

Antikkens gådefulde tandhjul

Af John Rosendal Nielsen, Aurehøj Gymnasium og KVANT

For ikke så længe siden stødte jeg ved et tilfælde på en bog med den inciterende titel "50 fund – højdepunkter i arkæologien". Jeg blev imidlertid en smule skuffet, da jeg måtte konstatere, at ét af de i mine øjne væsentligste fund i nyere tid inden for den græske arkæologi ikke var nævnt. Der er nærmere bestemt tale om den såkaldte Antikythera-mekanisme, som for nuværende bedst kan beskrives som en samling bronzefragmenter af forskellig størrelse. I det følgende vil jeg forsøge at beskrive denne mekanismes funktion og betydning.

Skibet er ladet med

For omkring 2100 år siden mødte et skib sin skæbne, da det led skibbrud ved øen Antikythera – syd for Peloponnes. Årsagen til skibbruddet kan vi kun gisne om, men skibet var formentligt blevet overrasket af et stormvejr, der betød, at skibet ramte de farlige skær ved øen. Vraget skulle ligge der i 2000 år, før det blev fundet af svampedykkere fra Symi i år 1900. Svampedykkerne havde søgt ly for en storm ved øen og ville undersøge stedet for gode badesvampe, nu hvor de alligevel var i området. I stedet bjergede de en stor arkæologisk skat med mange statuer i marmor og bronze, som blev bragt til det Nationalarkæologiske Museum i Athen, hvor man kan se dem den dag i dag.



Figur 1. Antikythera-mekanismen i dens nuværende tilstand. Disse fragmenter er brikker i et puslespil, hvor de fleste af brikkerne mangler. Hvis fragmenterne blev samlet, ville Mekanismen formentligt være på størrelse med en skotøjsæske.

Imellem de mange fine skatte fandt museumsfolkene en undseelig bronzeklump, hvor man tydeligt kunne se tandhjul og nogle antydninger af græske bogstaver. Filologer og søfartshistorikere blev kaldt til Athen for at studere dette objekt, der blev kendt som Antikythera-mekanismen.¹ En heftig debat begyndte imellem forskerne, som ikke kunne blive enige om, hvad Mekanismen var for noget. Nogle historikere – især de med en søfartsbaggrund – mente, at det var et søfartsinstrument, eftersom man havde fundet Mekanismen på et skib. Der blev også tilkaldt en anerkendt tysk filolog ved navn Albert Rehm (1871-1949), som fandt inskriptionerne

¹Kaldes for Mekanismen i resten af artiklen.

Pachon og *sterigmos* på Mekanismen. *Pachon* er det græske navn på en ægyptisk måned, og den ægyptiske kalender blev ofte benyttet i den græske astronomi, da den var mere regelmæssig end den græske kalender. *Sterigmos* er et græsk teknisk begreb for det tidspunkt, hvor en planet skifter direkte bevægelse til retrograd bevægelse eller omvendt. Rehm ræsonnerede, at Mekanismen var et planetarium. Fælles for alle disse teorier i perioden 1901-1940 var, at de var baseret på overfladiske observationer og spinkle ræsonnementer.



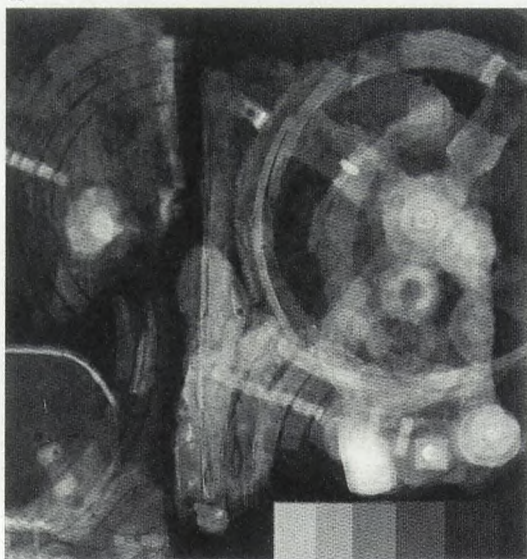
Figur 2. Øen Antikythera med det omkringliggende område. Det er sandsynligt, at skibet kom fra Rhodos eller fra den tyrkiske vestkyst. Svampedykkerne var på vej hjem til Symi.

Pionerforskningen

Det var først i 1970'erne, at fundet blev undersøgt grundigt med røntgenudstyr. Undersøgelserne blev ledet af en engelsk fysiker og videnskabshistoriker ved navn Derek de Solla Price (1922-1983), der havde en betragtelig forskningskarriere bag sig ved bl.a. Yale University [1]. Price havde længe haft en interesse i Mekanismen, men han kunne ikke få finansieret det nødvendige tekniske udstyr m.h.p. at foretage en videnskabelig undersøgelse. Først i 1971 faldt brikkerne på plads, og man kunne således begynde at gennemlyse bronzestykkerne med røntgenstråler, og resultaterne publicerede Price i en større monografi [2].

Røntgenbillederne gav det første indblik i, hvorledes Mekanismens tandhjul så ud, og de var tilstrækkeligt detaljerede til, at man kunne se nogle af tænderne på tandhjulene. Desværre var billederne ikke tydelige nok, eller tandhjulene var ganske enkelt ikke fuldstændigt

bevarede. Man var derfor nødt til at estimere det totale antal tænder i tandhjulet ved at bestemme tænderne i et mindre segment af tandhjulet og så vurdere, hvor stor en del af tandhjulet segmentet udgjorde. Denne metode kan naturligvis være hæftet med en lille usikkerhed, da det forudsætter, at tænderne sidder jævnt fordelt.



Figur 3. Øverst: Et eksempel på Prices røntgenbilleder. Nederst: Price med sin model af Mekanismen.

Det lykkedes dog Price og hans to hjælpere at bestemme antallet af tænder på flere af tandhjulene forholdsvis præcist, men desværre havde Price allerede en forudindtaget mening om Mekanismens funktion, hvilket betød, at hans model af fundet, som skulle være baseret på røntgenundersøgelserne, var upræcis og unødigt kompliceret [3]. Han havde blandt andet introduceret et differentialtandhjul, som var baseret på en – desværre – fejlfortolkning af et røntgenbillede, og differentialtandhjulet var en unødigt kompliceret løsning på noget, som kunne klares med almindelige tandhjul.

Et vigtigt resultat af Prices undersøgelser var dateringen af skibsvraget, som gav en indirekte datering af Mekanismen. Skibets planker blev bestemt ved kulstof-14-metoden, hvilket gav en datering på 220 (\pm 43) f.Kr. [2]. Han fik desuden bestemt den kemiske sammensætning af to fragmenter, hvor man fandt, at det drejede sig om en bronzelegering med 5% tin og resten kobber. Prices analyse af fundet var, at den måtte være en analog computer og et astronomisk instrument fra den sene hellenistiske periode.

Dateringsproblematikken

I 1976 blev der arrangeret en ny ekspedition til Antikythera. Det var selveste Jacques Cousteau, der var manden bag denne ekspedition. Der blev ikke fundet yderligere fragmenter af Mekanismen, men der blev fundet enkelte statuetter og endnu mere vigtigt: mønter. Der er således foreløbigt fundet 36 sølvmønter og minimum 40 bronzemønter. De er vigtige, fordi mønter kan give os et fingerpeg om, hvor skibet var fra, og en datering, m.h.t. hvornår skibet senest sejlede fra havn.



Figur 4. Øverst: Jacques Cousteau fremviser statuetterne. Nederst: to af mønterne fra Efesos og Pergamon (Tyrkiets vestkyst) er dateret til år 95–92 og 85–76 f.Kr..

Sølv mønterne er blevet dateret til perioden 95–60 f.Kr. [4], men enkelte bronzemønter kan muligvis være yngre. Dette kunne tyde på, at skibet må have forladt havnen omkring samme tidspunkt som mønternes datering. Begrundelsen herfor er, at skibet er blevet dateret til ca. 220 f.Kr., og selv med usikkerheden på kulstof-14-dateringen ville det stadig betyde, at skibet var meget gammelt. Et hundrede år gammelt skib i

antikken ville være usædvanligt, men om det ville være umuligt, er svært at afgøre. Vores viden om antikkens skibe – og specielt med hensyn til skibenes holdbarhed – er stadig begrænset.

Mønterne giver en nedre grænse for, hvornår skibet sejlede fra havn. Skibet kan ikke afsejle en havn med mønter, der endnu ikke er prægede, og derfor må skibet have sejlet fra havn i tidsrummet 95-60 f.Kr. Skibet kunne sagtens være afsejlet senere, men det ville bare gøre skibstømmeret ældre, hvilket er tvivlsomt. Det er derfor en rimelig hypotese at antage, at skibet afsejlede tidligt i den angivne periode.

Sølv mønterne er tetradrakmer, hvis nutidige værdi svarer til ca. 1000 kroner, og de blev almindeligvis kun benyttet til større handelstransaktioner. Der blev fundet 36 tetradrakmer ombord på skibet, hvoraf 32 var fra Pergamon, mens de sidste fire var fra Efesos. Antallet af bronzemønter er ukendt, da bronzemønterne har været vanskeligere at skille fra hinanden, men der er tale om mindst 40. Omfanget af bronzemønternes korrosion er omfattende, hvilket betyder, at kun seks er blevet identificeret. Tre af bronzemønterne er fra Sicilien, og de resterende tre er fra Lilleasien, og disse mønter er specielt interessante, da de formentligt blev benyttet af søfolkene i deres daglige transaktioner. Mønternes geografiske ophav giver et billede af, hvilket område skibet sejlede i. Uden at vi kan angive den præcise rejse, kan vi godt antage, at det er sandsynligt, at skibet sejlede fra Tyrkiets vestkyst eller nærliggende øer imod vest, hvilket passer godt med vragelets beliggenhed ved Antikytheras østkyst. De fleste forskere formoder, at skibet var på vej mod Italien, Sicilien eller det græske fastlands vestkyst, og nærmere kommer vi ikke skibets destination.

Mekanismen efter Price

Price var en af de store inden for videnskabshistorisk forskning, hvilket betød, at hans fortolkning stod uantastet frem til midten af 1980'erne. I 1985, to år efter Prices død, kom den australske computerhistoriker Allan Bromley fra Sydney University med en kritik af Prices model, da han havde testet Prices teori med Meccano-byggesæt og fundet modellen ubrugelig. Bromley instruerede en urmager i Sydney i at bygge en simplere model. En væsentlig ændring ved Bromleys model var, at når man roterede håndtaget på indgangshjulet én omgang, flyttede viserne på skiverne sig præcis med den vinkel, som svarede til den daglige ændring.

En stor forbedring af modellen var afsløringen af to tandhjuls funktioner. Price havde fundet to tandhjul med 15 og 63 tænder, hvilket ikke gav mening. Derfor ændrede han antallet til 16 og 64 og formodede, at de var en del af en ukendt fireårs cyklus. Bromley holdt fast på det oprindeligt opmålte antal på 15 og 63 tænder og kom frem til, at tandhjulene kunne vise en $4\frac{1}{2}$ års cyklus.² Fire gange $4\frac{1}{2}$ års cyklus giver 18 år eller

²Den eneste måde, hvorpå jeg kan få en cyklus på $4\frac{1}{2}$ år, er, hvis tandhjulene havde 14 og 63 tænder.

³Måneder er her synodiske, hvilket vil sige, at deres varighed er ca. 29,5 dage (mere herom i næste artikel). Årets længde regnes for at være 365,25 dage.

⁴Allan Bromley døde af Hodgkin's lymfoma i 2002.

223 måneder,³ hvilket er svarende til Saros-cyklussen – perioden mellem to solformørkelser med næsten ens placering.



Figur 5. Øverst: Allan Bromley (1947–2002) og hans model. Nederst: Michael Wright i sit værksted med sin første model af Mekanismen.

Det stod dog klart for Bromley, at det var nødvendigt med yderligere undersøgelser af Mekanismen og i starten af 1990'erne startede Bromley et samarbejde med Michael Wright, som var kurator ved British Museum. Bromley og Wright havde fået en tilladelse og penge til at undersøge fragmenterne med en teknik, der er kendt som lineær røntgentomografi. For at udføre denne røntgenundersøgelse måtte Wright opfinde en opstilling, der tillod fragmenterne at blive gennemlyst, hvilket resulterede i billeder med fantastiske detaljer og dybde. I 1998 blev Bromley⁴ alvorligt syg og måtte overlade forskningen til Michael Wright, der publicerede resultaterne og lavede en model ud fra røntgenbillederne i 2006.

Antikythera Mechanism Research Project

Året før Wrights artikel begyndte flere forskere fra hovedsageligt England og Grækenland at danne en forskningsgruppe ved navn *Antikythera Mechanism Research Project* (AMRP), da de mente at der stadig var meget at udforske ved Mekanismen. De valgte at ignorere Wrights forskning, hvilket har medført en del gnidninger imellem Wright og enkelte af forskerne i gruppen. AMRP-gruppen har anvendt fire forskellige metoder til at undersøge Mekanismen [4]:

- a) Polynomial Texture Maps
- b) Digital fotografering
- c) Computer Tomografi
- d) Kemisk analyse med røntgenspektroskopi.

Holdets undersøgelser har bekræftet mange af Wrights tidligere resultater, men der er også kommet andre resultater frem. Et af de vigtigste bidrag, som AMRP-gruppen har opnået igennem deres undersøgelser, er kommet fra *Polynomial Texture Maps* (eller PTM). Denne teknik er udviklet af Hewlett-Packard-laboratoriet i USA under ledelse af Tom Malzbender [5]. PTM kan groft sagt beskrives som digitale billeder, der er taget med blitz fra mange forskellige vinkler. Der dannes med PTM et tredimensionelt billede af Mekanismens overflade, og sammen med målingerne med røntgentomografien har holdets undersøgelser forøget antallet af tydede tegn i inskriptionerne på Mekanismen.



Figur 6. Øverst: Et eksempel på PTM af Mekanismen, hvor man tydeligt kan se inskriptionerne. Nederst: Opstilling, hvor kameraet er øverst på kuplen, og ledningerne mellem de små blitz sidder rundt om på kuplen.

Planetariet

I modsætning til Wrights håndgribelige model har AMRP-gruppen lavet en computeranimation baseret på deres forskning. Når man kigger på det, som vi i dag kalder for Mekanismens forside, bemærker man enkelte forskelle i deres modeller, men kigger man nærmere efter, opdager man, at det er overfladiske forskelle, og man er meget enig om udformningen af forsiden. Forskerne er enige om, at Mekanismens forside var et planetarium, hvor positionen af Solen, Månen og de fem kendte planeter – Merkur, Venus, Mars, Jupiter

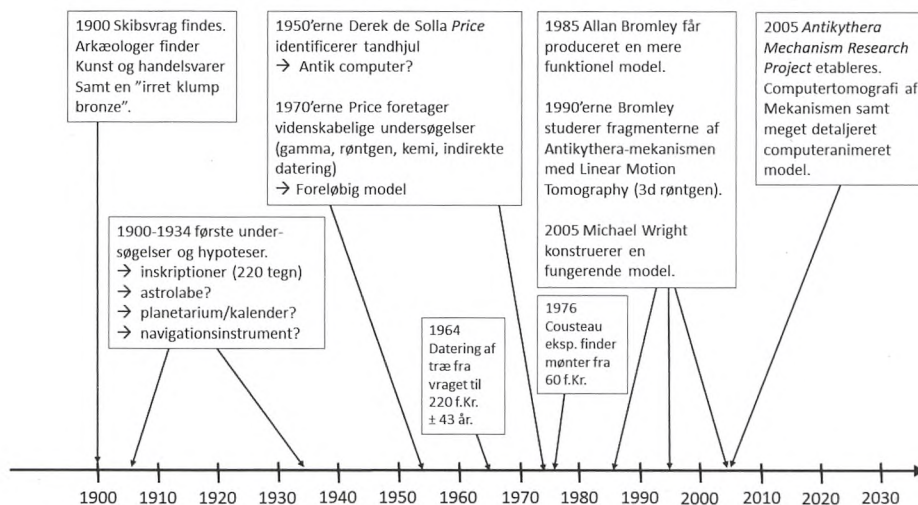
og Saturn – er placeret i forhold til stjerne-tegnene. På siden af kassen var der et håndtag, som man drejede, og derved fik de syv visere for Solen, Månen og planeterne til at bevæge sig rundt. Der var formentligt farvede perler på hver af viserne, som var indgraveret med de græske navne for himmellegemerne. De farvede perler fulgte en tradition, hvor hvert himmellegeme blev symboliseret ved en ædelsten. For eksempel vil den røde perle repræsentere Ares eller Mars. De græske navne for planeterne, Solen og Månen er vist på tabellen nedenfor.

Solen	Helios
Månen	Selene
Merkur	Hermes
Venus	Afrodite
Mars	Ares
Jupiter	Zeus
Saturn	Kronos



Figur 7. Der er ikke de store forskelle på forsiderne af Wrights model (øverst) og AMRP-gruppens computer-animerede model (nederst). Det mest iøjnefaldende er de manglende perler på viserne og inskriptioner hos Wright.

Tidslinje over arkæologiske og videnskabelige undersøgelser



Viserne pegede på to runde skiver, hvoraf den første var delt i tolv dele – én for hvert stjernetegn i dyrekredsen. Den anden og ydre skive var delt i 13 dele, hvoraf de 12 dele var lige store, mens den sidste 13. del var væsentlig mindre. Denne skive angav det ægyptiske kalenderår, der havde 12 måneder á 30 dage og 5 overskydende dage – de såkaldte epagomenale dage. Den ægyptiske kalender blev ofte benyttet i astronomien, da den tilnærmelsesvis fulgte Jordens omløbstid om Solen, og kalenderen var meget enkelt opbygget.⁵ De to runde skiver kunne placeres uafhængigt af hinanden, og skiven med den ægyptiske kalender havde 365 huller, hvor en lille pind kunne sættes i, så den ægyptiske kalenderskive kunne placeres efter årets stjernetegn [6]. Grunden hertil var, at den ægyptiske kalender ikke havde en skuddag hvert fjerde år – en af de få svagheder ved denne kalender.

Viseren for Månen havde en speciel udformning, da den var repræsenteret af en perle, hvoraf den ene halvdel af dens overflade var malet sort og den anden var malet hvid. Perlen var indkapslet i skiven, således at den kunne dreje rundt og vise månens fase som nymåne og fuldmåne. Nøjagtigheden af Solens og Månens visere på Mekanismen er utrolig stor, da der er tegn på, at der er taget hensyn til deres acceleration og deceleration ved at anvende en epicyklisk tilgang med tandhjulene.

Antikkens kosmos

Forståelsen af kosmos i antikken var begrænset af de observationer, som man kunne udføre. Uden teleskoper og andet udstyr var man henvist til, hvad man kunne se med det blotte øje. Det betød, at man kun kendte til Solen, Månen, de fem planeter – Merkur, Venus, Mars, Jupiter og Saturn – samt de klareste stjerner.

Dette kosmos var allerede kendt hos de tidligere civilisationer såsom den ægyptiske og den mesopotamiske, der benyttede astronomien til astrologisk forudsigelse og til tidsmåling om natten. Observatører af natte-

himlen i de ægyptiske og mesopotamiske civilisationer havde bemærket en regularitet i planeternes bevægelse. Specielt havde man opdaget, at planeternes fremkomst på himlen havde faste synodiske⁶ perioder.

De tidligste astronomiske tekster, som vi har fra Mesopotamien, er kileskrifttavler kendt under navnet *Enuma Enu Enlil* [6], hvor observationerne, som er beskrevet på tavlerne, kan spores tilbage til den gamle Babilonske periode, d.v.s. 1950–1595 f.Kr. De beskriver, hvilke varsler planeterne gav anledning til. De mesopotamiske konger var gudernes repræsentanter på Jorden, og deres gøren og laden var forbundet med himmellegemerne. Et par eksempler herpå kunne være [6]:

“Hvis Jupiter bærer udstråling: Kongen har det godt og landet vil blive glad.” og

“Hvis der er en formørkelse i Simānu (måned): Der vil blive oversvømmelse og vandet vil bære jorden væk”.

Der var en sammenhæng imellem de astronomiske fænomener og de jordiske aktiviteter i disse varsler. Derfor blev det nødvendigt for mesopotamiske astrologer at forudsige de astronomiske fænomener, så man med forskellige religiøse ritualer kunne forberede sig på gode eller dårlige hændelser. Dette gav anledning til kataloger af observationer af disse synodiske astronomiske begivenheder, som de græske astronomer fik indblik i. Grækerne var ikke kun interesserede i at lave varsler, men de ønskede også at forstå universet. Astrologer var også blevet astronomer.

Et af de vigtigste formål med de astronomiske observationer var at bestemme opbygningen af universet. De første naturfilosoffer, som ikke inddrog guderne i kosmologien, levede i græske bystater på den nuværende tyrkiske vestkyst, hvor det var geografisk oplagt, at de havde haft handelskontakt til civilisationerne i Mesopotamien og Ægypten. Der er også tydelige spor af mesopotamisk påvirkning i græsk tidsinddeling og

⁵Mere om den ægyptiske kalender i en kommende artikel.

⁶Synodiske perioder er tidsrummet mellem, at et astronomisk fænomen gentager sig selv – observeret fra Jorden. Et astronomisk fænomens sideriske periode er omløbstiden i forhold til fiksstjernerne, som f.eks. en planet tager for at udføre en hel tur omkring Solen. Den synodiske periode er længere, fordi Jorden også bevæger sig omkring Solen.

kalendere, men det vil ikke være overraskende, dersom grækerne har haft adgang til de mesopotamiske kataloger over observationer af planeter, sol- og måneformørkelser. Ifølge Herodot skulle Thales fra Milet have forudsagt en solformørkelse, hvilket han kun kunne have gjort, hvis han havde haft adgang til de astronomiske kataloger fra Mesopotamien. Vi ved desværre ikke meget om babylonsk kosmologi, og derfor er det svært at sige, hvilken indflydelse Mesopotamien har haft på græsk kosmologi. Babylonierne havde for eksempel ingen præferencer m.h.t. om universet var geocentriske eller heliocentriske, hvilket kom til at fylde en del hos grækerne.



Figur 8. En middelalderlig repræsentation af det fremherskende verdensbillede i antikken (t.v.) med tilføjelse af Paradisets have (t.h.). Det aristoteliske verdensbillede havde den uperfekte Jord i centrum, Solen, Månen og fem kendte planeter i kugleskaller. I den yderste kugleskal fandtes stjernerne, og uden for denne skal var gud eller gudernes domæne. I antikken var dette verdensbillede ét af mange muligheder, og grækerne har sikkert elsket at diskutere, hvilket verdensbillede der var det korrekte.

De fleste græske naturfilosoffer argumenterede typisk for et geocentriske univers, hvor alle himmellegemerne bevægede sig omkring Jorden, men der var også afvigelser fra dette synspunkt. Pythagoræerne mente for eksempel, at Solen var i centrum for det kendte univers. Noget tilsvarende mente den senere astronom og matematiker Aristarchos (ca. 310–230 f.Kr.), og han benyttede sit heliocentriske verdensbillede til at bestemme en afstand til Solen og Månen. Selvom der altså var astronomer og naturfilosoffer, som foretrak det heliocentriske verdensbillede, var det geocentriske verdensbillede det mest fremherskende, da man ikke kunne forestille sig, at afstandene til stjernerne var så store. På trods af, at vores viden om græsk astronomisk historie er større end vores viden om den babylonske, er størstedelen af perioden på cirka tusind år indhyllet i mørke, og der er blot nogle få lyspunkter. Vi kender ofte kun indirekte til de forskellige naturfilosoffer og deres teorier, da enkelte græske forfattere nævnte dem i deres få overleverede værker.

Det mekaniske univers

Antikythera-mekanismen har givet os indsigt i, hvordan grækerne forestillede sig universet. Regelmæssighederne i himmellegemernes bevægelse på nattehimmelen har givet anledning til, at de kunne repræsenteres med

tandhjul. Men hvilken teori ligger til grund for bevægelsen af Mekanismens himmellegemer? AMRP-gruppen mener, at det er sandsynligt, at Mekanismens indre planeter blev styret ud fra en ren epicyklisk teori, mens de ydre planeter krævede, at konstruktøren tog hensyn til, at selv i den geocentriske model kunne Jorden ikke være placeret præcis i centrum. I den eccentricke epicykliske teori var Jorden forskudt fra centrum, mens planeterne stadigvæk bevægede sig i en mindre cirkelbane omkring en større cirkelbane omkring Jorden som i en normal epicyklisk teori. Da det er begrænset, hvor mange tandhjul, vi kender til, er det også begrænset, hvad vi kan sige om, hvorledes teorien skal realiseres med tandhjul. Der er ikke enighed om, hvilke tandhjul og teorier, der ligger til grund for Mekanismens planetarium.

Selvom man ikke kan blive enige om det indvendige tandhjul, som skulle føre viserne rundt, kan man blive enige om det udvendige udseende. Michael Wright er således en af de få, som har lavet en velfungerende model i metal og træ. Brugen af Mekanismen ville slide på tandhjulene, og det er ikke utænkeligt, at den har været ændret med tiden. Måske er den ligefrem blevet føjet sammen af to andre dele, der hver især udgør forsiden og bagsiden af Mekanismen. Forskerne er enige om, at Mekanismen må være en del af en længere håndværkstradition i Grækenland. Hvis det modsatte er tilfældet, vil det svare til, at en urmager lavede et finmekanisk ur uden de mange års tidligere udvikling af ure.

I næste artikel vil jeg kigge nærmere på Mekanismens såkaldte bagside og Grækenlands mange kalendere.

Litteratur

- [1] Om Price på Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Derek_J._de_Solla_Price
- [2] Derek de Solla Price (1974) *Gears from the Greeks, Transaction of the American Philosophical Society*, bind 64, del 7.
- [3] Jo Marchant (2008) *Decoding the Heavens*, Windmill Books.
- [4] Nikolaos Kaltsas m.fl. (red.) (2012) *The Antikythera Shipwreck – the ship, the treasures, the mechanism*, Museum Catalogue.
- [5] Om Polynomial Texture Mapping, www.hpl.hp.com/research/ptm/
- [6] Alexander Jones (2017) *A Portable Cosmos*, Oxford University Press.
- [7] Om Enuma Anu Enlil på Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Enuma_Anu_Enlil



John Rosendal Nielsen er lektor ved Aurehøj Gymnasium, hvor han underviser i fysik. Han beskæftiger sig desuden med videnskabshistorie og kosmologi.