Ole Rømers eklipsarium

Meddelelser udgives af foreningen Ole Rømers Venner og udkommer hvert år med historiske artikler inden for foreningens virke. Forslag til emner modtages gerne.

Hjemmeside: www.oleroemer.dk

Ansvarshavende redaktør:
Ole Henningsen
olehen@vejrmølle.dk

Redaktør:
Jørgen Lyngbye
jin@c.dk

Teknisk redaktør:
Steen Lærke
Steen.Laerke@vip.cybercity.dk

Meddelelser i løssalg: 75 kr. inkl. porto.

Redaktionen af dette nummer er sluttet
den 30. marts 2012.

ISSN: 1604 - 9322

Meddelelser

fra

Ole Rømers Venner

Det Danske Rømer Selskab

Særnummer april 2012

Ole Rømers glemte formørkelsesmaskine

20. årgang 2012

Meddelelser 2012

Særnummer

Ole Rømers formørkelsesmaskine eller eklipsarium blev genfundet på Rosenborg Slot i 1982, og efterfølgende blev det opmålt, tegnet og beskrevet af Poul Darnell. Beskrivelsen blev udført som en ren mekanisk funktionsbeskrivelse, der var baseret på såvel tegninger som beregninger af mekanismerne.

Da eklipsariet imidlertid viste sig, at være en meget avanceret astronomisk/mekanisk model for sin tid (1680), var det klart, at en mere indgående beskrivelse ville blive nødvendig for på denne måde at gøre opmærksom på Ole Rømers geniale konstruktion.

Det er med udgivelse af dette særnummer, at denne beskrivelse nu foreligger. Artiklen omfatter en indgående matematisk/astronomisk funktionsbeskrivelse samt en analyse af den nøjagtighed, hvormed det er i stand til at vise sol- og måneformørkelser for perioden 1580 - 1780.

Forfatterne har valgt at lade beskrivelsen udkomme som et særnummer af ”Meddelelser fra Ole Rømers Venner”, fordi artiklen hermed når ud ud til den læserkreds, som især kan have interesse i emnet. Da det er hensigten, at artiklen på et senere tidspunkt også skal udkomme på engelsk, vil forfatterne meget gerne modtage evt. kommentarer til artiklen fra tidsskriftets læsere.

Ole Henningsen, redaktør

Ole Rømers glemte formørkelsesmaskine fra 1680

Poul Darnell og Frank Nielsen

1. Indledning

Ole Rømers formørkelsesmaskine eller eklipsarium blev genfundet på Rosenborg Slot i 1982, selvom apparatet var behørigt registreret i Rosenborg Samlingernes inventarlister.

Dette kan måske lyde lidt mærkeligt; men i flere skriftlige kilder er det i tidens løb beskrevet, at apparatet var forsvundet ved en brand i København i 1795, og påstanden blev gentaget flere gange senere og nævnt så sent som i 1944 [1)] i forbindelse med fejringen af Rømers 300 års fødselsdag.

Da apparatets forsvinden åbenbart blev betragtet som en kendsgerning, var der heller ikke nogle af forfatterne til de forskellige jubilæumsbøger i 1944 , der forsøgte at efterforske dets mulige eksistens!

En af bøgerne var: ”Ole Rømer som astronom” [2)]. Bogen blev udgivet af Videnskabernes Selskab, og forfatteren var Elis Strömgren, der på dette tidspunkt var professor i astronomi ved Københavns Universitet. Strömgrens bog var en kommenteret oversættelse af ”Basis Astronomiæ” [3)]. Denne bog fra 1735, som er hovedkilden til vor viden om Ole Rømers virke som astronom, blev skrevet af Peder Horrebow, der var elev af Rømer, og som senere blev hans efterfølger som astronomiprofessor.

Strömgren oversatte hele bogen fra latin til dansk på nær kapitlerne 14 og 15, som netop omtaler Ole Rømers planetmaskiner. Om udeladelsen af de to kapitler skriver Strömgren: *”Da en beskrivelse af maskinerne imidlertid falder helt udenfor det foreliggende arbejdes opgaver, undlader vi her at give en oversættelse af de to kapitler i Basis Astronomiæ”.*

Selvom de nævnte kapitler ikke detaljeret omtaler eklipsariet, kom udeladelsen alligevel til at betyde, at en beskrivelse planetmaskinerne blev udsat på ubestemt tid.

Begivenheden som satte gang i en fornyet undersøgelse af planetmaskinerne, var fundet af Rømers eklipsarium på Rosenborg Slot i 1982, og det skulle senere vise sig, at netop denne maskine såvel teknisk som teoretisk var den mest avancerede af alle Rømers planetmaskiner.

Figur 1.1. Eklipsariet fotograferet på Rosenbog Slot ved fundet i 1982.

2. Den historiske baggrund

Under sit ophold ved Det Franske Videnskabelige Akademi 1672-1681, konstruerede Ole Rømer forskellige planetmaskiner.

Den første maskine, som blev prototype for de efterfølgende, viste planeternes bevægelser. Vi ved ikke noget om dens tilblivelse i Paris, men Rømer havde maskinen med sig hjem, da han vendte tilbage til Danmark i 1681. Efterfølgende blev den i 1697 opsat på Rundetårn, hvor den viste Tycho Brahes verdensbillede. Maskinen blev således opstillet for at ære Tycho.

Den anden maskine som blev fremstillet, var et såkaldt jovilabium, der var i stand til at vise Jupitermånernes rotation om Jupiter. Dette apparat blev fremvist i Paris i forbindelse med Rømers påvisning af lysets hastighed i 1676. Horrebow beskriver senere i Basis Astronomiæ, hvorledes jovilabiet blev anvendt på universitets-observatoriet på Rundetårn til forudsigelse af, hvornår der ville ske formørkelser af Jupiters måner. Maskinen var altså en analogregnemaskine til planlægning af fremtidige observationer. Den tredje maskine var et såkaldt saturnilabium, som var i stand til at fremvise de dengang tre kendte drabanters kredsen om planeten Saturn. Denne maskine blev første gang fremvist i 1678, og den må have været konstrueret ud fra de samme principper, som Rømers jovilabium. Ingen af de to ovennævnte maskiner eksisterer mere, idet de blev flammernes bytte ved Københavns brand i 1728.

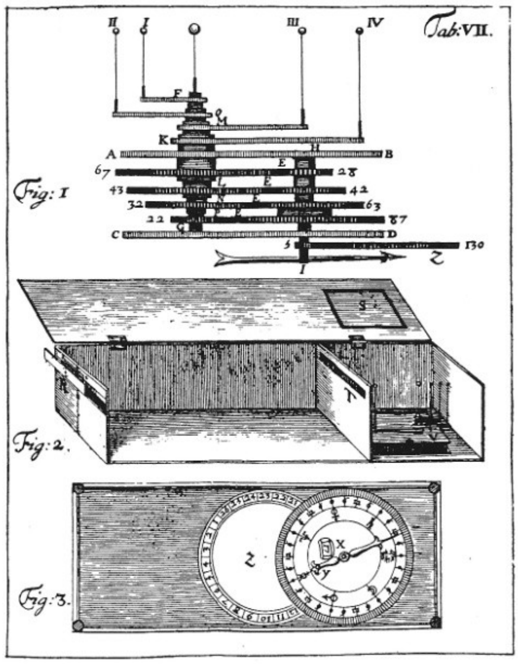
Den fjerde maskine var et egentligt planetarium, som viste de dengang seks kendte planeters gang om Solen. Denne maskine var færdig i 1680. Den femte maskine var formørkelsesmaskinen eller eklipsariet, som blev fremstillet samtidigt med planetariet, således at de to maskiner dannede et sæt. Af disse to sidstnævnte maskiner blev der udført fire sæt.

Det første sæt udførtes til Solkongen Ludvig XIV, og det blev anvendt til undervisning af kronprinsen, for hvem Rømer var lærer. Det andet sæt blev fremstillet til Shahen af Persien som fyrstegave, og et tredje sæt blev delt mellem den kinesiske kejser K´hang-hsi og kongen af Siam. Formålet med disse gaver var udelukkende at vise (prale med) hvor dygtige man var i Frankrig indenfor naturvidenskab og teknik. Det fjerde sæt blev fremstillet til den danske konge Christian den Femte, som selv måtte betale 1200 rigsdaler for de to maskiner, som Rømer havde med sig hjem, da han vendte tilbage til Danmark i 1681.

Af de nævnte fire sæt eksisterer i dag kun det danske og det franske eksemplarer på henholdsvis Rosenborg Slot i København og på Bibliothéque Nationale i Paris. Det franske eksemplar af eklipsariet er - såvidt forfatterne ved - aldrig blevet undersøgt. For de som er interesseret i en mere generel beskrivelse af alle Rømers planet-maskiner henvises til bogen: ”Ole Rømer – I kongens og videnskabens tjeneste”,[4)]

3. Teknikken i planetmaskinerne

Teknikken i jovilabiet, saturnilabiet og planetariet består af rene tandhjulskon-struktioner[5), 6)]. Figur 3.1 viser jovilabiet. Stikket stammer fra Basis Astronomiæ.



Figur 3.1. Jovilabiet.

Som det ses af stikket, består apparatet af to sæt tandhjul. Hver sæt består af 4 koncentriske tandhjul, som går i indgreb med tandhjulene i det andet sæt. På sættet til højre, hvorpå viseren er fastgjort, er alle tandhjulene gjort fast til en fælles aksel, hvorimod tandhjulene på den anden aksel er frit bevægelige i forhold til hinanden, idet de sidder på hver sin hule aksel. Hver af disse aksler bærer foroven en af Jupiters måner. På denne måde opnåede Rømer, at når viseren drejes, da drejes de fire jupitermåner med korrekte omløbstider, som angivet med viseren. Princippet med de to sæt tandhjul er bibeholdt i alle Rømers planetmaskiner på nær eklipsariet, idet denne maskine udover tandhjul også er forsynet med to kurveskiver.

En kurveskive er en plan skive, hvis form er tilpasset dens formål, og som ikke er en cirkel, men som alligevel drejes om et centrum. Når kurveskiven drejes, aftastes skivens ændrede radier kontinuerligt af en føler; eller - som man ville udtrykke det i dag - føleren læser de ”data”, som er ”indlæst” på skiven. Når kurveskiven har drejet 360 grader, gentages aflæsningen af skivens data.

Den første skriftlige beretning vi har om anvendelse af kurveskiver, stammer fra den hollandske fysiker Christiaan Huygens. Han skriver i et brev til sin bror Constantin i London [7)], der var sekretær for den engelske konge William den Tredje, at han havde konstrueret et tidsækvationsur, som: ”*også viser soltimerne uden behov for tidsækvationstabeller”*. Brevet er dateret den 4. marts 1695, og det fremgår også af dette, at broderen har talt med den engelske urmager Thomas Tompion herom.

Efterfølgende fremstillede Thomas Tompion et ur [7)], som det omtalte til William den Tredje, og dette ur findes i dag på Buckingham Palace.

Den nyreformede kurveskive, som blev benyttet i det engelske ur til at generere forskellen mellem middelsoltid og sand soltid, er vist på figur 3.2. Det ses at tidsækvationen er plottet i et polært koordinatsystem. Længderne af de grønne og de blå linjestykket angiver altså forskellen mellem middelsoltid og sand soltid i årets løb.

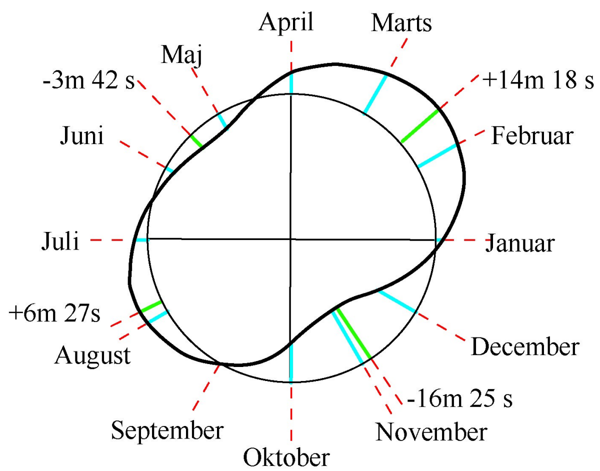


Fig.3.2.Kurveskive benyttet i Tompions tidssækvationsur.

Ud fra ovenstående, er det derfor ganske tankevækkende, at Ole Rømer allerede 15 år tidligere havde benyttet ikke blot en, men to kurveskiver af hver sin form og med hver sin omløbstid og -retning i sit eklipsarium. Rømers planetmaskiner blev fremstillet af Ludvig den Fjortendes urmager Isaac Thuret.

På figur 3.3 og 3.4 er vist to udsnit af forsideskiven på Rømers planetarium, konstrueret og fremstillet umiddelbart før eklipsariet.

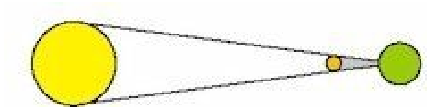
Figur 3.3.Mulig solformørkelse *Figur 3.4. Mulig Måneformørkelse*

Jorden er repræsenteret ved en grøn halvædelsten. Stenen er placeret i centrum af en drejelig sølvskive, som ved sin kant bærer en messingstift, der repræsenterer Månen.

Fotografierne viser hvorledes Månen drejes rundt om Jorden og i samme plan hvori også Solen er vist. Her har Rømer foretaget en forenkling, idet Månens baneplan i virkeligheden skærer ekliptiptikas plan, dvs jordbanens plan, under en vinkel på 5,1°. Man kan derfor sige, at Rømer~~s~~ forenkling, består i, at han har drejet Månens baneplan tilbage i Ekliptikas plan. Af figuren kan man se, at der er mulighed for formørkelse to gange hver måned, nemlig ved fuldmåne og ved nymåne. Men på grund af den nævnte vinkel på 5,1˚, er det meget sjældnere - og vanskeligt at forudsige - hvornår der faktisk kommer en formørkelse. Det er denne vanskelighed, som Rømer overvinder i sit eklipsarium. De to maskiner er derfor på denne måde direkte forbundet.

4. Astronomiske forudsætninger for eklipsariet

For at forstå det følgende er det først og fremmest nødvendigt, at man ved hvad en synodisk måned er. En synodisk måned er 29,530589 døgn, og det er den tid der går fra en nymåne til den næste nymåne. (Vi angiver her tidsperioder i døgn og i decimalbrøk med 6 decimaler. 1 sek. er ca. 0,00001 døgn.) Fra en nymåne til den følgende fuldmåne måne går der ½ synodisk måned. Lad os se, hvorfor det spiller en rolle for formørkelser.

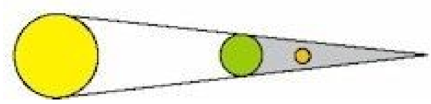


Figur 4.1. Solformørkelse

På figur 4.1 står Månen mellem Jorden og Solen. Hvis en iagttager på Jorden står på den lille plet, hvor måneskyggen rammer Jorden, dækker Månen fuldstændig for lys fra Solen. Så er der total solformørkelse. Hvis iagttageren står lidt ved siden af pletten er der partiel formørkelse, hvor man kan se lidt af Solen. Hvis man står endnu længere væk, kan man se, at det er nymåne. I eklipsariet skelnes der ikke mellem de to typer af solformørkelser, og der gives ingen information om, hvor på Jorden en formørkelse kan iagttages. Månen vender skyggesiden mod Jorden.

Når der er en solformørkelse er det altså ved nymåne.

<u>Derfor er der et helt antal synodiske måneder mellem to solformørkelser.</u>



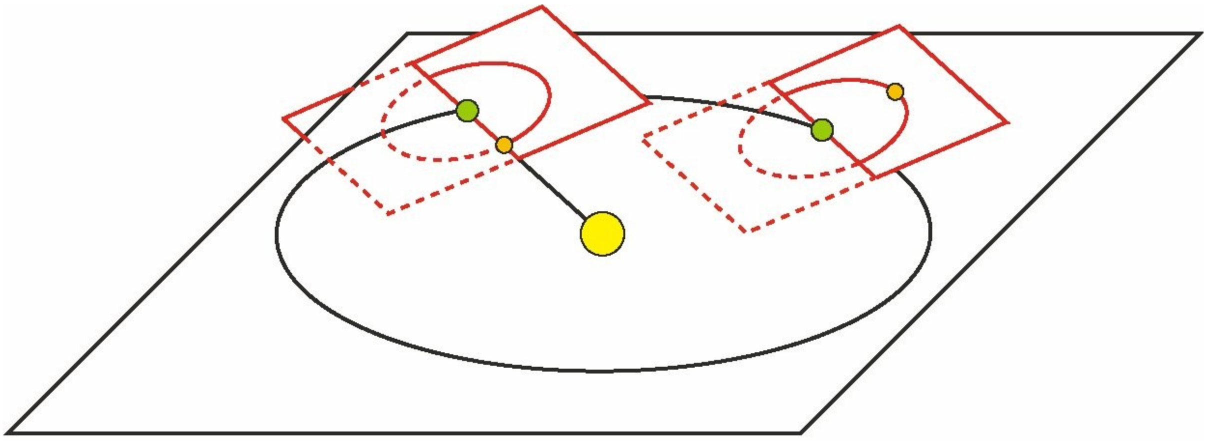
Figur 4.2. Måneformørkelse.

På figur 4.2 står Jorden mellem Solen og Månen. Alle iagttagere, der står på natsiden af Jorden, ser fuldmånen formørket. Eklipsariet giver ingen information om, hvilke lande, der er på natsiden. Hvis Månen stod lidt uden for skyggen ville den være fuldt belyst på den side, der vender mod Jorden.

Når der er en måneformørkelse er det altså ved fuldmåne.

<u>Fra en solformørkelse til en måneformørkelse er der derfor (x+½) synodiske måneder, hvor x er et helt tal.</u>

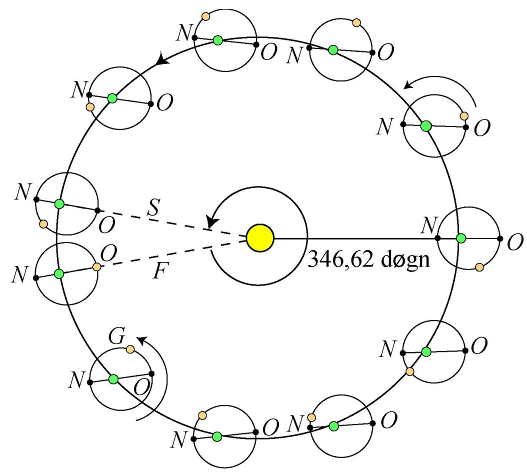
Månens bane i dens bevægelse omkring Jorden er en ellipse, og Jorden er i det ene brændpunkt. Ellipsen er næsten cirkelformet, men Jorden er tydelig forskudt lidt væk fra centrum. Ellipsen ligger i en plan, der danner en vinkel på 5,1˚ med Jordens baneplan, der kaldes Ekliptikas plan. Skæringslinjen mellem Ekliptikas plan og månebanens plan kaldes *knudelinjen*. Vi viser to situationer på figur 4.3.



Figur 4.3. Månens skrå bane.

Til venstre går knudelinjen gennem Solen, og Månen står på knudelinjen og mellem Jorden og Solen. Der er derfor solformørkelse. Til højre går knudelinjen ikke gennem Solen, og der kan ikke være formørkelse, lige meget hvor på banen Månen står. Så her har vi et eksempel på en fuldmåne, hvor der ikke er en formørkelse. Hvis man iagttager situationen højt oppefra, vil det se ud som om der er en måne-formørkelse, men det er der altså ikke. Hvis der er en formørkelse, vil Solen og Månen begge være tæt ved at stå på knudelinjen, og der vil omvendt være en formørkelse, når blot Solen og Månen begge begge er tæt ved at stå på knudelinjen. Af figuren til venstre kan man se, at <u>hvis Solen står på knudelinjen og der er fuldmåne eller nymåne, så vil der være en formørkelse.</u>

Figur 4.4 viser Jordens bane set nordfra. Månebanens storakse er vandret på figuren. Figuren viser, hvordan bevægelsen ser ud i løbet af et år. Man skal forestille sig at månebanen hælder 5,1˚ i forhold papirets plan, som altså er ekliptikas plan. Der er solformørkelse i startsituationen *F.* Fra *F* til den næste tegnede situation *G* har Månen drejet sig ca. 400˚ i sin bane.



Figur 4.4. Knudelinjens rotation.

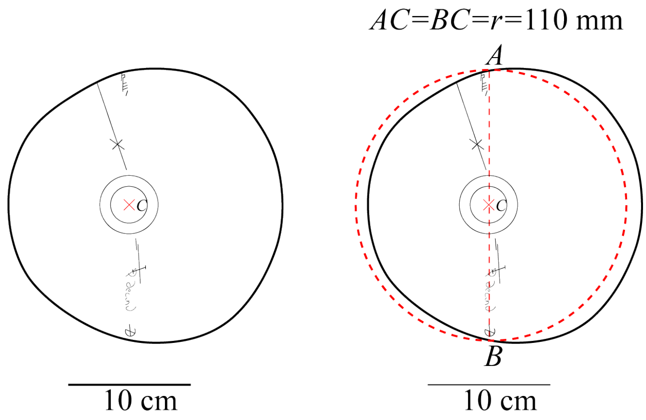
Knudelinjen skærer Månens bane i *knuderne*. *O* er den opgående knude, hvor Månen kommer op over Ekliptikas plan og *N* er den nedgående knude. Som man ser, drejer knudelinjen sig langsomt i forhold til månebanens storakse. Da knudelinjens drejning går i modsat retning af Jordens, møder linjen fra *N* til *O* Solen igen, lidt før der er gået et år, nemlig i situationen *S* efter at der er forløbet et såkaldt *knudeår*. Længden af et knudeår er *KÅ*=346,620075 døgn. ½ knudeår efter startpositionen *F* går knudelinien igen gennem Solen, og det gør den derefter hver gang der er gået ½ knudeår. Der kan kun være formørkelse når knudelinjen går gennem Solen, eller er tæt ved det. Knudelinjen drejer sig på et knudeår 360˚ i forhold til linjen mellem Solen og Jorden.

<u>Mellem to formørkelse er der altså et helt antal halve knudeår.</u>

Når vi i det følgende taler om Jorden, Månen og Solen opfatter vi dem som punkter. Både Jorden og Månen bevæger sig lidt uregelmæssigt. Derfor er de understregede udsagn ikke helt rigtige, men de er dog særdeles gode tilnærmelser. Der var en solformørkelse den 16/12-1694 [8)]. Det tidspunkt bruger vi som starttidspunkt i det følgende. I afsnit 7 fortæller vi, hvorfor vi bruger netop denne solformørkelse. De astronomiske konstanter kan f.eks. ses i [9)] eller [10).]

5. Rømers formørkelsesmodel

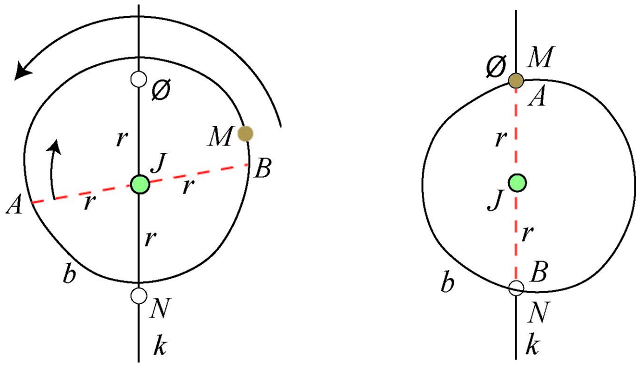
Den afgørende nøgle til forståelse af eklipsariets virkemåde er formen på den metalskive, som drejer sig inde i eklipsariet og som vi kalder baneskiven *b.* Den vises på figur 5.1.



Figur 5.1. Baneskiven

Til venstre på figur 5.1 viser vi baneskiven med de indridsninger, der findes på den. Umiddelbart kan man ikke finde nogen mening med indridsningerne og med skivens mærkelige form. Ideen med formen vises på figuren til højre. Ude på randen af skiven ligger der to punkter *A* og *B*. De ligger sådan, at midtpunktet af linjestykket *AB* er omdrejningscentret *C, AC*=*BC*=*r*=110 mm. *A* og *B* er de eneste punkter på randen, der har afstanden *r* fra *C*. Dette fremgår af den punkterede cirkel, der har centrum *C* og radius *r.* Vi tænker os, at det røde punkterede linjestykke *AB* er malet på baneskiven.

Før Rømer kunne gå i gang med at designe eklipsariet, måtte han vælge en mekanisk model, en model, som skulle indbygges i eklipsariet. Rømers model vises på figur 5.2. Den består af en plan indeholdende følgende: En lodret linje *k* med tre faste punkter, nemlig jorden *J* med to punkter *N* og *Ø* i afstanden *r* fra jorden og med *Ø* øverst. Endvidere en kurve med form som baneskiven *b* med punkterne *A* og *B* på randen og med det røde punkterede linjestykke *AB*. Baneskiven drejer sig om midtpunktet *C,* der ligger i *J.* Og endelig månen som et punkt, der bevæger sig på randen af baneskiven.



Figur 5.2. Rømers model og startbeliggenheden.

De relative bevægelser af objekterne hører med til modellen, så i modellen antager vi følgende:

M1. Månen passerer *k* med ½ synodisk måneds mellemrum, og linjen *JM* drejer sig jævnt om *J*.

M2. Månebanen *b* drejer sig jævnt omkring Jorden i forhold til *k* en gang rundt om på et knudeår, den modsatte vej af Månen.

Der er også koblet et ”ur” til modellen. Det viser dato, måned og kalenderår, efter gregoriansk kalender.

Hermed har vi beskrevet banerne og de relative bevægelser af de forskellige objekter.

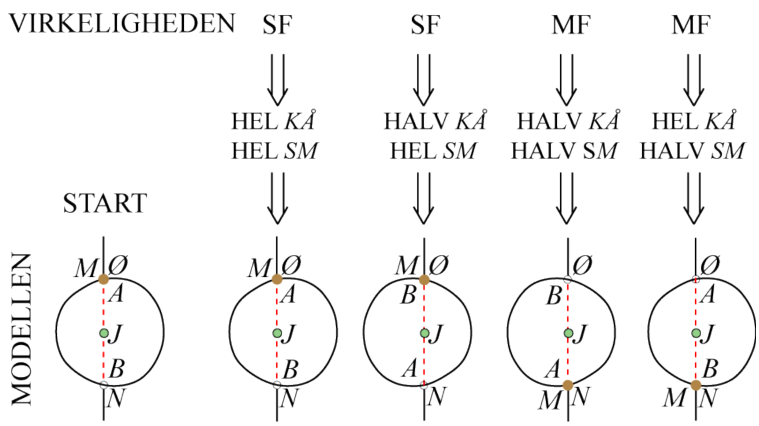
Til modellen hører også et sæt begyndelsesbetingelser. Vi kender ikke Rømers begyndelsesbetingelser, så vi vælger den oven for nævnte solformørkelse, der fandt sted den 16/12-1694 som begyndelsesbetingelse, sådan som det er vist til højre på figur 5.2. Den røde linje på baneskiven anbringes lodret til starttidspunktet med *A* øverst, og månen placeres i *Ø*. Eklipsariet har en måneviser. Den indgår ikke i Rømers model.

Rømers model er uventet. Solen er ikke repræsenteret i modellen, den virkelige månebane roterer ikke som her, og *b* ligner ikke månens bane. Det er et udtryk for Rømers evner til at følge en abstrakt, matematisk præget tankegang, at han fandt frem til denne model.

Vi kan nu gå over til at bevise to hovedresultater H1 og H2:

H1: Når der er en solformørkelse i virkeligheden, vil modellens måne stå i *Ø*, og når der er en måneformørkelse i virkeligheden, vil modellens måne stå i *N*.

Beviset følger af figuren her. SF betyder solformørkelse og MF betyder måneformørkelse. De øverste pile følger af de understregede resultater i afsnit 4, og de nederste pile følger af M1 og M2 ovenfor.



Figur 5.3. Formørkelserne vises korrekt.

Til venstre på figur 5.3 viser vi startsituationen i Rømers model. Når der står f.eks. HEL *KÅ* betyder det, at der er gået et helt antal knudeår siden start og når der står HALV *SM* betyder det, at der er gået (x + ½) synodiske måneder siden start, hvor x er et helt tal. Af nederste linje kan man se, at når der er solformørkelse, står modellens måne i *Ø,* og når der er en måneformørkelse står den i *N.*

Nu har vi vist, at når der er en formørkelse, så vises den korrekt i Rømers model. Men det ville ikke have nogen særlig værdi, hvis månen også kunne stå i *Ø* eller *N* på tidspunkter, hvor der ikke er en formørkelse. Men sådan forholder det sig heldigvis ikke. Der gælder nemlig:

H2. Når eklipsariets måne står i *Ø* eller *N*, er der en formørkelse i virkeligheden.

Bevis: Når eklipsariets måne står i *Ø* eller *N* ligger den på den lodrette linje. Der er derfor gået et helt antal halve synodiske måneder siden starten. <u>Det er altså fuldmåne</u>

eller nymåne i virkeligheden. Når eklipsariets måne står i *Ø* eller *N,* ligger den i afstanden *r* fra *J.* Da de eneste punkter på baneskiven, der har afstanden *r* fra *J* er *A* og *B,* må den punkterede linje være lodret. Der er derfor gået et helt antal halve knudeår siden starten, og heraf følger, at Solen i virkeligheden står på knudelinjen. Af de to understregede udsagn følger som nævnt i afsnit 4, at der er en formørkelse i virkeligheden. Hermed er H2 bevist.

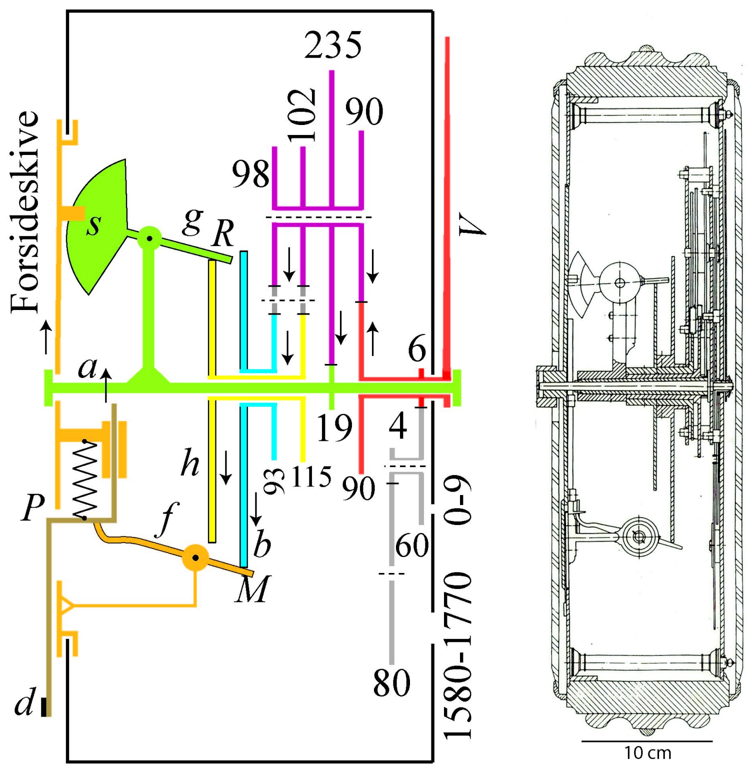
6. Beskrivelse af eklipsariet

På figur 6.1 har vi vist eklipsariets to sider. På *kalendersiden* til venstre er der en viser *V*, der peger på en af årets 365 dage. Der er også to huller. I det ene kan man se tiårene 1580, 1590,…,1770 og i det andet årene 0, 1, 2, …, 9. I de to huller kan man altså se et årstal mellem 1580 og 1779. Vi tænker os, at viseren *V* drejer jævnt rundt på et tropisk år, der er 365,242199 døgn. Viseren trækker de tandhjul, der viser årstallet og også maskineriet i eklipsariets indre.

Figur 6.1. Kalenderside og Måneside

Månesiden til højre er mere kompliceret. Den lyse cirkelstrimmel og området inden for den er en messingskive, der kaldes *forsideskiven*. Den drejer sig forbundet med viseren på bagsiden via nogle tandhjul rundt, lidt ujævnt på grund af hastighedsskiven *h*, en omdrejning på i gennemsnit en synodisk måned. Der er en smal revne i forsideskiven. Ud gennem den kommer der en viser, *måneviseren*, med en lille sort skive i spidsen. Den følges rundt med forsideskiven, men samtidig bevæger den sig lidt væk fra eller ind mod centrum, også på en uregelmæssig måde. Vi kalder den sorte spids for *måneskiven d*, som vi frem til afsnit 7 opfatter som et punkt. På den yderste faste del af forsiden er der to cirkelformede markeringer, men den nederste kan kun anes på billedet. På den øverste markering vises, som vi skal se, solformørkelser, og på den nederste vises måneformørkelser. Rømers model tænkes anbragt med Jorden i forsidens centrum og med linjen *k* lodret, så *Ø* ligger over Jorden.

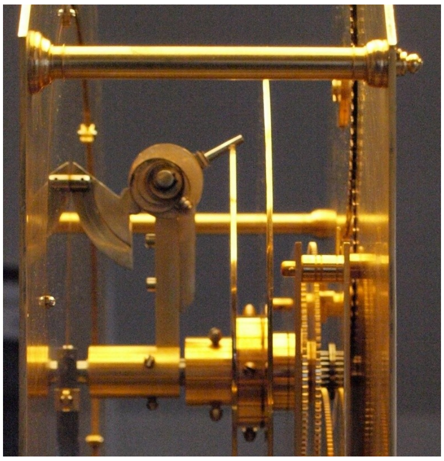
Vi går nu over til at beskrive, hvad der er inde i apparatet.



Figur 6.2. Lodret snit og målfast tegning.

Principtegningen til venstre på figur 6.2 viser et lodret snit gennem omdrejningsaksen på et tidspunkt, hvor viseren *V* er lodret. Der er 14 tandhjul. Tallene angiver antallet af tænder. Pilene viser omdrejningsretninger. De korte vandrette streger viser, hvor tandhjul er i indgreb. De vandrette punkterede linjer er sekundære omdrejningsakser. Deres lejer sidder fast i eklipsariet. Vi tænker os, at det hele drives af den store viser *V*, som drejer sig jævnt en omgang om året, altså på 365,242199 døgn. De grå tandhjul nederst til højre sørger for årstallet. De to små grå tandhjul lidt over aksen tjener til at vende en omløbsretning. Alle tandhjulene drejer sig med konstant vinkelhastighed. Man ser også eklipsariets to kurveskiver, den blå baneskive *b* og den gule hastighedsskive *h*. Skiverne sidder fast på hver sin hule aksel, der også bærer et tandhjul med samme farve som skiven. Til højre er der er en målfast tegning[11)] af eklipsariet. De to ydersider er beskyttet af glasplader.

På figur 6.3 kigger vi ind i eklipsariet fra siden, kalendersiden er til højre. Man ser den vinkelformede skive *s*. Den glider mellem to tætsiddende tappe, der sidder på indersiden af den gule forsideplade. På figur 6.2 kan man kun se den ene tap. Den anden ende af føleren hviler på hastighedsskiven. Skiven *s* overfører via tappene den grønne aksels rotation til den gule forsideskive. Det sker imidlertid på en noget kompliceret måde, idet *s* ikke ligger sådan, som man tror på tegningen. *s* er nemlig i forhold til papirets plan drejet 7,2° om *g*. På figur 6.2 og figur 6.3 er den øverste ende af *s* 6 mm nærmere iagttageren end den nederste.



Figur 6.3. Et kig ind i mekanikken.

Under bevægelsen er dette årsag til nogle små hastighedsvariationer i bevægelsen af forsideskiven. Her antager vi, at forsideskiven drejer sig jævnt. De små variationer i drejningshastigheden, som *s* bevirker, vender vi tilbage til i afsnit 7. Også i Rømers model har vi set bort fra virkningen af *s*.

Vi vil nu redegøre for, hvordan Rømers model er indbygget i eklipsariet. Jorden er repræsenteret i forsideskivens centrum og linjen *k* er den lodrette linje gennem centrum. Punkterne *N* og *Ø* er ikke fysisk repræsenteret i eklipsariet, men vi tænker os, at de ligger på *k* i afstanden *r* fra Jorden. Baneskiven er den blå skive på figur 6.2. Månen er repræsenteret som røringspunktet *M* mellem baneskiven *b* og føleren *f*.

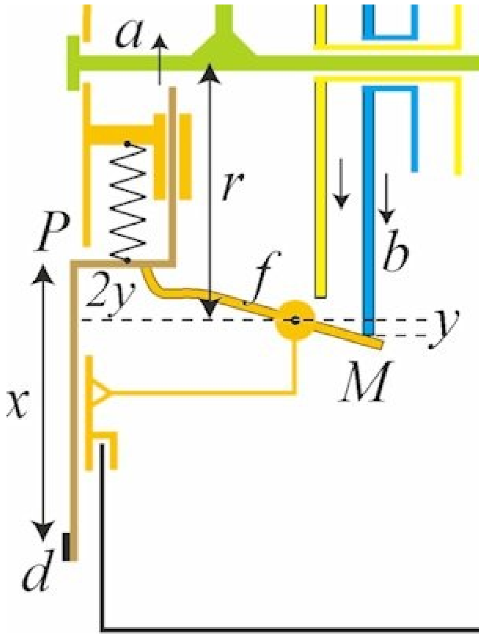
Omdrejningen af den grønne aksel, og dermed af forsideskiven, er bestemt af tandforholdet 235:19. Den grønne aksel drejer sig altså en omgang på 365,242199·19/235=29,530220 døgn, altså på en synodisk måned. Da *f* sidder fast på undersiden af forsideskiven, bevæger *M* sig jævnt en gang rundt om aksen *a* på en synodisk måned. Den passerer altså linjen *k* med ½ synodisk måneds mellemrum, så M1 er opfyldt.

Føleren *f* presses af en fjeder ind mod baneskiven. Den blå baneskive *b* drejes af viseren *V* via tandhjulsudvekslingen 98:93. Derfor drejer den sig en omgang med konstant vinkelhastighed på 365,242199·93/98=346,607393 døgn, altså på et knudeår, så M2 er opfyldt . Det er for at opnå det, at tandtallene 93 og 98 er valgt. Der er imidlertid en fejl på ca. 15 minutter på et knudeår, og det kommenteres i afsnit 9.1. Afstanden *r* findes også på figur 6.4.

Valget af begyndelsesbetingelser i eklipsariet skal ske i overensstemmelse med begyndelsesbetingelserne i Rømers model. Vi starter altså viseren den 16. december 1694, anbringer baneskiven, så den punkterede røde linje er lodret på dette tidspunkt, og så punktet *A* med den Ø-agtige markering er øverst. Endvidere placerer vi forsideskiven, så månen *M* på starttidspunktet er øverst på den punkterede røde linie. Hermed er Rømers model også tidsmæssigt indbygget i eklipsariet.

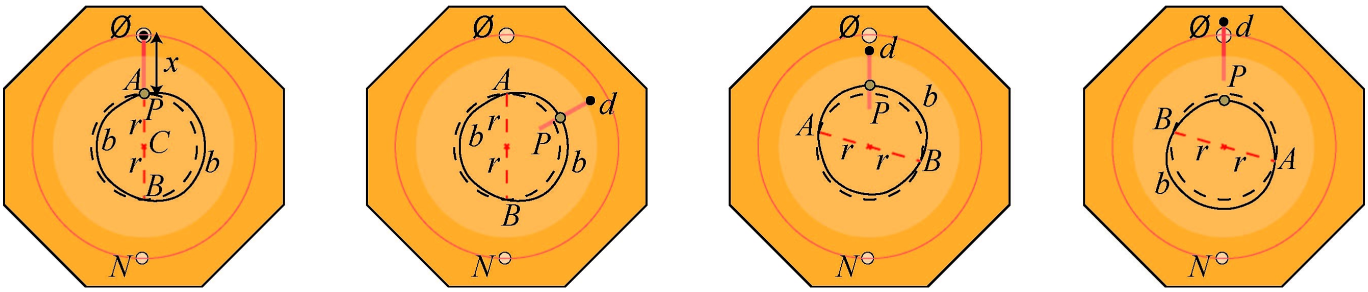
Da vi nu har vist, at Rømers model er indbygget i eklipsariet følger det af hovedresultatet ovenfor, at

Eklipsariets måne *M* befinder sig i et af de tænkte punkter *N* eller *Ø* på de samme tidspunkter som dem, hvor der er en formørkelse. Når Månen er i *N* er der måneformørkelse, og når den er i *Ø* er der solformørkelse.



Figur 6.4. Måneviserens bevægelse.

Tilbage står så et mindre problem: Når man kigger på eklipsariet kan man ikke se eklipsariets måne. Dette problem løser Rømer ved at indbygge måneviseren *d* i eklipsariet, se figur 6.4. Vi forstiller os at månen med føleren *f* flyttes, først ud til *P* og derfra videre udad med viserlængden *x,* ud til måneskiven *d.* Da afstanden *r* også er følerens omdrejningspunkts afstand fra aksen flyttes de viste formørkelser lige op eller ned til *P* og dernæst flyttes de udad stykket *x*, viserlængden. Så ude i afstanden *r*+*x* fra centrum er der på linjen *k* anbragt to markeringscirkler, hvor formørkelserne så bliver vist. Vi bruger også navnene *Ø* og *N* om disse markeringspunkter. Markeringspunkterne kan ses på figur 6.5. I det øverste vises solformørkelser og i det nederste måneformørkelser. På figuren længst til venstre, hvor det røde punktere-de linjestykke er lodret er der vist en solformørkelse.



Figur 6.5. Sådan flyttes månen ud på den faste skive.

Den punkterede cirkel har centrum *C* og radius *r.* På den næste figur viser vi, hvad der sker, når månen ikke ligger på linjen *k*. Den flyttes radiært ud til *d*, og kommer altså ikke til at vise en formørkelse, hvad den heller ikke skal. Derimod kunne man være nervøs for den situation, hvor den brune måne står på *k*, men hvor der ikke er formørkelse. Sådan en situation er vist som nummer 3. Da følerarmen *f,* som man kan se på ovenstående principtegning, deles i forholdet 1:2 af dens omdrejningspunkt, ligger *P* dobbelt så langt fra den punkterede cirkel, som månen, sådan som det er vist med *y* og 2*y* på figur 6.4. Måneviserens længde er stykket fra den punkterede cirkel og op til markeringen. Så når måneviseren begynder i *P,* kan den altså med sikkerhed ikke nå op til markeringscirklen. Månen kunne også være foroven og inde i den punkterede cirkel, sådan som det er vist på figuren længst til højre. Da Måneviseren præcis kan nå fra den punkterede cirkel og op til markeringen, kommer *d* op over markeringen når viseren begynder i *P. P* ligger jo dobbelt så højt over den punkterede cirkel, som månen ligger under cirklen. Vi har altså afslutningsvis følgende resultat:

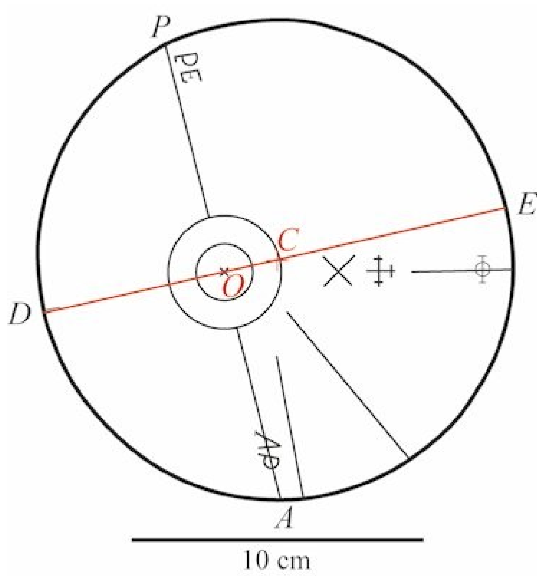
Måneskiven *d* befinder sig i *Ø* når der er en solformørkelse og ikke på andre tidspunkter, og den befinder den sig i *N* på de tidspunkter, hvor der er en måneformørkelse og ikke på andre tidspunkter.

Vi afslutter dette afsnit med at bemærke, at vi ikke er i tvivl om, at Rømer i sin planlægning af eklipsariet har fulgt samme overordnede tankegang, som vi har refereret ovenfor. F.eks. ville et eklipsarium konstrueret på baggrund af kendskab til tidligere formørkelser og en periodicitet af formørkelsestidspunkterne, have resulteret i en helt anden konstruktion af eklipsariet.

7. Hastighedsskivens betydning

I afsnit 4 antog vi, at Månen bevæger sig jævnt. Denne antagelse er ikke helt rigtig, og det giver anledning til fejl i visningen af formørkelser. Ved en test af eklipsariet uden hastighedsskive blev der vist nogle formørkelser, som ikke var der i virkeligheden, og der var nogle virkelige formørkelser, der ikke blev vist. I virkeligheden drejer *JM* sig hurtigst når Månen er i perihelium, dvs når den er nærmest

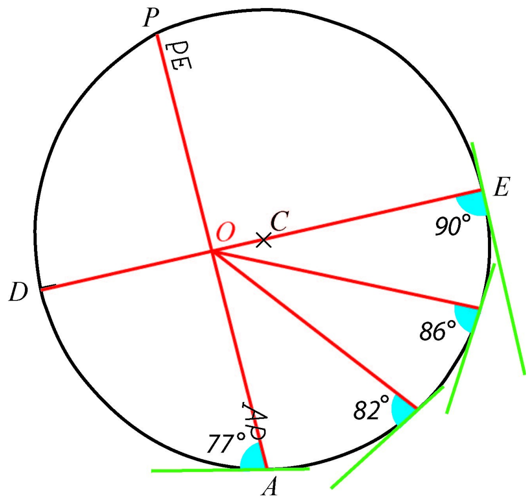
Jorden, og den drejer sig langsomst, når Månen er i aphelium, dvs. når den er fjernest fra Jorden. Ved hjælp af Keplers 2. lov kan man indse, at forholdet mellem disse to vinkelhastigheder er 1,25, se afsnit 9.2. Rømer retter delvis op på denne fejl med hastighedsskiven, der er vist på figur 7.1.



Figur 7.1. Hastighedsskiven.

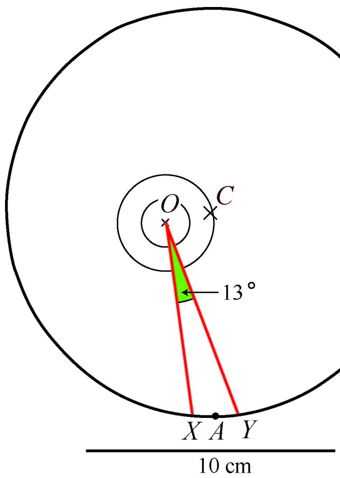
Hastighedsskiven *h* har form som en cirkel med radius 81 mm, men det punkt *C*, som den drejer sig om, er forskudt 18 mm væk fra centrum. På figuren er det røde sat ind af forfatterne. Den virkelige månebane er også tilnærmet cirkelformet, men her er omdrejningspunktet (dvs. Jorden) kun forskudt 8 mm væk fra centrum, hvis vi anvender samme radius. Hastighedsskiven minder altså ikke om månebanen, og det har heller ikke været Rømers hensigt. Skiven har to markeringer *AP* og *PE,* som vi fortolker som apogæum og perigæum. Om lidt skal vi begrunde, at det giver god mening.

Linjen *AP* er vinkelret på linjen *OC* mellem omdrejningspunkt *O* og centrum *C*. Man kan bevise, at på hastighedsskiven er *P* og *A* de to punkter, hvor tangenten til randen danner mindst vinkel med retningen ind til *O*. Se beviset i afsnit 9.3. Samtidig er *O* midtpunkt af linjen *PA* og afstanden *Y=CD=CE* findes også inde i eklipsariet, se neden for på figur 7.4. Følerarmen *g* på principtegningen er altså vandret, når den rører hastighedsskiven i *A* eller *P*. I afsnit 9.4 viser vi, at føleren er 27,554611 døgn om at bevæge sig en gang rundt på *h*. Denne tidsperiode kaldes en *anomalistisk* måned, og det er den tid, der går fra Månen er i perihelium, til den igen er der. Og det er jo netop den periode, vi skal bruge, når vi skal korrigere for hastigheds-variationerne i Månens bevægelse. Føleren bevæger sig altså 360/27,55=13˚ i døgnet på skiven.



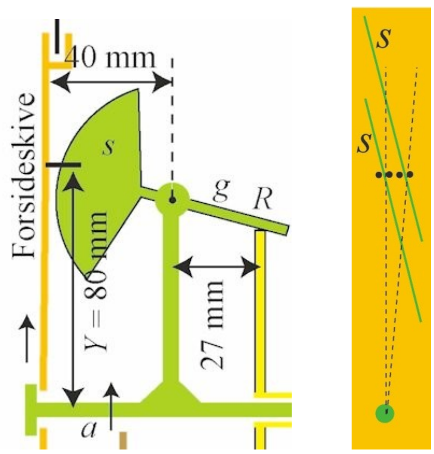
Figur 7.2. Variationen i vinkelhastighed.

Når føleren bevæger sig rundt på skiven vipper følerarmen lidt frem og tilbage. Jo hurtigere den vipper, jo større korrektion giver den via skiven *s* til måneviserens øjeblikkelige vinkelhastighed. På figur 7.2 kan man se, at hvis føleren bevæger sig lidt i omegnen af punkterne *D* og *E* vipper følerarmen ikke, så dér sker der ikke nogen hastighedskorrektion. Når følerarmen bevæger sig fra *E* og ned til *A* aftager den blå vinkel fra 90˚ til 77˚. Og jo mindre den blå vinkel er, jo mere vil følerarmen vippe ved små bevægelser af føleren i omegnen af vinklens toppunkt. I afsnit 9.3 viser vi, at den blå vinkel er mindst i punktet *A*. Når følerarmen bevæger sig videre fra *A* mod *D* vokser den blå vinkel op til 90˚. Vi får altså størst korrektion af vinkelhastigheden i punktet *A* , og da *s* er drejet, så der er tale om en subtraktion, passer det med, at vinkelhastigheden skal være mindst i apogæum. På den øverste halvdel af hastighedskurven bliver der tale om en addition af vinkelhastighed, og det går som det skal, vinkelhastigheden bliver størst i perigæum og mindst i apogæum. Den solformørkelse der fandt sted den 16. december 1694 valgt som begynd-elsesbetingelse, fordi Månen på det tidspunkt var i perigæum[12)]. Så derfor skal hastighedsskiven på begyndelsestidspunktet anbringes sådan, at føleren *g* rører den i punktet *P*.



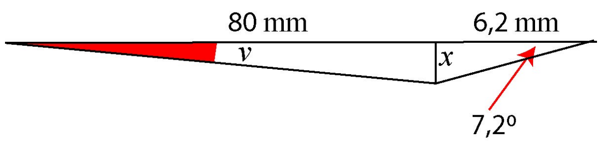
Figur 7.3. Bevægelsen i løbet af et døgn.

Efter at vi nu kvalitativt har vist, at korrektionerne af vinkelhastigheden foregår på en fornuftig måde, går vi over til en kvantitativ vurdering. Føleren drejer sig på hastighedsskiven 13˚ på et døgn, og vi vælger nu et døgn hvor føleren *g* rører i *A* midt på dagen og bevæger sig fra *X* til *Y* i løbet af døgnet. Differensen mellem *OY* og *OX* er så det stykke, som føleren vipper på hastighedsskiven i løbet af dette døgn. På figur 7.3 er differensen 4 mm, og en mere højtidelig beregning, som forfatterne har udført viser, at differensen er 4,2 mm.



Figur 7.4. Detaljer vedrørende skiven s

Figur 7.4 viser den del af eklipsariet, som kommer i spil, når man skal beregne hastighedsskivens indflydelse. De tappe, som *s* bevæger sig imellem, er tegnet sorte. Af de mål, der er vist på figur 7.4 til venstre følger nu, at når følerrøringspunktet *R* flyttes 4,2 mm ind mod den grønne omdrejningsakse, da flyttes den del af *s,* der er mellem de to tappe 4,2 × 40/27 = 6,2 mm væk fra omdrejningsaksen, altså opad. Figur 7.4 til højre viser, hvordan det ser ud når man ser mod forsideskivens inderside fra højre, ud mod undersiden af forsideskiven. De fire sorte cirkler til venstre er de to tappe i startsituationen og et døgn senere. Den grønne skive *s* ses som det grønne linjestykke, der er længst til venstre. Når det rykkes 6,2 mm opad tvinges tappene til siden, til positionen til højre, og det sker ved at forsideskiven drejer sig vinklen *v* mellem de punkterede linjer. På figur 7.4 til højre kan man så få øje på de trekanter, der er vist på figur 7.5:



Figur 7.5. Størrelsen af ændringen af vinkelhastigheden.

Heraf fås ved beregning, at x = 0,78 mm og videre at v = 0,5˚. Uden korrektionen er forsidens vinkelhastighed 360/29,53 = 12,2˚/døgn, og derfor bevirker korrektionen, at vinkelhastigheden i perigæum er 12,7˚/døgn, mens den er 11,7/døgn i apogæum. Forholdet mellem den maksimale og den minimale vinkelhastighed af linjen fra Jorden til månen er derfor 12,7/11,7=1,1. Det tilsvarende forhold i virkeligheden er 1,2, se afsnit 9.2. Der en fornuftig grund til, at Rømer har valgt et mindre forhold end det virkelige. Når man lader måneviseren dreje ujævnt, afviger man jo lidt fra det vi antog i afsnit 4, og det bevirker, at man ikke kan stole helt på de to hovedresultater i afsnit 5. Vi kan altså vælge mellem to fejl: Vi kan lade månen bevæge sig ujævnt, som den gør i naturen, og miste kvalitet i hovedresultaterne, eller lade månen bevæge sig jævnt og opretholde hovedresultaterne. Her er det naturligt at formode, at Rømer ville foretrække to små fejl i stedet for én større. I hvert fald har Rømer valgt kun at korrigere hastighedsvariationerne til forholdet 1,1 i stedet for

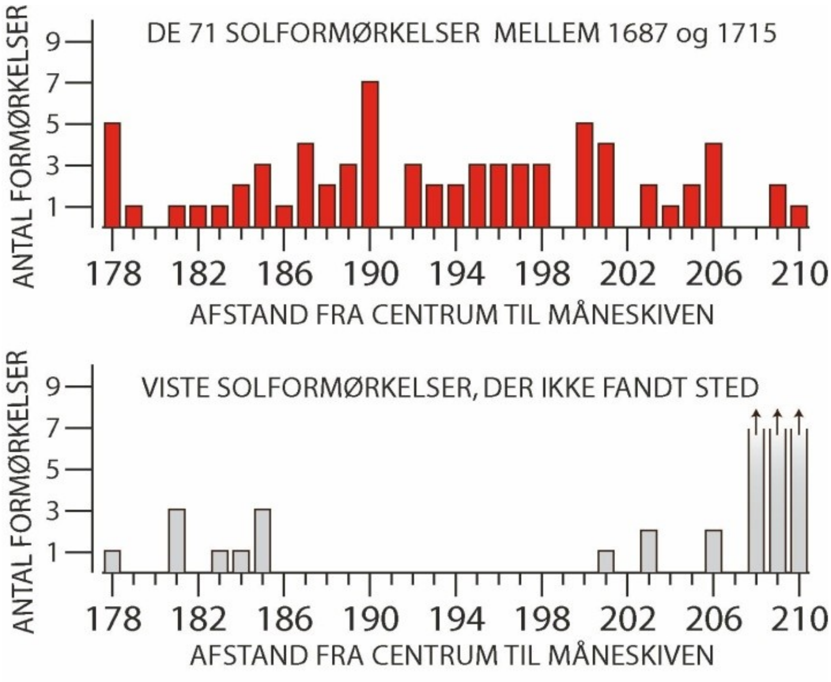
1,2, så der er en lille fejl to steder. Som vi skal se i næste afsnit, fører denne tankegang til et fornuftigt resultat.

8. Test af eklipsariet

Da eklipsariet blev genfundet i 1982, blev det omhyggeligt istandsat. Det eneste, der ikke kunne rekonstrueres var måneskiven *d* og det yderste af måneviseren. I det istandsatte eklipsarium er det altså ikke sikkert, at måneskivens diameter og måneviserens længde er korrekte. Det samme gælder derfor om den kopi af eklipsariet, som ved samme lejlighed blev lavet af urmager Søren Andersen. Bortset fra måneviseren er kopien fuldstændig magen til originalen. Forfatterne har haft fri adgang til indstille begyndelsesbetingelser og teste kopien, som nu findes på Kroppedal Museum. Formålet med denne test var dels at undersøge, hvor godt eklipsariet virker, og dels at prøve at finde ud af, hvor lang måneviseren var og hvor stor måneskivens diameter var. Det er værd at bemærke, at det er første gang i artiklen, hvor vi bruger kendskab til andre formørkelsestidspunkter end det, vi brugte som begyndelsesbetingelse.

Under testen undersøgte vi perioden fra 1687 til 1715, hvor der var 71 solformørkelser og 76 måneformørkelser.

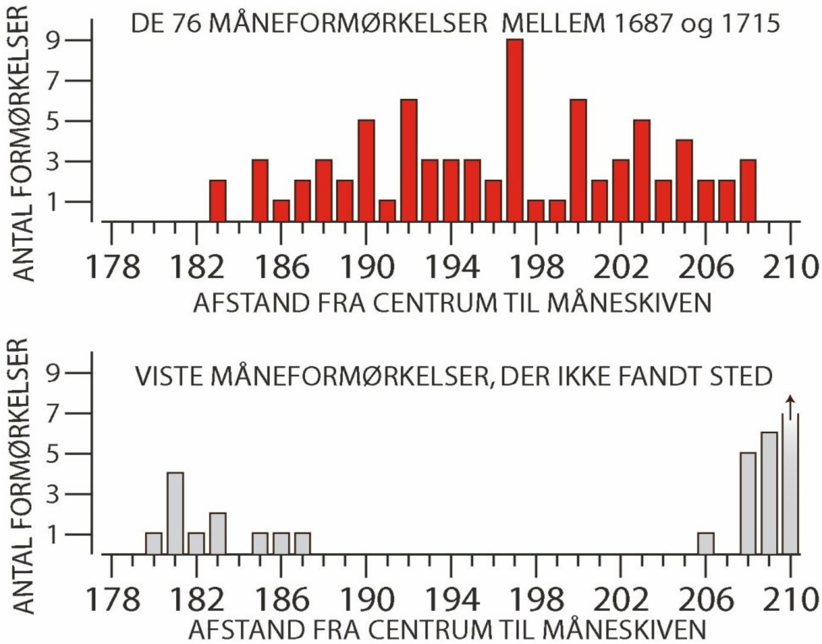
Under testen noterede vi alle de datoer hvor måneskivens centrum lå på linjen *k* og mellem 178 og 210 mm fra Jorden i centrum. Der efter så vi i en formørkelsestabel [8)] om der var en formørkelse den pågældende dato. Intervallet blev valgt, fordi alle de virkelige formørkelser blev vist i dette interval. Resultatet af testen af solformørkelserne viser vi på figur 8.1.



Figur 8.1. Test af solformørkelser.

F. eks. kan man af figuren se, at der var 3 solformørkelser, der vistes i afstanden 185 mm (±½ mm) over centrum. Af figuren kan man tydeligt se, at det vil være klogt at sørge for, at der ikke vises formørkelser mere end 207 mm oppe. Man går godt nok glip af 3 formørkelser, men det er prisen værd, for man slipper faktisk for 85 fejlagtige formørkelser. Forneden kan det ikke betale sig at skære noget af. Solformørkelserne siger altså, at det vil være bedst, hvis måneskivens diameter og måneviserens længde kunne vælges, så kun formørkelser intervallet fra 178 mm til 207 blev vist. Så vil 68 af de 71 solformørkelser blive vist, men der vil blive vist 14 formørkelser, der ikke fandt sted i virkeligheden.

Så går vi over til måneformørkelserne. Her var testresultatet følgende:



Figur 8.2. Test af måneformørkelser.

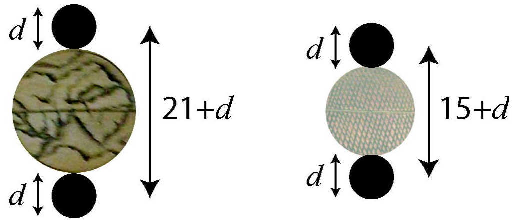
Her bliver alle de 76 måneformørkelser, der forekom i perioden, vist korrekt i intervallet fra 183 mm til 208 mm under centrum, men på grund af fejlene vil vi tilstræbe, at kun formørkelser i intervallet fra 184 mm til 207 mm under centrum bliver vist. Så vil 71 af de 76 måneformørkelser blive vist, og der vil blive vist 4 formørkelser, der ikke fandt sted i virkeligheden.

For at bestemme hastighedsskivens indflydelse på eklipsariets pålidelighed foretog forfatterne også en test af eklipsariet, hvor hastighedsskiven var sat ud af kraft, så forsideskiven drejede sig jævnt. En iagttagelse er en situation, hvor måneskiven passerer knudelinjen mellem 178 mm og 207 mm fra centret. Resultatet af de to tests kan beskrives således:

Uden hastighedsskive: 85% af iagttagelserne er korrekt viste formørkelser. 90% af formørkelserne vises korrekt.

Med hastighedsskive: 85% af iagttagelserne er korrekt viste formørkelser. 96% af formørkelserne vises korrekt.

Det er forfatternes vurdering, at man næppe kan forvente bedre resultater af et eklipsarium fra 1680. Ved hjælp af testen vil vi nu udregne den mest hensigtsmæssige værdi af måneskivens diameter, som vi nu også kalder *d*.



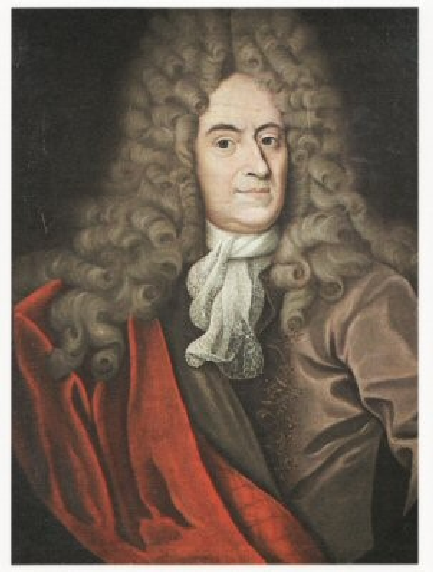
Figur 8.3 Bestemmelse af måneskivens diameter.

På figur 8.3 til venstre viser vi to måneskiver placeret på hver sin side af eklipsariets solformørkelsesmarkering, der har en diameter på 21 mm. Vi vil tilstræbe, at formørkelser vises, når måneskiven og solformørkelsesmarkeringen overlapper eller rører hinanden. Længden af det interval, hvor solformørkelser vises er altså 21+*d* mm. Ovenfor har vi bestemt intervallets længde til 29 mm og det giver, at måneskivens diameter skal være *d*=8 mm. Til højre på figur 8.3 vises den tilsvarende situation nede ved måneformørkelsesmarkeringen. Her får vi at 15+*d*=23, hvoraf *d*=8. Denne overensstemmelse begrunder til vores glæde størrelsesforskellen på de to markeringer. Den restaurerede måneskive, der i skrivende stund sidder i eklipsariet, er 10 mm i diameter.

Så går vi over til længden af viseren. Den skal vælges sådan, at måneskiven kan komme til at vise formørkelser i begge de to yderstillinger, der er vist på figur 8.3. Dette opnås, ved at vælge viserlængden lig med afstanden ud til midten af de to markeringsintervaller. Midtpunktet af solmarkeringsintervallet ligger 192 mm fra centrum, og det passer fint med at midtpunktet af solformørkelsesmarkeringen ligger 191 mm fra midtpunktet. Heraf ses, at den valgte viserlængde passer fint med solformørkelserne. Specielt placerede måneskiven sig på begyndelsestidspunktet med stort overlap med markeringen for oven.

Midtpunktet af månemarkeringsintervallet ligger 195,5 mm fra centrum. Så måneformørkelsesmarkeringen burde efter vores målinger ligge 4,5 mm længere nede, så ville det passe med den foreslåede viserlængde.

Til slut bemærker vi, at det ikke vides om Rømer i denne sammenhæng har brugt tests, som vi har gjort her, eller om han har støttet sig til teoretiske overvejelser. En ting, der vil spille en rolle ved sådanne overvejelser, er retningen af baneskivens tangenter i punkterne A og B . Man vil også få brug for at vide, hvor langt fra knudepunkterne Månen kan stå, når der er en formørkelse.



Ole Rømer

Konklusionen af denne beskrivelse af eklipsariet er, at Rømers konstruktion var både elegant udtænkt og succesrig, med 96% af alle formørkelser vist korrekt. Dertil skal tilføjes, at hvis man sammenligner eklipsariet med anden samtidig mekanik, da kan der ikke herske nogen tvivl om, at dette apparat har en for sin tid meget avanceret konstruktion. Eklipsariet illustrerer på fremragende vis Rømers fine evne til at forene teori og praksis.

9. Beviser

9.1. Om nøjagtigheden af tandhjulsudvekslingerne

Tre steder i eklipsariet skulle Rømer bestemme tandantal på to tandhjul, så de så nøjagtigt som muligt kom til at dreje sig med vinkelhastigheder, hvis forhold var bestemt af astronomiske konstanter. I alle tilfælde benyttede Rømer en metode, som Huygens også havde brugt, og som byggede på det matematiske begreb kædebrøk[13)].

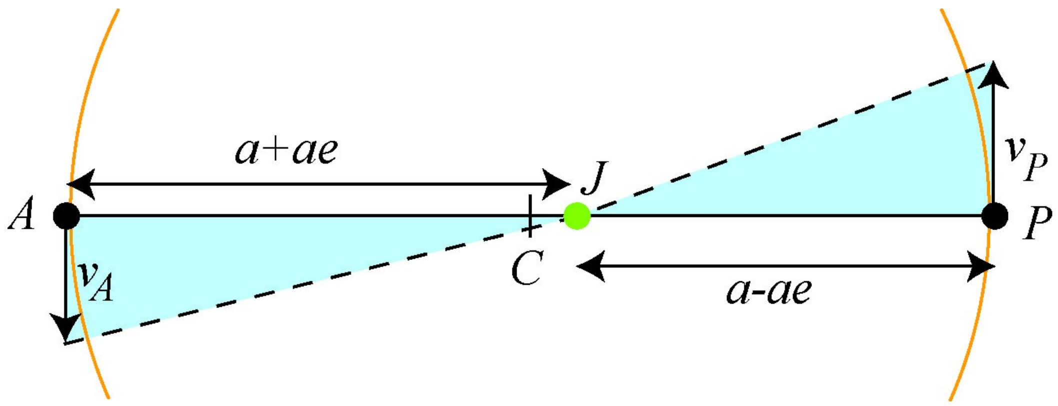
Vi vil ikke beskrive metoden nærmere, men kommenterer her det sted, hvor fejlen er procentvis størst, nemlig baneskivens omdrejning. Her skal forholdet mellem tand-antallene være lig forholdet mellem et tropisk år på 365,242199 døgn og et knudeår på 346,620075 døgn. Anvender man metoden på dette forhold får man følgende sekvens af brøker:

$$20/19,\ 39/37,\ 56/53,\ 98/93,\ 157/149,\ \cdots$$

Da skridtet fra den næstsidste til den sidste brøk ikke forbedrer nøjagtigheden nævneværdigt, benyttede Rømer den næstsidste brøk, også for ikke at få for store tandantal. 93 i nævneren er særligt godt. Hvis man prøver med 94 i nævneren får man en fejl, der er 20 gange så stor, selv med den bedst mulige tæller!

9.2. Om excentriciteter

En ellipse kan bestemmes ved angivelse af to størrelser: Storaksen af længde $2a$ er det længste linjestykke, der forbinder to ellipsepunkter og excentriciteten e, der er et tal mellem 0 og 1. Hvis e er tæt ved 0 er ellipsen næsten cirkelformet, og jo tættere e kommer til 1, jo mere fladtrykt er ellipsen. Månebanens excentricitet er 0,055, så månebanen er tæt på at være en cirkel. En ellipse har to brændpunkter, de ligger på storaksen i afstanden ae fra storaksens midtpunkt C. På billedet neden for er det kun vist to små stykker af den orange månebane. Storaksen er AP, hvor P er det punkt, hvor Månen er tættest på den grønne Jord, og A er det punkt, hvor Månen er længst væk.



Figur 9.1. Keplers 2. lov.

P kaldes perigæum og A kaldes apogæum. Jorden er i det ene brændpunkt, så den lille afstand mellem Jorden og storaksens midtpunkt er *ae*. Længderne V_A og V_B er de hastigheder, som Månen har, når den passerer A og P. Af Keplers 2. lov følger at de to blå trekanter har samme areal. Derfor vil $JA \cdot V_A = JP \cdot V_B$, hvoraf

$$\frac{JP}{JA} = \frac{a-ae}{a+ae} = \frac{1-e}{1+e} = \frac{0{,}945}{1{,}055} = 0{,}896$$

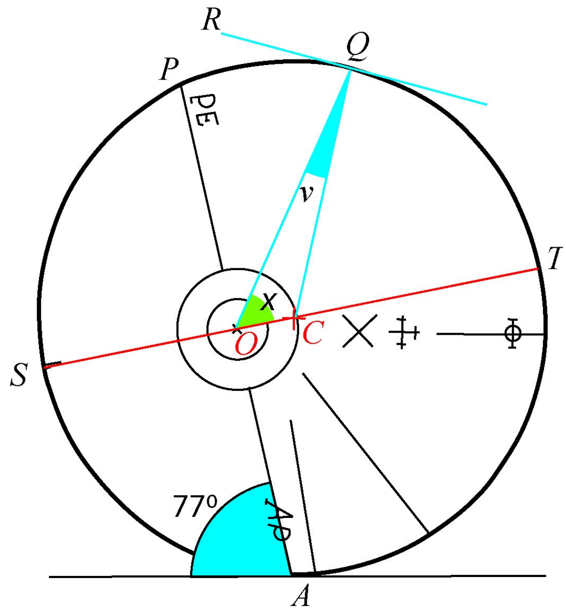
Lader vi nu ω_A og ω_B betegne vinkelhastighederne for linjen fra Jorden til Månen ved Månens passage af henholdsvis A og P vil

$$\omega_A = \frac{v_A}{JA} \quad og \quad \omega_P = \frac{v_P}{JP}$$

Derfor er
$$\frac{\omega_P}{\omega_A} = \frac{JA}{JP} \cdot \frac{v_P}{v_A} = \frac{JA}{JP} \cdot \frac{JA}{JP} = \frac{1}{0{,}896^2} = 1{,}246$$

I Rømers model er dette forhold til 1, og den fejl er så betydelig, at den under testen gav fejl i de viste formørkelser.

9.3. Om vinkler på hastighedsskiven



Figur 9.2. Hastighedsskivens geometri.

På figuren tænker vi os, at vinklen x stater i 0˚ og varierer op til 180˚. Så vil v starte og slutte med at være 0˚. Det sted undervejs, hvor v er størst vil vinklen OQR være mindst. Af sinusrelationen fås, at:

$$\sin(v) = \frac{OC}{QC} \sin(x)$$

v er størst når sin v er størst, og det er den når sin x = 1, dvs. når x er 90˚ og Q ligger i P. v bliver så 13˚. Bemærk at resultatet ikke er trivielt.

9.4. Hastighedsskivens rotation

Omdrejningen af hastighedsskiven h er bestemt af tandforholdet 102:115. Derfor drejer den sig en omgang på 365,24220·115/102=411,79268 døgn. h drejer sig altså 360°/411,79268=0,8742154° i døgnet.

Vi vil nu bestemme hvor lang tid røringspunktet R mellem h og g er om at bevæge sig en gang rundt på h. g drejer sig som nævn en gang rundt på en synodisk måned, altså på SM=29,530588 døgn. På ét døgn drejer g sig derfor 12,190749° og på x døgn drejer g sig x·12,190749°. h drejer sig 0,8742154° i døgnet, og da de to drejningsretninger igen går hver sin vej rundt drejer R sig en omgang på h på x døgn når x·12,190749°+x·0,8742154°=360°. Heraf fås, at x=27,554611 døgn. Denne tidsperiode kaldes en anomalistisk måned, og det er den tid T, der går fra Månen er i perihelium til den igen er der. Den korrekte værdi er 27,554555. R bevæger sig altså en omgang på h på en anomalistisk måned. Det er for at opnå det, at tandtallene 102:115 er valgt. Læg mærke til, at vi nu har motiveret alle tandantal.

10. Afslutning

Artiklen som helhed er et fælles ansvar for forfatterne. Imidlertid har arbejdet med de forskellige afsnit været ulige fordelt. Poul Darnell christa.poul @privat.dk var med ved fundet af eklipsariet i 1982, og han var hovedansvalig for istandsættelsen og opmålingen af eklipsariet. Han har hovedansvar for afsnittene 1,2 og 3. Afsnittene 4,6 og 8 har forfatterne været fælles om, mens Frank Nielsen fn@privat.dk har har hovedansvaret for afsnittene 5, 7 og 9.

Som tidligere nævnt findes det originale eklipsarium på Rosenborg Slot i København; se her: http://dkks.dk/ole-roemers-rum/ . En fuldstændig dokumentation af dette apparats mekanismer, i form af et sæt originaltegninger, findes på Kroppedal Museum i Tåstrup. Tegningslisten nedenfor viser, hvilke tegninger der eksisterer. Tegningerne er nummererede som anført nedenfor og forsynet med engelsk tekst:

1. Samlingstegning 2. Trækasse. 3. Skive med steltappe. 4. Bevægelig skive. 5. Skive og viser. 6. Bevægelig arm. 7. Diverse dele for bevægelig skive. 8. Tandhjul og drev. 9. Stelplader og tandhjul. 10. Talskiver. 11. Kurveskive for varierende vinkelhastighed. 12. Kurveskive for radiær forskydning af viser.

En redigeret version af denne artikel findes på adressen fysikhistorie.dk

Til slut vil forfatterne gerne rette en tak til følgende, som har været behjælpelige med, at denne artikel kunne blive en realitet: Museumsinspektør Robert Sunderland, Kroppedal Museum, urmager, konservator Søren Andersen, cand. scient.Ivan Tafteberg Jakobsen, cand.scient. Else Høyrup samt civilingeniør Ole Henningsen, der har taget tre af fotografierne og som deltog i den tidskrævende test af eklipsariet.

Referencer:

1) Axel V. Nielsen: Ole Rømer. En skildring af hans liv og gerning. Aarhus 1944, p. 77.

2) Elis Strömgren: Ole Rømer som Astronom. Det Kgl Danske Videnskabernes Selskab. København 1944.

3) Peder Horrebow: Basis Astronomiæ ···. København 1735.

4) Poul Darnell i: Ole Rømer – I kongens og videnskabens tjeneste", Aarhus Universitetsforlag 2011.

5) Frank Nielsen i: Ole Rømer – I kongens og videnskabens tjeneste, Aarhus Universitetsforlag 2011.

6) Frank Nielsen: Rømers Tandhjul, Nordisk Matematisk Tidskrift, Normat, 58, nr.3, Göteborg 2010.

7) H. Alan Lloyd: Some outstanding Clocks over seven Hundred Years 1250-1950. Leonard Hill Books, London 1958, p. 81.

8) http://eclipse.gsfc.nasa.gov/eclipse.html

9) Elis Strömgren: Lærebog i Astronomi, Oslo 1931.

10) Duncan Steel: Eclipse, Headline, London 1999.

11) Tegningen er lavet af Poul Darnell, og den findes på Kroppedal Museum.

12) http://www.projektpluto.com

13) Henry C. King: Geared to the Stars, ISBN 0-8020-2312-6


DECEMBRE
IANVIER
NOVEMBRE
MARS
OCTOBRE
APVRIL