

Verdensbilleder

NV/AT-forløb
Rosborg Amtsgymnasium og Hf-kursus



© Michael Andrew Dolan Møller, 2005.
Alle tænkelige og utænkelige forbehold tages.
Der må frit kopieres fra denne tekst.
Forslag til rettelser og ændringer kan sendes til mm@rosborg-gym.dk.

Indhold

1. Den første naturvidenskab	2
Babylon/Mesopotamerne	2
Hvem var babylonerne?	2
Kileskrifttavler	3
Observationsmetoder	4
Konklusion	5
Opgave 1.1. Mars' og Venus' baner	6
Kilder og litteratur til videre studier	8
2. Den moderne naturvidenskabs fødsel	9
Tycho Brahe	9
Johannes Kepler	10
Den nye videnskab	12
Opgave 2.1. Marsbanen	14
3. Det moderne solsystem	17
Byggestenenes dannelse	17
Sammentræningen af Nebulaen	18
Dannelse af Solen	20
Dannelse af planeterne	20
Solsystemets ydre struktur	21
Oortskyen	21
Jupiterfamilien	22
Konklusion	24

1. Den første naturvidenskab

Babylon/Mesopotamien

Læseren undrer sig måske over hvorfor han/hun skal lære om det gamle Babylon i et naturvidenskabeligt forløb. Grunden er, at vores ældste skriftlige materiale stammer fra Babylon/Mesopotamien. De (europæiske) kulturer, som vi har kendskab til, er alle sammen fremkommet efter det gamle Babylon og rester fra denne kultur påvirker den dag i dag vores kultur. Den mesopotamske kultur spænder helt tilbage til ca. 6000 f. Kr. hvor de første landbrugskulturer opstod.

Læseren kan for eksempel blot tænke på vores tidssystem, hvor timen er inddelt i 60 minutter, som igen er inddelt i 60 sekunder. Dette er et direkte levn fra babylonernes 60-tals system. (Døgnets 24 timer stammer iøvrigt fra Egypten.)

Astronomernes, geografernes og søfolkenes koordinatsystemer stammer også fra det gamle Babylon.

Af større ting kan nævnes den astrologiske religion, de første kalendersystemer, som var og er så vigtige for landbruget samt de første astronomiske forudsigelser.

I de følgende sider vil vi fokusere på den babylonske astronomi, som jo direkte vedrører naturvidenskab, dvs. vi betragter perioden omkring 650 f. Kr til ca. 60 f. Kr.

Hvem var babylonerne?

Babylonerne var det nuværende Iraks forgængere, som levede i området mellem Eufrat og Tigris, hvor byen Babylon var hovedstaden. Se figur 1.1.

Babylonerne var et fastboende folkeslag i modsætning til for eksempel araberne, som var et nomadefolk. Dette gav dem en fordel i udviklingen af astronomien og dermed naturvidenskaben. De kunne nemlig observere himmelen fra samme sted til forskellige tidspunkter, og de havde således en chance for at systematisere. Dermed havde de en fordel i udviklingen af astronomien og naturvidenskaben.

De havde også en større interesse i at lære himmelen at kende, for da de var landbrugsfolk i modsætning til nomadefolk for eksempel, var det vigtigt at have en kalender, så landbruget kunne planlægge såning mv. Kender man stjernehimmelen (i det mindste Månens og Solens bevægelse) har man også et ur, så dem som kunne tyde himmelen blev automatisk vigtige for samfundet.

Efterhånden som kulturen blev udviklet blev datoer også vigtige for at holde styr på skattebetalingsdage og helligdage. (Kilde 3, 3.)

Babylonerne var fatalistisk indstillede mennesker ganske som mange andre oldtidsfolk var. (Nogle



Figur 1.1. Babylons placering på Verdenskortet. Kilde: www.keyway.ca.

nutidsmennesker er det også.) De fortolkede planeternes forudsigelige bevægelse henover himmelen på en religiøs måde, idet planeterne fik tildelt menneskelige og mirakuløse egenskaber.

En babylonier kendte iøvrigt ikke begrebet planet. Alle lysende prikker på himmelen blev kaldt stjerner, og de stjerner som ikke havde konstant placering på himmelfæren blev kaldt for vandrestjerner. Babylonerne antog, at ved at kende vandrestjernernes placering i forhold til hinanden, ville man få mulighed for at forudsige menneskers og landes fremtidige skæbner. Kort og godt udviklede de religionen, som vi kender under navnet *astrologi*. I modsætning til vore dages fortolkning af astrologien, var datidens astrologi kun for konger og højtstående ledere – senere blev den generaliseret til også at dække alle andre mennesker. (Kilde 3.)

Babylonerne holdt sig primært til den religiøse fortolkning. Dog havde de alligevel en form for verdensbillede. De antog Jorden for at være i centrum af det hele, og de kendte vandrestjerner (Månen, Solen, Merkur, Venus, Mars, Jupiter og Saturn) kredsede om Jorden i forskellige sfærer. En ide, som grækeren Ptolemaios senere arbejdede videre med, og som først blev forladt i renæssancen!

Det område hvor vandrestjernerne bevægede sig (zodiakken) blev inddelt i 12 stjernetegn, som fik forskellige egenskaber. Vi kender i dag de 12 stjernetegn som dyrekredsen. Du kender sikkert det stjernetegn, som du er 'født i.' Nedenfor kan du se, hvad stjernebillederne hed i Babylon, og hvad de hedder i dag.



Figur 1.2. Kileskriftstavle fra 87 f. Kr. Den beskriver fremkomsten af komet Halley. Kilde: www.crystalinks.com.

Dansk navn	Latinsk navn	Babylonisk navn	Billedsymbol	Placering ¹
Vædderen	Aries	hun	♈	$0^\circ \leq \lambda < 30^\circ$
Tyren	Taurus	múl	♉	$30^\circ \leq \lambda < 60^\circ$
Tvillingerne	Gemini	maš	♊	$60^\circ \leq \lambda < 90^\circ$
Krebsen	Cancer	kusú	♋	$90^\circ \leq \lambda < 120^\circ$
Løven	Leo	a	♌	$120^\circ \leq \lambda < 150^\circ$
Jomfruen	Virgo	absin	♍	$150^\circ \leq \lambda < 180^\circ$
Vægten	Libra	rín	♎	$180^\circ \leq \lambda < 210^\circ$
Skorpionen	Scorpius	gír	♏	$210^\circ \leq \lambda < 240^\circ$
Skytten	Sagittarius	pa	♐	$240^\circ \leq \lambda < 270^\circ$
Stenbukken	Capricornius	máš	♑	$270^\circ \leq \lambda < 300^\circ$
Vandmanden	Aquarius	gu	♒	$300^\circ \leq \lambda < 330^\circ$
Fisken	Pisces	zib	♓	$330^\circ \leq \lambda < 360^\circ$

Bemærk at rækkefølgen på himmelen er den samme som i dag – det er kun navnene, der har ændret sig. Det er et sikkert vidnesbyrd om, at babylonernes astrologi blev overtaget af egypterne og grækerne², som vi har vores astrologi fra.

¹ Babylonernes nulpunkt for længdegraden lå 5° før vores – pga et fænomen, som kaldes præcession.

² Grækerne accepterede dog den frie vilje, og det indkorporerede de i deres astrologi – så mennesket altså nu var i stand til at ændre sin egen skæbne.

Kileskrifttavler

Grunden til, at vi overhovedet ved noget om en for længst uddød kultur, er, at babylonerne havde udviklet et skriftsprog – kileskrift – hvor de skrev på lertavler, som blev brændt efter indskrivning. Derved fik man et særdeles holdbart eftermæle. Figur 1.2 viser en kileskriftstavle.

Disse tavler blev fundet i tusindvis af håndværkere, som ville bruge dem til byggeri, men heldigvis er mange bevaret for eftertiden. I dag har man fundet over 1700 tavler eller fragmenter heraf, som handler direkte om astronomi. (Kilde 6, 15.) Tavlerne har registreret observationer så langt tilbage som 1700 f. Kr, selvom den ældst kendte tavle 'kun' er fra ca. 651 f. Kr.

Foruden astronomiske observationstabeller har tavlerne bl. a. indeholdt regnskaber, matematiske opgaver, madpriser, vandstandshøjder, vejrforhold og lokale historiske fortællinger.

Det er anslået, at kun 10% af alle tavler er fundet endnu, så muligvis kommer fremtiden til at fortælle os meget mere om denne civilisation.

Observationsmetoder

Ifølge forskeren B. L. van der Waerden (Kilde 4) havde babylonerne kun det blotte øje samt nogle primitive vandure til rådighed, når de skulle observere. Det er jo lidt af en påstand, men eftersom kileskrifttavlerne ikke har beskrevet nogle observationsredskaber, og eftersom arkæologerne ikke har fundet nogle observationsredskaber, er det en nærliggende tanke.

Dog var babylonerne dygtige håndværkere – læseren kender sikkert til den gammeltestamentlige beretning om Babelstårnet - babylonerne kaldte den slags tårne for zigguratter. (Kilde 5, 90-91.) Et af de højeste var ihvertfald 90 meter højt, hvilket har krævet en vis form for brug af arbejdsredskaber herunder vinkelmålingsinstrumenter. Derfor lyder det måske lidt sært, at astrologerne/astronomerne ikke i det mindste har benyttet sig af nogle simple vinkelmålere.

Uanset hvordan de observerede, kunne de lave nogle meget gode forudsigelser af Sol- og måneformørkelser, og de kunne bestemme planeternes position ganske præcist. Grunden til, at det lykkedes så godt for babylonerne, var, at de havde observationer målt over hundredvis af år. Derved ville fejl i positions- og tidsbestemmelser midle ud. Denne målemetode benytter man sig af den dag i dag. Læseren har sikkert, på lærerens opfordring, i et fysiklaboratorium måtte gentage det samme forsøg igen og igen, så man kan ende med et fint gennemsnit.

Babylonerne anførte deres måledata på følgende måde:

Stjernetegn, vinkel: zib 10° , 15 , 30 hvilket svarer til $(10+15/60+30/3600)^{\circ}$ inde i fisken = $10,2583^{\circ}$ inde i fisken. Dvs. længdegraden er $340,2583^{\circ}$ målt fra forårspunktet³. (Se tabel på foregående side.)

³ Forårspunktet er det (fiktive) punkt på himmelen hvor Solens bane krydser himmelens ækvator om foråret. Eller sagt



Figur 1.3. En stentavle fra ca. 600 f. Kr., der viser Babylons placering på Jorden. (Rektangel.) Floderne Eufrat og Tigris er markeret med lodrette streger, og nabokongedømmer er markerede med små cirkler. Jorden er en rund kreds, og der er et ocean rundt om Jorden. **Kilde:** se figur 1.2.

Alle observationerne skulle så behandles i en matematisk model. Babylonerne havde to modeller, system A og system B, som byggede på zig-zagfunktioner og stepfunktioner. Egentligt burde de bruge trigonometriske funktioner, som du lærer om i matematik senere i år, men disse funktioner var ikke opfundet endnu. Det vil komme for vidt at gennemgå de to systemer her, men interesserede kan læse mere i for eksempel kilde 2 og 3.

Konklusion

Babylonerne inddelte området hvor planeterne bevæger sig i 12 områder à 30 grader, de målte positioner på himmellegemer, og de benyttede positionerne til at forudse astronomiske fænomener.

Derudover konstruerede de horoskoper ved hjælp af planetpositionerne, og de kunne bruge deres observationer som præcise kalendre.

De konstruerede ikke noget regulært verdensbillede, dvs. de forsøgte ikke at forstå Verden/Solsystemet ud fra en fysisk model. Måske var deres religiøse verdensbillede nok for dem. Alligevel etablerede de videnskaben astronomi på en systematisk form, og derudfra udviklede resten af naturvidenskaben sig.

På forunderlig vis var det netop astronomien, som adskillige tusinde år senere ændrede verden fra middelaldertankegang til moderne tankegang. Det skete med Tycho Brahe som ophavsmand, og det kan du læse mere om i næste afsnit.

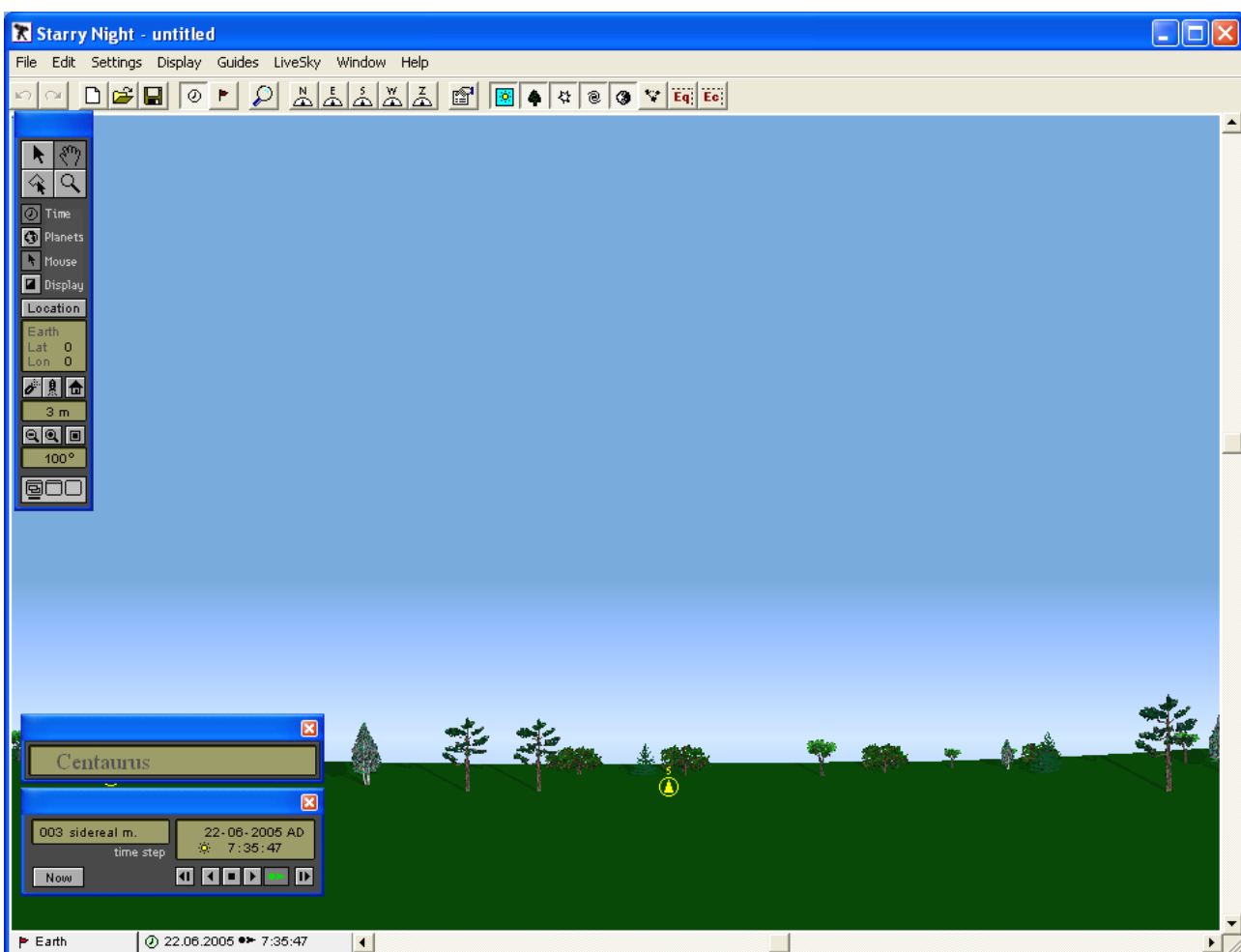
Opgave 1.1. Mars' og Venus' baner

Planeternes baner kan set fra Jorden danne ret sære baner på himmelen.

Babylonerne kunne godt forudsige Marsbanen, og det skyldes sandsynligvis at de konstruerede deres beregningsapparat udfra netop Marsbanen.

For at du kan få et indblik i Mars-banen, skal du anvende planetarieprogrammet Starry Night til at 'observere' Mars på samme tidspunkt hver aften i en periode på et år. Programmet kan du finde på skolens computere på stien **Programmer-Fagprogrammer-Naturvidenskab-Astronomi-Starry Night Bundle-Starry Night Bundle Edition 2.1**.

Når du åbner programmet får du nedenstående skærbillede.



Øverst på skærbilledet kan du søge efter objekter ved at trykke på lup-symbolet. Du kan også fjerne Jorden, så du kan observere objekter, der ligger under horisonten, og endelig kan du slukke for Solen, så det bliver mørkt nok til at se stjernerne.

Hvis du placerer musen på en af knapperne, fremkommer et ord, der beskriver hvad knappen gør.

Nederst til venstre kan du trykke på tidssteppet, som er sat til 3 minutter. Ved at klikke på *003* kan du ændre tidssteppet, og ved at trykke på *minutes* kan du ændre til sekunder, timer, dage osv.

a) Benyt søgefunktionen til at finde Mars. Når du har fundet den, så sørg for at zoome ud, så Mars

kun ligner en lille rød prik. (Zoom-knapperne findes til venstre på skærmen. De ligner små lupper.)

- b) Ændr nu tidssteppet til 24 timer eller endnu bedre – 1 siderisk døgn. (Et siderisk døgn er et døgn målt i forhold til stjernerne. I modsætning til et tropisk døgn, som måles i forhold til Solen. De er ikke ens, da Jorden kredser om Solen i sin bane.)
- c) Vælg datoen 20/7-2007. Her står Mars netop op. (Sluk for Solen.)
- d) Tryk nu gentagne gange (gerne mere end 150 gange) på knappen ”Single step forward in time.” Den kan du finde nederst til højre i panelet med tider. Skitser Marsbanens bevægelse på et stykke papir. (Brug stjernebillederne som baggrund. Starry Night kan tegne dem for dig, hvis du ikke kender dem.)
- e) Prøv at trykke på play-knappen, så du kan se Mars' bevægelse over flere år.
- f) Prøv at forklare hvorfor banen har den form, den har.
- g) Gentag opgaven men nu med Venus.

I næste afsnit kommer du til at bestemme Mars' bane ved hjælp af observationer foretaget af Tycho Brahe.

Kilder og litteratur til videre studier

1. Asger Aaboe, Babylonian Astronomy, Yale University. Ikke publiceret.
2. K. P. Moesgaard, Matematisk astronomi i det gamle Babylon, noter.
3. Jørgen Milert Møller, Babylonsk og græsk astronomi. Speciale 1965. Århus Universitet.
4. B. L. van der Waerden, The date of Invention of Babylonian Planetary Theory. Archive for History og Exact Sciences vol. **5**, 1968, pp. 70-78.
5. F. Richard Stevenson, Astronomical Records from ancient Babylon. Endavour N. S. vol. **10**, 1. 1986 pp. 90-96.
6. Asger Aaboe, Observation and Theory in Babylonian Astronomy, Centaurus 24, **14**, 1980 pp. 14-34.
7. Abraham Sachs, Babylonian Observational Astronomy, Phil. Trans. Royal Society London, A **276**, 1974 pp. 43-50. Særtryk.
8. Otto Neugebauer, The exact Sciences in Antiquity, Harper Torchbooks 1962.
9. G. J. Toomer, Ptolemy's Almagest, London 1984.
10. K. Becher & M. Feiertag, Astronomy & the Ancients, Cambridge 1984.
11. Bibelen.
12. Thorkild Ramskou, Solstenen, København 1969.

2. Den moderne naturvidenskabs fødsel

Tycho Brahe/Thyge Brahe

Thyge Brahe (på latin: Tycho Brahe, 1546-1601) var, nok uden at vide det, en af hovedmændene bag den idemæssige revolution, som skete i renæssancen. Hans indgang til naturen var observationer, og de kunne aldrig blive præcise nok. Derfor udviklede han flere instrumenter til at forbedre datidens astronomiske tabeller. Problemerne med observationerne opdagede han i 1563, da han observerede en konjunktion (møde) mellem Jupiter og Saturn. Hans observationstidspunkt passede ikke med de aktuelle tabeller, og derfor satte han sig for at forbedre dem.



Figur 2.1. Tycho Brahe i 1586.

I 1572 observerede Brahe en supernovaeksplosion i stjernebilledet Cassiopeja. Ved at måle stjerneeksplosionens position med hidtil uset nøjagtighed kunne han ved hjælp af den såkaldte parallakse-effekt⁴ konstatere, at eksplosionen foregik længere væk end Månen. Dermed havde han pilleret ved datidens kundskab om Solsystemets (og dermed Universets) størrelse. Mere vigtigt kunne han konstatere, at Universet heller ikke var statisk. En fundamentalt anderledes ide, som var med til at danne fundamentet for renæssancens paradigmeskift.

I 1576 kom Tycho Brahe populært sagt på finansloven. Kong Frederik II gav Brahe omkring 4% af statsbudgettet, så Brahe kunne bygge et observatorium på øen Hven. (Nu en del af Sverige.) Uraniborg, som observatoriet kom til at hedde, var udstyret med datidens high tech udstyr; for eksempel var der store sekstanter og kvadranter samt armillarsfærer til vinkelbestemmelser og der var præcise ure. Se figur 2.2. Med dette udstyr kunne han bestemme stjerners og planeters positioner med en nøjagtighed på et bueminut. (1/60 grad.) Alt udstyr er iøvrigt beskrevet i *Astronomiae instauratae Mechanica* fra 1598.



Figur 2.2. En model af Tycho Brahes Ækvatoreale Armilleinstrument med en hel- og en halv ring.

Ved hjælp af sit observationsudstyr kunne han blandt andet slutte, at kometen fra 1577 kredsede om Solen og var længere væk end Venus. Førhen troede man, at kometer var lokale atmosfæriske fænomener.

Denne opdagelse var også ganske revolutionerende, da man på dette tidspunkt troede, at alle objekter kredsede om Jorden. Selv kirken havde adopteret denne fejlagtige tanke fra oldgrækeren Aristoteles, og du kender måske historien om hvor slemt det gik Galilei (og andre), da han gik imod kirkens lære.

I dag har kirken ikke så stor magt, og især den katolske kirke har lært af historien. Nu holder den sig mere til de teologiske spørgsmål og vælger ikke side i naturvidenskaben.

I 1596 døde Frederik den II, og dermed forsvandt bevillingen til Tycho Brahe. Han rejste derfor i

⁴ Parallakse-effekten er, at nære stjerners tilsyneladende position på himmelen varierer i årets løb. Dette fænomen skyldes, at Jorden bevæger sig i sin bane omkring Solen. Effekten er kun mulig at måle ved hjælp af store kikkerter.

1599 til Benatky-slottet ved Prag, hvor han blev hofastronom/hofastrolog hos Kejser Rudolph II.

Før turen til Prag konstruerede Tycho et verdensbillede, som var videnskabeligt funderet. (I modsætning til det gammeldags aristoteliske verdensbillede, som var religiøst funderet.) Tychos verdensbillede var opbygget så Jorden var i centrum af Universet, og Solen og Månen kredsede om Jorden. Alle planeter og kometer kredsede derimod om Solen, mens alle stjernerne sad fast. Se figur 2.3. For læseren virker det måske som en lidt underlig model, men Tycho Brahes observationer viste, at stjernerne ikke bevægede sig i forhold til Jorden, og dermed *måtte* Jorden stå stille ifølge hans fortolkning. (Han kunne ikke forestille sig, at stjernerne er så langt væk som de er, og at det er derfor han ikke kunne måle deres parallakser.)

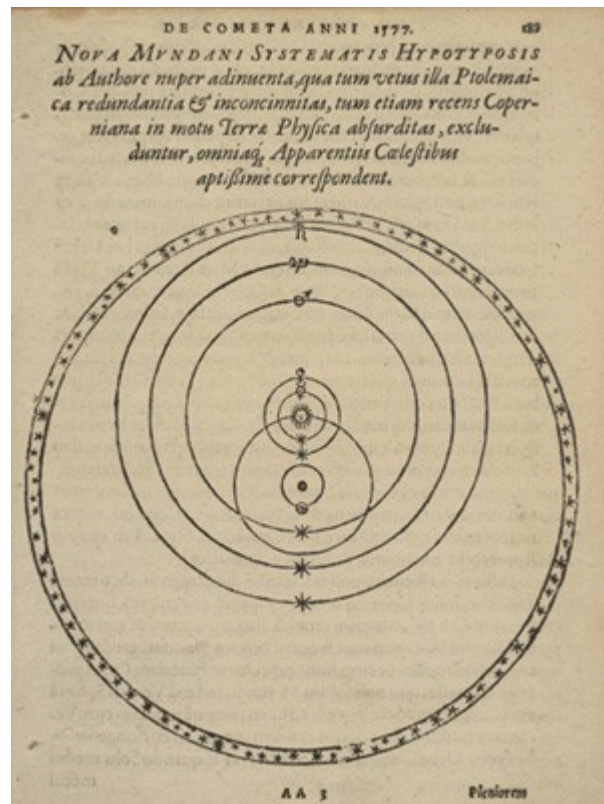
Når nu Tycho Brahe havde opdaget, at også kometerne kredsede om Solen, kan man undre sig over, at netop Jorden skulle indtage en særstilling blandt planeterne, men hans holdning til dette er formentlig også religiøst begrundet. Han havde jo heller ikke kikkerter til rådighed, så han stod i en umulig position, når det kom til at måle parallakser.

Set med nutidens øjne drog Tycho Brahe en forkert konklusion af sine observationer, og hans verdensbillede blev ikke andet end en parentes i verdenshistorien. Til gengæld var hans arbejdsmetoder med mere og mere nøjagtige observationer grundlaget for hele den naturvidenskabelige revolution, som har ændret verden uendeligt meget mere i de sidste 400 år end i hele menneskets forhistorie.

Desværre levede Tycho Brahe ikke længere end til 1601, men heldigvis var Johannes Kepler ankommet til Prag i 1600, hvor han blev assistent for Brahe. Kepler var en fremragende matematiker, og med ham blev Brahes arbejde bevaret for eftertiden. Han skulle i de kommende år selv drage stor nytte af Tychos nøjagtige observationer. Det kan du læse mere om nedenfor.

Johannes Kepler

Den tyske astronom og matematiker, Johannes Kepler (1571-1630), troede i modsætning til mange andre, at Solen måtte være det naturlige centrum i Solsystemet. Denne ide havde Kepler sandsynligvis fået af sin matematik/astronomilærer, Michael Maestlin, som troede stærkt på Copernikus' *heliocentriske* teori. Copernikus' teori gik kort fortalt ud på, at beskrive planeterne som kredsende på epicykler, fastspændt på cirkler med Solen i centrum. Se figur 2.5 og 2.7.



Figur 2.3. Tycho Brahes verdensbillede fra 1588.

Kepler kom i 1600 til Prag på flugt fra Tyskland, hvor Kepler var forfulgt pga. sin protestantiske tro, hvor han sammen med Tycho Brahe arbejdede som hofastronom/astrolog for Kejser Rudolph II. Dette samarbejde varede dog kun et år, da Brahe døde i 1601.

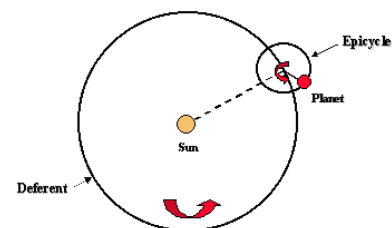


Figur 2.4. Johannes Kepler. Kilde: <http://www.hkr.se/web-mna/stud/stud97/steget/kepler.htm>

Tycho Brahe havde i årene inden samarbejdet med Johannes Kepler foretaget tidens bedste observationer på både stjerner og planeter, og dette arbejde kom Kepler til hjælp. I perioden 1600 til 1619 arbejdede Kepler især med at forstå Marsbanen. Dette var heldigt, da netop Marsbanen har den største eccentricitet⁵ af alle planeterne, hvis man lige ser bort fra den svært observerbare Merkur samt den dengang uopdagede planet Pluto. Fordi eccentriciteten for Marsbanen er så stor, som den er, kunne Kepler ikke få de målte positioner til at stemme overens med Copernikus' teoretiske beregninger. Han endte med at konkludere, at Marsbanens bevægelse bedst kunne beskrives ved en *ellipse* med Solen i det ene brændpunkt.

Denne opdagelse var nærmest revolutionær, for lige siden antikken havde man antaget, at himmellegemers bevægelse skulle beskrives ved cirkler. Grækerne havde ment, at gudernes bevægelse, dvs. Solen, planeterne og Månen, kun kunne være perfekte, og en cirkelbevægelse var det mest perfekte, man kendte. Man undres måske over, at et såkaldt kristent Europa var fikseret af en græsk/hedensk ide, men hellenismen har blandt andet via Romerkirken influeret voldsomt på hvordan europæiske folk tænkte. (Og tænker.)

Basic Copernican System

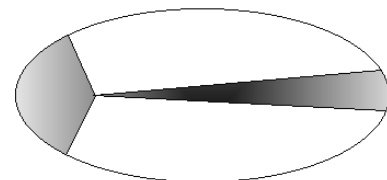


Figur 2.5. Sol i centrum, deferent og epicykel. Kilde: <http://www.science.gmu.edu/~hgeller/>

I de efterfølgende år lykkedes det Kepler at påvise, at de andre planeter også bevæger sig i ellipsebaner og i 1609 kunne han offentliggøre sit resultat i skriftet *Astronomia Nova*:

Keplers 1. lov: Planeterne bevæger sig i ellipsebaner omkring Solen med Solen i det ene brændpunkt.

Kepler var dog ikke færdig. Han forsøgte at give en *fysisk* begrundelse for den nyopdagede sammenhæng - førhen var modellerne rent matematiske. Han indførte en form for kraftbegreb og antog, at kraften på planeten afhænger **omvendt proportionalt med afstanden til Solen**. (Dvs: Fordobles afstanden mellem Sol og planet, halveres kraften.) Dette var en forkert tese, men det lykkedes ham dog alligevel at vise en sammenhæng mellem det areal en planets radiusvektor overstrøget og tiden, det tager. Resultatet (i øvrigt sammen med Keplers 1. lov) blev offentliggjort i *Astronomia Nova*.



Figur 2.6. En illustration af de overstrøgne arealer i samme tidsrum for en planets bevægelse. Arealerne skal forestille at være lige store.

⁵ Eccentricitet fortæller noget om banens afvigelse fra cirkelbanen. Den varierer mellem 0 for den rene cirkelbevægelse til 1 for den totalt udstrakte ellipsebevægelse. (Se evt. afsnittet om ellipser.)

Keplers 2. lov: Radiusvektor, dvs. en imaginær linie forbindende Solen og planeten, overstryger ens arealer i samme tidsrum. Se figur 2.6.

Han kunne altså vise, at planeten har mest fart på inde ved Solen. I årene op til 1619 lykkedes det Kepler at koble planeternes omløbshastigheder ved aphelion⁶ og perihelion⁷ sammen med musikskalaen(!) og resultatet er, som skrevet står i *Harmonices Mundi*:

Keplers 3. lov: Kvadratet på omløbstiden divideret med middelfstanden til Solen i tredje potens er lig en konstant. (Middelfstanden er også den halve storakse i ellipsebanen.)

Ovenstående indikerer måske svagt, at Keplers tankegang var baseret på ideen om, at alt i Universet skulle være smukt og harmonisk lige fra musikskalaer til opbygningen af Universet. Denne ide fik Kepler bl.a. fra sin dybt religiøse kristne overbevisning. Ligeledes afviste han store dele af astrologiens lære, da den ikke kan afpasses med Bibelens lære. At han alligevel udarbejdede horoskoper i forbindelse med sit daglige arbejde er en anden sag. (Det skal dog retfærdigvis tilføjes, at han mente, at der var enkelte ting ved astrologien, som var gode nok – det vil føre for vidt her at komme ind på hvad.)

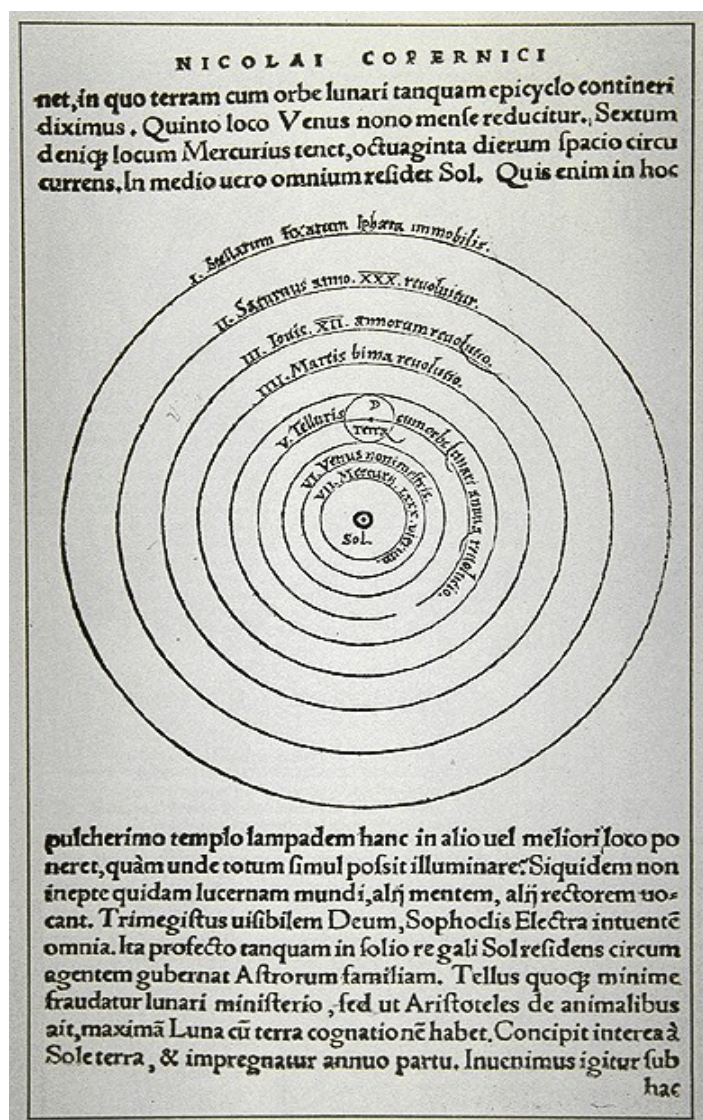
Johannes Keplers love lyder måske ikke så vigtige, men i realiteten var Keplers teori en af hjørnestenene i det arbejde, som Isaac Newton senere lavede. Newton benyttede blandt andet Keplers love til at konstruere sin gravitationslov, og med denne nøjagtige kraftbeskrivelse, som blev offentliggjort i 1687 i værket *Principia Mathematica*, var banen lagt for en ny måde at betragte verden på. Med denne teori havde man nu det teoretiske fundament for at beregne ikke blot planeters og kometers baner men også nutidens satellitbaner og rumrejser.

Den nye videnskab

Tycho Brahes, Johannes Kepler og naturligvis også Galileo Galileis måde at tænke og arbejde på, var fundamentalt forskellig fra den måde mennesket tidligere i historien havde forsøgt at forstå Verden på.

⁶ Planetes placering når den er fjernest Solen.

⁷ Planetens placering når den er nærmest Solen.



Figur 2.7. Copernikus' model af Solsystemet. Kilde: http://es.rice.edu/ES/humsoc/Galileo/Images/Astro/Conceptions/copernican_universe.gif

I de foregående ca. 2000 år havde lærde folk læst og fortolket Aristoteles' skrifter uden at foretage eksperimenter og forsøg. Dermed havde de berøvet sig selv muligheden for at få en forbedret indsigt i naturen.

Et er at man ikke forstod hvordan naturens verden hang sammen, men konsekvenserne var enorme for hele samfundet:

Lægevidenskaben kunne ikke udvikle sig uden forsøg. Ingeniørvidenskaben stod i stampe, hvilket fastholdt hele Europa og verden i en tilstand af fattigdom med de deraf følgende konsekvenser. (Pestepidemier og hungersnød for eksempel.)

Kunst og litteratur kunne ikke udvikle sig optimalt, da kun de rigeste havde overskud til at beskæftige sig med disse ting.

Mennesket kunne nemmere holdes i et jerngreb af magthaverne, da det var uoplyst.

Med den nye tankegang (paradigmeskiftet), som blev etableret af blandt andet Brahe, Kepler og Newton var grundlaget skabt for alle de landvindinger, som renæssancen og de efterfølgende århundreder blev vidne til. Naturligvis kunne ingen på den tid forudse de enorme ændringer den kommende tid skulle indeholde – sådan er det jo altid, når man står midt i forandringerne, men i dag kan vi se tilbage og konstatere at Brahe, Kepler og Galilei ændrede hele verden, og at det hele startede på Hven med nogle – i vore øjne – simple træinstrumenter og en nysgerrig dansk astronom.

Verdensbilledet fra renæssancen var dog ikke den færdige model af Universet. Nedenfor kan du læse, hvor langt vi er kommet med en mere omfattende og forhåbentlig mere præcis Verdensforståelse.

Opgave 2.1. Marsbanen. (Tekst fra Orbit 2 cd-rom.)

I denne opgave vil vi konstruere Mars bane omkring Solen, på samme måde som Kepler gjorde det ud fra Tycho Brahes observationer i starten af 1600-tallet.

Datidens astronomer var delt i flere lejre. Nogle mente sammen med den katolske kirke, at Jorden var centrum i universet, og at planeterne - og Solen - cirklede omkring Jorden i enten jævne cirkelbevægelser eller i *epicykelbevægelser*⁸. Andre mente, at Kopernikus måtte have ret i sin nye teori, at Jorden og de andre planeter cirklede om Solen, men stadig i jævne cirkel- eller epicykelbevægelser. Tycho Brahe havde sin egen teori, der var en mellemting mellem de to andre. Han mente - ud fra sine observationer - at kunne bevise, at Jorden var centrum, og at Solen cirklede omkring Jorden, men at de andre planeter, herunder Mars, cirklede omkring Solen. Og så var der den unge *Kepler*. Han mente som Kopernikus, at Jorden cirklede omkring Solen, men han mente ikke, at banerne nødvendigvis var cirkel- eller epicykelbaner. Især hans studier af Mars bane førte ham til den teori, at planeternes baner var ellipser og at de opfyldte 3 love, i dag kendt som "Keplers love for planetbanerne".

Kepler vidste fra tidligere observationer, at det tog Mars 687 døgn at gennemløbe 1 omløb om Solen i forhold til stjernerne. For Jorden tager 1 omløb 365 døgn og 2 omløb 730 døgn. Hvis derfor Mars observeres et sted i sin bane, vidste han, at det ville tage 687 døgn, før den var samme sted, selvom den fra Jorden ikke så ud til at være samme sted på himlen (se omstående figur). Ved at tegne positioner og retningslinjer på en skitse af solsystemet, kunne Kepler ved hjælp af en såkaldt *triangulering* bestemme marsbanens form. Men det krævede, at han havde nøjagtige positioner af Mars position på himlen med præcist 687 døgn mellemrum. Her kom Tycho Brahes observationer, de nyeste og mest præcise på den tid, "som sendt fra himlen". Dog måtte Kepler for enkelte af dem *interpolere* sig frem til positioner med det nøjagtige tidsinterval.

I tabellen nedenfor ser vi nogle af de observationer, som Kepler anvendte til at bestemme marsbanens form. Tabellen angiver datoen for observationen, Jordens position i solsystemet (den Heliocentriske længdegrad - i grader og bueminutter⁹ fra forårspunktet), samt Mars position på himlen, set fra Jorden (den Geocentriske længdegrad - også i grader og bueminutter fra forårspunktet). Kontroller, at der er 687 døgn mellem de parvise observationer.

	Dato	Jordens længdegrad (Heliocentrisk)	Mars længdegrad (Geocentrisk)
1a	17/2-1585	159°23'	135°12'
1b	5/1-1587	115°21'	182°08'
2a	10/3-1585	179°41'	131°48'
2b	26/1-1587	136°06'	184°42'
3a	28/3-1587	196°50'	168°12'
3b	12/2-1589	153°42'	218°48'
4a	19/9-1591	5°47'	284°18'
4b	6/8-1593	323°26'	346°56'
5a	7/12-1593	85°53'	3°04'
5b	25/10-1595	41°42'	49°42'

Følg *omhyggeligt* fremgangsmåden herunder og bestem Marsbanens form.

⁸ Epicykler er 'cirkler på cirkler'. Dvs. planetbaner kunne til en vis grad beskrives ved hjælp af cirkelbevægelser.

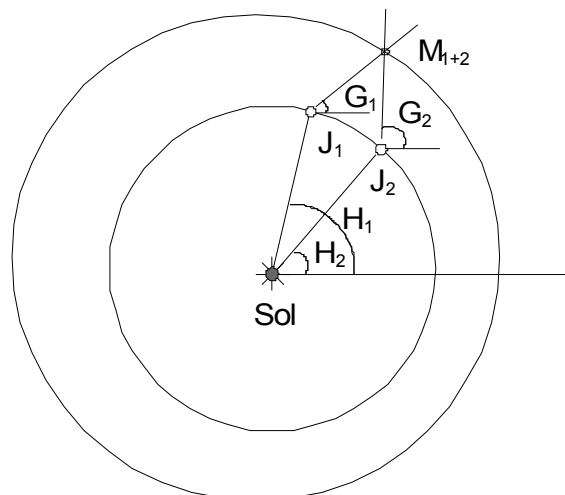
⁹ 1 bueminut = 1' = 1°/60.

Fremgangsmåde

Til denne øvelse skal vi bruge mm-papir, en spids blyant, en passer, en lineal, en vinkelmåler, samt knappenåle og sytråd (til at tegne ellipsen).

På midten af mm-papiret tegner vi en cirkel med en radius på 5 cm. Fra midten og mod højre tegner vi en lang lige streg. Cirklen angiver Jordens bane, som er næsten cirkelformet, med Solen i centrum. Linien mod højre angiver retningen mod forårspunktet (i stjernetegnet *Vædderen*), hvorfra vi måler alle vinkler *mod uret*.

Afsæt, ved hjælp af vinkelmåleren de parvise positioner for Jorden på dens bane, J_{1a} og J_{1b} ud fra vinklerne H_{1a} og H_{1b} i tabellen. Marker derefter retningerne til Mars i hver af Jordens positioner, ved hjælp af vinklerne G_{1a} og G_{1b} , afsat med Jorden som centrum og med 0° langs retningen til forårspunktet (parallel med linien). Tegn tynde streger fra Jorden langs retningerne til Mars, og forlæng dem til parvis skæring. Mars vil da befinde sig i skæringspunktet, M_{1+2} , mellem de to linier.



Konstruktion af banen

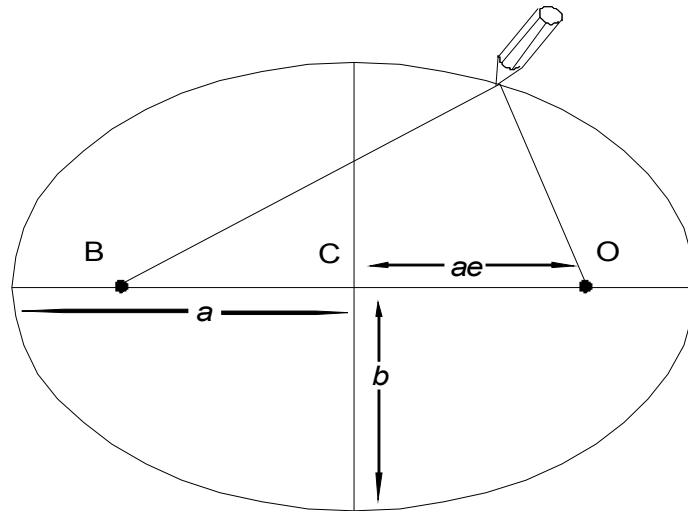
Kepler antog, at observationerne 4a-4b samt 1a-1b gav Marsbanens perihelion P og aphelion A (mindste og største afstand til Solen). Tegn en linie gennem P og A og find midterpunktet C mellem disse positioner. Tegn så en cirkel gennem positionerne med dette punkt som centrum. Denne angiver en 1. tilnærmelse til Mars bane. Vi vil nu vise, at en ellipse approksimerer banen endnu bedre.

En ellipse angives ved en storakse a en lilleakse b og en excentricitet e . Storaksen kan findes som halvdelen af afstanden mellem perihel- og aphelpunktet (radius i den ovennævnte cirkel). Linjen gennem P og A angiver storaksen. Excentriciteten kan findes som forholdet mellem afstanden fra Solen til C og storaksen. Altså

$$e = \frac{OC}{a}$$

Endelig kan vi beregne lilleaksen som

$$b = \sqrt{(1 - e^2) \cdot a^2}$$



Mål med linealen længderne AP og OC og beregn størrelserne a , b og e . Omregn a og b til astronomiske enheder (1 AE = 5 cm).

Ellipsens andet brændpunkt, B, befinder sig i et punkt på linjen AP på den anden side af C i samme afstand som O. Find dette punkt. Anbring papiret på en papplade (eller en blød masonitplade) og sæt knappenålene i banens to brændpunkter. Læg et stykke snor omkring de to knappenåle og blyantspidsen, og stram den ud til den lige netop kan nå ud til A hhv. P. Tegn nu hver halvdel af ellipsen, idet snoren hele tiden holdes udstrakt medens den glider på blyantspidsen og knappenålene (snoren må ikke være elastisk, så længden kan ændres undervejs). Undersøg om ellipsen giver en bedre tilnærmelse til banepunkterne.

Find den mindste og den største afstand mellem Jorden og Mars (i AE). Hvor lang tid går der mellem to observationer, hvor Jorden og Mars er nærmest?

3. Det moderne Solsystem

Efter det lykkedes for Kepler at beskrive planetbevægelserne i Solsystemet, var opgaverne for eftertiden at finde de korrekte længdemål¹⁰ og at finde ud af hvordan Solsystemet blev dannet. Denne formidable opgave blev blandt andet (foreløbig) løst ved at Newton udviklede mekanikken på baggrund af Keplers resultater. (Publiceret i 1687.) Især Newtons gravitationslov $F = \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2}$

hvor M er Solens masse, m er en planets masse, r er afstanden mellem planet og Sol og gravitationskonstanten $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ kunne bruges til at forstå bevægelsen af objekterne i Solsystemet. F er gravitationskraften, som er den kraft, der holder planeten i sin bane omkring Solen. Loven kunne også bruges til at komme med forslag til dannelsesscenarier.

Med fremkomsten af computere blev det ydermere muligt at foretage numeriske simuleringer på problemer, som det hidtil have været umuligt at regne ud analytisk. Tiden har vist at computeren og den øvrige teknologiske udvikling i form af forbedrede kikkerter, rumteleskoper og ccd-detektoren har haft enorm indflydelse på vores forståelse af Solsystemet dannelse, og i dag har vi endda et bud på hvordan hele Universet blev skabt og hvordan det vil udvikle sig i fremtiden.

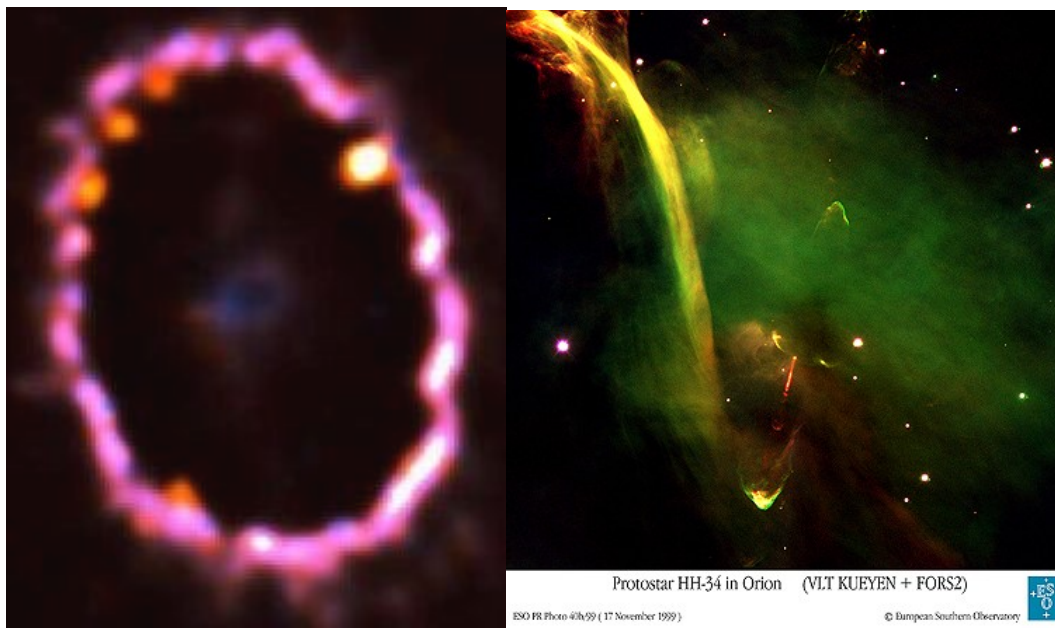
Nedenfor kan du læse, vores nye version over Solsystemets dannelse.

Byggestenenes dannelse

Solsystemet består af grundstofferne fra brint til uran. En total liste kan man for eksempel aflæse i et periodesystem. Tungere grundstoffer har sikkert eksisteret i den sky, *Nebulaen*, som fandtes før Solen, planeterne og alle de andre objekter blev dannet. Disse grundstoffer er dog radioaktive med relativt korte halveringstider, så de er alle forsvundet nu. (Nu findes de igen i Solsystemet, da vi har lavet dem i laboratorier og kernekraftværker.)¹¹

¹⁰ En metode til at bestemme en afstand – nemlig afstanden til Venus på en geometrisk måde, kan du se her: <http://www.ags.dk/as/venus/ven-dist.htm>

¹¹ Nogle af de mindre tunge grundstoffer findes dog normalt heller ikke i naturen. For eksempel blev Technetium første gang i 1937 skabt af Emilio Segré, da han og andre arbejdede med USA's første atombombe. Segrés mor blev myrdet af nazisterne i 1943 og faderen døde i 1944. Emilio strøede lidt technetium på faderens grav efter krigen og han udtalte: "Radioaktiviteten var forsvindende, men med dens halveringstid på hundredtusindvis af år vil den holde meget længere end noget andet monument, jeg kunne byde på." Så i dag findes Technetium i naturen. (Det findes også i Danmark i dag, da atomopbejdningsanlægget, Sellafield, i England er utæt.)



Figur 3.1a) Billede af supernovarest, som kan feje gas sammen. Gassen er i øvrigt 10MK varm. **Kilde: P. Challis and R. Kirshner, (Harvard), P. Garnavich (Univ. Notre Dame).** <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap000217.html>

b) Billede af protosol med støvskive og to jets, der kommer, når gas støder ind i protosolen. Den lange lodrette stribe til venstre, er der endnu ingen, der har givet en fornuftig forklaring på. **Kilde: <http://www.eso.org/outreach/press-rel/1999/pr-17-99.html>**

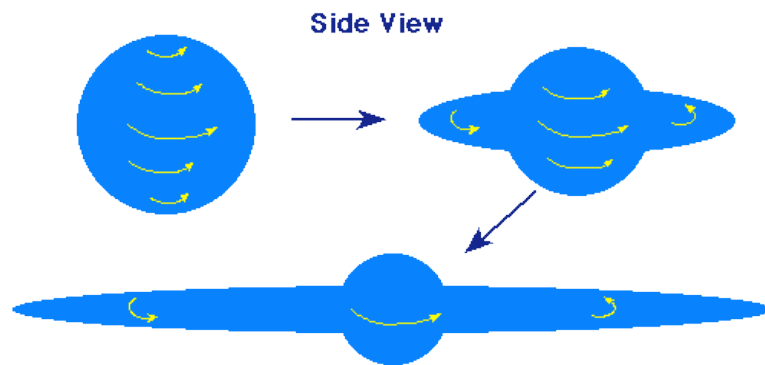
Nebulaen, som Solsystemet blev dannet af, er selv dannet af døde stjerner. Hvis nogle stjerner i den nuværende Sols omegn døde, blev der udsendt gas og støv, som var beriget med tungere grundstoffer – dvs. grundstoffer, som var tungere end helium. Mængden var ganske lille, 2-3%, men altså stor nok til at bl.a. Jorden kunne blive dannet. Nebulaen indeholdt omkring 74% brint og 24% helium foruden den lille mængde af tungere grundstoffer. I kapitel 6 i MMs astronominoter kan du læse om, hvordan grundstofferne bliver dannet i stjernerne samt i supernovaeksplosionerne.

Sammentrækningen af Nebulaen

Nebulaen har oprindeligt været en stor tynd gas- og støvsky, som har roteret svagt. Den har ligget i rummet og passet sig selv i et ukendt antal år. Den har været i såkaldt termisk ligevægt, dvs. gas- og støvpartiklernes termiske bevægelser har kunnet modstå tyngdekraften. Temperaturen af skyen har været omkring 10K. På et eller andet tidspunkt for ca. 4,6 milliarder år siden har en supernovaeksplosion fra en nærtliggende stjerne kastet en masse gas og støv ud i rummet og noget af den gas og støv, har kunnet feje en så stor mængde gas sammen, at den har kunne klappe sammen under tyngdekraftens påvirkning. På figur 3.1 kan man se hvordan en supernovaeksplosion kan feje gas sammen.

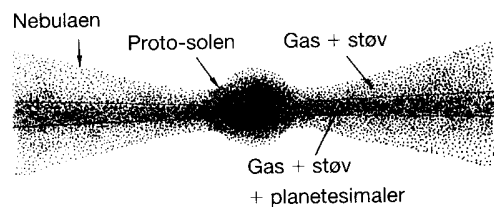
Når Nebulaen begynder at klappe sammen er det umiddelbart fristende at tro, at gassen bare ville trække sig sammen til en endnu mindre sky, men det viser sig, at der er en fysisk størrelse, *impulsmomentet*, der er bevaret. (Det er ikke kun energien, der er bevaret i isolerede systemer.) Hvis man forstår impulsmomentbegrebet, vil man kunne forstå, at ikke alt masse kan forsvinde ind i centrum af Nebulaen. Derfor vil vi i det følgende se lidt på den størrelse.

Betragt en sfærisk symmetrisk gassky, som har et tyngdepunkt (massemidtpunkt) i centrum. Samtlige støvpartikler og gasmolekyler ligger spredt jævnt rundt i skyen og man kan tegne pile mellem tyngdepunktet og alle partiklerne. De benævnes med symbolet, \vec{r}_i , hvor i er et nummer, der tildeles den enkelte partikel. (i går altså fra 1 op til antallet af partikler i skyen.) Hver enkelt partikel har også en hastighed, som angives med symbolet, \vec{v}_i . Man benytter igen en pil i symbolet for at markere, at hastigheden peger i en eller anden retning. Impulsmomentet for en enkelt partikel er så $\vec{L}_i = m_i \cdot \vec{r}_i \times \vec{v}_i$. Krydset er ikke et gangetegn, men er en speciel matematisk operator, og m_i angiver partiklens masse. Det samlede impulsmoment for Nebulaen er summen af alle bidragene fra de enkelte partikler. Hvis hastigheden og afstandspilen er vinkelrette på hinanden, er størrelsen af impulsmomentet for en enkelt partikel simpelthen produktet af partiklens masse, afstanden til tyngdepunktet og hastigheden.



Figur 3.2a. Roterende sky med plan vinkelret på rotationsaksen og som skærer centrum.

Kilde: <http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/solarsys/angmom.ht ml>



b) En flad skive, der er ca. 3 millioner km tyk ved Merkurs afstand og 50 millioner km tyk ved Jupiters afstand. (8.)

Eksempel.

Et brintatom har massen $m = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{kg}$, det befinder sig i afstanden $r = 1 \cdot 10^{11} \text{m}$ fra tyngdepunktet og dets hastighed er 50km/s . Vi antager at hastighed og afstand er vinkelrette på hinanden. Partiklens impulsmoment er så $L = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{kg} \cdot 1 \cdot 10^{11} \text{m} \cdot 50 \text{km/s} = 8,3 \cdot 10^{-12} \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$.

Hvis nu det samlede impulsmoment, L , er bevaret, så kan man se, at hvis r formindskes pga. at tyngdekraften trækker partiklen tættere på Solen, så må hastigheden af partiklen vokse. Dvs. en svagt roterende gassky vil øge sin rotationshastighed, jo mere den trækker sig sammen. Tænk for eksempel på en roterende kunstskøjteløber. Han/hun starter altid med armene spredt ud (r er stor), og når armene så trækkes ind til kroppen (r bliver mindre), roterer han/hun meget hurtigere.

Når nu skyen begynder at trække sig sammen, vil alle partikler få større hastighed, og forskellige mekanismer, som det vil føre for vidt at komme ind på her, vil bevirke, at skyen vil klappe sammen til en skive. Når partiklerne fra områderne væk fra det ovennævnte plan kommer tættere på midten, stiger densiteten og derfor stiger sandsynligheden for stødprocesser, hvor impulsmoment kan omfordeles mellem partiklerne. Det er dog værd at bemærke at skyens samlede impulsmoment er bevaret.

Dannelsen af Solen

Sammenfaldet skete over en periode på ca. 1 million år, og i løbet af denne tid steg temperaturen fra ca. 10K (-263°C) til flere millioner K i skyens inderste område¹². Gasskyens centrum begyndte dermed at lyse i en rødlig farve. Dette område kaldes for protosolen. I løbet af de næste ca. 70 millioner år voksede temperaturen i centrum af skyen til omkring 8-10MK, og dermed blev det muligt for brintkerner at fusionere under udsendelse af energi. (I kapitel 6 i MMs astro-noter gennemgår vi kerneprocesserne i Solen og andre stjerner.) Når der dannedes energi i kernen af protosolen, søgte den dannede stråling væk derfra, og lyset påvirkede derved de omkringliggende gaslag med et strålingstryk. Strålingstrykket voksede efterhånden som protosolen blev varmere, og på et tidspunkt kunne strålingstrykket modvirke gravitationskraften. Sammentrækningen standsede og Solen var blevet dannet ca. 70 millioner år efter, at sammentrækningen var begyndt.

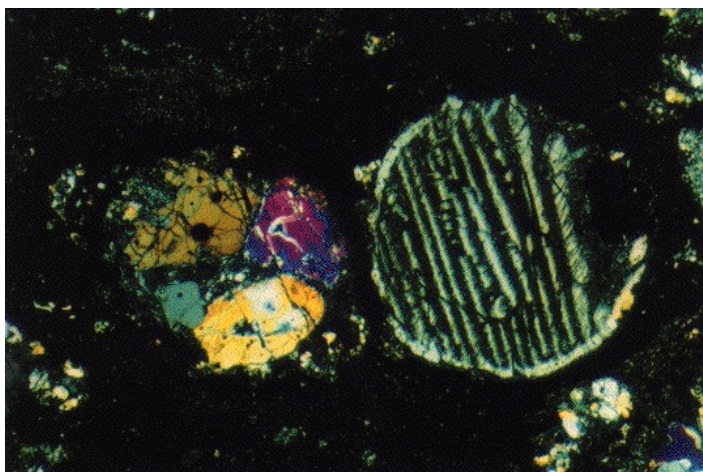
Dannelsen af planeterne

Imens Solen blev dannet inde i centrum af Nebulaen foregik der store ændringer uden for centeret. Gasskyen uden for centeret blev under sammentrækningen opvarmet til ca. 2-3kK, hvilket bevirkede at alle faste stoffer (støv, mineralkorn) smeltede. Derefter afkøledes skyen igen til omkring 400K, og partiklerne størknede til små silikat- og jern/nikkelpartikler, som havde en størrelse på 10^{-9} - 10^{-6} m. Der var flest silikatpartikler. Alt dette skete i den første million år af Nebulaens sammentrækning.

Silikater

Silikatminerale er grundbestanddelen i Jorden, asteroiderne og de andre indre planeter. Det er ligeledes grundbestanddelen i stenmeteoritter. Silikatminerale består af $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -tetraedre, knyttet sammen på forskellig måde til større enheder. I feldspaterne danner tetraedrene således rumlige netværk. Kalifeldspaten (også kaldet ortoklas), der er udbredt i almindelig granit, har følgende kemiske sammensætning: KAlSi_3O_8 . I olivin, $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, der er et vigtigt silikatmineral i stenmeteoritter og i Jordens kappe, danner $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -tetraedrene selvstændige grupper.

Skiven, som nu var dannet, roterede rundt om Solen men ikke i en pæn og ordnet facon. Den var inddelt i forskellige bånd, hvor materialet indenfor de enkelte bånd blev opblandet ved turbulente bevægelser. (Prøv at kigge på en ryger, der puster røg ud af munden. Røgen bevæger sig i sære hvirvelagtige former – det er en turbulent bevægelse.) Der er megen friktion ved turbulente bevægelser, så materialerne indenfor de enkelte bånd blev atter opvarmede, og silikaterne måtte endnu engang smelte og størkne. Derved dannedes nogle klistrede, millimeterstore silikatansamlinger, som kaldes *chondruler*. Se figur 3.3. Disse chondruler klistrede sig derefter sammen med andre silikater samt metalkorn til ca.



Figur 3.3. Chondruler i stenmeteoritten Allende, der faldt i Mexico den 8. februar 1969. Der findes flere slags chondruler, hvis indre struktur afspejler forskelle i deres dannelsesforhold. De her viste er en olivin-chondrule (tv) og en pyroxen-chondrule (th.) Den store chondrule er ca 1. mm i diameter.
Kilde: Kåre Lund Rasmussen.

¹² Energien af skyen var i øvrigt ikke bevaret i denne periode. Det viser sig, at halvdelen af den potentielle energi, der frigøres under sammentrækningen går til opvarmning af gassen, og den anden halvdel går til stråling.

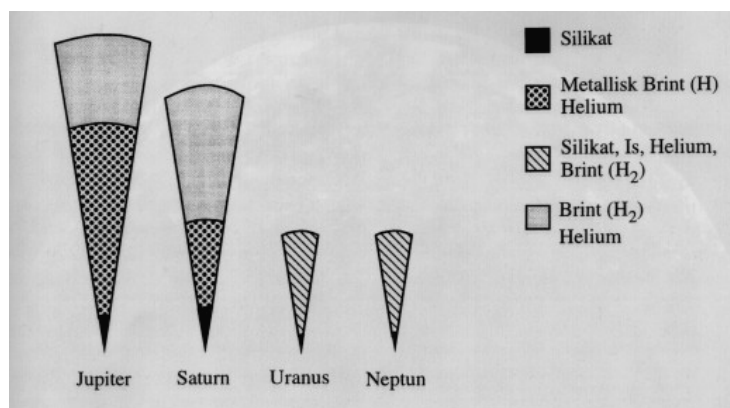
10 meter store planetesimaler.

Planetesimalerne kunne i den efterfølgende tid kollideres indbyrdes og danne asteroidelignende legemer på op til 500km i radius. Disse legemer måtte *også* gennem en smeltetur, da der var tilstrækkelige mængder af de radioaktive isotoper ^{26}Al , ^{60}Fe og ^{41}Ca til at sørge for at legemerne blev varme nok til at smelte. Efter ca. 10 millioner år, var radioaktiviteten dog aftaget så meget, at legemerne kunne størkne og derefter ramle ind i andre legemer, så planeterne blev dannet.

Planeterne skulle naturligvis også gennem den obligatoriske smelteproces, da gravitationskraften omdannede potentiel energi til kinetisk energi (varme! Jorden blev 6000K varm) og stråling, men med tiden kunne også planeterne komme til at størkne, i hvert fald i de aller yderste lag. I løbet af smelteperioden trak de tungeste grundstoffer, dvs. jern og nikkel, ned i centrum af planeten, mens de lettere materialer, sten, flød ovenpå.

Efterhånden som planeterne voksede i masse tiltrak de også mere og mere resterende støv og gas fra Nebulaen og denne gas kunne danne måner omkring planeterne på samme måde, som der blev dannet planeter rundt om Solen.

Læseren er måske bekendt med at de 4 inderste planeter er lavet af sten, mens de 4 næste planeter er gasplaneter. Grænseområdet mellem de to typer planeter kaldes for asteroidebæltet. (Pluto er en lidt pudsigt størrelse, så den venter vi lidt med.) Grunden til denne afgrænsning kommer fra det faktum at Solen udsender en ioniserende stråling, *solvinden*, som består af elektroner og protoner. Denne stråling kunne puste de letteste grundstoffer i Nebulaen ud forbi asteroidebæltet, hvor gassen kunne fortætte og planeterne herude kunne derefter indfange stofferne. Derved blev planeternes struktur, som skitseret i figur 3.4.



Figur 3.4. Den indre opbygning af Jupiter, Saturn, Uranus og Neptun. Planeternes radier er gengivet i det rette målestoksforhold. Kun i Jupiter og Saturn mener man med sikkerhed, at der er en kerne af silikat og jern i midten. Metallisk brint er en speciel tilstandsform, der er elektrisk ledende. Uranus og Neptun er ikke tunge nok, til at metallisk brint kan dannes i deres indre. (8)

Efter ca. 500 millioner år var alt det tiloversblevne materiale indfanget af planeterne, og solsystemet i dets nuværende form var blevet dannet. Hvis Solsystemet havde indeholdt mere gas, kunne gassen have bremset nogle af gasplaneterne, så de ville kunne komme tættere på Solen. I andre solsystemer har man allerede observeret planeter af Jupiters størrelse meget tæt på stjernen. Heldigvis skete det ikke i Solsystemets tilfælde, da det sandsynligvis ville have betydet at Jorden ikke havde eksisteret i dag.

Solsystemets ydre struktur

Oort-skyen

Det er almindeligt at forestille sig, at solsystemet ender ude ved Pluto, som er den fjerneste planet

fra Solen¹³, men Solens tyngdefelt rækker meget længere ud. Faktisk er det mere naturligt at tænke sig at solsystemet ender ca. halvvejs mellem Solen og den nærmeste stjerne Proxima Centaurus. (Afstand 4,28 Lysår.)

Observationer viser også, at der i afstanden 20-60kAU¹⁴ (de fleste ligger i afstanden 44kAU) må være en kæmpe stor sfærisk sky, som fortrinsvist består af 10^{12} kometer. Skyen kaldes Oort-skyen efter den hollandske astronom Jan Oort, som i 1950 påviste den teoretisk. Læg mærke til at skyen ligger mere end 20000 gange så langt væk fra Solen, som Jorden gør!

Temperaturen i denne afstand fra Solen er omtrent 4K og der er omtrent 1AU mellem de enkelte kometer.

Tavleøvelse. Beregn accelerationen på en komet, som er 44kAU væk fra Solen. ($a_f = GM/r^2$.) Beregn også accelerationen på en af planeterne og sammenlign de to størrelser. Beregn dernæst omløbstiden, T , for en komet. Er kometer stærkt bundne til Solen? (Vink: $a = (4\pi/T)^2 \cdot r$.)

Som øvelsen ovenfor viser, er kometer ganske løst bundne til Solen, og derfor er de også relativt lette at påvirke gravitationelt. For eksempel kan forbigående stjerner eller sågar planeter som Jupiter og Saturn ændre kraftpåvirkningen på i hvert fald de inderste af kometerne, så de kastes helt væk fra Solsystemet eller ind mod Solen. Hale-Bopp, som kom tæt på Jorden i 1997, havde oprindeligt en periode på 4200 år, men pga. Jupiters påvirkning af banen vil den allerede vende tilbage om ca. 2600 år. Stjernen Gliese 710 - en lille rød dværg - passerer om ca. 1,4 Mår forbi Solen i afstanden 70kAU, og derved vil den sandsynligvis skubbe nogle kometer ind mod Solen, så man vil kunne observere små 'byger' af kometer. Beregninger viser, at ca. hver 36 millioner år vil en stjerne passere inden for en afstand på 10kAU, og så tætte passager vil give anledning til en veritabel byge af indfaldende kometer.

Når mange kometer sendes mod Solen, vil sandsynligheden for et nedslag på Jorden også øges; et sådant nedslag kan udrydde det meste liv på planeten.

Jupiterfamilien

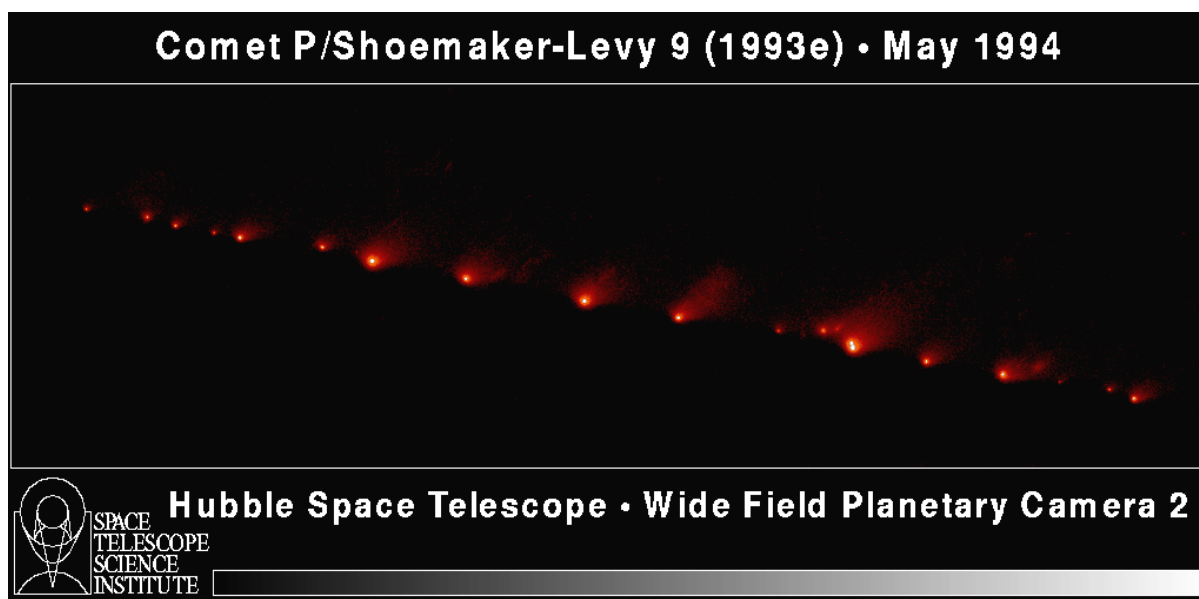
Heldigvis vil mange kometer blive fanget i Jupiters tyngdefelt i stedet for at komme helt ind til de indre dele af solsystemet. Således er der i dag et relativt stort antal kometer i omløb omkring Jupiter.

De fleste af kometerne i Jupiterfamilien tænkes dog ikke oprindeligt at hidrøre fra Oortskyen men istedet fra det såkaldte Kuiperbælte, som er et bælte, der ligger i Ekliptika¹⁵ i en afstand længere væk end Neptun og ud til afstand på ca. 100 AU. Bæltet er begrænset til et område omkring ekliptika i modsætning til Oortbæltet, som er sfærisk symmetrisk.

¹³ Man har nu fundet en planet (navn: 2003 UB313) endnu længere væk. Den er 97AU væk og er ca. 1,5 gange så stor som Pluto. Du kan læse mere her: http://science.nasa.gov/headlines/y2005/29jul_planetx.htm?list39638.

¹⁴ 1AU er middelfstanden mellem Solen og Jorden. 1AU=149,6·10⁶km.

¹⁵ Ekliptika er det plan i rummet som udspændes af Jord-Sol banen.



Figur 3.5. Komet Shoemaker-Levy 9 umiddelbart inden kollisionen med Jupiter. Hubble teleskopet tog billedet den 17/5-1994 . De 21 objekter strækker over 1,1 millioner km. Billedet er en mosaik af 6 enkeltbilleder. Ansvarlige for billedet er H. A. Weaver, T. E. Smith (Space Telescope Science Institute) samt NASA. Kilde: "Hubble's Panoramic Picture of Comet Shoemaker-Levy 9." <http://www.jpl.nasa.gov/sl9/image2.html>

Det var Gerard P. Kuiper, som i 1951, på baggrund af kometobservationer, foreslog, at der måtte ligge et bælte længere ude end Neptun, hvor der fandtes kometer og andre objekter. (Småplaneter og asteroider.) Egentlig var det en privatmand, ireren Kenneth Essex Edgeworth, som i 1949 først kom med ideen, men det var altså astronomen Kuiper, som fik bæltet opkaldt efter sig.

I dag har observationer og computersimuleringer påvist, at Kuiperbæltet findes. Der er foreløbigt fundet 32 objekter i feltet (maj 1996) og deres størrelser ligger i intervallet 100-400km i diameter, men man anslår, at der ligger ca. 35000 objekter i bæltet i størrelsen over 100 km i diameter. Dertil kommer alle kometerne, som kun har diameter på nogle få km. (<20 km.)

Hvis ovenstående betragtninger viser sig at være korrekte, indeholder Kuiperbæltet dermed mere end 100 gange så meget masse, som det velkendte asteroidebælte, der ligger mellem Mars og Jupiter.

I øjeblikket er det uklart hvordan Kuiperbæltet og Oortskyen er opstået, men simuleringer har ihvertfald vist, at hvis kometer og småplaneter blev dannet inden for Neptuns bane, ville Jupiter, Saturn, Uranus, og Neptun kaste objekterne væk og ud i baner uden for Neptuns bane. (Eller ind mod Solen, hvor de med tiden ville gå til grunde i kollisioner med de indre objekter.)

Alle kortperiodekometer, dvs. kometer med omløbstider, P, på under ca. 200 år menes at stamme fra Kuiperbæltet og kendetegnende for disse er, at de ligger tæt på ekliptika - i modsætning til langperiodekometerne, som ligger helt tilfældigt spredt i Solsystemet og som kommer fra Oortskyen. Eksempler på 'Kuiper-kometer' kunne være komet Halley (P=76 år) eller 'Dommedagskometen' komet Swift-Tuttle. (P=126 år.)

Konklusion

Som man kan se er vi i vores forståelse af Solsystemet kommet noget længere end Kepler og Newton. Med hjælp af computere har vi forfinet vores verdensbillede, og det er endda udvidet til at gælde hele Universet og ikke kun Solsystemet, som ellers er det, der er lagt fokus på at beskrive i denne note.

Metoden til at lære nyt om Verden er dog ikke anderledes end den metode, som Brahe, Kepler og Galilei introducerede. Nemlig

1. Observation.
2. Matematisk fortolkning og modelbygning.
3. Nye observationer.

Man kan dog tilføje, at vi også har rene teoretikere, som bygger modeller af naturen, og disse modellers forudsigelser, kan man så efterfølgende teste.

Som læseren forhåbentligt kan se, har mennesket altid i en eller anden form forsøgt at forstå verden. Nogle gange har det været nødvendigt at kassere en forståelse og starte forfra, som Renæssancens naturvidenskabsmænd gjorde; andre gange kan man arbejde videre og forfine en allerede eksisterende model – som vi har gjort med Keplers model af Solsystemet.

Dette er i sin enkelthed hvad astronomer, biologer, fysikere, kemikere og geologer gør – de bygger modeller af naturen og forsøger at forstå naturen ud fra deres modeller. Det er en afsindigt spændende verden, og du kan nu i de kommende 2½ år stifte bekendtskab med denne verden.