

# Solsystemet og livsbetingelser

2026



*Fra Southwest Research Institute/Don Davis.*

**Michael A. D. Møller. Feb. 2020.  
Redigeret juni 2026.**

## Indholdsfortegnelse

1 Solsystemet.....	5
1.1 Solsystemets dannelse.....	5
1.1.1 Byggestenenes dannelse.....	5
1.1.2 Sammentrækningen af Nebulaen.....	6
1.1.3 Eksempel.....	7
1.1.4 Dannelsen af Solen.....	7
1.1.5 Dannelsen af planeterne.....	7
1.1.6 Kometerne.....	9
1.2 Solsystemets nuværende struktur.....	9
1.2.1 Titius-Bodes lov.....	9
1.2.2 Asteroidebæltet.....	10
1.2.3 Jordkrydsende asteroider.....	11
1.3 Kometerne og deres placering.....	12
1.3.1 Kuiperbæltet.....	12
1.3.2 Oort-skyen.....	13
1.3.3 Jupiter-familien.....	14
1.3.4 Kometstruktur og sammensætning.....	15
1.4 Keplers love.....	17
1.4.1 Historien bag lovene.....	17
1.5 Celest mekanik.....	20
1.5.1 Ellipser.....	20
1.5.2 Mekanisk energi samt banehastighed af en planet.....	21
1.5.3 Virialteoremet.....	22
1.5.4 Farten af et legeme der bevæger sig i en ellipsebane.....	22
1.5.5 Newtonsk udledning af Keplers 2. og 3. lov.....	22
1.5.6 Opgave Marsbanen. [27].....	23
1.5.7 Opgave. Mars' banekonstanter.....	25
1.5.8 Opgave. Kometnedslag.....	25
1.5.9 Opgave. Rumsonden NEAR. [28].....	25
1.5.10 Opgave. Giacobini-Zinner. [28].....	26
1.5.11 Opgave. Jordens fart.....	26
1.5.12 Opgave. Størrelsesforhold i Solsystemet.....	26
1.5.13 Opgave. Afstandsskalaer.....	27
2 Liv i Solsystemet og rummet i øvrigt.....	28
2.1 Indledning.....	28
2.2 Astrobiologi.....	28
2.3 Betingelser for liv.....	29
2.3.1 Flydende vand.....	29
2.3.2 Livszonen.....	30
2.3.3 Atmosfærestabilitet.....	30
2.3.4 Kulstofkredsløbet.....	31
2.4 Bestemmelse af temperatur og tryk på fremmede kloder.....	33
2.4.1 Satellitmålinger.....	33
2.4.2 Spitzer – fakta.....	34
2.5 Steder at søge efter livsbetingelser.....	36
2.5.1 Det nære solsystem.....	36
2.5.2 Phoenix-missionen (Mars).....	37
2.6 Livets byggesten.....	40

2.6.1 Atomdannelse.....	40
2.6.2 Molekyledannelse.....	42
2.6.3 Opgave. Livsbetingelser i Solsystemet.....	45
2.6.4 Opgave. Temperaturmåling på exoplanet.....	45
2.6.5 Opgave. Spitzer-teleskopet.....	45
2.6.6 Opgave. Titan.....	45
2.6.7 Opgave. Jupiters og Saturns måner.....	45
2.6.8 Opgave. Alien Earths.....	46
2.6.9 Opgave. Kometer som vandbærere.....	46
2.6.10 Opgave. Livszoner.....	46
3 Naturkatastrofer fra rummet.....	47
3.1 Stjernes kud.....	48
3.1.1 Eksperiment. Kraterforsøg.....	49
3.2 Kraterdiametre.....	50
3.3 Kraterdybde.....	51
3.4 Energi af impaktor.....	51
3.4.1 Eksempel. Jernmeteorit.....	51
3.5 Strålingsenergi i atmosfæren.....	52
3.6 Seismiske effekter.....	53
3.6.1 Eksempel. Jordskælv.....	54
3.7 Dinosaurernes uddøen.....	54
4 Afslutning.....	55
5 Opgaver til afsnit 3.....	57
5.1 Opgave. Kinetisk og potentiel energi.....	57
5.2 Opgave. Ildkugler og bolider i atmosfæren.....	57
5.3 Opgave. Nedslagsenergi og kraterdiameter.....	57
5.4 Opgave. Kollisionssimulator.....	58
5.5 Opgave. Chicxulubkrateret – en detektivopgave.....	59
6 Formelsamling.....	60
6.1 Atmosfærer for måner og planeter.....	60
6.1.1 Middel molekylehastighed af atmosfære.....	60
6.1.2 Atmosfærestabilitet.....	60
6.2 Legemers baner.....	60
6.2.1 Ellipses eccentricitet.....	60
6.2.2 Ellipses pericenter- og apocenterafstande.....	60
6.2.3 Legemes hastighed om centrallegeme.....	60
6.2.4 Keplers 1. lov.....	60
6.2.5 Keplers 2. lov.....	60
6.2.6 Keplers 3. lov.....	60
6.2.7 Mekanisk energi i gravitationsfeltet.....	61
6.2.8 Mekanisk energi i ellipsebane.....	61
6.3 Nedslag og bolider.....	61
6.3.1 Kraterdiametre.....	61
6.3.2 Kraterdybde.....	61
6.3.3 Bolideenergi.....	61
6.4 Jordskælv.....	61
6.4.1 Jordskælvsstyrke og energi.....	61
6.4.2 Jordskælv som funktion af afstand til impaktor.....	61
7 Referencer.....	62



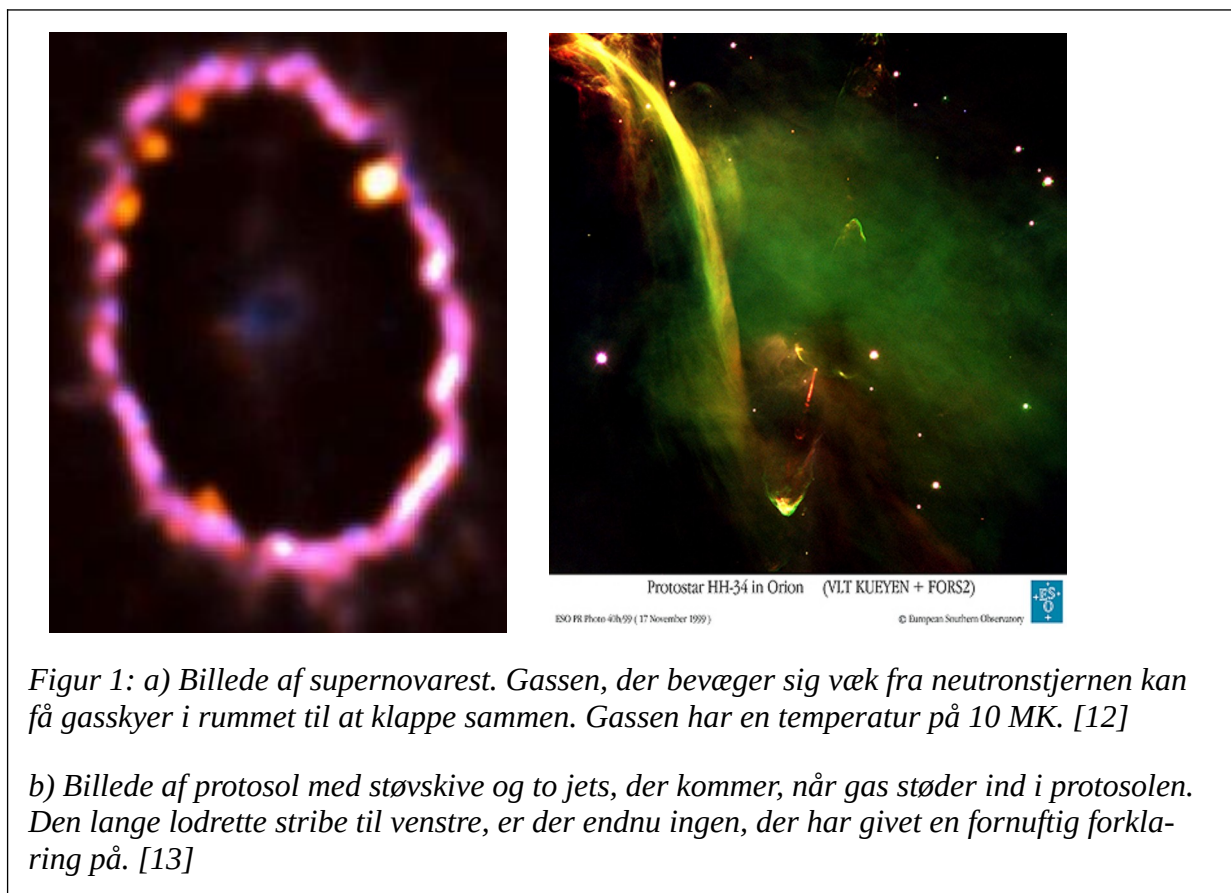
# 1 Solsystemet

Her følger en gennemgang af Solsystemets dannelse samt den fysik, der beskriver banebevægelser i Solsystemet.

## 1.1 Solsystemets dannelse

### 1.1.1 Byggestenenes dannelse

Solsystemet atomare indhold 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, vi kalder *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.)<sup>1</sup>



Nebulaen, som Solsystemet blev dannet af, er selv dannet af døde stjerner. Da 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, 1-2 %, men altså stor nok til at bl.a. Jorden kunne blive dannet. Nebulaen indeholdt omkring 74 % brint og

<sup>1</sup> Nogle af de mindre tunge grundstoffer findes dog normalt heller ikke i naturen. For eksempel blev Technetium i 1937 første gang skabt af Emilio Segré, da han og andre arbejdede med USAs 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 atomoparbejdningsanlægget Sellafield i England, har haft små lækager.)

24 % helium foruden den lille mængde af tungere grundstoffer. I afsnit 2.6 samt noten *Solen og andre stjerner* (<https://astro-gym.dk/Tekster>) kan du læse om, hvordan grundstofferne bliver dannet i stjernerne samt i supernovaeksplosionerne.

### 1.1.2 Sammentrækningen af Nebulaen

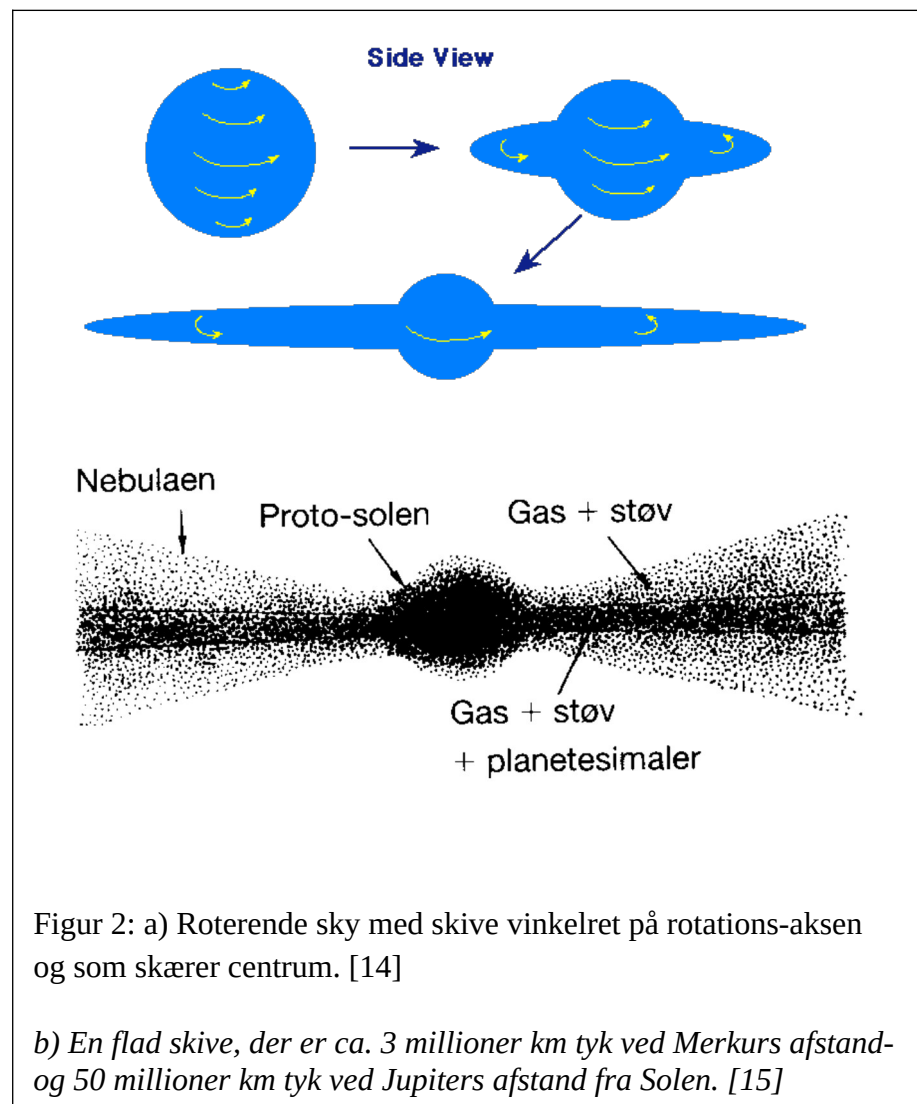
Nebulaen har oprindeligt været en stor tynd gas- og støvsky, som har roteret svagt. Den har ligget i rummet og passet sig selv i et ukendt antal år. Den har været i såkaldt termisk ligevægt, dvs. gas- og støvpartiklernes termiske bevægelser har kunnet modstå gravitationskræfterne. Temperaturen af skyen har været på ca. 10 K. For ca. 4,5672 milliarder år siden har flere supernovaeksplosioner fra en nærtliggende stjerne kastet en masse gas og støv ud i rummet, og noget af den gas og støv, har påvirket Nebulaen, så den kollapsede. På figur 1 kan man se resultatet af påvirkningerne fra en supernovaeksplosion på en gassky.

Da Nebulaen kollapsede, er det umiddelbart fristende at tro, at gassen bare ville trække sig sammen til en endnu mindre sky, men det viser sig ikke at kunne lade sig gøre. Det kan vi ses ud fra en fysisk størrelse, som kaldes *impulsmomentet*, der er bevaret.

Hvis man forstår impulsmomentbegrebet, vil man kunne indse, at ikke alt masse kan forsvinde ind i centrum af Nebulaen. Derfor vil vi overfladisk undersøge impulsmomentet i det følgende.

Betragt en sfærisk symmetrisk gassky, som har sit tyngdepunkt (massemidtpunkt) i skyens 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 og masse, som angives med symbolerne,  $\vec{v}_i$  og  $m_i$ . Man benytter igen en pil i symbolet for hastigheden for at markere, at hastigheden peger i en eller anden retning. Impulsmomentet for en enkelt partikel er givet som  $\vec{L}_i = m_i \cdot \vec{r}_i \times \vec{v}_i$ . Krydset er ikke et gangetegn, men er en speciel matematisk operator. Det samlede impulsmoment for Nebulaen er summen af alle bidragene fra de enkelte partikler. Hvis hastigheden



Figur 2: a) Roterende sky med skive vinkelret på rotations-aksen og som skærer centrum. [14]

b) En flad skive, der er ca. 3 millioner km tyk ved Merkurs afstand- og 50 millioner km tyk ved Jupiters afstand fra Solen. [15]

og afstandspilen for den enkelte partikel er i en vinkel  $\theta$  på hinanden, er den numeriske værdi af impulsmomentet for en enkelt partikel  $L_i = m_i \cdot r_i \cdot v_i \cdot \sin(\theta_i)$ .

### 1.1.3 Eksempel

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

Hvis nu det samlede impulsmoment,  $L$ , er bevaret, så kan man se, at hvis  $r$  formindskes pga. at gravitationskraften trækker partiklen tættere på Solen, så må hastigheden af partiklen vokse. Dvs. en svagt roterende gassky vil øge sin rotationshastighed, des mere den trækker sig sammen. Man kan erindre sig 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.

-o-

Når skyen begynder at trække sig sammen, vil alle partikler få større hastighed. Dog vil de indbyrdes ved stødprocesser kunne udveksle impulsmoment med hinanden, dog under den begrænsning, at det totale impulsmoment er bevaret. Partiklerne i nærheden af *rotationsplanet*, som er det plan som skærer tyngdepunktet, og som er vinkelret på rotationsaksen, vil umiddelbart få størst hastighed. Se figur 2. Partiklerne langs rotationsaksen f. eks har en mindre rotationshastighed end i rotationsplanet. Derfor kan de komme tættere på massemidtpunktet, mens deres hastighed vil vokse for faldende  $r$ , så mange slynges udad. Derfor vil noget af skyen klappe sammen til en skive. Hvis man vil forstå mekanismen i større detalje, er det noget, man kan arbejde med i en SRP i fysik A.

### 1.1.4 Dannelsen af Solen

Sammentrækningen skete over en periode på ca. 1 million år, og i løbet af denne tid steg temperaturen fra ca. 10 K til flere millioner K i skyens inderste område<sup>2</sup>. Gasskyens centrum begyndte dermed at lyse i en rødlig farve. Dette område kaldes for protosolen. I løbet af mange millioner år voksede temperaturen i centrum af skyen til omkring 8-10 MK, og dermed blev det muligt for brintkerner at fusionere under udsendelse af energi. (I noten *Solen og andre stjerner* gennemgår vi kerneprocesserne i Solen og andre stjerner.) Den dannede strålingsenergi i kernen af protosolen, fløj i alle retninger, 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.

### 1.1.5 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. 2-3 kK, hvilket bevirkede, at alle faste stoffer (støv og mineralkorn) smeltede. Derefter afkøledes skyen igen til omkring 400 K, 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.

Silikatminerale er grundbestanddelen i Jorden, asteroiderne og de andre indre planeter. Det er også 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 den kemiske

<sup>2</sup> Energien af skyen var 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.

sammensætning:  $KAlSi_3O_8$ . I olivin,  $(Mg,Fe)_2SiO_4$ , der er et vigtigt silikatmineral i stenmeteoritter og i Jordens kappe, danner  $(SiO_4)^{4-}$ -tetraedrene selvstændige grupper. [15]

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 særlige 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. Disse chondruler klistrede sig derefter sammen med andre silikater samt metalkorn til ca. 10 meter store planetesimaler.



Figur 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. [15]

Planetesimalerne kunne i den efterfølgende tid kollidere indbyrdes og danne asteroidelignende legemer på op til 500 km 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. Der er mere om asteroiderne i afsnit 1.2.2.

Planeterne skulle naturligvis også gennem den obligatoriske smelteproces, da gravitationskraften omdannede potentiel energi til kinetisk energi og stråling, men med tiden kunne også planeterne komme til at størkne, i hvert fald i de alleryderste lag. I løbet af den smeltede periode trak de tungeste grundstoffer, dvs. især jern og nikkel, ned i centrum af planeten, mens de lettere materialer, sten, flød ovenpå. Der er dog endnu tungere grundstoffer i Jordens kappe og lithosfære, men disse grundstoffer har været bundne til klipper, som har en lavere densitet end jern og nikkel.

Efterhånden som planeterne voksede i masse, tiltrak de også mere og mere resterende støv og gas fra Nebulaen, og denne støv og gas kunne danne måner omkring planeterne på samme måde, som planeter blev dannet 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 småplanet, som ligger i Kuiperbæltet, så den er teknisk set ikke en alm. planet.) 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 og molekyler i Nebulaen ud forbi asteroidebæltet, hvor f. eks. vandmolekyler på gasform kunne fortætte til iskrystaller, som kunne deltage med silikater i processen med at danne planeter. Derved blev planeternes struktur, som skitseret på figur 4. Solvinden havde blæst enorme mængder H og He ud forbi det senere asteroidebælte, og den gas kunne planeterne herude indfange.

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. Jupiter har også været inde omkring Mars' bane, efter den blev dannet, men kraftpåvirkninger fra Saturn bevirkede, at den endte ved sin nuværende placering. [43]

### 1.1.6 Kometerne

Foruden Solen, planeterne, månerne og asteroiderne blev der også dannet en masse kometer, som primært består af  $H_2O(s)$  og 10-50 % silikater. De ligger fortrinsvist i to områder, nemlig Kuiperbæltet, som ligger i afstanden 40-100 AU samt i Oortskyen, der ligger ca. 40000 AU væk. Kometerne i Kuiperbæltet er muligvis dannet i det indre solsystem, hvorefter gasplaneterne gravitationskræfter har skubbet kometerne ud i deres nuværende bane. Kometerne ligger dermed i Solsystemets plan. Kometerne i Oortskyen er muligvis 'fortættet' under sammentrækningen af Nebulaen, men deres oprindelse er usikker. (Det er faktisk usikkert, om Oortskyen overhovedet findes, for kometerne lyser så svagt, at vi ikke kan se dem.) Småplaneten Pluto findes i den inderste del af Kuiperbæltet. Læs mere om kometerne i afsnit 1.3.

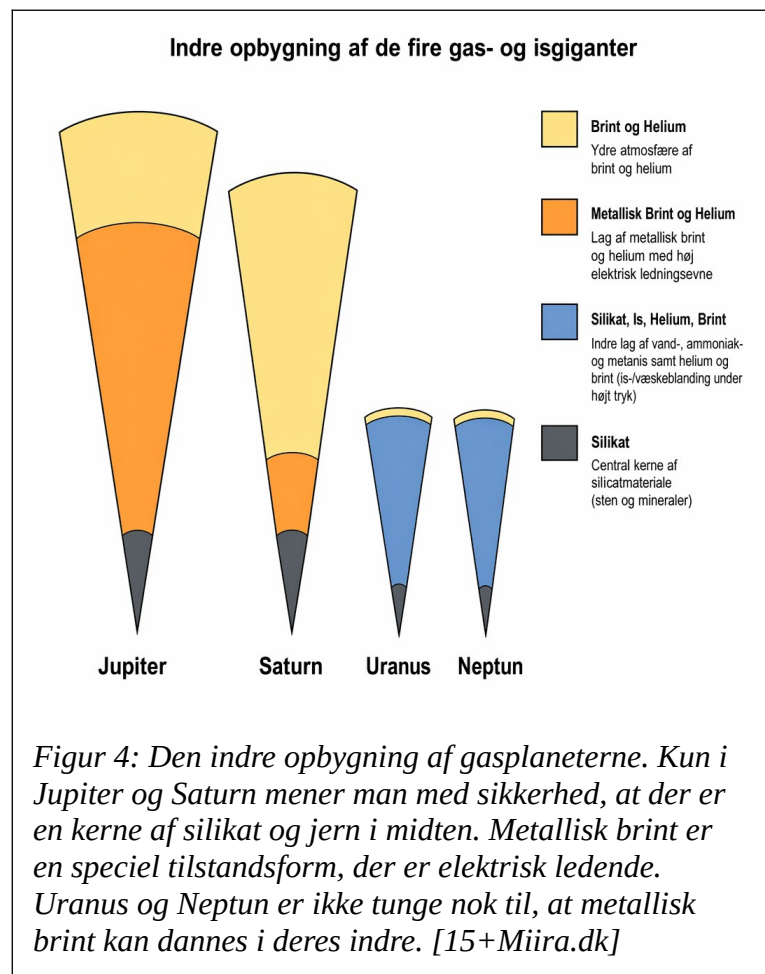
## 1.2 Solsystemets nuværende struktur

Solsystemets centrum er defineret som der, hvor dets massemidtpunkt ligger. Da planeterne bevæger sig, flytter massemidtpunktet sig også. Det går fra at ligge ca. i midten af Solen til lidt udenfor. [44]

Rundt om Solen bevæger planeterne Merkur, Venus, Jorden, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus og Neptun samt Pluto og øvrige småplaneter sig. Alle planeterne ligger næsten i *ekliptika*, som er Jord-Sol-baneplanet; kun småplaneterne baner adskiller sig væsentligt fra ekliptika. Tabel 1 viser middelfastandene til Solen for de 8 planeter samt Pluto. Umiddelbart ser det ikke ud til, at der er megen logik i middelfastandene til Solen, men en nærmere undersøgelse viser noget andet.

### 1.2.1 Titius-Bodes lov

Johann D. Titius opdagede i 1766, at der er en sammenhæng mellem afstanden fra Solen til planeterne og et bestemt tildelt 'planetnummer.' Titius tildelte et nummer til hver planet, og ved at



lave en simpel beregning lykkedes det ham at finde den sammenhæng, som kolonne 2 og 3 i tabel 1 viser.

<i>Planetnavn</i>	<i>n</i>	<i>Afstand/AU</i>	<i>Rigtige afstand/AU</i>
Merkur	$-\infty$	0,40	0,387
Venus	0	0,70	0,723
Jorden	1	1,0	1,00
Mars	2	1,6	1,524
Planet X	3	2,8	2-3,5
Jupiter	4	5,2	5,203
Saturn	5	10	9,539
Uranus <sup>3</sup>	6	19,6	19,18
Neptun	7	38,8	30,06
Pluto	8	77,2	39,44

Tabel 1. Planeternes afstande og deres nummer som Titius gav dem.

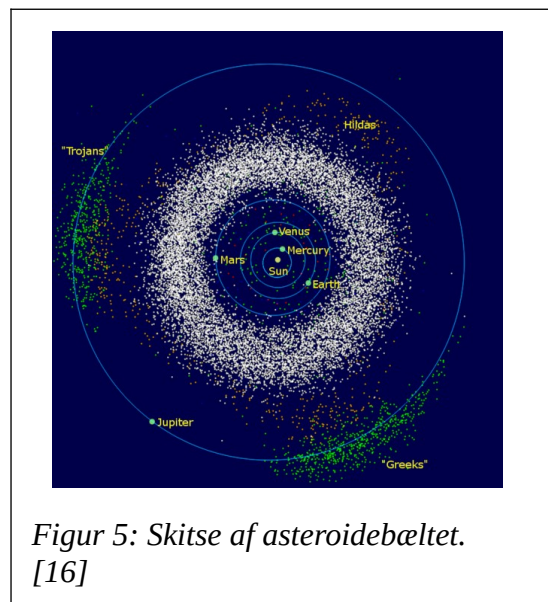
Tallene i 3. kolonne er fundet ved at tage rækken  $2^{-\infty} \cdot 3$ ,  $2^0 \cdot 3$ ,  $2^1 \cdot 3$ ,  $2^2 \cdot 3$ ,  $2^3 \cdot 3$  osv. og derefter lægge 4 til de fundne tal. Endelig deles alle tallene med 10, og det skulle være afstanden fra Solen til planeten målt i AU. Dvs.  $r_n = (0,4 + 0,3 \cdot 2^n)$  AU. (1 AU =  $1,496 \cdot 10^{11}$  m.)

Titius' opdagelse blev beskrevet i en fodnote i en bog, som han oversatte, og derfor fik offentligheden ikke adgang til reglen før i 1772, da Johann Eilert Bode fandt den frem, og præsenterede den som sin egen. Reglen hed derfor i begyndelsen kun Bodes lov.

Bemærk at der ikke er en fysisk begrundelse for at vælge de tal, som han gjorde – det er en ren empirisk sammenhæng. Man ser også, at sammenhængen passer dårligt med Neptun og Pluto. Alligevel lykkedes det at forudsæ Uranus' afstand, og da William Herschel opdagede denne planet i 1781, var Bode og andre overbevist om formlens gyldighed. Den tyske astronom Franz Xaver von Zach oprettede en videnskabelig gruppe, som skulle finde planet X, som ifølge Titius og Bode skulle ligge i afstanden 2,8 AU.

### 1.2.2 Asteroidebæltet

Det blev Nytårsnat 1801 før der skete noget. Den italienske munk og astronom, *Giuseppe Piazzi* (1745-1826), opdagede et legeme, som han først troede var en komet. Efter en nøjere analyse viste det sig, at det snarere var et planetlignende legeme, som ligger i afstanden 2,77 AU fra Solen, og objektet blev døbt Ceres efter Siciliens skytsgudinde. Ceres er ganske lille i forhold til en 'normal' planet – i dag kalder vi den for en *asteroide*. Navnet asteroide blev valgt af William Herschel, som syntes, at de små objekter lignede stjerner. Piazzi derimod foreslog, at de skulle kaldes småplaneter eller planetoider: Betegnelser, som er langt mere præcise, og som man også anvender i dag.



Figur 5: Skitse af asteroidebæltet. [16]

3 Bode kendte ikke til de 3 yderste planeter.

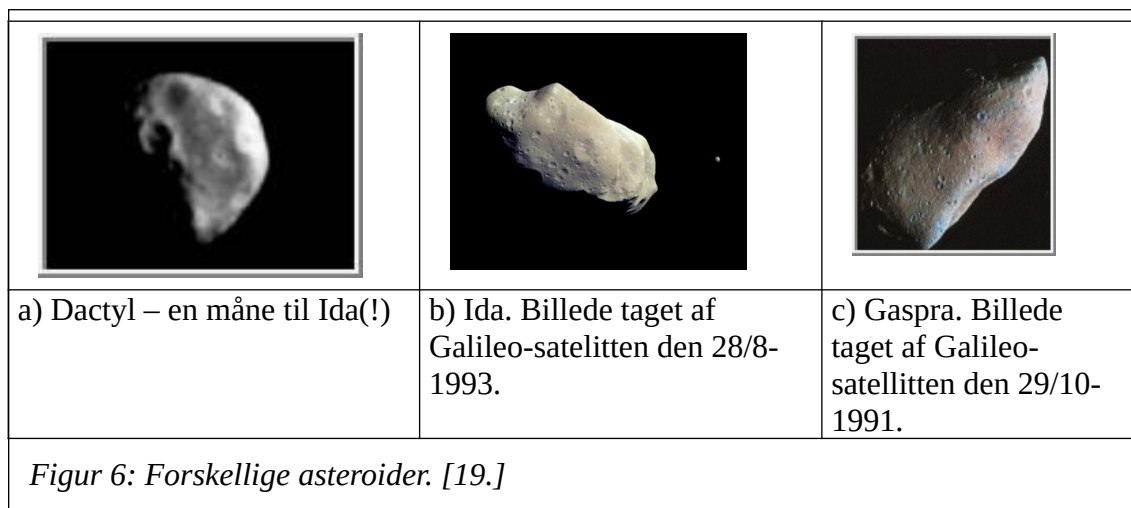
Senere opdagelser har vist et stort antal asteroider i afstandene 2-3,5 AU. Området kaldes for *asteroidebæltet*, og i dag har man kendskab til omkring 125000 asteroider. Der er sandsynligvis mange hundrede tusinde endnu, som mangler at blive opdaget. [58] Der findes også 2 små asteroidebælter i Jupiters bane. De kaldes *trojanerne*, dvs. opkaldt efter helte fra den trojanske krig. Trojanerne ligger ca. 60° foran og bagved Jupiter. Man kan vise, at deres baner er næsten stabile. (Områderne kaldes for Sol/Jupiter-systemets *Lagrange-punkter*.)

Asteroidernes diametre strækker sig fra nogle meter til omkring 1000 km, og deres massefylde ligger i intervallet 2,2-3,3 g/cm<sup>3</sup>. Af alle de undersøgte stumper (meteoritter) fra asteroider består 92,8 % af *silikater* (sten), og 5,7 % er lavet af jern og nikkel. Resten er en blanding af de 3 føromtalte materialer. Silikatmeteoritterne er de sværeste at identificere, da de ligner Jordsten ganske meget. Tabel 2 angiver enkelte asteroiders navne samt deres karakteristika.

Nr	Navn	R (km)	M (kg)	D (Gm)	Albedo	Opdager	Dato
1	Ceres	457	$8,7 \cdot 10^{20}$	413,9	0,10	G. Piazzi	1801
511	Davida	168		475,4	0,05	R. Dugan	1903
15	Eunomia	136	$8,3 \cdot 10^{18}$	395,5	0,19	De Gasparis	1851
52	Europa	156		463,3	1,06	Goldschmidt	1858
951	Gaspra	17x10	$1,0 \cdot 10^{16}$	205,0	0,20	Neujmin	1916
10	Hygiea	215	$9,3 \cdot 10^{19}$	470,3	0,08	De Gasparis	1849
243	Ida	58x23	$1,0 \cdot 10^{17}$	270,0	?	J. Palisa	29/9-1884
704	Interamnia	167		458,1	0,06	V. Cerulli	1910
2	Pallas	261	$3,18 \cdot 10^{20}$	414,5	0,14	H. Olbers	1802
16	Psyche	132		437,1	0,10	De Gasparis	1852
87	Sylvia	136		521,5	0,04	N. Pogson	1866
4	Vesta	262,5	$3,0 \cdot 10^{20}$	353,4	0,38	H. Olbers	1807

Tabel 2. [17] og [18]

Figur 6 viser eksempler på nogle enkelte asteroider.



### 1.2.3 Jordkrydsende asteroider

I 1990'erne har forskere gjort opmærksom på det problem, at nogle asteroider og kometer har jordkrydsende baner. I afsnit 3 er beskrevet, hvad der kan ske, når disse legemer kolliderer med

Jorden. Problemet er reelt nok, da vi har flere beviser for nedslag. Det store spørgsmål er, hvor stor risikoen er for et destruktivt nedslag.

Bjørn Franck Jørgensen fra Tycho Brahe-planetariet samt Kaare Lund Rasmussen fra Nationalmuseet har undersøgt problemet, og resultaterne blev fremlagt i *Aktuel Astronomi* nr. 2 og 3, 1997. Eleven henvises til disse artikler for at få den fulde historie. Nedenfor er angivet nogle få af konklusionerne.

Det menes, at omkring 2100 asteroider krydser Jordens baneplan. Her er kun medtaget asteroider med størrelser over 1 km i diameter. Sandsynligheden for et nedslag, der kan ødelægge civilisationen er anslået til 1/10000 i løbet af et menneskes levetid. Dette tal kan man jo sammenligne med at vinde den store gevinst i lotto på 52 uger. Chancen for et nedslag er ca. 16 gange større end chancen for at få en 7'er på 52 uger.

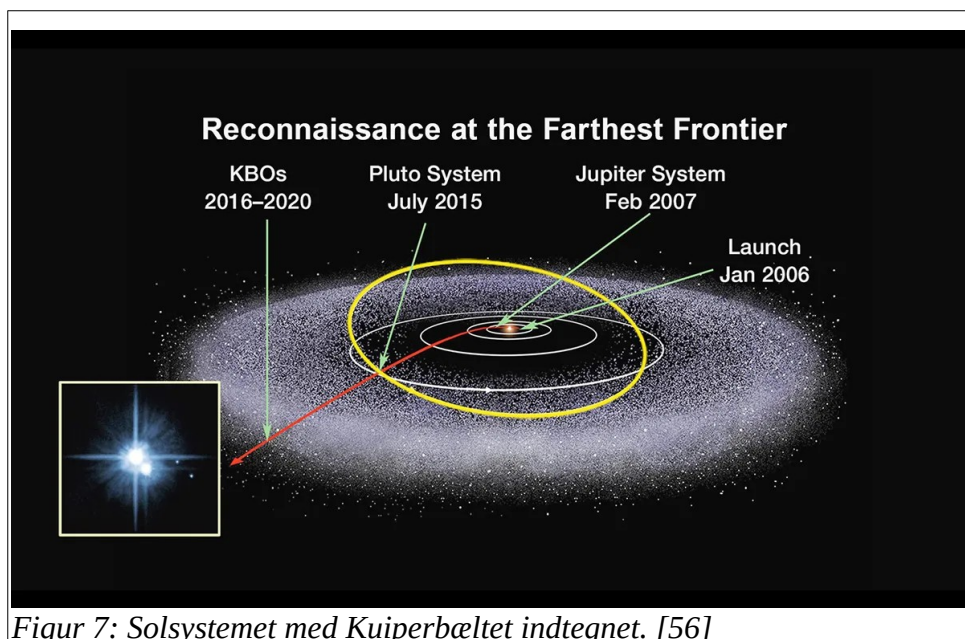
Risikoen virker jo umiddelbart chokerende. "Hvorfor er der ikke fokuseret på det noget før?" kunne man spørge sig selv. Svaret er muligvis, at vi med den teknologiske udvikling først nu har opdaget hvor mange asteroider, der findes i Solsystemet. Derudover har menneskeheden tidligere været fokuseret på at overleve sult, krige og truende miljøkatastrofer, og da vi ikke kan stille meget op overfor en indkommende asteroide, er det nok lettest at lukke øjnene og forestille sig, at der ikke er nogen fare. I opgave 1.3 samt i opgaverne i afsnit 3 kan man få et indtryk af virkningerne af et nedslag. Derudover opfordres eleven til at læse de ovennævnte artikler fra *Aktuel astronomi*.

## 1.3 Kometerne og deres placering

Kometer blev kort omtalt i 1.1.5. Herunder følger en nærmere forklaring på deres placeringer.

### 1.3.1 Kuiperbæltet

Ved afstanden 40-100 AU findes et bælte bestående af småplaneter samt kometer. De kometer, hvis baner cirka ligger i Ekliptika og har halve storakser på op til omtrent 100 AU kaldes for kuiperkometer. Halleys komet er et eksempel på sådan en. Kometerne har ifølge Keplers 3. lov (se afsnit 1.4) omløbstider om Solen på op til 1 kyr, dvs. de har været omkring Solen mange gange, og derfor fordamper de også relativt hurtigt. Man kalder kometerne for *kort-periodiske*, men de er altså også 'kort'-livede.



Figur 7: Solsystemet med Kuiperbæltet indtegnet. [56]

Pluto og anslået  $10^5$  andre småplaneter kredser også herude, så bæltet er ikke et rent kometbælte, selvom det er anslået, at der er over  $10^{12}$  kometer i bæltet. [56]

Der er foreløbigt fundet mere end 2000 objekter i feltet (oktober 2021) og deres størrelser ligger i intervallet 100-400 km i diameter, men man anslår, at der ligger knap en million objekter i bæltet med størrelser over 100 km i diameter. [45] Dertil kommer alle kometerne, som kun har diametre 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.

Alle kortperiodekometer, dvs. kometer med omløbstider på under ca. 200 yr, 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 Oort-skyen. Eksempler på 'Kuiper-kometer' kunne være komet Halley ( $P = 76$  yr) eller komet Swift-Tuttle. ( $P = 126$  yr.)

### 1.3.2 Oort-skyen

Det er almindeligt at forestille sig, at Solsystemet ender ude ved Kuiperbæltet, men Solens tyngdefelt rækker meget længere ud. Faktisk er det nok mere rimeligt at definere, at Solsystemet ender ca. en fjerdedel af vejen mellem Solen og den nærmeste stjerne Proxima Centaurus. (Afstand 1,31 pc.)

Dannelses teorier for Solsystemet viser, at der i afstanden 20-60 kAU (i middel er afstanden 44 kAU) må være en kæmpestor sfærisk sky, som fortrinsvist består af omtrent  $10^{12}$  kometer. Skyen kaldes Oort-skyen efter den hollandske astronom Jan Oort, som i 1950 "påviste" den teoretisk. Læg mærke til at skyen i middel ligger 44000 gange så langt væk fra Solen, som Jorden gør.

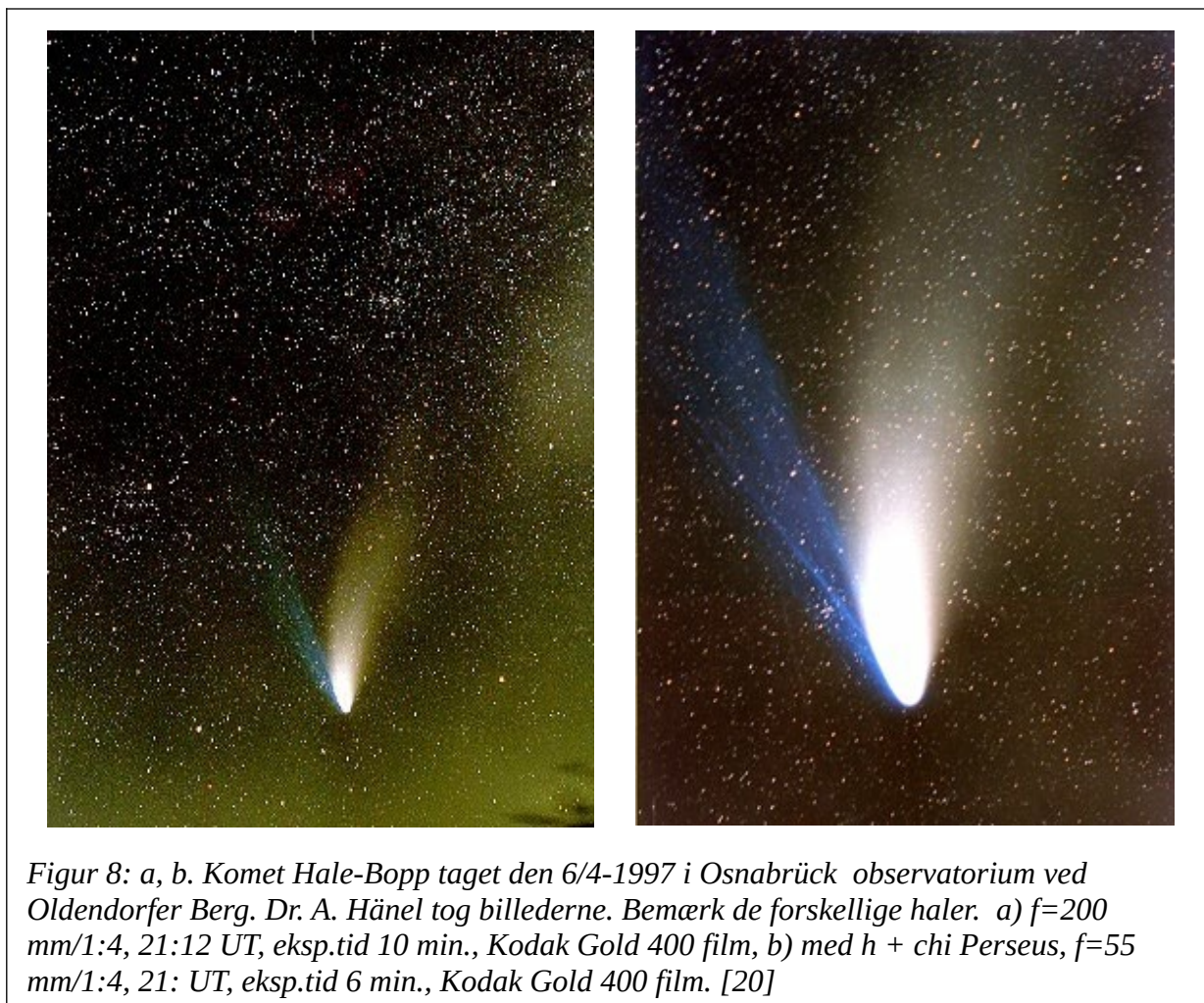
Temperaturen i denne afstand fra Solen er omtrent 4 K, og der er ca. 10 AU mellem de enkelte kometer.

Kometer er ganske løst bundne til Solen, og derfor er de også relativt lette at påvirke gravitationelt. For eksempel kan forbipasserende stjerner ændre kometerne baner. For kometerne i Kuiperbæltet kan planeter som Jupiter og Saturn også ændre kometbanerne, dvs. de kan for eksempel kastes helt væk fra Solsystemet eller sendes ind mod Solen. Hale-Bopp som er vist på figur 8), som kom tæt på Jorden i 1997 havde oprindeligt en omløbstid på 4200 yr, men pga. Jupiters påvirkning af banen, vil den allerede vende tilbage om ca. 2600 yr. Stjernen Gliese 710 - en lille rød dværg - passerer om ca. 1,4 Myr forbi Solen i afstanden 70 kAU, 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 10 kAU, og så tætte passager vil give mulighed for en byge af indfaldende kometer.

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

I øjeblikket er det lidt usikkert, hvordan Kuiperbæltet og Oortskyen er opstået, men computersimuleringer har i hvert fald vist, at hvis kometer og småplaneter blev dannet inden for Neptuns bane, ville Jupiter, Saturn, Uranus, og Neptun kaste objekterne ud i baner uden for Neptuns

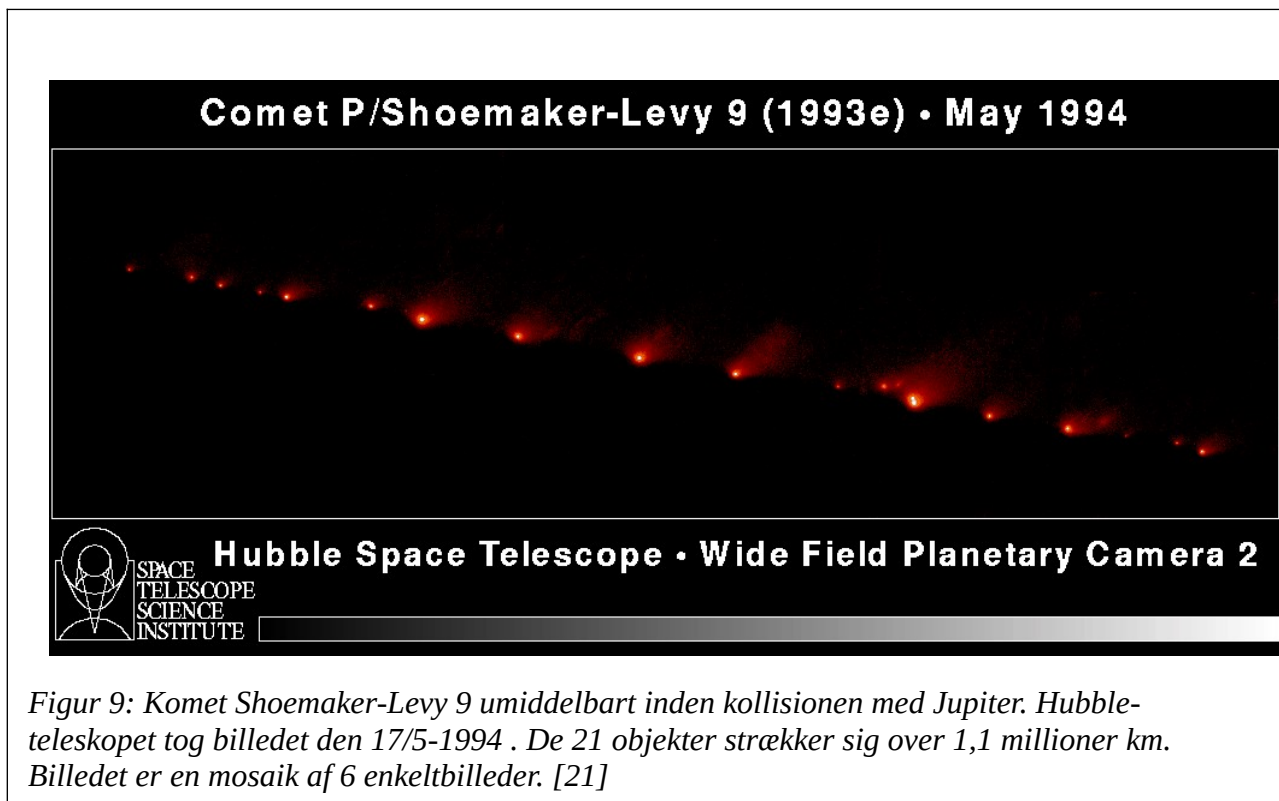
bane eller ind mod Solen, hvor de med tiden ville gå til grunde i kollisioner med de indre objekter og Solen.



### 1.3.3 Jupiter-familien

Heldigvis vil mange kometer blive indfanget 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. Illustration Fejl: Henvisningskilde ikke fundet viser et foto af komet P/Shoemaker-Levy 9, som i 1994 stødte ind i Jupiter. Grunden til, at billedet ligner en perlekæde, er, at kometen blev flået i stykker af Jupiters tidefelt.

De fleste af kometerne i Jupiterfamilien tænkes dog ikke oprindeligt at stamme fra Oortskyen men i stedet fra Kuiperbæltet.



Figur 9: Komet Shoemaker-Levy 9 umiddelbart inden kollisionen med Jupiter. Hubble-teleskopet tog billedet den 17/5-1994. De 21 objekter strækker sig over 1,1 millioner km. Billedet er en mosaik af 6 enkeltbilleder. [21]

### 1.3.4 Kometstruktur og sammensætning

Hvor vi ikke helt forstår dannelsen af Oortskyen, så har vi dog et lille kendskab til de fysiske og kemiske forhold i kometerne. Astronomer har udført spektroskopiske målinger på komet, og man har sågar haft sonder ude at måle på komet. F. eks. var der flere sonder oppe og måle på Halleys komet, da den sidst besøgte det indre af Solsystemet i 1986.

Vi har også besøgt kometen P67/Churyumov-Gerasimenko i 2014. Prøv at søge på internettet med kometens navn eller på missionsnavnet *Rosetta-mission*.

I en første tilnærmelse kan man betragte komet, som en slags gigantiske 'beskidte snebolde.' Kometerne består nemlig af ca. 50 % is iblandet silikater (støv og sten) samt en del gasser og molekyler. De varierer ganske meget i størrelse, men de fleste kendte komet har diametre, som ligger i intervallet 1-60 km.

H<sub>2</sub>O, HDO, OH, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, CO, CO<sub>2</sub>, CO<sup>+</sup>, HCO<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>S, SO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CS, OCS, CS, CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>CO, HCOOH, CH<sub>3</sub>OCHO, HCN, DCN, CH<sub>3</sub>CN, HNC, HC<sub>3</sub>N, HNCO, CN, NH<sub>3</sub>, NH<sub>2</sub>, NH<sub>2</sub>CHO, NH, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>, Na, K, O<sup>+</sup>

Og de følgende isotoper:

H<sup>13</sup>CN, HC<sup>15</sup>N

C<sup>34</sup>S

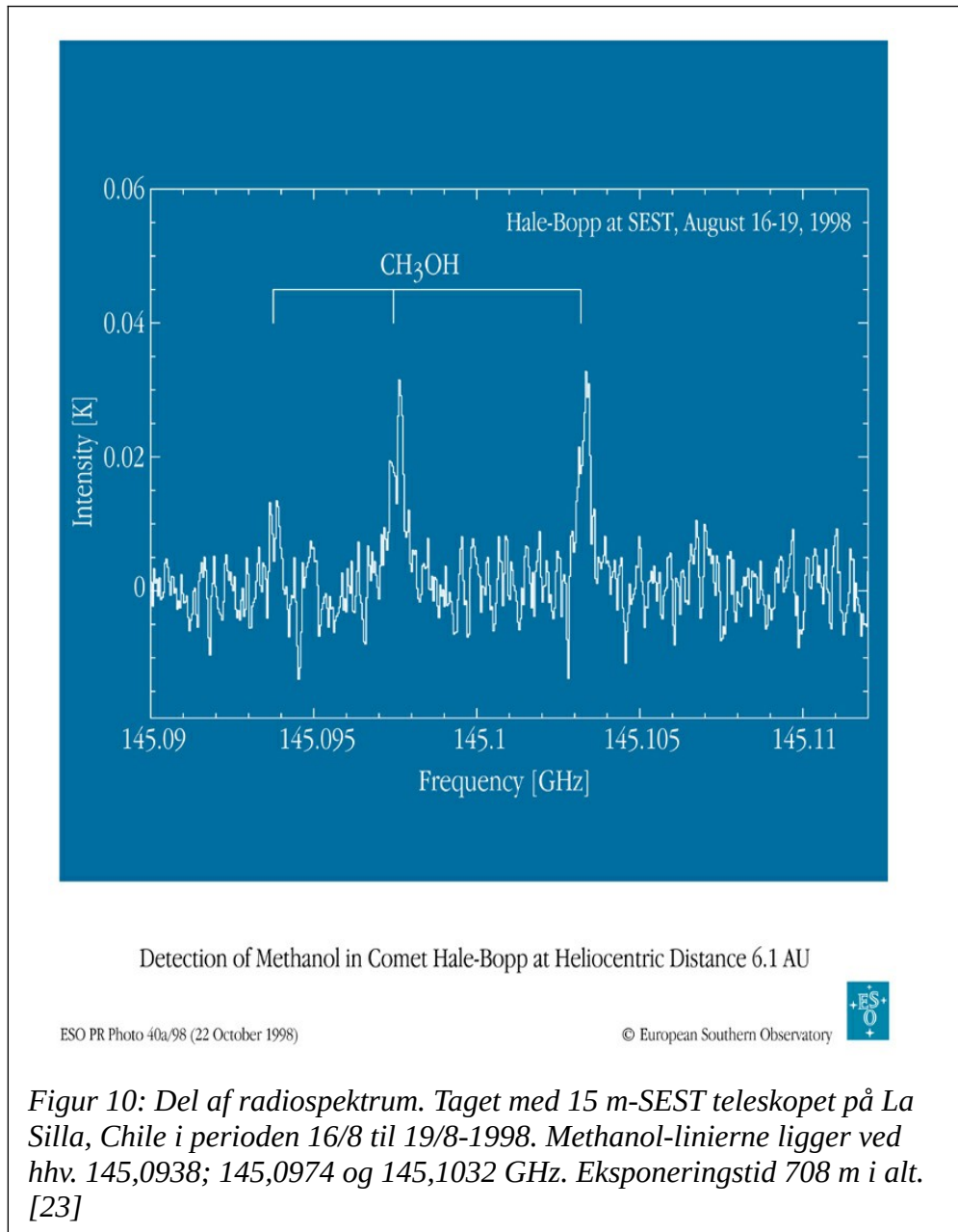
Molekyler fundet i Hale-Bopp. [22]

Når en komet kommer ind i nærheden af Solen, vil Solen varme den op, og den udvikler en såkaldt *coma*, som er en meget stor gassky, der omkranser kometkernen. Comaen kan godt blive op til en million km i diameter. Comaen er en af grundene til, at det er let at observere komet, når de er nær Solen

og dermed nær ved os. Kometen vokser både i størrelse og lysstyrke, og desuden vil solstrålingen

samt solvinden (for eksempel elektroner og protoner) puste til comaen, som derved udstrækkes i en lang hale, som dermed altid peger bort fra Solen. (Se figur 8.)

Hvis man kigger nærmere på billeder af kometer, kan man se at de faktisk har to haler - de har en bred og buet hale, som består af støv, der pustes væk fra comaen, og de har en *ionhale*, som er smallere og peger i en mere lige retning væk fra kometen. Det skyldes, at ionerne er meget lettere end støv-partikler. Støvpartiklerne er relativt tunge og er derfor sværere at skyde væk. Når kometen så bevæger sig igennem sin bane, vil det give en afbøjet støvhale.



Der findes ganske mange forskellige slags molekyler i kometer. F.eks. viser spektret på figur 10, at der er methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) i Hale-Bopp, dvs. træsprit. Der er også vand, kuldioxid, samt kvælstof- og kulstofforbindelser (hydrogencyanid, HCN, for eksempel) foruden støv og andre silikater. Se kassen ovenfor for en mere udtømmende liste. På grund af tilstedeværelsen af vand og kulstofforbindelser er der fremsat hypoteser om, at kometerne er leverandører af vand til Jorden,

samt at de måske også er kilden til livets byggesten - aminosyrerne. Det er dog stadigvæk usikkert, om kometerne er nødvendige for livets opståen.

## 1.4 Keplers love

### 1.4.1 Historien bag lovene

Den tyske astronom og matematiker Johannes Kepler (1571-1630) troede, at Solen måtte være det naturlige centrum i Solsystemet og endda hele Universet. (Andre som for eksempel Thyge Brahe troede, at Jorden var centrum i Solsystemet og Universet.) Denne ide havde Kepler sandsynligvis fået af sin matematik- og astronomilærer, Michael Mästlin, som var overbevist om gyldigheden af 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 figurerne 12 og 14.

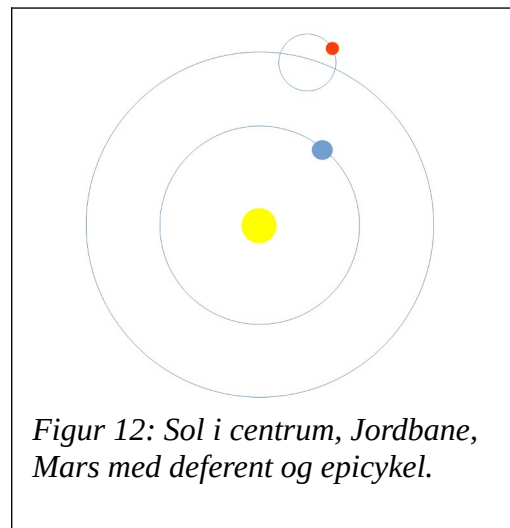


Figur 11: Johannes Kepler. [24]

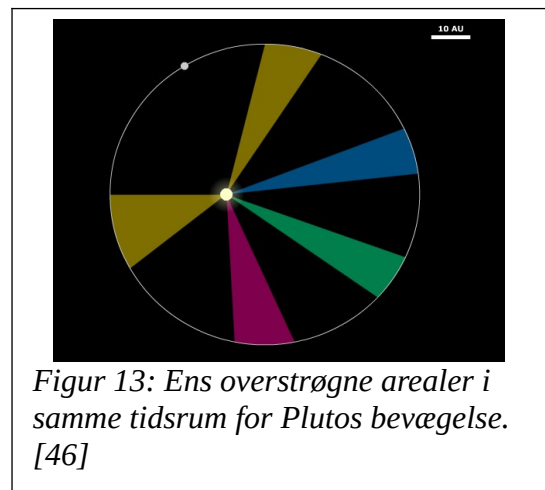
Kepler kom i 1600 til Prag, hvor han sammen med Tycho Brahe arbejdede som hofastronom/astrolog for Kejser Rudolph II, men dette samarbejde varede dog kun et år, da Brahe døde i 1601.

Thyge Brahe havde i årene inden samarbejdet med Johannes Kepler foretaget tidens bedste observationer på både stjerner og planeter, og dette arbejde kom Kepler til gode. I perioden 1600 til 1619 arbejdede Kepler især med at forstå Marsbanen. Dette var heldigt, da netop Marsbanen har den største *eccentricitet*<sup>4</sup> af alle planeterne, hvis man lige ser bort fra den svært observerbare Merkur samt den dengang uopdagede småplanet 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. Oldtidens grækere mente, at gudernes bevægelse, dvs. Solens-, planeternes- og Månens bevægelser, skulle være perfekte, og en cirkelbevægelse var det mest perfekte, man kendte. Man undres måske over, at et kristent Europa holdt så fast på en græsk/hedensk ide, men hellenismen har influeret betydeligt på, hvordan europæiske folk tænkte og tænker.



Figur 12: Sol i centrum, Jordbane, Mars med deferent og epicykel.



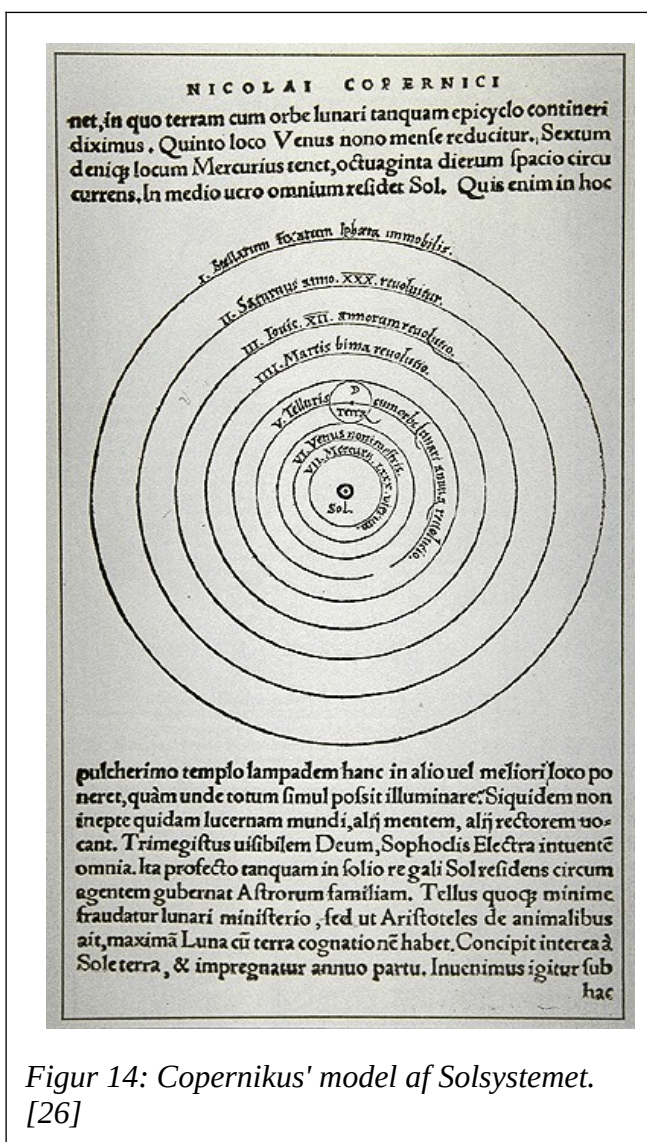
Figur 13: Ens overstrøgne arealer i samme tidsrum for Plutos bevægelse. [46]

4 Eccentricitet fortæller hvor meget en ellipsebane afviger fra en cirkelbane. Den varierer mellem 0 for den rene cirkelbevægelse til 1 for den totalt udstrakte ellipsebevægelse. (Se afsnit 1.5.1.)

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. Dette var en forkert tese, men det lykkedes ham dog alligevel at vise en sammenhæng mellem det areal en planets radiusvektor overstrøger og tidsrummet, det tager. Resultatet blev også offentliggjort i *Astronomia Nova*.



Figur 14: Copernikus' model af Solsystemet.  
[26]

Keplers 2. lov: Radiusvektor, dvs. en imaginær linje der forbinder Solen og planeten, overstryger ens arealer i samme tidsrum. (Se figur 13.)

Det vil altså sige, at planeten har mest fart på, når den i sin bane er nærmest Solen, et punkt som kaldes *perihel*, og den bevæger sig langsomt, når den er længst væk fra Solen, et punkt som kaldes *aphel*. I yderpunkterne gælder specielt at  $v_a \cdot r_a = v_p \cdot r_p$ .

I årene op til 1619 lykkedes det Kepler at koble planeternes omdrejningshastigheder ved aphel og perihel sammen med musikskalaen(!) men et mere vigtigt resultatet er, som beskrevet i *Harmonices Mundi*:

Keplers 3. lov: Kvadratet på omløbstiden divideret med middelfastanden til Solen i tredje potens er lig en konstant. (Middelfastanden er også den halve storakse i ellipsebanen – se afsnit 1.5.1.) De benyttede enheder for tid og længde i formlerne (1) og (2) er AU for længde og yr for tid. Loven kan også skrives som en formel

$$\left(\frac{T}{yr}\right)^2 = \left(\frac{a}{AU}\right)^3 = 1 \quad (1)$$

En moderne version af Keplers 3. lov inkluderer betydningen af planetens masse. Det var Newton, der fandt frem til denne præcisering. Loven lyder

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{m_{\text{planet}} + M_{\text{stjerne}}}{M_{\text{sol}}} \quad (2)$$

Hvis man benytter sig af SI-enheder, skal højresiden ovenfor have en konstant ganget på sig, og så bliver Keplers 3. lov

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G \cdot (M_{\text{sol}} + m_{\text{planet}})}{4 \cdot \pi^2} \quad (3)$$

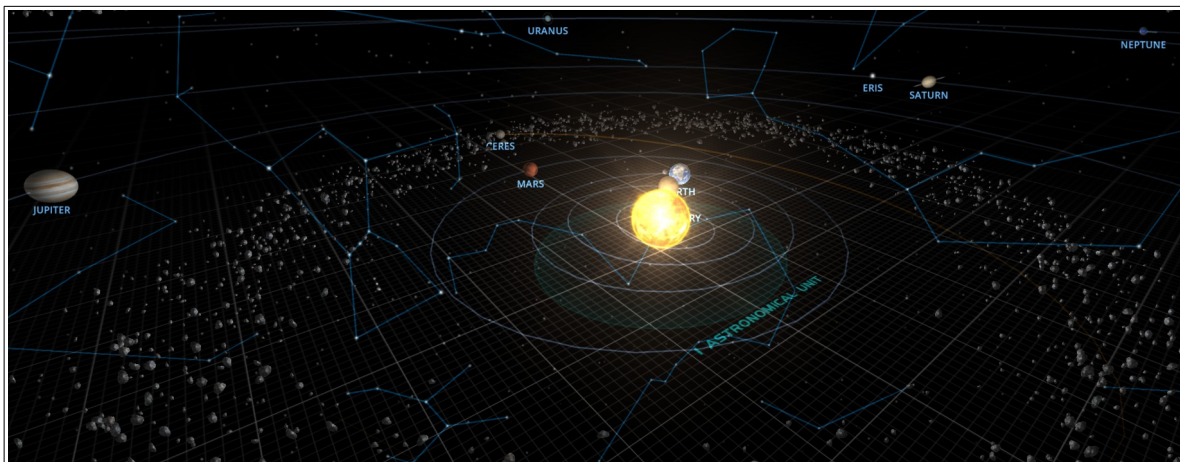
Ovenstående indikerer måske svagt, at Keplers tankegang var baseret på ideen om, at alt i Universet skulle være smukt og harmonisk lige fra musikskalaer til opbygningen af Universet. Denne ide fik Kepler bl. a. fra sin dybt religiøse kalvinistiske overbevisning. Ligeledes afviste han store dele af astrologien, da den ikke kan tilpasses 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 var en vigtig del af fundamentet for 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 en teori for både det himmelske og det jordiske, og teorien er også vigtig for den nuværende teknologi, da den er det teoretiske fundament for at beregne satellitbaner og rumrejser.

Med opdagelsen af Keplers love kunne man nu lave et nyt verdensbillede, hvor Solen er i centrum af verden og planeterne kredser om Solen.

I dag ved vi, at denne model kun tilnærmelsevist er korrekt, da Universet slet ikke har noget centrum.

## 1.5 Celest mekanik



Figur 15: Planeternes position den 1/11 2026. [47]

Celest mekanik – også kaldet stjernemekanik handler om *planetbaner*, og det vil vi opridse i det følgende.

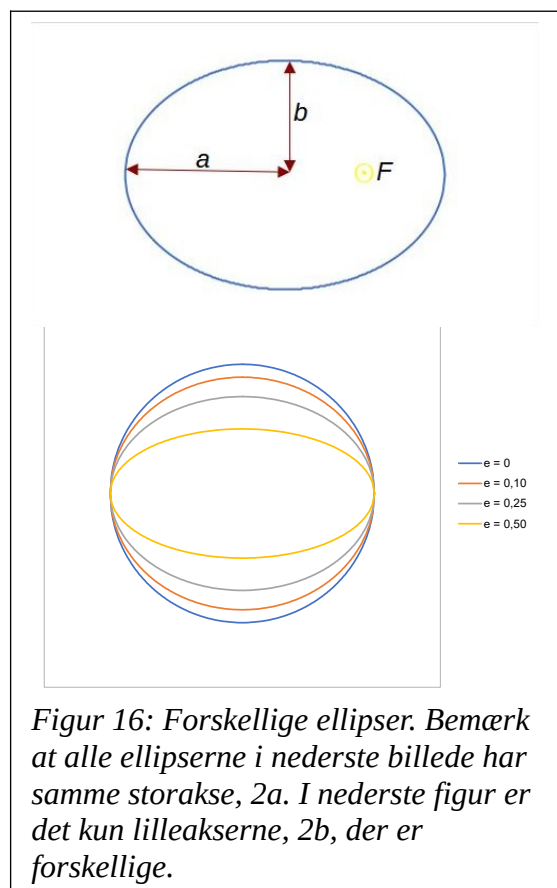
### 1.5.1 Ellipser

Som Kepler fandt frem til, bevæger planeterne sig i ellipsebaner omkring Solen; dette er dog kun tilnærmelsesvist korrekt. For at få perfekte ellipsebaner må der kun være 2 legemer til stede, og der er jo mange legemer i Solsystemet. De påvirker alle sammen hinanden, og derfor bliver planeternes baner heller ikke fuldstændigt ellipseformede.

Til vores formål kan vi dog sagtens bruge Keplers resultater, og derfor er det hensigtsmæssigt at se lidt på de størrelser, der definerer en ellipse og samtidigt nævne nogle af resultaterne fra den celeste mekanik. En grundig gennemgang kræver en større matematisk- og fysisk baggrundsviden, så i gennemgangen vil vi springe over hvor gærdet er lavest.

Betragt figur 16. Der er tegnet 1+4 ellipser. På første ellipse er de halve lille- og storakser,  $a$  og  $b$ , indtegnet. Derudover er det ene *brændpunkt*,  $F$ , angivet. Brændpunktet (eller fokus) kan forstås som det punkt lysstråler ville samles i, hvis et parallelt strålebundt blev sendt ind på siden af et spejl, hvis form er som ellipsen.

*Eccentriciteten*,  $e$ , er et mål for hvor oval ellipsen er. Den går fra 0 ved cirkler til 1 for den fuldstændigt udstrakte ellipse. (Altså en linie.) Eccentriciteten er defineret som:



Figur 16: Forskellige ellipser. Bemærk at alle ellipserne i nederste billede har samme storakse,  $2a$ . I nederste figur er det kun lilleakserne,  $2b$ , der er forskellige.

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (4)$$

Afstanden fra brændpunktet til det nærmeste punkt på ellipsen kaldes *pericenterafstanden*,  $r_p$ , og det fjerneste punkt kaldes for *apocenterafstanden*,  $r_a$ . Apo- og pericenterafstandene kan bestemmes vha. følgende formler:

$$r_a = a \cdot (1 + e) \text{ og } r_p = a \cdot (1 - e) \quad (5)$$

I Solsystemet er apocenter omdøbt til aphel, og pericenter er omdøbt til perihel, da legemerne kredser om Solen – helion på græsk.

### 1.5.2 Mekanisk energi samt banehastighed af en planet

Alle ellipserne på figur 16 har samme halve storakse, men forskellige lilleakser. De to akser er nøje forbundet med to fysiske størrelser – *energien* og *impulsmomentet*. Energien bestemmer længden af den halve storakse, mens impulsmomentet bestemmer, hvor udstrakt ellipsen er.

Den mekaniske energi er negativ og konstant. Den er en sum af de 2 legemers kinetiske energier samt deres indbyrdes potentielle energi. For eksempel vil systemet bestå af en planet med massen,  $m$ , i afstanden,  $r$ , fra Solen, som har massen,  $M$ , have den mekaniske energi:

$$E_{mek} = E_{kin} + E_{pot} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 - \frac{G \cdot m \cdot M}{r} \quad (6)$$

Solens kinetiske energi er væsentligt mindre end planetens, da dens hastighed er meget mindre, så derfor udelades den kinetiske energi for Solen ofte. Ovenfor skal tal indsættes i SI-enheder. Gravitationskonstanten  $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ .

Minusset i fortegnet for udtrykket for den potentielle energi skyldes, at man selv kan vælge nulpunkt for den potentielle energi. Med minusset har man valgt fortegnet sådan, at hvis et legeme har en negativ mekanisk energi, betyder det, at det er bundet til systemet. Hvis  $E_{mek} \geq 0$  er legemet frit. Det viser sig ydermere, at hvis  $E_{mek} < 0$  er banen en ellipse, hvis  $E_{mek} = 0$  er banen en parabel og hvis  $E_{mek} > 0$  er banen en hyperbel. Hvis energien går mod nul går den halve storakse mod uendelig. Impulsmomentet for en given bane kan skrives som

$$\vec{L} = m_{planet} \cdot \vec{r}_{planet} \times \vec{v}_{planet} + m_{sol} \cdot \vec{r}_{sol} \times \vec{v}_{sol} \quad (7)$$

Impulsmomentet er konstant ligesom energien.

Formen af ellipsebanen angives ved eccentriciteten, og sammenhængen mellem eccentriciteten og impulsmomentet er givet ved følgende formel

$$e = \sqrt{1 + \frac{2 \cdot E_{mek} \cdot L^2}{(G \cdot M_{sol} \cdot m)^2} \cdot \mu} \quad (8)$$

Ovenfor er  $\mu = m_{\text{planet}} \cdot m_{\text{Sol}} / (m_{\text{planet}} + m_{\text{Sol}})$ . Størrelsen kaldes den reducerede masse.

### 1.5.3 Virialteoremet

Virialteoremet udtrykker, at for et himmellegeme kun påvirket af Solen, er summen af det dobbelte af den gennemsnitlige kinetiske energi + den gennemsnitlige potentielle energi = 0. Eller på formelsprog

$$2 \cdot \langle E_{\text{kin}} \rangle + \langle E_{\text{pot}} \rangle = 0. \quad (9)$$

Den gennemsnitlige potentielle energi beregnes ved afstanden  $r = a$ , som er den halve storakse.

Hvis vi benytter formlerne (6) og (9) ved at bortsubstituere den kinetiske energi får vi

$$E_{\text{mek}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \langle E_{\text{kin}} \rangle + \langle E_{\text{pot}} \rangle = -\frac{1}{2} \langle E_{\text{pot}} \rangle + \langle E_{\text{pot}} \rangle = \frac{1}{2} \langle E_{\text{pot}} \rangle \quad (10)$$

Dvs. vi kan nu indsætte  $a$  på  $r$ 's plads i udtrykket for potentiel energi i formel (6), og så får vi

$$a = \frac{-G \cdot m \cdot M}{2 \cdot E_{\text{mek}}}. \quad (11)$$

Dvs. banens halve storakse afhænger kun af den mekaniske energi.

### 1.5.4 Farten af et legeme der bevæger sig i en ellipsebane

Ud fra (6) og (11) kan vi anføre den mekaniske energi som:

$$E_{\text{mek}} = \frac{-G \cdot m \cdot M}{2 \cdot a} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 - \frac{G \cdot m \cdot M}{r} \approx \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 - \frac{G \cdot m \cdot M}{r}$$

Det er nu muligt at bestemme isolere hastigheden i en ellipsebane for en given afstand,  $r$

$$v = \sqrt{G \cdot M \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} \quad (12)$$

Er banen en parabel sættes  $a$  til uendelig. Er banen en hyperbel duer formlen ikke. Man skal benytte SI-enheder til formlerne 6-12.

### 1.5.5 Newtonsk udledning af Keplers 2. og 3. lov

Hvis man er interesseret i hvordan fysiske teorier bliver lavet, kan man læse om Newtons udledning af bevægelsesligningerne for 2-legeme-systemet. Noter *To-legemeproblemet* gennemgår teorien. Den findes på <https://astro-gym.dk/Tekster>.

Noten gennemgår også, hvordan Newton kunne udlede Keplers love ved hjælp af sin mekanikteori fra 1687. Det er naturligvis ikke overraskende, at Newton kunne gøre dette, da han anvendte Keplers 3 love som en del af fundamentet for sin nye teori – derfor skulle teorien naturligvis også gengive Keplers love.

### 1.5.6 Opgave Marsbanen. [27]

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

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 365,256 døgn og 2 omløb 730,512 døgn. Hvis derfor Mars observeres et sted i sin bane, vidste han, at det ville tage 687 døgn, før den var samme sted i sin bane, selvom den fra Jorden ikke så ud til at være samme sted på himlen (se figur 17). 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 Thyge 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 bueminutter<sup>5</sup> fra forårspunktet), samt Mars' position på himlen, set fra Jorden (den geocentriske længdegrad - også i grader og minutter fra forårspunktet).

	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 derved Marsbanens form.

#### Fremgangsmåde

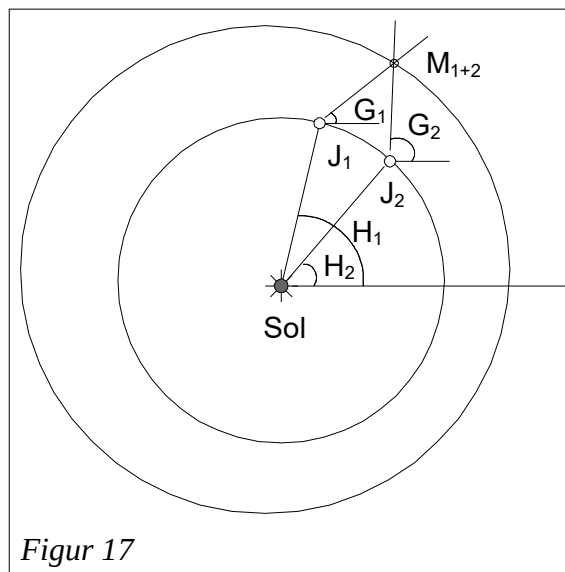
Til denne øvelse skal du bruge mm-papir, en spids blyant, en passer, en lineal, en vinkelmåler, samt knappenåle og sytråd (til at tegne ellipsen).

På midten af mm-papiret skal du tegne en cirkel med en radius på 5 cm. Fra midten og mod højre tegnes 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,  $J_1$  og  $J_2$  ud fra vinklerne  $H_1$  og  $H_2$  i tabellen. Marker derefter retningerne til Mars i hver af Jordens positioner, ved hjælp af vinklerne  $G_1$  og  $G_2$ , afsat med Jorden som centrum og med  $0^\circ$  langs retningen til forårspunktet

<sup>5</sup> 1 bueminut, som skrives 1' svarer til  $1^\circ/60$ .

(parallelt 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. approksimation til Mars bane. Vi vil nu vise, at en ellipse tilnærmer banen endnu bedre.

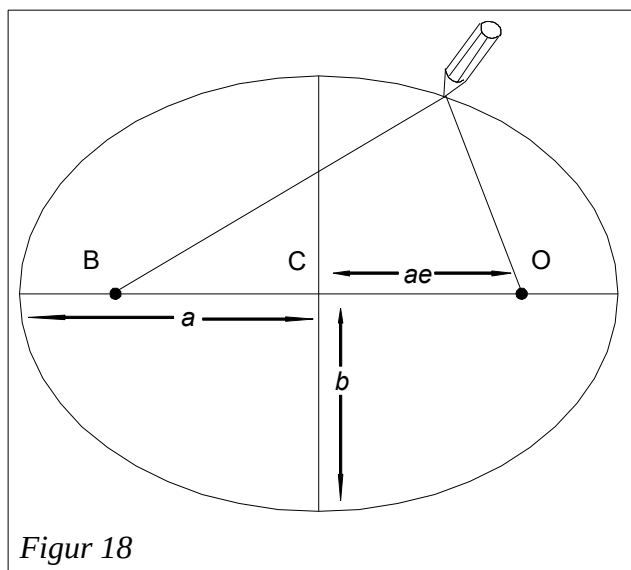
Ellipsens parametre angives ved storaksen,  $a$ , lilleaksen,  $b$ , og eccentriciteten,  $e$ . Storaksen kan findes som halvdelen af afstanden mellem perihel- og aphelpunktet. Linjen gennem P og A angiver storaksen. Eccentriciteten kan findes som forholdet mellem afstanden fra Solen til C og storaksen. Altså

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

Endelig kan vi beregne lilleaksen ud fra formel (4).

Mål med linealen længderne  $AP$  og  $OC$  og beregn størrelserne  $a$ ,  $b$  og  $e$ . Omregn  $a$  og  $b$  til astronomiske enheder ( $1 \text{ AU} \sim 5 \text{ cm}$ ).

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, for længden må ikke ændres. Undersøg om ellipsen giver en bedre tilnærmelse til banepunkterne.

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

### 1.5.7 Opgave. Mars' banekonstanter

- Find Mars' og Solens masse samt Mars' middelfasthed til Solen. Beregn den mekaniske energi for Mars.
- Beregn Mars' omløbstid ved hjælp af Keplers 3. lov.
- Find Mars' eccentricitet i en tabel (eller benyt dit resultat fra Marsopgaven) og beregn impulsmomentet for Mars.
- Tegn en graf over Mars' banehastighed, som funktion af afstand. (Du kan finde intervallet af afstande ved at bruge formlerne (5).)

### 1.5.8 Opgave. Kometnedslag

Kometen Hale-Bopp er lavet af is og grus, og den kan antages kugleformet. Diameteren af kometen er ca. 40 km. Densiteten  $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ .

Kometen bevæger sig tilnærmelsesvist på en ellipsebane med  $e = 0,9951$  og en hel storakse på 58 mia km, og farten til et vilkårligt punkt i en ellipsebane omkring Solen kan beskrives ved hjælp af formel (12).

- Skitser banebevægelsen og indtegn storaksen.
- Opstil et udtryk for kometens kinetiske energi udtrykt ved kometens diameter,  $d$ , den halve storakse,  $a$ , massefylden af kometen,  $\rho$ , Solens masse,  $M_\odot$ , gravitationskonstanten,  $G$  samt afstanden fra Solen. (NB: Ret svært spørgsmål.)
- Hvor stor er kometens kinetiske energi, når den befinder sig i afstanden 1 AU?
- Antag at Jorden står stille, og at kometen og Jorden kolliderer. Beregn den energimængde, der afsættes ved nedslaget.
- Angiv energien i enheder af "Hiroshima-atombomber." (Energien af den bombe, som blev smidt over Hiroshima frigav 80 TJ.)

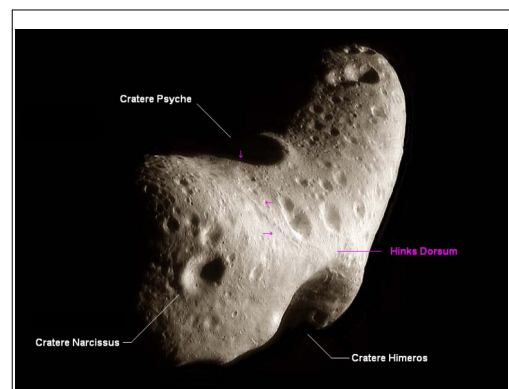
### 1.5.9 Opgave. Rumsonden NEAR. [28]

Den amerikanske rumsonde NEAR har i perioden februar 2000 til februar 2001 kredset omkring asteroiden Eros og grundigt kortlagt dens overflade. Den 12. februar 2001 blev NEAR den første rumsonde, der landede på en asteroide. For Eros bane om Solen gælder følgende banedata  $r_a = 1,783 \text{ AU}$  og  $r_p = 1,133 \text{ AU}$ .

- Beregn banens halve storakse og excentriciteten.
- Beregn omløbstiden for Eros.

I aphel har Eros en fart på 19,7 km/s.

- Beregn farten i perihel.



Figur 19: Asteroiden EROS. [59]

Vi tænker os, at NEARs raketmotorer blev slukket i en højde af 100 meter over overfladen på et tidspunkt, hvor NEAR var i hvile i forhold til Eros. Tyngdeaccelerationen på Eros kan sættes til  $0,01 \text{ m/s}^2$ .

- d) Beregn faldtiden for NEAR og den fart, hvormed den når overfladen. Du kan bruge formlen her til at finde tiden:  $\Delta s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$ .

### 1.5.10 Opgave. Giacobini-Zinner. [28]

Kometen Giacobini-Zinner blev opdaget i år 1900 og i 1985 udforsket af en amerikansk rumsonde. Kometen har en omløbstid på 6,6 år, og dens aphelafstand er 6,0 AU.

- Beregn banens halve storakse samt perihelafstanden.
- Beregn banens eccentricitet og skitser kometbanen.

### 1.5.11 Opgave. Jordens fart

Antag at Jorden bevæger sig i en cirkelbevægelse med konstant fart. Benyt tabellen på næste side til at beregne den hastighed, som Jorden bevæger sig med rundt om Solen.

### 1.5.12 Opgave. Størrelsesforhold i Solsystemet

For at få en fornemmelse for Solsystemets størrelse kan det være nyttigt at lave en model over systemet. Man kan lave forskellige modeller:

- En fuldstændig skalatro model over planetsystemet hvor man også tager højde for Solens- samt planeternes diametre. (Denne model kræver en kilometerlang sti.)
- En opdeling af Solsystemet i et indre- og et ydre system.
- Man kan undlade at tage højde for Solens og planeternes indbyrdes størrelsesforhold og kun fokusere på planetbanerne.

På næste side findes en tabel med de relevante data.

- Vælg en af modellerne, der er nævnt ovenfor.
- Udmål det længste område, du kan finde på din skole.
- Bestem en passende skalafaktor for din model.
- (Ej nødvendigt ved model c). Benyt kugler til at repræsentere planeterne. Du kan bruge alt fra kuglelejer til pilatesbolde. Anbring boldene i de afstande, du har regnet dig frem til.

	Middelfstand fra Solen AU	Middelfstand fra Solen 10 <sup>6</sup> km	Diameter km	Siderisk omløbstid År	Banens excentricitet	Baneplanens vinkel med ekliptikas plan °
Merkur	0,387	57,9	4879	0,241	0,2056	7,00
Venus	0,723	108,2	12104	0,615	0,0068	3,39
Jorden	1,000	149,6	12742	1,000	0,0167	0,0
Mars	1,524	228,0	6779	1,881	0,0934	1,85
Jupiter	5,203	778,3	139822	11,862	0,0484	1,31
Saturn	9,539	1427,0	116464	29,458	0,0557	2,49
Uranus	19,18	2869	50724	84,014	0,0472	0,77
Neptun	30,06	4497	49244	164,793	0,0086	1,78
(Pluto)	39,44	5900	2390	248,43	0,250	17,17
Solen			1392000			

### 1.5.13 Opgave. Afstandsskalaer

Åbn programmet "Scale of the Universe 2", som findes på adressen <http://htwins.net/scale2/> og besvar nedenstående spørgsmål.

- Hvilke længdeskalaer er naturlige at bruge, når vi undersøger
  - atomer
  - atomkerner
  - stjerner
  - galakser
  - afstanden mellem galakser



Figur 20: M51, også kaldet Whirlpoolgalaksen. [31] Dens afstand til Mælkevejen er 7,27 Mpc. (Afstanden er dog usikkert bestemt.) [41]

- Info om partikler.  
På webstedet kan man trykke på de forskellige legemer, og så angives data for dem.
  - Hvor stor er en kvark?
  - Hvor stor er en neutrino?
  - Hvad er massefylden af en U-238 kerne?
  - Hvor stor er et brintatom samt en proton?
  - Hvis protonen skaleres op til Jordens størrelse, hvor langt væk skal elektronen så være?

## 2 Liv i Solsystemet og rummet i øvrigt

### 2.1 Indledning

Mennesker overalt fra alle kulturer og religioner stiller før eller siden sig selv spørgsmålet om, der findes liv andre steder end på Jorden. Som nedenstående argumenter antyder, spiller det ikke nogen større rolle, om man er religiøs eller ej, for at kunne svare ja til spørgsmålet.

Hvis man antager, at livet er blevet dannet ved en tilfældighed, er det logisk også at antage, at livet er dannet i andre stjernesystemer ved tilfældighedernes spil. Bare mulighederne er til stede, skulle livet kunne udvikle sig. Da der alene i Mælkevejen er milliarder af stjerner, der er tilstrækkeligt isolerede til at have mulighed for stabile planetsystemer, og da der findes i hvert fald 125 milliarder galakser, så skulle der nok også være mulighed for, at livet er opstået på flere planeter i Universet. [48]

Hvis man ikke tror på tilfældighederne i livets opståen, men hælder til en skabelse lavet af en højere intelligens, kan man alligevel godt formode, at livet findes mange andre steder. For hvorfor skulle Gud/Skaberens lave så mange galakser/stjerner/planeter og så kun sætte liv på en eneste? Dette ville forekomme som en ren ødslen med plads.

Et er at føre rundbordsdiskussion om, der findes liv på andre planeter, noget andet er at kigge efter på en nogenlunde fornuftig måde. Enhver kan jo forestille sig, at det er umuligt at undersøge alle stjernesystemer hele tiden, og det er med vores teknologi også umuligt at rejse ud til de andre stjernesystemer og kigge efter. Eftersom der er 1,31 pc<sup>6</sup> til vores nærmeste nabo, Proxima Centaurus, vil det tage i størrelsesordenen 100 000 år for et rumskib at flyve derud, hvis man bruger almindelige raketter. (Med ion-motorer går det hurtigere – så er rejsetiden ca. 10 000 år.)

At lede efter ekstraterrestrielt<sup>7</sup> liv synes som en formidabel opgave, men alligevel er der forskere, der har sat opgaven i system, og de har dermed dannet en ny videnskabsgren – *astrobiologien*.

### 2.2 Astrobiologi

Nedenstående er et ekstrakt af NASA's egen forklaring på, hvad astrobiologi er. Interesserede kan læse mere på adresserne [astrobiology.nasa.gov](http://astrobiology.nasa.gov) samt [www.seti.org](http://www.seti.org). De spørgsmål, der i astrobiologien ønskes besvaret, er:

1. Hvordan opstår og udvikler liv sig?
2. Eksisterer der liv andre steder i Universet?
3. Hvad indeholder fremtiden for livet på Jorden og uden for Jorden?

I dag er der opdaget tusinder af exoplaneter, man har opdaget, at livet set under et er langt mere levedygtigt end hidtil antaget (se tabel 3 på næste side for eksempler på særligt levedygtige organismer - de såkaldte ekstremofiler), der er tydelige spor efter vand på Mars og andre kloder; livet på Jorden opstod for ca. 3,8 milliarder år siden, dvs. 'kun' ca. 700 millioner år efter, at Solsystemet blev dannet, og livsformer fra Jorden kan overleve i flere år i rummet uden særlig beskyttelse. Derfor må der også være basis for at fremkomme med tesen, at liv også er muligt at finde andre steder end her på Jorden.

<sup>6</sup> 1 pc = 3,26 lysår =  $3,086 \cdot 10^{16}$  m.

<sup>7</sup> Ekstraterrestrielt = udenfor Jorden.

Liv på grænsen	
Sted/tilstand	Livsform
Varmeste, 113 °C, (Vulkanø, Italien.)	Pyrococcus furiosus
Koldeste. (Antarktis.)	Cryptotendolithotrophs
Dybste, 3,5 km. (Landområder.)	Bakterier fundet i underjordiske klipper.
Sureste miljø, pH < 0.	Uklassificerede organismer voksende på materialer i huler.
Mest alkaliske miljø, pH > 11.	Alkaliphiliske bakterier.
Højeste strålingsmiljø, 50 kGy	Deinococcus radiodurans.
Ubekyttet i rummet, 6 år.	Bacillus subtilis.
Længste rejse ubeskyttet, Kamera på Månen. (3 år).	Streptococcus mitis.
Længste dvaletilstand, 20-40 Myr. Fundet i tarm på rav-indhyllet bi.	Bakterier.
Dybtest og højeste tryk, $p = 1200$ atm. (Marianer-graven.)	Dybhavsdyr.
Mest salte område, 30 % saltkoncentration.	Halophiliske bakterier.

Tabel 3. Eksempler på ekstremofile – bakterier, der kan overleve i omgivelser, man ikke normalt forbinder med at kunne opretholde liv.

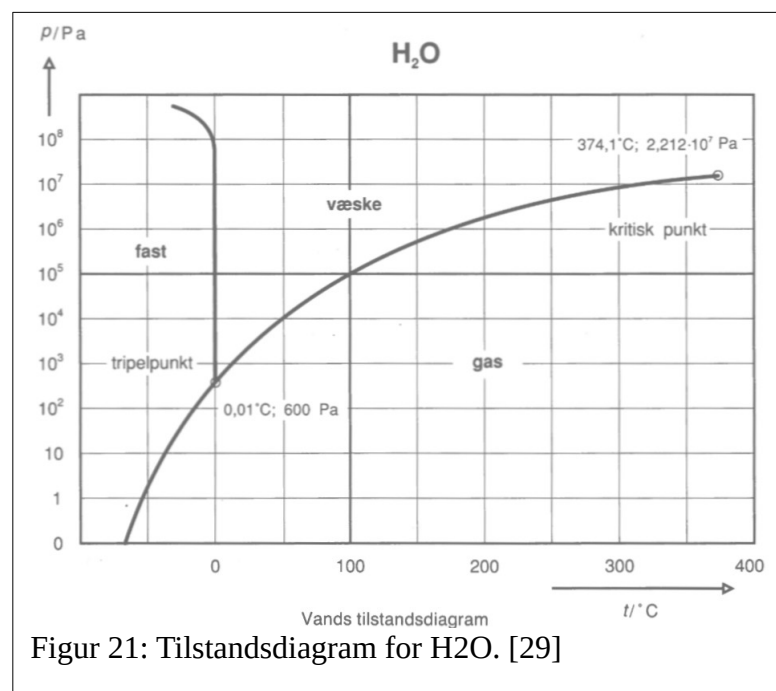
En biologisk tilgang til astrobiologien<sup>8</sup> er gennemgået i noten *Astrobiologi af Vagn Kjeldsen*. (Se noten på [astro-gym.dk](http://astro-gym.dk).)

## 2.3 Betingelser for liv

### 2.3.1 Flydende vand

For at celler, som vi kender dem, skal kunne eksistere, skal de have et opløsningsmiddel at fungere i. Her på Jorden er vand det oplagte opløsningsmiddel, fordi der findes store mængder af det i Jordens lithosfære, og vandmolekyler er polære, dvs. de ødelægger ikke fedtceller, som cellemembraner er lavet af.

Vi kender normalt vand som værende flydende i temperaturintervallet 0-100 °C. Dette er dog under forudsætning af, at trykket er omkring 1 atm. (1 atm = 1013 hPa.) Som figur 21 viser, kan vand være flydende ved andre temperaturer end i intervallet 0-100 °C, såfremt det findes under andre tryk.



Af figuren kan man se, at vand kan være flydende fra omtrent -25 °C (Tryk omkring 0,7 GPa) og op til 374,1 °C. (Ved trykket 22,12 MPa.) Til højre for det kritiske punkt, opfører vand sig anderledes, og det vil vi ikke se på her.<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Man kan nok med nogen ret sige, at ægte astrobiologi kræver inddragelse af biologi.

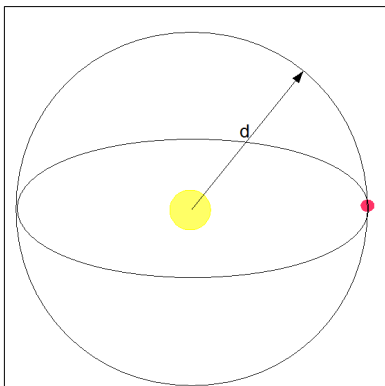
<sup>9</sup> På smeltegrafnen står temperaturen 0,01 °C anført – den gælder ved 600 Pa. Ved 1013 hPa er temperaturen faldet til 0,0 °C. (Smeltegrafnen hælder med hældningstallet  $-1,29 \cdot 10^7$  Pa/K.)

### 2.3.2 Livszonen

Solen eller en anden stjernes tilsyneladende lysstyrke,  $F$ , aftager som afstandskvadratloven, der er vist på figur 22. Fluxen ved planeten kaldes for *solar konstanten*, og den kan beregnes ved hjælp af formlen

$$F = \frac{L}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (13)$$

For Solen er  $L = 3,846 \cdot 10^{26}$  W.



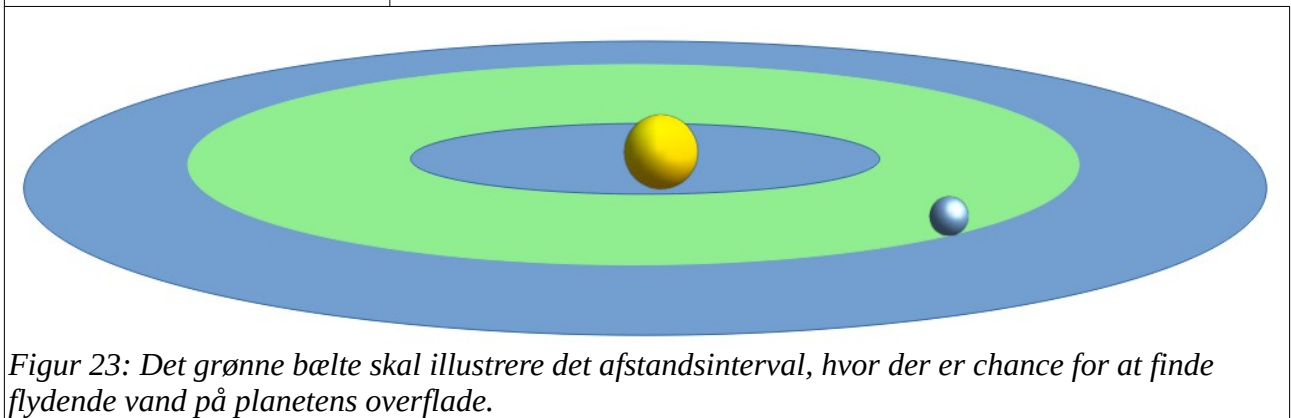
Figur 22: Solens effekt fordeles på et kugleformet areal, hvis radius  $d$  bestemmes af planetens afstand til Solen.

Man definerer det afstandsinterval fra Solen – eller en anden stjerne, hvor chancen for at finde flydende vand er til stede for *livszonen*. For en planet med en atmosfære som Jordens, forventer man at solar konstanten må variere i intervallet

$$F \in [800; 1700] \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (14)$$

I dag er solar konstanten målt til  $1368 \text{ W/m}^2$ . Hvis atmosfæren på en exoplanet er anderledes end Jordens kan tallene variere meget. Faktisk er der forskere, der mener, at fluxintervallet kan ligge i intervallet  $[14; 9470] \text{ W/m}^2$ . [57]

Livszonen kan illustreres som vist på figur 23.



Figur 23: Det grønne bælte skal illustrere det afstandsinterval, hvor der er chance for at finde flydende vand på planetens overflade.

### 2.3.3 Atmosfærestabilitet

Foruden flydende vand skal en atmosfære også være stabil. Dvs. trykket, densiteten og temperaturen skal være ret konstante. Sollyset vil langsomt fordampe en atmosfære, hvis ikke den får tilført nyt materiale. Denne tilførsel kan for eksempel ske ved jordskælv og vulkanudbrud, hvor gas fra planetens indre kan tilføres atmosfæren.

Gasmolekylerne i atmosfæren bevæger sig med forskellige hastigheder, og hastighederne er fordelt efter en såkaldt *Maxwell-fordeling*, dvs. der vil næsten altid være nogle molekyler som bevæger sig så hurtigt, at de kan forlade atmosfæren. Jo varmere atmosfæren er, des flere kan forlade den. Det viser sig, at gennemsnitshastigheden af gasmolekylerne er givet ved formlen

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_m^2 = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \Leftrightarrow v_m = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}} = 158 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{\frac{T}{m(u)}} \quad (15)$$

Ovenfor er Boltzmanns konstant  $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K.

Det kan vises, at betingelsen for at en atmosfære er stabil, kræver at følgende sammenhæng mellem middelhastigheden,  $v_m$ , af molekylerne og deres undvigelseshastighed,  $v_e$ , skal være opfyldt

$$v_m < \frac{1}{6} \cdot v_e = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}, \quad (16)$$

hvor  $G = 6,674 \cdot 10^{-11}$  Nm<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>,  $M$  er planetens masse, og  $R$  er dens radius. (Alt indtastes i SI-enheder.) [28]

### 2.3.4 Kulstofkredsløbet

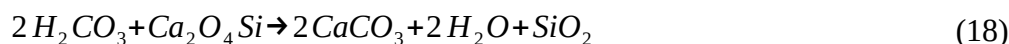
For livet her på Jorden sørger atmosfæren for, at der er en nogenlunde konstant mængde kuldioxid i vores atmosfære – i hvert fald hvis tidsskalaen ligger i størrelsesordenen nogle få tusinde år.

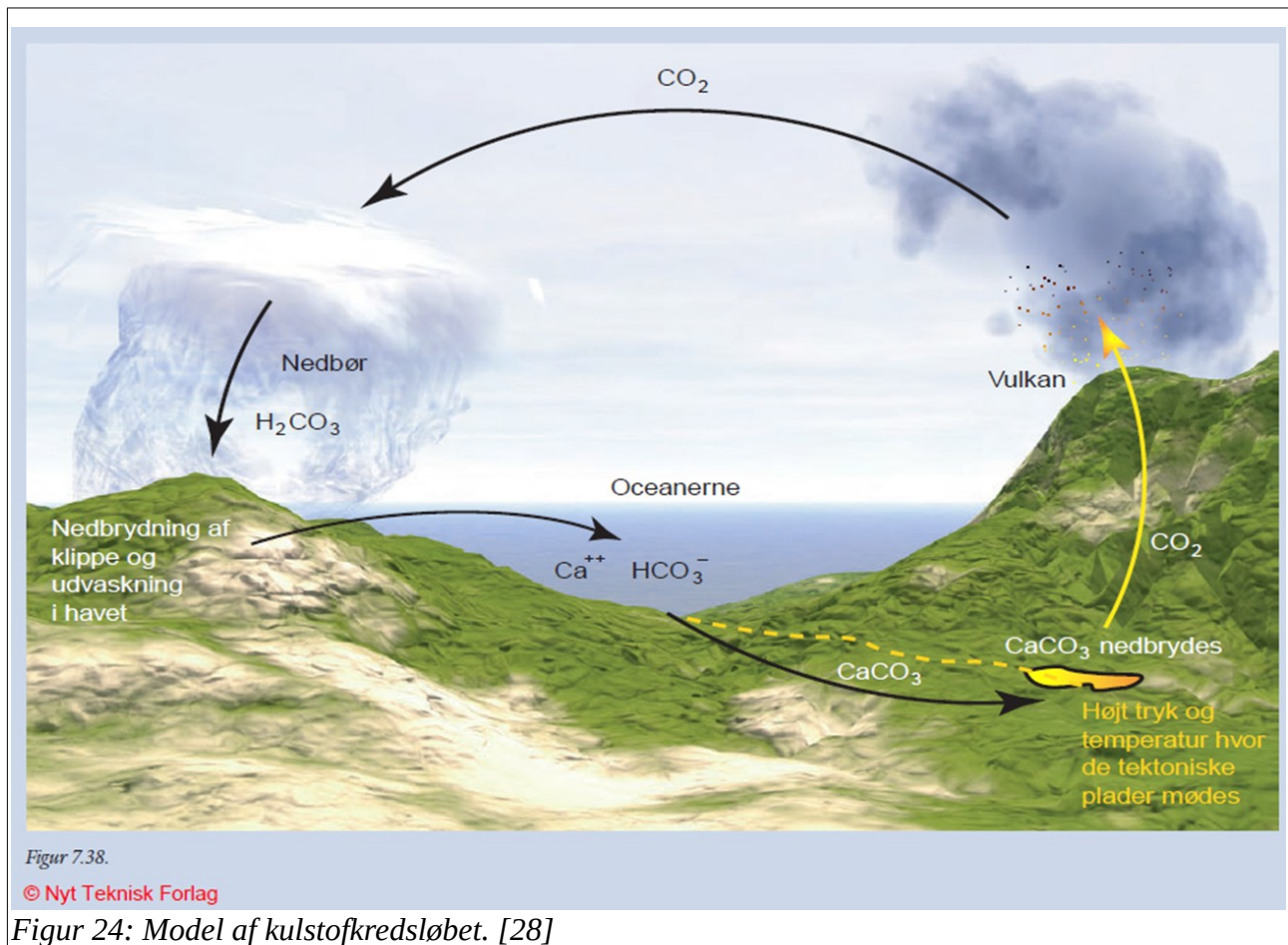
Betragt figur 24. En vulkan udspyr aske og røg, som indeholder CO<sub>2</sub>. Kuldioxiden reagerer med vandet, som findes i atmosfæren. Dermed laves kulsyre. Reaktionsskemaet ser ud som vist herunder.



Kulsyren kan regne ned på enten jordoverfladen eller i havet. Rammer den jordoverfladen kan den reagere med f. eks. kalciumsilikat. Processen kan gå to veje, og danne kalciumcarbonat, CaCO<sub>3</sub>, og/eller en form for kiselsyre, H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>. [51].

Reaktionsskemaerne er vist nedenfor.





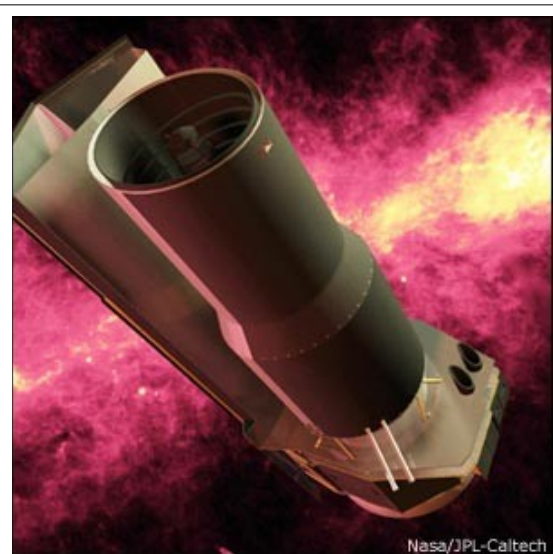
Figur 24: Model af kulstofkredsløbet. [28]

Hvis kulsyren rammer havet, dannes hydrogencarbonat, hvis reaktionskema står nedenfor.



Kalciumkarbonaten findes på ion-form i vandet, og Ca<sup>++</sup> kan bruges af plankton og alger til at bygge skeletter. Kuldioxidet i hydrogenkarbonatet eller kulsyren kan planter på land og i vandet bruge til at danne kulstofforbindelser. Når plantelivet dør, kan det presses ned under jordoverfladen og danne hydrocarboner, dvs. gas, olie og kul, som kan lagres i millioner af år – med mindre mennesket altså graver dem op og forbrænder dem og derved ændrer i kulstofkredsløbet.

Interesserede kan læse mere om kulstofkredsløbet i [51].



Figur 25: NASA har lavet Spitzer Space Telescope. Et infrarødt observatorium. [31]

## 2.4 Bestemmelse af temperatur og tryk på fremmede kloder

### 2.4.1 Satellitmålinger

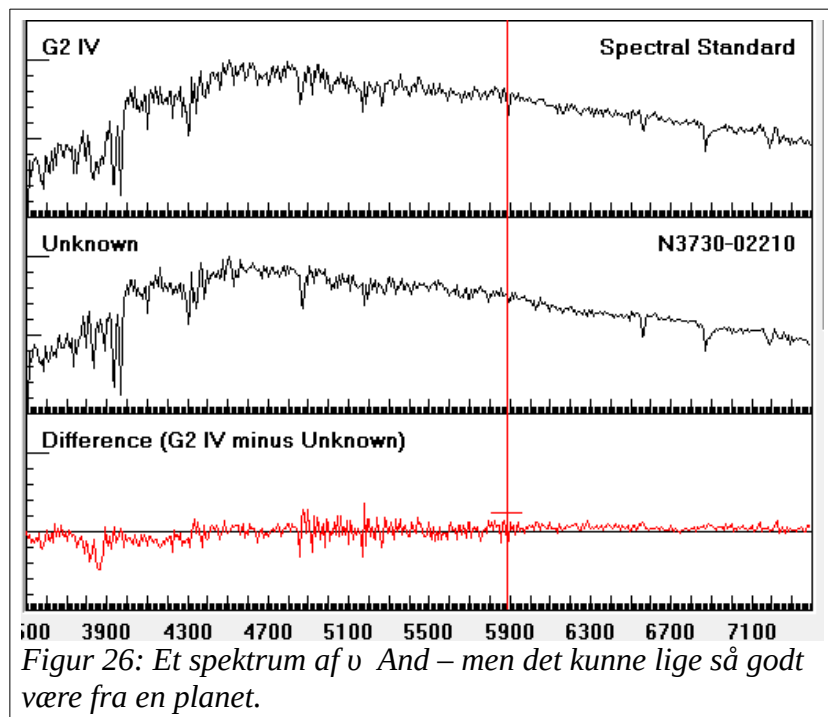
Her på Jorden er det ret nemt at måle tryk og temperatur, da vi let kan anbringe et barometer og et termometer i de områder, vi vil udforske. Men hvordan gør man på fremmede kloder?

Svaret for Solsystemets planeter er i princippet indlysende simpelt – man bygger en rumsonde, som flyver hen til de ønskede planeter, og så måler man parametrene, hvorefter resultaterne sendes tilbage til Jorden. På den måde kender vi allerede data for flere af Solsystemets planeter og Måner. Se tabel 4.

Hvis man derimod vil bestemme tryk og temperatur for kloder udenfor Solsystemet, kan man med vores teknologi ikke flyve måleudstyr derhen. Derfor må man ty til andre metoder. Man kan for eksempel måle temperaturen på en fjern planet vha. kikkerter. Således har Spitzer Space Telescope f.eks. målt dag- og nattemperaturer på en Jupiterlignende planet,  $\epsilon$  And b, (udtales: ypsilon andromedae b) omkredsende stjernen  $\epsilon$  Andromeda.

Der er fundet 3 planeter om denne stjerne, og de hedder  $\epsilon$  And -b, -c, -d. Metoden går ud på at måle det infrarøde lys, som planeten udsender. Hvis man måler det igennem et gitter eller et prisme, opspaltes lyset ved diffraktion eller brydning til et spektrum. Hvis man analyserer spektrallinjernerne, kan man bestemme temperaturen. Se figur 26.

Resultatet for planeten var, at dens atmosfæretemperatur varierede med over 1400 °C mellem nat og dag! Dvs. vi med sikkerhed kan sige, at liv, som vi kender det, slet ikke har en chance på den klode. [32]



Figur 26: Et spektrum af  $\epsilon$  And – men det kunne lige så godt være fra en planet.

At måle temperatur og tryk i en exoplanetatmosfære kan som sagt ske ved, at man analyserer spektrallinjernerne<sup>10</sup> fra lyset, som atmosfæren udsender. Denne teknologi bruges allerede nu for stjerneatmosfærer. Efterhånden som den teknologiske udvikling giver bedre måleudstyr, vil man sikkert engang i fremtiden kunne måle temperatur og trykforhold på planeter langt fra vores solsystem.

Læseren kan f. eks. besøge James Webb-teleskopets [hjemmeside](#) og læse mere om teleskopet og dets resultater.

10 Læs mere her: <http://www.faqs.org/faqs/astrophysics/faq/part7/section-3.html>

(Små)Planet/månenavn	Atmosfæretemperatur (K) Min-Gennemsnit-Max	Atmosfæretryk (MPa)
Merkur	90-440-700	~0
Venus	228 <sup>11</sup> -737-773	9,2
Jorden	185-287-331	0,1013
Månen	40-250-396	$3 \cdot 10^{-16}$
Mars	133-210-293	$0,7 \cdot 10^{-3}$ - $0,9 \cdot 10^{-3}$
Jupiter	110-152-XXX	0,070
Saturn	82-143-XXX	0,140
Uranus	59-68-XXX	0,120
Neptun	50-53-XXX	>>0,100
Pluto	33-44-55	$0,30 \cdot 10^{-6}$

Tabel 4. [30]

## 2.4.2 Spitzer – fakta

Spitzer-observatoriet består af en kikkert med en spejldiameter på 0,85 m. Der er tilsluttet udstyr til kikkerten, så observatoriet kan måle lys i bølglængdeområdet 3-180  $\mu\text{m}$ .

Kikkerten er bygget af Lockheed-Martin, og udstyret er lavet af Cornell University, University of Arizona samt Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.

Parameter	Value
Total Observatory mass at launch .....	861 kg
Dimensions (height $\times$ diameter).....	4.5 m $\times$ 2.1 m
Average operating power.....	375 W
Solar array generating capacity at launch .....	500 W
Nitrogen reaction control gas at launch .....	15.59 kg
Estimated reaction control gas lifetime.....	17 yr
Mass memory capacity.....	2 Gbytes
Telescope primary diameter.....	0.85 m
Telescope central obscuration.....	14.2%
Superfluid helium at launch.....	337 l
Estimated nominal cryogenic lifetime.....	5.3 yr
Data transmission rate (high-gain antenna up to 0.58 AU from Earth).....	2.2 Mb s <sup>-1</sup>
Command communication rate.....	2 kbps

Tabel 5. Lidt Spitzerdata. [32]



Figur 27: Spektrometer, IRS, til at analysere det infrarøde lys. Der er yderligere to instrumenter om bord. Et fotometer samt et infrarødt kamera. [32]

Kikkerten blev anbragt i sin bane i 2009, og den flyver i en bane omkring Solen med afstanden 1 AU, men 0,62 AU efter Jorden, i et såkaldt Lagrange-punkt.

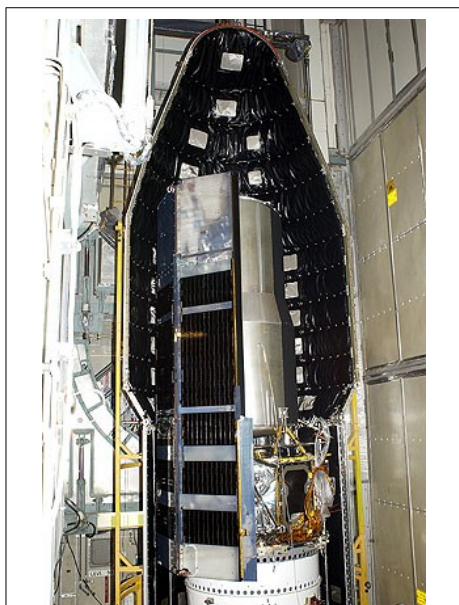
11 Gælder kun i øverste skyer.

### Apparaturet

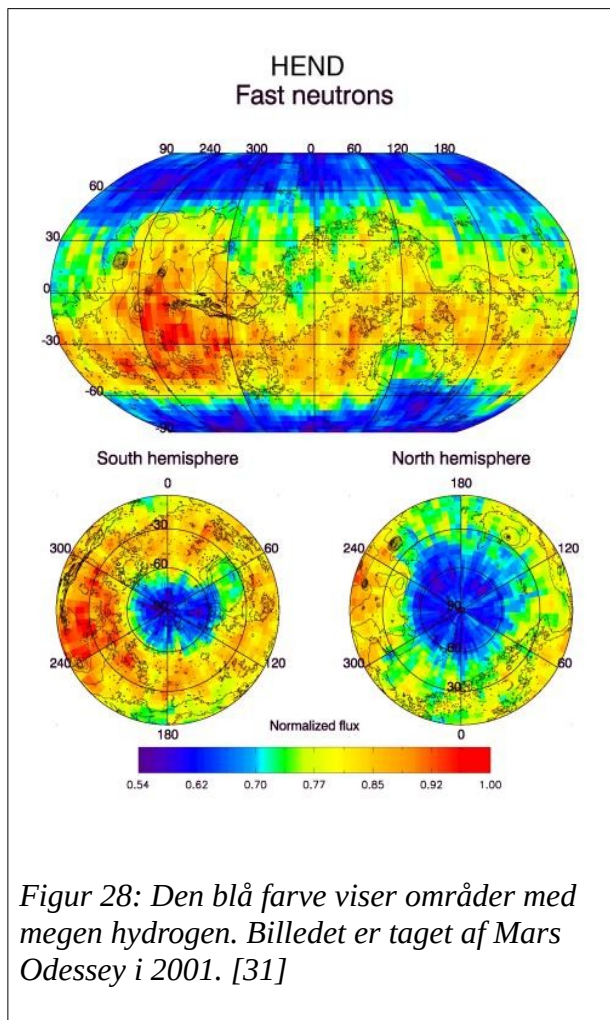
På figur 25 og 29 kan du se Spitzer-satellitten, inden den blev opsendt samt noget af det udstyr, der er installeret i teleskopet.

### Podcasts

Hvis du vil vide mere om forskellige resultater fra Spitzer-missionen, kan du prøve dette websted: <https://www.spitzer.caltech.edu/>. Her kan du også se en podcast omkring målingen af en planets temperatur.



Figur 29: Spitzer inden affyringen i en Delta II-raket. [32]



Figur 28: Den blå farve viser områder med megen hydrogen. Billedet er taget af Mars Odyssey i 2001. [31]

## 2.5 Steder at søge efter livsbetingelser

### 2.5.1 Det nære solsystem



Figur 30: Området Nanedi Valles hvor væske har skabt et flodleje. Det er lidt usikkert, hvordan 'floddeltaet' er dannet, men det må have været et flydende materiale. Billedet er taget af sonden Mars Express. [33]

Vi ved, at Jorden ikke er det eneste sted, hvor der enten er eller har været flydende stoffer. Nedenfor er der et kort oprids af interessante steder at undersøge for liv.

#### Mars

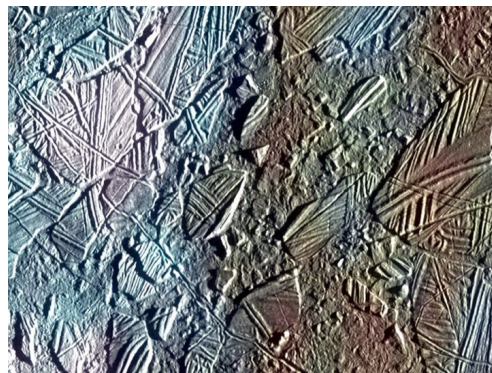
Mars har engang haft flydende vand på overfladen, men efter at planetens varmeproduktion<sup>12</sup> er aftaget, er vandet henholdsvis fordampet, frosset ned ved polerne, eller er under Mars-overfladen. Flydende vand kan muligvis eksistere i underjordiske lommer, og der kan der være mulighed for at finde liv. Figur 28 viser hvor der er høj koncentration af hydrogen på Mars' overflade. Hydrogen er hovedbestanddel i vand, men det findes også i mange andre forbindelser. Derfor er det ikke et helt sikkert bevis på, at der er tale om vand. På figur 30 kan man dog se udtørrede flodlejer.

Pr. 15/3-07 er det lykkedes forskere fra ESA/NASA at finde frossen vand på Mars' sydpol. Området er på størrelse med Texas, og det er ca. 3,7 km tykt. Hvis sådan en klump is smeltede, ville den kunne dække hele planeten i et 11 m tykt vandlag. Dermed må mysteriet om, hvor Mars' forsvundne vand er, være løst. Det meste har været der hele tiden. Man kan læse mere her: <http://www.esa.int>.

#### Europa

Galileo-missionen har vist, at Jupiters måne, Europa, måske har et flydende hav under dets iskappe. Astrobiologer vil i fremtiden undersøge nærmere, om der er flydende vand på Europa, samt om der findes præbiologiske organiske stoffer. (Stoffer, der bruges som byggestene for liv.)

På figur 31 kan man se Europas rillede overflade, som indikerer, at der er flydende materiale under overfladen. Det gør den interessant for astrobiologerne.



Figur 31: Europa set på tæt hold.[34]

12 Stenplaneters varmeproduktion kommer fra henfald af radioaktive isotoper i planeten. Hvis planeten er på Mars' størrelse, vil forholdet mellem rumfanget og overfladearealet være så lille, at planeten afkøles hurtigere end for eksempel Jorden. Derved ophører vulkaner samt jordskælv tidligt i planetens 'liv', og atmosfæren degenererer dermed. Uden atmosfære vil drivhuseffekten på planeten ophøre, og den vil blive afkølet kraftigt.

*Titan*

Saturn-månen Titan er den eneste måne i Solsystemet med en tyk atmosfære samt en avanceret sammensætning af organiske molekyler. Atmosfæren består, ligesom vores egen atmosfære, primært af kvælstof.

Cassini-missionen lod i 2005 en probe svæve ned gennem Titans atmosfære og proben foretog målinger undervejs. Senere målinger har blandt andet påvist aminosyrer samt 5 nukleotidbaser, som kan bruges til at bygge DNA. Det er adenin, cytosin, thymin, guanin og uracil og aminosyrerne er glycin og alanin. [49]

Nogle af resultaterne fra missionen kan du finde på Internettet. (Se også opgave 2.6.6)

*Kometer*

Vi ved allerede nu, at kometer indeholder store mængder vand samt aminosyrer. Kometerne har muligvis leveret aminosyrer til Jorden, før livet opstod. Da kometer ofte kommer meget tæt på Jorden, er det oplagt at undersøge disse. Derfor er der flere projekter i gang, som skal udmønte i sonder, der sendes mod kometer for at tage prøver og sende dem retur til Jorden.

For eksempel fløj sonden *Stardust* (opsendt 7/2-1999) til kometen Wild 2, ankom i januar 2004, tog prøver og returnerede dem til Jorden, så vi fik dem i 2006. På Wild 2 fandt man også glycin, og man fandt mange spændende egenskaber ved kometer. Du kan læse mere på siden: <http://stardust.jpl.nasa.gov/news/news116.html>.

Muses-C/Muses-CN lettede i januar 2002 og skal hjembringe prøver fra asteroiden 25143 Itokawa.

Rosetta-missionen, som startede 2/1 2004 fløj mod komet 67 P/Churyumov-Gerasimenko og landede på kometen i 2014. Landingsmodulet Philae studerede kometens overflade, indtil den løb tør for strøm. Der findes opdaterede oplysninger om denne mission på webstedet <http://rosetta.esa.int/>.

Der er mange flere missioner, som er beskrevet på hjemmesiden <http://astrobiology.nasa.gov/missions>.

**2.5.2 Phoenix-missionen (Mars)**

I forrige afsnit kunne man læse om egnede steder at undersøge. Mars har allerede været besøgt flere gange, men vi er slet ikke færdig med den planet endnu.

Phoenix-missionen gik ud på at anbringe et måleapparat på Mars. Dette apparat målte indholdet af H<sub>2</sub>O og diverse mineraler i marsjorden, samt mængden af CO<sub>2</sub> i atmosfæren. Marsjordens pH-værdi



*Figur 32: Titans overflade. [35]*



*Figur 33: En tegners ide om hvordan Phoenix ser ud på overfladen af Mars. [36]*

skulle også bestemmes. Disse data giver mulighed for at finde ud af om Mars-mudder kan danne grobund for liv.

De tre hovedspørgsmål, der søges besvaret er

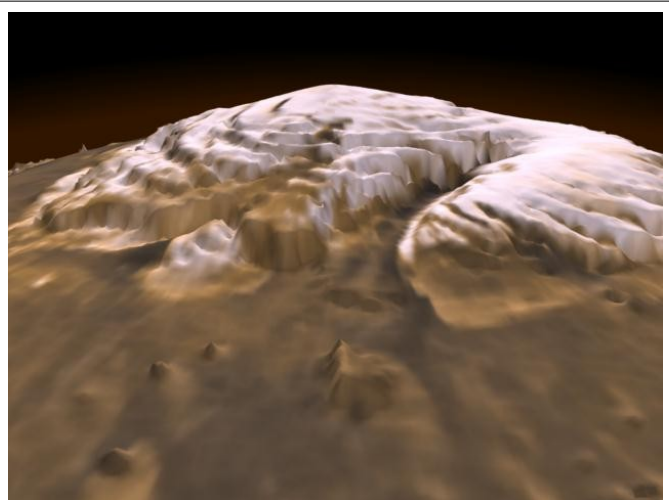
1. Hvordan har den tidlige udvikling af vand ved Nordpolen på Mars set ud?
2. Er der mulige levesteder for mikrober?
3. Hvilke muligheder for liv er der i området mellem is og mudder et stykke nede i Marsjorden?

### Måling på H<sub>2</sub>O

I dag er der kun vandis eller vandgas på Mars' overflade. Flydende vand findes normalt ikke. Der er dog tegn på nylige vandudslip fra undergrunden, men når dette vand når op til overfladen, fordamper det meget hurtigt, så flydende vand på overfladen er yderst sjældent og meget kortvarigt.

Flydende vand fandtes måske ved polerne for bare 100 kyr siden. Grunden til, at Marspolerne med ca. 100 kyr tidsrum kan have flydende vand, skyldes, at Mars' rotationsakse flytter sig – ligesom rotationsaksen på en snurretop ændrer sig, når farten af den aftager.

Dette er interessant, da astrobiologer i dag har fundet ud af at f.eks. sporer kan overleve i iskolde-, iltfrie- og helt tørre omgivelser i millioner af år, for, når de rette betingelser igen opstår, at genoptage stofskiftet.



*Figur 34: Tre-dimensionelt billede af Mars' nordpol. Billedet er lavet af Mars Orbiter Laser Altimeter. Kappen er ca. 1200 km i diameter og isen er på det tykkeste sted 3 km. Der er kløfter over 1 km dybe. Islaget er i gennemsnit 1,03 km tykt og rumfanget af isen er  $1,2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ . (Det svarer til ca. halvdelen af Grønlands iskappe.) [37]*

Ved at undersøge is fra polerne er det håbet, at meteorologer bliver så gode til at modellere Marsklimaet, at de vil kunne blive i stand til at forudsige, hvor evt. flydende vand vil opstå i fremtiden.

Nordpolsisen udgør kun 10 % af den krævede vandmængde for at have vand nok til ur-havet på Mars. Den resterende vand ligger på Sydpolen samt nedfrosset under det meste af Mars' overflade. Dermed er der også en lille chance for, at der findes underjordiske steder på planeten, der har flydende vand.

Men hvorfor er vand nu så vigtigt?

Hvis celler skal kunne overføre kemiske forbindelser (ioner), skal det ske i et opløsningsmiddel. Vand er et sådant middel, og vand har også den egenskab, at det ikke ødelægger cellerne. Et opløsningsmiddel som f. eks. alkohol opløser fedt, hvilket kan ødelægge celler.

Vanddamp og is er også opløsningsmidler, men deres evne til at transportere kemiske forbindelser er meget ringere end for vand, og dermed vil celleprocesser gå ganske langsomt.

Celleprocesser kræver proteiner som katalysatorer i deres stofskifte, og proteiner kræver vand for at kunne katalysere ordentligt.

Vand har også den klare fordel, at det er flydende over et relativt stort temperaturinterval, og når det endelig fryser, så flyder isen ovenpå og virker som isolering for vandlagene nedenunder.

Endelig har vand den fordel, at vandmolekyler er polære – dvs. kemiske forbindelser som salt og sukker er letopløselige i vand, mens fedtstoffer ikke er. Derfor kan energi nemt transporteres i vand, og cellemembraner, som er lavet af fedt, går ikke i stykker i vand.

### Jordbundsanalyse

Phoenix-roveren kan grave jordprøver op og opvarme jorden i små ovne, så den afgiver nogle af de gasser, som den indeholder. Disse gasser opfanges af en gas-analysator, som derefter kan måle mængden af CO<sub>2</sub>, vanddamp, kvælstof, kulstof og fosfor. Dermed kan man finde ud af om Marsjorden har tilstrækkeligt med kemisk potentiel energi til, at mikrober kan overføre energi ved elektronbytning. (Her på Jorden afgiver glukose elektroner, mens ilt optager dem, men på Mars kan det være andre molekyler og ioner, der sørger for den proces.)

Marsjorden bliver også opløst i vand, så pH-værdi og salinitet<sup>13</sup> kan måles. Der skal også undersøges, om der er mange frie radikaler, der jo er cellegifte.

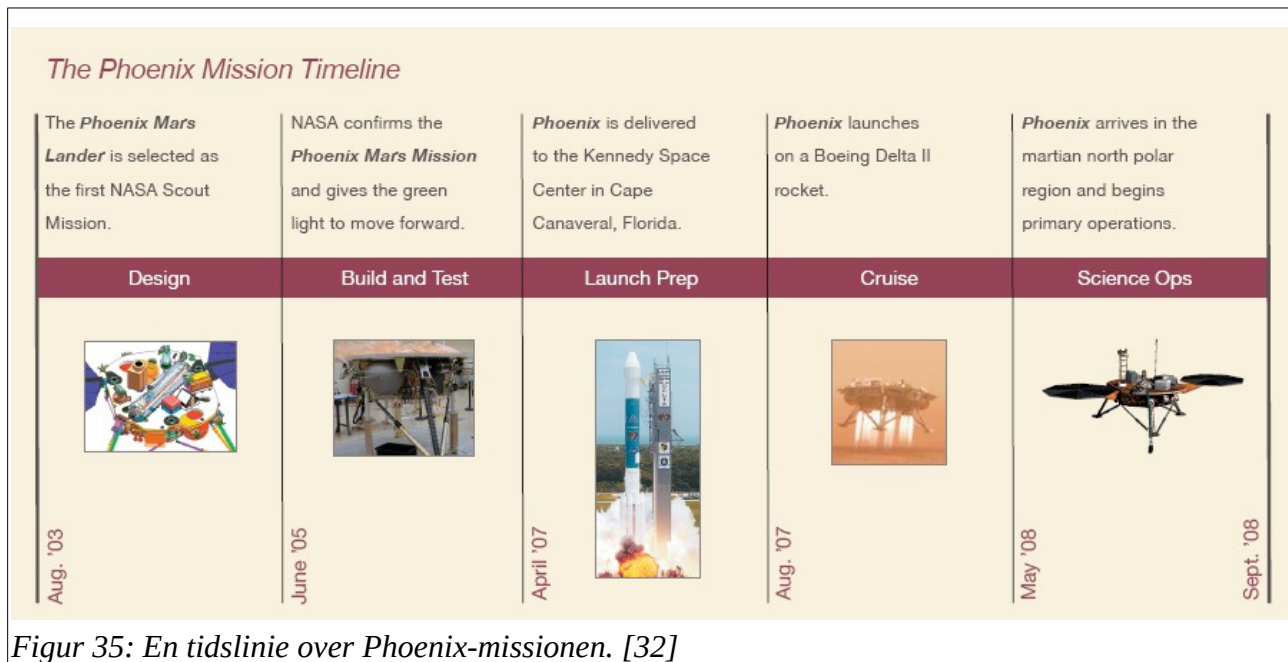
Jordeksperimenter fra Marslaboratoriet i Århus viser, at hvis man graver dybt nok (nogle cm), så vil jorden skærme for de radikaler, som Solens UV-lys vil lave, og derfor tror vi, at Marsjorden under overfladen kan levere gunstige livsbetingelser.

### Resultater

Phoenix har blandt andet fundet perchlorat i Marsjorden – et materiale som mikrober her på Jorden kan bruge som føde. Der er fundet spor af flydende vand i Marsjorden, det sner jævnlige deroppe og missionen har fundet mange andre ting. Læseren anbefales at besøge <http://phoenix.lpl.arizona.edu> for at lære mere om missionen.

---

13 Salinitet = saltindhold.



Phoenix-missionen er færdig nu, da solpanelerne på sonden er dækket til af is. Missionen viste sig dog at være mere langvarig end beregnet, så den var en succes.

Danmark er også deltager i udforskningen af Mars. F.eks. har Århus Universitet et Marslaboratorium. Du kan læse mere om dette laboratorium på adressen: <https://projects.au.dk/marslab/>

## 2.6 Livets byggesten

Alt (pånær elektromagnetisk stråling samt ikke-baryonisk stof og mørk energi) er opbygget af atomer og molekyler. Levende organismer er bygget op af lange komplicerede molekyler – f.eks. DNA-molekyler, proteiner mv. Det er derfor naturligt at spørge, hvordan atomerne og molekylerne overhovedet er blevet dannet.

### 2.6.1 Atombildning

I Big Bang blev der dannet ca. 75 % brint og 25 % helium. Der blev også dannet minimale mængder lithium og beryllium. Alle andre grundstoffer er dannet i stjerner ved fusionsprocesser, neutronindfangning, i supernovaeksplosioner (stjerneeksplosioner) og ved kollisioner mellem neutronstjerner.

Grundstoffer op til Ni-62 ( $Z = 28$ ) dannes i fusionsprocesser i tunge stjerners indre, hvorved energi kan frigøres. Ni-62 har en bindingsenergi pr. nukleon på 8,795 MeV.<sup>14</sup> (Fe-56 har en bindingsenergi på 8,790 MeV/nukleon.) Tungere grundstoffer kan ikke dannes ved fusion af atomkerner, da disse processer kræver energi. De øvrige grundstoffer dannes derimod ved neutronindfangning og radioaktivt henfald. Nedenfor er nævnt de forskellige dannelsesprocesser for grundstoffer tungere end jern.

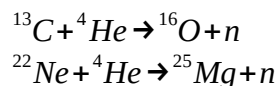
#### S-processen

s-processen (sløv) forekommer i røde giganter og supergiganter. Her sker der en 'stille' neutronudstrømning på ca.  $10^5$ - $10^{11}$  neutroner/cm<sup>2</sup> pr. s, og disse neutroner kan ramme f.eks. jern, så

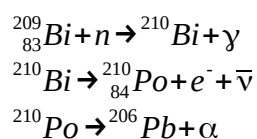
<sup>14</sup> 1 MeV =  $1,602 \cdot 10^{-13}$  J.

endnu tungere grundstoffer kan dannes. Bemærk at hele kernen ikke er blevet til jern endnu, da stjernen ellers ville kollapse.

Neutronerne, som bidrager til s-processerne kan f.eks. dannes ved at C-13 eller Ne-22 fusionerer med He-4. Disse processer skriver man på følgende måde:



Processerne fortsætter indtil Pb-206. Pb-206 absorberer 3 neutroner og henfalder så til Bi-209, som bestråles af en neutron; den henfalder tilbage til Pb-206. Skrevet op ser de sidste s-processer ud som følger:



s-processen når ikke at danne alle grundstoffer med atomtal 27-82. Mange af grundstofferne med  $Z < 82$  dannes også ved r-processen (se nedenfor.) I tabellen herunder ses nogle grundstoffer, som fortrinsvist dannes ved s-processen.

Z	Symbol	Navn	Z	Symbol	Navn
38	Sr	Strontium	56	Ba	Barium
39	Y	Yttrium	57	La	Lanthan
40	Zr	Zirkonium	58	Ce	Cerium
41	Nb	Niobium	82	Pb	Bly

Tabel 6. [38]

### R-processen

r-processen (ræs) sker når neutronstrømmen er 'stor' (omkring  $10^{22}$  neutroner/cm<sup>2</sup> pr. s), for eksempel i en supernovaeksplosion, hvor elektroner presses ind i protoner og danner neutroner, eller når to neutronstjerner kolliderer. Processen går så stærkt, at de nye isotoper ikke kan nå at henfalde ved  $\beta$ -henfald, før de atter modtager neutroner. Dermed kan de tungeste naturlige grundstoffer dannes. (Uran.) Hvis atommasserne overstiger ca. 270 u vil de også kunne henfalde ved spontan fission, og derfor bliver de allertungeste grundstoffer ekstremt sjældne.

Tabellen nedenfor viser nogle grundstoffer, der fortrinsvist er lavet ved r-processen.

Z	Symbol	Navn	Z	Symbol	Navn
33	As	Arsen	67	Ho	Holmium
35	Br	Brom	68	Er	Erbium
44	Ru	Ruthenium	69	Tm	Thulium
47	Ag	Sølv	71	Lu	Lutetium
52	Te	Tellurium	75	Re	Rhenium
53	I	Iod	76	Os	Osmium

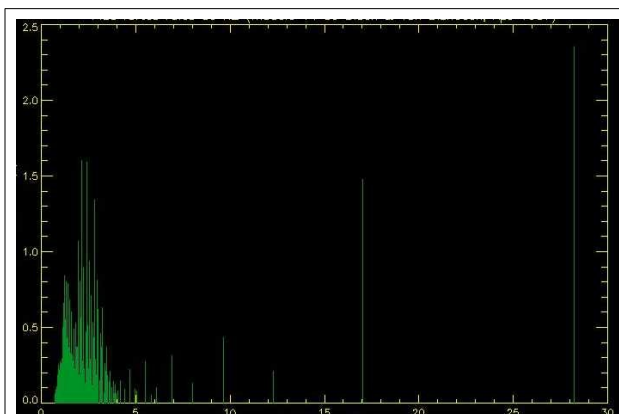
54	Xe	Xenon	77	Ir	Irridium
55	Cs	Cæsium	78	Pt	Platin
63	Eu	Europium	79	Au	Guld
64	Gd	Gadolinium	90	Th	Thorium
65	Tb	Terbium	92	U	Uran
66	Dy	Dysprosium			

Tabel 7. [38]

## 2.6.2 Molekyledannelse

Aminosyrer kan dannes ved kraftige elektriske udladninger (lyn) i en blanding af mindre molekyler. Det er svært at sige, i hvor stor målestok dette skete på den tidlige Jord, men vi kender dog til gigantiske molekylefabrikker – nemlig verdensrummet. I interstellare tåger (gasskyer) kan molekyler dannes på overfladen af silikater, når gasserne bestråles af stjernelys. Silikaterne er 'sod'-partikler, som er dannet i røde stjerner.

Det er svært at detektere disse molekyler, da molekylespektre har rigtig mange linjer – og da der findes mange forskellige molekyler, kan et målt spektrum indeholde utallige linjer, som er uhyre svære at identificere korrekt. Hvis man måler spektret fra jordoverfladen, adderes mange linjer fra vores egen atmosfære, hvilket komplicerer analysearbejdet endnu mere. På figur 36 er vist spektret for det allermest simple molekyle – nemlig H<sub>2</sub>.



Figur 36: Et spektrum af molekylær brint. 1. akser viser bølgelængden i  $\mu\text{m}$ . 2. akser viser intensiteten af H<sub>2</sub>-linierne. [39]

Alligevel har besværlighederne ikke afholdt radioastronomer fra at bestemme en stor mængde forskellige molekyler i gasskyerne og kometerne. Nogle af molekylerne er rigtig giftige for mennesker, men nogle er også aminosyrer, som kan bruges til at bygge proteiner.

Nedenfor er anført hvilke identificerede molekyler, der var fundet indtil april 2015. [40]

I listen kan man se, at aminosyren glycin samt molekylet HCN er nævnt. HCN-polymerer<sup>15</sup> findes overalt i rummet; bl.a. på overfladen af komet, hvoraf nogle har ramt Jorden. HCN kan bruges til at lave aminosyrer, som proteiner er lavet af. (HCN + H<sub>2</sub>O laver heteropolypeptider<sup>16</sup>, som igen kan lave proteiner.)

Hvis molekylet anført i tabellerne nedenfor er skrevet med blå, er det fundet på både gas- og fast form. Farvet baggrund betyder, at identifikationen er lavet i enten det infrarøde, -visuelle eller det ultraviolette bølgelængdeområde. Alle øvrige er målt i radio- eller mikrobølgeområdet. Er der anført et '?' betyder det, at detektion af molekylet ikke er sikker.

15 Polymerer er lange molekylekæder bygget af det samme lille molekyle. I dette tilfælde lange kæder af HCN-molekyler.

16 Polypeptider er peptider indeholdende 10-100 aminosyrer. (Peptider er f.eks. proteiner eller et molekyle indeholdende mere end 1 aminosyre.) Hetero betyder, at de enkelte peptider er bundet til et atom, der ikke er C.

<b>Molekyler med 2 atomer</b>			
H <sub>2</sub> hydrogen	CO carbon monoxide	CSi carbon monosilicide	CP carbon monophosphide
CS carbon monosulfide	NO nitric oxide	NS nitric sulfide	SO sulfur monoxide
HCl hydrogen chloride	NaCl sodium chloride	KCl potassium chloride	AlCl aluminum monochloride
AlF aluminum monofluoride	PN phosphorus mononitride	SiN silicon mononitride	SiO silicon monoxide
SiS silicon monosulfide	NH imidyl radical	OH hydroxyl radical	C <sub>2</sub> diatomic carbon
CN cyanide radical	HF hydrogen fluoride	FeO iron monoxide	LiH lithium hydride
CH methyldyne	CH <sup>+</sup>	CO <sup>+</sup>	SO <sup>+</sup>
SH mercapto radical	O <sub>2</sub> ? oxygen	N <sub>2</sub> nitrogen	

<b>Molekyler med 3 atomer</b>			
H <sub>2</sub> O water	H <sub>2</sub> S hydrogen sulfide	HCN hydrogen cyanide	HNC hydrogen isocyanide
CO <sub>2</sub> carbon dioxide	SO <sub>2</sub> sulfur dioxide	MgCN magnesium cyanide	MgNC magnesium isocyanide
NaCN sodium cyanide	N <sub>2</sub> O nitrous oxide	NH <sub>2</sub> amidogen radical	OCS carbonyl sulfide
CH <sub>2</sub> methylene	HCO formyl radical	C <sub>3</sub> triatomic carbon	C <sub>2</sub> H ethynyl radical
C <sub>2</sub> O ketenylidene	C <sub>2</sub> S	AlNC	HNO nitrosyl hydride
SiCN silicon monocyanoide	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	SiNC	<i>c</i> -SiC <sub>2</sub> silicon dicarbide
HCO <sup>+</sup> formyl cation	HOC <sup>+</sup>	HCS <sup>+</sup>	H <sub>3</sub> <sup>+</sup>
OCN <sup>-</sup> solid-phase only			

<b>Molekyler med 4 atomer</b>			
NH <sub>3</sub> ammonia	H <sub>2</sub> CO (?) formaldehyde	H <sub>2</sub> CS thioformaldehyde	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> acetylene
HNCO isocyanic acid	HNCS thioisocyanic acid	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> hydronium ion	SiC <sub>3</sub>
C <sub>3</sub> S	H <sub>2</sub> CN	<i>c</i> -C <sub>3</sub> H	/- C <sub>3</sub> H
HCCN	CH <sub>3</sub> methyl radical	C <sub>2</sub> CN cyanoethynyl radical	C <sub>3</sub> O
HCNH <sup>+</sup>	HOCO <sup>+</sup> protonated CO <sub>2</sub>		

<b>Molekyler med 5 atomer</b>			
CH <sub>4</sub> methane	SiH <sub>4</sub> silane	CH <sub>2</sub> NH methyleneimine	NH <sub>2</sub> CN cyanamide
CH <sub>2</sub> CO ketene	HCOOH (?) formic acid	HCC-CN cyanoacetylene	HCC-NC isocyanoacetylene
<i>c</i> -C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	/- C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> CN cyanomethyl	H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup> protonated formaldehyde
C <sub>4</sub> Si	C <sub>5</sub>	HNCCC	C <sub>4</sub> H

<b>Molekyler med 6 atomer</b>			
CH <sub>3</sub> OH methanol	CH <sub>3</sub> SH methanethiol	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ethylene	H(CC) <sub>2</sub> H diacetylene
CH <sub>3</sub> CN methylcyanide	CH <sub>3</sub> NC methylisocyanide	HC(O)NH <sub>2</sub> formamide	HCC-C(O)H propynal
HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup> protonated cyanoacetylene	HC <sub>4</sub> N cyanopropenylidene	C <sub>5</sub> N	C <sub>5</sub> H
H <sub>2</sub> CCCC butatrienylidene			

Molekyler med 7 atomer			
CH <sub>2</sub> CH(OH) vinyl alcohol	c - C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O ethylene oxide	HC(O)CH <sub>3</sub> acetaldehyde	H <sub>3</sub> C-CC-H methylacetylene
CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> methylamine	CH <sub>2</sub> CH(CN) acrylonitrile	HCC-CC-CN cyanobutadiyne	C <sub>6</sub> H hexatriynyl radical

Molekyler med 8 atomer		
CH <sub>3</sub> COOH acetic acid	HC(O)OCH <sub>3</sub> methyl formate	HOCH <sub>2</sub> C(O)H glycolaldehyde
H <sub>3</sub> C-CC-CN cyanomethylacetylene	H <sub>2</sub> C <sub>6</sub> hexapentaenylidene	H(CC) <sub>3</sub> H triacetylene
H <sub>2</sub> C=CH-C(O)H propenal		C <sub>7</sub> H

Molekyler med 9 atomer		
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O dimethyl ether	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN ethylcyanide	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH ethanol
CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H methylbutadiyne	HCC-CC-CC-CN cyanoheptatriyne	C <sub>8</sub> H

Molekyler med 10 atomer	
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO acetone	HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH ethylene glycol
H <sub>3</sub> C-CH <sub>2</sub> -C(O)H propanal	CH <sub>3</sub> (CC) <sub>2</sub> CN methylcyanoacetylene
NHH-CHH- COOH Glycin	Glycin er nævnt i det levende univers

Molekyler med 11 atomer
HCC-CC-CC-CC-CN cyanoctatetrayne

Molekyler med 12 atomer	
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> benzene	(CH <sub>2</sub> OH) <sub>2</sub> C(O) dihydroxyacetone

Molekyler med 13 atomer
HCC-CC-CC-CC-CC-CN cyanodecapentayne

Se <http://science.gsfc.nasa.gov/691/cosmicice/interstellar.html>  
for den nyeste liste.

I dette kapitel har vi blandt andet set på kometers rolle for at livet har kunnet opstå på Jorden. I næste kapitel vil vi undersøge det modsatte, nemlig hvordan himmellegemer fra rummet kan skabe problemer for livet.

### 2.6.3 Opgave. Livsbetingelser i Solsystemet

Benyt tilstandsdiagrammet vist på figur 21 samt tabel 4 til at finde ud af hvilke kloder i Solsystemet, der kan indeholde flydende vand i atmosfæren i kortere eller længere perioder.

### 2.6.4 Opgave. Temperaturmåling på exoplanet

Se videosekvensen EpsAndTemp.m4v. (Søg filen på Internettet eller spørg din lærer.)

### 2.6.5 Opgave. Spitzer-teleskopet

Besøg webstedet <http://www.spitzer.caltech.edu> og find ud af hvordan Spitzer-teleskopet virker, og hvorfor det er anbragt udenfor Jordens atmosfære.

### 2.6.6 Opgave. Titan

Nogle af resultaterne fra Cassini-missionen kan findes på Internettet. Prøv med udgangspunkt i <https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/overview/> og andre sider på Internettet at besvare nedenstående spørgsmål.

- Hvad er målet med Cassini-missionen?
- Hvad er Titan-atmosfærens sammensætning?
- Hvilket stof på Titan svarer til vands rolle på Jorden?
- Kan man forestille sig liv, der er baseret på andre opløsningsmidler end vand?

### 2.6.7 Opgave. Jupiters og Saturns måner

I denne opgave skal du finde ud af om månerne Io, Ganymede og Titan er i stand til at opretholde stabile atmosfærer. Formlerne (15) og (16) kan anvendes.

- Udfyld tabellen nedenfor ved at anvende data fra tabel 8.

Månenavn	Molekylemasse <sup>17</sup> (u)	$v_m$ (m/s)	$1/6 \cdot v_{esc}$ (m/s)	Stabil atmosfære (Ja/Nej)
<b>Io</b>				
<b>Ganymedes</b>				
<b>Titan</b>				

	<b>Io</b>	<b>Ganymedes</b>	<b>Titan</b>
<b>M (kg)</b>	$8,9319 \cdot 10^{22}$	$1,4819 \cdot 10^{23}$	$1,345 \cdot 10^{23}$
<b>R (km)</b>	1815	2631	2575
<b>T (K)</b>	130	109	94
<b>Atmosfære</b>	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	98,5 % N <sub>2</sub> 1,5 % CH <sub>4</sub>

Tabel 8: Data for 3 måner.

- Hvis temperaturen på en planets- eller månens atmosfære stiger, hvad vil det betyde for stabiliteten af atmosfæren?
- Hvad sker der med stabiliteten af en atmosfære, hvis massen af månen/planeten stiger?

17 Slå atommasser op på [ptable.com](http://ptable.com).

- d) Hvad sker der med stabiliteten af en atmosfære, hvis radius af månen/planeten stiger?

### 2.6.8 Opgave. Alien Earths

- Besøg webstedet <http://www.alienearts.org/>
- Læs teksten til punktet "Search for Life" og udfør øvelserne.
- Skriv en kort sammenfatning af øvelsen om Winogradskysøjlen.
- Hvad kan Drakes ligning bruges til?

### 2.6.9 Opgave. Kometer som vandbærere

Kometer er fortrinsvist lavet af is, sten og frossen kulilte, og de antages her kugleformede. Antag at gennemsnitsdiameteren af en komet er 10 km og densiteten er  $600 \text{ kg/m}^3$ . Jordens radius er i middel 6371 km. Ca. 40 % af kometernes masse er lavet af vandis.

- Find rumfanget af en komet.
- Find massen af isen for en komet.

Der er anslået  $1,6 \cdot 10^{21} \text{ kg}$  vand på Jorden.

- Hvor mange kometer skulle Jorden rammes af, hvis kometerne skulle levere alt Jordens vand?
- Hvis Jorden var helt kugleformet, hvor dybt et lag vand ville så ligge på hele kloden? (Du kan tilnærme rumfanget af vandet som Jordens overfladeareal gange tykkelsen af vandlaget.)

Relevante formler

$$\text{Rumfang } V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3$$

$$\text{Overfladeareal af kugle } A = 4 \cdot \pi \cdot R^2$$

$$\text{Masse } m = \rho \cdot V, \text{ hvor } \rho \text{ er densiteten af kometen.}$$



Figur 37: Kilde ukendt.

### 2.6.10 Opgave. Livszoner

Hvis en planet har en atmosfære, som ligner Jordens er fluxintervallet for potentielt liv angivet som i (14).

- Antag en stjerne, som lyser 2 gange så kraftigt som Solen. Hvad er livszonen for en sådan stjerne?

### 3 Naturkatastrofer fra rummet

Igennem Jordens historie har der været store begivenheder, som på drastisk vis har ændret livsbetingelserne. Der har for eksempel været gigantiske vulkanudbrud, store klimaændringer og der har været nedslag af asteroider og kometer på Jorden.

Hver gang en sådan katastrofe er hændt, skulle livet, lokalt eller nogle gange endda globalt, tilpasse sig de nye forhold. I dette kapitel vil vi se på effekterne af nedslag fra rummet.

Figur 38 viser et foto fra et nedslag i Sibirien. Ca. 2000 km<sup>2</sup> skov blev jævnet med jorden, dvs. ca. 80 millioner træer blev væltet. [7] Der var ingen krater ved nedslaget, så der må være tale om en eksplosion i atmosfæren. Der er ikke registreret alvorligt tilskadekomne ved nedslaget, hvilket skyldes at Tunguska ligger ganske øde, men man kan jo forestille sig katastrofens omfang, hvis impaktoren<sup>18</sup> havde ramt en storby.



Figur 38: Billede fra Tunguska i Sibirien, hvor et himmellegeme faldt ned den 30/6-1908. [7]

Figur 39 viser et krater i Australien. Krateret er dateret til at være ca.  $3 \cdot 10^5$  yr gammelt, det er 880 m i diameter, og det er 60 m dybt. [8]

De to første eksempler viser, hvordan livet, i hvert fald lokalt, kan påvirkes af et nedslag, men der har været meget større nedslag, som har ændret livet på hele Jorden. I dag er vi ret sikre på, at et kæmpenedslag i havet ud for Yucatan-halvøen for 66 millioner år siden har udryddet ca. halvdelen af alt liv på jorden. [9] Denne hændelse behandles i opgave 5.5.



Figur 39: Wolfe Creek Crater i Australien. [8]

#### 3.1 Stjernes kud

Når partikler (fra støvkorn til store sten - kaldet *meteorider*) entrer Ionosfæren, som strækker sig fra ca. 80 kilometers højde over jordoverfladen og opefter, vil friktionen mellem den tynde luft og partiklen give anledning til en så kraftig gnidning, at partiklen begynder at brænde og luften omkring meteoritten exciteres og udsender derfor lys. Vi oplever fænomenet som et stjernes kud – også kaldet en *meteor*.

<sup>18</sup> En *impaktor* er defineret som et legeme, der slår ned på jorden. Det kan være en asteoride, en meteorit eller en komet.

12.-13. august: Maksimum for Perseiderne.  
 21. oktober: Maksimum for Orioniderne.  
 5. november: Maksimum for Tauriderne.  
 17.-18. november: Maksimum for Leoniderne.  
 14. december: Maksimum for Geminiderne.

Liste over meteorsværme. [50]

Sammensætningen af meteorider eller *meteoritter*, som de legemer, der klarer vejen ned til jordoverfladen kaldes, kan variere ganske meget. Nogle er lavet af sten, andre af jern/nikkel og atter andre indeholder organiske stoffer som for eksempel kul. Figur 41 viser eksempler på forskellige slags meteoritter.

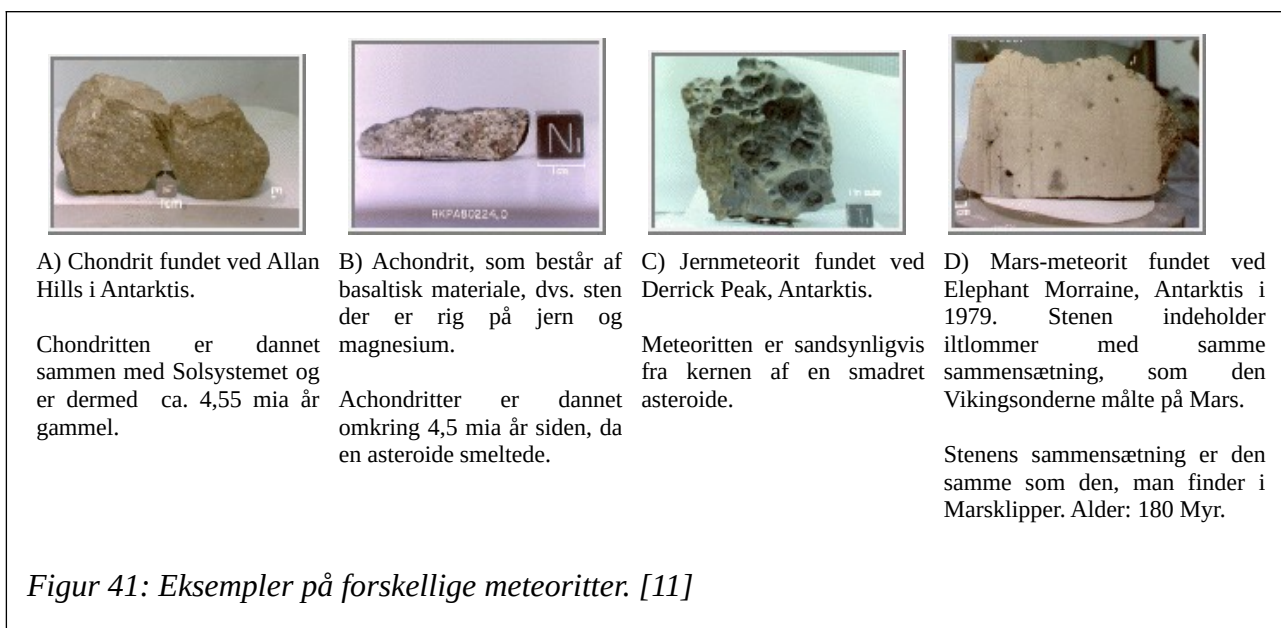
En meteorit kan falde ned til jordoverfladen i et stykke, eller den kan blive opvarmet så meget, at den eksploderer i mindre stykker, som så rammer overfladen. (Hvis legemerne, der entrer atmosfæren er større end nogle hundrede meter, kaldes de ikke for meteorider men for *asteroider* eller *småplaneter*.)

Stjernesquiddene kan forekomme som enkeltstående fænomener, dvs. man kan hver eneste aften være heldig at se et stjernesquid, men de kan også komme i stimer på bestemte tider af året. For eksempel findes der hvert år omkring 12. august en sværm, som tilsyneladende udspringer fra stjernebilledet Perseus. Derfor kaldes sværmen for *Perseiderne*. I virkeligheden har sværmen ikke meget med Perseus at gøre. Sværmen opstår, fordi Jordens bane krydser kometen Swift-Tuttles bane. Kometer aflejrer støv, småsten og gas i deres baner, når de er så tæt på Solen, at de bliver varmet tilstrækkeligt op (se afsnit 1.3), og derved vil partiklerne støde ind i Jordens atmosfære, hver gang Jordens- og komets baner krydser hinanden.

Der findes andre stjernesquidssværme. *Leoniderne*, som stammer fra kometen Temple-Tuttle, kan ses omkring 18. november, hvis man kigger mod stjernebilledet Løven. Se figur 40. Disse partikler har i øvrigt en fart på omkring 70 km/s. Se boksen ovenfor for andre meteorsværme.



Figur 40: Billede taget af Leoniderne. [10]



A) Chondrit fundet ved Allan Hills i Antarktis.

Chondritten er dannet sammen med Solsystemet og er dermed ca. 4,55 mia år gammel.

B) Achondrit, som består af basaltisk materiale, dvs. sten der er rig på jern og magnesium.

Achondritter er dannet omkring 4,5 mia år siden, da en asteroide smeltede.

C) Jernmeteorit fundet ved Derrick Peak, Antarktis.

Meteoritten er sandsynligvis fra kernen af en smadret asteroide.

D) Mars-meteorit fundet ved Elephant Moraine, Antarktis i 1979. Stenen indeholder iltlommer med samme sammensætning, som den Vikingsonderne målte på Mars.

Stenens sammensætning er den samme som den, man finder i Marsklipper. Alder: 180 Myr.

Figur 41: Eksempler på forskellige meteoritter. [11]

### 3.1.1 Eksperiment. Kraterforsøg

Formålet med øvelsen er at finde en sammenhæng mellem et nedslags energi og kraterdiameteren. Til rådighed er en vaskebalje med knastørt finsand, en stålkugle, en vægt, en skydelære og et målebånd.

Fremgangsmåden er at du først glatter sandoverfladen ud, dernæst lader du en stålkugle falde frit fra forskellige højder. Du skal måle højden,  $h_0$ , for hvert fald, og du skal måle diameteren af det dannede krater. Se figur 42 for definitionen af diameteren. Kuglens diameter og masse skal måles med skydelæren. Hvis kuglen rammer bunden af vaskebaljen, duer målingen ikke, og du skal vælge en mindre højde eller en mindre kugle.

Man beregner energien af nedslaget ved at anvende formlen for mekanisk energi

$$E_{mek} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot h_0, \quad (21)$$

da starthastigheden er 0. Tyngdeaccelerationen  $g = 9,82 \text{ m/s}^2$ .

Vær omhyggelig med målingerne og anfør alle målinger i en tabel som vist nedenfor. Du skal lave *mindst* 15 målinger!

$M_{kugle} = \text{_____ kg.}$       $d_{kugle} = \text{_____ m.}$

Måling nr.	$h_0$ (m)	$E_{mek}$ (J)	$d$ (m)	$v$ (m/s)
1				
2				
osv				

Tegn en  $(E, d)$ -graf samt en  $(v, d)$ -graf og lav potensregression. Sammenlign din regressionsfunktion med de andre grupper. Er de ens? (Har kuglens diameter betydning for resultatet?)

## 3.2 Kraterdiameter

En formel til at finde sammenhængen mellem kraterstørrelse på Jordens overfladen og nedslagshastigheden, er angivet i *Collins et al. [1]*

$$D = 1,451 \cdot \left( \frac{\rho_{impaktor}}{\rho_{target}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot L^{0,78} \cdot v_{impaktor}^{0,44} \cdot g^{-0,22} \cdot \sin^{\frac{1}{3}}(\theta). \quad (22)$$

*Impaktor* kan være en asteroide, en meteorit eller en komet.

$D$ : Kraterdiameter.      $L$ : Impaktorens diameter.      $g$ : Tyngdeaccelerationen.

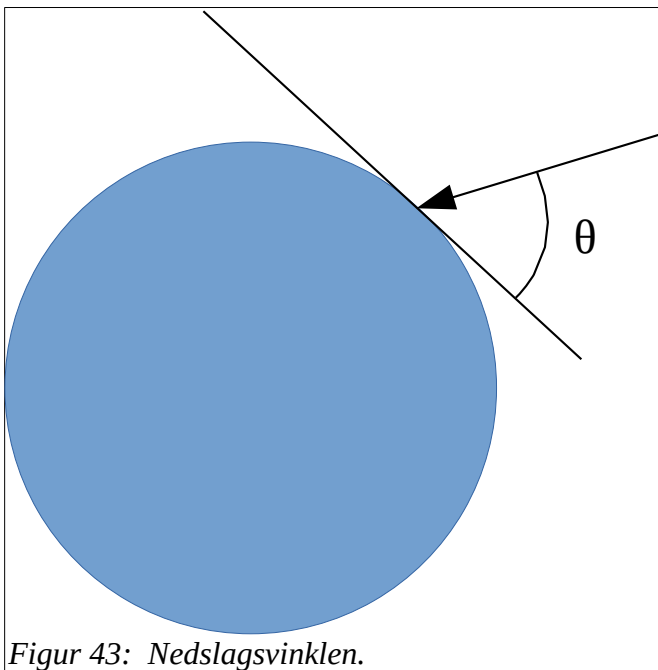
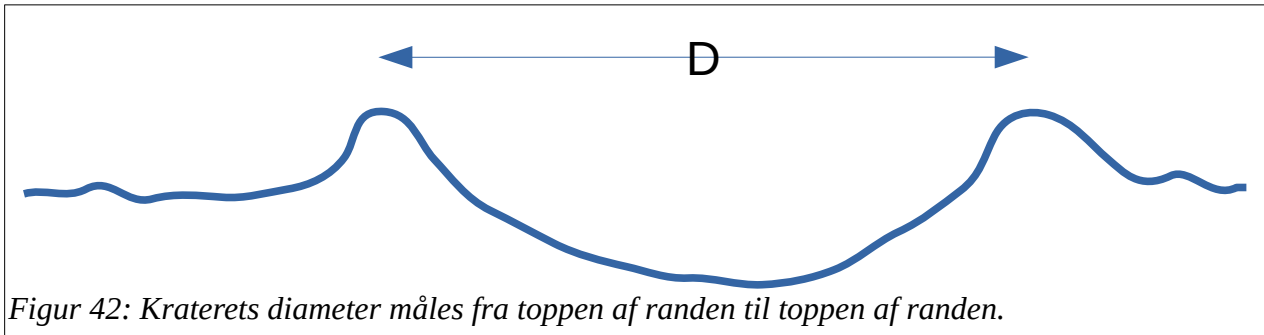
$\rho_i$ : Impaktorens densitet.      $\rho_{target}$ : Underlagets densitet.      $\theta$ : Nedslagsvinkel målt fra vandret.

$v_{impaktor}$ : Impaktorens hastighed før den rammer jorden.

Alle størrelser indsættes i SI-enheder og diameteren kommer ud i meter. Formlen er god op til kraterdiameter på ca. 3,2 km. Hvis krateret er større end 3,2 km, er der en lidt anderledes måde at finde sammenhængen mellem de indgående størrelser:

$$D_1 = 1,161 \cdot \left( \frac{\rho_{\text{impaktor}}}{\rho_{\text{target}}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot L^{0,78} \cdot v_{\text{impaktor}}^{0,44} \cdot g^{-0,22} \cdot \sin^{\frac{1}{3}}(\theta) \wedge D = 0,410 \cdot D_1^{1,13}. \quad (23)$$

Ovenfor er  $D$  diameteren af det færdige krater, mens  $D_1$  er kraterdiameteren målt i en højde, der svarer til omgivelsernes højde over havet, inden krateret falder sammen til sin færdige form.



### 3.3 Kraterdybde

Et estimat for kraterdybden kan beregnes vha nedenstående formel, hvor kraterdiameteren,  $D$ , indsættes i m og kraterdybden,  $d$ , også bliver m.

$$d = 36,76 \text{ m} \cdot \left( \frac{D}{\text{m}} \right)^{0,301} \quad (24)$$

### 3.4 Energi af impaktor

Energien af en impaktor kan udtrykkes ved formelen for kinetisk energi, da den potentielle energi er betragteligt mindre end den kinetiske energi (Se i øvrigt opgave 3.1):

$$E_{\text{mek}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2.$$

#### 3.4.1 Eksempel. Jernmeteorit

En jernmeteorit har en diameter på 50 m. Densiteten af jern er  $7870 \text{ kg/m}^3$ . Den lander i noget sedimentklippe, som har densiteten  $2500 \text{ kg/m}^3$ . Hastigheden er  $15 \text{ km/s}$ , og den falder lodret ned. Positionen er  $35^\circ \text{N}$ , dvs.  $g = 9,80 \text{ m/s}^2$ . (Se formel for  $g$ , som funktion af breddegrad i Databogen.)

#### Kraterets diameter og dybde bliver dermed

$$D = 1,451 \cdot \left( \frac{7870}{2500} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot 50^{0,78} \cdot 15000^{0,44} \cdot 9,80^{-0,22} \cdot \sin^{\frac{1}{3}}(90) = 1,87 \text{ km}.$$

$$d = 36,76 \cdot 1870^{0,301} \text{ m} = 355 \text{ m}$$

**Impaktorens masse** kan beregnes, hvis vi antager, at den er kuglerund

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left( \frac{50 \text{ m}}{2} \right)^3 \cdot 7870 \text{ kg/m}^3 = 5,151 \cdot 10^8 \text{ kg}.$$

**Energien af impaktoren** er

$$E_{\text{impaktor}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 5,151 \cdot 10^8 \text{ kg} \cdot (1,5 \cdot 10^4 \text{ m/s})^2 = 5,79 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

Man angiver ofte energienheden i Mton TNT. 1 Mton TNT =  $4,185 \cdot 10^{15}$  J. Dvs. nedslagsenergien kan også angives som

$$E_{\text{impaktor}} = \frac{5,79 \cdot 10^{16} \text{ J}}{4,185 \cdot 10^{15} \text{ J/Mton TNT}} = 13,8 \text{ Mton TNT}.$$

### 3.5 Strålingsenergi i atmosfæren

En *bolide* er et et meget lysstærkt stjerneskud, som er lyset fra en impaktor, der flyver ned gennem atmosfæren. En *ildkugle* er, når impaktoren eksploderer i atmosfæren. (Termerne *bolide* og *ildkugle* bruges dog lidt i flæng.) Lyset fra bolider og ildkugler skyldes, at luften exciteres/ioniseres pga. friktionen fra impaktoren, og ved henfald til grundtilstanden udsendes synligt lys. Derudover kommer også varmestråling fra impaktoren. Varmestrålingen opstår pga. friktion mellem impaktor og atmosfæren. Det viser sig, at man kan beregne strålingsenergien udtrykt ved impaktorenergien, hvis impaktoren er mindre end ca. 100 m. [42]

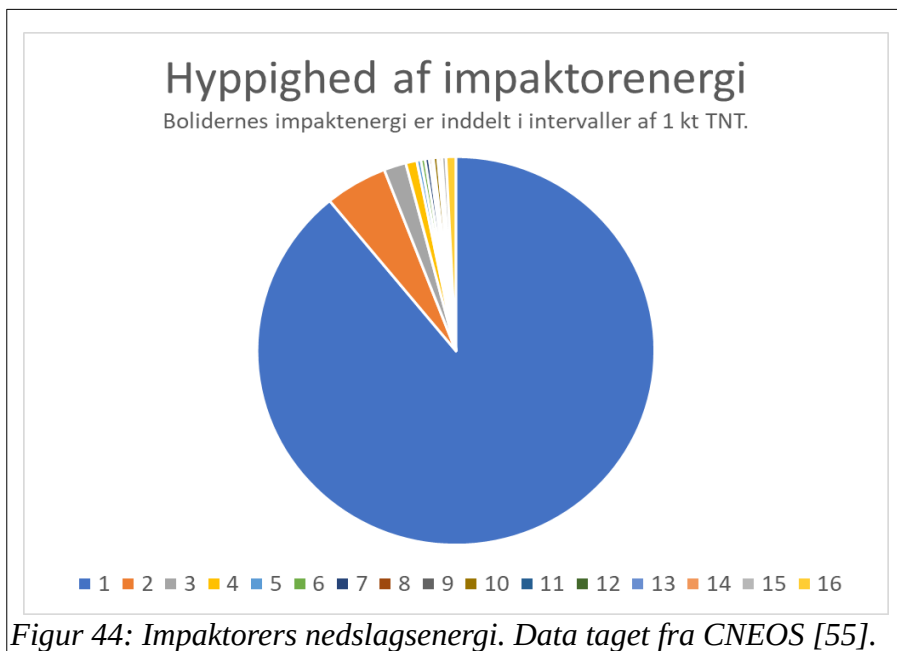
Formlen er

$$E_{\text{stråling}} = 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{E_{\text{impaktor}}}{\text{J}} \right)^{1,13} \text{ J}. \quad (25)$$

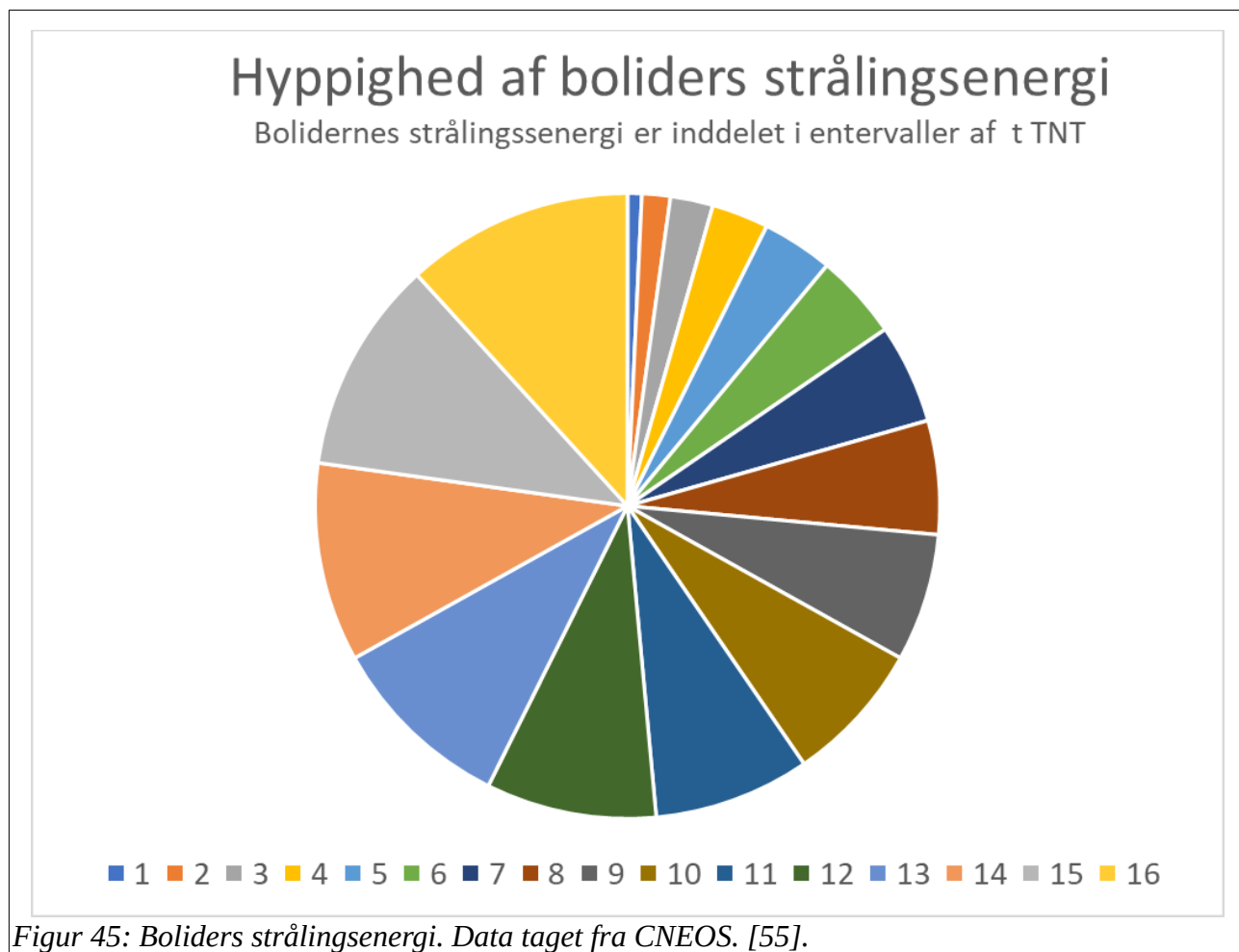
#### Densiteter af undergrunden

Type	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Sand	1600
Sedimentklippe	2500
Krystallinsk klippe	2750

Tabel 9: Densiteter for undergrunden. [1]



På figurerne 44 og 45 kan man se energifordelingen af boliders nedslagsenergi (impaktorenergi) og bolidernes strålingsenergi.



### 3.6 Seismiske effekter

I noten *Dinosaurernes udryddelse* er angivet en formel til at bestemme størrelsen af det jordskælv, som fremkommer ved et nedslag. I *Collins et al* er der en lidt anderledes formel, og den er

$$M = 0,67 \cdot \log(E) - 5,87 \quad (26)$$

Man indsætter nedslagsenergien i enheden ”J”, og derefter beregnes størrelsen af et tilsvarende jordskælv målt med Gutenberg-Richterskalaen.

Jo længere væk man kommer fra nedslagsstedet, des mindre vil et jordskælv føles. Sammenhængen mellem den oplevede styrke  $M(r)$ , hvor  $r$  (i enheden m) angiver afstanden til skælvet er:

$$\begin{aligned} M(r) &= M - 2,38 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{r}{m}\right) \text{ for } \frac{r}{m} < 60000. \\ M(r) &= M - 4,8 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{r}{m}\right) - 1,1644 \text{ for } 60000 \leq \frac{r}{m} \leq 700 \cdot 10^3. \\ M(r) &= M - 1,66 \cdot \log\left(\frac{r}{R_{Jord}}\right) - 6,399 \text{ for } \frac{r}{m} \geq 700 \cdot 10^3. \end{aligned} \quad (27)$$

Når man har  $M(r)$  kan man benytte tabel 10 samt figur 47 til at få et overslag over den oplevede skadevirkning.

#### 3.6.1 Eksempel. Jordskælv.

Fra eksempel 3.4.1 fandt vi en nedslagsenergi på  $5,79 \cdot 10^{16}$  J. Det svarer til et jordskælv med styrken

$$M = 0,67 \cdot \log(5,79 \cdot 10^{16}) - 5,87 = 5,36.$$

Hvis man er 100 km fra nedslagsstedet får man en tilsyneladende styrke på

$$M(100 \text{ km}) = 5,36 - 4,80 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^5 - 1,1644 = 3,7.$$

På mercalliskalaen svarer det til en styrke på III-IV, som man føler som knagen af døre og rysten af vinduer.

### 3.7 Dinosaurernes uddøen

Igennem Jordens historie har der været flere meget store asteroider/komet-nedslag på Jorden. På figur 46 kan man se en sikkert ufuldstændig liste over store nedslag på Jorden. Især to nedslag stikker ud – Chicxulubkrateret og Bedout-krateret.

Nedslaget ved Chicxulub på Yucatan-halvøen skete for 65 Myr siden, og det er anslået, at Bedout-nedslaget, som ligger i havet ud for Nordvestaustralien skete for ca. 250 Myr siden.

#### Gutenberg-Richter- og Mercalli-skalaen

- 0-1. -
- 1-2. I.
- 2-3. I-II.
- 3-4. III-IV.
- 4-5. IV-V.
- 5-6. VI-VII.
- 6-7. VII-VIII.
- 7-8. IX-X.
- 8-9. X-XI.
- > 9. XII.

Kilde [1].

Tabel 10: Sammenæng mellem richter- og mercalliskalaen.



## 4 Afslutning

I denne note har vi set på dannelsen af Solsystemet samt livsbetingelser – herunder begivenheder, der ændrer livsbetingelser drastisk.

Hvis man vil vide mere om emnet, kan man tage fat i kilderne i referencelisten. F.eks. [2], [5], [15] og [28]

# *Mercallis intensitetskala*

*(i en moderniseret udgave)*

- I Mærkes ikke eller kun af øvede iagtagere under særlige omstændigheder.
- II Mærkes af et lille antal personer i ro, især i de øvre etager i bygninger.
- III Mærkes af flere personer i ro og indendørs. Retning og varighed kan bedømmes. udendørs. Rystelse af vinduer og døre, knagen i bjælkerne.
- IV Mærkes af personer i bevægelse indendørs, nogle sovende vækkes, mærkes kun af få udendørs. Rystelse af vinduer og døre, knagen i bjælkeme.
- V Mærkes almindeligt af alle, mange sovende vækkes. Rystelse af møbler og sende, anslag af huskløkker, enkelte revner i gips.
- VI Almindelig opvågning af sovende, enkelte personer flygter ud i det fri, almindelig forskrækkelse. Gyngen af lysekroner, døre springer op, pendulure går i stå.
- VII Alle løber udendørs, almindelig skræk. Væltning af løse genstande, løsning af loftsgips. Kirkeklokker anslås.
- VII Alle løber udendørs, almindelig skræk. Væltning af løse genstande, løsning af loftsgips. Kirkeklokker anslås.
- VIII Almindelig panik. Væltning af skorstene, revner i mure, møbler vælter.
- IX Delvis ødelæggelse af middelgode bygninger, revner i jorden.
- X Ødelæggelse af middelgode bygninger, jembaneskinner bøjes.
- XI Kun få bygninger bliver stående. Broer ødelægges. Brede revner i jorden.
- XII Komplet ødelæggelse, ting kastes op i luften. Jordoverfladen bølger.

Figur 47: Mercalliskalaen. [2]

## 5 Opgaver til afsnit 3

### 5.1 Opgave. Kinetisk og potentiel energi

Asteroiders hastigheder ligger i intervallet 12-20 km/s og kometers hastigheder ligger i intervallet 30-70 km/s. [1]

- a) Opskriv formelen for den kinetiske energi af en impaktor.

Formel (6) giver den potentielle energi for impaktoren og Jorden.

- b) Benyt formelsamlingen til at finde værdier for  $G$  og Jordens masse og radius. ( $R$  i formel (5) angiver i dette eksempel Jordens radius + højden af impaktoren over jordoverfladen – i enheden "m".)
- c) Prøv at beregne tabet i potentiel energi, som funktion af impaktormassen,  $m$ , fra en højde på  $h = 100$  km over jordoverfladen ned til jordoverfladen.
- d) Antag energibevarelse og beregn  $v(R_{Jord})^2 - v(R_{Jord} + h)^2$ .
- e) Er det en god antagelse, at se bort fra den potentielle energi af impaktoren?

### 5.2 Opgave. Ildkugler og bolider i atmosfæren



- a) Besøg webstedet <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>.
- b) Læs introduktionen ved på forsiden at trykke på den knap, der hedder "Introduction."
- c) Tryk derefter på knappen "Map Data" og undersøg kortet ved at trække musen hen over de forskellige cirkler.
- d) Tryk på knappen "Excel" under tabellen og download alle dataene.
- e) Kontroller formel (25) ved at benytte strålingsenergien og impaktenergien for et par bolider. Husk at omregne kt TNT til J først.
- f) Tegn et histogram, der viser hyppigheden af bolider med forskellige impaktenergier. (Brug intervaller af størrelsen 1 kt TNT gående fra 0 -15 kt TNT.) Bemærk, at det er besværligt at vise søjlen for de små bolider – derfor er der på figur 45 lavet et lagkagediagram.

### 5.3 Opgave. Nedslagsenergi og kraterdiameter

Formel (22) angiver en sammenhæng mellem en impaktors hastighed og kraterdiameteren. Her skal du finde en sammenhæng mellem diameteren og impaktorens energi.

- a) Opskriv formelen for impaktorens energi.
- b) Isolér  $v$  i formelen.
- c) Indsæt udtrykket for  $v$  i formel (22) og reducer udtrykket.
- d) Sammenlign tallene i den fundne formel med din regressionskurve for diameter og energi fra kraterforsøget.
- e) Hvis du kan lide at regne, kan du anvende formelen  $m = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^3$  og bortsubstituere massen.

## 5.4 Opgave. Kollisionssimulator

# Earth Impact Effects Program

Robert Marcus, [H. Jay Melosh](#), and [Gareth Collins](#)

Welcome to the Earth Impact Effects Program: an easy-to-use, interactive web site for estimating the regional environmental consequences of an impact on Earth. This program will estimate the ejecta distribution, ground shaking, atmospheric blast wave, and thermal effects of an impact as well as the size of the crater produced.

Please enter values in the boxes below to describe your impact event of choice and your distance away. Then click "Calculate Effects" to learn about the environmental consequences.

Distance from Impact

Distance from Impact  km

### Enter Impact Parameters

[Impact Examples](#)

**Projectile Parameters**

Projectile Diameter  m

Projectile Density (in kg/m<sup>3</sup>)  or

**Impact Parameters**

Impact Velocity  km/s

This is the velocity of the projectile before it enters the atmosphere. The minimum impact velocity on Earth is 11 km/s. Typical impact velocities are 17 km/s for asteroids and 51 km/s for comets. The maximum Earth impact velocity for objects orbiting the sun is 72 km/s.

Impact Angle (in degrees)

The impact angle is measured from a plane tangent to the impact surface. This angle is 90 degrees for a vertical impact. The most probable angle of impact is 45 degrees.

**Target Parameters**

Target Type

Water of depth:  meters

Sedimentary Rock

Crystalline Rock

Besøg webstedet <http://www.purdue.edu/impaclearth> eller <https://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEarth/ImpactEffectsMap/>

- a) Udvælg nogle passende data og kørsimuleringen. Noter de inputværdier, du har valgt.
- b) Arguenter for hvorfor du netop har valgt de data, du har indtastet.
- c) Noter resultaterne fra simuleringen.
- d) Juster en af startparametrene og se hvilken effekt det giver. Skriv resultatet ned.
- e) Gentag punkt d en gang mere.
- f) Hvis du arbejder med link 2 ovenfor, så kan du også vælge en lokalitet og se effekterne indlejret på kortet.



*Illustration 1: Barringerkrateret i Arizona.*

## 5.5 Opgave. Chicxulubkrateret – en detektivopgave

I denne opgave skal du undersøge egenskaberne for den asteroide, der udryddede dinosaurerne. Derudover skal du bruge de oplysninger, der findes nederst i opgaven her.

- Hvor stor skal radius for en stenmeteorit hhv. jernmeteorit være, for at levere den observerede mængde iridium?
- Beregn diametrene  $L_{\text{sten}}$  og  $L_{\text{jern}}$ .

Antag at impaktoren slog ned i klippe med densiteten  $2500 \text{ kg/m}^3$ . Antag at faldet skete med vinklen  $45^\circ$ .

- Hvor stor var nedslagshastigheden for hhv. en sten- og jernasteroide? (Se formel (23). Benyt f. eks. et CAS-værktøj til at isolere farten.)
- Hvor stor er nedslagsenergien for stenmeteoritten hhv. jernmeteoritten?
- Hvilken slags meteorit er der størst sandsynlighed for at have forårsaget krateret?
- Prøv at indtaste dine beregnede værdier af impaktordiameter og hastighed ind i TI nSpire-programmet **Impaktor** eller kollisionssimulatoren fra Purdue og se hvor stort et krater, det giver.
- Beregn den tilsyneladende størrelse af det jordskælv en dinosaur vil mærke i en afstand af 2000 km fra nedslagsstedet.
- Forklar hvad dinosaureren mærker ved jordskælvet.



Illustration 2: Det store krater i Mexico. Breddegraden for nedslagsstedet er  $21^\circ$ .

### Formelværktøjskasse

$$\text{Volumen af kugle: } V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

$$\text{Masse, densitet, rumfang: } m = \rho \cdot V$$

$$E_{\text{mekanisk}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$m_{\text{Iridium}} = \sigma \cdot m_{\text{meteorit}}$$

$$d_{\text{krater}} = 150 \text{ km}$$

$$m_{\text{Iridium}} = 2,0 \cdot 10^8 \text{ kg}$$

$$\rho_{\text{Fe}} = 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{sten}} = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\sigma_{\text{Fe}}^I = 3,7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg\_Iridium}}{\text{kg\_meteorit}}$$

$$\sigma_{\text{sten}}^I = 8,8 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg\_Iridium}}{\text{kg\_meteorit}}$$

Iridiumkoncentration i stenmeteoritter er fundet i [3] og iridiumkoncentration er jernmeteoritter er fundet i [4] Iridiummassen er fundet i [5]

## 6 Formelsamling

### 6.1 Atmosfærer for måner og planeter

#### 6.1.1 Middel molekylehastighed af atmosfære

$v_m = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}} = 158 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{\frac{T}{m(u)}}$ , hvor  $T$  er atmosfærens middeltemperatur,  $m$  er atmosfærens delmolekylemasse og  $k$  er Boltzmanns konstant.

#### 6.1.2 Atmosfærestabilitet

$v_m < \frac{1}{6} \cdot v_e = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}$ , hvor  $v_e$  er undvigelseshastigheden for kloden,  $G$  er gravitationskonstanten,  $M$  er klodens masse, og  $R$  er klodens radius.

### 6.2 Legemers baner

#### 6.2.1 Ellipses eccentricitet

$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$ , hvor  $a$  er banens halve storakse og  $b$  er banens halve lilleakse.

#### 6.2.2 Ellipses pericenter- og apocenterafstande

$r_p = a \cdot (1 - e)$  og  $r_a = a \cdot (1 + e)$ , hvor  $a$  er banens halve storakse og  $e$  er banens eccentricitet.

#### 6.2.3 Legemes hastighed om centrallegeme

$v = \sqrt{G \cdot M \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$ , hvor  $G$  er gravitationskonstanten,  $M$  er centrallegemets masse,  $r$  er afstanden mellem legeme og centrallegeme og  $a$  er den halve storakse for banen. Er banen er parabel sættes  $a$  til uendelig og er banen er hyperbel dør formelen ikke.

#### 6.2.4 Keplers 1. lov

Planeter kredser i ellipsebaner om Solen, med Solen i det ene brændpunkt.

#### 6.2.5 Keplers 2. lov

En planet overstryger ens arealer i ens tidsrum. Dvs. planeten bevæger sig hurtigst i sin bane, når den er nærmest centrallegemet. I perihel og aphel gælder  $r_p \cdot v_p = r_a \cdot v_a$ .

#### 6.2.6 Keplers 3. lov

$$\frac{\left(\frac{a}{\text{AU}}\right)^3}{\left(\frac{T}{\text{yr}}\right)^2} = \frac{m + M_{\text{sol}}}{M_{\text{sol}}} \quad \text{eller i SI-enheder} \quad \frac{a^3}{T^2} = \frac{G \cdot (M_{\text{sol}} + m)}{4 \cdot \pi^2}$$

## 6.2.7 Mekanisk energi i gravitationsfeltet

$E_{mek} = E_{kin} + E_{pot} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 - \frac{G \cdot m \cdot M}{r}$ , hvor  $m$  og  $M$  er legemernes masser,  $G$  er gravitationskonstanten, og  $v$  samt  $V$  er legemernes hastigheder.  $r$  er afstanden mellem legemerne.

## 6.2.8 Mekanisk energi i ellipsebane

$a = \frac{-G \cdot m \cdot M}{2 \cdot E_{mek}}$ .  $a$  er banens halve storakse, og resten af symbolerne er beskrevet i formlen ovenfor.

## 6.3 Nedslag og bolider

### 6.3.1 Kraterdiametre

Hvis  $D < 3,2$  km:  $D = 1,451 \cdot \left( \frac{\rho_{impaktor}}{\rho_{target}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot L^{0,78} \cdot v_{impaktor}^{0,44} \cdot g^{-0,22} \cdot \sin^{\frac{1}{3}}(\theta)$ .

Hvis  $D > 3,2$  km:  $D_1 = 1,161 \cdot \left( \frac{\rho_{impaktor}}{\rho_{target}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot L^{0,78} \cdot v_{impaktor}^{0,44} \cdot g^{-0,22} \cdot \sin^{\frac{1}{3}}(\theta) \wedge D = 0,410 \cdot D_1^{1,13}$ .

Ovenfor betyder symbolerne

$D$ : Kraterdiameter.

$L$ : Impaktorens diameter.

$g$ : Tyngdeaccelerationen.

$\rho_i$ : Impaktorens densitet.

$\rho_{target}$ : Underlagets densitet.

$\theta$ : Nedslagsvinkel målt fra vandret.

$v_{impaktor}$ : Impaktorens hastighed før den rammer jorden.

### 6.3.2 Kraterdybde

$d = 36,76 \text{ m} \cdot \left( \frac{D}{\text{m}} \right)^{0,301}$ .  $D$  er kraterdiameteren.

### 6.3.3 Bolideenergi

$E_{stråling} = 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{E_{impaktor}}{\text{J}} \right)^{1,13}$  J. Impaktorens energi er dens kinetiske energi.

## 6.4 Jordskælv

### 6.4.1 Jordskælvsstyrke og energi

$M = 0,67 \cdot \log(E) - 5,87$   $M$  er styrken af jordskælvet og  $E$  er energien.

### 6.4.2 Jordskælv som funktion af afstand til impaktor

$M(r) = M - 2,38 \cdot 10^{-5} \cdot \left( \frac{r}{\text{m}} \right)$  for  $\frac{r}{\text{m}} < 60000$ .

$M(r) = M - 4,8 \cdot 10^{-6} \cdot \left( \frac{r}{\text{m}} \right) - 1,1644$  for  $60000 \leq \frac{r}{\text{m}} \leq 700 \cdot 10^3$ .

$M(r) = M - 1,66 \cdot \log\left(\frac{r}{R_{Jord}}\right) - 6,399$  for  $\frac{r}{\text{m}} \geq 700 \cdot 10^3$ .

## 7 Referencer

1. G. S. Collins *et al.*: "Earth Impact Effects Program." *Meteoritics & Planetary Science* 40, Nr. 6, 817-840. **2005**.
2. "Danske jordskælv - en rystende historie" af *prof. emer. Erling Bondesen*. *Geologisk Nyt* 6, 2001.
3. [Biointeractive.org](http://Biointeractive.org): "Calculating iridium fallout from an asteroid impact", **Juli 2014**.
4. *Geophysical Abstracts* 194, pp. 198, marts **1963**.
5. *Nørgaard et al.*, "Universets melodi," kapitel 2. Gyldendal, **2001**.
6. *Brown et al.*, "The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth." *Nature*, vol. 420, 21 Nov. **2002**, pp. 294-296.)
7. <https://imgur.com/gallery/fWwYaEy>
8. <https://www.Universetoday.com/19616/earths-10-most-impressive-impact-craters/>
9. <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/dinosaur-killing-asteroid-impact-chicxulub-crater-timeline-destruction-180973075/>
10. <http://www.dlh.dk/mat/fysik/leonider/index.htm>.
11. [http://www.astro.ku.dk/~lars\\_c/tbp/solar/meteor.htm#pictures](http://www.astro.ku.dk/~lars_c/tbp/solar/meteor.htm#pictures).
12. P. Challis and R. Kirshner, (Harvard), P. Garnavich (Univ. Notre Dame).  
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap000217.html>
13. <http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-1999/pr-17-99.html>
14. <http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/solarsys/angmom.htm>
15. "Planeter" af Kaare Lund Rasmussen, Munksgaard 1999.
16. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:InnerSolarSystem-en.png>.
17. <http://www.solarviews.com/eng/asteroid.htm/>
18. <http://www.systeme.dk/cd/orbit/deniplaneter/nineplanets/asteroids.html>
19. <http://www.solarviews.com/eng/asteroid.htm>.
20. "Osnabrück Observatorium." A. Hänel.  
[http://nostromo.physik.uni-osnabrueck.de/students/ahaenel/komet/kom\\_obse.htm](http://nostromo.physik.uni-osnabrueck.de/students/ahaenel/komet/kom_obse.htm)
21. H. A. Weaver, T. E. Smith (Space Telescope Science Institute) samt NASA. "Hubble's Panoramic Picture of Comet Shoemaker-Levy 9." <http://www.jpl.nasa.gov/si9/image2.html>
22. "Comet Hale-Bopp (August 1 1997.)"  
<http://www.eso.org/outreach/info-events/hale-bopp/comet-hale-bopp-summary-aug01-97-rw.html>. ESO-skrivelse.
23. "New Observations of Comet Hale-Bopp from La Silla." ESO Press Release 16/98. 22 Oct. 1998.
24. <http://www.hkr.se/web-mna/stud/stud97/steget/kepler.htm>
25. <http://www.science.gmu.edu/~hgeller/>
26. [http://es.rice.edu/ES/humsoc/Galileo/Images/Astro/Conceptions/copernican\\_universe.gif](http://es.rice.edu/ES/humsoc/Galileo/Images/Astro/Conceptions/copernican_universe.gif)
27. *Orbit 2*, Systeme, 1. udg, 1. oplag, medfølgende CD-rom.
28. Helle og Henrik Stub, *Det levende univers*, Nyt Teknisk forlag, 2017.
29. *DATABogen*, F & K-forlaget side 140. (8. udg, 1. oplag.)
30. Wikipedia.
31. NASA.
32. <https://www.spitzer.caltech.edu/news/ssc2006-18-nasas-spitzer-sees-day-and-night-on-exotic-world> samt  
<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/upsilon%20and>
33. ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum).
34. <http://www2.jpl.nasa.gov/galileo/images/topTen02.html>.

35. [http://esamultimedia.esa.int/images/cassini\\_huygens/huygens\\_land/Picture7.png](http://esamultimedia.esa.int/images/cassini_huygens/huygens_land/Picture7.png).
36. [jpl.nasa.gov](http://jpl.nasa.gov).
37. [gsfc.nasa.gov](http://gsfc.nasa.gov).
38. Data er taget fra en kilde som henviser til: <http://kencroswell.com/alchemy.html>
39. [www.u-cergy.fr](http://www.u-cergy.fr)
40. <http://science.gsfc.nasa.gov/691/cosmicice/cometary.html>
41. [ned.ipac.caltech.edu](http://ned.ipac.caltech.edu)
42. *Brown et al:* "The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth." *Nature*, Nov. **2002**, pp. 294-296. (Henvist fra webstedet <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/> Se regneark med data.)
43. <https://www.britannica.com/place/Jupiter-planet/Early-history-of-Jupiter>
44. <https://spaceplace.nasa.gov/barycenter/en/>
45. <https://solarsystem.nasa.gov/news/792/10-things-to-know-about-the-kuiper-belt/>
46. NAAP Labs. (<https://astro.unl.edu/downloads/>)
47. <http://www.solarsystemscope.com/>
48. <http://hypertextbook.com/facts/1999/TopazMurray.shtml>
49. <http://www.sciencedaily.com/releases/2010/10/101008105847.htm>
50. <http://firda.vgs.no/popvit/leonidar.htm>
51. [https://www.global-klima.org/Kap%202/s2\\_5a\\_10.html](https://www.global-klima.org/Kap%202/s2_5a_10.html)
52. Fundet på adressen <http://www.vdrsyd.com/planet/crater.html>
53. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031018216306915>
54. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bedout>
55. <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>
56. <https://science.nasa.gov/resource/kuiper-belt-in-depth/>
57. [https://en.wikipedia.org/wiki/Habitable\\_zone](https://en.wikipedia.org/wiki/Habitable_zone)
58. <https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/facts/>
59. <https://en.wikipedia.org/wiki/User:ScottyBoy900Q>

Derudover er brugt information fra

60. "Paul R. Weissman," *Scientific American* sept. 1998, p. 62-67.
61. "Jane X. Luu and David C. Jewitt," *Scientific American* maj 1996.
62. "The Comet Primer." <http://medicine.wustl.edu/~kronkg/comintro.html>.