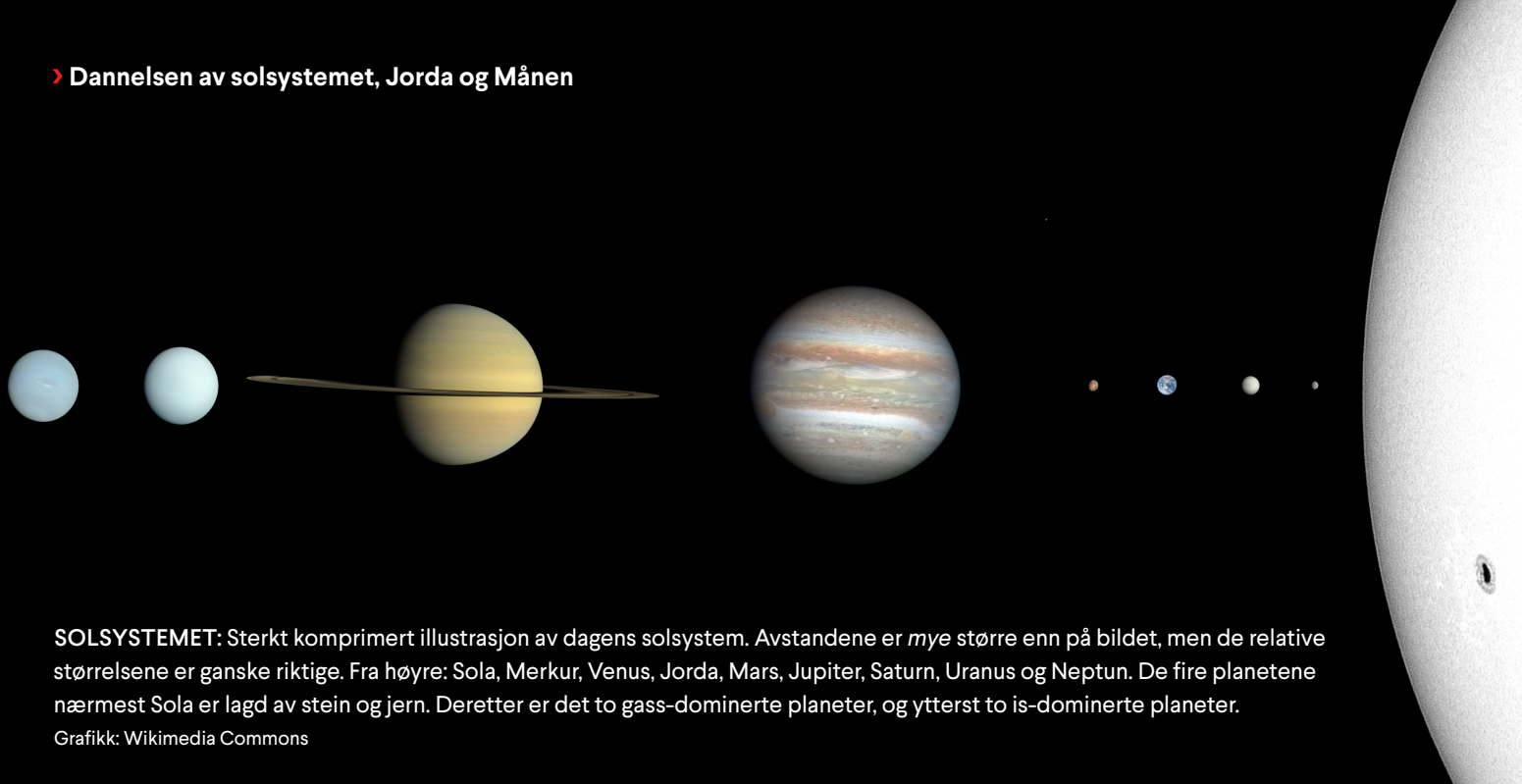


BEGYNNELSEN: Kunstnerisk skisse av en protoplanetær skive med gass, støv og kometer, samt kolliderende planetesimaler og planeter.
Illustrasjon: NASA/FUSE/Lynette Cook

Dannelsen av solsystemet, Jorda og Månen

Sammenklumping og kollisjoner førte til dannelsen av planetene i solsystemet. ➤



SOLSYSTEMET: Sterkt komprimert illustrasjon av dagens solsystem. Avstandene er *mye* større enn på bildet, men de relative størrelsene er ganske riktige. Fra høyre: Sola, Merkur, Venus, Jorda, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus og Neptun. De fire planetene nærmest Sola er lagd av stein og jern. Deretter er det to gass-dominerte planeter, og ytterst to is-dominerte planeter.

Grafikk: Wikimedia Commons



REIDAR G. TRØNNES
Naturhistorisk museum og Senter for planetær beboelighet, Universitetet i Oslo

I denne artikkelen gir jeg en kort oversikt over opprinnelsen, strukturen og materialene i solsystemet, med vekt på den indre stein- og jern-sonen fra Merkur til asteroidebeltet. Deretter behandles den relativt sene og spesielle dannelsen av Jord-Måne-systemet, som skjedde 100–150 millioner år etter Solas fødsel. Den spesielle dannelsesmåten for dette systemet forklarer hvorfor Jorda og Månen avviker fra en regelmessig variasjon i kjerne-størrelse og steinmaterialets jernoksid-innhold fra den innerste planeten Merkur via Venus og Mars til asteroiden Vesta.

Meteorittene forteller

Meteorittene som faller ned på Jorda, er den viktigste kilden til informasjon om den kjemiske og mineralogiske sammensetningen hos det varierte stein- og jern-materialet i de indre jordlignende planetene og asteroidene. Her inkluderer jeg for enkelhets skyld Månen, Vesta og Mars i gruppen jordlignende planeter.

De fleste meteorittene kommer fra ukjente kilder i asteroidebeltet, men vi har også godt dokumenterte meteoritter fra Månen, Mars og Vesta. Meteorittene omfatter (1) primitivt materiale fra planetesimaler som ikke gjennomgikk omfattende oppsmelting, og

Avstander og materialer i solsystemet

Planetenes heliosentriske avstander er deres avstander til Sola. Disse avstandene oppgis i astronomiske enheter (AU), hvor 1 AU er den gjennomsnittlige Sol-Jord-avstanden, som er 149,6 millioner kilometer. Den indre delen av solsystemet, innenfor asteroidebeltet mellom 2,0 og 3,3 AU, omfatter fire stein-jern-planeter: Merkur, Venus, Jorda og Mars, med baner som er hhv. 0,39, 0,72, 1,00 og 1,52 AU utenfor Sola. Månen og asteroiden Vesta (2,36 AU) er også stein-jern-objekter med en kjerne av jern-dominert metall, omgitt av en steinmantel. Utenfor asteroidebeltet kretser to kjempestore gass-dominerte planeter (Jupiter og Saturn: hhv. 5,20 og 9,57 AU) og to litt mindre is-dominerte planeter (Uranus og Neptun: hhv. 19,17 og 30,18 AU). Kuiperbeltet utenfor Neptun inneholder også is-dominerte objekter, inkludert Pluto, Eris, Makemake, Haumea og Orcus.

(2) differensiert materiale fra planetesimaler som ble gjennomsmeltet, slik at en tung smelte av jern sank og dannet en kjerne

< **JERNMETEORITT:** Fotografisk utsnitt fra en avsgd plate fra den store jernmeteoritten Agpalilik fra Grønland. Agpalilik ligger ute foran Geologisk Museum i København, og den avsgde plata er i Naturhistorisk museum i Oslo. Det sølvglinsende materialet med kryssmønster (Wiedmannstätten) er størknet smelte av rent jern, og den brune dråpen er størknet jernsulfid (nå mineralet troilitt, FeS). I flytende tilstand, like før størkning, var den 7,5 cm lange sulfid-dråpen på vei oppover gjennom den tunge jernsmelten. Agpalilik som veide 20,14 tonn, er det største fragmentet i Cape York meteorittfamilien (mer enn 58 tonn) som falt i en stor skur i 1818 eller tidligere. Inuittene brukte dette jernet til kniver, spyd og andre redskaper.

Foto: Naturhistorisk Museum/UiO

Prosesser og stadier i dannelsen av et stjerne-planet-system

1 En forstyrrelse (f.eks. sjokkbølge fra en supernova) kan forårsake sammentrekning av en svakt fortettet molekylær gassky, som også inneholder støvpartikler.

2 Slike gasskyer har et tilfeldig dreiemoment, som bevares under sammentrekningen. Dette fører til økende rotasjonshastighet av en begynnende stjerne-planet-skive (protoplanetær skive), som føres av gass og støv som trekkes inn mot sentrum.

3 Ekvatoriell gass-innstrømning til den nyfødte stjernen, kombinert med bipolar utstrømning fra stjernen. Varighet: Opptil 1 million år

4 Planetvekst i protoplanetær skive, som etter hvert mister gassen.

Skråskisse av gassinnstrømning til roterende protoplanetær skive.

Snitt gjennom stjerne og protoplanetær skive, langs rotasjonsaksen og normalt til ekvatorplanet.

Snitt gjennom stjerne og protoplanetær skive, langs rotasjonsaksen og normalt til ekvatorplanet.

Snitt gjennom stjerne og protoplanetær skive, langs rotasjonsaksen og normalt til ekvatorplanet.

Illustrasjon: Reidar G. Trønnes

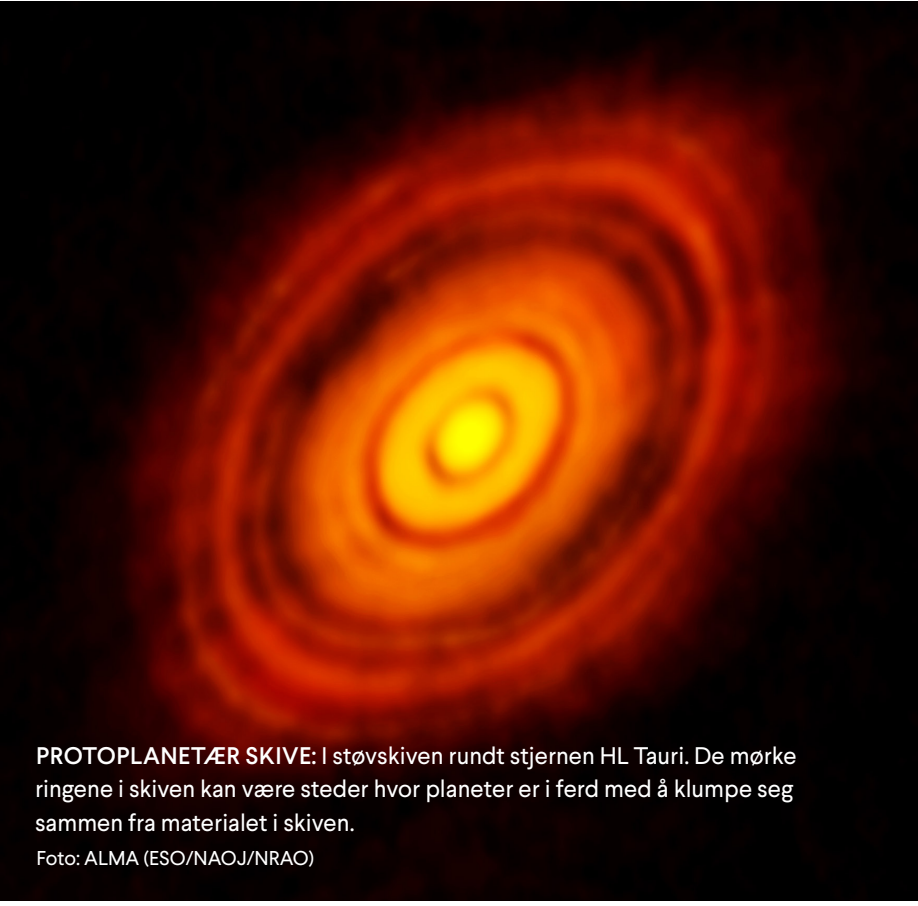
innenfor en mantel av smeltet stein.

De primitive og differensierte meteorittene kalles henholdsvis chondritter og achondritter. Alle meteorittene fra Månen, Mars og Vesta er achondritter. Det er fordi disse objektene ble gjennomsmeltet og fikk segregerte, tunge jern-dominerte kjerner. Jernmeteorittene, som stammer fra kjernene i istykkerslåtte planetesimaler, er også achondritter.

Planetvekst

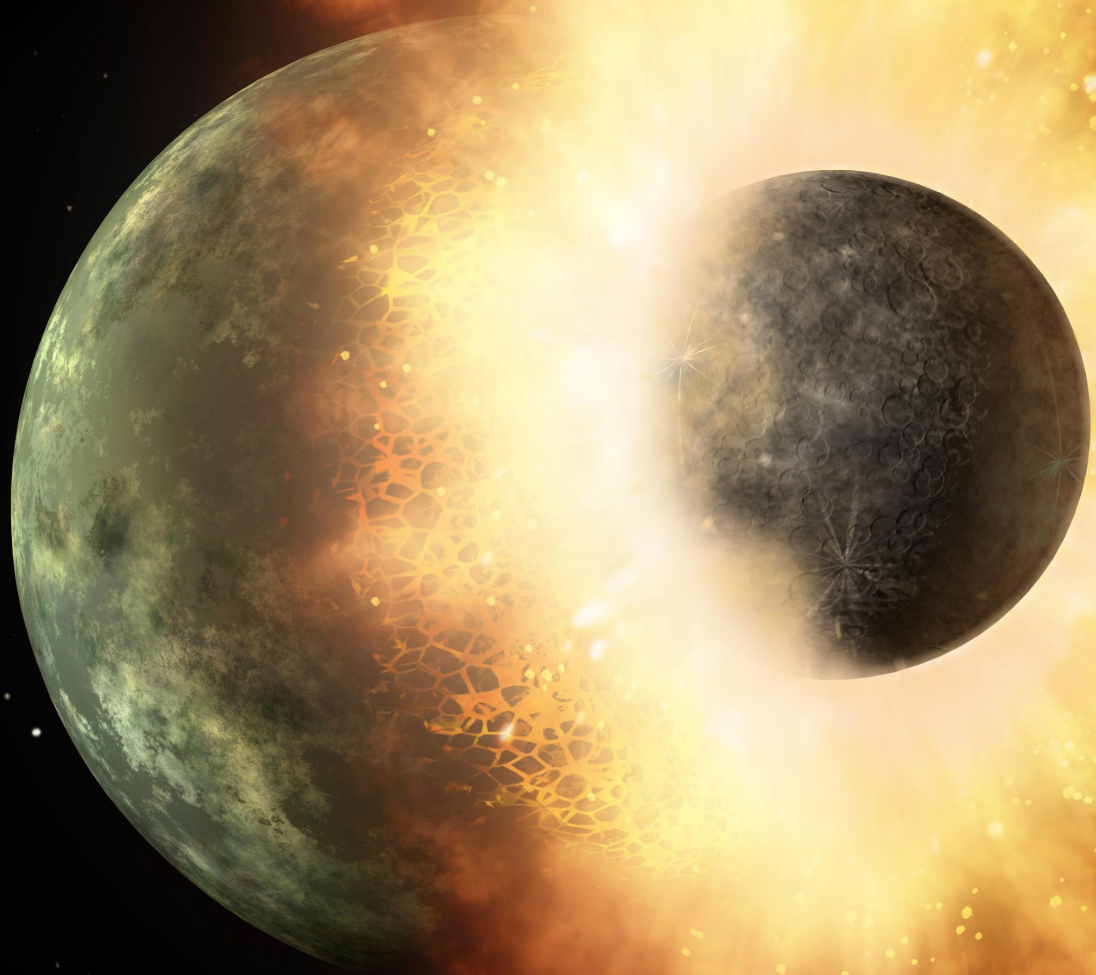
Ved solsystemets begynnelse var den unge Sola omgitt av en skive av støv, stein og gass, kalt en protoplanetarisk skive. Dette var rester fra Solas egen dannelselse. Prosessene som fører til et stjerne-planet-system, er vist i faktaboksen over. Planetene vokste ved gjensidig tiltrekning mellom støv- og steinpartikler, som ble bremsert litt av gassen (mest hydrogen, litt helium) i den protoplanetære skiva.

Etter hvert oppsto *planetesimaler* (Vesta-størrelse) som på grunn av tyngdekraften kolliderte med hverandre og dannet *planetfostre* (Mars-størrelse). Vesta er en planetesimal som ble dannet og gjennomsmeltet i løpet av de første to millioner årene etter Solas fødsel. Mars, som var utvokst til 98 % >



PROTOPLANETÆR SKIVE: I støvskiven rundt stjernen HL Tauri. De mørke ringene i skiven kan være steder hvor planeter er i ferd med å klumpe seg sammen fra materialet i skiven.

Foto: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



KOLLISJONEN: Slik kan man se for seg kollisjonen mellom Jorda og Theia, hvilket førte til dannelsen av Månen.

Illustrasjon: NASA/JPL-Caltech

av dagens størrelse i løpet av de første fem millioner år, er et planetfoster. De tidligste planetesimalene og de påfølgende planetfostrene har oftest diametre på henholdsvis 100–1000 km og 1000–10 000 km.

Bare de planetesimalene som ble dannet tidlig (i løpet av 1–2 millioner år), gjennomgikk fullskala oppsmelting fra varmen utviklet av kortlevde radioaktive isotoper. Aluminium-26 med halveringstid på 0,7 millioner år var den viktigste radioaktive varmekilden. Den påfølgende separasjonen av tunge jernsmelter som sank inn til planetesimal-kjernene, var også en sterkt eksotermisk (varmegivende) prosess fordi den potensielle energien i tunge jerndråper ble omgjort til varme når de sank.

Senere ble det utviklet mye varme fra kollisjoner mellom planetesimaler, planetfostre

og voksende planeter (omgjøring av bevegelsesenergi til varme).

Gassen i den protoplanetære skiva forsvant etter 5–6 millioner år. Dette skyldtes delvis at sterk magnetisk aktivitet fra den unge Sola «blåste» gassen bort. Jupiter og Saturn tiltrakk seg også mye gass under veksten sin mens de forflyttet seg innover. Fra området 5–10 AU flyttet de seg nesten til Mars-banen, og deretter utover og tilbake til sine nåværende baner. Forflytningen innover, som skapte kaos i området 2–4 AU, skyldtes en bremseeffekt fra gassen, som forsvant etter at de to gasskjempene hadde passert asteroidebeltet.

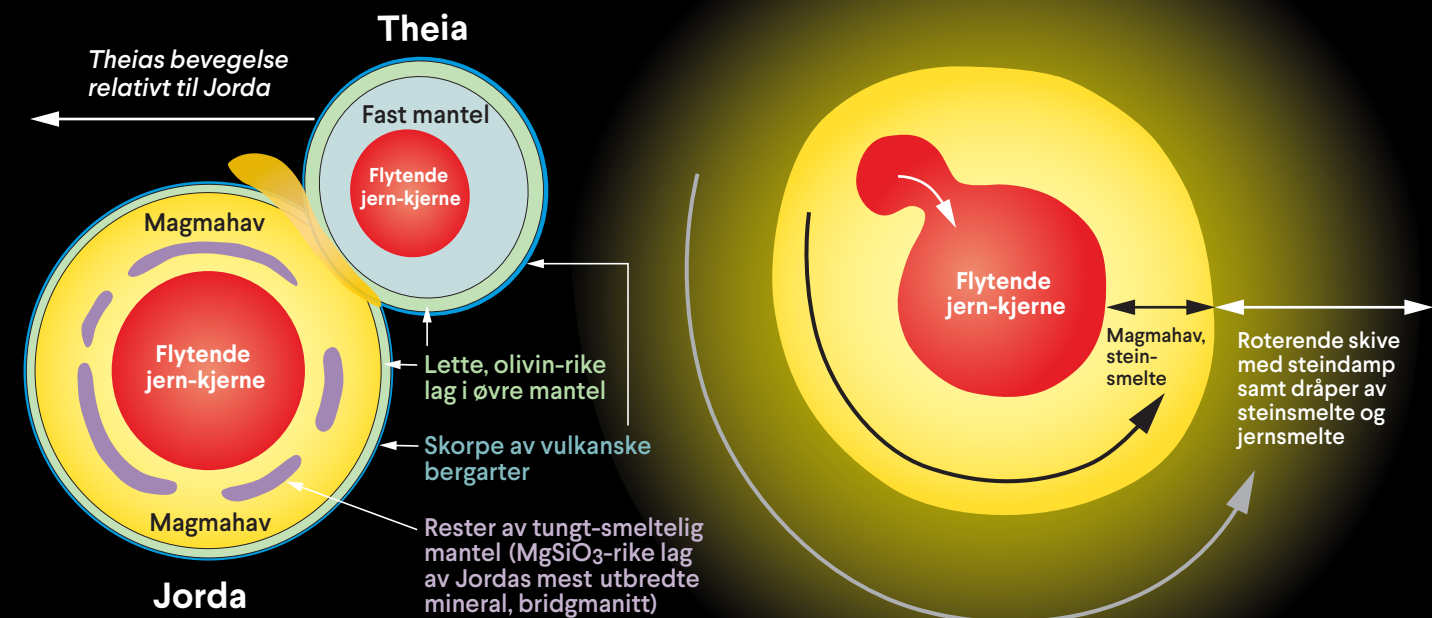
Utenfor asteroidebeltet kan vanddamp danne fast is. Den indre grensen for isdannelse kalles *frostlinjen*. Betingelsen for at Jupiter og Saturn, som opprinnelig var utenfor frostlinjen, kunne klare å legge på seg så store mengder hydrogen- og helium-gass, er at de måtte ha vokst fram store «kjerner» av stein, jern og is (flere ganger Jordas masse) på et meget tidlig stadium. Kjerneveksten foregikk trolig ved at småstein klumpet seg

«Månen ble til på et sent stadium av planetvekst-perioden, 70–120 millioner år etter at Sola og de første planetesimalene var dannet.»

Jorda-Theia-kollisjonen

Skjematisk og forenklet skisse av et sannsynlig Jorda-Theia-kollisjonsscenario.

- 1 Indre struktur og materialer i Jorda og Theia før og under første kontakt.
- 2 Siste del av kollisjonen. Kollisjonsvarmen har smeltet og delvis fordampet all fast stein. Theias kjerne synker raskt inn i Jordas kjerne. Den tangentielle (skrå) kollisjonen har satt den fullstendig oppsmeltede «nye» Jorda i hurtig rotasjon. Jorda med kjerne er fremdeles deformert på dette sene kollisjonsstadiet.



Snitt normalt til Jordas rotasjonsakse etter kollisjonen.

sammen, såkalt grus-vekst (engelsk: *pebble accretion*). Dette skjedde samtidig med planetesimal-veksten i den indre delen av solsystemet i de første to millioner år. Innblanding av H_2O -is utenfor frostlinjen kunne ha bidratt til at de stein- og jernrike kjernene i Jupiter og Saturn ikke smeltet, selv om steinmaterialet inneholdt mye radioaktivt ^{26}Al .

Månen blir til

Månen ble til på et sent stadium av planetvekst-perioden, 70–120 millioner år etter at Sola og de første planetesimalene var dannet. Dette startet med en kjempekollisjon mellom en relativt liten proto-Jord (60–90 % av dagens jordmasse) og en planet som kalles Theia (10–40 % av jordmassen). Mesteparten av den tunge og flytende kjernen i Theia sank raskt inn i Jordas kjerne med relativt begrenset blanding med steinsmelte i Jordas mantel. Mesteparten av Theias mantel blandet seg i Jordas magma. Resten av dette steinmaterialet fordampet og ble til en roterende skive (eller ringformet sky) av steindamp og etter hvert dråper av steinsmelte.

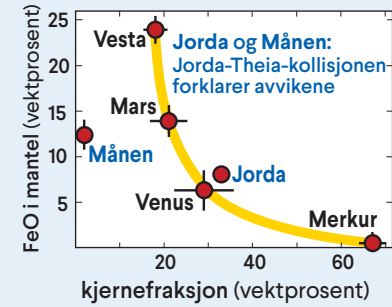
Den roterende skiva (skya) inneholdt også svært små mengder av jernsmelte-dråper fra Theias kjerne. Månen, som kun utgjør 1,2 vektprosent av Jorda, ble til fra denne roterende skiva, som trolig inneholdt minst to Måne-masser i starten.

Den høye rotasjonshastigheten til Jorda, som i dag har en periode på 24 timer, avtar stadig, samtidig som avstanden mellom Jorda og Månen øker. Dette skyldes at rotasjonsenergien i Jorda-Månen-systemet gradvis omgjøres til varme, via indre friksjon. Denne energioverføringen foregår i tide-Jord-bevegelser, inkludert tidevannsbevegelser, og i tilsvarende tide-Måne-bevegelser.

Den opprinnelige rotasjonsenergien i dette systemet ble til ved en tangentiell komponent i en «skrå» Jorda-Theia-kollisjon. Ulike numeriske simuleringer av Jorda-Theia-kollisjonen viser at en rekke ulike scenarioer med forskjellig massefordeling og relative hastigheter, er mulige. Et krav for alle slike akseptable modeller er naturligvis at de må lede til den observerte rotasjonsenergien i Jord-Måne-systemet i dag.

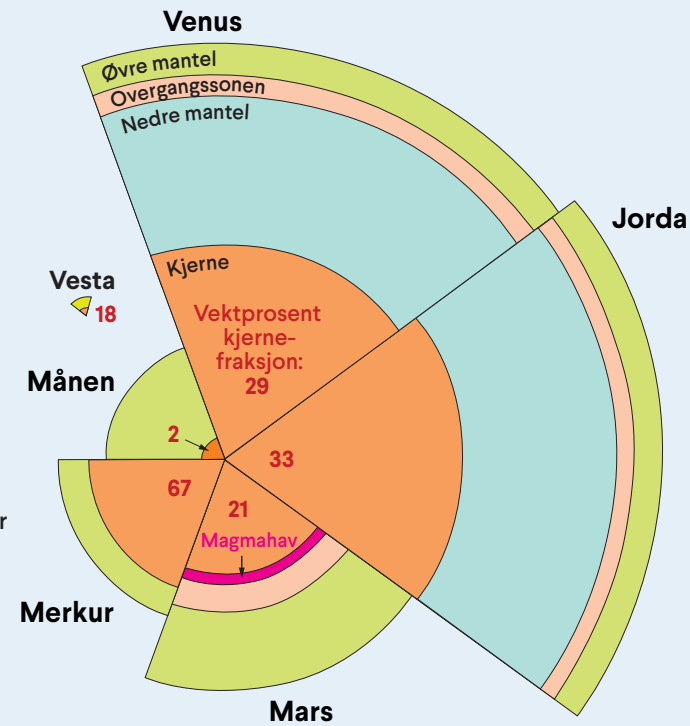
Steinplanetenes oppbygning

Figurene viser FeO-innhold og kjernefraksjon i de jordlignende planetene.



Månen har en liten kjerne fordi mesteparten av Theia-kjernen sank raskt inn i Jordas kjerne. Månens mantel har høyere FeO-innhold enn Jordas mantel fordi:

1. Theia trolig hadde Mars-lignende FeO-innhold.
2. Selv om stein- og jernmaterialet (både stein-smelte og -damp med små jerndråper) i Jorda og i skya som Månen vokste fra, var godt blandet (homogenisert), skilte Månen ut en liten jernkjerne under relativt oksiderende forhold.



Grafikk: Basert på Figur 2 i Trønnes et al. (2019), Tectonophysics 760, s. 165–198.



MÅNEMETEORITT:

Saget og slipt skive av bruddstykke-meteoritten Dar Al Gani 400, som ble funnet i 1998 i Libya. Den nedre sidekanten er 6,5 cm. De lyse fragmentene er bergarten anortositt, dominert av feltspatmineralet plagioklas, fra den tykke høylands-skorpen på Månen. De mørke bitene er yngre basaltlava. Bruddstykkene ble til under kollisjoner med meteoriter og asteroider på Månens overflate.

Foto: Naturhistorisk museum/UiO

Materialer og kjernestørrelser

Som vist i figuren over, har de jordlignende planetene ulik kjernefraksjon og mantel-innhold av jernoksid (FeO). Det økende FeO-innholdet og den avtakende kjernefraksjonen utover fra Merkur til Vesta, reflekterer et økende oksygen-innhold i materialene i den protoplanetære skiva utover fra Sola. Den økende oksygen-aktiviteten utover har trolig sammenheng med at konsentrasjonen av hydrogengass var overveldende innerst mot Sola.

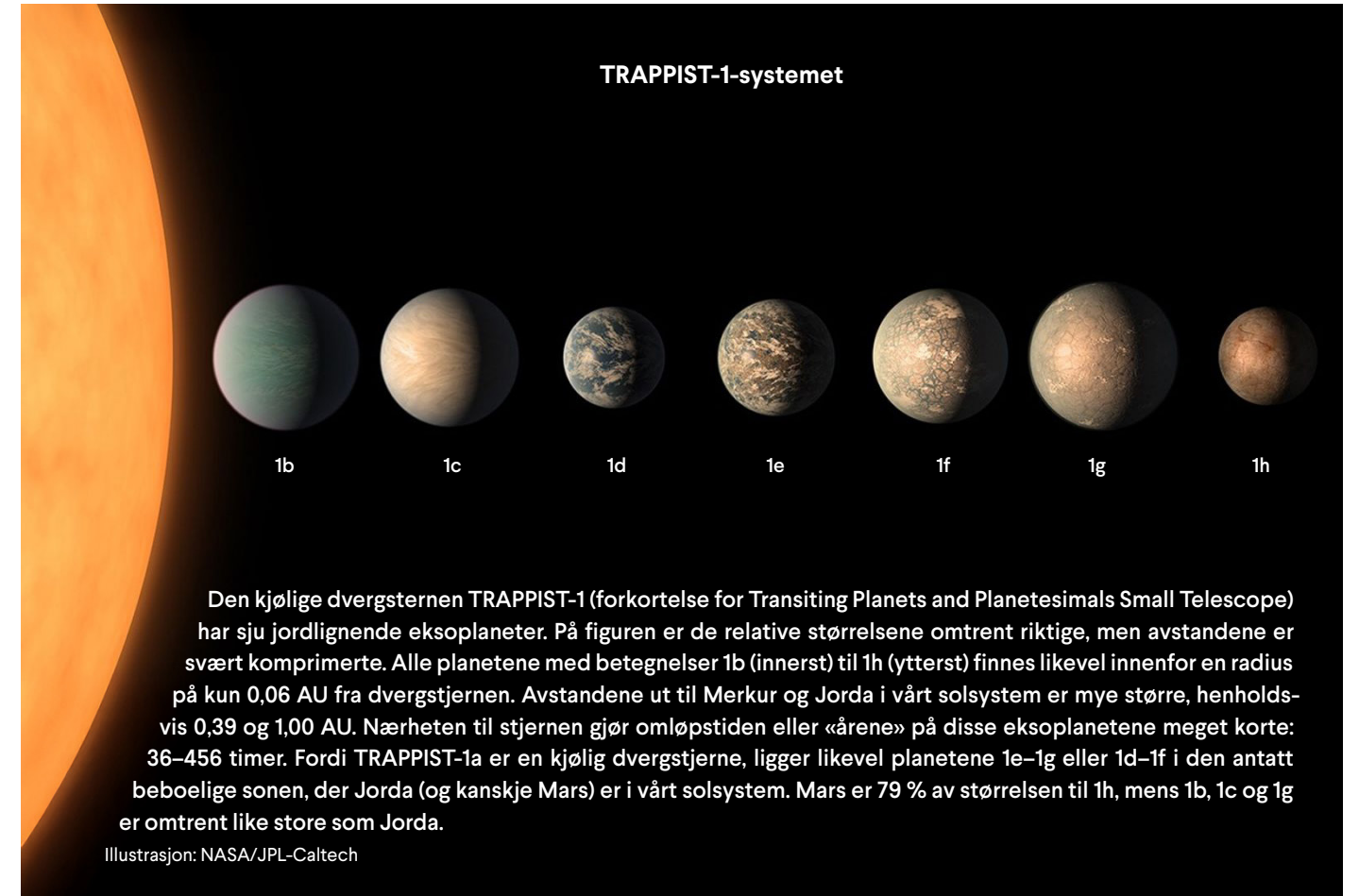
Jorda og Månen avviker noe fra den tilsynelatende regulære sammenhengen med økende FeO-innhold og avtakende kjerne-størrelse utover fra Merkur til Vesta. Dette avviket er todelt: (1) Månen har en meget liten kjerne, kun 2 vektprosent av Månens masse, og (2) Månens mantel har et høyere FeO-innhold (12 vektprosent) enn Jordas mantel (8 vektprosent).

Punkt 1 skyldes at mesteparten av Theias kjerne sank rett inn i Jordas kjerne, med svært begrenset fragmentering til små jerndråper, som kunne blande seg med steindamp og steinsmelte i den roterende skya eller skiva utenfor Jorda. Månen ble dannet fra dette materialet, der det var lite metallisk jern tilgjengelig. Jordas kjerne, derimot, er ganske stor (større kjernefraksjon enn nabo- og søsterplanet Venus), nettopp

fordi Jorda effektivt mottok Theia-kjernen, mens mye av steindampen gikk tapt til verdensrommet og til Månen.

Det høyere FeO-innholdet i Månens mantel (punkt 2) skyldes trolig at Månen samlet seg til en kule med flytende kjerne og flytende steinmantel (magmahav), under mer oksiderende forhold enn de oksygen-fattige og hydrogen-rike omgivelsene til de opprinnelige planetesimalene og planetfostrene som bygde naboplanetene Jorda (dvs. proto-Jorda) og Venus. Disse planetesimalene og planetfostrene vokste hovedsakelig i løpet av henholdsvis to og fem millioner år, da det fremdeles var mye hydrogengass i den protoplanetære skiva i de indre delene av solsystemet. Dette gjorde at en del av de metalliske jerndråpene i steinsmelte som ble til Månen, oksiderte til FeO. Dermed sank kjernefraksjonen ytterligere, samtidig som FeO-innholdet i mantelen økte til 12 vektprosent.

Vi vet at den steindamp- og steinsmelte-dominerte skiva som sirkulerte rundt Jorda og ga opphav til Månen, var godt blandet. Det er fordi de stabile isotopforholdene for grunnstoffer som oksygen, kalsium og titan er nesten identiske i Jorda og Månen. Det opprinnelige FeO-innholdet (ca. 8 vektprosent) i skiva var trolig også homogenisert. Det er derfor sannsynlig at Månen ble oksidert under sin vekst og senere magma-hav-krystallisering.



Andre planetsystemer gir innsikt i solsystemet

Andre stjerne-planet-systemer gir verdi-full innsikt i hvordan solsystemet er blitt dannet og har utviklet seg. Vår kunnskap om stjerne-planet-systemer er basert på observasjoner og teoretiske beregninger av solsystemet i mer enn 500 år. I løpet av de siste 50–80 årene har moderne teleskoper, romteleskoper, bemannede og ubemannede romsonder samt teoretisk og eksperimentell fysikk revolusjonert vår innsikt i universet også utenfor solsystemet.

Det er nå nesten 30 år siden den første planeten i bane rundt en annen stjerne (51-Pegasi) ble rapportert i *Nature* i november 1995. Oppdagerne fikk Nobelprisen i fysikk i 2019. 11. september 2025 hadde vi 5989 bekreftede eksoplaneter i 4615 ulike stjerne-planet-systemer, og disse tallene vokser raskt. Eksoplanetene gir et godt innblikk i variasjonen mellom ulike stjerne-planet-systemer. Alle systemene vi har funnet til nå, avviker betydelig fra solsystemet vårt.

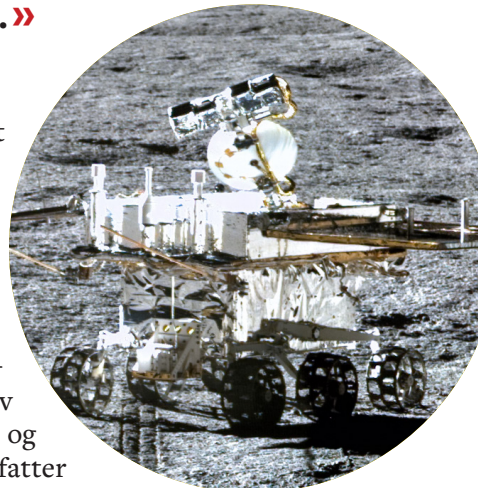
Pågående utforskning i det indre solsystemet

I løpet av det siste tiåret har vi gjort store framskritt i utforskningen av Månen. Resultatene fra det meget vellykkede kinesiske Chang'e-programmet, med til sammen seks

«Alle planetsystemene vi har funnet til nå, avviker betydelig fra solsystemet vårt.»

måneferder, har gitt mye interessant informasjon om bergarter og strukturer. Særlig i et nordlig område på Månens forside og i et sørlig område på baksiden.

Flere andre romfartsorganisasjoner og private selskaper planlegger også nye måneferder. Pågående og planlagt utforskning av flere andre jordlignende planeter og asteroider er også i gang. Dette omfatter blant annet den hovedsakelig europeiske BepiColombo-ferden til Merkur, flere ulike ferder til Venus og Mars, samt en liten NASA-finansiert ferd til den metalliske asteroiden Psyche. I tillegg er det også flere pågående og planlagte ferder i de ytre delene av solsystemet, blant annet til Jupiter og Jupiters store måner. Dette vil gi oss mer kunnskap om dannelsen og utviklingen av solsystemet vårt. /



PÅ BAKSIDEN: Den kinesiske roveren Yutu-2 ble i 2019 den første roveren plassert på Månens bakside i forbindelse med Chang'e 4-ferden.

Foto: CSNA/Siyu Zhang/ Kevin M. Gill