

# **Ole Rømers opdagelse af Lysets hastighed samt andre opdagelser**



**Af Michael Andrew Dolan Møller  
Februar 2013**

## Indholdsfortegnelse

Indledning.....	1
1. Solsystemet.....	1
1.1. Solsystemets opbygning.....	1
1.2. Keplers love.....	3
1.3. Nogle karakteristika ved ellipser.....	4
1.4. Tidsligningen.....	4
1.5. Opgaver.....	6
Appendix 1. Ordliste til kapitel 1.....	7
2. Ole Rømers liv og gerning.....	8
2.1. Ole Rømers ungdom.....	8
2.2. Bestemmelse af lyshastigheden.....	9
2.3. Rømers øvrige arbejde.....	12
2.4. Rømers termometerarbejde.....	13
2.5. Afslutning.....	14
2.6. Opgaver.....	15
Appendix 2. Afskrift af Rømers artikel i Journal des Sçavans.....	16
3. Referencer.....	17

## Indledning

I denne note bliver en meget lille del af fysikkens historie gennemgået. Kun Ole Rømers arbejde vil blive gennemgået i disse noter.

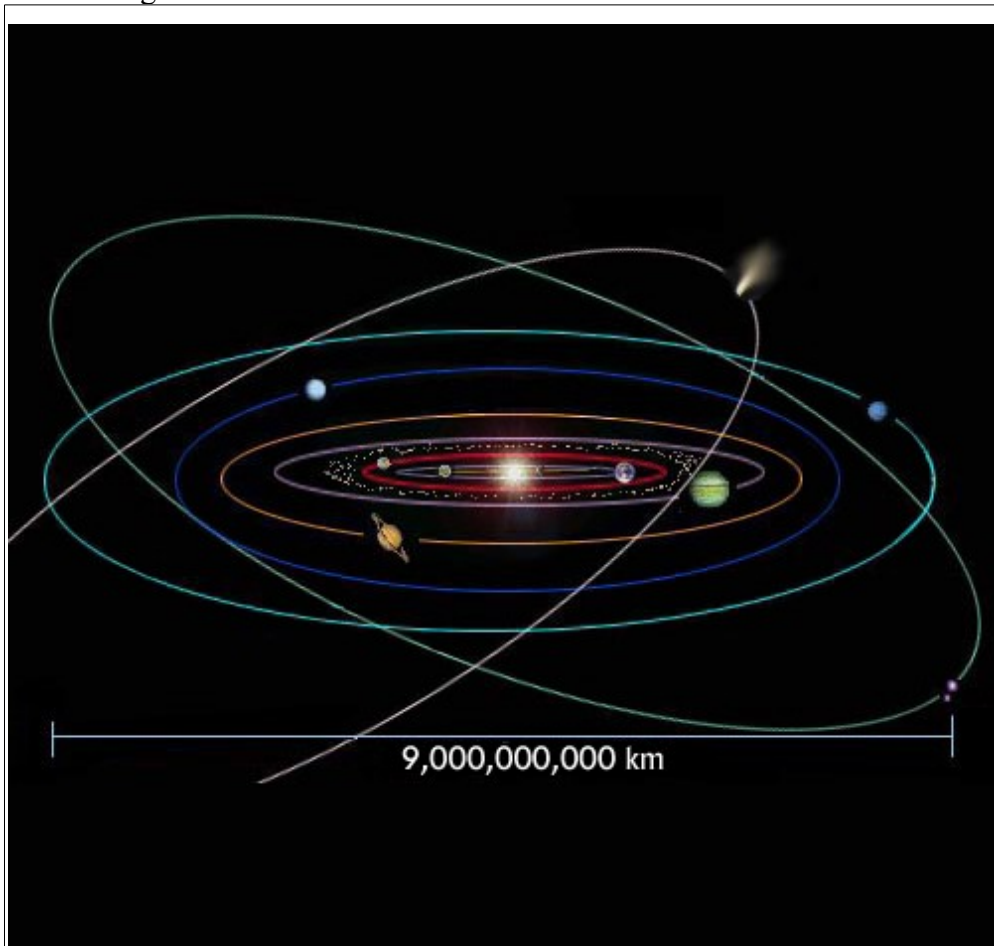
Ole Rømer er valgt, fordi han er en af Danmarks mest produktive- og bredtfavnede forskere. Muligvis er han den dansker, der har opnået mest i et menneskeliv nogensinde. Det gør ham automatisk til et oplagt mål til et temaforløb i fysikhistorie.

Den moderne opfattelse af solsystemet bliver også introduceret, primært for at skabe en baggrund for at forstå Rømers metode til lyshastighedsbestemmelse. Der findes, for begyndere i hvert fald, en del nye ord og betegnelser. For at lette på forståelsen findes bag kapitel 1 en ordliste.

# 1. Solsystemet

## 1.1. Solsystemets opbygning

Vores indre solsystem består af en stjerne (Solen), en mængde planeter hvoraf nogle har måner til at kredse om sig, kometer og endelig et asteroidebælte hvor en mængde småplaneter og sten befinder sig. Se illustration 1.



*Illustration 1: Skitse af Solsystemet. Solen er inderst. Derefter følger planeterne Merkur, Venus, Jorden, Mars, asteroidebæltet, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun, Pluto og de øvrige objekter i Kupiterbæltet. I afstanden 20-50kAU findes Oortskyen, som dog ikke er med på tegningen. Kilde: NASA.*

De 4 inderste planeter er stenplaneter, dvs. de har en fast ydre skal. Asteroidebæltet består af alt fra grus til kloder med en diameter på ca. 1000km. Asteroidernes samlede masse er mindre end Mars, og grunden til at der aldrig kom en planet i denne bane, skyldes sandsynligvis at Jupiters tyngdefelt har fostyrret dannelsen af en enkelt klode.

De 4 yderste planeter er gasplaneter, men modeller viser dog, at i hvert fald Jupiter og Saturn kan have faste klippekerner på en størrelse i samme størrelsesorden som Jordens radius.

Pluto er det inderste af de såkaldte Kuiperobjekter, som er en mængde småplaneter, der befinder sig i en afstand på 30-100AU. De ligger primært i ekliptikas plan.

I meget store afstande findes Oort-skyen, som er et sfærisk bælte af kometer. Det anslås, at der er

ca.  $10^{12}$  kometer i Oortskyen.

I tabel 1 findes en liste over planeternes masser samt baneparametre.

Navn	Banenr	Middelafst. (1000km)	Omløbstid (d)	Inklination (°)	Ecc (°)	M (kg)	Æk. dia. (km)	Poldia. (km)	Døgn
Solen	-	-	-	-	-	1,989E+030	1392530	1392530	~26
Merkur	I	57910	87,97	7	0,21	3,302E+022	4878	4878	58,65 d
Venus	II	108200	224,7	3,39	0,01	4,869E+024	12104	12104	243 d
Jorden	III	149600	365,26	0	0,02	4,974E+024	12756	12714	23,93 h
Mars	IV	227940	686,98	1,85	0,09	6,419E+023	6794	6759	24,62 h
Jupiter	V	778330	4332,71	1,31	0,05	1,899E+027	142800	134200	9,8 h
Saturn	VI	1429400	10759,5	2,49	0,06	5,684E+026	120000	108000	10,2 h
Uranus	VII	2870990	30685	0,77	0,05	8,698E+025	51800	49000	16,3 h
Neptun	VIII	4504300	60190	1,77	0,01	1,028E+026	49500	47400	18,2 h
Pluto	IX	5913520	90550	17,15	0,25	1,600E+022	2500	2500	6,3 d

Tabel 1: Planetdata.

I tabellen kan man se inklinationen af planeternes baner i forhold til *ekliptika*. Eklipitika er defineret som Sol-Jordbanen. Eccentriciteten, ecc, er et mål for hvor ellipseformet de forskellige baner er.

Man definerer eccentriciteten som  $e = \frac{r_{\text{aphel}} - r_{\text{perihel}}}{r_{\text{aphel}} + r_{\text{perihel}}}$ ,  $r_{\text{perihel}}$  er klodens korteste afstand til Solen, mens  $r_{\text{aphel}}$  er klodens længste afstand til Solen.

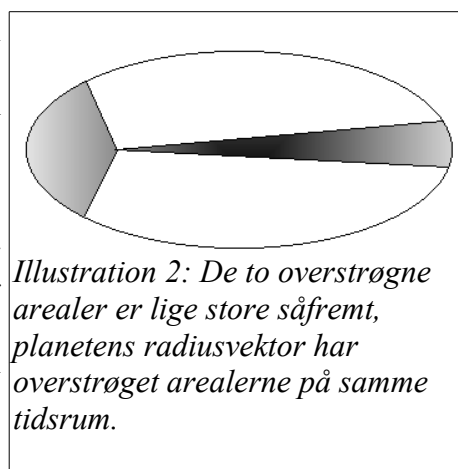
## 1.2. Keplers love

Tyskeren Johannes Kepler fandt i 1609, at planeterne bevæger sig i ellipsebaner omkring Solen, som er i det ene brændpunkt. Loven kaldes i dag for Keplers 1. lov. For at komme frem til denne erkendelse måtte Kepler med stor omhyggelighed regne på Mars-observationer, som var opskrevet i de såkaldte Rudolphinske tabeller. Tabellerne var en fortegnelse over Tycho Brahes observationer af Mars og andre planeter.

Kepler opdagede yderligere 2 sammenhænge. De kaldes naturligt nok Keplers 2.- og 3. lov. Lovene lyder som følger:

Keplers 2. lov: (Også offentliggjort i 1609.) Linien mellem planeten og Solen (kaldet radiusvektor) overstryger lige store arealer til lige store tidsrum. Illustration 2 viser det areal, som en planet overstryger i løbet af 2 forskellige men lige lange tidsrum. Keplers 2. lov fortæller så, at de 3 arealer er lige store.

Man kan af illustrationen se, at for et bestemt tidsinterval har planeten bevæget sig et længere stykke i sin bane, når den er tæt på Solen, end når den er længere væk. Det er fordi planetens hastighed afhænger af, hvor den befinder sig i sin bane. Når den er tæt på Solen, har den meget fart på og når den er langt fra Solen, har den ikke så meget fart på.



Keplers 3. lov: (Offentliggjort i 1618.) Jo længere en planet er væk fra Solen, des langsommere bevæger den sig. Mere præcist lyder reglen: "*Forholdet mellem kvadratet på omløbstiden og 3. potens af afstanden fra Solen er konstant.*"

Skrevet på moderne formel-sprog ser Keplers 3. lov ud som følger  $\frac{a^3}{P^2} = \frac{G \cdot (M+m)}{4 \cdot \pi^2}$ .

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{s}^2 \text{kg})$  og Solens masse  $M = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ . Bemærk at højresiden af formlen faktisk ikke er konstant, da planeternes masser,  $m$ , er forskellige. Denne forskel er dog så lille, at effekten ikke kan udledes ud fra Brahes målinger.

Keplers 3. lov på den matematiske form, som vist ovenfor skyldes Isaac Newton, som i 1687 i værket *Principia* udledte formlen ud fra sin nye teori – den klassiske mekanik.

### 1.3. Nogle karakteristika ved ellipser

Som nævnt i afsnit 1.2 beskriver planeterne ellipsebaner omkring Solen, med Solen i det ene brændpunkt. Herunder følger et par karakteristika om ellipser.

På illustration 3 kan man se skitser af ellipser. Ved hjælp af den halve storakse samt den halve lilleakse, kan man skrive

eccentriciteten som  $e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$ .

Sammenhængen mellem aphel og perihel er givet ved formlerne

$$r_{\text{aphel}} = a \cdot (1 + e)$$

$$r_{\text{perihel}} = a \cdot (1 - e).$$

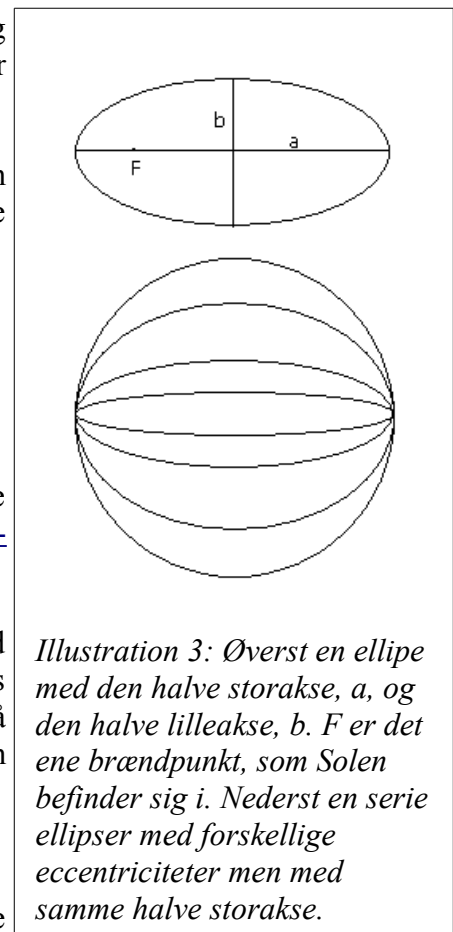
Er man interesseret i at vide mere om ellipsebaner kan man læse mere i artiklen *Tolegemproblemet*, som kan læses på [astro-gym.dk](http://astro-gym.dk).

Ellipser var kendt stof på Keplers tid. Derfor kunne man ved brug af nogle observationer og Keplers love forudsige planeters baner meget nøjagtigt. Dette kunne Ole Rømer naturligvis også gøre 100 år senere, og han beregnede også afstande mellem Jupiter og Jorden, da han opdagede at lyshastigheden er endelig.

### 1.4. Tidsligningen

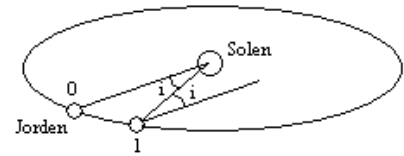
I afsnit 1.2 så vi, at Jorden bevæger sig på en ellipsebane omkring Solen og at banehastigheden afhænger af placeringen i banen. F. eks. bevæger Jorden sig hurtigt, når den er nær Solen og lidt langsommere, når den er fjernest Solen. Dvs. når den er tæt på Solen og bevæger sig hurtigt, skal den rotere lidt længere rundt, for at Solen står på samme position som dagen før. Og når Jorden er langt fra Solen, behøver den omvendt ikke at rotere så meget. Se illustration 4.

Der er endnu en korrektion til soltiden, som man skal tage højde for. Jordens ækvatorplan ligger ikke i samme plan som ekliptika. Hvis man antager, at Jordens rotationstid (døgnets længde) er konstant, betyder det, at man set fra Jorden vil opdage, at Solen bevæger sig med forskellig hastighed i løbet af året. En metode til at måle dette fænomen er ved at gå ud forskellige dage på året kl. 11:30, 12:00 og kl. 12:30 (Dansk lokal tid) og måle Solens højde på himmelen.



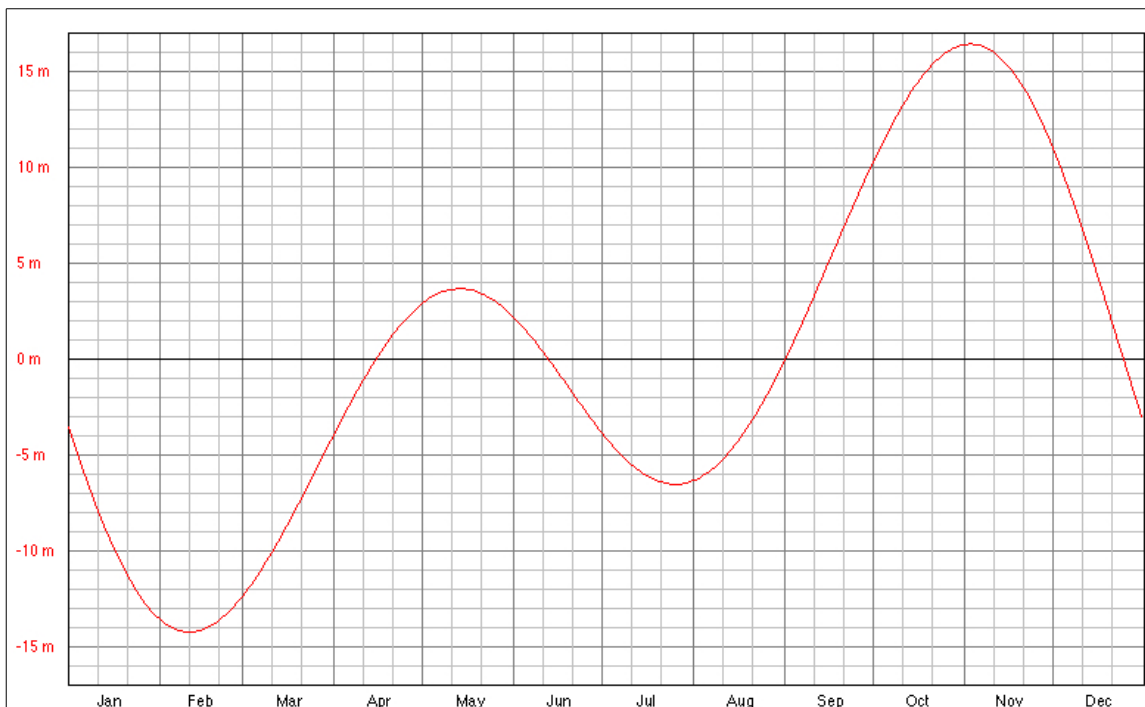
*Illustration 3: Øverst en ellipse med den halve storakse, a, og den halve lilleakse, b. F er det ene brændpunkt, som Solen befinder sig i. Nederst en serie ellipser med forskellige eccentriciteter men med samme halve storakse.*

Så vil man opdage, at Solen oftest ikke har nået sin maksimumshøjde kl. 12:00. Dvs. et solur er ikke så godt et ur, hvis man vil regne med tidspunkter foretaget på forskellige tidspunkter af året. (Dog vil Solen stå højest på himmelen kl. 12:00 til sommer- og vintersolhverv samt forårs- og efterårsjævndøgn.)



*Illustration 4: Jorden spinner med konstant rate. Når Jorden er tæt på Solen i sin bane, skal den spinne lidt mere rundt for at et soldøgn er passeret, end når den befinder sig yderst i sin bane.*

Man benytter derfor et tidssystem, som midler de forskellige jordhastigheder ud og som tager højde for ekliptikas hældning med Jordens ækvatorplan. (Man kan forestille sig jordbanen rettet ind til en ren cirkelbevægelse, hvor omløbstiden stadigvæk er et år og banen drejet, så jordens ækvator og ekliptika er sammenfaldende.) På illustration 5 er der en kurve, der viser kombinationen af de 2 ovenstående effekter .



*Illustration 5: Grafen viser tidskorrektion mellem sand middag og middel solmiddag. Kilde [7].*

Man kan ved hjælp af grafen i illustration 5 finde sand soltid, ST, ved hjælp af tidskorrekationen, TK, som aflæses på grafen og middelsoltiden, MST, som aflæses på et godt ur. Relationen er

$$ST = TK + MST.$$

## 1.5. Opgaver

1.1. Ved afstanden 1 AU = 149600000 km stråler Solen med en effekt på 1,362 kW/m<sup>2</sup>. Hvad er Solens totalt udstrålede effekt?

1.2. Solen er 1 AU væk. Dens vinkelradius på himmelen er 16' = 16/60 grader.

- Hvad er vinklen i radianer?
- Hvor stor en radius har Solen?
- Hvor mange Sole kunne man lægge ved siden af hinanden hvis de skulle lægges som perler på en snor rækkende fra Jorden til Solen?

1.3. Hvorfor aftegner man ikke planeterne i almindelige stjernerkort?

1.4. Benyt f.eks. Internettet til at finde ud hvad der adskiller det Ptolemæiske og det Kopernikanske verdenssystem?

1.5. Hvem var det, der først fandt den rigtige banebevægelse for planeterne?

1.6. Perioderne for Jupiters 4 inderste måner og deres middellafstande målt i en arbitrær enhed fra Jupiter er som følger:

	Omløbstid	Middellafstand
Io:	1,77 døgn	0,42
Europa:	3,55 døgn	0,67
Ganymede:	7,15 døgn	1,07
Callisto:	16,69 døgn	1,88

Vis at Keplers 3. lov gælder i dette system.

1.7. Afstanden til vores nærmeste nabostjerne, (pånær Solen), er 270000 AU. Hvis et rumskib flyver med hastigheden 30 km/s og flyver i lige linie fra Jorden derud, hvor mange år vil det så tage at flyve derud? (Til læserens orientering kan det oplyses, at Jordens hastighed omkring Solen er 30 km/s.)

1.8. Den amerikanske Sattelit, Hawkeye 1, havde sit perigæum (pericenter) 1,1 Jordradier fra Jordens centrum og sit apogæum (apocenter) 20,9 AU væk.

- Hvad er den halve storakse for dette system?
- Hvad er forholdet mellem perigæumhastigheden og apogæumhastigheden? (Hint. Benyt Keplers 2. lov.)

## Appendix 1. Ordliste til kapitel 1.

*Asteroide* Et objekt, der oftest ligger mellem Mars og Jupiter. En asteroide er typisk en 'sten,' der er omkring 10-100 km i diameter.

*Eccentricitet* Et tal, der fortæller hvor oval en ellipsebane er. Hvis eccentriciteten er 0 er der tale om en cirkelbevægelse; hvis eccentriciteten er 1 er der tale om en ret linie.

*Ekliptika* Det plan, som Jorden ligger på i sin bevægelse omkring Solen.

*Galakse* En 'by' af stjerner. Der er typisk omkring 200 milliarder stjerner i en galakse. Galakserne kan være elliptiske galakser, dvs. de ligner fodbolde eller amerikanske fodbolde, eller de kan være skiveformede. (Ligesom 2 tallerkner ovenpå hinanden.) Skivens stjerner ligger oftest i en spiralstruktur.

*Komet* Er en kugle, der består af frosne gasarter iblandet silikater og andre mineraler + grundstoffer. Er omkring nogle km i diameter.

*Meteor/meteorit* Er lavet af enten sten, kul eller jern/nikkel. Meteoritter er sten, der især stammer fra kometrester .

*Middelsoltid* En tid, som tager højde for, at Jordbanen er elliptisk og at Jordens akse hælder ift. ekliptika.

*Mælkevej* Den galakse vi bor i. Vores galakse er en spiralgalakse.

*Måne* Et objekt, der kredser omkring en planet.

*Planet* Objekter, der kredser omkring stjerner. De lyser kun, fordi de reflekterer sol/stjernelys. De krydser ikke andre planetbaner, og de har ryddet banen for materiale.

*Soltid* Den sande soltid, man kan aflæse på et solur.

*Stjerne/Sol* En stor gasklump der lyser i kraft af kerneprocesser i dens indre.



## 2. Ole Rømers liv og gerning

### 2.1. Ole Rømers ungdom

Ole Christensen Rømer blev født d. 25. september 1644 i Århus. Han blev født omkring det nuværende Åboulevarden 12, nærmere betegnet ved den adresse, hvor BP-huset nu befinder sig.

Hans forældre hed Anne Olufsdatter Storm, som var af århusiansk oprindelse og Christen Pedersen Rømer, som oprindeligt kom fra Rømø. Faderen var i sine lidt yngre dage sømand, men ved tilflytningen til Århus fungerede han hovedsagligt som importør af hollandske tekstilvarer. (Han var dog medejer af det skib, som transporterede varerne.)

Man ved ikke meget om Rømers barndom, men den har sandsynligvis lignet den, de fleste middelklassebørn dengang havde. Det vides dog, at han blev direkte berørt af svenskekrigene (1657-1660) idet hans forældres hus - og iøvrigt hele kvarteret omkring Mindet - blev bombet af svenskerne i 1659. Den 15-årige dreng flyttede derfor sammen med familien til Skolegade, hvor han boede, indtil han blev student. Huset er iøvrigt en af de få bygninger i Århus, der er bevaret fra denne tid.

Rømer blev student fra byens bedste skole, Katedralskolen som 18-årig i 1662. Katedralskolen var dengang en latinskole, dvs. man lærte faktisk kun at læse og skrive latin. Al anden højere undervisning blev overladt til universitetet i København.

Der var naturligt nok intet universitet eller andre højere læreanstalter i Århus dengang, for Århus var kun en lille by med omkring 3500 indbyggere. (København havde 60000 indbyggere.) Latinundervisningen var dog ikke helt ubrugelig, for al videnskabelig litteratur blev netop skrevet på latin. Det gjorde den, fordi Danmarks og de andre europæiske landes skriftsprog ikke var tilstrækkelige veludviklede til at kunne overtage latins rolle. Folk, over hele Europa, skrev simpelthen som de talte!

Efter studentereksamen flyttede Rømer til København for at læse på universitetet. Han boede hos Rasmus Bartholin (1625-1698), hvor han skulle gå til hånd for at tjene til kost og logi. Andre studenter boede på kollegium, men Rømers forældre var efter bombningen af deres hus ikke længere rige nok til at de kunne betale Rømers ophold. (Det var ikke ualmindeligt dengang, at folk, som var kommet i økonomisk ulykke, fik hjælp fra folk af deres tidligere stand. Derved slap f.ex. lovende unge mennesker fra at træde nogle trin ned af den sociale rangstige.)

Det var lidt af et held for Rømers videre udvikling, at han kom til at bo hos Bartholin, for det var Bartholin, der tændte Rømers interesse for astronomi. (Foruden at han her mødte sin fremtidige kone, nemlig Bartholins datter Anne Marie.) Interessen kom, iflg. et brev fra Rømer til Leibniz, da Bartholin bad Rømer og 5 andre studerende om at renskrive og tilrettelægge Tycho Brahes observationer, så de kunne blive udgivet. Rømer brugte årene 1664-1670 til dette arbejde.

Rømers arbejde blev så vel modtaget af Bartholin og Kong Frederik III, at han i 1671 blev udpeget til at hjælpe en udsending fra det franske Videnskabernes selskab, *Royales Academis des Sciences*, som var sendt til Danmark for at bestemme øen Hvens nøjagtige længdegrad. Det var vigtigt at bestemme denne, hvis Tychos observationer skulle kunne bruges overalt på Jorden.

Jean Picard, som udsendingen hed, inviterede Rømer til Paris, hvor han skulle arbejde de næste 9 år

som medlem af det franske akademi. (1672-1681.)

I Paris oprettede Rømer en del kontakter, f. eks. til hollænderen Christiaan Huygens. Det var også her, han lavede den opdagelse, der gjorde ham verdensberømt: Nemlig at bestemme lysets hastighed. I afsnit 2.2 følger en gennemgang af hans metode til lyshastighedsbestemmelse. I Paris byggede han også sine planetmaskiner og maskiner til at bestemme sol- og måneformørkelser. Han var også med til at konstruere Versailles-springvandene, hvilket viser, hvor alsidig han var allerede på dette tidlige tidspunkt i hans liv.

Frankrig var et katolsk land - Rømer var protestant - og dermed kunne han ikke blive boende der særligt længe efter 1680. Her blev Hueguenot-forfølgelserne nemlig indledt og alle protestanter blev uønskede i landet. Derfor tog han hjem i 1681, hvor der siden 3. april 1676 havde ventet et professorat i astronomi på Kbh.'s universitet.

Han blev i 1681 gift med Anne Marie Bartholin.

## **2.2. Bestemmelse af lyshastigheden.**

Rømer's nok mest berømte astronomiske bedrift, var hans metode til bestemmelsen af lyshastigheden.

I 1600-tallet var videnskabsfolk ganske uenige om lyset bevægede sig med en endelig- eller uendelig hastighed. F. eks. var Descartes og Cassini, to berømte videnskabsfolk fra Videnskabsakademiet i Paris af den sikre overbevisning, at lyset måtte bevæge sig uendeligt hurtigt.

Det var lidt underligt, at Descartes påstod at lyset bevægede sig med uendelig hastighed, for i hans værk, Dioptrique, endte han med at konkludere, at lyset bevæger sig med en større hastighed, jo tættere stoffet bliver. Men hvis lyshastigheden allerede er uendelig i luften, hvordan kan den så være ENDNU større i et andet og mere tæt materiale? (løvrigt var hans konklusion forkert. Lyset bevæger sig langsommere i stoffer med tæthed større end lufts.)

Cassinis overbevisning var endnu mere besynderlig, idet han selv var på samme spor som Rømer. Ligesom Rømer undrede Cassini sig over, at Jupiters inderste måne, Io, havde en tilsyneladende uregelmæssig periode. (Omløbstid). Under sine overvejelser fik han også tanken om, at lyset kunne have en endelig hastighed og dermed var i stand til at skabe kludder i observationerne af Io. Denne tanke forkastede han dog igen, og han endte i stedet med, at blive en nidkær modstander af ideen om lysets endelige hastighed. Han benyttede en metode analog til Rømers, når formørkelsestidspunkter af Jupitermånerne skulle bestemmes. Han kunne bare ikke forklare, hvorfor metoden virkede.

Hvorfor, han forkastede ideen om lysets endelige hastighed, hænger lidt hen i det uvisse. Muligvis forkastede han ideen, fordi den ikke kunne beskrive de tre næste måners irregulariteter. Måske satte han al sin lid til et eksperiment til bestemmelse af lyshastigheden foretaget af Galileo og som faldt negativt ud; måske var tanken om en endelig lyshastighed for stort et angreb på hans verdensbillede. Læseren kan selv gætte med.

Andre fysikere/astronomer f. eks. Huygens fra Holland samt Newton og Flamsteed fra England accepterede dog hurtigt Rømers opdagelse, især fordi den stemte overens med disse videnskabsmænds arbejder. Så Rømer havde ikke kun modstandere til sin opdagelse.

Selve metoden til lyshastighedsbestemmelse er som følger:

1. Man måler Jupiters inderste måne, Io's, periode og et tidspunkt hvornår Io går ind eller dukker frem af Jupiters skygge.
2. Dernæst venter man et par måneder, så afstanden mellem Jupiter og Jorden ændres væsentligt.
3. Ved hjælp af målingen i pkt. 1 kan man til et hvilket som helst tidspunkt beregne, hvornår Io går ind i Jupiters skygge - eller hvornår den dukker op igen.
4. Så måler man, hvornår Io rent faktisk dukker op eller forsvinder.
5. Hvis det beregnede- og det målte tidspunkt ikke stemmer overens betyder det, at lyset må have brugt tid på at tilbagelægge den ændrede afstand, der er fremkommet mellem Jupiter og Jorden i løbet af tidsrummet, der er forløbet. Se illustration 6.

Ved hjælp af ovenstående metode lykkedes det Rømer at forudsige, at formørkelsen af Io d. 9/11-1676, som var forudset til at ske kl. 5:25:45 lokal soltid i Paris, i virkeligheden først ville ske 10 minutter senere.

Herunder følger et eksempel på hvordan man med Rømers metode bestemmer lyshastigheden.

I Rømers notesbog, *Adversaria*, finder man en tabel over en del observationer han har foretaget på Io. Se illustration 7. Tabellen angiver en række tidspunkter hvor Io enten er indtrådt i Jupiters skygge eller er dukket op fra samme.

Rømer havde derudover bestemt Ios omløbstid ret præcist for tidsrummet 1671-1673. Han fik omløbstiden til  $1^d 18^h 28^m 30^s$ . Den vil vi benytte i det følgende, dvs. vi skal benytte observationer foretaget i tidsrummet 1671-1673. (Ios periode skifter som funktion af tiden, fordi Jupiters kegleskygge flytter sig, når Jupiter flytter sig rundt i sin bane. Når kegleskyggen bevæger sig, ændres perioden også en smule.) To mulige observationer kunne være dem, der blev foretaget d. 24/10 1671 og 12/1-1672. Disse 2 observationer beskriver begyndende formørkelser af Io, dvs. Io på disse tidspunkter glider ind i Jupiters skygge. Tidspunkterne for de 2 observationer aflæses af illustration 7:

Observation 1:	24/10-1671	18:15:0
Observation 2:	12/01-1672	08:59:22.

Ovenstående tidspunkter er målt i sand soltid, dvs. vi skal omregne til en tidsenhed, der ikke afhænger af Jordens placering i sin bane omkring Solen. Til dette bruges tidsligningen, som er beskrevet i kapitel 1.3.

Hvis man aflæser meget nøjagtigt på illustration 5, ser man at korrektionen til de to observationers tidspunkter hhv. er

$$\begin{aligned} \text{TK}_1 &: 15^m 45^s \\ \text{TK}_2 &: -9^m 23^s. \end{aligned}$$

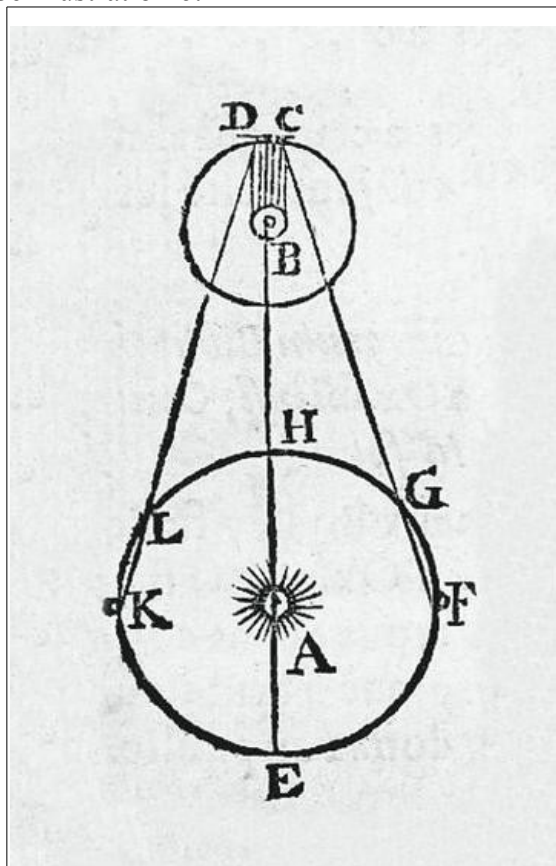
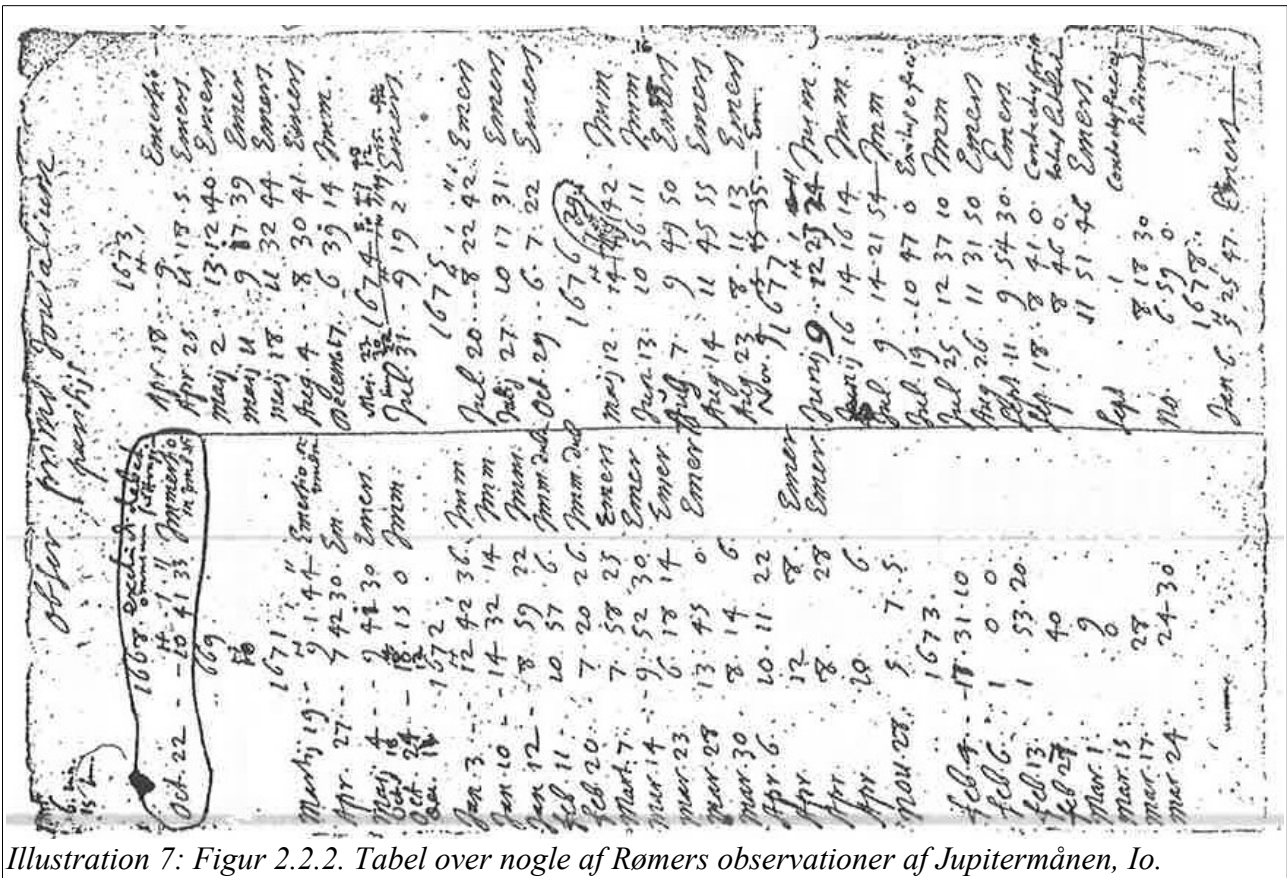


Illustration 6: Rømers tegning af problemstillingen omkring Io's bevægelse. Ved A findes Solen. Jorden bevæger sig omkring Solen på banen markeret med bogstaverne EFGHLK. Jupiter er i B. Io kredser om Jupiter på den lille bane markeret med bogstaverne DC.



Dvs. det nu er muligt at beregne middelsoltiden for de to observationer ud fra formlen

$$MST = ST - TK.$$

$$MST_1 = 18^h 15^m 00^s - 0^h 15^m 45^s = 17^h 59^m 15^s.$$

$$MST_2 = 8^h 59^m 22^s - (-0^h 9^m 23^s) = 9^h 08^m 45^s.$$

Tidsrummet mellem de to observationer er altså

$\Delta t = 1672^a 12^d 09^h 08^m 45^s - 1671^a 297^d 17^h 59^m 15^s = 79^d 15^h 9^m 30^s$ , hvor a angiver anuum, dvs. årstallet og d angiver dagnummeret. Tidsrummet mellem de 2 observationer er altså lidt over 79 dage. Da vi kender Ios omløbstid kan vi se at 44,89 omløb svarer til ovenstående tidsinterval  $\Delta t$ . Tallet bør jo være et heltal, dvs. der må være sket 45 omløb.

Ud fra observation 1 og den kendte værdi for omdrejningstiden er det muligt at beregne de tidspunkter, hvor Io går ind i Jupiters skygge - nemlig 1 gang pr.  $1^d 18^h 28^m 30^s$ . For eksempel er der efter 45 omløb gået tidsrummet  $45 \cdot 1^d 18^h 28^m 30^s$ . Dvs. man kan nu beregne det tidspunkt, hvor Io burde gå ind i Jupiterskyggen d. 12/1-1672, såfremt lyset bevæger sig uendelig hurtigt:

$$t = 1671^a 297^d 17^h 59^m 15^s + 45 \cdot 1^d 18^h 28^m 30^s = 1672^a 12^d 09^h 21^m 45^s.$$

Men observation 2 fortalte jo, at tidspunktet for den begyndende formørkelse skete  $1672^a 12^d 09^h 08^m 45^s$ . Dvs. der er en forskel på 13 minutter mellem den beregnede og den observerede værdi.

I tidsrummet mellem observation 1 og observation 2 har både Jupiter og Jorden bevæget sig rundt omkring Solen. Dvs. deres indbyrdes afstand har ændret sig i tidsrummet mellem observationerne. Rømer beregnede denne afstandsændring manuelt til 1,18 AU. Rømer indså, at grunden til at lyset i dette tilfælde kom for hurtigt frem, skyldtes, at det skulle tilbagelægge 1,18 AU mindre. Dvs. han nu kunne beregne lysets hastighed. Hastigheden bliver 1,18 AU pr. 13 minutter hvilket også er  $226 \cdot 10^3 \text{ km/s}$ . Den rigtige værdi er som bekendt 300-103 km/s - en afvigelse på knap 25%.

Hans først kendte beregning viste, at lyset "tøvede" med at nå frem. Det skyldes naturligvis at afstanden mellem Jupiter og Jorden blev større.

Man kan ikke forvente, at han skulle kunne bestemme hastigheden med større nøjagtighed i første forsøg. Og den fundne værdi forklarede jo de anomaliteter, han ville have forklaret, så der var jo ingen grund til at måle videre og perfektionere bestemmelsen af hastigheden.

I appendix 2 findes et afskrift af hans artikel i *Journal des Sçavans*. Som man ser er det en lille og uanselig artikel og ikke nok med det: Det var den eneste artikel Rømer nogensinde udgav! Han brød sig øjensynligt ikke om at fortælle alle og enhver om sine opdagelser. Enten fordi han ikke selv fandt dem væsentlige, eller også fordi han havde travlt med at arbejde videre på nye ting.

Senere, da kendskabet til lyshastigheden blev mere og mere anvendelig i andre grene af fysikken blev andre astronomer/fysikere interesserede i at bestemme hastigheden. Bl. a. derfor har Halley i 1694 med egne observationer samt observationer foretaget af Flamsteed fundet, at lyshastigheden er  $339 \cdot 10^3 \text{ km/s}$ , dvs. fejlen blev forbedret til kun 13%.

### **2.3. Rømers øvrige arbejde**

Opdagelsen af lyshastigheden var som bekendt nok til at gøre Rømer verdensberømt, men Rømer hvilede ikke på laurbærerne. Der var en masse ting, som kunne opfindes eller forbedres. Derudover var han efter tilbagekomsten til Danmark andet end bare kongelig hofastronom. Kongen værdsatte hans evner så meget, at han gav Rømer mere end rigeligt at se til i resten af hans liv.

Det vil føre for videt i disse noter at gennemgå alt hans arbejde, så i det følgende følger kun en liste over nogle af hans bedrifter:

1. Han konstruerede kloak- og vandledningssystemer i København og rensede Sortedamssøen for slam, så den kunne bruges som vandreservoir.
2. Politimester i København.
3. Overborgmester i København.
4. Brandmester i København.
5. Højesteretsdommer i København.
6. Han indrettede Københavns gadenet og indførte belysning på gaderne.
7. Han var kongelig rådgiver.
8. Han reformerede mål- og vægtsystemet.
9. Han opfandt et instrument til vejlængdemåling og brugte det til at kortlægge afstande i Danmark.
10. Han eksperimenterede med krudt og andre militære anliggender.
11. Han foretog de første meteorologiske målinger i Danmark.
12. Han indførte den gregorianske kalender i Danmark i år 1700 og lugede astrologien ud af den danske almanak.
13. Han opfandt zoomlinsen, mikrometerskruen, epicykloidetandhjulet, som arbejder praktisk talt modstandsfrít, meridiankredsen og mange andre ting.

Ovenstående 'mange andre ting,' dækker f. eks. over de reproducerbare termometre, hvilket vil sige termometre, der er indbyrdes kalibrerede. I afsnit 2.4 diskuteres denne opfindelse.

## 2.4. Rømers termometerarbejde

Termometret, som vi kender det, blev opfundet i 1641, og det var storhertug Ferdinand II af Toscana, som sponsorede det arbejde. I Firenze havde *Accademia del Cimento* (forsøgsakademiet) under fyrst Leopold af Medici udviklet termometre, som hver især var rimelig gode. De led dog alle af en brist, nemlig at de var unikaer, dvs. man kunne ikke sammenligne temperaturer målt med forskellige termometre. Dvs. til formål, hvor resultater skulle deles med andre, var de ubrugelige!

Termometrene bestod af et langt glasrør med nogle farvede perler brændt fast til at angive de forskellige grader. Termometrenes nulpunkter blev fundet ved at nedsænke dem i isvand og dette var det eneste fikspunkt, der blev valgt. Det var derfor disse termometre var unikaer. De var simpelthen ikke nøjagtige nok, da det var ganske svært at lave rør med samme diameter.

Rømer derimod havde en ide til at lave bedre termometre. Han havde den simple (og geniale) ide at vælge 2 fikspunkter i stedet for 1. Når man så havde valgt et antal inddelinger på termometret var temperaturintervallerne dermed fast bestemt, såfremt rørdiameterne var nogenlunde konstante. (Det kontrollerede Rømer naturligvis.)

Det skal lige nævnes, at han ikke er den første, der er fremkommet med ideen om 2 fixpunkter. For eksempel foreslog franskmanden Dalence i 1688 at anvende vands smeltepunkt og smørs kogepunkt som fixpunkter. Halley foreslog, også i 1688, at benytte vands smeltepunkt og sprits kogepunkt; og samtidig benytte kviksølv i termometrene. Carlo Renaldini foreslog i 1694 at benytte vands kogepunkt og frysepunkter som fixpunkter, dvs. før Rømer, men der er intet der tyder på, at de omtalte folk realiserede deres forslag. Rømers ide var altså ikke unik, men han var den første, som brugte ideen.

Der er der dog ingen der ved, hvordan Rømers termometre rent faktisk så ud, for som det meste af Rømers arbejde blev alle hans termometre ødelagt ved Københavns brand i 1728. Der er dog nogle indikationer i hans notesbog, *Adversaria*, som overlevede branden.

De fortæller, at rørene var 18" dvs. 47,11 cm lange, vinånd (sprit) var termometervæske og safran var farvestof. Han inddelte termometrene i 60 lige store intervaller, hvor 7,5 grader svarede til vands frysepunkt og 60 svarede til kogepunktet.

Det lidt underlige tal 7,5 fremkommer ved at dele længden af den totale skala med 2 tre gange. Altså:  $60/2=30$ .  $30/2=15$ ,  $15/2=7,5$ . Rømer valgte frysepunktet ved 7,5 grader, så der er plads til frostgrader på skalaen.

Den opmærksomme læser undrer sig sikkert over, hvordan man kan bruge vands kogepunkt som fixpunkt, når termometervæsken Rømer anvendte er sprit. Spirit koger jo længe før vand koger. Dette problem behandles i opgave 2.4.

Rømer offentliggjorde (naturligvis) ikke sine resultater, men alligevel kunne samtiden drage nytte af dem. Det eneste, der skete, var, at det moderne termometers opbygning blev tilegnet andre fysikere - nemlig Fahrenheit fra Holland og Celsius fra Sverige.

Fahrenheit har i et brev fra 17/4-1729 til sin ven Boerhave skrevet, at han besøgte Rømer i København og her blev inspireret til at benytte 2 fixpunkter til sine termometre - nemlig smeltende is og blodvarmt vand. Rømer brugte iflg. hans notesbog, *Adversaria*, vands smelte- og kogepunkt,

så det lyder lidt underligt, at Fahrenheit ville bruge blodvarmt vand, men ikke desto mindre er det, hvad han har gjort. (Hans termometre bruges stadigvæk i USA, så hans ide var jo ikke helt så tosset endda.)

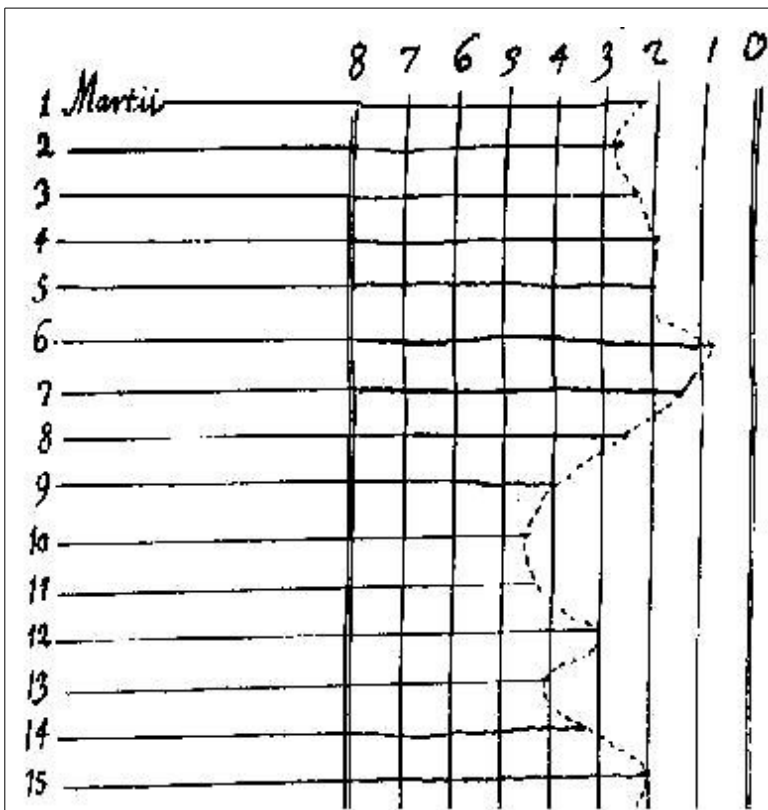
Rømer brugte blandt andet sit termometer til at bestemme temperaturer for København i vinteren 1708/1709. Se illustration 8. Derudover har han muligvis solgt en del termometre, for han begyndte først at konstruere dem, da Frederik IV i 1702 fratog Rømer hans løn, fordi Rømer prøvede at bevise den 'kætterske' lære, at Jorden ikke er centrum i Universet. (Kepler havde allerede vist dette i 1609 med sin 1. lov, men det tog noget tid, inden ideen slog rigtig igennem.)

Så vidt vides var det kun økonomiske grunde - og muligvis ren interesse - der gjorde, at Rømer arbejdede med de nye termometre, for han var færdig med at undersøge pendullængders afhængighed af temperaturen allerede 6 år tidligere. Derfor havde han ikke brug for termometre til sit astronomiske arbejde.

## 2.5. Afslutning

Rømer døde i 1710 efter flere perioder med pinefuld galdesten og uden at lave flere væsentlige fysiske/astronomiske innovationer. De sidste år af hans liv blev primært brugt til 'verdslig' arbejde for staten. Han døde den 19/9-1710.

Hermed afsluttes gennemgangen af Ole Rømers liv og arbejdsvirke. Hvis gennemgangen af lyshastighedsbestemmelsen og termometerkonstruktionen har fænget nogens interesse, kan de finde mere uddybende tekster om andre af Rømers arbejder i referencelisten.



Lidt af Danmarks ældste temperaturkurve, den viser temperaturvariationerne i begyndelsen af Marts 1709.

Illustration 8: Et lille udsnit af Ole Rømers temperaturmålinger af København. [8]

## 2.6. Opgaver

2.1. At bestemme lystets hastighed ud fra nogle andre målinger.

- Find 2 værdier fra illustration 7, der begge beskriver enten en tilsynekomst fra Jupiters skygge eller en forsvinden.
- Bestem det nøjagtige tidsinterval mellem de 2 observationer. (Husk at bruge tidsligningen.)
- Beregn hvornår anden observation burde være fremkommet. (Benyt den omløbstid Rømer havde bestemt for perioden 1671-1673.)
- Bestem forskellen mellem det beregnede tidspunkt og tidspunkt nummer 2.
- Find den ændrede afstand lyset skal tilbagelægge mellem Jupiter og Jorden vha. et planetarieprogram.
- Bestem nu lyshastigheden.

2.2. Rømers temperaturskala sammelignet med Fahrenheits.

Antag at Rømer brugte vands frysepunkt og kogepunkt som fixpunkter og at 7,5 Rømer grader svarer til frysepunktet, mens 60 Rømergrader svarer til kogepunktet.

- Find fikspunkterne for Fahrenheitskalaen samt Fahrenheits valg af gradinddeling.
- Bestem den lineære sammenhæng mellem Fahrenheit- og Rømerskalaen.

2.3. Vands kogepunkt kontra sprit i termometeret.

- Hvis man benytter sprit som termometervæske, hvad sker der så, hvis man vil bestemme temperaturen af et stof, der er varmere end sprits kogepunkt?
- Hvis Rømer har opdaget dette problem, hvad kan han så have gjort for at eliminere det?



## Appendix 2. Afskrift af Rømers artikel i Journal des Sçavans

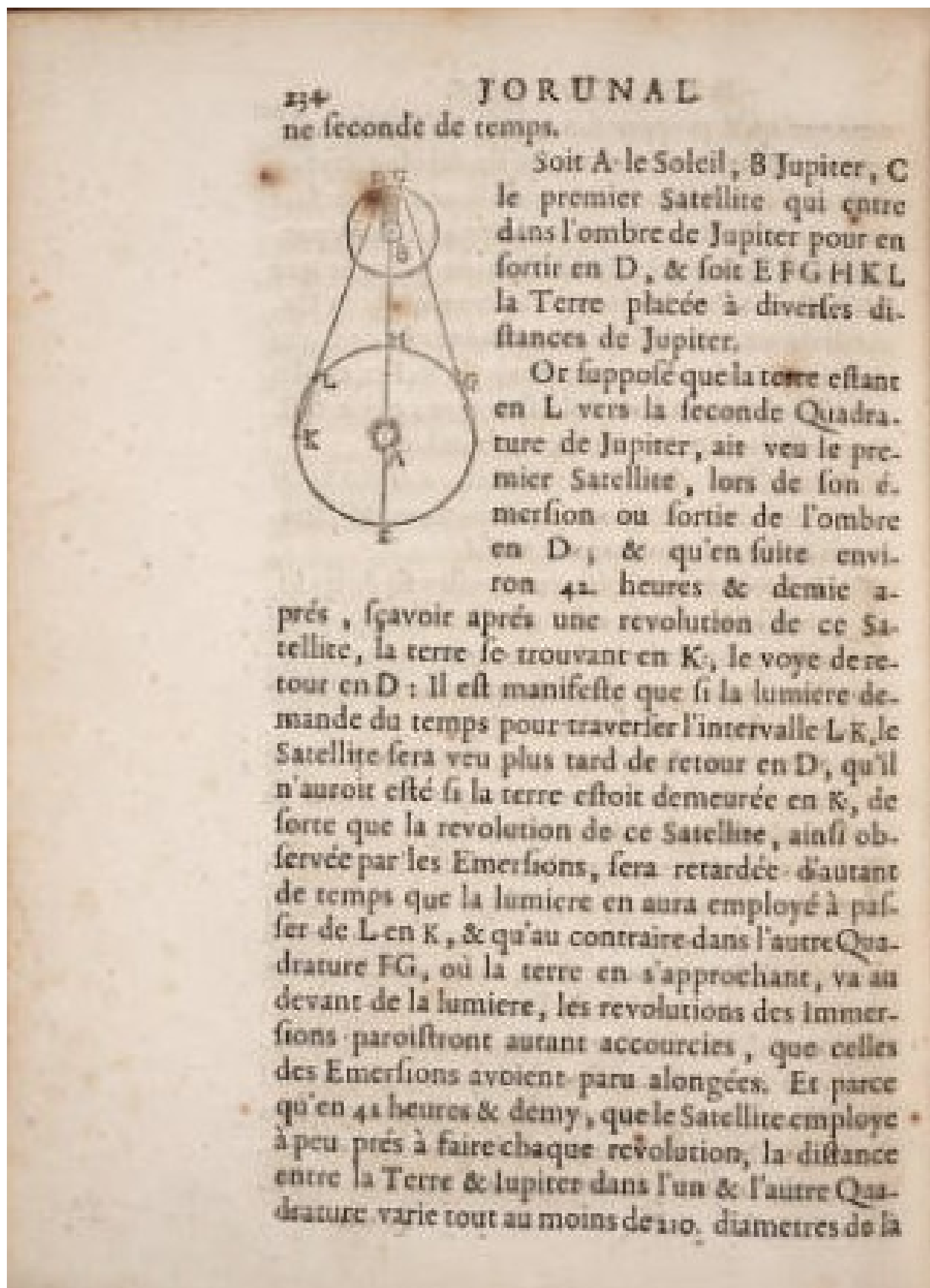


Illustration 9: En side fra Rømers originalartikel. [10] Den fulde artikel kan læses i [11].

### 3. Referencer

1. "Ti Rømer facetter," red. Claus Thykier. Albertslund, 1989.
2. "Ole Rømer, en skildring af hans liv og gerning," af Axel V. Nielsen. Århus, 1944.
3. "Roemer and the First Determination of the Velocity of Light," I. Bernard Cohen. New York City, 1944.
4. "924 Elementary Problems and Answers in Solar System Astronomy," af James A. van Allen. Iowa City, 1993.
5. "Observational Astronomy," D. Scott Birney. Cambridge, 1994.
6. "Videnskabens Verden, Solsystemet bd. 2," red. Iain Nicholson & Patrick Moore. København, 1986.
7. <http://www.jgiesen.de/SundialBox/index.html>
8. [www.rundetaarn.dk](http://www.rundetaarn.dk)
9. <http://www.eso.org/public/outreach/eduoff/aol/market/experiments/advanced/skills302.html>
10. <http://lhldigital.lindahall.org/cdm/singleitem/collection/cosmology/id/232>
11. [http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/ama09/pages\\_jdsc/pages/jdsc\\_1676\\_lumiere.pdf](http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/ama09/pages_jdsc/pages/jdsc_1676_lumiere.pdf)

Ref. 1, 2, 6 og 7 kan læses af alle, mens ref. 3 kræver kendskab til engelsk, latin og fransk. Ref. 4 og 5 kræver kendskab til engelsk og en vis matematisk rutine. (Mindst studentereksamen på højt niveau og gerne mere.)

Reference 9 indeholder mange flere målinger, man kan arbejde videre med.