

KVANT

September 2016 3

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 27. årgang

- 
- TUNGE SORTE HULLER – HVAD KAN DE BRUGES TIL?
 - BENGT STRÖMGRENS STJERNEUDVIKLINGSTEORI FRA 1933
 - LANDGREVEN I KASSEL OG TYCHO BRAHE PÅ HVEN
 - DEN GRAVITO-TERMISKE EFFEKT
 - HAWKING I DANMARK
 - AKTUELLE BØGER
 - BREDDEOPGAVER
 - KVANT-NYHEDER
 - FORENINGSNYT

Løssalgspris: 50 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk
Facebook  : KVANT.fysiktidsskrift
ISSN (trykt) : 0905-8893
ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

Astronomisk Selskab,
Dansk Fysisk Selskab,
Dansk Geofysisk Forening,
Selskabet for Naturlærers Udbredelse,

Redaktion

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

Abonnementspris : 180 kr/år.

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

Annoncepriser

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

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

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri ApS.
Oplag: 2400.

Produktionsplan

Nr. 4-16 udkommer ca. 15. december
Nr. 1-17 udkommer ca. 15. marts
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Tunge sorte huller – hvad kan de bruges til?	
<i>Marianne Vestergaard</i>	3
Tøndefald – breddeopgave 69 med didaktisk kommentar	
<i>Jens Højgaard Jensen</i>	9
Foreningsnyt – foredrag i efteråret 2016	10
Aktuelle bøger	
<i>Anja Skaar Jacobsen</i>	11
KVANT-nyheder	
<i>Sven Munk</i>	12
Landgreven i Kassel og Tycho Brahe på Hven	
<i>Erik Høg</i>	14
Den gravito-termiske effekt	
<i>John Niclasen</i>	24
Bengt Strömbergens stjerneudviklingsteori fra 1933	
<i>Jørgen Otzen Petersen</i>	28
Annonce: Candscient.nu (IDA netværk)	35
Hawking i Danmark	
<i>Michael Cramer Andersen</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden viser en tegning af tilvækstsskiven af gas omkring det stellare sorte hul i dobbeltstjernesystemet *Cygnus-X1*. Hullet har stjålet gassen fra dens ledsagende stjerne. For alle sorte huller gælder, at gas på vej ind i det sorte hul lægger sig i en skive omkring hullet. I skiven bremses gassen når den støder ind i sig selv (ved viskøse processer), hvilket tillader gassen at bevæge sig mod, og til sidst falde ind på, det sorte hul. Gassens potentielle energi omdannes til varme og højenergi stråling (specielt i røntgenområdet for stellare sorte huller). Dette gør det sorte hul nemt at finde, selv i store afstande fra Jorden.

Læs artiklen inde i bladet af Marianne Vestergaard, om de tunge sorte huller, som findes i centrum af galakser.

Tegning: Chandra (NASA).



KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle 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 og Kemi (SDU), Institut for Fysik og Nanoteknologi (AAU), DTU Nanotech, DTU Fotonik og DTU Fysik.

Tunge sorte huller – hvad kan de bruges til?

Af Marianne Vestergaard, Dark Cosmology Centre, Københavns Universitet

I Einsteins almene relativitetsteori, fremsat for 101 år siden, giver masse anledning til krumning af rumtiden. Den største krumning sker, omkring sorte huller som er meget kompakte. Længe har sorte huller været omgærdet af mystik, dels pga. den ukendte fysik som hersker og dels da man ikke vidste, om de faktisk eksisterer. Vi ved nu, at sorte huller findes i stort antal og i mange størrelser. Jeg beskriver her, hvorledes tunge sorte huller kan bruges til at udforske Universet og til at forstå nogle af de mere specielle hjørner af fysikken.

Hvad er sorte huller?

Et sort hul er så kompakt (dvs. at det har en stor masse indenfor et relativt lille volumen), at selv lys ikke kan undslippe det faste greb fra dets tyngdefelt, når det kommer for tæt på. Størrelsen af et sort hul bestemmes af dets begivenhedshorisont (Schwarzschild radius), R_s , hvor undvigelseshastigheden er lig lysets hastighed:

$$R_s = \frac{2GM_{SH}}{c^2}. \quad (1)$$

Her er G og c hhv. den gravitationelle konstant og lysets hastighed, mens M_{SH} er massen af det sorte hul. For Jorden er $R_s = 9$ mm og Solen har $R_s = 3$ km. De allerstørste kendte sorte huller, med masser af størrelsesordenen 10 milliarder solmasser, har R_s af størrelsesordenen 25 lystimer (dvs. en udstrækning på ca. 50 lystimer).

Et sort hul er et ret simpelt objekt, da det kan beskrives ved blot tre egenskaber: masse, spin, og ladning. Massen er langt den vigtigste egenskab, som bestemmer dets tyngdefelt og dermed dets gravitationelle rækkevidde, samt hvor hurtigt det kan sluge materiale og dermed vokse sig større, såfremt der er nok materiale i nærheden. Astronomisk set er kun massen og spinnets af interesse.

Sorte huller findes!

Blot indenfor de sidste 20 år er det blevet bekræftet, at sorte huller ikke blot eksisterer men de findes alle vegne. Hver galakse har mindst ét, nemlig et kæmpestort sort hul med en masse over 1 million solmasser (én solmasse er massen af Solen, ca. $2 \cdot 10^{30}$ kg). Vores egen Mælkevej har et sort hul på 4 millioner solmasser, mens de tungeste vi kender er på ca. 10 milliarder solmasser. Et mindre antal galakser forventes også at have to tunge sorte huller fordi de er i slutfasen af, at to galakser smelter sammen; de sorte huller vil sidenhen også smelte sammen.

I en mindre brøkdel af de mest lysstærke galakser er det centrale tunge sorte hul i færd med at sluge gas, som er transporteret fra de ydre dele af galaksen ned til det sorte hul i centret. I processen udsendes så kraftigt lys, at de mest lysstærke af disse såkaldte aktive galaksekerner, kaldet kvasarer, kan observeres helt ud til de allerstørste afstande, hvor de første galakser kan observeres.

Selvom denne artikel har fokus på tunge sorte huller, er det værd at nævne, at der også er adskillige sorte huller i alle galakser med masser mellem ca. 3 og ca. 60 solmasser. De er dannet i processer der involverer

stjerners død. Den øvre massegrænse er noget usikker, da den dels beror på hvor store sorte huller der kan dannes når tunge stjerner dør og dels på, hvor hyppige sammensmeltninger af sådanne sorte huller er. Den nedre grænse (ca. 3 solmasser) bestemmes af tilstandsligningen for neutronstjerner. Mindre sorte huller end 3 solmasser, der er postuleret af nogle partikelfysikere, vil være uden astrofysisk betydning.

Dannelse af sorte huller

Små sorte huller, dvs. med en masse under 100 solmasser, ofte kaldet *stellare sorte huller*, dannes når tunge stjerner opbruger deres brændsel i centret. Der ved stopper atomkernefusionen, dannelsen af fotoner dør ud og kerneområdet falder sammen. Hvis denne kerne overstiger tre solmasser, kan end ikke tætpakkede neutroner opretholde det enorme tryk, og kerneområdet falder sammen til et sort hul.

Vi observerer de første galakser og kvasarer blot 700-800 mio. år efter Big Bang. Dette er for kort tid til, at kvasarernes tunge sorte huller (på 1000 til 10.000 mio. solmasser; se evt. figur 6 senere) kan være dannet fra stellare sorte huller som siden har vokset sig større ved at sluge omkringliggende gas. Man antager derfor, at det er muligt for store gasskyer på flere hundrede solmasser, eller mere, at falde sammen og danne et sort hul. Det er blot ikke ligetil, da en stor gassky skal kunne køle for at komme af med den varme, som opstår, når gas sammenpresses. Den gas, som fandtes i det tidlige univers, har svært ved at køle, fordi det kun bestod af brint og helium. Derfor mener man, at store sorte huller først kunne dannes efter den første episode af stjernedannelse, som dannede tungere grundstoffer i centret af de tunge stjerner. Tungere grundstoffer hjælper gassen med at køle langt mere effektivt.

Man mener nu, langt om længe, at have observeret én sådan kæmpe gassky. De er nemlig svære at observere, dels fordi skyen er meget lyssvag og dels fordi de fleste forekommer tidligt i Universet, hvorved det svage lys er blevet meget svagt når det endelig når Jorden [1].

Sorte huller i vækst: aktive galaksekerner og kvasarer

Et sort hul kan vokse sig større ved at smelte sammen med et andet sort hul som kommer indenfor dets gravitationelle rækkevidde. Den mest almindelige måde for et sort hul at vokse på er dog ved at sluge gas fra dets omgivelser, idet gasskyer er meget mere hyppigt forekommende. Specielt var der meget mere gas i det yngre og mindre Univers, hvor kvasarer også var langt hyppigere. Langt de fleste galakser, specielt de større,

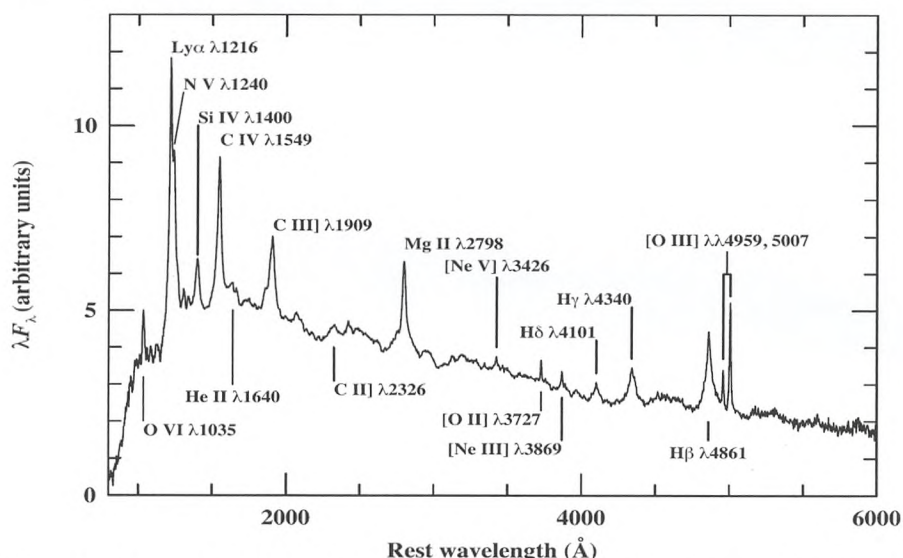
har været igennem en sådan tidlig *aktiv* fase. Selv vores nære galakser og Mælkevejen har været igennem en sådan vækstfase.

Når det sorte hul fortærer gassen udsendes kraftig røntgen-, ultraviolet- og optisk (synlig) stråling: Gassen bremses og dermed varmes den kraftigt op ved viskøse processer tæt ved det sorte hul og gassen lyser kraftigt. Aktive galaksekerner og kvasarer er derfor nemme at finde, pga. det kraftige lys fra den centrale "tilvækstskive" som gassen lægger sig i tæt ved det sorte hul, men de udsender også karakteristiske emissionslinjer (se figur 1) fra anden gas, som befinder sig nær det sorte hul. Linjerne er Dopplerudbredt af de høje hastigheder af gassen på mellem 2000 og 10.000 km/s.

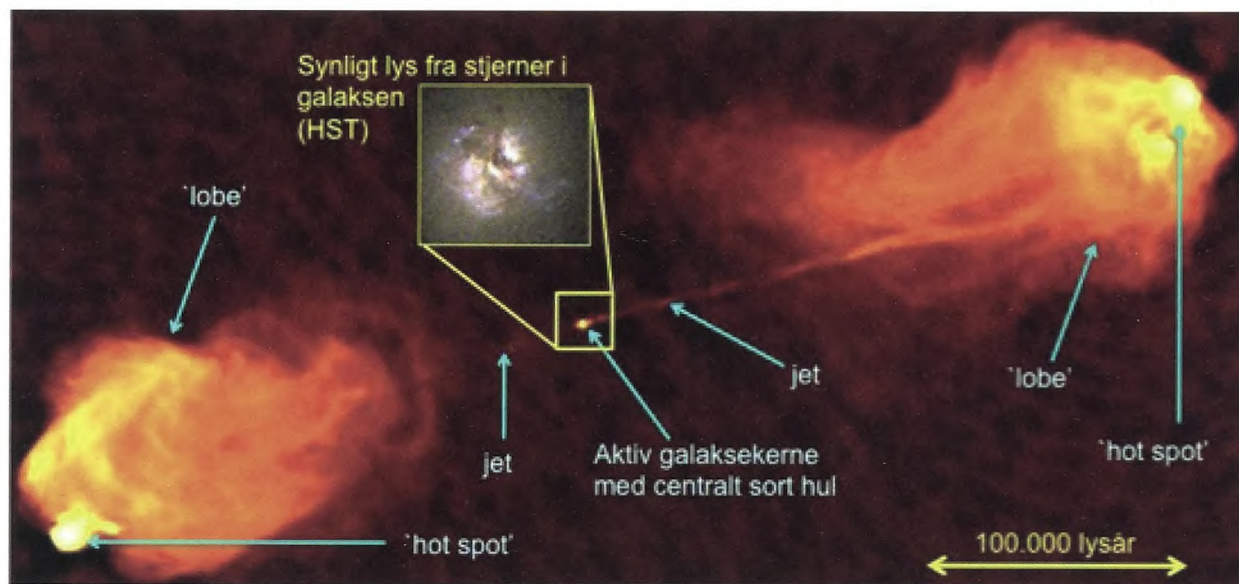
Et af de mere spektakulære eksempler på deres emission er de store jets af relativistisk plasma (især

bestående af elektroner og protoner), som udsendes af ca. 10 % af aktive galaksekerner og kvasarer. Plasmaen accelereres og udsendes fra et område tæt på det sorte hul til afstande på flere gange stjernelysets udstrækning i galaksen (se figur 2). Sorte huller er meget effektive partikelacceleratorer.

Den kraftige emission fra tunge sorte huller har en stor indflydelse på deres omgivelser. Det kan være energirig stråling eller hurtige jets af tæt molekylgas [2]. Det er derfor nødvendigt for forskerne, at forstå disse processer i større detalje for at kunne forstå beskaffenheden af nogle af de store massestrukturer i Universet, såsom galakser og galaksehobe. Da energien som det sorte hul formår at afsætte i omgivelserne primært afhænger af dets masse, er der stor forskningsaktivitet netop i at bestemme denne masse nøjagtigt.



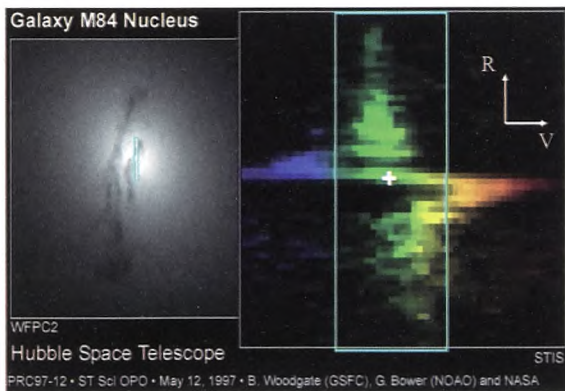
Figur 1. Typisk UV-optisk spektrum af en aktiv galaksekerner. Kraftige, brede emissionslinjer af brint (Ly α , H δ , H γ , H β), kul (CIV, CIII), magnesium (MgII), silicium (Si), og kvælstof (NV) ses liggende over kontinuumstrålingen fra den centrale gasskive, hvis intensitet aftager med fotonernes bølgelængde. Linjer fra ilt (OVI, [OII], [OIII]), helium (He) og neon (Ne) ses også. De smalle linjer af ioniseret ilt, fx [OII] og [OIII], dannes i diffus gas i større afstand fra kernen. Kontinuumstrålingen ved fx 5100Å kan benyttes til at beregne den "monokromatiske luminositet" ved 5100Å, som benyttes til bl.a. mælemålinger (se evt. figur 5). Figuren er høfligt udlånt af Bradley M. Peterson og baseret på data fra Paul J. Francis og Craig Foltz.



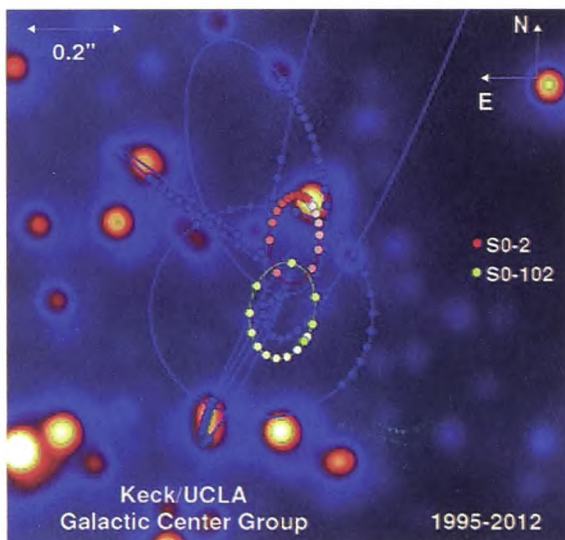
Figur 2. Radiostråling fra galaksen Cygnus A. Radio-jetten (orange/gul), der dannes tæt på det sorte hul i centret af galaksen, kan strække sig over afstande flere gange udstrækningen af stjernelyset i galaksen (kassen i centret). Jetten består af relativistisk plasma accelereret af det sorte hul og ses her som en tynd 'fokuseret stråle' af plasma. Billede: NRAO/AUI/STScI/NASA. Billedet er opmærket med forklaringer af forfatteren.

Massebestemmelse

Astronomer vejer objekter i Universet ved at måle på, hvordan andre himmellegemer bevæger sig omkring det relevante objekt. Fysikken fortæller os nemlig, at vi kan måle den masse som ligger indenfor en bestemt radius ved at kende den radius plus den fart, hvormed et andet objekt bevæger sig. På den måde kan vi fx (vha. Keplers tredje lov) bestemme Solens masse ved at måle på banebevægelsen af Merkur. Måler vi længere ude, på Mars' bane om Solen, bestemmer vi den samlede masse af Solen, Merkur, Venus, Jorden og Månen.



Figur 3. Den høje rumlige opløsning på Hubble Rumteleskopet skabte i 1990'erne et gennembrud i detektion og studiet af sorte huller i fjerne galakser som ikke kan foretages med jordbaserede teleskoper pga. atmosfærens udsmyring af lyset fra punktkilder. De kraftige hastighedsudsving (blåt og rødt) af gassen i de små afstande R fra centret (hvidt kryds) af M84 galaksen (venstre blå kasse) viser, at det centrale objekt er et sort hul med en masse på 800 millioner solmasser. Billede: STScI/NASA/B. Woodgate(GSFC)/G. Bower(NOAO). Billedet er opmærket med forklaringer af forfatteren.



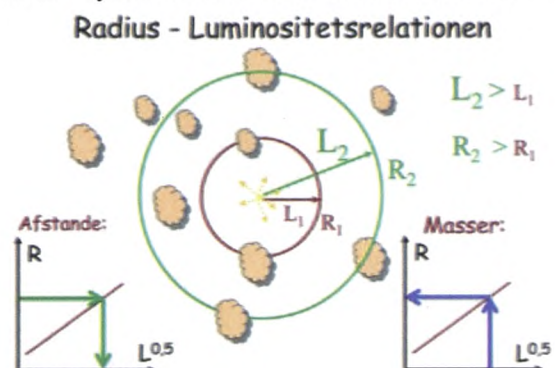
Figur 4. Stjerners banebevægelse tæt på det sorte hul i Mælkevejens centrum. Kun to stjerner har så korte omløbstider, at deres baner er fuldt kortlagte, hvilket giver mest information om det centrale objekt. Stjernen S0-2 med en omløbstid på 16 år, beviste eksistensen af det sorte hul. Stjernen S0-102 har en omløbstid på kun 11,5 år hvilket tillader tests af Einsteins almene relativitetsteori. Målinger på et større antal stjerner end vist her, viser at Mælkevejens sorte hul vejer 4 millioner solmasser. Billede: A. Ghez/UCLA/W.M. Keck Telescopes.

¹Man bestemmer den tid Δt (tidsskala: dage), det tager for lyset at tilbagelægge afstanden R til gassen ved at krydskorrelere lyskurverne for kontinuums emissionen fra skiven med linje emissionen som er en tidsforsinket version af kontinuumslyskurven, fordi gassen absorberer dette lys og genudsender linje emissionen øjeblikkeligt. Afstanden er så $R = c \cdot \Delta t$, hvor c er lysets hastighed.

På samme måde måler forskerne massen af sorte huller ved at måle på banebevægelserne af gas (se figur 3) og stjerner (se figur 4) tæt på det sorte hul. Her er det vigtigt, at man måler på stjerner og gas så tæt på det sorte hul som muligt, fordi metoden måler massen af *alt* indenfor den pågældende radius.

For store sorte huller i centret af normale galakser kræver metoden derfor en ret stor rumlig opløsning, for at man kan bestemme massen af det sorte hul alene. Derfor kan metoden kun benyttes i det lokale univers. På større afstande fra os er det kun de sorte huller i aktive galaksekerner, som vi kan bestemme massen af. Her benytter man i stedet tidlige variationer af emissionen fra skiven og emissionslinjegassen nær det sorte hul til at bestemme gassens afstand¹ og linjebredderne (se figur 1) til at bestemme gassens hastighed.

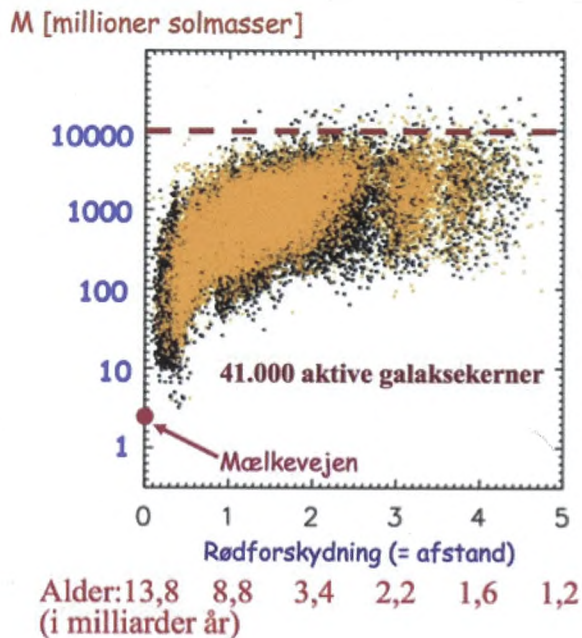
Metoden har nu været benyttet på 60 nære aktive galaksekerner med rødforskydninger under 0,3. I disse afstande har lyset været op til 3,4 milliarder år undervejs. Målingerne viser, at der er en tydelig sammenhæng mellem afstanden til emissionslinjegassen og hvor lysstærk tilvækstsskiven er. Denne sammenhæng, kaldet R - L -relationen (se figur 5), benyttes til at estimere massen af de sorte huller i mere fjerne aktive galaksekerner [3]. Hastigheden af gassen bestemmes ud fra måling af linjebredden, og gassens afstand bestemmes ud fra styrken af lyset fra skiven vha. R - L -relationen.



Figur 5. Jo mere lysstærk gasskiven omkring det sorte hul er (højere L), fra jo større afstand udsendes emissionslinjerne fra gassen omkring det sorte hul (højere R). Når relationen benyttes til massebestemmelser (blå pile) måles L som den "monokromatiske luminositet" ved 5100Å fra spektret (se evt. figur 1), som derved giver et estimat af R . Måler man i stedet R ud fra analyse af variabiliteten af lyset [4], se evt. fodnote 1, kan man bestemme hvad L må være (grønne pile) og dermed beregne den kosmiske afstand til den aktive galaksekerner, når den modtagne fluks fra objektet måles.

Vi måler at aktive galaksekerner vejer mellem 1 og 10.000 millioner solmasser. Selv de fjerneste kvasarer vi kender vejer over 100 millioner solmasser (se figur 6). Årsagen til den øvre grænse på 10.000 millioner solmasser kendes ikke med sikkerhed. Den afhænger sandsynligvis af flere forhold: (a) mangel på gas som det sorte hul kan sluge, (b) det tager tid at opbygge store sorte huller og med tiden udvider Universet sig og det bliver dermed sværere for galakser (og deres sorte huller) at smelte sammen, og (c) specielt er de allertungeste

sorte huller på 10.000 millioner solmasser sjældne, og for at de kan vokse hurtigt nok (før Universet spreder galakserne for meget), skal de smelte sammen med et større antal sorte huller af samme vægt. Det er en meget svær opgave – der tilsyneladende ikke har kunnet lade sig gøre.



Figur 6. Massen af tunge sorte huller i fjerne aktive galaksekerner og kvasarer vist som funktion af afstanden fra os (i enhed af rødforskydning), der også er omregnet til alderen af Universet, da lyset blev udsendt. Nutiden og Jorden befinder sig i Origo. Farvekodningen af målingerne er uden betydning. Målingerne viser, at der er en øvre grænse for, hvor tunge de sorte huller i fjerne aktive galaksekerner kan blive og at vi ikke kan detektere objekter som har sorte huller lettere end ca. 100 millioner solmasser med mindre de var aktive 9 milliarder år efter Big Bang (dvs. for $z < \text{ca. } 1$ på figuren). Den øvre grænse falder mod nyere tid, fordi de sorte huller stopper deres aktivitet, og derefter kan de ikke observeres. Det forventes at antallet af relativt mindre sorte huller langt overstiger antallet af relativt større sorte huller i Universet. Vi kan kun detektere de mest lysklare (og dermed tungeste) af den eksisterende population. Diagrammet viser kun et lille udsnit af de ca. 106.000 kendte aktive galaksekerner, hvoraf de fleste befinder sig relativt tættere på Jorden som antydnet i figuren. Mælkevejens centrale sorte hul (ikke aktivt) er indtegnet til sammenligning.

Hvad kan vi så bruge de sorte huller til?

Her gives et overblik over nogle af de vigtigste områder indenfor astrofysik og kosmologi, hvor tunge sorte huller kan bruges til at lære mere om naturen og Universet.

Ekstrem fysik:

De enorme tyngdekrafter nær sorte huller tillader studier af 'ekstrem fysik'. Blandt andet kan vi teste Einsteins almene relativitetsteori i et meget kraftigt tyngdefelt. Man kan bl.a. måle, at banen præcesserer (forskydes) en smule og laver et rosettamønster. Dertil kommer at der sker en relativistisk acceleration (en relativistisk gravitationel rødforskydning som øger radialhastighederne) tæt på det sorte hul. Det sidste kan måles, hvis man tager hyppige nok data af positioner og radialhastigheder.

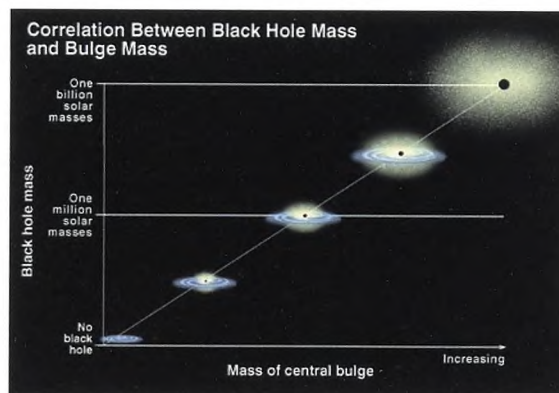
Forskerhold ved University of California og det Europæiske Sydobservatorium (ESO) vil bl.a. undersøge,

hvor meget banen af stjernerne S0-102 og S0-2 vil præcessere næste gang de vender omkring det sorte hul i Mælkevejens centrum (se figur 4). Derudover vil det nye GRAVITY instrument bruge de fire *Very Large Telescopes* ved ESO som ét teleskop, svarende til 130 m i diameter, til at teste Einsteins teori yderligere [5].

Specielt indenfor det sidste år har der været ekstra stor opmærksomhed omkring sorte huller, idet det er lykkedes forskerne ved *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory* (LIGO) i USA et par gange at detektere tyngdebølger fra to sorte huller mens de smeltede sammen. Observationerne [6] bekræfter dels eksistensen af de sorte huller på ny, samt at der findes så tunge (ca. 30 solmasser) stellare sorte huller, hvilket ikke er helt oplagt. Da stjerner tungere end ca. 100 solmasser ikke kan eksistere på grund af det enorme strålingstryk, må det betyde, at der er mange sorte huller i vores galakse som kan smelte sammen og med tiden skabe tunge sorte huller med masser omkring 30-40 solmasser ude i Galaksen. Flere tyngdebølgeobservationer vil klarlægge netop, hvor hyppige så tunge stellare sorte huller egentlig er.

Galaksedannelse og -udvikling:

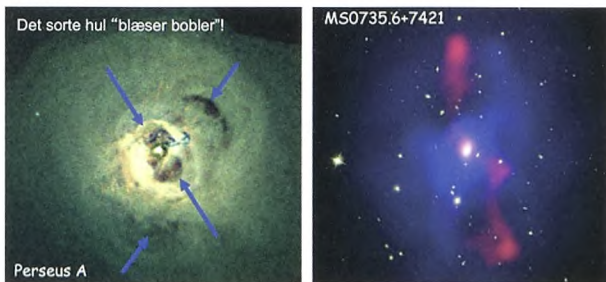
Indenfor de sidste 15 år er der sket et gennembrud i forståelsen af, hvorfor galakser ser ud som de gør, idet man har erfaret at sorte huller må spille en vigtig rolle for, hvordan galakser dannes og udvikler sig. Man finder bl.a., at de tungere galakser huser tungere sorte huller med næsten et konstant masseforhold, se figur 7.



Figur 7. Jo tungere galaksen er desto tungere er det sorte hul. Sammenhængen mellem massen af det tunge sorte hul (y-aksen) og massen af bulen af galaksen (x-aksen), målt gennem hastighedsdispersionen af stjernerne i bulen. De tungeste sorte huller sidder i store elliptiske galakser, der har hele deres masse i bulen. Dog ved vi nu, at galakser uden en bule sagtens kan huse et tungt sort hul, fordi vi kender sådanne galakser med aktive sorte huller. Tegning: K. Cordes og S. Brown (STScI).

Dette tyder på en vis tilpasning og en fysisk forbindelse eller vekselvirkning mellem galaksen og det sorte hul. At dette ikke er en trivial forbindelse understreges af de meget forskellige størrelsesskalaer af de to objekter. Det betyder nemlig, at et sort hul med en masse på fx 10 milliarder solmasser, med en udstrækning på mindre end 50 lystimer, tilsyneladende har information om massen af galaksen på en skala af 100.000 lysår eller mere, og omvendt! Hvordan den tilpasning blev til, vides endnu ikke men der forskes flittigt i emnet.

Det bedste eksempel på hvordan sorte huller kan have en direkte indflydelse på beskaffenheden af objekter i Universet er nok de såkaldte "røntgenhobe". I galaksehobe findes millioner af grader varmt gas, der køler ved at gløde i røntgenområdet, dvs. ved bølgelængder mindre end ca. 124 Å (eller fotonenergi større end 100 eV). I mange år stod forskerne med det mysterium, at der ikke blev skabt så mange stjerner i centret af disse hobe, som man forventede ud fra den kraftige røntgenstråling. Først i de seneste år har man fundet ud af, at røntgengassen er ujævnt fordelt eller har 'huller'. Man ved nu, at jetten fra den centrale radiogalakse kan opvarme gassen i centret, både ved at skubbe rundt på gassen og ved at virke som en radiator (se figur 8). Når gassen opvarmes, forhindres den i at køle nok af til at danne så mange stjerner som røntgenemissionen ellers indikerer.



Figur 8. Energien fra sorte huller i færd med at sluge gas kan skubbe og varme den kølende gas mellem galakserne i røntgenhobe. Til venstre ses huller i røntgengassen (grøn) angivet ved pilene. Til højre ses at radio-jetten (rød) fra den centrale galakse passer som hånd i handske i hullerne i røntgengassen (blå). Den mekaniske energi fra jetten svarer til den opvarmning af gassen der skal til for at forklare forskellen mellem den målte stjernedannelsesrate og den forventede på basis af røntgenemissionen fra gassen. Synligt lys fra galakserne i hoben (hvid) er fra rumteleskopet (NASA/CXC/STScI/A. Fabian (IoA)/B. McNamara (UWaterloo)). Originale billeder er opmærket af forfatteren.

Eksistensen af de tunge sorte huller er altafgørende for forklaringen på, at elliptiske galakser har tilfældige stjernebaner og samtidig ikke har dannet stjerner i flere milliarder år og heller ingen skive eller kold gas har. Til sammenligning har spiralgalakser en skive med masser af kold gas, hvorfra stjerner konstant dannes, og stjernerne bevæger sig i ordnede baner omkring centret i denne skive i galaksens plan. De tilfældige stjernebaner i elliptiske galakser kan skabes, når to næsten lige store galakser støder sammen og bliver til én galakse. Teoretiske modeller viser, at når dette sker, så smelter deres centrale sorte huller også sammen. Modellerne viser også, at den energi der frigøres, når gas under sammensmeltningen falder ind på de sorte huller, er stor nok til at opvarme og bortblæse den resterende gas i den endelige galakse, således at stjerner ikke længere kan dannes. Uden de sorte huller ville gassen i stedet blive koncentreret i centret af galaksen, og mange flere stjerner ville fortsat kunne dannes, stik imod hvad man observerer.

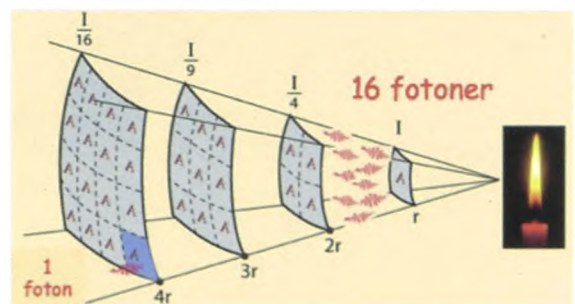
Kosmiske afstandsmålinger:

Indenfor kosmologien er sorte huller specielt brugbare og har stort potentiale for anvendelser. Lige siden 1980'erne, hvor man identificerede kvasarer som be-liggende i store (dvs. kosmiske) afstande fra os har

astronomer haft interesse i at finde en metode, hvorved man kunne benytte målinger af kvasarer til at bestemme de store afstande i Universet, idet kvasarer udsender kraftigt vedvarende lys i modsætning til andre objekter som benyttes til afstandsmålinger. Det er specielt nyttigt, hvis man kan finde en egenskab ved kvasarer som afhænger af den indre lysstyrke, idet en simpel måling af den observerede fluks derved direkte giver afstanden, se boksen om *Standardlyskilde* og figur 9.

Standardlyskilde

Et objekt er en standardlyskilde (se figur 9) hvis der findes en egenskab som kun afhænger af den udsendte lysstyrke, L . Derved vil en simpel måling af den observerede fluks direkte give afstanden (eller rettere, "luminositetsafstanden", D_L , som det kaldes): $L = 4\pi D_L^2 F$. Her er L luminositeten (i enhed af energi per sekund) og F er fluksen (i enhed af energi per sekund per areal). En supernova af typen Ia er et eksempel på en standardlyskilde fordi eksplosionen altid sker når den hvide dværg i et dobbeltstjernesystem opnår en masse på 1,4 solmasser i den proces hvor den hvide dværg "stjæler" gas fra dens ledsagende stjerne. Når massen kendes ret præcist, kender vi også luminositeten af supernovaen og dermed afstanden når vi måler hvor meget fluks vi modtager.



Figur 9. Illustration af en standardlyskilde. Kendes intensiteten (dvs. luminositeten) af den udsendte stråling, kan man benytte den målte energifluks til at beregne afstanden til kilden. Antallet af fotoner er konstant men spredes over et større overfladeareal på den imaginære sfære, hvis radius er afstanden til kilden; dvs. energien per tidsenhed per arealenhed svækkes (med kvadratet på afstanden) jo længere væk lyskilden er. Figurer: Lawrence Livermore National Laboratory/Universe Adventure (øverst) og R. Nave, Georgia State University (nederst).

Det har længe ikke været muligt at finde en luminositetsafhængighed, som er tilstrækkelig entydig til at være nyttig. I 2011 lykkedes det at vise, at den kendte R - L -relation (se figur 5) har et stort potentiale for at kunne bruges til at bestemme de store afstande, selv til de allerførste galakser i Universet [7]. Dette er et stort gennembrud. I dette tilfælde benyttes R - L -relationen omvendt (se figur 5): Man måler R direkte i fjerne aktive galaksekerner ved hjælp af de tidligere nævnte variabilitetsstudier og dernæst estimeres L ud fra relationen, der så benyttes til at finde D_L fra formelen ovenfor. Pt. er metoden ikke helt så nøjagtig som fx *Supernova Ia*-metoden, men der er rige muligheder for at forbedre dens præcision, så forskerne er forhåbningsfulde og arbejder ivrigt på sagen. Gevinsten bliver nemlig, at vi kan måle afstande helt ud til de første galakser der blev dannet i Universet, hvor *Supernova Ia*-metoden kun kan benyttes ca. 10 milliarder år tilbage, dvs. tilbage til en tid hvor Universet kun var ca. 3,7 milliarder år gammelt.

Fremtiden

Der er sket rigtig mange fremskridt indenfor forskningen i sorte huller i de sidste ca. 100 år, siden Einstein fremsatte sin almene relativitetsteori og specielt indenfor blot de sidste 20 år. Det er svært at spå om de næste 100 år, men de næste 20 år lover rigtigt godt. Forbedringen af de første succesrige tyngdebølgeobservatorier og nye observatorier vil givetvis give os uanede mængder information om sorte huller og deres egenskaber. Et nyt teleskop, kaldet "Event Horizon Telescope", er i opstartsfasen. Det benytter radioteleskoper over hele jordkloden til at skabe en rumlig opløsning, der er stor nok til at se radiostråling fra området meget nær det sorte huls begivenhedshorisont. Forskerne arbejder på at opsætte et radioteleskop på Grønlands iskappe for at hjælpe med dette udfordrende arbejde [8].

Der er store forhåbninger om at kunne:

- a) se afbøjning af strålingen omkring det sorte hul (se evt. [9] om den gravitationelle linseffekt),
- b) se skyggen af det sorte hul idet det jo ikke lyser eller har en overflade hvorpå lys fra omgivelserne kan reflekteres,
- c) se hvordan radio-jets dannes nær det sorte hul,
- d) teste mange af de teoretiske ideer om fysikken i og omkring det sorte hul. Nye teoretiske ideer og tiltag er lovende for at vi snart kender langt mere til den ekstreme fysik som regerer i et sort hul. Danske forskere ved Niels Bohr Institutet er med til at bane vejen.

Så fremtiden lover godt! Vil du vide mere om sorte huller og udviklingen i vores forståelse deraf indenfor de sidste 100 år, kan du med fordel læse kapitel 6 i bogen *Verdensrummet i forandring – et hundredårigt perspektiv* [10]. Små dele af teksten i denne artikel er taget fra kapitel 6 i denne bog med tilladelse fra forlaget.

Litteratur

- [1] Hubble finds clues to the birth of supermassive black holes, European Space Agency Press Release heic1610; <http://www.spacetelescope.org/news/heic1610/?lang>.
- [2] ALMA finds a swirling, cool jet that reveals a growing, supermassive black hole; <http://phys.org/news/2016-07-alma-swirling-cool-jet-reveals.html>.
- [3] M.C. Bentz m.fl. (2013), The Low-luminosity End of the Radius-Luminosity Relationship for Active Galactic Nuclei, *Astrophysical Journal*, **767**, 149; DOI: 10.1088/0004-637X/767/2/149.
- [4] B.M. Peterson m.fl. (2004), Central Masses and Broad-Line Region Sizes of Active Galactic Nuclei. II. A Homogeneous Analysis of a Large Reverberation-Mapping Database, *Astrophysical Journal*, **581**, 197. DOI: 10.1086/423269.
- [5] Successful first observations of Galactic Centre with GRAVITY, ESO press release 1622; <https://www.eso.org/public/news/eso1622/?lang>.
- [6] J.O.P. Pedersen, M.C. Andersen (2016), Tyngdebølger observeret for første gang, *KVANT* nr. 1, Marts 2016.
- [7] D. Watson, K.D. Denney, M. Vestergaard, T.M. Davis (2011), A new cosmological distance measure involving Active Galactic Nuclei, *Astrophysical Journal Letters*, bind **740**, L49.
- [8] M.C. Christiansen (2016), Hvordan ser et sort hul ud?, <http://videnskab.dk/teknologi-innovation/hvordan-ser-et-sort-hul-ud>.
- [9] C. Grillo, L.B. Christensen, J. Hjorth (2015), Kosmiske forstørrelsesglas, *KVANT* nr. 4, December 2015; Michael F. Hansen (2016), Gravitationelle linser i galaksehobe, *KVANT* nr. 1, 2016.
- [10] Lone Bruun, Johan Fynbo og Michael Quaaed (red.), *Verdensrummet i forandring – et hundredårigt perspektiv*. Forlaget Epsilon 2016. Udgivet i forbindelse med Astronomisk Selskabs 100 års jubilæum.



Marianne Vestergaard er lektor og leder af et forskningsprogram støttet af Det Frie Forskningsråd til at forbedre massebestemmelserne af sorte huller i kvasarer og aktive galaksekerner, deriblandt de metoder hun selv har udviklet.

Almen Relativitetsteori i 100 år

Denne artikel er med i *KVANT*'s markering af 100-året for Einsteins almene relativitetsteori.

Læs mere om udviklingen af denne teori og moderne anvendelser i temanummeret om emnet, *KVANT* nr. 4 (2015) samt i *KVANT* nr. 4 (2014) og *KVANT* nr. 1 (2016).

Tøndefald – breddeopgave 69 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

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

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af KVANT var denne breddeopgave (nr. 69 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 69. Tøndefald

På ladet af en bil, der holder stille, er en cylinderformet tønde blevet glemt. Den ligger op ad forhuset med aksens vinkelret på køreretningen. Lastbilen speeder op for at køre. Hvor langt når den at køre før tøndens ruller ud over den åbne bagende af ladet? Begrund svaret.

Løsning

Vi vil først antage, at tøndens kan betragtes som et stift legeme med omdrejningssymmetrisk massefordeling. Hvis der f.eks. i tøndens er væske, der kan skulpe, er opgaven svær at besvare. Vi vil dernæst finde ud af, hvor lang tid det tager for tøndens at rulle fra forhuset til bagenden af ladet ved at regne i lastbilens koordinatsystem.

Hvis lastbilen antages at have accelerationen a , og tøndens massen m , er tøndens i lastbilens system påvirket af kraften ma , rettet bagud og angribende i tøndens tyngdepunkt. Herudover er tøndens påvirket af en modsat rettet gnidningskraft, G , angribende i tøndens berøring med ladet. Hvis vi betegner tøndens afstand fra forhuset x , er tøndens bevægelse relativt til ladet da givet ved:

$$m\ddot{x} = ma - G \quad (1)$$

Så længe tøndens ruller, er G bestemt af momentsætningen omkring tøndens midterakse kombineret med rulningsbetingelsen. Kaldes tøndens radius r , dens inertimoment kmr^2 og dens vinkelhastighed i rotationen omkring midteraksen ω , udtrykker $rG = kmr^2\dot{\omega}$ momentsætningen og $r\omega = \dot{x}$ rulningsbetingelsen. Kombineret fås:

$$G = km\ddot{x} \quad (2)$$

Indsat i ligning (1) fås herefter

$$\ddot{x} = \frac{a}{1+k} \quad (3)$$

for accelerationen af tøndens relativt til lastbilen.

Hvis vi for nemheds skyld antager a for konstant og kalder ladets længde for L , er tiden τ , det tager tøndens at rulle fra forhuset til bagenden af ladet, ifølge faldloven for det frie fald, derfor givet ved:

$$L = \frac{a\tau^2}{2(1+k)} \quad (4)$$

I tiden τ er distancen D , lastbilen har bevæget sig i forhold til vejen tilsvarende givet ved:

$$D = \frac{1}{2}a\tau^2 \quad (5)$$

Sammenholdes ligningerne (4) og (5), fås:

$$D = (1+k)L \quad (6)$$

som svar på opgaven. Svaret ses, udover af ladets længde (L), alene at afhænge af tøndens inertimoment (k), men altså ikke af lastbilens acceleration (a).

Kommentar

Hvad adskiller et velvalgt breddeeksamensproblem, der ved eksamen skal kunne løses på en time uden hjælpemidler, fra et velegnet projektkim, der skal kunne fungere som afsæt for et fysikorienteret 15 ECTS projektarbejde på 2. semester på den naturvidenskabelige bacheloruddannelse på RUC? Ikke meget, nødvendigvis. Opgaven her har været brugt som eksamensopgave i den svære ende af fysikstudiet, men kan også efter min vurdering bruges som afsæt til et 2. semesters projektarbejde. Men mine overvejelser over de to slags brug af opgaven er meget forskellige.

Som eksamensopgave hører opgaven, som skyldes Poul Winther Andersen, samtidigt med, at den er eksemplarisk for breddeopgavegenren, til i den svære ende. Løsningen af den forudsætter kombination af viden om og erfaring med accelererede koordinatsystemer, stive legemers mekanik, rulning og frit fald, på uvant måde. Vanskeligheden af opgaven taget i betragtning, er ovenstående besvarelse fuldt ud tilfredsstillende som resultatet af en times overvejelser ved eksamen.

Antagelsen, at a er konstant, er imidlertid overflødig. Resultatet i ligning (6) er gyldigt, uanset hvordan $a(t)$ varierer med tiden, forudsat tøndens ikke skrider under forløbet. To gange integration af ligning (3) giver:

$$L = \int_{t_2=0}^{t_2=\tau} \left[\int_{t_1=0}^{t_1=t_2} \frac{a(t_1)}{1+k} dt_1 \right] dt_2 \quad (7)$$

Tilsvarende har vi:

$$D = \int_{t_2=0}^{t_2=\tau} \left[\int_{t_1=0}^{t_1=t_2} a(t_1) dt_1 \right] dt_2 \quad (8)$$

som sammenholdt med ligning (7) igen giver resultatet i ligning (6).

Men, som sagt, løsningen af opgaven ved antagelse af konstant a var OK. Det afgørende, breddeopgaverne skal træne, er evnen til formaliserende fysisk problemløsning. At kunne løse bredere og mere uskarpt formulerede problemer ved at identificere et forenklet og formelt formuleret matematisk/fysisk kerneproblem, hvis løsning fanger en essens for svaret på det løsere formulerede problem. I den sammenhæng kan udvidelsen fra konstant a til tidsligt varierende $a(t)$ betragtes som mere teknisk end essentiel.

For tøndefaldsproblemet som projektkim for et 15 ECTS projektarbejde på den naturvidenskabelige bacheloruddannelse på RUC forholder det sig helt anderledes. Problemet inviterer til eksperimentelle undersøgelser. For at sammenholde teori og eksperiment må k så måles eller beregnes for forskellige foreliggende tønders. Og følsomheden af resultatet i ligning (6) af antagelsen om konstant a vurderes. Hvilket da leder til udvidelsen af rækkevidden af ligning (6) via ligningerne (7) og (8).

Et ideelt RUC projekt drejer sig ikke om at gå på jagt efter gemte essenser, som breddeopgaverne gør. Her drejer det sig netop om selvstændigt løbende at udvide og justere udgangsproblemet i takt med løbende problemafklaringer. Udover rækken af opdukkende problemer i sammenhæng med udførelsen af det eksperimentelle arbejde, kunne det

også tænkes, at spørgsmålet om skridning dukkede op som teoretisk problem.

Så længe a ikke er for stor har vi ren rulning med G givet ved indsættelse af ligning (3) i ligning (2):

$$G = \frac{kma}{1+k}. \quad (9)$$

Skridning indtræffer, når G ifølge ligning (9) overskrider $\mu_s mg$, hvor μ_s er den statiske gnidningskoefficient og g tyngdefeltstyrken. Tønden skrider derfor i stedet for at rulle, når a overstiger a_{kr} givet ved:

$$a_{kr} = \frac{k+1}{k} \mu_s g \quad (10)$$

For en tom tønde med radius r og højde h og samme vægtykkelse overalt er k givet ved:

$$k = \frac{r+2h}{2r+2h}. \quad (11)$$

Som et lidt realistisk eksempel kan vi vælge $h = 4r$. Da er k ifølge formelen 0,9. For stål imod stål er μ_s lig med 0,7. Indsættes det sammen med $k = 0,9$ i ligning (10) fås $a_{kr} = 1,5g$. Det er en ret voldsom acceleration, som vistnok sjældent forekommer for lastbiler, bortset fra i ulykkestilfælde.

Men i et projektarbejde kunne denne grænse måske udfordres. I så tilfælde udvikler der sig en kaskade af bevægelsesforløb at undersøge og regne på. Bevægelsen på

ladet er givet ved ligning (1), hvor G er givet ved ligning (9) i perioder, hvor a er mindre end a_{kr} . I perioder, hvor a er større end a_{kr} , er G i ligning (1) derimod givet ved $\mu_d mg$, hvor μ_d er den dynamiske gnidningskoefficient (for stål imod stål 0,6).

Projektarbejdet kunne også udvides i retning af tønder med asymmetrisk massefordeling. Eller tønder med skvulpende væske i.

Det er en pointe ved projektarbejdet på RUC, at det er de studerende selv, der foretager dets løbende problemudvikling. Så jeg stopper med antydninger af retninger af mulige forløb her, idet jeg håber at have illustreret den didaktisk forskellige situation mellem at arbejde med en breddeopgave som træning i fysisk problemløsning og at benytte den som afsæt for et projektarbejde med dets større spektrum af læringsmål.

Breddeopgave 70. Acceleration i inhomogent tyngdefelt

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen juni 2014, nr. 70 i rækken her i KVANT):

En frit svævende stang med retning mod Jordens centrum er så lang, at tyngdefeltet er af forskellig størrelse i de to ender af stangen. Hvor stor er stangens acceleration imod Jorden? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af KVANT.

Foreningsnyt – foredrag i efteråret 2016

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Sep.				
12/9	19.30	Tyngdebølger	Søren Brandt	SNU
12/9	19.45	Solen og stjernerne	Anja C. Andersen	AS (Aarh)
19/9	19.15	Grundstofferne	Camilla S. Hansen	AS (Kbh)
Okt.				
3/10	19.30	Saftstrømning i træerne – hvordan kan det mon løbe rundt?	Tomas Bohr	SNU
3/10	19.45	Grundstofferne	Camilla S. Hansen	AS (Aarh)
10/10	19.15	Kosmiske eksplosioner	Maximilian Stritzinger	AS (Kbh)
24/10	19.30	Med Ørsted på jagt efter lyset. Uddeling af H.C. Ørsted Medaljen i sølv. Bemærk ændret adresse: Lundbeck Auditoriet, Københavns Biocenter, Københavns Universitet, Ole Maaløes Vej 5, 2200 København N	Anja C. Andersen	SNU
24/10	19.45	Kosmiske eksplosioner	Maximilian Stritzinger	AS (Aarh)
Nov.				
7/11	19.15	Solsystemet	Morten Bo Madsen	AS (Kbh)
14/11	19.30	From the atom to the computer and back again. Uddeling af H.C. Ørsted Medaljen i bronze	Charles Marcus	SNU
14/11	19.45	Solsystemet	Morten Bo Madsen	AS (Aarh)
28/11	19.15	Exoplaneter	Uffe Grå Jørgensen	AS (Kbh)
Dec.				
5/12	19.30	Nattelivet i hjernen	Maiken Nedergaard	SNU
5/12	19.45	Exoplaneter	Uffe Grå Jørgensen	AS (Aarh)

AS (Kbh): Astron. Selskab (Kbh), Aud. 2, H.C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 Kbh Ø (www.astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarh), Matematisk Inst., Aarhus Univ., Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, lokale G122, 8000 Aarhus C.

SNU: Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K (www.naturvidenskab.net, www.facebook.com/SNU1824).

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

SNU byder på en række spændende foredrag om forskellige emner. Man behøver ikke at være medlem af SNU for at komme til foredragene. Alle er hjertelig velkomne!

H.C. Ørsted Medaljen 2016 til en inspirerende gymnasielærer: Kender du en gymnasielærer, som har evnen til at formidle naturvidenskab på en levende, inspirerende og fornem måde? Eller vil du gerne udtrykke en anerkendelse til en inspirerende og hjælpsom kollega? Så har du måske en kandidat til modtagelse af H.C. Ørsted Medaljen for fornem

formidling af naturvidenskab i de gymnasiale uddannelser.

Fristen for indstilling til H.C. Ørsted Medaljen 2016 er den 10. oktober 2016. Indstillingen skal stiles til SNU's direktion (mail: snu@naturvidenskab.net) og skal naturligtvis begrundes – gerne fra flere sider og gerne med konkrete eksempler på lærerens virke. Se nærmere information på: www.facebook.com/SNU1824. Medaljen i bronze uddeles den 14. november i forbindelse med et foredrag.

I år uddeler SNU desuden H.C. Ørsted Medaljen i sølv til Anja C. Andersen den 24. oktober, hvor hun samtidig vil holde et populært foredrag om sin forskning.

Temaet for forårets foredragsrække er "Astronomiske gennembrud gennem tiden". I 2016 fejrer vi 100-årsjubilæet for Astronomisk Selskab der blev grundlagt i oktober 1916. I

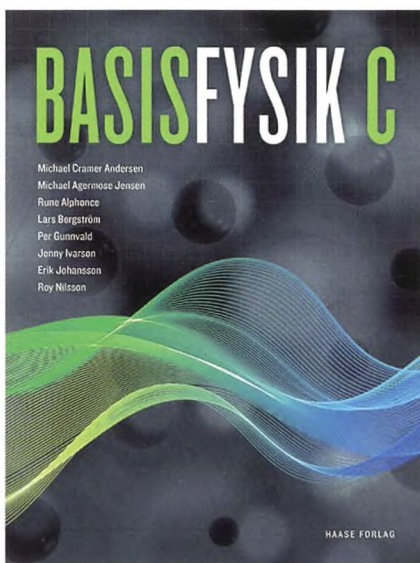
denne række af fem foredrag i foråret 2016, og efterfølgende i fem foredrag i efteråret 2016, tager vi et blik tilbage på de største gennembrud i den astronomiske forskning i dette tidsrum fra 1916 til 2016. Ved cand. scient., ph.d. Jens Jessen-Hansen og professor mso Johan Fynbo.

Aktuelle bøger

Af Anja Skaar Jacobsen

Ny lærebog til Fysik C

Michael Cramer Andersen, Michael Agermose Jensen m.fl. "BasisFysik C". Haase Forlag 2016 (www.haase.dk), 320 sider, 245 kr. Elektronisk version 62,50 kr.(gennem lix.com).



Det er modigt at udgive gymnasielærebøger i en reformtid, men her har vi at gøre med en ambitiøs og meget anvendelig fysik C lærebog i et handy bærbart soft-cover B5 format. Den kan varmt anbefales, og hvis jeg havde muligheden i disse sparetider, ville jeg gøre brug af den. Bogen findes også i en elektronisk udgave, som man køber en 3-årig licens til.

Udviklingen synes måske ellers at gå i retning af elektroniske interaktive lærebøger. Der kan være fordele ved en I-bog, hvor man har mulighed for at vise bevægelige billeder og animationer. Det giver god formidling af f.eks. bølgefænomener og en hoppende basketball, og derudover kan man lave interaktive quizzer som opfølgning på de forskellige afsnit. Eleven medbringer sin bog på computeren, så hun eller han har en bog mindre i tasken. Det sidste kan klares med den elektroniske udgave af *BasisFysik C*. På den anden side er vi stadig mange inkl. VUC-kursister (det er nok en anden situation med stx-elever), som ikke bryder os om at læse på en skærm.

Nogle lærebøger, navnlig *FysikCbogen*, indeholder meget lidt tekst ud over definitioner og billeder og det er derfor op til læreren at formidle beskrivelsen – hvilket også er fint nok. *BasisFysik C* indeholder til sammenligning forholdsvis meget tekst i form af kvalitative beskrivelser og det synes jeg er en styrke ved bogen. Det gør den mere anvendelig for elever og kursister. Altså hvis man da ellers kan få dem til at læse i en bog. Det er dog en balance. Der kan sagtens være for meget tekst i en lærebog.

BasisFysik C er omfattende med mange emner, hvoraf nogle ofte først behandles på B-niveauet såsom bevægelse med konstant acceleration, begrebet arbejde og et afsnit om radioaktivitet. Til gengæld nævnes brydningsfænomener ikke. Det er godt, at bogen giver læreren mulighed for frit at udvælge, hvilket stof hun eller han ønsker at medtage i undervisningen inden for bekendtgørelsens rammer.

Bogen følger en traditionel opbygning efter klassiske emner: masse, densitet, bevægelse, energi osv. Det er i modsætning til en tematiseret og problemorienteret tilgang som findes i *Aktiv Fysik C-bogen*. På VUC, hvor alle kursister skal til eksamen og hvor der ikke er krav til fysik om at indgå i tværfaglige samarbejder, kan den klassiske struktur være en fordel. Ligeledes er *BasisFysik C* rigtig god for de elever og kursister, der fortsætter på B-niveauet. De elever kan læse en teaser om B-niveauet sidst i bogen. Den klassiske struktur gør også bogen mere systematisk, og det tror jeg er en støtte for de svageste elever og kursister. På den anden side bidrager den lidt gammeldags form måske ikke til at fange talentfulde ikke-allerede-naturvidenskabs-mindede ind i folden. For dem giver den tematiserede og problemorienterede tilgang måske anledning til mere begejstring.

Til bogens elevvenlige struktur hører også, at man finder definitioner ude i venstre margen, sådan at man hurtigt kan orientere sig i et afsnit. Derudover gentages definitionerne og andre pointer i en fin sammenfatning i slutningen af hvert kapitel. De rent matematiske definitioner findes i en nyttig formelsamling bag i bogen. En formelsamling er noget der ofte efterlyses af elever og kursister. Bag i bogen findes også de vigtige tabeller over præfikser og græske bogstaver, og derudover har forfatterne medtaget en tabel over fysiske størrelser, hvoraf det fremgår at f.eks. a og A kan have flere betydninger. Det er alt sammen rigtig godt og elevvenligt. Det er også skønt med opdaterede tabeller og grafer, f.eks. i forbindelse med udviklingen af vindenergi. Generelt er det et godt afsnit om bæredygtighed.

Bogen giver forslag til mange sjove forsøg, både enkle kvalitative og mere detaljerede kvantitative forsøg, og bogen er også forsynet med en rapportskabelon som et appendiks. Undervejs i teksten er der små gode "tænke"-opgaver, som tvinger læseren til at stoppe op og overveje det hun eller han lige har læst. Efter hvert afsnit er der en række relaterede opgaver. Der er mange flotte illustrationer og fotos, men det er ikke altid læseren får at vide hvad de viser. F.eks. nævnes det ikke, at det er et boblekammerbillede, der vises s. 135.

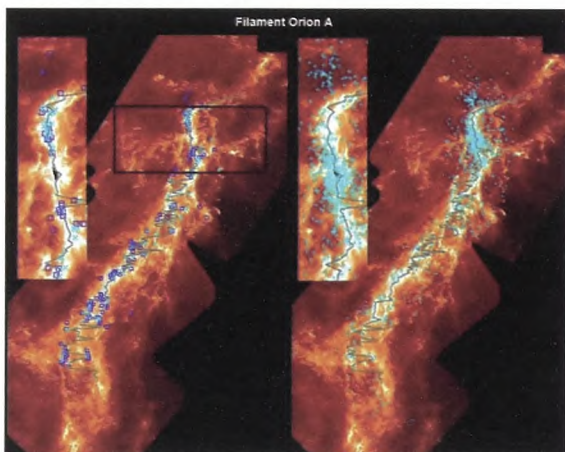
Jeg savner en problematisering af Richard Feynman-citatet s. 133: "Alt det, dyr gør, gør atomer. Med andre ord, der er ikke noget af det, som levende væsner gør, der ikke kan forstås ud fra det synspunkt, at de er lavet af atomer, der opfører sig i overensstemmelse med fysikkens love." Man kunne for eksempel bede eleverne diskutere denne ubeskedne reduktionistiske påstand, altså at al naturvidenskab i bund og grund kan reduceres til fysik. Den for mig at se forældede og uheldige videnskabssteoretiske holdning synes også at ligge til grund for bogens indledning om hvad fysik er: "Fysikken forsøger som udgangspunkt at beskrive hele naturen." Det er noget vrøvl.

ASJ

Af *Sven Munk, KVANT*

Magnetfelter hjælper stjernedannelse

ASTRONOMI. Astronomer har undret sig over, at stjernehobe kan dannes i løbet af få millioner år. Et par forskere har nu fremlagt et bud på, hvordan dette kan ske. Idéen er, at magnetfelter får filamenter af støv og gas til at svinge frem og tilbage. Herved skulle chancen øges for at materiale af denne art hurtigere koncentrerer sig i rummet. Computersimuleringer og observationer skal afdække, om dette er en korrekt hypotese. Billedet t.v. har indtegnet placeringen af protostjerner, mens unge stjerner ses t.h.



I over 300 år har man vidst, at stjerner dannes ved sammentrækning af støvskyer, men først for 50 år siden blev man opmærksom på, at sådanne støvansamlinger er indlejret i en filamentagtig struktur. Forskerne har nu underkastet det store filament *Orion A* et detaljeret studium med henblik på fordelingen af stof, magnetfelter og stjerner i den nærmeste omegn. De er nået til den opfattelse, at tyngdekraften alene ikke kan koncentrere støvskyerne. De understreger, at filamenterne har stor betydning for denne proces. De påpeger, at protostjerner hovedsagelig findes inde i filamenterne.

Kilde: Amelia M. Stutz, Andrew Gould, Slingshot Mechanism in Orion: Kinematic Evidence For Ejection of Protostars by Filaments, *Astronomy & Astrophysics* vol. **590**, juni 2016, <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201527979>.

Ung jord med tynd atmosfære

ATMOSFÆREFYSIK. Da Jorden var halvt så gammel som nu, skønner forskere, at trykket af atmosfæren kun var det halve af nutidens tryk. Dette er resultatet af analyser af fossile gasindlejringer i lavasten. Udsagnet er i modstrid med en udbredt opfattelse af, at atmosfæren kunne være tættere i Jordens tidlige historie. Lavasten gemmer på en historie om forholdene for mange milliarder år siden.



Konkret blev lavasten fra Pilbara-Kraton (Australien) gennemlyst med røntgenstråling. Denne lava størknede for 2,7 mia. år siden. Da lavaen størknede indeholdt den små luftlommer, som dog senere er blevet fyldt op med mineraler. Man finder således ingen gas fra disse tider, men kun geometriske former af de luftlommer, som oprindeligt blev dannet. På dette tidspunkt var der ikke meget ilt, og man antager at det meste var kvælstof (nitrogen). Forskerne vurderer, at lufttrykket var 210 mbar. Som en øvre grænse har de sat 500 mbar.

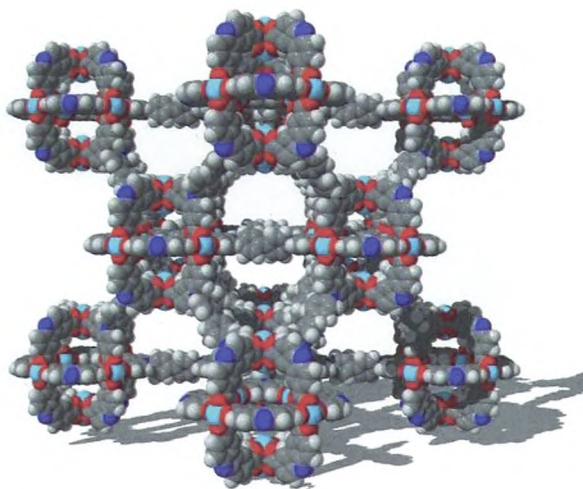
Forskerne mener som mange andre, at der var flydende vand. De peger dog på et vigtigt aspekt, nemlig ved så lavt lufttryk koger vand ved 60 °C. At det overhovedet skulle have været varmt nok til at holde vand flydende er ikke indlysende. Solen var svagere, Jorden roterede hurtigere og månen var tættere på.

I det lange perspektiv kan dette arbejde være særdeles interessant for udforskningen af exoplaneter.

Kilde: Sanjoy M. Som et al., Earth's air pressure 2.7 billion years ago constrained to less than half of modern levels, *Nature Geoscience*, vol. **9**, 448-451, maj 2016, <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2713>; Blue Marble Space Institute of Science, <http://www.bmsis.org>.

Molekyle virker som ballon

STRUKTURKEMI. Hverdagslivets erfaring er, at porøse materialer kan/vil absorbere mere gas i takt med at trykket vokser. Denne viden udnyttes fx når kultvejlte skal trækkes ud af røggas. Forskere beskriver nu et stof, som fungerer modsat. Jo større tryk desto mere frigjort gas – en effekt forskerne betegner negativ gasabsorption. En analogi kunne være sammenligningen med en ballon, der trykkes på.



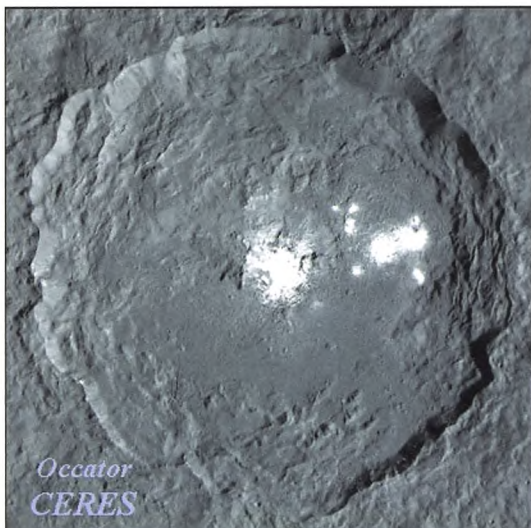
Forskernes egentlige projekt var at lagre metan (gasdrevne biler) så effektivt som muligt. Undervejs i arbejdet dukkede et metalorganisk netværk op – betegnet DUT-49 – bestående af store grupper af organiske molekyler lejret omkring kobber-atomer. Ved stuetemperatur blev stoffet testet med 110 bar. Under disse betingelser kunnet 1 kg stof opsuge 0,3 kg metan.

En efterfølgende afkøling til –162 °C afslørede en helt uventet egenskab. Ved et tryk på 100 bar blev der mod forventning frigjort metan. Altså: trykket steg og der blev frigjort mere metan. En analyse der anvendte synkrotronstråling viste, at det indre (fri) volumen i det metalorganiske netværk blev halveret, når trykket blev stort.

Kilde: A pressure-amplifying framework material with negative gas adsorption transitions, Simon Krause et al.; *Nature*, 2016, <http://dx.doi.org/10.1038/nature17430>.

Hilsen fra Ceres

PLANETFYSIK.

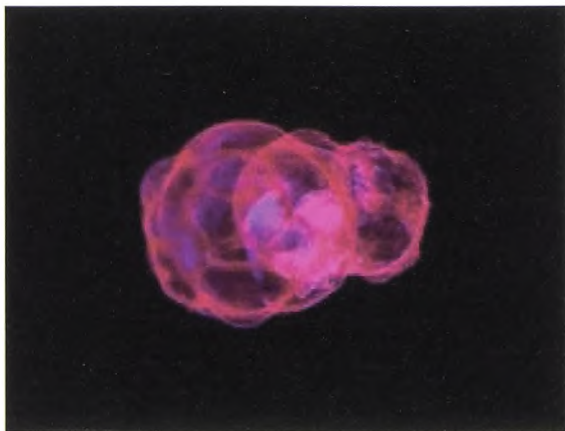


Dværgplaneten Ceres har et stort krater med en diameter på 92 km og en dybde på 4 km som vist på billedet. Krateret "Occator" er det mest lysreflekterende område på dette himmellegeme. Det er rumsonden Dawn, der har sendt billedet til Jorden.

Kilde: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA/PSI.

Stjerneeksplosion i nabolaget

ASTRONOMI. Gennem analyse af sedimenter fra Stillehavet, Atlanterhavet og Det indiske Ocean kan forskere afsløre, at Jorden er blevet ramt af stråling (atomer) fra to supernovaer for et par millioner år siden. Det skønnes, at disse supernovaer befandt sig omkring 300 lysår væk. Dét, der afslørede disse supernovaer, var tilstedeværelsen af jernisotopen jern-60, ^{60}Fe , i sedimenterne. Det er ikke en jernisotop, som findes naturligt på jorden. Jern-60 henfalder med en halveringstid på 2,6 mio. år. Så chancen at finde rester fra meget tidlige supernovaer er nok forsvindende. Billedet illustrerer, hvorledes en sky af jern-60 spredes af en supernova.



De første sedimentprøver blev indsamlet for 10 år siden. Tidsmæssigt rakte det 11 mio. år tilbage. Analyserne afslørede, at jernisotopen jern-60 fandtes i to "tidsbånd": 1,5-3,2 mio. år og 6,5-8,7 mio. år. Astronomerne er tilbøjelige til at placere de to supernovaer i stjernegruppen Scorpions-Centaurus og heraf afledes så afstanden 300 lysår.

Kilde: D. Breitschwerdt et al., The locations of recent supernovae near the Sun from modelling ^{60}Fe transport; *Nature*, vol. **532**, 73-76, april 2016, <http://dx.doi.org/10.1038/nature17424>; A. Wallner et al., Recent near-Earth supernovae probed by global deposition of interstellar radioactive ^{60}Fe , vol. **532**, 69-72, april 2016, <http://dx.doi.org/10.1038/nature17196>.

ExoMars ankommer snart

PLANETFYSIK. ESA's rumsonde *ExoMars* blev afsendt den 14. marts i år fra Kazakstan og forventes at nå Mars i oktober 2016. I virkeligheden er der to rumsonder på vej, den anden er landingsfartøjet *Schiaparelli*. Landingsfartøjet adskilles fra hovedmodulet 3 dage før ankomsten. Strømforsyningen (batteriet) på *Schiaparelli* er dimensioneret til at holde i 8 dage.

Billedet t.v. viser *Trace Gas Orbiter*, der skal omkredse Mars i en højde på 400 km og "snuse" efter gassen metan. Billedet t.h. viser landeren, som bl.a. skal afprøve metoden til blød landing i 2018.

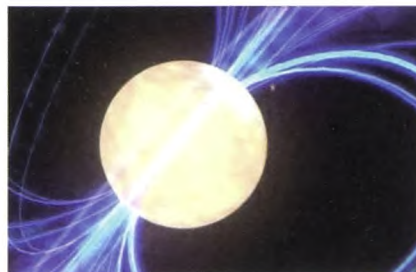


Den europæiske sonde *Mars Express*, opsendt 2003 og stadig aktiv, afslørede, at der er metan på Mars. *Trace Gas Orbiter* har måleudstyr med større følsomhed. Instrumenteringen gør det muligt at bestemme fordelingen af isotoper i den opfangede gas. Orbiter vil specielt lede efter absorptionsbånd i Mars-atmosfæren, når Solen står op – og går ned på Mars. Der bruges også en anden procedure, hvor solstråling reflekteres fra Mars-overfladen analyseres.

Kilde: Robotic Exploration of Mars, <http://exploration.esa.int/mars/>

Mysterium: Radioglimt

ASTRONOMI. Kosmiske radioglimt er ret sjældne og med en varighed, som måles i millisekunder. Desuden er det stadig uklart, hvilke fysiske mekanismer, som frembringer sådanne glimt. Kort sagt: man kan ikke indstille radioteleskopet mod et bestemt punkt på himmelhvelvet og forvente at fange et radioglimt. Forskerne mener dog at vide, at kilderne befinder sig i fjerne galakser. Med lidt held har astronomerne identificeret en kilde, som har udsendt blink mere end én gang, nemlig 11 gange. Et radioteleskop i Australien opfangede et radioblink i 2006. Dette blev fulgt op med gennemgang af arkiverne, hvor man fandt data om en hændelse i 2001.



Billedet viser en mulig kandidat, nemlig en neutronstjerne omgivet af kraftige magnetfelter.

I 2015 blev der med Jodrell Bank Observatory i England lokaliseret en hurtig radioblinker. Kilden befinder sig i en galakse 6 mia. lysår borte. Forskere på feltet har heftige diskussioner om mulige forklarings valør.

Kilder: L.G. Spiller et al., A repeating fast radio burst, *Nature* vol. **531**, 202-205, marts 2016, <http://dx.doi.org/10.1038/nature17168>; Arecibo Observatory, <https://www.naic.edu>; Radioastronomische Fundamentalphysik, Max-Planck-Institut für Radioastronomie, <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/forschung/fundamental>.

Landgreven i Kassel og Tycho Brahe på Hven

Af Erik Høg, Niels Bohr Institutet

Tycho Brahe var kendt som sin tids største astronom og hans observationer fik afgørende betydning for videnskabens udvikling. Men han må dele æren for astronomiens fornyelse med Landgreve Wilhelm IV i Kassel, hvad der først for nylig er blevet fuldt erkendt. Omkring 1566 opnåede Wilhelm meget bedre nøjagtighed for stjerners positioner end alle tidligere astronomer, og tyve år senere målte man i Kassel med en nøjagtighed på ét bueminut, hvad Tycho Brahe nåede næsten samtidig. Vi skal følge denne udvikling og den gensidige læreproces mellem Kassel og Hven – som ikke var uden dramatik.

1500-tallet – Hven og Kassel

Vi kan takke Luther, Kopernikus og Tycho Brahe for tre store tanker. Martin Luther sagde, at mennesker skal læse Guds egne ord i Bibelen, de skal ikke kun høre, hvad Paven siger på latin. De reformer, der fulgte, blev meget omfattende. En følge var, at en stor del af det gods og den rigdom, som kirker og klostre havde samlet, tilfaldt konger og fyrster i de reformerte lande, i Danmark blev krongodset derved tredoblet. Tiende skulle stadig opkræves, men en trediedel heraf gik nu til kongens kasse i stedet for til bispernes. En anden følge var, at videnskaben friere kunne søge at finde Guds plan for verden gennem studium og måling af naturen. Tanken om *den almægtige Gud som verdens arkitekt* (se figur 1) var modnet gennem århundreder i det kristne Europa.

Stadig i første halvdel af 1500-tallet sagde Nikolaus Kopernikus, at Jorden ikke er verdens centrum, men at Jorden og alle planeterne kredser om Solen – det vender vi tilbage til.



Figur 1. Gud som verdens arkitekt. Fra middelalderbibel, Codex Vindobonensis, ca. 1250.

I århundredets sidste halvdel opdagede Tycho Brahe, at selve verdensrummet slet ikke er indrettet, som den store filosof Aristoteles havde tænkt sig til for næsten to tusind år siden. Det indså Tycho Brahe efter nøjagtig måling af positioner for den nye stjerne, der viste sig 1572 i stjernebilledet Kassiopeia. Ved at måle stjernens position i nogen tid kunne han bevise, at stjernen var længere borte end Månen. Men derude blandt vandrestjernerne, planeterne, lærte Aristoteles jo, at der kun er planeter. Så måtte den være helt ude

blandt fiksstjernerne, men der var alt jo uforanderligt. Tycho Brahe drog den slutning, at det var en helt ny fiksstjerne, og at det derfor var “det største mirakel siden verdens skabelse.” Undersøgelsen af “stella nova” og bogen derom fra 1573 gjorde den 27-årige Tycho Brahe berømt i hele Europa.

Denne artikel skal følge Tycho Brahes arbejde på Hven og det tilsvarende arbejde i Kassel, hvor Wilhelm IV, Landgreve af Hessen-Kassel, allerede fra 1560 var begyndt at måle stjerners positioner meget nøjagtigt. De nye instrumenter som blev designet og bygget de to steder var meget forskellige, store instrumenter af træ og jern på Hven overfor næsten lige så store instrumenter i Kassel, men i metal og finere mekanisk udførelse. Det viste sig, at finmekanikken i Kassel var nøjagtig, og det var vejen frem. Samspillet mellem Hven og Kassel kan følges gennem den megen litteratur der nu findes.

I artiklen gennemgås astronomiens udvikling gennem oldtid og middelalder som baggrund for forståelsen af det, der skete i Europa i 1500-tallet gennem design og konstruktion af nye astronomiske instrumenter og nye metoder til observation og beregninger. Målefejlen på positioner blev bragt ned, som det fremgår af de nyeste undersøgelser af de gamle stjernekataloger, idet man nu kan projicere de moderne positioner tilbage i tiden med overlegen nøjagtighed.

Hovedsagen i denne fremstilling skal være Tychos instrumenter til observation af stjerner og planeter og en sammenligning med arbejdet i Kassel, så derfor vil jeg ikke gå meget ind på Tychos politiske opgaver, observationer af kometer, eller andre sider af livet på Hven, også fordi denne del af hans liv er skildret ofte før. To fremragende bøger på dansk om Tycho Brahes liv og virke er udgivet af Wittendorff [1] og Christianson [2] og en god bog på engelsk er af Christianson [3].

Fra astronomi og astrologi til moderne astrometri

Astronomiske målinger bestod i oldtid og middelalder mest i måling af positioner for stjerner, planeter, Månen og Solen. Målingerne blev brugt til at holde rede på tidsregningen og kalenderen, hvad der var vigtigt for forudsigelsen af Nilens oversvømmelser i Egypten og af påsken i det kristne Europa. De blev også brugt ved navigation og ved måling af Jordens omkreds for 2200 år siden. Den astrologiske tydning af himmelske fænomener som kometer spillede også en stor rolle, og i Kina var astronomerne kejserens ansatte, der risikerede dødsstraf, hvis de brød deres tavshedspligt, fordi de

astrologiske tydninger var statshemmeligheder, der kun vedkom kejseren.

I vor tid fra omkring år 1900 taler man om to grene af astronomien, dels "astrofysik", der drejer sig om stjerner og alt i universet som fysiske objekter, og dels "astrometri" til nøjagtig måling af stjerners positioner, bevægelser og afstande som det nødvendige fundament for alle grene af astrofysikken. Tycho Brahe dyrkede astrometri, men også astrofysik, da han tydede den nye stjerne som værende en ny fiksstjerne, idet han anvendte sin tids fysik skabt af Aristoteles. Derimod var det astrologi, når han opstillede horoskoper og uddrog varsler af nye kometer.

Ole Rømer (1644-1710) opdagede i 1675 at lyset har en endelig hastighed, det var ny fysik opdaget gennem astrofysiske målinger af Jupiters måne Io. Rømer fortsatte Tycho Brahers arbejde ved at udvikle og observere med nye astrometriske instrumenter. Hans meridiankreds blev opstillet nær København i 1704 og fik betydning i de følgende århundreder ved at blive et astronomisk hovedinstrument. Denne type instrument blev først forældet, da rumteknologien kom til. Den første astrometriske satellit Hipparcos opsendt af ESA i 1989 skabte et helt nyt fundament – bemærk at den græske astronom staves HipparCHos. Dette fundament vil blive forbedret gennem Gaia-satellitten opsendt i 2013, og som er en million gange så effektiv. Se tidligere artikler i Kvant af forfatteren [4, 5, 6].

Oldtid og middelalder

Den græsk-hellenske astronom Hipparchos fra Nicæa (-190 til -120) kaldet "astronomiens fader" samlede stjernedata af babylonsk oprindelse og supplerede med egne observationer. 250 år senere føjede Claudius Ptolemæus (100-180) i Alexandria flere observationer til, og det hele blev offentliggjort i hans "Megiste Syntaxis" (største sammenstilling). Dette værk hedder i arabisk oversættelse "Almagest" (den store bog), og det forblev i 1500 år den store autoritet. Værket indeholder også den geocentriske verdensmodel, idet Ptolemæus valgte at sætte Jorden i centrum, selvom han har kendt Aristarch af Samos' model, hvor Solen er centrum for Jordens og alle planeters baner. Ptolemæus regnes som en af de største astronomer nogensinde, og man kan ikke laste ham for, at hans verdensbillede blev det eneste gældende i hele middelalderen. Men både den arabisk-muslimske videnskab, de kristne filosoffer og kirkens ledere holdt fast ved det.

Almagest rummer et katalog med positioner for 1028 stjerner, angivet med hver stjernes længde og bredde i forhold til ekliptika, og Ptolemæus er den første der anvender et koordinatsystem på himlen. Kataloget får senere stor praktisk betydning for søfarende, idet måling om natten af stjerners højde over horisonten, når de passerer meridianen, eller måling af Solens middagshøjde bestemmer et skibs breddegrad. Bestemmelse af skibets længdegrad var meget vanskeligere, hvad vi ikke skal komme ind på.

Ptolemæus skrev andre værker om geografi, optik og astrologi, hvor han systematisk gjorde rede for

planeters og stjerners indflydelse på livet på Jorden og på det enkelte menneskes skæbne. Med disse værker om praktiske og åndelige emner var Ptolemæus en kendt skikkelse for middelalderens elite, men det er ikke derfor han tit afbildes med en kongekrone på hovedet, se figur 2. I hvert fald skyldtes det også, at man dengang forvekslede ham med Egyptens mange konger med navnet Ptolemæus.



Figur 2. Ptolemæus måler med krone på hovedet. Bag ham står Astronomia og hjælper ham. (Kilde: G. Reisch 1512).

Orientaliske fyrster bevarede interessen for den praktiske astronomi. Således grundlagde den mongolske fyrste Hulagu i 1259 et nyt observatorium i Maragha (ved Täbris) og Djengis Khans barnebarn, Ulugh Beg, byggede i 1428 ved Samarkand en kæmpe 90 graders murkvadrant med en radius på 40,4 meter, der stadig kan ses. Den benyttede han til måling af positioner for de 1028 stjerner i Almagest, der blev samlet i et katalog i 1437. Det forblev dog ukendt i Europa indtil 1665 og fik derfor ingen betydning for udviklingen i Europa. Kataloget indeholder også størrelsesklasser (et mål for stjerners lysstyrke) fra astronomen al-Sufi i 900-tallet.

I Europa blev Ptolemæus først kendt gennem oversættelser fra arabisk, især gennem udgaver med forenkling af den vanskelige matematik ved englænderen Johannes de Sacrobosco, engelsk: John of Holywood, (1195-1265), og som blev trykt i hele 240 udgaver i Europa.

Disse to kataloger blev undersøgt af Verbunt og Gent i 2012 [7], idet positionerne blev sammenlignet med Hipparcos-kataloget. Standardfejlen for ekliptisk længde er ca. 20 % større end for bredden, og for et Gaussisk fit er:

- Standardfejlen¹ hos Ptolemæus 25'
- Standardfejlen hos Ulugh Beg 20'

hvis man kun medtager stjerner med mindre fejl end 50'. Medtages stjerner op til 100' fås 10-15 % større fejl, så fejlfordelingen er ikke Gaussisk – til sammenligning har fuldmånen en diameter på 30 bueminutter.

Det viste sig, at en del af stjernerne i de to kataloger ligger meget langt fra virkelige stjerner på himlen, ca.

¹ Vinkelenhederne bueminut og buesekund angives ved tegnene ' og ", idet en grad er lig 60' eller 3600".

20 stjerner hos Ptolemæus og kun en eller to stjerner hos Ulugh Beg ligger mere end 150' borte. Kun én stjerne hos Ptolemæus og tre hos Ulugh Beg kan slet ikke identificeres med nogen stjerne. Disse tal vidner om den udmærkede kvalitet af begge kataloger.

I Nürnberg indrettede Johannes "Regiomontanus" Müller i 1400-tallet et observatorium og observerede stjerner og planeter systematisk. Dette blev i mange år videreført af Bernhard Walther og Georg Hartmann – så der var aktive astronomer, men de efterlod ikke noget stjernekatalog.

Nikolaus Kopernikus

I 1500-tallet var hovedemnet i astronomien forslaget om Solen i centrum for planeterne bevægelser, det heliocentriske system ved Nikolaus Kopernikus (1473-1543). Hans arbejde var færdigt omkring 1530, og kirkens ledere tog godt imod det i begyndelsen, men han vægrede sig ved at offentliggøre sit værk. Det er tvivlsomt, om udgivelsen var blevet påbegyndt i hans levetid, hvis ikke hans eneste elev, G.J. Rheticus, straks var blevet begejstret og i 1540 havde udgivet sin *Narratio Prima* (Første beretning) med argumenter for det nye system. Selve værket *De revolutionibus orbium coelestium* (Om himmelsfærernes kredsbevægelser), udkom i Kopernikus' dødsår 1543,

Kopernikus fremhævede, at forslaget ikke er nyt, idet det heliocentriske system allerede blev foreslået af Aristarch (ca. -310 til -230). Derved fulgte han tidens skik, hvorefter man fremmer sin sag ved at sige at ideen er gammel og ærværdig, i modsætning til vor tid hvor man hellere skal fremhæve det nye. Vi skal nu vende os mod de to steder, Kassel og Hven, hvor den store udvikling af måleteknikken skete.

Det følgende bygger på [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Landgreven i Kassel og Tycho Brahe

En central og vigtig person for den nye astronomi blev født i 1532 og kendes som Landgreve Wilhelm IV af Hessen-Kassel, figur 3 (øverst), der regerede fra 1567 til sin død i 1592. Wilhelm udmærkede sig ved intelligens og interesse for de aktuelle spørgsmål i tiden og han fik tilnavnet "den vise". Wilhelm var tidligt opmærksom på mangler i de gamle angivelser af positioner for Solen, Månen og planeter i forhold til stjerner, som baserede sig på observationer af islamiske astronomer. Det var mangler som også disse havde kendt siden as-Sufi i 900-tallet. Den klare stjerne Spica har en fejl på 27' hos Ptolemæus og der var systematiske fejl i stjernernes positioner på over 20'. Ingen astronomer har før Wilhelm gjort noget ved dette problem ud over at teoretisere, hvad der er forståeligt, når man ser, at kun en fyrste kunne have midler til at løse denne kæmpe opgave. Wilhelm IV besluttede at skaffe et sikkert fundament for kundskab om himlen ved måling af positioner for stjerner og planeter, mest ud fra sin praktiske interesse for planeture og astrologi, påviser [14]. Det første ur er fra 1559-1563 og viser planeterne stilling. Det tjente astrologiske formål og var dermed politisk nyttigt. Med dette praktiske syn på astronomien adskiller Wilhelm sig tydeligt fra Tycho Brahe. For Tycho var den videnskabelige indstilling om at naturen

kan erfares afgørende, i en tid hvor mange stadig siden oldtiden troede, at man alene ad tankens vej kunne forstå naturen.



Figur 3. Øverst: Landgreve Wilhelm IV. af Hessen-Kassel (1532-1592) med gemalinde Sabine, født hertuginde af Württemberg. Regneglobusen ses helt til venstre, et torquetum (se også figur 4) og en kvadrant i midten. Maleriet er dateret 1577 ved begge personer. Fra [12]. Nederst: Slottet i Kassel med to altaner til astronomiske observationer ved hjørnerne i sydvest og sydøst. Instrumenter blev kun stillet ud på en altan, når der skulle observeres. Fra [15].



Figur 4. Torquetum – dette apparat kunne måle i de tre koordinatsystemer: horisontal, ækvatorial og ekliptika. Fremstillet i Prag ca. 1590. Fra [15].

Indsigt i de astronomiske emner var for Wilhelm også en vej til at regere, for en prins i det 16. århundrede spillede astronomi en væsentlig rolle ifølge [14], og han nåede med sit fyrstehus til stor politisk anseelse i det tysk-romerske rige og sågar i Frankrig. Prins Wilhelms astronomilærere og rådgivere fra 1557 var Victorin Schönfeld, professor i matematik ved universitetet i Marburg, og de observerede himlen sammen.

Med tilbygning af to altaner på residensslottet, figur 3 (nederst), i Kassel skabte prins Wilhelm 1560/61 det første permanente observatorium i den tids Europa, og det blev benyttet i 37 år; slottet skimtes også midt i figur 3 (øverst). Det blev ødelagt ved en brand i 1811. Tycho Brahe betegner Landgreven som “den vigtigste astronom i Europa” og beretter, at Wilhelm mellem 1560 og 1563 “med egne øjne og hænder” har observeret 58 stjerner, det første Kassel katalog, og også den nye stjerne i 1572.

I 1575 indledte Tycho Brahe som 29-årig en ni måneders rejse gennem Europa for at finde det sted, hvor han ønskede at etablere sig. I april 1575 var han først gæst hos Landgreven i Kassel. Han rejste som den meget berømte astronom han var blevet efter udgivelsen af hans bog “Stella Nova”.

Han blev kun hen ved ti dage hos Wilhelm, da en lille prinsesse døde og Tychos ophold derfor måtte afkortes. Alligevel markerer dette korte besøg en milesten på vejen til den nye astronomi. Wilhelm fortalte med stor åbenhed om sine erfaringer og planer. Han overgav Tycho en afskrift af sit katalog fra 1567 og notater om kometen i 1568 samt supernovaen i 1572. Det vides ikke, om Tycho gengjaldt med sine tilsvarende notater ved denne lejlighed, men besøget blev indledning til en omfattende meget åben korrespondance indtil Landgreven døde i 1592. Tycho udgav 1596 disse breve i “Epistolarum Astronomicarum” på 350 sider.

Tycho fortsatte fra Kassel over Frankfurt, Freiburg og Basel til Venedig. Ved juletid vendte han tilbage til Danmark over Augsburg, Regensburg, – hvor Rudolf II blev kronet som tysk-romersk konge den 1. november – Nürnberg og Dresden. I sit skrift “Mechanica” fra 1598 skildrer han sin mening om Basel, hvorledes han i alle måder fandt dette sted at være det bedste.

Efter Tychos besøg i Kassel sendte Wilhelm et bud til den danske konge med en stærk anbefaling om at støtte Tycho. Udsendinge fra Frederik II besøgte Kassel kort efter og Wilhelm udtalte at “Tycho vil udrette store ting”. Efter hjemkomsten til Danmark blev Tycho modtaget meget venligt hos kongen og blev opfordret til at nævne sine ønsker. Da den forbavsede Tycho tøvede, opfordres han til at overveje sagen, hvad han gør sammen med sine rådgivere. I februar sendte kongen et ilbud, som efter et natligt ridt nåede frem til Knudstrup i Skåne to timer før solopgang, hvor Tycho endnu lå i sin seng. Nu forstod Tycho, at han måtte komme straks og han mødte Kongen i dennes jagthytte nær København samme dags aften. Kongen havde hørt om Tychos plan om at flytte til Tyskland, og desuden forstod han, at politiske og sociale forpligtelser kunne hindre Tycho Brahe i forskningen. Kongens nye tilbud omfattede diverse indtægter fra kronen fx fra et len i Norge og fra domkirken i Roskilde, og Tycho fik øen Hven i Øresund, dengang beliggende midt i det danske rige. Der kunne Tycho koncentrere sig om astronomien, og nu accepterede Tycho.

En anden følge af Tychos besøg i Kassel var, at Wilhelm genoptog arbejdet med astronomien, som ellers havde ligget stille siden han var blevet regerende Landgreve i 1567.

De første observationer i Kassel

Lige fra starten i 1560 uddannede Wilhelm instrumentmagere til sit observatorium, og Eberhard Baldewein (1525-1593) var den første. Denne fremstillede omkring 1561 en regneglobus (figur 5) der blev anvendt til beregninger, den var altså en analog regnemaskine, hvorpå stjerner blev nøje indtegnet ved hjælp af en spidspasser. Beregninger af de sfæriske formler var et kæmpe problem, selv multiplikation og division var vanskelige inden logaritmen blev opfundet. Det mest interessante instrument var en azimutalkvadrant i messing fra 1560 (figur 6), der stadig findes, det ældste apparat i verden af denne art helt af metal.



Figur 5. Regneglobus med 72 cm diameter fra Kassel. Fremstillet 1561-1563 af Eberhard Baldewein og Hermann Diepel. F. Staudacher.



Figur 6. Kvadrant med 40 cm radius brugt i Kassel på Landgrevens observatorium fra 1560 til hans første katalog. Den findes nu på museet i Kassel og kaldes “Wilhelmkvadranten”. Fremstillet af Baldewein. Fra [14].

Disse instrumenter og et torquetum, som ses i billedet af Landgreven, figur 3 (øverst), og i figur 4, benyttede Wilhelm personligt især mellem 1560 og 1567 til fremstilling af sit andet katalog med de samme 58 stjerner. Nøjagtigheden var på 2,2' i RA (rektascension)

og 4,6' i D (deklinations), altså 4-6 gange mindre fejl end hos Ulugh Beg. Et gennembrud til stor nøjagtighed blev altså nået i Kassel i 1567. Selvom Wilhelm jo ikke har kendt disse tal for nøjagtigheden, har han sikkert været overbevist om, at han var på rette vej. Dog gik han først videre med observationer 18 år senere.

Torquetum bruges slet ikke senere, da det blev erstattet af den nøjagtigere sekstant bygget af Jost Bürgi til måling af vinkler. Et torquetum havde imidlertid den yderligere funktion at udføre en tre-dimensional overførsel af data til en regneglobus ved hjælp af ringe, der definerer koordinatsystemet. Dette kunne ikke udføres med sekstanten.

Observationer i Kassel efter Tychos besøg

Som tidligere nævnt blev der kun observeret lidt efter 1567, men efter Tychos besøg i 1575 begyndte en ny aktiv fase med ansættelse den 15. juli 1579 af den svejtsiske urmager og astronom Jost Bürgi (1552-1632). Denne viste sig at være en gudbenådet instrumentmager, der i de kommende år fremstillede et stort antal måleinstrumenter og ure af højeste kvalitet. Fra 1579 fremstillede Bürgi en sekstant med 1,1 m radius. En horisontalkvadrant med 1,1 m radius fra 1559 blev udstyret med nye sigtemidler og inddelinger fra Bürgis hånd, og de to instrumenter er beskrevet og vist på figur 2 og 3 i [10]. I 1582 skrev Wilhelm til Kurfyrsten i Pfalz, at Jost Bürgi havde udviklet en måneteori, der var bedre end den, der blev anvendt til de "Alfonsinske Tabeller" og bedre end Kopernikus' teori.



Figur 7. Jost Bürgi (1552-1632).

I Kassel fik man i 1584 vigtige oplysninger om instrumenterne på Hven angående sigtemidler og aflæsning af skalaer, lige i rette tid til at ændre instrumenterne før en stor observationsserie skulle begynde. Det var Paul Wittich (1546-1586) der bragte disse oplysninger til Kassel efter et fire måneders ophold på Hven fire år tidligere, altså kort efter at Tycho havde begyndt observationer fra Uraniborg. Landgreven belønnede ham derfor med en guld kæde. Wilhelm skrev til Brahe, at "de matematiske instrumenter var blevet stærkt forbedret efter instruktioner fra Paul Wittich". I oktober 1585 meddelte Wilhelm stolt til Heinrich Rantzau, statholderen i de holstenske hertugdømmer, at man før knap kunne aflæse 2' skarpt, mens man

nu kunne aflæse mellem et halvt og et helt bueminut. Alt dette kom imidlertid som et chok for Tycho, fordi Wittich havde udgivet disse vigtige forbedringer af instrumenterne som værende hans, Wittichs, opfindelser uden at nævne at de skyldtes Tycho og hans stab, se figur 11.

Vi kan altså slutte, at erfaringer på Hven fik stor betydning for de fine resultater i Kassel, omend på en meget uskøn måde. Tycho var dog i stand til at komme sig over sin vrede, så den ikke gik ud over det gode forhold til Landgreven.

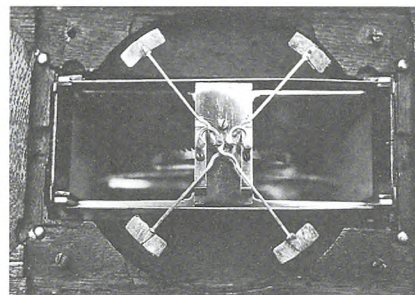
Rothmann og Bürgi observerer

I november 1584 blev astronomen Christoph Rothmann (1561-1601) ansat som hofmatematiker, og i januar 1585 begyndte Wilhelms tredje fiksstjerneprojekt. Fra 1585-1590 observerede Bürgi sammen med Landgreven og Rothmann med de således forbedrede instrumenter. Efter Rothmanns afgang observerede Bürgi alene fra 1590 til 1597 som "kommissarisk" hofastronom.

Jost Bürgis nye ure (figur 8 og 9) var forudsætning for anvendelse af en ny astronomisk målemetode, der siden er blevet standard i astronomien overalt, idet man målte det nøjagtige tidspunkt for en stjernes passage af en given retning. Især benyttedes meridianen, som betegner de retninger fra observatøren, der ligger på cirkelbuen fra syd over zenit til nord. Således når Solen sin største højde på himlen når den passerer meridianen.



Figur 8. Observatoriumsur med krydsslagshæmning, automatiseret optræk og savtandsur svarende til Kassel observatoriets sekundur fra 1585. Fremstillet af Jost Bürgi i Prag 1625. Fra [12].



Figur 9. Krydsslagshæmning af Jost Bürgi. To par masser er forbundet over tandhjul og svinger i modfase næsten isokront og harmonisk. Fra [12].

Observationsuret blev ofte aflæst med en nøjagtighed på et kvart minut og sjældent på 1/12 minut, hvad der svarer rimeligt til den nye forbedrede målenøjagtighed, idet en stjerne ved himlens ækvator bevæger sig et bueminut ($1'$) på 4 tidssekunder (4 s). Vinkelen på kvadrant og sekstant blev aflæst med en nøjagtighed på et eller et halvt bueminut. På meridianen målttes højde og tidspunkt for passagen, men uden for meridianen målttes tidspunktet for stjernens passage af en indstillet højde.

Denne målemetode blev i første omgang afvist af Tycho Brahe som ubrugelig efter hans egne erfaringer på grund af urenes unøjagtighed. Rothmann og Bürgi observerede sammen, idet Rothmann målte Solens eller stjernens kulminationstid med kvadranten, mens Bürgi kontrollerede urets gang og noterede tidspunktet. Aflæsning af kvadrantens højdeskala ved måling i meridianen gav deklinationen, idet observatoriets breddegrad blev bestemt ved observation af stjerner omkring polen. Dette var en ny metode, da breddegraden ellers altid bestemtes ved måling af Solens kulminationshøjde ved solhverv, men dette er jo kun muligt to gange om året.

Der blev etableret et net af nøjagtige referencestjerner, hvormed nye objekter hurtigt kunne positioneres. Kassel systemet skulle indeholde 68 referencestjerner, og halvdelen af dem var udmålt på tre måneder. Således havde man grundlaget for det tredje katalog med 121 stjerner, der forelå i 1586, og allerede i 1587 stod det fjerde katalog "den store Hessiske stjernefortegnelse" færdig med 384 stjerner. Hermed var Wilhelms mål nået om ca. 400 stjerner, og vi ved det ikke var hans hensigt at måle Ptolemæus' 1028 stjerner, som det ellers hyppigt er påstået.

Kataloget blev i 1587 skrevet på 36 dobbeltsider pergament i en repræsentativ form indeholdende en teoretisk redegørelse af Rothmann. En undersøgelse af A. Schrimpf (2016, privat kommunikation) viser nøjagtigheder på $1,17'$ og $1,10'$ for henholdsvis rektascension og deklination ved sammenligning med positioner målt med Hipparcos-satellitten.

Denne fejl på $1,1'$ er en reduktion til blot en tyvendel af fejlen hos de gamle forgængere og viser, at et gennembrud for astronomiske målinger blev nået i Kassel i 1587. Dette gennembrud i nøjagtighed tilskrives i litteraturen ellers udelukkende Tycho Brahes katalog fra 1598, en opfattelse der bør revideres. Gennembruddet er ikke blevet erkendt før Hamel (1998) gennemførte den første systematiske undersøgelse af kataloget fra Kassel [8]. Kataloget fik imidlertid ikke den betydning i samtiden, det fortjente, fordi det kun fandtes i nogle få afskrifter og først blev trykt i 1666 som appendix til Tycho Brahes observationsjournaler, altså på et tidspunkt da det kun havde historisk interesse.

Landgrevens katalog har ganske vist været astronomer bekendt, men dets betydning og kvalitet har været ukendt. Jeg selv har kun læst om det i den meget udbredte bog om astrometri af Eichhorn (1974) [16], hvor der (s. 101) omtales et katalog fra 1594 med positioner for 1004 stjerner og middelfejl på $6'$, mens det virkelige katalog fra 1587 med 384 stjerner havde fejl på kun $1,1'$.

Først gennem samtaler med professor A. Schrimpf i Marburg i november 2015 blev jeg klar over dette. Pannekoek [17] omtaler Landgreven meget positivt men uden talmæssige angivelser. Han skriver bl.a., "from Cassel came the first West-European catalogue of stars based on new measurements", og Landgrevens brev til kong Frederik om Tycho Brahe omtales som meget vigtigt. Om Tycho skriver Pannekoek, at middelfejlen ved sammenligning med moderne værdier ser ud til at være omkring $1'$.



Figur 10. Bürgi sekstant. Sekstant efter 1604 nu i Prag, muligvis fremstillet af Jost Bürgi. Radius er 1145 mm. Til transport eller opstilling på et bord eller en mur ved observationer kan sekstanten tages af stativet. Bürgi udvikler i 1582 en sådan sekstant med radius 1,1 m! Den kan betjenes af kun en observatør, mens Tychos store træsekstant (figur 12) kræver to observatører. Sekstanten er helt i metal, og viserstaven med spaltevisir føres via et drivtandhjul langs målebuen (limbus). Dette visir rettes mod den ene af de to stjerner man ønsker at måle vinkelen imellem, idet sekstanten drejes om de to akser, der ses i midten, og om en lodret akse. Et andet visir til den anden stjerne har formodentlig siddet på den ene ende af målebuen.

Efter Rothmanns bortrejse fra Kassel i 1590 intensiverede Bürgi sine egne observationer. Han udførte i løbet af de næste otte år over 1000 observationer af planeter i forhold til stjerner, og han observerede Solen, Månen og nogle stjerner. Sandsynligvis har Kepler benyttet sig af Bürgis mange observationer, så meget mere som Bürgi fra midt i 1603 stadig var i hans nærhed. Kepler verificerede Brahes data og supplerede dem, hvad der er særlig vigtigt ved Mars, som han observerede i 1602 og 1604 med en Bürgi sekstant, men offentligt roste han kun Tychos nøjagtighed. Kepler kunne overhovedet ikke risikere at nævne andre end Tycho i sine to hovedværker "Astronomia Nova" og "De Rudolfsinske Tavler", da Brahes arvinger meget strengt havde krævet, at han kun anvendte dennes data som betingelse for at få dem overladt.

Uraniborg bygges på Hven

Tycho Brahe begyndte at arrangere sig på Hven straks efter modtagelse af gaven fra Kongen, en gave Kongen kunne give uden at tage noget fra nogen adelsmand, for der havde aldrig før været nogen herremand på Hven. Derfor mødte Tycho mennesker, bønder, der altid havde kunnet bestemme over sig selv, og nu blev sat til at bygge et slot for Tycho, sammen med fagfolk

mest fra Holland. Hver gård skulle yde to dages arbejde om ugen fra solopgang til solnedgang, mens de til gengæld slap for at betale skat til kongen. Det had mod Tycho, der hurtigt oparbejdedes, har holdt sig næsten til vore dage, for jeg mødte for nogle år siden en mand, der inviterede mig hjem i sin stue. Der lå en smukt forarbejdet sten, som havde siddet i Tychos Uraniborg. Manden fortalte, at den tidligere sad i muren i faderens svinestald, og hver gang faderen gik forbi, spyttede faderen på den. I vore dage derimod er beboerne glade for den opmærksomhed de får takket være Tycho.

Det første spadestik til Brahes "himmelborg" (Uraniborg) blev taget i sommeren 1576 og grundstenen blev højtideligt lagt den 8. august, en dato der omhyggeligt blev valgt efter stjernerne. Da Tycho fyldte 30 den 14. december udførte han den første observation af Solen, og om vinteren fortsatte han med regelmæssige observationer for første gang i sit liv, ofte kun nogle minutter for at observere Solen eller en planet, 10-15 gange om måneden.

Det skulle snart vise sig, at den gunst han nød hos kongen trak ham ind i politiske sager, skønt han netop ville undgå dette. Han blev nomineret som rektor magnificus af universitet af et enstemmigt konsistorium i maj 1577. Tycho følte sig enormt beæret, men formåede at afslå æren med henvisning til hans mange opgaver på Hven. Den 1. juni skulle den ny prins døbes, og det måtte han nødvendigvis overvære i sit fornemste antræk. Han deltog dog nok ikke i alle festlighederne, der varede over to uger, for nu havde han fået sin første opgave fra kongen, at stille horoskopet for prinsen, den kommende Christian IV. Det gjorde han selvfølgelig meget omhyggeligt, idet det gav ham mulighed for derved at takke for den gunst han nød.

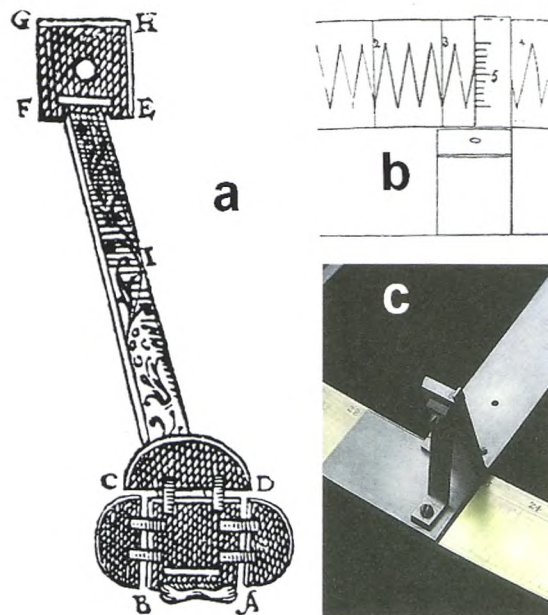
Man må sige, at Tycho havde et meget gammeldags verdenssyn og mange ejendommelige forestillinger, især ved begyndelsen af sit virke. Det har slået mig, hvor kolossalt springet er fra Tycho til Rømer, et hundrede år senere. Når man læser Rømer, fornemmer man en moderne person, man ville kunne føre en fornuftig samtale med, mens Tycho hører til i en formørket fortid.

Tychos instrumenter

I foråret 1577 fik Tycho sit første ur, formentlig fra den københavnske urmager Steffen Brenner, der havde arbejdet for hoffet. Uret viste ikke kun timer og minutter men også sekunder, men det var ikke godt nok, for i de næste fire år købte han yderligere tre ure. Tycho forsøgte længe at måle rektascensioner direkte fra stjernernes passagetider i meridianen, men i 1581 måtte han endelig erkende, at urene var for unøjagtige. Han gik derfor over til at forbinde stjernerne og Solen gennem observationer af Venus, når denne stod passende på himlen, og det lykkedes gennem observationer fra 1585-1588. Han bad Wilhelm i et brev fra 1592 om at hjælpe med at finde en dygtig fagmand til at bygge instrumenter og ure, og det menes at han benyttede Bürgis ure efter 1593.

Slottet stod færdigt i 1580 som den første bygning i Europa i nyere tid målrettet til at være et forskningscentrum. Tycho blev imidlertid klar over, at slottet ikke var stort nok til alle aktiviteter, og instrumenterne

stod ikke stabilt nok på platformene. Udgravninger til et nyt observatorium, Stjerneborg, begyndte i foråret 1584 ca. 30 meter fra den sydlige vold om Uraniborg. Stjerneborg lå i niveau med terrænet, instrumenterne stod på fast grund, himlen kunne ses hele vejen rundt. Her blev de nye store instrumenter opstillet.



Figur 11. T.v. (a): Tychos sigtemiddel fra 1580. Øverst t.h. (b): Transversaldeling af Christoph Rothmann og Jost Bürgi. Fra 1585 anvendtes dette forfinede koncept til aflæsning af skalaerne. Det tillader aflæsning med en nøjagtighed på en trediedel bueminut. Nederst t.h. (c): Transversaldeling på messingkreds-buen af en Bürgi sekstant fra 1593, men den er knap nok til at se. Viserlinealen med sigtespalter føres meget præcist. Fra [12].

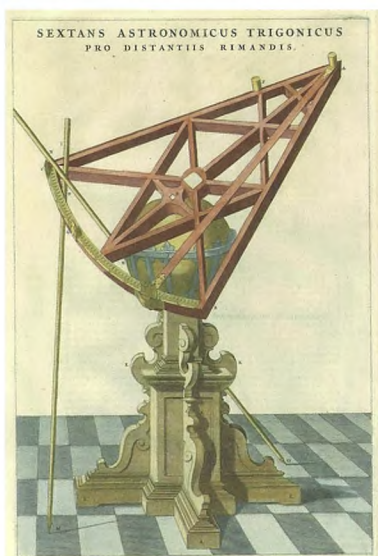
Tycho lod hele 22 astronomiske instrumenter bygge i tidsrummet ca. 1576-1590 og i hans "Mechanica" fra 1598 findes figurer og beskrivelse af deres anvendelse. Alle observationer noteredes med angivelse af instrument og observatør. Ingen astronom før ham har dokumenteret sit arbejde så omhyggeligt, i årene omkring 1590 skrev og trykte han over 1000 sider om instrumenter og teoretiske undersøgelser. Imidlertid bestemtes hans muligheder også af den faglige viden og kunnen hos dem, der skulle bygge instrumenterne. De har tit haft vanskelighed ved at forstå de særlige krav, der blev stillet og som lå langt uden for det de var vant til. Tycho forsøgte fra 1573 med små instrumenter. En 40 cm kvadrant fra 1573 var næsten ubrugelig, men en 60 cm kvadrant fra 1580 blev en stor succes især fordi han havde indført de nye sigtemidler og skalaer, figur 11.

Han indrettede et værksted på Hven og ansatte folk hvoraf vi kun kender én ved navn, lederen Hans Crol, men det er klart at Tycho ikke havde held til at finde og ansætte et geni som Jost Bürgi. Tycho byggede efterhånden store instrumenter med radius omkring 1,5 meter for at kunne inddele og aflæse skalaen med den krævede nøjagtighed på et bueminut svarende til 0,44 mm. Bürgis instrumenter havde næsten samme radius, fx 1145 mm for sekstanten i figur 10, men de gav faktisk bedre nøjagtighed end Tychos.

Nogle instrumenter krævede 5-6 mand i tre år til fremstillingen, og omkring 1590 har han ladet dem alle rejse, bortset fra en eller to mand til reparationer. Mange instrumenter måtte forbedres og endda bygges helt om. Megen tid gik med at vente på levering af instrumentdele eller forbedringer. Han stolede først rigtig på målingerne med murkvadranten efter at han fra 1585 kunne verificere ved måling med den store armille og de drejelige kvadranter.

Efter 1585 observerede han sjældnere personligt, men han har nok været til stede det meste af tiden, en ikke ringe præstation, da der var ca. 185 observationsrunder om året i de tyve år Uraniborg eksisterede. Det har været muligt for Thoren [13] at påvise, hvorledes Tycho gjorde erfaringer med hvert instrument, gode eller dårligere, så han kunne beslutte hvad han videre skulle gøre, og han havde resurser til alt dette. Det må derfor skyldes manglende viden og nogen arrogance, når nogle forfattere har skrevet, at "Tycho blev ved med at bygge instrumenter for at holde sine instrumentmager beskæftiget". Tycho vigtigste instrumenter, som alle var til rådighed fra 1586, var en sekstant, to kvadranter og en armille. Når disse instrumenter gav overensstemmende resultat kunne han stole på det.

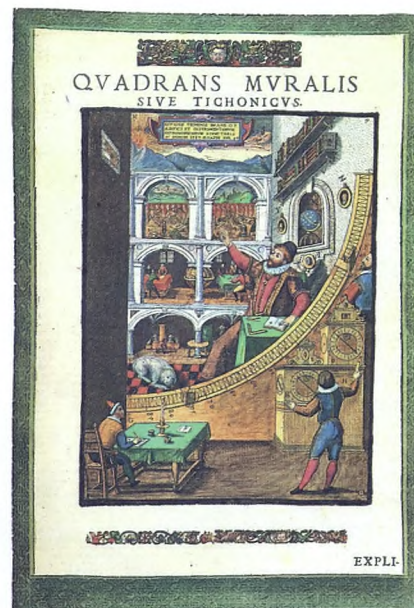
Tycho opfandt sekstanten i 1569 som afløser for den håndholdte krydsstav til måling af vinklen mellem to stjerner, og han fik bygget adskillige under en stadig udvikling af denne instrumenttype. Den modne, fuldt udviklede sekstant er fra ca. 1582, se figur 12. Den var af træ og skulle betjenes af to observatører, idet den kunne drejes i alle retninger om en halvkugle.



Figur 12. Brahes sekstant fra ca. 1577 har 155 cm radius er fremstillet af træ med indlagt skala og sigteindretninger af messing. Den kan drejes og hældes om en halvkugle og skal betjenes af to observatører.

Kvadranter anvendtes til måling af en stjernes højde over horisonten. Tycho fremstillede i tidens løb mange kvadranter som kunne drejes om en lodret akse, så stjerner på alle dele af himlen kunne måles. Tychos første virkeligt gode instrument var en lille drejelig kvadrant med 39 cm radius fra 1580, som han brugte i mange år. Den var en milepæl, fordi den var forsynet med avancerede sigtemidler og inddeling af skalaen, figur

11. Den første store drejelige kvadrant med en radius på næsten to meter blev indviet den 21. marts 1581 som det første af otte store instrumenter fra værkstedet indenfor et tidsrum på to og et halvt år. Men resultatet var ikke godt, bl.a. på grund af et ustabil fundament. Den store murkvadrant, figur 13, forbindes særligt med Tychos navn fordi den var så smuk og illustrativ, og den anvendtes meget, men der er meget lidt i den af Tychos originalitet.



Figur 13. "Murkvadranten". Tycho Brahe på sit observatorium Uraniborg med en murkvadrant på 2,5 meter radius samt ure og tre assistenter i arbejde. Der ses rum til forskning og ophold, alkymilaboratorium nederst, og observationsplatforme med instrumenter for oven.

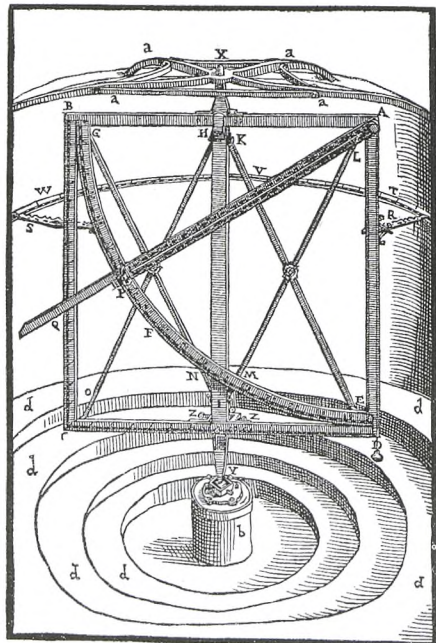


Figur 14. Den store armille i Stjerneborg. Dens skala i messing har en radius på 136 cm hvorved $1' = 0,40$ mm og instrumentet anvendes til måling af deklinationer.

Samtidig med at han eksperimenterede med kvadranter, studerede Tycho mulighederne i den traditionelle familie af instrumenter, armillerne. Armillen blev oprindeligt anvendt både til at vise stjernernes

bevægelser rundt om jorden og som måleinstrument. Den kendes fra oldtiden og typen blev forbedret af persiske og arabiske astronomer i 800-tallet. Den blev uafhængigt opfundet i Kina, og den spillede en stor rolle i senmiddelalderen i Europa, dels som symbol på visdom og som måleinstrument. Tycho byggede først en klassisk type med flere ringe svarende til ækvator og ekliptika og 60 cm radius, men han indså at den ikke var nøjagtig og forenkledede derfor konstruktionen som på figur 14. Denne armille fra ca. 1585 var et af Tychos bedste instrumenter til måling af deklinationer. En fordel var at den kunne anvendes på stjerner over hele himlen, og at deklinationen kunne aflæses direkte uden beregninger.

En drejelig kvadrant af træ med radius 1,5 meter blev færdig i begyndelsen af 1586. En anden kvadrant kom i brug to år senere (se figur 15). Den var af stål, havde en radius på 1,75 meter og var i virkeligheden en ombygning af kvadranten fra 1581, nu opstillet på et solidt fundament. Med disse to store kvadranter var udrustningen på Hven i det væsentlige afsluttet, altså i 1588.



Figur 15. Den store kvadrant af stål i Stjerneborg ca. 1588. Den har en skala i messing med radius 194 cm, og instrumentet anvendes til måling af deklinationer.

Den mand der synes at have været Tychos vigtigste tekniker var Hans Crol, han var også en af de mest pålidelige observatører. Tycho havde stadig brug for ham ved modifikationer eller reparationer, og han blev på Hven indtil sin død i november 1591.

Med de instrumenter Tycho brugte indtil 1581 havde observationerne fejl på omkring 4', hvad der var langt fra hans mål på 1'. Det opnåede han med sine nye instrumenter omkring 1585 ifølge Thoren [13] s. 190.

Tychos katalog på 1004 stjerner fra 1598 findes i en version af Tycho selv og en af Kepler trykt i 1627. Nøjagtigheden af Keplers udgave er blevet undersøgt med største grundighed af Verbunt & Gent i 2010 [18], der sammenlignede med Hipparkos-kataloget. Der fandtes god overensstemmelse med undersøgelser af Dreyer i 1916 og Rawlins i 1993, og det konkluderes at fejlene

i ekliptikal længde og bredde har fordelinger med en vidde (standard afvigelse) på 2', idet der dog var flere stjerner med større afvigelser end i en Gaussfordeling. Der var ca. 15 % med afvigelser over 10' hvilket tilskrives regne- eller skrivefejl. Tychos ni standardstjerner havde en nøjagtighed omkring 30 buesekunder.

Nøjagtigheden er også undersøgt af Hamel i 1998 [8] hvilket ikke nævnes af Verbunt & Gent. Hamel fandt standardafvigelser i rektascension og deklination på henholdsvis 2,3' og 2,4' for de 794 sikkert identificerede stjerner i Tychos katalog, i rimelig overensstemmelse med ovennævnte 2'.

Konklusion

Mange år inden Tycho flyttede til Hven havde Wilhelm IV, Landgreven af Kassel, opnået meget bedre nøjagtighed for stjerners positioner end alle tidligere astronomer, idet han i 1567 havde målt 58 stjerner med en nøjagtighed på ca. 3,4'. I Kassel opnåedes en nøjagtighed på 1' i et katalog fra 1586 med 384 stjerner, en nøjagtighed som Tycho Brahe samtidig nåede. Så æren for det store gennembrud i nøjagtighed må deles mellem observatorierne i Kassel og på Hven. Tychos stjerne-katalog fra 1598 indeholder 1004 stjerner med en nøjagtighed på 2', og Tycho observerede planeterne gennem 20 år hvad der fik stor betydning for Keplers anvendelse.

Det ses i de historiske kilder, at begges resultater blev bedre gennem det de lærte fra den anden, og Wilhelms anbefaling til den danske konge efter Tychos besøg i Kassel i 1575 har haft stor betydning for kongens storstilede gave til den unge Tycho.

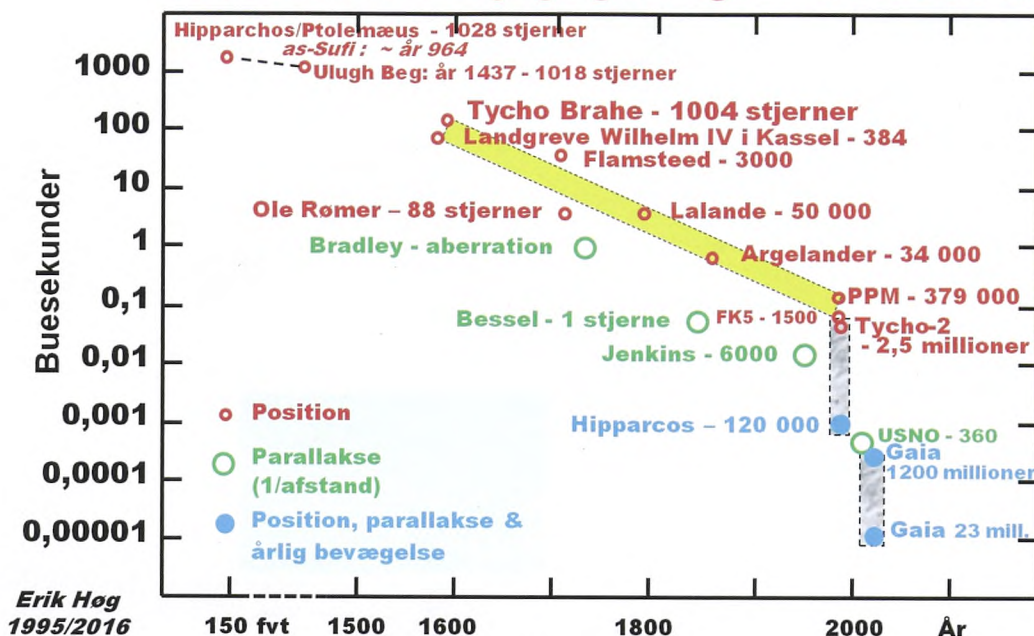
Der er en slående forskel på de instrumenter der anvendtes de to steder. På Hven fremstilledes instrumenter både af træ og metal med radius på typisk 150 cm. De begrænsede håndværksmæssige færdigheder gjorde størrelsen nødvendig for at nå bueminuttet, men samtidig blev instrumentet bøjet under sin egen vægt. I Kassel havde man instrumenter af metal med en noget mindre radius på 115 cm for sekstanten på figur 12, men her fandtes mekanik fra både Baldewein og Bürgi i langt finere og lettere udførelse end Tychos instrumenter af træ og metal. Takket være denne finmekanik har man haft mindre bøjning af instrumentet. Det er interessant at se, hvorledes Hamel [8] overdriver størrelsen af Tychos instrumenter, idet han fx på s. 68 skriver, at armillen havde en "radius på hele 3 meter", skønt det dog er diameteren der er omtrent så stor nemlig 2,6 meter, så radius er 1,3 m. Gradinddelingernes nøjagtighed har nok også været forskellig på Hven og i Kassel, men det nævnes ikke noget sted.

Vil man nævne syv helte i dette drama om udvikling af astronomiske instrumenter og observationer, må det være Wilhelm IV, Eberhard Baldewein, Tycho Brahe, Jost Bürgi, Christoph Rothmann, Hans Crol og Paul Wittich. Wittich skal med blandt de syv, skønt han også var skurken i dramaet. Wittich bragte nye beregningsmetoder til Hven – hvilket der dog er tvivl om hos Thoren [13] (s. 283) – og fra Hven bragte han oplysninger om Tychos instrumenter, som Bürgi og Rothmann gjorde brug af i Kassel så deres observationer til det fjerde katalog blev nøjagtigere.

Wilhelm IV fik dog ikke betydning for astronomiens udvikling gennem sit katalog, fordi det blev offentliggjort for sent. Hans historiske betydning ligger i hans bud til Frederik II i 1575 om at støtte den unge Tycho Brahe og i Bürgis observationer og instrumenter, som Kepler gjorde brug af. En helt ny astronomisk målemetode blev udviklet i Kassel, måling af passage-

tider og dermed rektascensioner, uret blev et nøjagtigt astronomisk måleinstrument, mens en omtrentlig tid ellers kun blev brugt til at angive en epoke for observationer. Ole Rømer var den første der på denne måde målte rektascensioner ved anvendelse af kikkert med sit passageinstrument fra 1691. Hovedsagen i denne artikel² har været at gøre rede for det historiske forløb.

Astrometrisk nøjagtighed gennem 2000 år



Figur 16. Astrometrisk nøjagtighed gennem 2000 år. Det fremgår, at Landgreven i Kassel og Tycho Brahe næsten samtidig når et gennembrud til meget bedre nøjagtighed for positioner af stjerner med ti gange mindre fejl end forgængerne. Der følger en gradvis forbedring med en faktor 1000 over et tidsrum på 400 år, fulgt af en forbedring med en faktor 10.000 gennem de to astrometriske satellitter Hipparcos og Gaia opsendt af ESA. Den enorme forøgelse af antallet af stjerner fremgår af diagrammet, ligeså forløbet for måling af parallakser, der giver afstande, og af årlige bevægelser. For Gaia er angivet hvad der i 2016 forventes fra fem års observationer. Tegnet af forfatteren (2016).

Litteratur

- [1] Wittendorff, A. (1994), Tycho Brahe. G.E.C. Gad, København. 327 pp.
- [2] Christianson, J.R. 2008, Tycho Brahe – Renæssancen på Hven. Nyt Teknisk Forlag.
- [3] Christianson, J.R. (1999), On Tycho's Island -Tycho Brahe and His Assistants, 1570 1601. Cambridge University Press.
- [4] Høg E. (2010), En landmåler i himlen. Kvant 3.
- [5] Høg E. (2011), Astrometri fra antikken til i dag. Kvant 3.
- [6] Høg E. (2013), Gaia-missionens snørklede tilblivelse. Kvant 4.
- [7] Verbunt, F. og Gent, R.H. (2012), The Catalogues of Ptolemaios and Ulugh Beg. *A&A* **544**, A31.
- [8] Hamel, J. (1998, 2002), Astronomical research in Kassel under Wilhelm IV. (Tysk titel: Die astronomischen Forschungen in Kassel unter Wilhelm IV.). *Acta Historica Astronomiae*, vol. 2, p. 1-173. 1998, 2002, Verlag Harri Deutsch, Thun and Frankfurt am Main.
- [9] Hamel, J. & Rothenberg, E. (2007), Rothmann, Christoph. På side 987f af *The Biographical Encyclopedia of Astronomers* af Virginia Trimble et al. (eds.), Springer Science+Business Media.
- [10] Repsold, Joh.A. (1919), Zur Geschichte der astronomischen Messwerkzeuge. *Astron. Nachr.* Band **209**, 14 Sp.193-210.
- [11] Ræder Hans, Elis og Bengt Strömberg (1946), TYCHO BRAHE'S, description of his instruments and scientific work, Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, København 1946.
- [12] Staudacher, Fritz (2013), Jost Bürgi, Kepler und der Kaiser, Uhrmacher, Instrumentenbauer, Astronom, Mathematiker, 1552-1632. Verlag Neue Zürcher Zeitung, Zürich, 1st Edition 2013, 293 pp. Tredje udgave (2016) er på 312 sider.

- [13] Thoren, V.E. (1990), The Lord of Uraniborg, A Biography of Tycho Brahe. Cambridge University Press, Cambridge, 523 pp.
- [14] Gaulke, K. (2010), William IV of Hesse-Cassel – the purpose of astronomy for a princely court in the 16th century. *Acta Historica Astronomiae* (tysk), vol. **40**, p. 47-66.
- [15] Mackensen, L. von (1982), Die erste Sternwarte Europas mit ihren Instrumenten und Uhren – 400 Jahre Jost Bürgi in Kassel. Calwey Verlag München, Zweite Auflage, s. 1-160.
- [16] Eichhorn, H. 1974, Astronomy of star positions. Frederick Ungar, New York.
- [17] Pannekoek, A. (1961), A history of astronomy. George Allen and Unwin, London.
- [18] Verbunt, F. og Gent, R.H. (2010), Three editions of the star catalogue of Tycho Brahe. *A&A* **516**, A28.



Erik Høg er dr.scient., emeritus, Niels Bohr Institutet. Medlem af ESA science teams for Hipparcos- og Gaia-satellitterne 1975-2007, formand for Hipparcos- og Tycho-konsortier 1981-97, formand for arbejdsgruppen for fotometri med Gaia.

²Forfatteren ønsker at takke følgende personer for oplysninger og kommentarer til manuskriptet: Poul Darnell, Claus Fabricius, Povl Høyer, Svend Laustsen, Claus Lund, Francois Mignard, Jørgen Otzen Petersen, Andreas Schrimpf og Fritz Staudacher.

Den gravito-termiske effekt

Af John Niclasen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Josef Loschmidts teori om den gravito-termiske effekt og relationen til Maxwell og Boltzmann belyses. Det påpeges, at Venus muligvis er den empiriske test af dette stridsspørgsmål. Eksperimenter af R.W. Gräff beskrives, og til slut gives et forslag til et eksperiment, der kan udføres i laboratoriet med henblik på at måle den eventuelle effekt.

Loschmidt, Boltzmann og Maxwell

Josef Loschmidt var en østrigsk fysiker og kemiker og blandt det 19. århundredes betydningsfulde videnskabsmænd. Loschmidt blev født d. 15. marts 1821 i en lille by nær Karlsbad i det nuværende Tjekkiet. Han viste i en ung alder akademiske evner og blev af sine forældre, på foranledning af en lokal præst, sendt til Prag for at studere filosofi og matematik.

Som 20-årig flyttede den unge Loschmidt til Wien for at studere på Polyteknisk Institut og universitetet. I 1846 afsluttede han sine studier med, hvad der svarer til en bachelor i fysik og kemi, men formåede i første omgang ikke at få en akademisk stilling. I ti år arbejdede han på en papirfabrik og startede en virksomhed nær Wien med det formål at fremstille salpeter. Forretningen gik dårligt og i 1856 blev Loschmidt i stedet gymnasielærer i Wien, hvor han underviste i kemi, fysik, aritmetik og regnskabsføring. På gymnasiet fik han adgang til sit eget laboratorium og fem år senere finansierede og publicerede han en lille bog, *Chemische Studien I*, som indeholdt hans første to videnskabelige artikler. Det var måske i en sen alder, som 40-årig, at have sine første videnskabelige udgivelser, men der skulle vise sig at komme mere fra Loschmidts hånd.

Den første 47-siders artikel med titlen *Constitutions-Formeln der Organischen Chemie in Graphischer Darstellung* indeholdt pionérarbejde udi at illustrere molekylers opbygning. Den anden og kortere artikel indeholdt Loschmidts beregning af, hvad der senere blev kendt som "Avogadros tal". I meget tysk litteratur er dette tal kendt som *Loschmidts tal* af denne grund. Idéen bag *Avogadros tal* stammer tilbage fra 1811, hvor Amedeo Avogadro foretog observationer, der pegede på, at sådan et tal eksisterer, men Avogadro var aldrig selv i stand til at bestemme tallets størrelse, bl.a. fordi man ikke vidste, hvor store (eller små) molekyler var.

Loschmidts undersøgelser i sit laboratorium på gymnasiet ledte ham til mange opdagelser og indsigt i molekylernes verden. Bestemmelsen af molekylers størrelse bragte ham anerkendelse, og i 1866 fik Loschmidt på foranledning af Josef Stefan en stilling på universitetet i Wien. I 1870 publicerede Loschmidt de mest præcise målinger af *interdiffusion* af to gasser. James Clerk Maxwell, på daværende tidspunkt bosiddende i Skotland, benyttede Loschmidts data til at beregne den molekylære diameter for forskellige gasser. Loschmidt avancerede hurtigt på universitetet og blev professor i 1872. Blandt Loschmidts elever og senere kollegaer var Ludwig Boltzmann, og de to blev nære venner.



Figur 1. Venstre: Portræt af den østrigske fysiker og kemiker, Johann Josef Loschmidt, udført af August Steininger. Højre øverst: Ludwig Boltzmann fotograferet i 1902 (Universitetet i Frankfurt). Ludwig Boltzmann havde bl.a. Josef Loschmidt som underviser. Højre nederst: James Clerk Maxwell. Gravering udført af G.J. Stodart efter et fotografi af Fergus af Greenock.

Den gravito-termiske effekt

I 1860 havde Maxwell udviklet sin teori om kinetisk energi og forbindelsen til fordelingen af molekylers hastigheder i gasser [1]. Boltzmann benyttede Maxwells teori til at forsøge at udlede termodynamikkens 2. lov om maksimering af entropien. Disse forsøg af Boltzmann mødte kritik af Loschmidt, som bl.a. beskrev et "reversibilitetsparadoks". Kritikken var konstruktiv, og den ledte Boltzmann til at udvikle den statistiske fysik.

I disse meningsudvekslinger frem og tilbage introducerede Loschmidt på et tidspunkt problemet med faste stoffer og gassers opførsel i et tyngdefelt. (Loschmidts første indvendinger var for faste stoffer, men det kan udvides til at omfatte gasser og væsker.) I en samling artikler fra 1876, som tager højde for tyngdefelter, argumenterer Loschmidt for, at temperaturen af gassen vil afhænge af højden med stigende temperatur nedefter, selvom man forudsætter vertikal termodynamisk ligevægt i et uniformt tyngdefelt [2].

Maxwell og Boltzmann er uenige med Loschmidt og argumenterer, at selvom den molekylære hastighedsfordeling vil afhænge af højden i en cylinder af gas, vil den termodynamiske ligevægt med tilhørende ligevægtsfordeling betyde samme uniforme temperatur hele vejen op gennem søjlen af gas.

Så her står forskellen i opfattelsen af den fysiske virkelighed med Loschmidt på den ene side, der argumenterer for en temperaturgradient vertikalt i en søjle af

gas, og Maxwell og Boltzmann på den anden side, der argumenterer for én og samme temperatur overalt i gassen uafhængigt af højden, når termodynamisk ligevægt er indtruffet. Vi ved, at Maxwell og Boltzmanns model virker lokalt, men er Loschmidts model nødvendig på stor skala?

I en søjle af gas i et tyngdefelt må trykket stige nedefter, fordi hvert lag af gas skal bære vægten af gassen ovenover. Trykket p er således en aftagende funktion af højden z , og dette krav om *hydrostatisk ligevægt* fører til, at trykgradienten må være

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho, \quad (1)$$

hvor g er tyngdeaccelerationen og ρ er gassens massefylde. Her står vi nu med to ubekendte funktioner af højden: trykket $p(z)$ og tætheden $\rho(z)$. Tætheden er forbundet med rumfanget, og gennem gassens tilstandsligning, fx idealgasligningen, kan vi finde temperaturen $T(z)$. Dermed er der imidlertid stadig to ubekendte funktioner, $T(z)$ og enten $p(z)$ eller $\rho(z)$. Maxwell og Boltzmann mente, at termisk ligevægt betød udjævning af alle temperaturforskelle, altså $T(z) = \text{konstant}$; men Loschmidt så en anden mulighed.

Bl.a. indenfor meteorologien opererer man med begrebet en *tøradiabat* (på engelsk *Dry Adiabatic Lapse Rate*, DALR). Ligningen for denne fremkommer ved at forlange, at atmosfæren skal være stabil overfor lodrette forskydninger. Da luft er en dårlig varmeleder vil sådanne forskydninger foregå uden varmeudveksling, altså *adiabatisk*. For en luftmasse, der gennemgår en adiabatisk ekspansion, altså faldende tæthed, vil der ske et temperaturfald. For en tør idealgas kan man ved hjælp af termodynamikkens første hovedsætning vise, at sammenhængen er

$$c_p dT = \frac{1}{\rho} dp, \quad (2)$$

hvor c_p er gassens specifikke varmekapacitet ved konstant tryk. Ved at kombinere ligningerne (1) og (2) finder man temperaturgradienten

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} \quad (3)$$

For Jordens atmosfære, dvs almindelig luft, giver formel (3) en gradient på -10 K/km, mens det målte gennemsnit er ca. -6 K/km. Afvigelsen skyldes atmosfærens indhold af vanddamp. Hvis Maxwell og Boltzmann havde ret, ville der fremkomme én og samme temperatur uafhængig af højden under termodynamisk ligevægt, og så ville resultatet være en *isoterm* atmosfære for en planet.

Venus

Hvis Loschmidts effekt eksisterer, bør man kunne måle en temperaturgradient med koldt øverst og varmt nederst i en planetatmosfære i ligevægt. Jo mere atmosfære der er desto højere vil temperaturen være nederst. Er Venus' atmosfære den empiriske test, der viser, at

Maxwell og Boltzmann tog fejl, og at Loschmidt havde en pointe?

Venus vejer lidt mindre end Jorden og har en atmosfære med ca. 94 gange så meget masse som Jordens. Venus har modsat Jorden et tæt skydække i omkring 50 km højde, hvor trykket er 1 atm (ca. 1 bar), hvorimod trykket er 92 bar nede ved den faste overflade [3].

Den flg. korte analyse af Venus bygger jeg bl.a. kvantitativt på data givet af NASA på deres webside, *Venus Fact Sheet* [4].

Der er vanskeligheder forbundet med at bestemme en planets albedo, der er et mål for mængden af tilbagekastet stråling (fra Solen). Denne usikkerhed har en direkte indflydelse på den beregnede effektive temperatur. Den angivne albedo for Venus har varieret mellem 0,75 og 0,90 i årene 2010-2016. Den nuværende angivne værdi er 0,77 og svarer til en effektiv temperatur for Venus på 227 K eller -46°C . Uanset hvilken effektiv temperatur, man bestemmer for Venus, så findes denne temperatur højt i atmosfæren på Venus. Nede ved den faste planetoverflade er temperaturen langt højere, og den er af landingsfartøjer målt til 737 K (464°C).

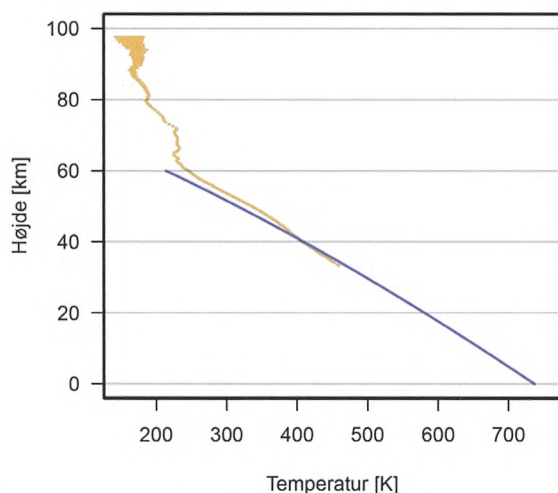
Interessant er også, at *diurnal temperaturvariationen* er angivet til ~ 0 for Venus. Dette er forskellen på minimum- og maksimum-temperaturer både på forskellige tidspunkter og forskellige lokationer på den faste overflade (under forudsætning af samme højde, dvs. samme tryk). Der er altså samme temperatur dag og nat, sommer og vinter, ved ækvator eller ved polerne på Venus. Vindhastigheder er desuden målt til 0,3-1,0 m/s, dvs. nærmest vindstille.

Alt dette tyder på en atmosfære i ligevægt eller tæt på ligevægt. Man kan sige, at Venus ikke har årstider og ikke har vind og vejr, som vi kender det fra Jorden. Det er umiddelbart bemærkelsesværdigt, når man samtidig ved, at Venus roterer meget langsomt. En venusdag varer knap 117 jorddage. Hvordan kan temperaturen nede nær den faste overflade være uændret, når man har 117 dage med sol efterfulgt af 117 dage med nat?

Svaret skal findes i, at Venus har et konstant tæt skydække højt i atmosfæren, at Venus er meget hvid, dvs. kaster det meste af Solens lys tilbage, og at meget lidt af Solens lys derfor når ned til den faste overflade. Venus er markant anderledes end de øvrige terrestriske planeter (Merkur, Jorden og Mars) ved, at den har så meget atmosfære. Der har ikke været liv på Venus til at suge en masse CO_2 ud af atmosfæren, som det er tilfældet på Jorden. Det kan måske hjælpe til at forstå Venus at se planeten som en *dværg gasplanet*, en *gasdværg*, da den har ligheder med *gasgiganterne* Jupiter og Saturn, og *isgiganterne* Uranus og Neptun. Ligesom Venus har de store ydre planeter også temperaturgradienter ned gennem deres atmosfærer, så der dybt nede i de tunge atmosfærer, hvor gassen overgår til andre tilstandsformer, menes at være temperaturer på tusindvis af grader.

I sommeren 2015 færdiggjorde jeg et valgfrit projekt på Niels Bohr Institutet, hvor jeg beregnede temperatur- og trykgradienten for atmosfæren på Venus kun ud fra den målte temperatur ved den faste overflade og antagelsen om, at *tøradiabaten* skulle gælde [5]. Jeg fandt

en meget tæt overensstemmelse (se figur 2) med data fra rummissionen Magellan, som i 1991 havde målt tryk og temperatur ned gennem atmosfæren fra kredsløb [6]. Temperaturgradienten på det blå stykke er knap 9 K/km, altså lidt større end for Jordens atmosfære.



Figur 2. Venusatmosfærens temperaturprofil kombineret af data målt med satellit (orange) og beregnet som en tøradiabat, ved hjælp af en *Lapse Rate Atmospheric Model* (blå).

Det tyder på, at Loschmidts effekt bestemmer temperaturgradienten i atmosfæren på Venus, men laboratorieforsøg under kontrollerede forhold er nødvendige for en endelig konklusion.

Gräffs eksperimenter

Her følger hovedpunkterne i beskrivelsen af eksperimenter beskrevet i "Challenges to the Second Law of Thermodynamics" afsnit "6.3.1 Gräff Experiments" [7].

Der er i nyere tid foretaget eksperimenter til at efterprøve Loschmidts indvendinger. R.W. Gräff har udført omkring 50 individuelle eksperimenter med formål at sætte kvantitative afgrænsninger på størrelsen af Loschmidts effekt. Laboratorier i hhv. Ithaca (USA) og Königsfeld (Tyskland) har simultant udført flere eksperimenter, som blev beskrevet i 2002 [8].

Eksperimenterne af Gräff blev udført både med faste stoffer (Pb, Fe), væsker (vand, olie, kulsyreholdige vandige opløsninger med opløste salte og organiske forbindelser) og gasser (luft, Xe, Ar) ved forskellige tryk ($10^{-4} - 10^5$ Torr¹). Forsøgene blev udført i opretstående cylindre (længde-/bredde-forhold på 5-10:1) med skalalængde på 0,15-0,5 meter. Temperaturen blev målt med termoelementer (0,005" diameter) sat i forskellige positioner inde i cylindrene og på ydersiden af det indlejrede varmeskjold. Fem termoelementer blev trukket vertikalt i serie for at danne en fem-benet forbindelse, hvor de øvre og nedre terminaler måler forskelle i temperaturer (snarere end målinger af absolutte temperaturer) over en højdeforskel på 10-20 cm. Målinger af forskelle i temperaturer blev valgt i et forsøg på at omgå måleusikkerheder forbundet med det benyttede udstyr, når man foretager absolutte temperaturmålinger,

og fordi forskelle i temperaturer er nok til at vise en effekt.

Spændingsforskelle blev målt med en nøjagtighed på $\pm 10^{-7}$ V svarende til $\pm \Delta T \simeq 3 \cdot 10^{-4}$ K, mens nøjagtigheden påstået af Gräff kun var $\Delta T = 2 \cdot 10^{-3}$ K. Type E termoelementer har en ANSI-nominel usikkerhed på $\pm 1\%$, hvilket vil sige at en måling af absolut temperatur på $T = 300$ K vil have en usikkerhed på $\pm \Delta T = 3$ K. Dette er over tusind gange værre end usikkerheden påstået af Gräff for temperaturforskelle – men det er uklart hvordan ANSI specifikationer overføres til målinger af temperaturforskelle.

Fordi effekten beskrevet af Loschmidt er lille, involverede de umiddelbare vanskeligheder ved eksperimenterne termisk isolation, ensartethed og stabilitet.

Resultaterne af Gräffs eksperimenter underbygger eksistensen af Loschmidts gravito-termiske effekt i gasser og væsker, men er uden konklusion for faste stoffer, den fase af stoffet Loschmidts oprindelige forslag omtalte. De mest sofistikerede eksperimenter over lange tidsrum viste gennemsnitlige vertikale temperaturgradienter for henholdsvis luft og vand (koldt i toppen og varmt i bunden af søjlen) på:

$$\text{Luft: } \left(\frac{dT}{dz} \right)_{\text{air/exp}} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ K/m}$$

$$\text{Vand: } \left(\frac{dT}{dz} \right)_{\text{water/exp}} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ K/m.}$$

De eksperimentelle resultater er kvalitativt i overensstemmelse med de teoretiske estimater af temperaturgradienter på:

$$\text{Luft: } \left(\frac{dT}{dz} \right)_{\text{air/theory}} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ K/m}$$

$$\text{Vand: } \left(\frac{dT}{dz} \right)_{\text{water/theory}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ K/m.}$$

I en senere række vandige eksperimenter blev prøven fysisk vendt lodret top til bund op til ti gange på tidsskalaer af 6-36 timer. Temperaturgradienten blev observeret at genetablere sig mellem disse omvendinger.

En prøve med vand viste konstant negativ temperaturgradient, mens det ydre varmeskjold viste det modsatte. Den efterfølgende databehandling med at midle værdier undertrykte store variationer i data over korte tidsrum (signal/støj-forhold af størrelsen 1). Der blev ikke udført kontrolforsøg med prøverne holdt vandret eller ved mellemliggende vinkler i forhold til lodret.

Gennemsnitlige spændingsgradienter (temperaturgradienter) over lange tidsrum var umiskendelige, dog var signal/støj-forholdet for alle forsøg af størrelsen 1, hvilket rejser spørgsmålet hvorvidt de positive resultater var Loschmidts effekt eller en systematisk fejl. Til underbygning af effekten kan siges, at mens kernen af prøverne konstant viste negative temperaturgradienter (koldt øverst og varmt nederst), viste målinger på varmeskjoldet, der omgav prøverne, konstant positive temperaturgradienter af større værdi. Det er vanskeligt at forklare disse omvendte lodrette temperaturgradienter fra inderside til yderside af apparatet. Bortset fra Loschmidts effekt er der ikke blevet fremført nogen alternativ fysisk forklaring på disse resultater.

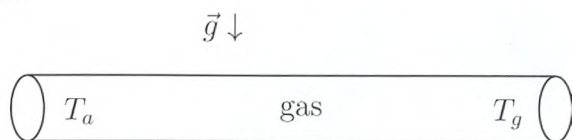
¹En Torr er $\frac{1}{760}$ atm, svarende til 1 mm kviksølv på et barometer.

Sammenfattende kan man sige, at Gräffs eksperimenter endnu ikke er entydigt afgørende, og deres teoretiske fundament bestrides af andre forskere. Alligevel er Gräffs eksperimenter de første til at teste og støtte Loschmidts effekt, den gravito-termiske effekt.

Forslag til eksperiment

Disse eksperimenter fortjener opmærksomhed, og det er oplagt at forsøge at gentage lignende eksperimenter i uafhængige laboratorier.

Man fylder en aflag beholder med gas. Det kan være almindelig luft eller en hvilket som helst anden gas såsom argon eller kuldioxid, hvor man så kan teste effekten med forskellige gasser, der giver forskellige temperaturgradienter, fordi gasserne har forskellige specifikke varmekapaciteter. Først placeres beholderen, der er godt isoleret fra omgivelserne, i horisontal position.

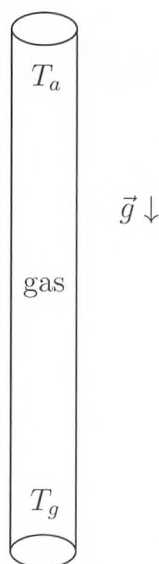


Figur 3. En horisontal beholder med gas.

Efter nogen tid vil gassen være i termodynamisk ligevægt, og der vil være samme temperatur overalt i gassen.

$$T_a = T_g \quad (4)$$

Nu roterer man forsigtigt beholderen 90 grader.



Figur 4. En vertikal beholder med gas.

Hvis *tøradiabaten* holder i et isoleret system, så vil der efter nogen tid, når systemet har opnået termodynamisk ligevægt i den nye position, opstå en temperaturgradient, så temperaturen øverst i røret er mindre end nederst.

$$T_a < T_g \quad (5)$$

I formel (5) og (6) er T_a temperaturen et sted i atmosfæren, og T_g temperaturen nær overfladen.

Til udfordringerne i sådanne forsøg hører at isolere gassen tilstrækkeligt fra omgivelserne. Beholderens

vægge skal være af et materiale, der ikke er en god varmeleder. Et tyndt plastmateriale er en mulighed. For bedre at kontrollere omgivelserne kunne røret placeres inde i et ydre rør. Man kunne holde en konstant temperatur mellem de to rør, så en eventuel temperaturgradient kun opstår i gassen i det indre rør. Hvis man måler en temperaturgradient, kunne røret vendes 180 grader for så at se, om temperaturgradienten genopstår.

Med moderne udstyr til præcis måling af temperatur (-forskelle) og nem tilgang til moderne materialer af høj kvalitet, bør der ikke være nogen stor økonomisk forhindring i vejen for at udføre sådanne eksperimenter. Disse eksperimenter burde kunne afgøre, om Loschmidt havde en pointe, eller om konsensus skabt af Maxwell og Boltzmann stadig står ved magt her 140 år senere.

Litteratur

- [1] Maxwell, J.C. (1860), Illustrations of the dynamical theory of gases. Part I. On the motions and collisions of perfectly elastic spheres, *Philosophical Magazine*, 4th series, **19**: 19-32. Maxwell, J.C. (1860), Illustrations of the dynamical theory of gases. Part II. On the process of diffusion of two or more kinds of moving particles among one another, *Philosophical Magazine*, 4th series, **20**: 21-37.
- [2] J. Loschmidt (1876), Sitzungsber. Kais. Akad. Wiss. Wien, *Math. Naturwiss. Kl.*, II. Abt. **73**, 128 (1876); *ibid.*, III. Abt. **75**, 267 (1877); *ibid.*, IV. Abt. **76**, 209 (1878).
- [3] Roger A. Freedman, William J. Kaufmann III, Universe, Seventh edition, New York (2005).
- [4] Venus Fact Sheet, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html>
- [5] John Niclasen (2015), The Lapse Rate Atmospheric Model, https://www.researchgate.net/publication/306082807_The_Lapse_Rate_Atmospheric_Model
- [6] Jenkins, Jon M., Paul G. Steffes (1994), Radio Occultation Studies of the Venus Atmosphere with the Magellan Spacecraft, *ICARUS* **110**, 79-94.
- [7] Čápek, Vladislav og Sheehan, Daniel P. (2005), Challenges to the Second Law of Thermodynamics, Theory and Experiment, Netherlands.
- [8] Graeff, Roderich W. (2002), Measuring the Temperature Distribution in Gas Columns, *AIP Conference Proceedings*, 20 November 2002, Vol. **643**(1), pp.225-230.

John E. Niclasen har netop i sommeren 2016 forsvaret sit kandidatspeciale i astrofysik ved Niels Bohr Institutet. Hans interesseområder omhandler ud over astronomi også emner som gravitation, planetatmosfærer, Jordens geologiske og klimatiske historie og videnskabsteori, som han ser som en nødvendighed for at sætte den videnskabelige verden anno 2016 i perspektiv. Han har en baggrund indenfor informationsteknologi og arbejder bl.a. på at udvikle et nyt programmeringssprog, The World Programming Language, bl.a. rettet mod videnskaben.



Bengt Strömgrens stjerneudviklingsteori fra 1933

Af Jørgen Otzen Petersen, lektor emeritus fra Astronomisk Observatorium, Københavns Universitet

Den mest berømte danske astronom i 1900-tallet, Bengt Strömgren (1908-1987), skabte klarhed over nogle fundamentale problemer i teorien for stjerners opbygning og udvikling først i 1930'erne. Endnu i 1920'erne var næsten alt vedrørende stjerners opbygning, deres dannelseshistorie og endelige skæbne usikkert og gådefuldt. Forskerne var vildt uenige om, hvordan stjerner producerer det lys de udsender og derfor om tidsskalaen for deres udvikling. Med to afgørende publikationer i årene 1932 og 1933 kunne Strömgren sandsynliggøre, at de fleste stjerner producerer energi ved omdannelse af brint til helium og tungere grundstoffer, og dermed afgøre de vigtigste af de varme stridsspørgsmål. Her beskrives dette forløb. Udover Strömgren er den engelske astronom A.S. Eddington en central person i fortællingen.

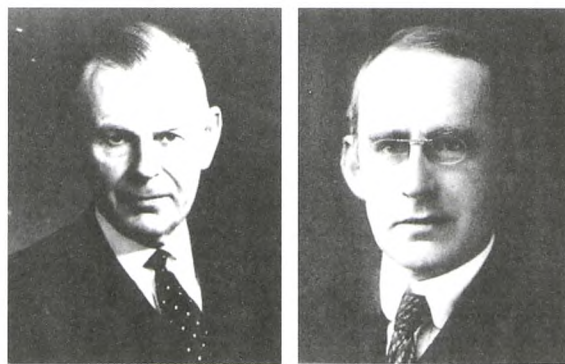
Indledning

Indtil midten af 1930'erne var mange væsentlige detaljer om opbygningen af stjernerne ukendte, og det var gådefuldt, hvilke udviklingsstadier Solen og andre stjerner havde gennemgået og ville gennemløbe i fremtiden. Litteraturhenvisninger angiver ofte året 1933 for overgangen til "moderne" tider med mere sikker viden om stjerners egenskaber med henvisning til Bengt Strömgrens berømte artikler i *Zeitschrift für Astrophysik*: "The opacity of stellar matter and the hydrogen content of the stars" (se reference [1]) fra 1932 og "On the interpretation of the Hertzsprung-Russell Diagram" fra 1933 [2].

Man kan nemt få den opfattelse, at Strömgrens to artikler giver det udviklingsbillede, vi kender så godt i dag [3]. Det var også mit indtryk, indtil jeg for nylig studerede artiklerne nøjere. Sagen er langt mere kompleks og interessant; og Strömgrens udviklingsbillede fra 1933 adskiller sig på afgørende punkter fra det, vi har i dag, hvor vi kender det meste af den relevante fysik i stjerneudvikling og direkte kan gennemføre beregninger. Strömgrens arbejdsmetode måtte være langt mere indirekte og indeholder elementer, der virker fremmede i dag.

I det følgende vil jeg først kort skitsere den katotiske situation mht. forståelsen af stjerneudvikling før Strömgren. Der var spekulationer om den "lange", "intermediære" og "korte" tidsskala baseret på de mulige energikilder til stjernernes lysudsendelse. Derefter kommer der lidt om stjernestoffets fysiske egenskaber og nogle hovedtræk af Eddingtons standardmodel for stjerneopbygning, som var den bedste stjernemodel, man dengang havde, og som var basis for Strömgrens analyse. Han udnyttede nøjagtige observationsdata for lysudsendelse, radius og masse for kun 40 stjerner – det var alt man havde – til at bestemme deres brintprocent ved anvendelse af to ligninger fra Eddingtons teori. I Hertzsprung-Russell-diagrammet (*HR-diagram* i det følgende) kunne Strömgren nu angive brintindholdet for disse stjerner, og se hvordan brintprocenten varierer med positionen i diagrammet. Han kunne så indtegne kurver for konstant masse og for konstant brintprocent. Dette diagram minder om det velkendte (se fx [3]) HR-diagram med udviklingsspor (konstant masse) og alderskurver (hos Strömgren dog konstant brintprocent), som vi benytter i dag. Til sidst sammenlignes

Strömgrens beskrivelse af stjerneudvikling fra 1933 med det moderne billede, som blev etableret i 1940'erne og 1950'erne.



Figur 1. T.v.: Bengt Strömgren (1908-1987). T.h.: Arthur Stanley Eddington (1882-1944).

Tidsskalakaos

Gennem 1920'erne fik astronomer og fysikere efterhånden bedre kendskab til de fysiske forhold i stjernernes indre. Hovedproblemet og det store stridspunkt var tidsskalaen for stjerneudvikling, idet man intet sikkert kendte til de processer, der producerer den udsendte energi. En (teoretisk) mulighed er annihilation, at stjerner direkte kan producere energi, E , ved omdannelse af masse, m , til energi efter Einsteins ligning $E = m \cdot c^2$, hvor c er lyshastigheden. Den giver den "lange" tidsskala $t_l = E/L$, hvor E er givet ved stjernemassen og L er stjernens luminositet (eller lysstyrke), energiudsendelsen per tidsenhed. Indsætter vi solværdier for m og L , finder vi ca. 15 billioner ($t_l = 1,5 \cdot 10^{13}$) år. Omkring 1930 var der spekulationer om ekstreme forhold i stjernerne, hvor direkte masseomdannelse kunne foregå.

Ud fra de kendte atomvægte vidste man også, at fusion af hydrogen til helium ville give en energifrigørelse svarende til annihilation af ca. 0,7 % af den fusionerede brintmasse. Hvis en brintsol med massen $M(\text{sol})$ kunne fusionere helt til helium, ville vi have den maksimale værdi af den "intermediære" tidsskala $t_i(\text{max}) = 0,007 \cdot M(\text{sol}) \cdot c^2/L = \text{ca. } 100 \text{ milliarder år}$. I dag ved vi, at i den langvarige udviklingsfase for Solen, *hovedseriefasen*, vil ca. 15 % af brintmassen i Solen (som består af ca. 70 % brint) fusionere til helium, så den realistiske værdi af t_i for Solen bliver ca. $t_i(\text{max}) \cdot 0,70 \cdot 0,15$, dvs. ca. 10 milliarder år.

I 1930 var det velkendt, at hvis stjerner ikke aktivt kunne producere energi, måtte de enten afkøles pga. lysudsendelsen eller frigive potentiel gravitationsenergi ved sammentrækning. Det resulterer i den "korte" tidskala – Kelvin-Helmholtz-tidsskalaen – for Solen $t_k =$ ca. 20 millioner år.

Helt afgørende for stjernernes opbygning og udvikling er det naturligvis, hvilke grundstoffer de består af. Indtil ca. 1930 antog næsten alle astrofysikere, at stjernestof var næsten som jordsammensætningen, dvs. at hovedparten af massen var jern og lignende tunge grundstoffer, og at det letteste, ret hyppigt forekommende grundstof var kulstof eller ilt; brint forekom kun i forsvindende mængde. Derfor var den intermediære tidsskala før ca. 1930 ikke betragtet som en realistisk mulighed. Den korte skala, som var den første, der blev studeret seriøst for stjernerne, baseret på termodynamik, måtte også anses for tvivlsom eller umulig, fordi geologiske studier pegede på, at jorden alder var omkring en milliard år. Tilbage var så den lange tidskala, som øjensynligt krævede helt ny fysik med stabil masseomdannelse til energi ved direkte annihilation.

De tre store engelske teoretikere Arthur Stanley Eddington (1882-1944), Edward Arthur Milne (1896-1950) og James Hopwood Jeans (1877-1946) var hovedaktører i forskningen. De var kendte personligheder, og skrev også populære bøger, fx [4] og [5], som giver et interessant tidsbillede. Rebsdorf omtaler, i [6] side 176, under overskriften "Between the Devil and the Deep Sea" nogle af deres ideer, som vi i dag med bagklogskab kun kan betegne som "vilde". To eksempler: I en periode hævdede Milne, at stjerner måtte have temperaturer i centralområdet på milliarder grader. Nogle studier fandt, at centraltemperaturen i hovedseriestjerner både lyssvagere og lysstærkere end Solen bør være ca. 40 millioner grader. Eddington skriver i 1927, i [4] side 162, at det er mærkeligt: "Vi kan næppe tro, at der findes en Slags Kogepunkt (uafhængigt af Trykket), hvorved Stoffet koger bort som Energi. Hele fænomenet er højst forunderligt".

Eddingtons standardmodel

Eddington havde fra 1920'erne til starten af 1940'erne en autoritet, som vi knap nok kan forstå i dag. Baggrunden var, at han havde publiceret mindst fem større lærebøger om stellarstatistik, relativitetsteori, stjerneopbygning, stjernepulsation og kvantemekanik udover et stort antal artikler i videnskabelige tidsskrifter og flere populærvidenskabelige bøger. Han blev dog også kendt for sine specielle ideer. Fx fik en fejlagtig opfattelse af kvantestatistik ham til at forkaste realiteten af Chandrasekhars grænsemasse for hvide dværgstjerner, som vist alle andre astrofysikere efterhånden accepterede.

Med hensyn til stjerneopbygning var Eddington den absolut førende teoretiker efter publikationen i 1926 af sin berømte bog "The Internal Constitution of the Stars" [8]. På den tid var man klar over, at stoffet i normale stjerner kan betragtes som en idealgas. Eddington indførte to væsentlige forbedringer i sine modeller. Han antog, at energitransporten udefter i stjernerne sker ved stråling og tog hensyn til strålingstrykket ved siden af gastrykket.

Da stjerner ikke ændrer deres basisegenskaber over lange tidsrum, må de være i næsten perfekt ligevægt. På ethvert sted i en stjerne må den indadrettede gravitationskraft balanceres af den udadrettede trykkraft. Og i ethvert lag må den energi, der udsendes fra overfladen, være lig med den energi, der kommer indefra, plus den energi, der evt. produceres i laget. Ligevegtsbetingelserne kombineret med de ligninger, der beskriver stjernestoffets fysiske egenskaber, definerer det matematiske problem, der skal løses for at beregne stjerneopbygning og stjerneudvikling.

Når energien transporteres udefter i stjernen ved stråling, er energiudsendelsen (luminositeten) bestemt af, hvor gennemsligt stjernestoffet er. Teknisk udtrykkes det ved et uigennemslighedsmaal kaldet *opaciteten*, som kan beregnes ud fra basisfysik. Den bedste formel, som Eddington kunne bruge som grundlag for beregning af opaciteten, var udledt i 1923 af hollænderen Kramers, som virkede på Københavns Universitets Institut for Teoretisk Fysik (nu Niels Bohr Instituttet), på basis af den tidlige kvantemekanik. Den blev brugt gennem mange år, og det viste sig, at senere og mere præcise beregninger, pga. fremskridt i kvantemekanikken, kun gav mindre korrektioner. Det var noget afgørende nyt, at en teoretisk stjernemodel gav mulighed for at beregne modellens luminositet. Tidligere modeller kunne ikke behandle energiudsendelsen. De gav kun mulighed for at diskutere massefordelingen i stjernemodellen og forløbet af tryk, temperatur og tæthed gennem modellen.

Eddingtons store problem var, at han ikke kendte de processer, der producerede energien, og han havde derfor ikke en matematisk formel for hastigheden af energiproduktionen som funktion af de fysiske forhold i stjernerne (variationen af temperaturen og trykket gennem stjernen). Han gjorde nu en dristig (og heldig) antagelse om energiproduktionen kombineret med opaciteten, som han mente var rimelig, og han kunne vise, at den resulterende model, *Eddingtons standardmodel*, var i god overensstemmelse med de kendte observationsdata for masse og luminositet af stjernerne. Det kunne han jo betragte som en smuk verifikation af modellen. Den er ganske god for hovedseriestjerner, og blev i mange år betragtet som den bedste stjernemodel. Det er derfor fuldt fortjent, at den blev kaldt standardmodellen.

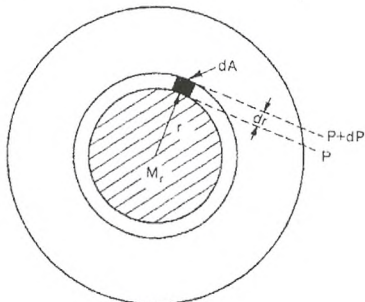
Det store spørgsmål først i 1930'erne blev indholdet af brint i stoffblandingen, som er afgørende for dels hvor mange lysabsorberende partikler, der forekommer, og derfor også for opaciteten, og dels for balancen mellem gastryk og strålingstryk i stjernerne. I de følgende afsnit introduceres de nødvendige tekniske begreber.

Middelmolekylvægt (μ) og relativt gastryk (β)

Middelmolekylvægten er defineret som gennemsnitsvægten, i enheder af brintatomets masse, af de frie partikler (elektroner, ioner og atomkerner), som bidrager til gastrykket. På grund af den høje temperatur er atomerne, næsten fuldstændigt ioniserede, så gassen i normale stjerner kan betragtes som en idealgas også ved høje tætheder.

Eddingtons standardmodel

I boksen bruges de betegnelser for fysiske størrelser, som defineres og omtales i hovedteksten. De to ligevægtsbetingelser, som stjernerne skal opfylde, giver differentiaalligninger, som bestemmer deres opbygning. Betragt en kugleskal i afstanden r fra stjernens centrum med den lille tykkelse dr . Den masse, der ligger indenfor kugleskallen, kalder vi M_r , så tyngdeaccelerationen på et punkt i kugleskallen bliver $g = GM_r/r^2$.



Figuren viser et lag i stjernen i afstanden r fra centrum med den lille tykkelse dr . Et masseelement med massen $dm = \rho dr dA$, hvor dA er tværsnitsarealet, er markeret. I hydrostatisk ligevægt må den indadrettede tyngdekraft $dm g$, der virker på elementet, være lig med den udadrettede trykkraft $dP dA$.

Betragt nu en cylinder med tværsnit dA og højden dr i kugleskallen. Dens masse er $dm = \rho dr dA$, hvor ρ er massefylden, og den indadrettede tyngdekraft på cylinderen er $dm g$. Den skal være lig med den udadrettede trykkraft $dP dA$, hvilket fører til ligningen:

$$\frac{dP}{dr} = -g\rho = -\frac{GM_r\rho}{r^2} \quad (1)$$

På overfladen af stjernen er $r = R$, stjernens radius og $M_r = M$, stjernens totalmasse. Tilsvarende kalder vi energifluxen gennem kugleskallen L_r , og værdien af L_r på overfladen bliver stjernens luminositet L .

Nu definerer Eddington en størrelse, der varierer med r

$$\eta = \frac{L_r}{M_r} \frac{M}{L}$$

På stjernens overflade bliver $\eta = 1$; og hvis energiproduktionshastigheden ε var konstant gennem stjernen var $\eta = 1$ i hele stjernen. Hvis ε vokser ind gennem stjernen, fx fordi den vokser med temperaturen, vil η også vokse. Men Eddington mente, at η som en middelværdi over kuglen med radius r ikke vil vokse til en meget høj værdi.

Eddington antog, at energitransporten udefter i stjernerne foregår ved stråling, strålingsligevægt. Han viste så, at ligevægtsbetingelsen er

$$\frac{dp_R}{dr} = -\frac{k\rho}{4\pi c} \frac{L_r}{r^2} \quad (2)$$

hvor k er opaciteten. Ligning (2) er identisk med den ligning for temperaturgradienten dT/dr , der benyttes i præcise formuleringer af stjerneopbygning, se fx [13], idet $p_R = \frac{a}{3}T^4$. Så gjorde Eddington den antagelse, at

$$\eta k = \text{konstant} = k_0 \quad (3)$$

Det var ret dristigt, fordi η afhænger af hastigheden af energiproduktionen, ε , som var helt ukendt, og teorien for k var ny og usikker. Eddington mente som nævnt, at η bør vokse fra værdien 1 på stjernens overflade og ind mod centrum. Han kunne også argumentere for, at k aftager ind mod centrum, fordi temperaturen vokser indad. Derfor var antagelsen $\eta k = \text{konstant}$ måske en god approksimation.

Mht. den matematiske løsning af problemet er antagelsen yderst elegant. Ved at dividere ligning (2) med (1) finder vi:

$$\frac{dp_R}{dP} = \frac{k}{4\pi c G} \frac{L_r}{M_r} = \frac{k\eta}{4\pi c G} \frac{L}{M} = \frac{k_0}{4\pi c G} \frac{L}{M} = \text{konstant}$$

Og da både p_R og P på overfladen af stjernen er forsvindende i forhold til værdierne i det indre, kan integrationskonstanterne sættes til 0, så vi får:

$$\frac{p_R}{P} = \frac{k_0}{4\pi c G} \frac{L}{M} = \frac{P - p_G}{P} = 1 - \beta$$

som kan skrives

$$L = 4\pi c G M(1 - \beta)/k_0 \quad (4)$$

Her har vi fundet ligning (8), som vi ønsker at udlede, hvor vi blot kalder k_0 for k .

Bemærk, at Eddington undgår både at få temperaturen T ind i sine formler og at skulle tage hensyn til variationen af opacitet og energiproduktionshastighed gennem stjernen, pga. antagelsen i ligning (3), ved denne løsning af differentiaalligningerne. Uden approksimationer giver det klassiske, matematiske problem stjerneopbygning fire sammenhørende, ikke-lineære, førsteordens differentiaalligninger for funktionerne $P(r)$, $T(r)$ eller alternativt p_R , M_r og L_r , se fx [13]. Det er imponerende, at Eddington ved approksimationer, som viser sig at give ganske gode stjernemodeller, kunne reducere det helt umulige analytiske integrationsproblem for fire sammenhørende differentiaalligninger, så ligning (4) nemt kan udledes. Han starter med at udnytte ligning (1), som udtrykker hydrostatisk ligevægt sammen med ligning (2), som angiver betingelsen for strålingsligevægt, til at udlede ligning (4) på den måde, vi lige har set.

Hermed er løsningen af problemet dog ikke afsluttet. Opgaven er også at bestemme strukturen af en model med given masse, radius og stofsammensætning (μ). Eddington kunne ikke angive en analytisk løsning, men udnyttede de på hans tid velkendte *polytrope* stjernemodeller. I ligning (1) indgår tre ubekendte funktioner af r : P , ρ , og M_r . Udover (1) har man den trivielle kontinuitetsligning:

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (5)$$

Så til at lukke systemet kræves åbenbart endnu en ligning. I *polytrope* modeller antages en sammenhæng mellem P og ρ :

$$P = K \rho^{(n+1)/n}, \quad (6)$$

hvor K og n er konstanter og n kaldes *polytropindexet*. Navnet 'polytrop' betyder her simpelthen, at ligning (6) gælder i modelerne.

For valgt K og n kan man ved beregninger (numerisk integration af ligning (1) og (5) fra centret under benyttelse af ligning (6)) konstruere stjernemodeller. Herved finder man variationen af massefunktionen M_r , trykket $P(r)$ og tætheden $\rho(r)$ gennem modellen, og stjernens radius og masse bliver den værdi af (r, M_r) , hvor $P = \rho = 0$. Anvendelse af tilstandsligningen for en idealgas giver endelig temperaturforløbet $T(r)$.

I praksis udnyttede man en variabeltransformation, der gør det muligt at bestemme alle strukturvariable vha. en forudberegnet tabel uden hver gang at skulle udføre numeriske integrationer selv.

De første stjernemodeller, som gav en ret realistisk variation af de fysiske størrelser gennem modellerne var baseret på adiabat-ligningen $P = K \rho^{5/3}$, som gælder, når energitransporten gennem stjernen sker ved stofstrømninger i en énatomig idealgas. Det ses, at dette tilfælde svarer til $n = 3/2$. Værdier af n mellem 0 og 5 giver en serie af meget forskellige stjernemodeller.

Eddingtons fremgangsmåde var [8], paragraf 86, at han først viste, at totaltrykket i hans model kan skrives $P = K \rho^{4/3}$, hvor K er en konstant, idet gassen antages at være en idealgas. Standardmodellen er derfor en polytrop med polytropindex $n = 3$. Fra den veludviklede teori for polytropen kunne Eddington tage nogle formler, og en af disse formler giver netop ligning (7) i artiklens hovedtekst, når der indsættes talværdier for de fysiske konstanter. Den er jo afgørende for Eddingtons diskussion.

Lad os betegne brøkdelen af stoffet efter vægt, som er: X , Y og Z for henholdsvis hydrogen, helium og (alle) tungere grundstoffer. Hvis fx $X = 0,70$, $Y = 0,25$ og $Z = 0,05$ betyder det, at 70 % af stjernens masse er brint, 25 % er helium og 5 % er tungere grundstoffer.

For ren brint kommer der to partikler, elektronen og protonen, fra hver masseenhed, dvs. $\mu = 0,5$. For helium kommer tre partikler, $\mu = 1,33$, idet ${}^4\text{He}$ er langt den hyppigste heliumisotop, og hvert heliumatom bidrager med to elektroner og atomkernen. For tungere grundstoffer finder vi $\mu \approx 2,0$, fordi de hyppigst forekommende atomer alle har netop halvt så mange elektroner som atomvægten angiver. Før ca. 1930 brugte man som standard $\mu = 2,2$ svarende til at en stor del af stjernestoffet var jern og andre tunge grundstoffer.

Det totale tryk $P = p_G + p_R$ består hos Eddington af gastrykket p_G og strålingstrykket p_R , der kan opfattes som trykket fra fotongassen. Stjerner består af stof og stråling. Idet gastrykket skrives som en brøkdel af hele trykket, $p_G = \beta \cdot P$, udtrykkes balancen (eller vægtningen mellem gas- og strålingstryk) ved det relative gastryk $\beta = p_G/P$. Strålingstrykket bliver derfor $p_R = (1 - \beta) \cdot P$.

Eddingtons resultater og konklusioner

Som nævnt gjorde Eddington en antagelse om energiproduktionen kombineret med opaciteten. Antagelsen var genial i den forstand, at Eddington så kunne reducere hovedproblemet i stjerneopbygning til én simpel differentialligning, hvis løsning direkte kan nedskrives, se boksen *Eddingtons standardmodel* (foregående side). Hans hovedresultat af analysen er to formler, se paragraf 87 i [8]:

$$1 - \beta = 0,00309 \cdot M_s^2 \mu^4 \beta^4 \quad (7)$$

$$L = 4\pi c G M (1 - \beta) / k \quad (8)$$

hvor M_s er massen i solenheder, G gravitationskonstanten og k en repræsentativ opacitet. Vha. den næsten mytiske fjerdegradsligning for β , ligning (7), kan man beregne β når blot stjernens masse M og middelmolekylvægt μ er givet. Eddington fremhæver, at β er uafhængig af stjernens radius og opaciteten (og konstant igennem en standardmodel). Det er nemt nok at løse ligning (7) for β numerisk. For Solen finder Eddington med sit valgte $\mu = 2,2$, at det relative strålingstryk $(1 - \beta)$ er 5,7 %. Hvis vi derimod antager, at Solen består af ren brint, er $\mu = 0,5$, og det relative strålingstryk bliver kun 0,02 %. Det kunne Eddington slet ikke lide, fordi han så noget smukt og betydningsfuldt i, at stjerner netop er de kloder, hvori både gastrykket og strålingstrykket bidrager væsentligt til det totale tryk. Herved fik han jo en smuk forklaring på, at stjerner netop har de masser, vi observerer, og ikke masser flere størrelsesordener mindre eller større. Derfor forkastede han den hypotese, at stjernerne kunne have et højt brintindhold.

I ligning (8) er k en middelværdi gennem stjernen af opaciteten. Til diskussionen af k benyttede Eddington Kramers' opacitetslov, og med $\mu = 2,2$ giver ligninger (7) og (8) den teoretiske $M - L$ relation for stjerner

opbygget efter standardmodellen. Ved sammenligning med de bedste observationsdata for mange stjerner fandt Eddington en fin overensstemmelse med *formen* af kurven (sammenhængen mellem stjernens masse M og dens luminositet L) over hele masseintervallet – langt bedre end han i første omgang havde forventet. Det kunne betragtes som et bevis på gyldigheden af standardmodellen.

Der var dog det problem, at den *astronomiske* opacitet, som observationsdata krævede, var omkring 10 gange større end den *teoretiske* værdi, som direkte beregninger fra Kramers' lov og kendskabet til stjernestrukturen (forløbet af temperatur og tryk gennem de relevante stjernemodeller) gav. Og Eddington kunne ikke give nogen tilfredsstillende forklaring på uoverensstemmelsen. Han formodede (håbede), at bedre observationsdata og nye kvantemekaniske studier af den dengang meget usikre absorptionsberegning ville give bedre overensstemmelse. Lidt senere i bogen skriver han dog [8], paragraf 172: "By assuming that the stars contain a large proportion of hydrogen the discrepancy would be removed; but this hypothesis would be in disagreement with earlier conclusions as to the intensity of radiation pressure. Other changes of chemical constitution make no important difference."

Strömgren, brintindhold og Hertzsprung-Russell-diagrammet

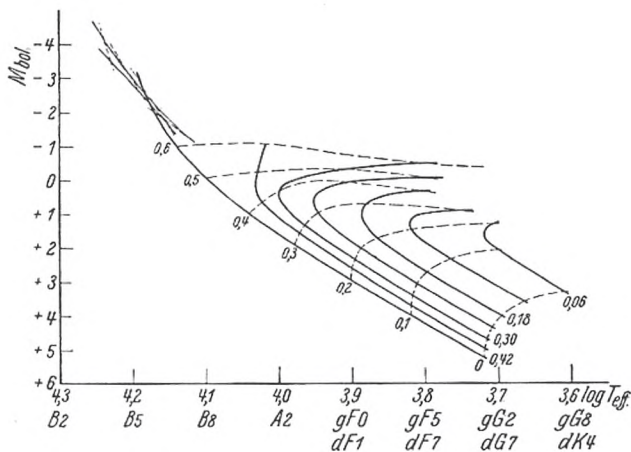
I 1932-artiklen [1] viderefører Strömgren Eddingtons studier med en detaljeret diskussion af observationsmaterialet og en mere præcis beregning af middelmolekylvægten og den teoretiske opacitet. Programmet angives i indledningen (oversat): "I de følgende sektioner vil vi antage hydrogenhypotesen (den normale ikke den ekstreme). Vi vil *stole på* den teoretiske værdi af opaciteten og *deducere* middelmolekylvægten og følgelig hydrogenindholdet i stjerner med kendt M , R og L , hvorimod Eddington stoledes på middelmolekylvægten (ingen hydrogen) og deducerede opaciteten".

Strömgren beregner numeriske værdier af opaciteten for mange kombinationer af tæthed og temperatur og benytter dem til at beregne teoretiske k -værdier for Capella, Solen og Sirius. Herefter giver ligning (8) det relative strålingstryk $(1 - \beta)$ og ligning (7) middelmolekylvægten μ . Idet Strömgren kun antog hydrogen X og tunge grundstoffer Z i stoffblandingen, bliver $\mu = 2/(1 + 3X)$, hvoraf X nemt beregnes. Strömgren fandt X omkring 0,30 for Solen og de to stjerner, og kunne konkludere, at stjernerne indeholder en væsentlig mængde brint (i modsætning til den herskende opfattelse på den tid). Det var en revolution; det er jo svært at acceptere en ide, der strider mod den herskende "sandhed" gennem mange år. I slutdiskussionen bemærker han, at alle de observerede luminositeter også kan reproducere med X tæt ved 1.

I Strömgrens følgende artikel fra 1933 [2] beregner han X i 40 stjerner med gode observationsværdier for masse, radius og luminositet¹, og viser, at en stjernes position i HR-diagrammet er bestemt af massen M og X .

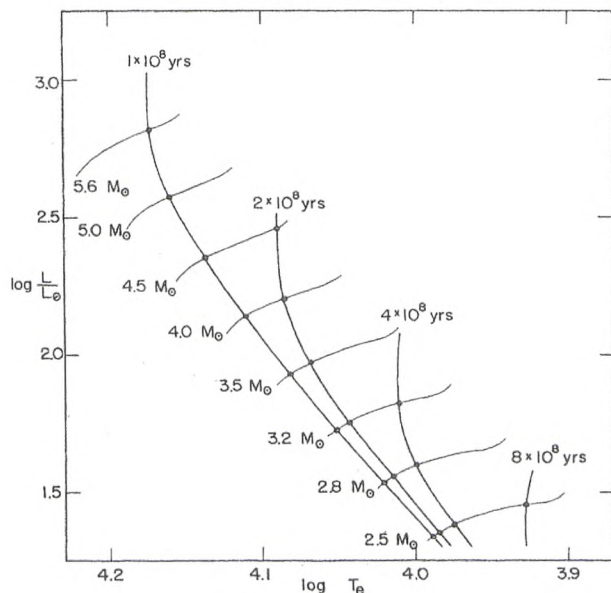
¹Masser og radier af stjerner kan bl.a. bestemmes hvis de er medlemmer af dobbeltstjernesystemer, se fx Temaboks 10.1 i [3]. Andre stjerner, kan sammenlignes med sådanne stjerner hvis de har samme spektralklasse.

Figur 2 viser hans figur 4. Her er de stiplede kurver tegnet for konstant masse fra 1 solmasse (mærket 0) til 4 solmasser (mærket 0,6). De fuldt optrukne kurver er for konstant brintindhold fra $X = 0,42$ for den nederste kurve til 0,06 på den øverste. Strömngren skriver, at den observerede hovedserie svarer til X -værdier mellem ca. 0,45 og 0,25.



Figur 2. Strömngrens Hertzsprung-Russell-diagram fra 1933. Akserne viser henholdsvis (logaritmen til) den effektive temperatur (varmest t.v.) sammen med spektraltyper og luminositeten (mest lysstærke øverst) udtrykt ved den bolometriske magnitud, $M_{bol} = 4,85 - 2,5 \log(L/L_{sol})$. De stiplede kurver er tegnet for konstant masse. Den nederste kurve for 1 solmasse (mærket 0) kan forstås som et udviklingsspor for Solen, dog ikke realistisk, idet den faktiske sol ikke præcist har fulgt det spor, men noget der ligner. De fuldt optrukne kurver er for konstant X -værdi. Se teksten for detaljer.

Figuren minder jo om de velkendte HR-diagrammer med realistiske udviklingsspor (konstant M) og kurver for konstant alder, jvf. figur 3 fra [13] side 169.



Figur 3. HR-diagram med realistiske udviklingsspor gennem hovedserien (konstant masse angivet i solmasser, $M_{\odot}$, ved hvert spor) og tidskurver med de angivne aldre. Sporene starter ved alder 0, og for voksende alder går de mod større luminositet og større radius (mod kæmpestjernestadiet). Figuren er fra [13].

Med vanlig forsigtighed udtaler Strömngren sig kun klart om det, der direkte kan ses i diagrammet, fx at

mindre brintindhold X (brøkdelen af brint) for samme M medfører større luminositet og større radius, idet radien vokser opad og mod højre i diagrammet. Han skriver også, at kæmpestjerner (med M_{bol} omkring 0) øjensynligt har X fra 0,2 til 0,3. I dag ved vi, at det ikke er korrekt, hvilket skyldes, at Eddingtons standardmodel ikke er fornuftig for alle kæmpestjerner.

Stjerner med masser større end 4 solmasser opfører sig afvigende i figur 2, og detaljerne i figur 2 og figur 3 er ret forskellige. Strömngrens fortolkninger afviger på flere punkter fra idéerne i dag.

Hovedårsagen til disse forskelle er, at både Eddingtons og Strömngrens modeller er homogene, hvorimod vi i dag ved, at stjernerne udvikler sig ved først at opbruge brinten i centralområdet, så vi får en meget inhomogen model i slutningen af hovedseriefasen. Betragter vi sporet for solmassen i figur 2 ses, at en evt. hydrogenforbrænding i Strömngrens hovedseriefase fra $X = 0,45$ til 0,25 giver en ændring i M_{bol} på ca. 1 størrelsesklasse. Senere solmodeller giver også en ændring af lignende størrelse; men for en ændring af centralværdien af X fra ca. 0,70 til 0,05. Ligheden mellem de to figurer er kun overfladisk. Men den stammer fra, at omdannelse af hydrogen til helium i alle rimelige stjernemodeller vil give en forøget lysstyrke.

I 1934 publicerede Strömngren en artikel på dansk [9], som også var baseret på figur 2 her. Han betonedede igen de mange usikkerhedsmomenter; men pegede på et mere moderne billede. Han foretrækker nu klart den intermediære tidsskala med hydrogenforbrænding ved en dengang ukendt proces. Han udelukker den korte skala og siger, at der næppe kan anføres argumenter for den lange tidsskala. Hans helhedsbillede starter: "Begyndelsen til en Stjerne er en Koncentration i en uhyre fortyndet Taagemasse. Efterhaanden dannes en Stjerne, der relativt hurtigt trækker sig sammen. Efter en kort Periode, hvor den ikke er i varig Ligevægt, naas den Ligevægtskonfiguration, der svarer til Stjernens Masse og dens – sandsynligvis store – Brintindhold. Nu opbygges Brinten langsomt til tungere Grundstoffer, og Stjernen udvider sig langsomt, idet den følger Linierne med konstant Masse i H-R-Diagrammet". Herefter følger nogle muligheder vedr. stjerneudvikling, som vi i dag ved, ikke realiseres.

Man kan undre sig over, at Strömngren i så ung en alder (22 år i 1930) kunne komme med overbevisende løsninger på problemer, der havde været studeret længe af de førende teoretikere, de tre englændere, H.N. Russell i USA og andre. Han blev omtalt som "unge Strömngren", formentlig både pga. sin alder og fordi hans far, professor Elis Strömngren (1870-1947) også var en kendt astronom. Men læser man Rebsdorfs fremragende Strömngren-biografi [6], får man en god forklaring. En udførlig omtale af Bengt Strömngrens liv og virke findes i [7].

Bengt Strömngren var opvokset på Østervold i København i et astronommiljø, der var aktivt og internationalt, så han fra barnsben lærte nogle af de førende astronomer at kende. Hans familie var meget ambitiøs, og især hans far interesserede sig for hans undervisning og hans senere forskningsarbejde. Rebsdorf skriver [6], side xvi, at især Elis' uvurderlige dagbog gjorde det

muligt for ham at skrive om Bengts opvækst og tidlige karriere fra 1908 til 1929. Det var en selvfølge, at han og hans bror skulle være nr. 1 i klassen i de bedste skoler. Rebsdorf nævner [6], side 94, at Elis Strömghren i en sygdomsperiode i januar 1919 (den spanske syge), da Bengt var 11 år, underviste ham i mere avanceret matematik; nogle emner:

- Integrationskonstanter
- Afledede af højere orden
- Integraler af højere orden
- Afledede og differencer
- Forskellige integraler
- 3, 4 ligninger med 3, 4 ubekendte
- Numerisk differentiation
- Numerisk integration
- Fejlloven
- De mindste kvadraters metode
- Faldproblemet
- $\sqrt{i}$, $\sqrt[4]{i}$
- Maxima og minima
- Partiel differentiation
- Rødder til ligninger af højere orden.

Der var to yderligere omstændigheder, der gav Strömghren gode forberedelser til hans forskning. På Observatoriet lærte han tidligt at bruge numeriske beregninger ved løsning af vanskelige problemer, og modsat mange andre, fx Eddington, kunne han godt lide at sidde med en regnemaskine i dagevis.



Figur 4. Her benytter Bengt Strömghren i 1930'erne en elektrisk regnemaskine, som kunne multiplicere eller dividere to store tal med hinanden på omkring et minut. Dengang var en sådan maskine en avanceret og ret kostbar sag. Fra [6].

Og på Bohrs Institut kunne Strömghren også på nærmeste hold følge udviklingen i kvantemekanikken og konsultere de førende fysikere. I de to centrale afhandlinger er både kvantemekaniske beregninger af opaciteter og store numeriske beregninger baseret på detaljerede stjernemodeller afgørende. Strömghren var eminent udrustet til at gå i gang med de uoverskuelige problemer omkring 1930.

Efter 1933

I sin videnskabelige selvbiografi [10] omtaler Strömghren publikationerne [1] og [2] ret detaljeret. Han nævner også, at han kort efter artiklen om brintindholdet modtog et særdeles venligt og elskværdigt brev fra Eddington [som jo længe havde været modstander af

brint i stjernestof], i hvilket han informerede Strömghren om, at han [Eddington] for nylig var vendt tilbage til spørgsmålet om brintindholdet og havde nået en konklusion, som passede med min.

I forordet til den danske udgave af Eddingtons "Stjerner og atomer" fra 1934 [4] skriver Eddington: "Nu ser det ud til, at vi nødvendigvis må regne med, at der virkelig findes en uforholdsmæssig stor Brintmængde i Stjernerne. Man [Eddington] har forsøgt enhver anden Udvej; men dette er den eneste, som kan komme til at stemme med den fysiske og astronomiske Beregning af Absorptionen i Stjernernes Indre. Dette bekræftes derved, at de, som undersøger en Stjernes ydre Lag, har fundet at disse overvejende består af Brint".

I en senere artikel fra 1937 [11] påpegede Strömghren, at den empiriske masse-luminositets-relation ikke bare var i overensstemmelse med en brintprocent på 30-40 med tunge grundstoffer for resten, men også med en blanding bestående af hydrogen og helium med kun få procent tunge grundstoffer. I 1938 bestemte Strömghren [12] Solens stofsammensætning til $X = 0,60$, $Y = 0,36$ og $Z = 0,04$, der er tæt på de værdier, vi bruger i dag. Det sidste Strömghren skriver om stjerneudvikling i sin selvbiografi er, at gennembruddet i forståelsen af energiproduktion i stjernernes indre omkring 1940 skabte nye muligheder. Fremgangen startede i 1950'erne og accelererede i 1960'erne med introduktionen af elektronregnemaskiner. I de følgende år var han specielt interesseret i beregning af udviklingsspor og isokroner for hovedseriestjerner med henblik på aldersbestemmelser til brug i studier af tidsudviklingen af Mælkevejssystemet.

På Østervold

Efter Elis Strömghrens pensionering i 1940 blev Bengt Strömghren udnævnt til ordinær professor ved Københavns Universitet. Under 2. verdenskrig og i årene lige efter var mulighederne for forskning i Danmark meget begrænsede og opbygningen af observatoriet i Brorfelde gik meget langsomt. Blandt andet derfor tog Strömghren i 1951 imod et tilbud om at overtage stillingen som direktør for Yerkes- og McDonald-observatorierne i USA og senere et professorat ved Institute for Advanced Study i Princeton. Her blev han til 1967, hvor han kom tilbage til København og fik bolig i Carlsbergs Æresbolig. Strömghrens virke fik stor betydning for astronomifaget i København.

Anders Reiz og stjerneudvikling

I 1958 blev Anders Reiz udnævnt til professor i Astrofysik ved Københavns Universitet. Jeg selv var startet som astronomistuderende ved Astronomisk Observatorium på Østervold i 1957. Reiz holdt straks en forelæsningsrække om stjerneudvikling, og jeg blev begejstret for emnet, som forekom betydelig mere spændende end de muligheder, jeg ellers havde undersøgt for den afsluttende specialeopgave i studiet. Reiz' kursus var baseret på en helt ny lærebog af Martin Schwarzschild "Structure and Evolution of the Stars" [13]. Den er letlæst og er velegnet som kagebog til modelberegninger. Reiz havde erfaring med stjernemodeller fra

håndregninger, og ville gerne fortsætte med stjerneudvikling, dvs. beregning af en serie af stjernemodeller, som følger tidsudviklingen af en stjerne. Da jeg allerede havde en vis erfaring med numerisk analyse og gerne ville fortsætte med anvendelse af de dengang helt nye datamater (computere), passede det mig udmærket. I Danmark var der én maskine, DASK, og jeg gik på programmeringskursus og begyndte at skrive programmer i forbindelse med astronomistudiet.

Efter eksamen i 1960 blev jeg ansat på Astro-nomisk Observatorium, hvor vi så i 1962 fik rådighed over vores egen maskine af typen GIER. Det var helt usædvanligt for et lille universitetsinstitut på den tid og skyldtes Reiz' forudseenhed og gode kontakter. Vi startede straks opbygning af et program til stjerneudvikling. Fordelen ved at anvende en elektronregnemaskine i stedet for håndregninger er, at det så bliver praktisk muligt at beregne modeller med en realistisk fysik. Det store problem er her igen opaciteten, som kræver så omfattende beregninger, at ingen vil udføre dem direkte fra basisfysikken. Man er tvunget til at udnytte forudberegnete tabeller for den grundstofsammensætning, man vil studere. I mange år blev de bedste beregninger udført ved Los Alamos Laboratorierne i USA, som rådede over de kraftigste computere (mange størrelsesordener kraftigere end GIER). Her blev kontakterne til Strömgren afgørende, idet han formidlede kontakten til Los Alamos. I 1960'erne og 1970'erne udførte en lille gruppe omfattende stjerneudviklingsberegninger i København. Da vi i de første år brugte GIER til beregningerne tog de sin tid. Til beregning af hver model i en udviklingssekvens brugte vi tæt ved 1 time (for nogle detaljer se [14]).

Da jeg kom til Østervold i 1957, vidste jeg næsten intet om dansk astronomi. Jeg kendte intet til Elis og Bengt Strömgren, bortset fra at de havde skrevet en elementær lærebog, som jeg brugte til et astronomikursus. Til afsluttende eksamen i 1960 skrev jeg speciale om stjerneudvikling; men opdagede ikke Strömgrens arbejder fra 1932 og 1933. Det var måske ikke så mærkeligt, fordi de ikke var med i pensum og heller ikke spillede nogen rolle i den aktuelle forskningssituation. Schwarzschilds bog var alt, vi behøvede.

Afslutning og konklusion

Strömgrens to publikationer fra 1932 og 1933 giver et klart brud med mange af de "gamle" ideer og usikre teorier om stjerneopbygning og stjerneudvikling før 1930. Mest drastisk var nok erkendelsen af, at brint udgør en væsentlig brøkdel af massen i stjernerne. Den ødelagde Eddingtons yndlingside om balancen mellem gastryk og strålingstryk i hovedparten af stjernerne; kun i de allertungeste er strålingstrykket afgørende. Det er ikke altid, at det skønne også er sandt. Det er bemærkelsesværdigt, at Eddington allerede i 1926 havde indset, at hans opacitetsproblem kunne løses ved at antage et væsentlig hydrogenindhold i stjerner. Men han måtte foretrække det skønne. Eddington kunne i 1926 have draget de samme konklusioner, som Strömgren nåede til i 1933; men det ville have krævet for drastiske brud med de dengang velkendte og accepterede forestillinger om stjerners fysiske egenskaber.

Strömgrens diskussion af HR-diagrammet gav for

første gang et godt, konkret argument for, at energiproduktionen i hovedseriestjerner sker ved omdannelsen af hydrogen til helium og tungere grundstoffer, idet de følger linjer med konstant masse i HR-diagrammet. Og i artiklen på dansk fra 1934 skriver han som nævnt direkte, at stjerner i hovedseriefasen opbygger brint til helium og tungere grundstoffer i den intermediære tidsskala – det moderne billede. Han gør dog også opmærksom på mange usikkerhedsmomenter i de senere faser af stjerneudvikling.

Litteratur

- [1] Bengt Strömgren (1932), The opacity of stellar matter and the hydrogen content of the stars, *Zeitschrift für Astrophysik*, Bind 4, side 118, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1932ZA.....4..118S>.
- [2] Bengt Strömgren (1933), On the Interpretation of the Hertzsprung-Russell-Diagram, *Zeitschrift für Astrophysik*, Bind 7, side 222, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1933ZA.....7..222S>.
- [3] Helle og Henrik Stub, Det levende Univers, PRAXIS – Nyt Teknisk Forlag (2015). Denne bog er på gymnasieniveau.
- [4] A.S. Eddington (1927), dansk udgave (1934), *Stjerner og Atomer*, Nordisk Forlag.
- [5] J. Jeans (1930), *The Universe around us*, Cambridge University Press.
- [6] S.O. Rebsdorf (2005), *The Father, the Son and the Stars*, Aarhus Universitet.
- [7] Simon Olling Rebsdorf, Bengt Strömgrens liv blandt stjerner; <http://www.nbi.ku.dk/hhh/bengt/stromgren/>.
- [8] A.S. Eddington (1926), Dover ed. (1959), *The Internal Constitution of the Stars*, Dover publ.
- [9] B. Strömgren (1934), Teorier for Stjernernes Udvikling, *Nordisk Astronomisk Tidsskrift*, bind 15, side 1.
- [10] B. Strömgren (1983), Scientists I have known and some astronomical problems I have met, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, bind 21, side 1.
- [11] B. Strömgren (1937), Die Theorie des Sterninnern und die Entwicklung der Sterne, *Ergebnisse d. exakten Naturw.* bind 16, side 465.
- [12] B. Strömgren (1938), On the helium and hydrogen content of the interior of the stars, *Astrophysical Journal*, bind 87, side 520.
- [13] M. Schwarzschild (1958), Dover ed. (1965), *Structure and Evolution of the Stars*, Dover Publ.
- [14] J.O. Petersen (2015), Observatoriet på Østervold i vækstperioden 1958-1975, DASK og GIER – dengang og nu, *KVANT*, maj 2015.



Jørgen Otzen Petersen er dr.scient. i astrofysik og arbejdede med de første danske computere DASK og GIER. Forskningsområdet har været stjerneudvikling og stjernepulsation. Studier af Cepheidevariable stjerner, som svinger med to perioder samtidigt, var en forløber for den moderne asteroseismologi.

CANDSCIENT.NU

FÅ NATURVIDENSKABELIG VIDEN OG SPAR PENGE

Bliv en del af vores store netværk
for cand.scient.er. Vi styrker dig og
din karriere med viden, rådgivning
og økonomiske fordele.
Bliv klogere på candscient.nu

**PRØV DET GRATIS
I 3 MÅNEDER**

Hawking i Danmark

Af Michael Cramer Andersen

Den engelske teoretiske fysiker Stephen Hawking gæstede Danmark i dagene omkring den 24. august, hvor han om aftenen holdt et offentligt foredrag i et helt fyldt DR Koncerthus.

Titlen på Stephen Hawking's foredrag var "Quantum Black Holes". Der var en god stemning af forventning mens publikum fandt deres pladser. Interessen for at se den berømte fysiker var så stor, at alle billetter (ca. 1500 udover de inviterede) blev solgt på et kvarter og der stod 30.000 på venteliste. Det var derfor et godt initiativ, at der blev arrangeret live streaming til 27 biografer landet over, hvor omkring 6000 mennesker fulgte med.

Arrangørerne var *Carlsberg Foundation*, *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab* og *Niels Bohr Institutet*. Anledningen var, at Hawking skulle deltage i en konference om nye strømninger i partikelfysik og kosmologi, afholdt af *Niels Bohr Internationale Akademi* og Videnskabernes Selskab.

I de seneste år er teoretisk partikelfysik og strengteori beskyldt for at være i krise. Den ekstremt dyre *LHC Collider* har primært bekræftet Higgs-partiklen, som ventet. Men der er ikke set nogle opsigtsvækkende nye partikler. De ventede opdagelser af "ny fysik", ud over Standardmodellen, er kort sagt udeblevet. Rygterne om en ny partikel, der skulle være seks gange tungere end Higgsen, har vist sig at være en statistisk fluktuation. Men teoretikerne bevarer fanen højt [1]. Der er fx mange data fra LHC, som endnu ikke er analyseret. Ved konferencen blev et væddemål om, hvorvidt man ville have bekræftet eksistensen af supersymmetriske partikler ved LHC afgjort. De, der satsede på at supersymmetri skulle være bekræftet her i 2016, tabte en flaske god cognac.

Hawking talte i sit foredrag om sorte huller, kvantemekanik og termodynamik. Han lagde blødt ud med at vise en planche med Solsystemet og fortalte, at "tyngdekraften er en langtrækkende kraft som altid er tiltrækkende". Derefter fortsatte han med at ridse historien op om, hvordan sorte huller blev forudsagt som de kompakte rester af en kollapsede stjerne og hvordan de siden blev observeret. Hans egne bidrag om singulariteter, udført sammen med bl.a. Roger Penrose, blev nævnt. I 1975 studerede han en kvantemekanisk effekt der gør, at et sort hul med tiden vil udsende stråling og fordampe. Det er siden

blevet døbt *Hawking-stråling*.

Allerede i 1970'erne forudsagde Hawking, at hvis der blev dannet mini sorte huller kort efter Big Bang, og de fordampede, ville de kunne ses som gammastråling. Hawking lagde ikke skjul på, at observationer af Hawking-stråling ville give ham en nobelpris. Men strålingen er ikke observeret og det er omdiskuteret hvorvidt mini sorte huller overhovedet eksisterer. Nu satser Hawking på, at der kan produceres mikroskopiske sorte huller ved CERN og at de fordamper. Eller at man ser spor af Hawking-stråling i tyngdebølger fra Big Bang. Han går efter en nobelpris.



Stephen Hawking i DR's Koncertsal den 24. august 2016. Foto: HASSE FERROLD.

I de senere år har Hawking beskæftiget sig med informationsparadokset i sorte huller. Han har bl.a. tabt et væddemål sammen med Kip Thorne mod John Preskill om, hvorvidt den information der udsendes fra et sort hul gennem Hawking-strålingen stammer fra det sorte huls indre eller kommer udefra [2]. Selv information der er gået tabt i et sort hul bør bevares i Universet. Dette tema behandles bl.a. i filmen "Interstellar". Hawking afsluttede med at sige, at "selv om man er havnet i et sort hul er der altid en udvej". En forfriskende optimisme fra en mand der er lænket til en kørestol og taler gennem en computer.

Litteratur

- [1] Gunvor Lystbæk Vestergård, Trevler i strengteorien, *Weekendavisen* 2. sept. 2016.
- [2] Thorne-Hawking-Preskill bet, https://en.wikipedia.org/wiki/Thorne-Hawking-Preskill_bet