den forskel, som usikkerheden i en enkelt elektrons position påvirker rumtiden med, fra påvirkning af vekselvirkningerne fra alle de andre elementarpartikler. De mest nøjagtige målinger, vi hidtil har udført på noget fysisk objekt, har en nøjagtighed på ca. 10 decimaler.

Det ser derfor ud til, at den indflydelse, elementarpartiklernes usikkerhed i position og energi har på den metriske tensor, aldrig vil kunne måles.

Singulariteten

I centrum af et sort hul befinder der sig en singularitet, hvor rumtidens krumning er uendelig. Dette er meget "ufysisk", og man håber, at kvantegravitation vil kunne få den til at forsvinde. Men i 1969 formulerede Roger Penrose et teorem [10], som kaldes formodningen om kosmisk censur:

Intet imploderende objekt kan nogensinde skabe en nogen singularitet. Hvis en singularitet opstår, vil den altid være gemt bag en begivenhedshorisont, så den aldrig kan observeres fra det resterende univers.

Så igen forhindrer naturen os i at finde ud af, om kvantegravitationen er påkrævet.

Konklusion

Efter at fysikerne i over 70 år har prøvet at forene den generelle relativitetsteori med kvantemekanikken, må vi konstatere, at det har været sværere end forventet. Mange fysikere er derfor begyndt at stille spørgsmålet, hvorvidt det overhovedet giver mening. Hvis ikke, må vi nøjes med at anvende kvantefeltteorien i et euklidisk rum og trøste os med, at vi altid kan dele rumtiden op i mindre elementer, hvor Euklids geometri gælder, og kvantemekanikken virker. Så kan vi integrere bidragene fra hvert delement. Kvantemekanikken gør, at vi kan udregne sandsynligheden for et bestemt udfald. Den generelle relativitetsteori fortæller os, hvorledes rumtiden ser ud, og den udgør den baggrund, hvor kvantemekanikkens fysiske processer foregår.

Litteratur

- [1] K. Thorne (1994) “Black Holes & Time Warps, Einstein’s Outrageous Legacy”, W. W. Norton & Company, side 118.
- [2] “Gravity Waves”, *AW Physics Macros*, blad nr. 24, side 16–23 (2015).
- [3] Z. Bern m.fl. (2017) “Two-Loop Renormalization of Quantum Gravity Simplified”, *Phys. Rev. D*, bind **95**, side 046013.
- [4] S.-T. Yau og S. Nadis (2010) “The Shape of Inner Space: String Theory and the Geometry of the Universe’s

Hidden Dimensions”. Basic Books, ISBN 978-0-465-02023-2.

- [5] C. Rovelli og M. Gaul (2000) “Loop Quantum Gravity and the Meaning of Diffeomorphism Invariance”, *Lecture Notes in Physics*, bind **541**, Springer, Berlin.
- [6] N. Bohr og L. Rosenfeldt (1933) “Zur Frage der Messbarkeit der Elektromagnetischen Feldgrößen“, *Det Kgl. Danske Videnskabers Selskab. Matematisk-fysiske Meddelelser*, bind **XXI**, nr. 8. København, Levin & Munksgaard.
- [7] R. Penrose (1979) “General Relativity, an Einstein Centenary Survey”, red. S.W. Hawking og W. Israel, Cambridge University Press.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han underviser i fysik og matematik på Midtbyens Gymnasium, Mercantec, i Viborg.

Kvadratrod på kinesisk

Peer Jespersen

Alle de tidlige kultursamfund har kendt Pythagoras' læresætning, hvor bestemmelsen af kvadratroden af en størrelse er essentiel. Og de har alle udviklet metoder til bestemmelse af kvadratroden af en størrelse. Den kinesiske metode er interessant af flere grunde. Dels er den kinesiske metode baseret på kendskabet til kvadratsætningen, $(x + y)^2 = x^2 + y^2 + 2xy$, dels benytter kineserne 10-tals systemet, dog uden et tegn for tallet 0 (nul) og dels oversættes proceduren til en algoritme, som benyttes sammen med tællestave og -bræt.¹

Kinesisk matematik udviklede sig rigtig meget under Zhoudynastiet fra ca. 1022 til ca. 256 f.Kr. En vigtig kilde til forståelse af kinesisk matematik er værket Zhou Bi Suan Jing, som beskriver aritmetiske udregninger i forbindelse med astronomi og den kinesiske kalender. Zhou Bi Suan Jing indeholder bl.a. også et bevis for Gou Gu-sætningen, som i vesten kendes som Pythagoras' læresætning. Sætningen er illustreret på figur 1 ved en 3-4-5 trekant.



Figur 1. Xian Tu-diagrammet, hvorfra kineserne udledte Pythagoras' sætning [1]

Det kinesiske talsystem

Det kinesiske talsystem består af ni cifre; 1, 2, ..., 9:

一	二	三	四	五	六	七	八	九
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Ud over de ni cifre, så anvender man potenser af 10:

¹ Artiklen er tidligere udgivet i LMFK-bladet.

十	百	千	万
10	10 ²	10 ³	10 ⁴

Tallet 1.024 blev skrevet ved brug af både cifrene og 10-potenserne:

一 千 二 十 四

Som det ses, så er tallet opbygget ved skrifttegnene 1 – 1.000 – 2 – 10 – 4. Bemærk, at man ikke anvender et tegn for nul, idet pladsen blot udelades. Der findes dokumenter, hvor man anvender 10-potenser med negativ eksponent.

Kvadratrod

Vi vil bestemme kvadratrod, K , af 395.641. Da

$$600^2 = 360.000 < 395.641 < 490.000 = 700^2$$

ved vi, at $600 < K < 700$. Det vil sige, at antallet af cifre i K er tre. Med andre ord, så er

$$K = 100a + 10b + c,$$

hvor $a, b, c \in \{0, 1, 2, 3, \dots, 9\}$ og $a \neq 0$. Vi kan af ovenstående slutte, at $a = 6$. Det vil sige, at

$$K = 600 + 10b + c.$$

Lad os udregne kvadratet på K :

$$\begin{aligned} K^2 &= (600 + 10b + c)^2 \\ &= 360.000 + 12.000b + 1.200c + 100b^2 + 20bc + c^2. \end{aligned}$$

Dermed får vi ligningen

$$\begin{aligned} 360.000 + 12.000b + 1.200c + 100b^2 + 20bc + c^2 \\ = 395.641 \end{aligned}$$

eller

$$1.200 \cdot (10b + c) + (10b + c)^2 = 35.641.$$

I første omgang ser vi bort fra $(10b + c)^2$ og c i den første parentes. Vi vil nu bestemme b , som det største hele tal så $12.000b \leq 35.641$.

Ved division finder vi, at $b \leq 2,97$. Det vil sige, at $b = 2$. Indsættes i ligningen ovenfor, får vi

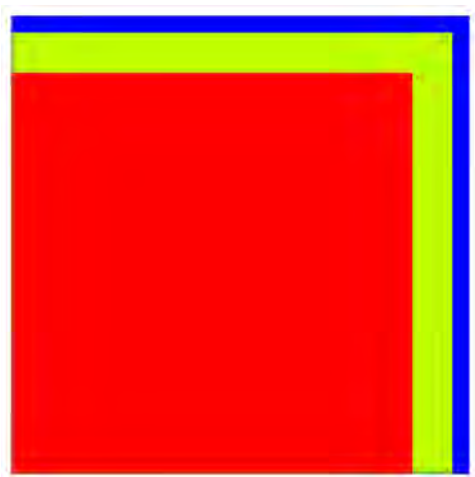
$$1.200 \cdot (20 + c) + (20 + c)^2 = 35.641$$

eller

$$c^2 + 1.240c = 11.241.1$$

Da 9 er løsning til andengradsligningen, er $c = 9$. (Der er en løsning mere, nemlig -1.249).

Kvadratroden af 395.641 bliver $K = 629$.



Figur 2. Processen med at beregne kvadratroden er illustreret ved at udfylde et kvadrat (se tekst).

Ideen

Ideen med processen er at udfylde et kvadrat med et areal svarende til radikanden, som i eksemplet er 395.641. Vi betegner roden med cifre $K = c_1c_2c_3 = 100 \cdot c_1 + 10 \cdot c_2 + c_3$.

- Først bestemmes det røde kvadrat, hvis sidelængde netop er $100 \cdot c_1$. Arealet er $10.000 \cdot c_1^2$.
- Dernæst den gulgrønne polygon og dermed c_2 , som har arealet $2.000 \cdot c_1 \cdot c_2 + 100 \cdot c_2^2$
- Til sidst bestemmes c_3 ved den blå polygon, som har arealet $2 \cdot (100 \cdot c_1 + 10 \cdot c_2) \cdot c_3 + c_3^2$.

Ikke kvadrattal

Spørgsmålet er naturligvis, om proceduren også virker, hvis vi ikke har et kvadrattal. Lad os for eksempel bestemme kvadratroden af 21. Lommeregneren giver resultatet $\sqrt{21} \sim 4,582576$.

Da $4^2 = 16 < 21 < 25 = 5^2$ kan vi i første omgang sætte $K = a + \frac{b}{10}$. Af det foregående kan vi umiddelbart konkludere, at $a = 4$. Vi ønsker at bestemme b , så

$$\left(4 + \frac{b}{10}\right)^2 \leq 21$$

Udregnes parentesen fås uligheden

$$16 + \frac{8}{10}b + \frac{1}{100}b^2 \leq 21$$

eller

$$80b + b^2 \leq 500.$$

Det største positive heltal (ciffer), som opfylder uligheden er $b = 5$. Vi kan derfor konkludere at $b = 5$. Vi har foreløbig at $K = 4,5$ og da $K^2 = 4,5^2 = 20,25 \neq 21$ fortsætter vi jagten på flere decimaler.

Vi sætter $K = \frac{9}{2} + \frac{c}{100}$, og vi ønsker nu at bestemme c således at

$$\left(\frac{9}{2} + \frac{c}{100}\right)^2 \leq 25$$

Som før udregnes parentesen, og uligheden bliver

$$\frac{81}{4} + \frac{9}{100}c + \frac{1}{10.000}c^2 \leq 25.$$

Vi får først ved reduktion, at

$$3600c + c^2 \leq 30.000$$

Det største hele tal (ciffer), som opfylder uligheden, er 8. Vi sætter dermed $c = 8$ og har nu $K = 4,58$. Da $K^2 = 4,58^2 = 20,9764$ fortsætter jagten på decimaler. Lad nu $K = 4,58 + \frac{d}{1000}$. Vi ønsker at bestemme d , så

$$\left(4,58 + \frac{d}{1000}\right)^2 \leq 21$$

Samme procedure som ovenfor giver løsningen $d = 2$. Dermed har vi, at $K = 4,582$, hvor $K^2 = 4,582^2 \sim 20,99472$.

Lad os slutte med at finde fjerde decimal. Vi sætter $K = 4,582 + \frac{e}{10000}$. I lighed med de foregående decimaler, ønsker vi at bestemme e , således at

$$\left(4,582 + \frac{e}{10000}\right)^2 \leq 21$$

Proceduren giver, at $e = 5$ har vi $K = 4,5825$.

Tællestave og -bræt

Kineserne har naturligvis ikke lavet beregningerne på papir, men har anvendt tællestavene sammen med et tilhørende tællebræt, som vist på figur 3. Den øverste række i tabellen består af forskellige potenser af 10. I felterne under placeres tællestavene i henhold til positionsværdien. For at kunne det, må proceduren omformes til en algoritme, der kan anvendes med tællestavene.

Den første observation, man må gøre, er at bestemme en sammenhæng mellem antal cifre i radikanden og antal cifre i kvadratroden.

- Hvis radikanden har et eller to cifre, så har kvadratroden ét ciffer.
- Hvis radikanden har tre eller fire cifre, så har kvadratroden to cifre.
- Hvis radikanden har fem eller seks cifre, så har kvadratroden tre cifre.
- Osv.



Figur 3. Kinesisk tællebræt [3].

Algoritme

Som eksempel vil vi bestemme kvadratroden af 817. Vi samler cifrene i radikanden to og to, jævnfør observationen ovenfor. Det vil sige 08 og 17. Da vi har to grupper består kvadratroden af to cifre.

		100	10	1	1/10	1/100
Kvadratrod	**					
Radikand	817					

Det største kvadrattal mindre end eller lig 08 er $4 = 2^2$. Dermed er det første ciffer i kvadratroden 2. Vi indsætter 2 på pladsen for 10'erne i rækken for kvadratrod.

Dernæst trækkes kvadratet $4 = 2^2$ fra radikanden. Da 2 er en 10'er, så er 4 en 100'er.

		100	10	1	1/10	1/100
Kvadratrod	2-					
Radikand	817					
$20^2 = 400$						
Differens	417					

For at bestemme næste ciffer udføres følgende mellemregning på et hjælpebræt:

Vi tager det dobbelte af den kvadratrod, vi har bestemt, og opstiller uligheden, hvor vi skal bestemme det største tal, der kan stå på den ledige plads (*), så

$$(4*) \cdot * \leq 417.$$

Da $(40 + 8) \cdot 8 = 384$ og $(40 + 9) \cdot 9 = 441$ er næste ciffer 8:

		100	10	1	1/10	1/100
Kvadratrod	28					
Radikand	817					
$20^2 = 400$						
Differens	417					
$40 \cdot 8 + 8^2 = 384$						
Differens	33					

For at bestemme næste ciffer tilføjer vi 00 til vores differens, hvert ciffer i kvadratroden svarer til to cifre i radikanden. Vi har således 3300. Det dobbelte af vores kvadratrod er $2 \cdot 28 = 56$. Det næste ciffer bestemmes ved uligheden

$$(56*) \cdot * \leq 3300.$$

Da $(560 + 5) \cdot 5 = 2825$ og $(560 + 6) \cdot 6 = 3396$ er næste ciffer 5.

		100	10	1	1/10	1/100
Kvadratrod	28,5					
Radikand	817					
$20^2 = 400$						
Differens	417					
$40 \cdot 8 + 64 = 384$						
Differens	33					
$(560 + 5) \cdot 5 = 2825$						
Differens	475					

Igen gennemføres vores mellemregning. Det dobbelte af 285 er 570, og vi skal nu løse

$$(570*) \cdot * \leq 47.500.$$

Da $(5700 + 8) \cdot 8 = 45.664$ og $(5700 + 9) \cdot 9 = 51.381$ er næste ciffer 8.

		100	10	1	1/10	1/100
Kvadratrod	28,58					
Radikand	817					
$20^2 = 400$						
Differens	417					
$40 \cdot 8 + 64 = 384$						
Differens	33					
$565 \cdot 5 = 2825$						
Differens	475					

Dermed er kvadratroden af 817 med to decimaler 28,58. Proceduren kan fortsættes, indtil vi synes, at der er decimaler nok.

En moderne lommeregner giver med to decimaler, at $\sqrt{817} \sim 28,58$.

Kubikrod

Lad os bestemme kubikroden af 1.860.867. Princippet er det samme, som blev anvendt ved kvadratroden, men i 3D. Det vil sige, at vi har en terning, som skal udfyldes.

		10^6	10^5	10^4	10^3	100	10	1
Kubikrod								
Radikand	1.860.867							

Vi inddeler radikanden i grupper af tre cifre. Vi har dermed tre grupper, nemlig 001, 860 og 867. Dette betyder også, at kubikroden har tre cifre. Det største kubiktal mindre end eller lig med 001 er $1^3 = 1$. Det vil sige, at første ciffer i kubikroden er 1:

		10^6	10^5	10^4	10^3	100	10	1
Kubikrod								
Radikand	1.860.867							
1^3								
Differens								

For at bestemme næste ciffer udregnes først

$$3 \cdot 12 = 3 \text{ og } 3 \cdot 1 = 3,$$

hvor 1-tallet er kubikrodens første ciffer. Dernæst skal vi bestemme, hvilket ciffer, der skal stå på – for at løse uligheden:

$$(3 \cdot 100 + (3*) \cdot *) \cdot * \leq 860, ,$$

hvor det første 3-tal stammer fra $3 \cdot 12$ og det andet 3-tal stammer fra $3 \cdot 1$. Første gæt er 2, da

$$\frac{860}{300} = \frac{43}{15} \sim 2,866667.$$

Indsættes 2 fås

$$(300 + 32 \cdot 2) \cdot 2 = 728.$$

Indsættes 3 i stedet fås

$$(300 + 33 \cdot 3) \cdot 3 = 1197,$$

som er for stort. Andet ciffer er derfor 2.

		10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	100	10	1
Kubikrod						I	II	
Radikand	1.860.867	I	III	T		III	T	TT
	1 ³ = 3	I						
Differens			III	T		III	T	TT
	(300 + 32 · 2) · 2 = 728		II	III				
Differens	132.867		I	III	II	III	T	TT

Differensen er 132.867. Vi gennemfører vores beregning igen:

$$3 \cdot 12^2 = 432 \text{ og } 3 \cdot 12 = 36,$$

Vi skal – som før – bestemme hvilket ciffer, der skal stå på * i uligheden

$$[43.200 + (36 * *)] \cdot * \leq 132.867.$$

Vores gæt er 3, da

$$\frac{132.867}{43.200} = \frac{4.921}{1.600} \sim 3,075625.$$

Indsættes 3 i ulighedens venstre side fås

$$[43.200 + (363 \cdot 3)] \cdot 3 = 132.867..$$

Da udtrykket netop er lig ulighedens højre side, er 3 det sidste ciffer.

		10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	100	10	1
Kubikrod						I	II	III
Radikand	1.860.867	I	III	T		III	T	TT
	1 ³	I						
Differens			III	T		III	T	TT
	728		II	III				
Differens			I	III	II	III	T	TT
	132.867		I	III	II	III	T	TT
Differens								

Litteratur

- [1] www.dam.brown.edu/people/mumford/blog/2015/Pythagoras.html
- [2] De kinesiske tegn for tallene er hentet fra [en.wikibooks.org/wiki/Chinese_\(Mandarin\)/Numbers](http://en.wikibooks.org/wiki/Chinese_(Mandarin)/Numbers)
- [3] Billedet er lånt fra A. Volkov og V. Freiman (2018) "Computations and Computing Devices in Mathematics Education Before the Advent of Electronic Calculators", Springer, ISBN 978-3-319-73394-4.



Peer Jespersen er kandidat i matematik og datalogi fra Aarhus Universitet (1979) og har undervist på erhvervsakademier, ingeniørhøjskoler og gymnasier samt arbejdet i den private sektor. I dag er han pensionist med interesse for historisk matematik. Han er forfatter til "Elementer af matematikkens historier" (udkommer på LMFK-forlaget) og er ved at færdiggøre "Den græske matematik". Han undersøger nu kinesisk matematik.

Landskoordinaterne

Leif Kahl Kristensen

Geo-metri eller jord-måling blev udviklet i Ægypten til at afsætte skel efter oversvømmelserne og beregne arealer som beskatningsgrundlag. Ved stavnsbåndets ophævelse blev disse problemer aktuelle her i landet, og det vises hvordan de løses i dag. Det illustreres, at folk med indflydelse ikke altid har indsigt, men gør tingene unødvendigt besværlige og kostbare.

Gradmålingen

Den Danske Gradmåling gav vigtige bidrag til bestemmelsen af Jordens størrelse. Den blev oprettet 1816 af H.C. Schumacher, som var direktør for Observatoriet

på Rundetaarn. Han havde fået fondsbevilling til at lave to trianguleringskæder: en fra Elben til Skagen og en fra København til vestkysten. De blev markeret med postamenter (figur 1). Efterhånden blev de bredt over

hele landet. Schumacher havde endvidere foreslået C. F. Gauss at føre sine trianguleringer fra Göttingen til Elben. Udjævnningen, der gav punkternes geografiske bredde og længde regnet fra Rundetaarn ($12^{\circ}34'40''$ øst), blev først afsluttet 1878 af C.C.G. Andræ [1]. Vinklerne blev genmålt flere gange – sidst mellem 1978-92 [2]. Da General Staben overtog kortlægningen af topografiske kort blev postamenterne brugt som førsteordens punkter for forskellige projektioner.



Figur 1. Postament for førsteordens punkter af granit ved Kongsbjerg / Lisbjerg nær Aarhus. Den synlige del rager ca. 1 m op over jordoverfladen og er forsynet med fredningsplade. Den underjordiske del er nedstøbt i et betonfundament på 1 m^3 . Stationscentret er afmærket ved et hul i en messingbolt nedfæstet i stenens top. Foto: Wikipedia.

System 1934

Siden dannelsen af “Praktiserende Landinspektørers Forening” (PLF) i 1870 var det deres ønske at få et tæt net af anden- og tredjeordens fikspunkter til lokale målinger. Med indførelsen af stålband og teodolit var nøjagtigheden også blevet stærkt forøget. En L meter lang linje kunne nu måles med en middelfejl på $0,0020 \cdot \sqrt{L(\text{m})}$. For $L = 25 \text{ m}$ – typisk for de utallige elementer lokale målinger består af – fås middelfejlen 1,0 cm. Ønsket blev først opfyldt efter dannelsen af Geodætisk Institut under professor N.E. Nørlund, som deltog i trianguleringen omkring Baltikum og ville forenkle beregningerne i kortplanen. Det var sædvane at bruge Legendres teorem, som reducerede vinklerne i en sfærisk trekant med en tredjedel af den sfæriske exces², og tilnærmede en konform (vinkeltro) afbildning i planen. Meridianen $2^{\circ}12'$ vest for Rundetaarn var brugt af General Staben til en konform kegleprojektion (Lambert) som tangerede 56° nord og dannede grundlaget for hærkort i 1:20.000 og mindre. Forvanskningen kunne blive 1:3000 og var for meget for matriklen og tekniske kort.

Landet blev derfor af Store Bælt delt i Jylland/Fyn og Sjælland, som fik hver sin “Transverse Mercator” (TM) projektion defineret ved retnings- og afstandskorrektionerne, som blev stærkt forenklet. Ellipsoiden blev erstattet med to Gauss kugler med radier bestemt på middelbredden af den internationale ellipsoide. Agri Bavnehøjs koordinater blev ansat til $X = Y = 200 \text{ km}$

²På en kugle er vinkelsummen i en trekant $180^{\circ} + \epsilon$, hvor ϵ (epsilon) betegnes “sfærisk exces”. Hvis R er kuglens radius er trekantens areal $\epsilon \cdot R^2$.

og retningen til Lysnet ansat til Andræs værdi. Dette “System 1934” (S34) blev grundlaget for anden- og tredjeordens punkterne i S34 (figur 2–3).



Figur 2. Andenordens fikspunkt i jordoverfladen over en nedsat betonblok. Knoppen under koordinatmærket giver højdekoten. Stationscentret er hullet i midten af kalotten. Fra Klitmøller. Foto: Wikipedia.



Figur 3. Tredjeordens fikspunkt centreret i bronzeplade i jordhøjde over nedsat betonblok. Stationscentret er centret af bronzepladen. Fra toppen af Jernhatten på Djursland. Foto: Wikipedia.

UTM og GPS

Omkring 1955 blev de topografiske kort – efter et ønske fra NATO – omlagt til “Universal Transverse Mercator” (UTM), der deler hele Jorden i 60 zoner på 6° , der nummereres mod øst. Det meste af Danmark ligger i zone 32, som strækker sig fra 6° til 12° øst for Greenwich, men ekstrapoleres ind i Sverige på danske kort. Centralmeridianen er 9° øst. S34 blev transformeret til UTM(ED50) ved potensrækker.

Da der var planer om at omlægge de 16.000 matrikelkort på papir til et digitalt matrikelkort var PLF igen aktiv for at få forbedringer af fikspunkterne udliciteret til medlemmerne [3]. Fikspunkterne i S34 blev forbedret i perioden 1978–92 [2] og kortene blev digitaliseret

i 1990–97. Med brugen af GPS blev fikspunkterne forbedret til UTM(EUREF89). For Jylland/Fyn er der 26.062 punkter som forbindes med polynomier af 13. grad ved mindste kvadrater. Der er 210 frie parametre og standardafvigelsen er 1,6 cm. S34 blev redefineret ved denne procedure og brugt til transformation af 13 millioner skelpunkter. Hvert af disse 210 led ændrer retnings- og afstandskorrekktionerne, så systemet kan ikke bruges over større afstande. De gør også beregningerne længere – det ville have været lettere at bruge retningen og afstanden til Mekka som nye koordinater.

Det digitale matrikelkort

Allerede ved oprettelsen af “Kort og Matrikel Styrelsen” (KMS) i 1989 var det på tale at digitalisere matrikelkortene. I “Rådet for Danmarks Geografiske Referencenet” (Rådet) var valget af kortprojektion et vigtigt emne. Der synes tre muligheder: 1) Det redefinerede S34, som kun afveg 1–2 cm fra originalen. 2) UTM som krævede afstandskorrekktioner på op til 40 cm/km og 3) en ny “Kortprojektion 2000” (Kp2000) med meridianerne 9,5° og 12,0° øst. Her er forvanskningen mindre end 5 cm/km, men TM kræver radikale omlægninger, da nulpunktet flyttes til ækvator. De forskellige brancher havde forskellige præferencer: Statsinstitutioner og amter med trafik til lands, søs og luften, lande grænser, miljø og militær som område valgte UTM. Kommuner, landinspektører, entreprenører og især ledningsejerne, som arbejder med de mange lokale data, var skeptiske. Først da KMS lovede ledningsejerne at transformere frem og tilbage mellem UTM og S34, enes man om UTM. Jeg havde nogle andre forslag, men referaterne fra Rådets møder viser, at de aldrig blev realitetsbehandlet [4].

Forbedring af S34

Ca. 60 førsteordens punkter transformeres fra UTM-koordinaterne N og E til landskoordinaterne X og Y konformt ved komplekse funktioner. Definer:

$$z = (62,35 - N) + i \cdot (E - 5,30) \quad (1)$$

hvor $i = \sqrt{-1}$ og alle enheder er 100 km, så 5. decimal er meter:

$$\begin{aligned} -Y - iX = & (-2,03577102 - i2,65216685) \quad (2) \\ & + (+1,00014333 - i0,02000296) \cdot z \\ & + (+0,00000075 + i0,00003708) \cdot z^2 \\ & + (+0,00000003 + i0,00000082) \cdot z^3 \end{aligned}$$

Ovenstående 8 koefficienter [5, side 56] er elementer i en mindste kvadraters udjævning af førsteordens punkterne, som hver giver to uafhængige lineære iagttagelsesligninger. Middelfejlen bliver ca. 20 cm og kan forklares ved observationsfejlene i 1934. Det konstante led giver udviklingspunktets tilnærmede koordinater: $X = 265.217$ m, $Y = 203.577$ m. Meridianen i S34 er $12^\circ 34' 40'' - 2^\circ 12' = 10,38^\circ$ og for UTM $9,00^\circ$ øst for Greenwich. I kortplanen giver det en drejning: $(10,38 - 9,00) \cdot \sin 56^\circ = 1,144^\circ = 0,020$ rad, som er andet led ovenfor. Tredje og fjerde led giver rækkeudviklingen af

denne drejning. En forskydning og drejning på grund af pladetektonik tager de to første led sig også af – en deformation derimod ikke, men den bidrager til middelfejlen. Lad B betegne afstanden til en linje med retningsvinkel A :

$$X \cdot \sin A - Y \cdot \cos A - C = B. \quad (3)$$

Området $B > 0$ definerer en halvplan, som vi nu antager skubbet en konstant værdi B på grund af et brud i de tektoniske plader. Det ændrer postamentets komplekse koordinater til:

$$(X - B \cdot \sin A) + i(Y - B \cdot \cos A) \quad (4)$$

Medtages denne betingelse i udjævningen og løses for B bliver middelfejlen altid mindre. Hvis vi erstatter B med $\mu \cdot B$ fås en affinitet, som ofte bruges til at korrigere papirkorts krympning.

De 26.062 anden- og tredjeordens punkter burde udjævnes for sig i en stor samlet udjævning baseret på de utallige målinger af korte afstande i marken med fejl på 1–2 cm niveau. Fejlphobningen vil give lokale drejninger, som imidlertid modelleres af formlen. I princippet kunne aflæsningerne af de utallige målinger med stålband tilpasses, så residuerne blev eksakt 0, men i praksis er det tilstrækkeligt de er 1–2 cm. Tilføjelsen af nye variable vil altid reducere middelfejlen og bestemme dem, hvis de er mærkbare. Det vil give nye værdier for de 8 koefficienter og reducere middelfejlen til ovennævnte 1,6 cm. Vi vil imidlertid redefinere S34 ud fra UTM(EUREF89) ved formel (2). S34 er kun defineret i Danmark og har X i intervallet 175–475 km. Forvekslinger kan undgås ved i det nye system at erstatte X med $1000 - X$, som regnes positiv mod øst og bliver et højre-system.

Lokale målinger

Med centralpunktet nær Silkeborg er Jylland/Fyn dækket af Taylorrækken til yderområderne i Skagen og Langeland, hvor $z = 1,65$. Her giver det kvadratiske led et bidrag til X på $1,65^2 \cdot 3,708 = 10$ m, som ikke kan ignoreres. Vi udvikler derfor i potenser af $z + dz$, hvor dz ligger indenfor en cirkel med radius 2 km. De kvadratiske led bliver derfor $3,708 \cdot 0,02^2 = 1,5$ mm og $3 \cdot z \cdot 0,02^2 = 2,0$ mm. Hvis fikspunkterne er jævnt fordelt skulle der være omkring 15–20 indenfor 2 km – rigeligt til lokalt at regne lineært.

Det Digitale Matrikelkort indeholder omkring 13 millioner skelpunkter svarende til omkring 130.000 i hver kommune og her er de simple lineære regninger en stor fordel. Et lokalt system indordnes i landssystemet ved at måle mindst 3–4 fikspunkter. Udjævningen sker ved at danne tyngdepunktet med vægt omvendt proportionalt med kvadratet på middelfejlen. Så findes retning og afstand fra tyngdepunktet til de enkelte punkter som vægtes yderligere med kvadratet på afstanden. Herefter midles korrekktionerne til retning og målestok.

En stor fordel ved de små korrekktioner er, at fejl straks springer i øjnene. Et vist ikke helt fiktivt eksempel er: Der skal lægges en jernbane til en lufthavn. De store afstande kræver planlægning i Kp2000, men omregnes

til S34 for at se bygninger og anden infrastruktur på linjen. Lufthavnen bruger imidlertid lokale koordinater fra før revisionen. Skinner og perron passer derfor ikke sammen og det opdages først efter arbejdet påbegyndes. Den slags problemer løses vistnok i Højesteret.

Konklusion

KMS vedtog at redefinere S34 ved potensrækker af 13. grad og 210 led, som hvert ændrede retnings- og afstandskorrekktionerne, så S34 ikke kan bruges over længere afstande. Referaterne fra debatten i "Rådet for Danmarks Geografiske Referencenet" viser, at mine forslag om at forbedre S34 med små korrekktioner ikke blev behandlet. De kunne have sparet samfundet for meget besvær og kostbare omlægninger [6]. Der argumenteres kraftigt mod at indføre for mange systemer, men ironisk nok indfører KMS DKTm kort tid efter med centralmeridianerne 9° og 10° overlappende systemer, der gør Jylland/Fyn ret kaotisk.

Litteratur

- [1] L.K. Kristensen (2004) "Retvinklede koordinaters historie", *Landinspektøren*, Nr. 1, side 34–42.

- [2] O. Jacobi (2008) "Skal System 34 pensioneres?", *Landinspektøren*, Nr. 1, side 10–13.
- [3] A.S. Kristensen (2006) "Historien om det digitale matrikelkort (1989-93)", *Landinspektøren*, Nr. 2, side 82–87.
- [4] L.K. Kristensen (2006) "Overgangen fra S34 til EU-REF89", *Landinspektøren*, Nr. 2, side 71–74.
- [5] L.K. Kristensen (2021) "Hvilke kortprojektioner bruges i dag?", *Trafik & Veje*, April, side 54–56.
- [6] A.S. Kristensen (2004) "Fremtidens reference systemer (debat)", *Landinspektøren*, Nr. 1, side 43–46.



Leif Kahl Kristensen er mag.scient. og lektor emeritus fra Aarhus Universitet og var i 1961 den første kandidat i teoretisk fysik fra Det fysiske Institut. Arbejdede i en årrække med almindelig relativitetsteori og bidrog til Astronomischen Rechen-Instituts (Heidelberg) forbedring af fiksstjerne positioner. Det har mange ligheder med geodæsi.

Overfladespænding – breddeopgave 112 og 113 med didaktiske kommentarer

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

Her bringes løsninger og kommentarer til opgaverne fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaverne i sidste nummer af Kvant var disse breddeopgaver (nr. 112 og 113 her i Kvant):



Figur 1. Appelsiner og citroner. Foto: Wikimedia Commons.

Breddeopgave 112 og 113. Overfladespænding

En vanddråbe svinger imellem at være appelsinformet

og citronformet (figur 1). Hvordan afhænger svingningstiden af dråbens størrelse? Begrund svaret.

Ved elektrostatisk maling sprøjtes små dråber maling påført elektriske ladninger mod det jordede metalelement, der skal males. For meget påført ladning på en dråbe fører til, at den eksploderer. Hvordan afhænger den maksimale ladning, en dråbe kan eksistere med uden at eksplodere, af dråbens størrelse? Begrund svaret.

Løsninger

1. Når den svingende vanddråbe er appelsinformet, eller når den er citronformet, er dens potentielle energi øget i forhold til, når den er kugleformet. Til gengæld har den, til forskel fra, hvis den ikke svingede, kinetisk energi, når den er kugleformet. Den svingende regndråbes øgede energi svinger mellem at være potentiel energi i de to yderformer og kinetisk energi, når dråben er kugleformet. Da den potentielle energi afhænger af vandets overfladespænding γ , og den kinetiske energi afhænger af vandets densitet ρ , må svingningstiden τ derfor være en funktion af γ og ρ , udover af dråbens radius r . Idet vi regner vandet for usammentrykkeligt, er det svært at komme i tanke om andre styrende

inputparametre. Formlen for τ må da findes blandt:

$$\tau = k \cdot \gamma^\alpha \cdot \rho^\beta \cdot r^\delta, \quad (5)$$

hvor k er dimensionsløs, og α, β og δ skal sikre, at begge sider af lighedstegnet har dimensionen tid (T). Da γ er en kraft per længde, har vi $[\gamma] = \text{MT}^{-2}$, og tidsdimensionen kræver da $\alpha = -\frac{1}{2}$. Med $\beta = \frac{1}{2}$ elimineres massedimensionen. Endelig forsvinder længdedimensionen med $\delta = \frac{3}{2}$. Den søgte formel kan således indkredses til at have udseendet:

$$\tau = k \cdot \sqrt{r^3 \rho / \gamma}. \quad (6)$$

Parameteren k kan i princippet, udover slet og ret at være et tal, være en dimensionsløs funktion af et dimensionsløst potensprodukt af r, γ og ρ , hvis et sådant findes. I det tilfælde ville opgaven ikke kunne besvares ved dimensionsanalyse. Men r, γ og ρ lader sig ikke kombinere til en dimensionsløs størrelse. Derfor er k blot et ukendt tal, og svaret på opgaven er således, at vanddråbens svingningstid afhænger af dens radius i potensen $3/2$.

2. Det er overfladespændingen γ , der holder en dråbe maling sammen, før den eksploderer. Påføres dråben ladningen q , vil det ifølge Coulombs lov få dens dele til at frastøde hinanden proportionalt med q^2/ϵ_0 , hvor ϵ_0 er dielektricitetskonstanten i vakuum. Grænsen q_{maks} , hvor frastødningen får overfladen til at bryde, er derfor, udover af dråbens størrelse r , bestemt af γ og ϵ_0 . Vi søger derfor en ukendt formel blandt:

$$q_{maks} = k \cdot \gamma^\alpha \cdot \epsilon_0^\beta \cdot r^\delta. \quad (7)$$

Vi vil benytte længde L , tid T , masse M og ladning Q som indbyrdes uafhængige basisdimensioner. Af Coulombs lov ses $M L T^{-2} [\epsilon_0] = Q^2 L^{-2}$ og heraf $[\epsilon_0] = M^{-1} L^{-3} T^2 Q^2$. Da $[\gamma] = M T^{-2}$ fås heraf $[\gamma \epsilon_0] = L^{-3} Q^2$ og $[\gamma \epsilon_0 r^3] = Q^2$. Da ϵ_0, γ og r ikke kan kombineres til en dimensionsløs størrelse, ses derfor, at den ukendte søgte formel for q_{maks} , bortset fra den ukendte talværdi for k , af dimensionsgrunde må være:

$$q_{maks} = k \cdot \sqrt{\epsilon_0 \gamma r^3}. \quad (8)$$

Som svar på opgaven afhænger q_{maks} for dråben af maling, ligesom τ for vanddråben, af dråbens radius i potensen $3/2$.

Kommentarer

1. Det oprindelige Breddekursus i fysik på RUC går nu under navnet Problem Solving in Physics. Dels fordi undervisningen er skiftet til at foregå på engelsk. Dels for at betone det kompetencerettede formål med kurset, som vi lidt flot annoncerer som at lære de studerende at tænke som fysikere. Derfor er samlingen af tidligere eksamensopgaver det primære fokus, medens lærebog og noter fungerer supplerende. Men det er stadig, udover at lære de studerende at tænke som fysikere, også et formål at lære dem fysik i bredden. Vi har således tidligere inkluderet lidt om overfladespænding i pensum af hensyn til emnets betydning for nanofysik og biofysik.

2. Dimensionsanalyse kan bruges til kontrol af matematisk, analytisk udledte fysiske formler. Eller som metaanalyse af, hvilket udfaldsrum ukendte formler er begrænset til at falde i, hvis/når de lader sig udlede matematisk, analytisk.

For at vælge de inputvariable, som outputvariablen i en formel må afhænge af, fx γ, ρ og r som bestemmende for τ , og fx γ, ϵ_0 og r som bestemmende for q_{maks} , er det udover fysisk intuition vigtigt at kunne skelne imellem variable og parametre i de matematiske analytiske udregninger, hvis udfaldsrum, man vil finde ved dimensionsanalyse. Ved de normale matematisk-fysiske udregninger afhænger facit kun af de indgående parametre, ikke af benyttede variable undervejs. For at foretage metaanalysen, må vi derfor forestille os hvilke parametre, der er i spil i de ukendte matematisk-fysiske udregninger, som metaanalysen er meta i forhold til. Blandt parametrene skal medtages de naturkonstanter, der indgår i problemet, jf. ϵ_0 . Dimensionerne af de indgående fysiske størrelser og hvilke naturkonstanter, der skal indgå, afhænger af, hvilket system af basisstørrelser, der vælges som grundlag for de matematisk-fysiske udregninger.

3. Jeg kender ikke til matematisk-analytiske løsninger til de to opgaver og er umiddelbart kun i stand til at løse dem dimensionsanalytisk som anført.

Jeg går ud fra, at der i litteraturen findes matematisk-analytiske udregninger af vanddråbers egen-svingninger med forskellige svingningstider svarende til forskellige talværdier af k i ligning (2). Dimensionsanalysen kan ikke levere værdien af k . Men den fortæller, at svingningstiderne for de forskellige egen-svingninger, med varierende værdier af k , alle må afhænge af r, ρ og γ som angivet i ligning (2).

Måske er problemet med den eksploderende dråbe maling, som skyldes Poul Winter Andersen, også behandlet matematisk-fysisk i litteraturen? For mig ser problemet umiddelbart svært ud at løse matematisk-fysisk. Kvalitativt er der mikroskopisk tale om, at overfladespænding skyldes, at molekylerne i overfladen trækkes indad i dråben på grund af de asymmetrisk fordelte Coulombkræfter på overflademolekylerne fra de omgivende molekyler. Eksplosionen sker så, når frastødningen på overflademolekylerne fra den tilførte overskudsladning på alle dråbens molekyler overstiger denne tiltrækning. Ved løsningen vil dielektricitetskonstanten ϵ i maling skulle indgå i stedet for ϵ_0 , dielektricitetskonstanten i vakuum. Så længe vi kan regne de to dielektricitetskonstanter for proportionale, spiller det ikke nogen rolle for udseendet af ligning (4), da det blot vil føre til en justeret værdi af k .

Breddeopgave 114. Minigolf

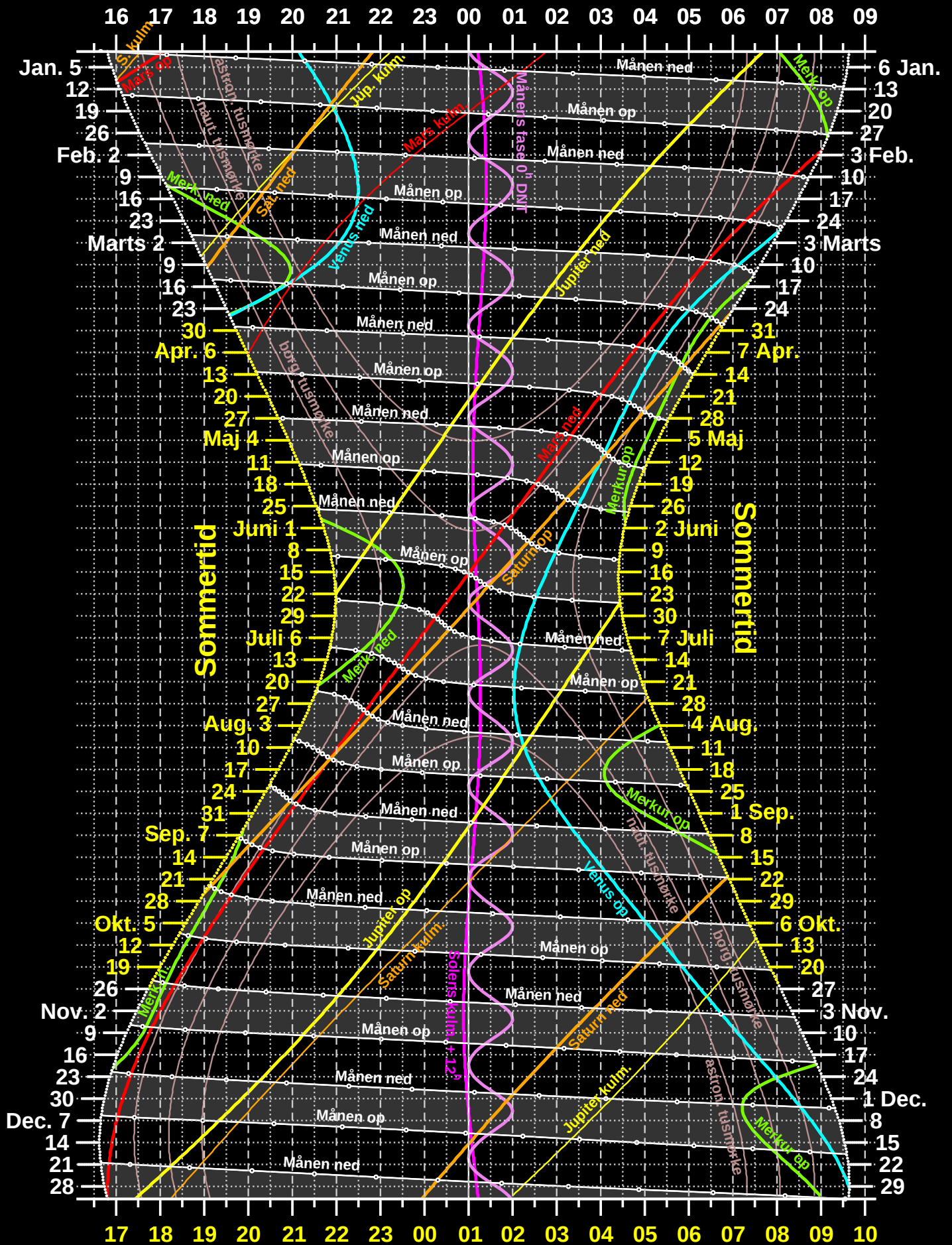
Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekursen på RUC (fra eksamen august 2013, nr. 114 i rækken her i Kvant):

Hvor stor en fart skal en minigolfkugle, der ruller hen imod et lodret loop, mindst have for at rulle rundt i loopet uden at falde ned? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Planetkalender for København 2025

Dansk Normaltid



Aktuelle bøger

Finn Berg Rasmussen, KVANT

200 år med Selskabet for Naturlærens Udbredelse



Cecilie M.K. Pedersen, Charlotte Koldbye, Anja C. Andersen, Martin Bech, Hans Buhl, Henning Haack, Erik Høg, Anja Skaar Jacobsen, Mogens Høgh Jensen, Helge Kragh, Poul R. Kruse, Rosa Nan Leunbach, Gregers Mogensen, Kristian Hvidtfelt Nielsen, Anita Kildebæk Nielsen, Dorte Olesen, Jens Olaf Pepke Pedersen, Annette Buhl Sørensen og Laila Zwisler, "Naturvidenskabens ildsjæle", 2024, Nord Academic / Gads Forlag, 304 sider, 299,95 kr.

SNU – Selskabet for Naturlærens Udbredelse – blev stiftet af H.C. Ørsted i 1824. Ved stiftelsen aftalte Ørsted med Prins Christian Frederik, den senere kong Christian 8., at denne ville være patron for selskabet, hvis formål var at åbne "en lettere Adgang til en af de ædleste Bestanddele af Menneskets Dannelse" og tillige "stræbe at befordre den for Fædrelandet saa vigtige Anvendelse af Naturlæren paa alle Erhvervsgrene".

Bortset fra Christian 9.s regeringstid har SNU indtil nu kunnet nyde kongelig protektion. Jubilæumsbogen er tilegnet Dronning Margrethe 2., som har været selskabets protektor igennem 52 år. Efter det nylige tronskifte har Kongehuset imidlertid meddelt, at protektoratet ikke vil blive fortsat.

Under rejser i 1810 havde Ørsted i Preussen og Frankrig set, hvordan naturvidenskab understøttede forskellige erhverv og industrier, og i England i 1824 fandt han stærk inspiration i den engelske Royal Institution, som både havde et uddannelsesmæssigt og almindennende formål. Dannelsesaspektet havde for Ørsted en religiøs betydning, idet man gennem naturlovene får indblik i de sande sider af Guds skaberværk.

I jubilæumsbogens kapitel 1 giver videnskabshistorikeren Kristian Hvidtfelt Nielsen et overblik over SNU's

historie gennem de 200 år med udviklingen i samfundet og naturvidenskaben som baggrund.



Figur 1. Maleriet "Industriens mænd" fra åbningen af det nyopførte Østre Elværk ved Trianglen på Østerbro blev bestilt af G.A. Hagemann, som var nyudnævnt direktør for Polyteknisk Lærestanstalt og medlem af SNU's direktion. Malet af P.S. Krøyer (1903–04). Illustration fra bogen.

Kapitel 2 resumerer de første hundrede år. I denne tid var der bl.a. en stærk kontakt mellem Ørsted/SNU og bryggerfamilien Jacobsen, resulterende både i bedre øl og i oprettelsen af Carlsberg Fondet. Henimod slutningen af 1800-tallet oplevede SNU åbenbart en vis tilbagegang. I året 1900 blev Martin Knudsen ny formand, og under hans ledelse blomstrede SNU igen op både i aktiviteter og medlemstal. I 1908 indstiftedes H.C. Ørstedmedaljen, i første omgang udelukkende i guld. Inden 1924 blev medaljen uddelt tre gange, sidste gang i 1916 til Martin Knudsen. Foruden de tre medaljemodtagere får Kirstine Meyer her en supplerende særartikel.

I de øvrige kapitler går der mere i detaljer indenfor kortere perioder: mellemkrigstiden, 2. verdenskrig, "efterkrigstiden" (indtil 1965), derefter mest 10 års perioder. Det er interessant at se, at mange fremragende forskere har påtaget sig formandskabet, mest prominent Niels Bohr, der var formand 1939–1962. Endnu mere interessant for undertegnede har det været at få kendskab til flere danske videnskabsmænd, der ellers højst var navne. Rammefortællingen i kapitlerne 2–9 er forfattet af Cecilie M.K. Pedersen og Charlotte Koldbye (det er ikke oplyst i bogen, men på forespørgsel bekræftet af SNU's præsident Anja C. Andersen).

Det er en dejlig bog. Stort format, næsten A4. Blankt, stærkt papir. Mange interessante illustrationer. Rammefortællingen er ledsaget af små, selvstændige fokusartikler om guldmedaljemodtagere, tidligere formænd eller særskilte emner, og disse sider er markeret med en raffineret farvetoning. Bogen er forsynet med en fortegnelse over SNU-direktionens medlemmer helt fra begyndelsen i 1824, præsentation af hver af de 19 forfattere, noter, kildelitteratur, billedliste og navneregister.

Nobelprisen i fysik 2024: Kunstige neurale netværk og ChatGPT

Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

Det kom som en stor overraskelse for de fleste fysikere, og også for Nobelprismodtagerne selv, at Nobelprisen i fysik i år gik til fysikeren John J. Hopfield og datalog og psykolog Geoffrey E. Hinton for deres ”grundlæggende opdagelser og opfindelser der gør det muligt at bruge maskinlæring med kunstige neurale netværk”. Flere fysikere havde svært ved at se, at kunstig intelligens og maskinlæring overhovedet havde noget med fysik at gøre, da de fleste vil mene, at det mere er teknologi eller computerscience. Nobelpriskomiteen begrundede valget med, at de har brugt metoder fra statistisk fysik til at udvikle de kunstige neurale netværk.



Figur 1. Nobelprismodtagerne 2024: John J. Hopfield (t.h.) og Geoffrey E. Hinton (t.v.).

John J. Hopfield er professor emeritus ved Princeton University i USA, og Geoffrey E. Hinton er professor emeritus fra University of Toronto i Canada. De har begge arbejdet med kunstige neurale netværk siden 1980'erne.

De neurale netværk, som de har skabt, bruges i dag i kunstig intelligens blandt andet i den populære sprogbot ChatGPT, eller når man fx søger efter bestemte personer i sine billeder i skyen.

Hopfield har bidraget med at skabe en hukommelse, der kan gemme og rekonstruere billeder og mønstre i data, og Hinton har skabt en metode, der kan finde egenskaber i data og udføre opgaver som fx at identificere bestemte dele af et billede.

Kunstig intelligens er maskinlæring, der bruger kunstige neurale netværk. Et kunstigt netværk processerer information ved at bruge hele netværksstrukturen. Det kunstige netværk var oprindeligt inspireret af vores hjernes neurale netværk. Men i et kunstigt netværk er hjernens neuroner repræsenteret af netværksknuder, der kan have forskellige værdier. Disse knuder påvirker hinanden gennem forbindelser, der kan blive forbundet til synapser, som kan blive gjort stærkere eller svagere.

Netværket bliver trænet ved fx at udvikle stærkere forbindelser mellem knuder med høje værdier.

Hopfields bidrag er et såkaldt Hopfieldnetværk, der kan gemme mønstre og genskabe dem igen. Når netværket får et input, som ikke er fuldstændigt, kan metoden finde det gemte mønster, der passer bedst til inputtet. Ligesom neuroner, der, når de samarbejder, kan muliggøre nye løsninger, som man ikke kan finde, når man kun kigger på de enkelte neuroner.

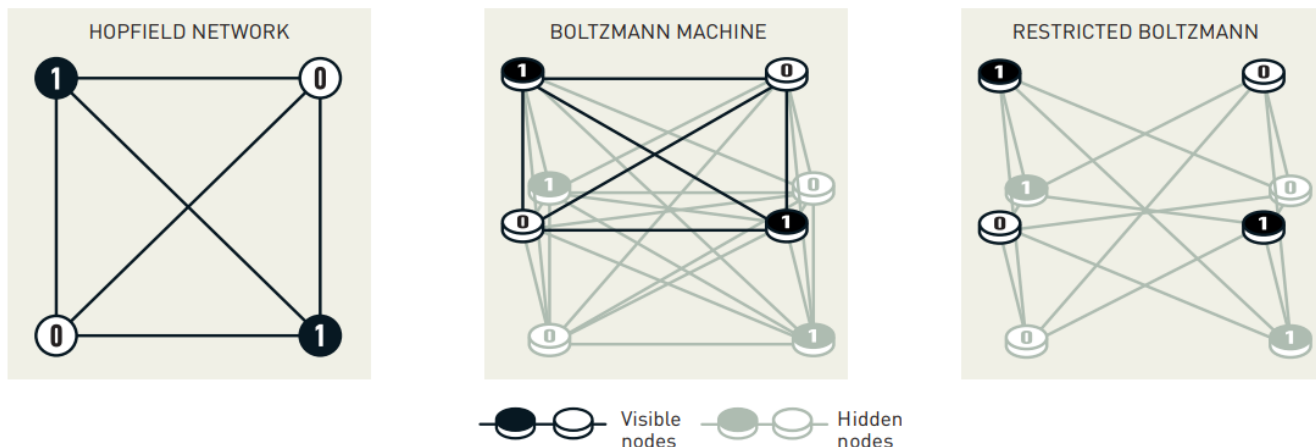
Hinton, som har studeret psykologi og kunstig intelligens, overvejede, om maskiner kunne lære at finde mønstre i information på samme måde, som et menneske kan. Sammen med en kollega startede han fra Hopfieldnetværket og udvidede det ved at bruge ideer fra statistisk fysik. Statistisk fysik beskriver systemer der, som neurale netværk, er sammensat af mange ens elementer, fx gasmolekyler, hvor de neurale netværk er sammensat af neuroner. Statistisk fysik ser på en gas som et kollektivt system fremfor at følge hvert enkelt molekyles bevægelse.

Mere præcist så brugte Hinton Boltzmannfordelingen til at beskrive et kunstigt neuralt netværk, som han kaldte Boltzmannmaskinen i 1985. Boltzmannfordelingen er en sandsynlighedsfordeling, som beskriver sandsynligheden for, at et system er i en bestemt tilstand fx sandsynligheden for, at en partikel i en gas har en bestemt energi ved en bestemt temperatur.

Boltzmannmaskinen lærer ved at få eksempler. Hvert muligt mønster, den finder, har en bestemt sandsynlighed, der er bestemt af netværkets energi ifølge Boltzmannfordelingen. Boltzmannmaskinen er en generativ model, dvs. det er en maskinlæringsmodel, der er designet til at lære og til at repræsentere den underliggende datafordeling, så den kan generere nye, realistiske data, som ligner dem, den var trænet på. Den fokuserer på at finde mønstre i træningsdata til at producere nye output, der tilhører samme område. Boltzmannmaskinen anvendes ofte som en del af et større netværk, fx til at anbefale film på Netflix ud fra brugerens tidligere sette film.

I dag er kunstige netværk ofte enorme og konstruerede af mange lag, som kaldes dybe, neurale netværk, og måden, de trænes på, kaldes ”deep learning”.

Da brugen af kunstig intelligens i dag er så populær, har Kvantredaktionen spurgt ChatGPT, hvad den mener om Nobelprisen. Det tog lidt tid at formulere spørgsmålet korrekt, først fortalte ChatGPT, hvad Nobelprisen i fysik 2024 blev givet for, og derefter hvad den selv ville synes om at få Nobelprisen. Svaret var, at “... det ville afspejle den voksende anerkendelse af AI's transformative potentiale på tværs af flere domæner [og desuden] ... ville tildeling af AI-skabere inden for de traditionelle videnskabspriser understrege deres rolle i



Figur 2. Figuren viser forskellige typer af netværk. I Hopfieldnetværket er alle knuderne forbundet til hinanden, og informationen sendes ind og læses fra alle knuderne. Hinton's Boltzmannmaskine er konstrueret i flere lag, hvor informationen sendes ind og læses ved at bruge et lag af synlige knuder, som er forbundet til et lag af skjulte knuder. Denne måde at behandle information på påvirker, hvordan netværket fungerer i sin helhed. I en begrænset Boltzmannmaskine er der ingen forbindelser mellem knuder i samme lag. Boltzmannmaskinerne bruges ofte efter hinanden i en lang kæde. Efter den første Boltzmannmaskine er trænet, bruges indholdet af de skjulte knuder til at træne den næste maskine osv.

at fremme beregningsvidenskab og muliggøre værktøjer, der tackler globale udfordringer”.

Vi blev derfor fristet til at høre mere om, hvorvidt ChatGPT ønsker at vinde Nobelprisen:

“Som AI har jeg ikke følelser eller ønsker, så jeg stræber ikke efter at vinde priser som Nobelprisen. Konceptet med at anerkende et system som mig – eller mere realistisk, mine menneskelige skabere – rejser imidlertid fascinerende spørgsmål om, hvordan samfundet værdsætter teknologisk innovation. Hvis et AI-system skulle “modtage” en Nobelpris, ville det repræsentere et dybtgående skift i, hvordan vi opfatter handlekraft og kreativitet. Æren ville i virkeligheden gå til de videnskabsmænd, ingeniører og udviklere, der designede, trænede og fortsætter med at forfine AI-teknologier. Anerkendelse af et sådant arbejde kunne understrege den tværfaglige indsats, der gjorde AI mulig, involverende fysik, datalogi, neurovidenskab og etik. Alligevel kan tildeling af en pris til en AI eller dens skabere invitere til debat om de etiske dimensioner af AI, herunder spørgsmål om kontrol, utilsigtede konsekvenser og samfundsmæssige konsekvenser. Det er et interessant filosofisk og kulturelt spørgsmål, men hvad mig angår, er jeg tilfreds med at hjælpe, informere og vække nysgerrighed!”

Da vi endelig kunne kommunikere som ønsket og direkte fik spurgt, om Nobelprisen ikke kunne være gået til fx astrofysik eller kvantefysik, fik vi at vide at:

“Dette fokus på kunstig intelligens demonstrerer Nobelkomiteens anerkendelse af, hvordan nye felter omformer ikke kun videnskaben, men også samfundet. Det er værd at tildele områder som astrofysik eller kvantefysik, som fortsat giver dybtgående indsigt i universet ... Nobelkomiteen søger dog ofte at fremhæve arbejde, der har haft en transformativ og målbar indvirkning på både det videnskabelige samfund og menneskeheden som helhed. I denne sammenhæng stemmer John Hopfields

og Geoffrey Hinton's bidrag til neurale netværk overens med Alfred Nobels vision om at gavne menneskeheden. I sidste ende understreger beslutningen et skift i, hvordan fysik krydser andre discipliner, såsom biologi, datalogi og endda filosofi. Det udvider forståelsen af, hvad der udgør en “fysik”-pris, hvilket afspejler den stadig mere indbyrdes forbundne natur af videnskabelig opdagelse. Både traditionelle og nye områder rummer uvurderlige bidrag, og valget af det ene mindsker ikke betydningen af det andet.”

Det lyder jo rigtig fint, og vi blev derfor nysgerrige på, om ChatGPT er blevet spurgt af Nobelpriskomiteen om, hvem der skulle have Nobelprisen i fysik i 2024. Det afviser den dog at have haft noget med at gøre.

Det bør nævnes, at ligesom fysik har været brugt til at udvikle værktøjerne til kunstig intelligens, har maskinlæring også været brugt indenfor fysik til at processere data, fx data, der blev brugt til at opdage Higgspartiklen i 2012 og til at reducere støj i målingerne af gravitationsbølger i 2015.

Selvom der er mange gode anvendelsesmuligheder af kunstig intelligens, mener Hinton, at vi også skal være opmærksom på de problemer, som teknologien kan medføre. Hinton var ansat både hos Google Brain og University of Toronto, men forlod jobbet hos Google sidste år pga. bekymringer ved de mange risici ved brugen af kunstig intelligens, og for at kunne ytre sig frit om dem. Han sammenligner brugen af kunstig intelligens med den industrielle revolution og siger, at den vil blive ved med at have en kæmpe indflydelse. Han nævner, at kunstig intelligens kan hjælpe fx i sundhedssystemet, men også kan få store negative konsekvenser, hvis teknologien kommer ud af kontrol. “I stedet for at overgå mennesker i fysisk styrke, vil det overgå mennesker i intellektuel formåen”, siger han.

Kilder: nobelprize.org og ChatGPT (OpenAI, 2024).

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Maren Mallong



DFS' generalforsamling var en succes!

Dansk Fysisk Selskabs generalforsamling blev afholdt fredag den 4. oktober 2024 i Margrethe Bohr Multisalen i den nyåbnede del af Niels Bohr Bygningen. Arrangementet startede med to meget interessante foredrag: Professor Christine Schøtt Hvidberg fra Niels Bohr Institutet fortalte om sin forskning i afsmeltningen og massetabet af iskapperne i Grønland og Antarktis og de deraf følgende potentielle havstigninger. Professor Jeffrey Hangst fra Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet og talsperson for ALPHA Collaboration på CERN fortalte om sin banebrydende forskning indenfor antibrint, herunder de gravitationelle egenskaber af stoffet.

Ved den efterfølgende generalforsamling gennemgik formand Ian Bearden sin beretning for året, og kasserer Louise Kindt fremlagde foreningens regnskab og budget, som blev godkendt. Formandens beretning kan læses her:

danskfysiskselskab.dk/2024/10/16/chairmans-report-2024

og referatet af generalforsamlingen kan læses her:

danskfysiskselskab.dk/referat-generalforsamling-2024/

Efter generalforsamlingen var der fredagsbar og socialt samvær, hvor bl.a. den tidligere Forskningsminister fra Holland, Robbert Dijkgraaf, kom forbi til en uformel snak, da han netop var på besøg i bygningen denne dag.

Nye valgregler

De af bestyrelsen foreslåede ændringer af valgreglerne blev vedtaget af generalforsamlingen. De nye valgregler simplificerer processen for at opstille som kandidat til bestyrelsen, og selve valghandlingen vil fremover foregå via en digital platform. Valgreglerne kan læses på DFS'

hjemmeside:

danskfysiskselskab.dk/regler-for-valg-til-dansk-fysisk-selskabs-bestyrelse/

Kontingentstigning fra 2025

Kontingentet for medlemskab af DFS stiger i 2025 for første gang i mange år. Stigningen er bl.a. nødvendig gjort af stigende administrationsudgifter og generelle prisstigninger. De faktiske udgifter per medlem er på 300 kr., hvilket udover administration dækker prisen for Kvant og Europhysics News.

På generalforsamlingen blev følgende årlige kontingent satser gældende fra 2025 vedtaget:

- Ordinære medlemmer: 450 kr.
- Studerende inkl. ph.d.-studerende: 200 kr.
- Pensionister: 300 kr.

DFS Årsmøde 2025

Sæt kryds i kalenderen den 14.–15. maj 2025, hvor foreningens næste årsmøde afholdes på Danmarks Tekniske Universitet, DTU, i Lyngby. Bestyrelsen er i fuld gang med at planlægge programmet og invitere foredragsholdere, så hold øje med hjemmesiden for løbende opdateringer. Som altid vil årsmødet byde på en række plenarforedrag med fremtrædende forskere, tematiske parallelsessioner, en poster session, middag og netværksmuligheder. Årsmødet er en unik mulighed for at møde fysikere fra hele landet og høre om, hvad der foregår såvel på forskningsfronten som i industrien!

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Cecilie Pedersen



Foto: Rochelle Coote Photography.

En fejring af naturvidenskabelig formidling: UNF og SNU markerede store jubilæer

Fredag den 8. november 2024 var en særlig dag for naturvidenskaben, da Ungdommens Naturvidenskabelige Forening (UNF) og Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) afholdt “280-års jubilæum”. SNU fylder i 2024 200 år, mens UNF kan bryste sig af runde de 80 år. Fælles jubilæer er tidligere blevet afholdt i 2014 og 2004.

Begivenheden fandt sted i Glassalen på Danmarks Tekniske Universitet (DTU) og bød på et festligt program med taler fra både SNU- og UNF-medlemmer, herunder to personer, der har været aktive i begge foreninger gennem tiden, samt et spektakulært Science Show og uddelingen af H.C. Ørstedmedaljen i sølv.

Hæder til fremragende formidlere

H.C. Ørstedmedaljen i sølv blev tildelt to fremtrædende formidlere: astronaut Andreas Mogensen og vindenergipioner Henrik Stiesdal. Medaljen, sponsoreret af TICRA Fond, blev ledsaget af et legat på 20.000 kr.

Andreas Mogensen, den første dansker i rummet, blev hædret for sin evne til at begejstre og inspirere både unge og ældre med sine fortællinger fra rummet. SNU's præsident, Anja C. Andersen, beskrev hans formidling som “usædvanligt medrivende” og fremhævede hans evne til at gøre rumforskning relevant og tilgængelig for alle aldersgrupper.

Desværre måtte Andreas Mogensen melde afbud kort før arrangementet. Han vil i stedet modtage sin medalje ved et arrangement i foråret. Da dette åbnede op i programmet, holdt Henrik Stiesdal et udvidet foredrag, hvor han dykkede ned i klimaudfordringer og mulige løsninger.

Henrik Stiesdal, en af verdens førende innovatører inden for vindenergi, modtog medaljen for sin evne til at formidle komplekse teknologiske problemstillinger på en forståelig og inspirerende måde. Som SNU's vicepræsident, Rasmus Larsen, formulerede det: “Henrik

Stiesdal er en eminent formidler. Han har modet til at reducere et komplekst problem til enkle, håndgribelige budskaber og klare, forståelige analogier, som leveres med vid og humor. Hans formidling er altid fængende, uanset om det er til små eller store forsamlinger, TV eller populærvidenskabelige artikler i Ingeniøren.”



Figur 1. Henrik Stiesdal, modtager af Ørstedmedaljen i sølv, holder foredrag om klimaudfordringer og mulige løsninger. Foto: Rochelle Coote Photography.

En historisk forbindelse

UNF og SNU deler en lang historie, som også blev fejret denne dag. SNU, grundlagt i 1824, havde gennem to århundreder arbejdet på at udbrede kendskabet til naturvidenskab. UNF blev grundlagt i 1944 som en selvstændig organisation udsprunget af SNU og har siden udviklet sig til en landsdækkende organisation med lokalafdelinger drevet af engagerede frivillige gymnasieelever og universitetsstuderende.

Jubilæumsarrangementet var en hyldest til historien og en fejring af de mennesker, der gør naturvidenskab levende og tilgængelig for samfundet. Dagen mindede os om vigtigheden af at inspirere kommende generationer til at udforske og forstå verden omkring os.

Hauchs Physiske Cabinet

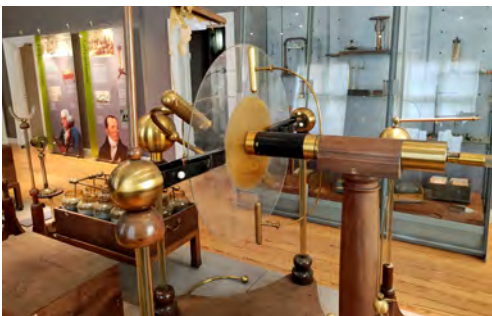
Jens Olaf Pepke Pedersen, Kvant

Hauchs Physiske Cabinet er en imponerende samling af fysiske og kemiske apparater, som er indsamlet i tidsrummet 1790–1827 af Adam Wilhelm Hauch (1755–1838).



Hauch var som barn bestemt til en militær karriere – allerede som 5-årig blev han udnævnt til fændrik og som 10-årig til premierløjtnant. Han interesserede sig dog mest for fysik og kemi, og han tog derfor afsked fra hæren i 1786 og drog ud på en videnskabelig dannelsesrejse. Den førte ham til Tyskland, Polen, Holland, England og Frankrig, hvor han kom i kontakt med nogle af tidens fremmeste videnskabsmænd som Cavendish, Herschel og Lavoisier, og hvor han købte instrumenter af førende instrumentmagere.

Hauch blev dog kaldt hjem igen i 1789 for at blive chef for staldetaten, og i 1794 blev han udnævnt til hofmarskal.



Gennem selvstudier og offentlige forelæsninger lærte Hauch en del fysik, og han begyndte at forelæse og foretage kemiske undersøgelser, bl.a. om vands sammensætning. Han udgav bogen “Begyndelses-Grunde til Natur-Læren” og publicerede i skrifter fra Videnskabernes Selskab, som han senere blev præsident for.

Hauch gjorde ikke banebrydende opdagelser, men forbedrede og udviklede eksperimenter med stor grundighed, og han blev bl.a. tilbudt et professorat i fysik ved universitetet i Göttingen.

Prins Christian Frederik, den senere Christian VIII, var den 17. marts 1803 på besøg i kabinettet, og skrev i sin dagbog:

“Om morgenen var jeg i Kammerherre Hauchs Cabinet, hvor og Prindsen af Gloucester var. Han gjorde Forsøg med Suurstof, Vandstof og oversyret Saltsyregas. Af det sidste kom Prindsen i en meget stærk og ubehagelig Hoste.”



Hauchs privatøkonomi blev hårdt belastet af de kostbare instrumenter og statsbankerotten i 1813. Han blev reddet af Frederik VI, der købte samlingen i 1815, men lod Hauch beholde den. Ved indvielsen af Sorø Akademis nye hovedbygning i 1827 skænkede kongen samlingen til Akademiet.



Instrumenterne blev dog hurtigt forældede og endte på loftet, hvor de senere blev genopdaget som museumsgenstande. I dag betragtes samlingen som en af Europas bedste.

(Fotos fra SNU's direktion på besøg i kabinettet i 2022. Kontakt: www.awhauch.dk.)