



Anders Johansen

är professor i astronomi vid Lunds universitet. Han disputerade 2007 i astrofysik vid Heidelbergs universitet och Max Planck-institutet för astronomi. Efter en kort vistelse som postdoktor vid Leidens universitet i Nederländerna erhöll han en fast tjänst i Lund 2010. Anders Johansen har fått åtskilliga priser för sin teoretiska forskning om planetbildning, däribland Harold C. Urey-priset från Amerikanska astronomiska sällskapet 2013.



Hur har vårt planetsystem uppstått? Varför är vissa planeter små och steniga – som vår egen jord – medan andra är mer som jättelika gasbollar? Anders Johansen hjälper oss att finna ledtrådarna såväl på nära håll som i avlägsna stjärnors planetära barnkammare. Det visar sig vara många stadier som måste passeras för att en planet ska bli till.

Bilden: Asteroiden Lutetia, fotograferad av Rosetta-sonden. (ESA)

Hur bildas planeter?

Vad är egentligen en planet? Många har säkert hört talas om Internationella astronomiska unionens (IAU:s) försök att definiera begreppet, och om de kontroverser som följde efter att Pluto degraderades till "dvärgplanet" 2006. Det höga tonläget i debatten berodde säkert på att vissa astronomiska objekt – som solen, månen och många av planeterna i solsystemet – har varit kända av människan sedan lång tid, och av många uppfattas nästan som del av det kulturella arvet. Sådant kan man inte bara definiera om utan att det väcker känslor. I debatten 2006 spelade det till exempel roll att det var just en amerikansk astronom, Clyde Tombaugh, som 1930 hade upptäckt Pluto, och att en satellitmission, New Horizons, redan hade finansierats av NASA för att utforska denna "amerikanska" planet.

Det kan tyckas konstigt att man har upprörda diskussioner om vad som är en planet, när exempelvis begreppet "stjärna" inte ens har någon formell definition. Användandet av ordet stjärna täcker in ett brett spektrum av objekt, från röda dvärgstjärnor som är så snåla med sin förbrukning av väte att de kan leva hundratal miljarder år, över gula stjärnor som solen, till jättestjärnor som bara lever några miljoner år innan de exploderar som supernovor. En stjärna kan väl ungefär definieras som ett gravitationellt bundet objekt av gas som upprätthåller sin jämvikt mellan inåtriktad gravitation och utåtriktat tryck genom att utlösa energi från kärnfusion i sitt inre.

Kan vi då hitta en definition av planeter som på motsvarande sätt kan användas för att karakterisera dem som fysikaliska objekt? Här vill jag argumentera för att det speciella med planeter och planetliknande objekt är att de har bildats genom kollisioner mellan fasta partiklar av damm och is. Universums totala energi består till 68 % av mörk energi, en mystisk kosmisk energiform

som får universum att accelerera snabbare och snabbare. Mörk materia, som bara växelverkar med vanlig materia genom gravitationen, täcker ytterligare 27 % av energibudgeten i universum. Den mörka materian spelar en viktig roll när galaxer bildas: på grund av sin gravitation verkar den som förtättningspunkt för den vanliga materian att strömma in mot, och på så sätt bildas de ansamlingar av stjärnor som vi kallar galaxer. Vanlig materia – det vill säga de atomslag som vi känner från det periodiska systemet – bidrar bara med 5 % av universums totala energi, och då framför allt i form av väte och helium.

Tidigt i universums utveckling slogs en del av väteatomerna samman till helium och en aning litium – grundämnet med tre protoner. Men inuti stjärnorna bildades så småningom genom ytterligare kärnfusion en ny komponent av universums materia: de tunga grundämnena. Alla de tyngre grundämnena har faktiskt bildats genom kärnfusion i stjärnorna och har sedan återvunnits till den interstellära gasen (gasen mellan stjärnorna) genom tunga stjärnors supernovaexplosioner och genom massförlust från de stjärnor som har för låg massa för att explodera som supernovor.

Tunga grundämnen som kol, syre, kisel och järn bildar molekyler med den avgörande egenskapen att de kan kondensera som fasta dammpartiklar och ispartiklar. Det kan förstås även väte och helium, men bara vid sådana extremt låga temperaturer och höga tryck som inte förekommer i det interstellära mediet. Därför ger tunga grundämnen universum ett helt nytt sätt att bilda struktur, nämligen genom nukleering (bildandet av fasta partiklar från gasfasen) och efterföljande tillväxt i partikelkollisioner. Medan galaxer och stjärnor bildas genom att gravitation samlar materia i områden med allt högre densitet, så kan dammpartiklar i stället växa genom kollisioner helt utan gravitationens hjälp. Det är attraktionskraften mellan molekylerna i den fasta materiens kristallstruktur som får dammpartiklarna att fastna i varandra när de väl råkar kollidera. Och vilket öde som nu väntar dessa fasta partiklar: att bilda hela planetsystem med kanske beboeliga planeter som jorden, där liv kan uppstå och civilisationer utvecklas!

Damm och småsten

Som första steg växer dammpartiklarna till *småstenar* med storlekar mellan millimeter och centimeter. Sedan kolliderar dessa småstenar och bildar kilometerstora *planetesimaler*, som aster-

oiderna i solsystemet. Slutligen kolliderar de största av planetesimalerna med varandra och med resterande småstenar och bildar färdiga *planeter*.

Nu är det ju inte helt sant att gravitationen inte spelar någon roll i denna process. Redan när småstenarna samlas till planetesimaler får de en hjälpande hand från gravitationen – och tillväxten från planetesimal till planet kan bara gå tillräckligt snabbt för att gravitationen ökar sannolikheten för att planetesimalerna kolliderar med varandra och med resterande småstenar. Men dessa steg i processen kan bara nås efter att dammpartiklarna har kolliderat och bildat småstenar – och i detta första steg av planetbildningen är gravitationen mellan partiklarna alltför svag för att påverka kollisionsfrekvensen.

Småstenar spelar en central roll i planetbildningen, och det är därför värt att titta närmare på hur de bildas – också därför att småstenar faktiskt kan observeras kring unga stjärnor idag. Stjärnor bildas när ett gasmoln i en galax kollapsar på grund av sin egen gravitation. Molnets temperatur är väsentligen oförändrad under kollapsen. Gas som komprimeras värms ju upp, men temperaturen i molnet kan hållas konstant på grund av energiförlust från fotoner som strålas ut när elektronerna i molekylerna, som bildas i den allt tätare gasen, deexciteras efter kollisioner med andra molekyler. Den konstanta temperaturen får kollapsen att accelerera och till sist bildas en *protostjärna* i molnets centrum, matad av infallande gas från det molekylära molnet utanför. Men en del av gasen hamnar i en skiva som roterar kring protostjärnan, med den roterande gasen fångad i perfekt balans mellan gravitation och centrifugalkraft, på samma sätt som planeternas banor i solsystemet idag. Dessa skivor kallar man *protoplanetära skivor*. En typisk skiva har en storlek på ungefär 100 astronomiska enheter (1 AE = nuvarande avståndet mellan jorden och solen) och består av 99 % gas (mest väte och helium) och 1 % damm- och ispartiklar som från början har en storlek på några mikrometer, dvs. samma som dammet i interstellära mediet.

Kollisioner mellan dammpartiklarna är vanliga i den täta protoplanetära skivan, och de flesta av dem leder till att partiklarna fastnar i varandra och bildar större och större dammaggregat. När partiklarna har växt till en storlek av millimeter eller centimeter kallar vi dem för småsten (eller *pebbles* på engelska). Små dammaggregat är ganska fluffiga och fastnar bra i kollisioner – tänk bara

på hur dammråttor under soffan fastnar i varandra och bildar större strukturer! Men småstenarna blir alltmer kompakta vid varje kollision och uppnår så småningom en struktur som påminner om den översta sanden i en sandlåda efter att det har regnat och sanden åter har torkat. Tar man upp en bit sammanhängande sand, då står man med en bra motsvarighet till småstenarna i en protoplanetär skiva: fasta men mycket spröda. Ett litet tryck mellan två fingrar är tillräckligt för att sandkakan ska falla sönder till små sandkorn igen. Och på samma sätt pulvriskeras två småstenar som kolliderar till ett moln av mikrometerstora partiklar igen. Därför växer det mesta av dammet och isen i protoplanetära skivor snabbt till småstenar av millimeter-centimeter storlek, men dessa småstenar blir sköra och kan inte växa sig större på grund av de destruktiva kollisionerna mellan dem.

Protoplanetära skivor

En förvånande egenhet hos småsten är att de kan detekteras över avstånd på flera hundra ljusår. Man kan förstås inte fotografera individuella småstenar på ett sådant avstånd. Men småstenarna i en protoplanetär skiva absorberar ljuset från den centrala stjärnan och värms upp till mellan 20 K (långt från stjärnan) och 1000 K (i delarna av skivan närmast stjärnan). Denna värme strålas ut igen i form av infraröd strålning som kan fångas upp av teleskop på jorden som är känsliga för infraröda våglängder (se figur 1). Att detektera värmestrålning från ett område nära en ung stjärna visar därför direkt närvaron av en protoplanetär skiva fylld med damm och småsten. Den dominerande delen av skivan är visserligen gas, men den går inte att detektera. Detta beror på att väte och helium har väldigt låg opacitet (dvs. förmåga att absorbera och skicka ut fotoner) vid temperaturer under 1000 K.

Hur mängden värmestrålning från skivan varierar med våglängden ger nu information om dammpartiklarnas storlek. Små partiklar har nämligen dålig förmåga att skicka ut värmestrålning med en våglängd större än partikelns egen storlek. De två viktigaste teleskopen för att detektera strålning i millimeter-centimeter området är Very Large Array (VLA) i USA och Atacama Large Millimeter Array (ALMA) i Chile. Observationer med dessa faciliteter visar att värmestrålningen från protoplanetära skivor typiskt kommer från partiklar av millimeter-centimeter storlek. Här kan astronomer alltså direkt detektera strålningen från småstenarna

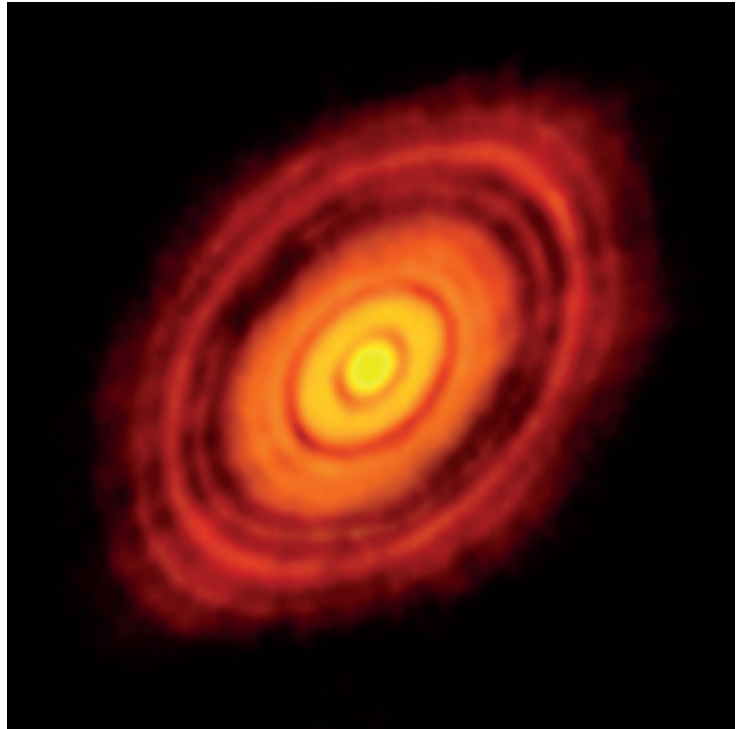


BILD: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO). LICENS: CC BY 4.0

Figur 1: Den protoplanetära skivan kring den unga stjärnan HL Tau. Bilden visar strålning med en våglängd på 1 millimeter, uppfångad av ALMA-teleskopen i Chile 2014. Skivans opacitet (förmåga att absorbera och skicka ut ljusfotoner) domineras vid denna våglängd av millimeterstora småstenar. Notera de mörka ringarna – man menar att de kan vara orsakade av unga protoplaneter som blockerar flödet av småstenar genom skivan.

som har bildats genom kollisioner mellan dammpartiklar – det första steget i planetbildningen.

Att detektera småstenar kring unga stjärnor är förstås intressant i sig själv, men att partikeltillväxten fastnar vid millimeterstorlek är ingen bra nyhet för planetbildningen. Astronomer känner numera till nästan 4000 planeter som kretsar kring andra stjärnor – så kallade exoplaneter. En av de mest kompletta kartläggningarna av exoplanetpopulationen i Vintergatan gjordes av satelliten Kepler som den amerikanska rymdstyrelsen NASA sköt upp 2009. Kepler observerade 150 000 stjärnor under nästan fyra år och hittade flera tusen planeter kring dessa. Planeterna detekterades med hjälp av den så kallade passagemetoden, där variationen i stjärnans ljusstyrka när en planet passerar framför den

ger information om planetens storlek och banans period. Sannolikheten att en planetbana ska passera framför sin centralstjärna, sett från jorden, är bara några få procent. Tar man hänsyn till detta kan man sluta sig till att ungefär varannan stjärna i Vintergatan borde ha minst en planet kring sig. Kepler-satelliten var dessutom bara känslig för planetbanor inom Merkurius bana i solsystemet, det vill säga banor inom ett avstånd på ungefär 0,4 astronomiska enheter från stjärnan. Detta beror på att passagesannolikheten är proportionell mot ett genom avståndet från stjärnan. Man kan därför dra slutsatsen att i princip alla stjärnor bildar ett planetsystem kring sig.

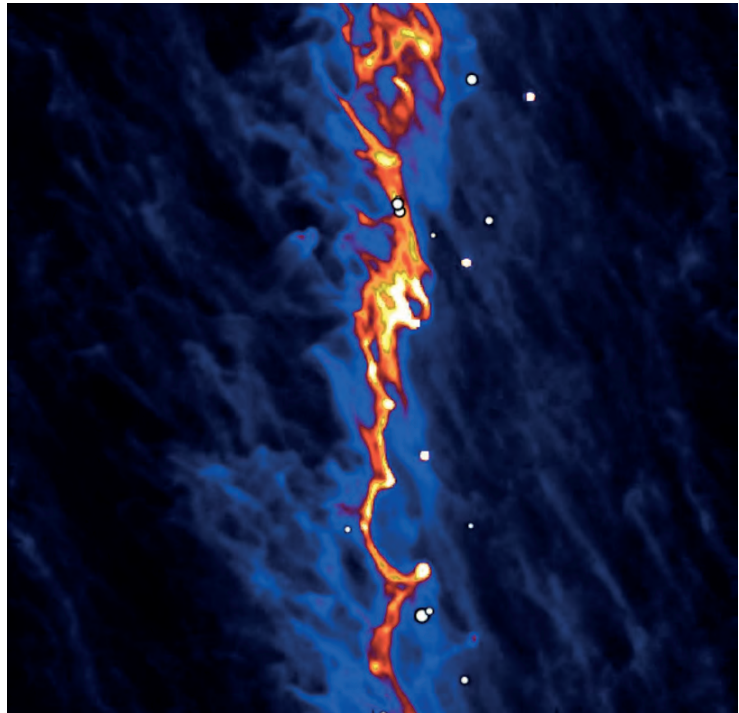
Vi måste alltså komma vidare från småstenarna och deras dåliga förmåga att fastna i varandra vid kollisioner. Vi behöver en hjälpende hand från gravitationen. Men gravitationen mellan två småstenar är fortfarande för svag för att påverka deras dynamik. Situationen påminner om den vid stjärnbildning: gravitationen mellan två enskilda vätemolekyler är ofattbart liten – men ett område som har stor densitet av vätemolekyler kan kollapsa på grund av molekylernas kollektiva gravitation. De vätemolekyler som så småningom bildar stjärnor ansamlas först genom chockvågor från supernovaexplosioner, vågor som rör sig genom molekyllära gasmoln och ökar densiteten där gasen komprimeras. Därefter kan gravitationen ta över.

Planetesimaler

I den protoplanetära skivan finns dock inga chockvågor som kan komprimera småstenarna. Men det visar sig att småstenar koncentreras spontant i gasen och uppnår mycket hög densitet. Den fysikaliska process som orsakar detta kallas *tvåströmsinstabiliteten* (eller *streaming instability* på engelska). Som analogi till hur småstenarna koncentreras i gasen kan man betrakta tävlingscyklister. Tävlingscyklister reducerar friktionen mot luften genom att cykla i grupp. Cyklisterna ytterst i gruppen får kämpa mot friktionen, som om de cyklade ensamma, men deras kamp mot luftmotståndet leder till att cyklisterna bakom känner en medvind från luften som sugts fram bakom cyklisterna framför. Småstenarna i den protoplanetära skivan ansamlas på liknande sätt till täta klumpar där densiteten lokalt når 1 000 eller 10 000 gånger gasens densitet. Nu kan gravitationen ta över och pressa samman klumparna ytterligare till planetesimaler med storlek på ungefär 100 ki-

lometer. När gravitationen tvingar småstenarna att samlas, så har det ingen betydelse att de inte fastnar när de kolliderar (se figur 2).

För 4,5 miljarder år sedan omgärdades alltså vår egen sol av en skiva av gas, småstenar och planetesimaler. De flesta av planetesimalerna inkorporerades så småningom i de växande planeterna, men några populationer av dem finns kvar än idag, dels i asteroiderna mellan Mars och Jupiters banor, dels i Kuiper-bältet bortom Neptunus. Jupiters gravitationella inverkan gav planetesimalerna i asteroidbältet så höga kollisionshastigheter att de inte kunde bilda en planet där. Jupiters gravitation har dessutom tömt asteroidbältet över miljarder år så att endast omkring 0,1 % återstår av dess ursprungliga massa. Men de asteroider som ännu finns kvar ger rik information om planetbildningen i solsystemet. De har en karakteristisk storlek på ungefär 100 km, vilket väl mot-



Figur 2: Resultat av datorsimulering av planetesimalbildning genom tvåströmsinstabiliteten. Vi ser här ett område på 0,1 gånger 0,1 astronomiska enheter i en protoplanetär skiva. Stjärnan befinner sig långt till vänster utanför simuleringens område. Färgerna visar småstenarnas densitet. Småstenarna har samlats i ett tätt filament som nu håller på att kollapsa under sin gravitation. Nybildade planetesimaler är markerade med ringar.

svarar den storlek som typiskt uppnås i datorsimuleringar av planetesimalbildning genom tvåströmsinstabiliteten. (Bilden på denna artikels ingressida visar en sådan typisk asteroid, nämligen Lutetia, fotograferad av rymdsonden Rosetta år 2010.)

Fragment av asteroider hamnar ibland på jorden i form av *meteoriter*. Dessa stenar från rymden ger planetforskare och astronomer massor med information om planetbildningen i solsystemet för 4,5 miljarder år sedan. Baserat på de olika meteorittyper som har hittats på jorden har man kommit fram till att det finns två typer av planetesimaler i asteroidbältet – *differentierade* och *primitiva*. Meteoriter av järn och kisel kommer från järnkärnan av en planetesimal som, liksom stenplaneterna, differentierades och bildade en mantel av sten och en kärna av järn. Man menar att jorden smälte på grund av den värme som frigjordes vid kollisioner med de planetesimaler och protoplaneter som jorden fångade in. När en planet eller en asteroid smälter, leder detta till att järnet separeras från stenmaterialet och sjunker mot centrum där det bildas en järnkärna – planeten differentierar. Värmekällan för asteroiderna var sannolikt inte kollisioner utan radioaktivt sönderfall av aluminium-26, en instabil isotop av aluminium som saknar en neutron och med en halveringstid på bara 700 000 år. Detta radioaktiva aluminium bildades inom tunga stjärnor i solens stjärnbildningsområde och förorenade, genom massförlust i vindar och supernovaexplosioner, gasen som sedan bildade solen och dess protoplanetära skiva.

De primitiva planetesimalerna differentierades däremot inte, sannolikt för att de bildades efter att det mesta aluminium-26 redan hade sönderfallit, och deras sammansättning är därför helt olik den man känner från jorden. Primitiva meteoriter har ett innehåll av tunga grundämnen som däremot väldigt väl motsvarar vad man observerar i spektroskopiska observationer av solens atmosfär. De har också behållit sin ursprungliga struktur, därför att planetesimalen inte smälte. Primitiva meteoriter består till stor del av millimeterstora partiklar, kallade *kondruler*, som är inbäddade i en grundmassa av mikrometerstora dammpartiklar. Man menar att kondrulerna och den omgivande massan faktiskt är småsten och damm från den protoplanetära skivan som kretsade kring solen för 4,5 miljarder år sedan. Det är häftigt att man faktiskt kan stå med en riktig småsten från solsystemets planetbildningsfas, när man håller en primitiv meteorit i sin hand (se figur 3).



© METEORITES AUSTRALIA
WWW.METEORITES.COM.AU

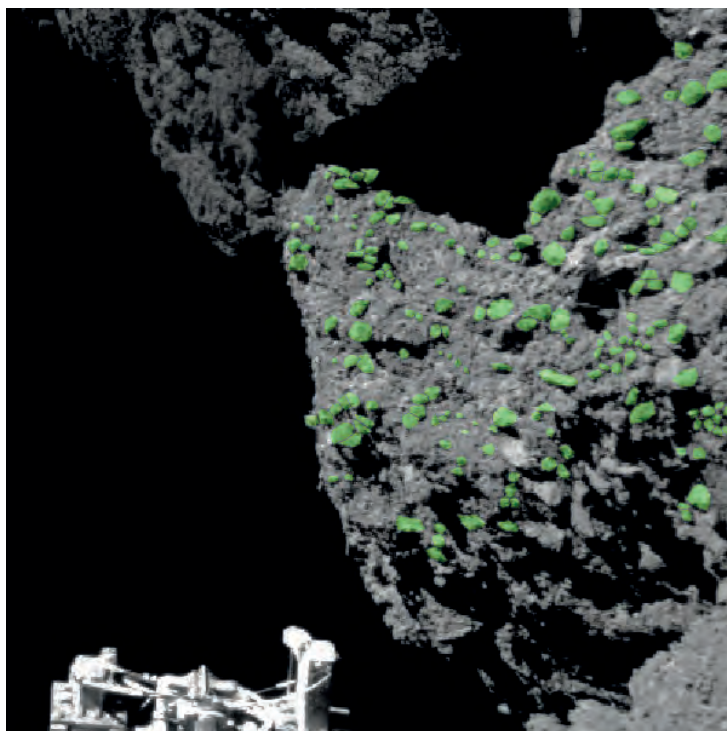
Figur 3: Fragment av Murchison-meteoriten, en så kallad kolhaltig kondrit. Sådana meteoriter har ett stort innehåll av grundämnet kol i form av långa, organiska molekyler. Man ser här också kondrulerna, millimeterstora stenar som kristalliserade för 4,5 miljarder år sedan. Dessa kondrulor motsvarar sannolikt de småstenar som observeras i protoplanetära skivor kring andra stjärnor.

Bortom Neptunus bana lyckades planetesimalerna i Kuiperbältet inte heller att bilda en planet. Detta beror sannolikt på att densiteten så långt från solen var för låg för att samla planetesimaler och småstenar till planeter. Kuiperbältet innehåller ett stort antal av is-asteroider och också dvärgplaneter som Pluto, Eris och Sedna. Is-asteroiderna har en karakteristisk storlek på ungefär 100 kilometer, likt asteroiderna, vilket tyder på att de har bildats på liknande sätt. Dvärgplaneterna bildades sannolikt närmare solen och hade redan börjat tillväxten mot planetstorlek när de slungades ut till banor i Kuiperbältet av jätteplaneternas gravitation.

De allra flesta objekten i Kuiperbältet är betydligt mindre än 100 kilometer, även om dessa små objekt totalt sett inte representerar mycket massa. Ibland går sådana små is-asteroider vilse bland jätteplaneterna: som biljardbollar skjuts de runt mellan Uranus, Neptunus, Saturnus och Jupiter och de kan till slut hamna i den inre delen av solsystemet som en komet. Kometer får sin karakteristiska svans när is av bland annat vatten, koldioxid och

kolmonoxid sublimerar vid de höga temperaturer som finns här så nära solen där vi befinner oss.

Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko är ett helt vanligt exempel på en sådan komet från Kuiperbältet. Men efter att 67P var mål för den europeiska rymdsonden Rosetta är denna komet idag en av de bäst utforskade småkropparna i solsystemet. Rosetta kretade kring 67P under 2014 och skickade ner en landare, Philae, till kometens yta. Att landa på en komet är faktiskt svårt, eftersom gravitationen är så svag. Flykthastigheten från 67P är bara omkring 1 m/s, och därför behövde Philae bromsa ner ordentligt för att kunna stanna på ytan efter landningen. Tyvärr fungerade inte harpunen som skulle förankra kometen på ytan, och Philae studsade tre gånger innan den slutligen hamnade på en skuggig



Figur 4: Bild av ytan på kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko, gjord av Rosettas landare Philae i området där den landade efter att ha studsat tre gånger på ytan. Man ser här småstenar markerade i grönt. Man menar att hela kometen består av sådana småstenar från den protoplanetära skivan som kretsade kring solen för 4,5 miljarder år sedan. (Bild från Poulet et al, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 462:1, p. S23 (2016) (DOI: 10.1093/mnras/stw1959).)

plats där de soldrivna batterierna inte kunde laddas som planerat. Men Philae hann ändå att ta massor av bilder och göra mätningar på kometytan. Bilder från ytan, som den i figur 4, visar att komets yta består av millimeterstora småstenar, lite som en sandlåda. Radarmätningar av den inre strukturen tyder dessutom på att densiteten bara är ungefär hälften av vattens densitet, och att den är homogen på skalor större än några meter. Det betyder att det finns en hel del tomrum inuti kometen, tomrum som måste vara på skalor mindre än några meter – det vill säga, kometen kan inte bestå av några få stora kompakta bitar. I stället kan tomrummen vara uteslutande på millimeterskalor, vilket är det man förväntar sig om kometen består av millimeterstora småstenar hela vägen igenom. När sådana småstenar packas tätt uppstår naturliga tomrum av samma storlek som småstenarna.

Från planetesimaler till planetsystem

Vi kan alltså observera det första steget av planetbildningen – småstenarna – i protoplanetära skivor kring unga stjärnor, och det andra steget – planetesimalerna – i vårt eget solsystem. Dessa observationer ger massor av information om under vilka förhållanden planeter bildas och växer. Nästa information vi behöver är en tidsskala för hela planetbildningsprocessen. Genom att observera grupper av unga stjärnor med känd ålder kan man ta reda på livstiden för protoplanetära skivor. Denna information är intressant eftersom många planeter växer till genom att fånga in gas från sin protoplanetära skiva. Gasjättar som Jupiter och Saturnus bildas när en fast planet växer till ungefär 10 gånger jordens massa. Då kan den attrahera gas från den protoplanetära skivan och bilda en planet som Jupiter som sannolikt har en kärna just på omkring 10 gånger jordens massa, men en total gasmassa på över 300 jordmassor. Isjättarna Neptunus och Uranus har fasta kärnor på ungefär 14–15 jordmassor och atmosfärer bestående av några få jordmassor väte- och heliumgas. Dessutom har nästan hälften av andra stjärnor minst en så kallad superjord kring sig. Dessa superjorदार har massor mellan 2 och 10 gånger jordens, och deras låga densitet tyder på att de ofta har en substantiell gasatmosfär lik isjättarnas i solsystemet. Gasjättar, isjättar och superjorदार har alltså alla gasatmosfärer med mycket stor massa, och måste därför ha bildats inom *några få miljoner år*, medan det fortfarande fanns gas kvar i den protoplanetära skivan att fånga in.

Olika planettyper

Astronomer känner idag till närmare 4000 planeter kring andra stjärnor, de så kallade exoplaneterna. Populationen av planeter i solsystemet och kring andra stjärnor kan ungefär delas upp i följande kategorier.

Stenplanet: Planet med massa mellan 0,1 och 2 gånger jordens, och som har en stenmantel och en järnkärna, men ingen tjock gasatmosfär. Dessa små planeter är fortfarande svåra att detektera kring andra stjärnor med nuvarande teleskop. I vårt eget solsystem är det de innersta planeterna – Merkurius, Venus, jorden och Mars – som utgör stenplaneter.

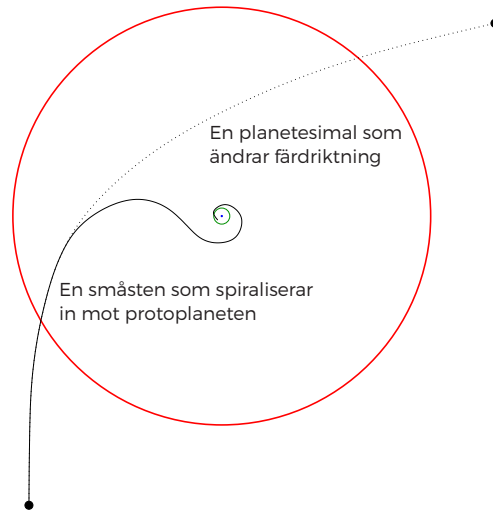
Superjord: Planet med massa mellan 2 och 10 gånger jordens massa. Har ofta en tjock gasatmosfär. Superjordar finns inte i solsystemet, men ungefär 50 % av andra stjärnor har en superjord kring sig.

Gasjätte: Planet där massan består av minst 50 % gas. Gasjättar har en fast kärna, som en stenplanet eller en superjord, men lyckades fånga in 100 gånger jordens massa eller mer i form av gas från den protoplanetära skivan. I vårt solsystem är det Jupiter och Saturnus som utgör gasjättar.

Isjätte: Planet där kärnan av is och sten har en större massa än gasatmosfären. Uranus och Neptunus i solsystemet är isjättar. Isjättar påminner om superjordar, men de bildades i områden långt bort från stjärnan där det var tillräckligt kallt för vatten att kondensera till is.

Heta respektive varma Jupiter: Gasjättar som kretsar mycket nära sin stjärna: närmare än 0,1 AE för heta Jupiter och mellan 0,1 och 1,0 AE för varma Jupiter.

Datorsimuleringar visar att tillväxten från planetesimal till planet med 10 gånger jordens massa – tillräcklig för att attrahera en tjock gasatmosfär – tar över 10 miljoner år på de avstånd Jupiter och Saturnus bildades. Tillväxten går dock betydligt fortare om man tar med i beräkningen att skivan inte bara innehåller gas och planetesimaler, utan också massor av småsten som inte lyckats bilda planetesimaler. Vi vet ju från observationer att det finns småstenar i protoplanetära skivor med väldigt olika ålder. Dessa småstenar kan fångas in av en växande protoplanets gravitation mycket effektivt, faktiskt mera effektivt än vad planetesimalerna fångas in. Detta beror på att småstenarna påverkas av friktion från gasen i den protoplanetära skivan. Denna friktion omvandlar ki-



Figur 5: En protoplanet kan växa väldigt snabbt genom att fånga in småstenar. Processen kallas "pebble accretion" eller "småstensinfångning". En planetesimal som passerar en protoplanet ändrar riktning på grund av gravitationen, förutsatt att den hamnar inom den röda cirkeln som representerar det område där protoplanetens gravitation dominerar över centralstjärnans gravitation, men att den faktiskt kolliderar med protoplaneten är relativt osannolikt. Småstenen, å andra sidan, förlorar under passagen kinetisk energi på grund av friktion med gasen och binds därför gravitationellt till protoplaneten. Så småningom kolliderar den med protoplaneten efter ytterligare energiförlust.

netisk energi till termisk energi när en småsten passerar förbi en växande protoplanet. Förlusten av energi resulterar i att småstenen binds gravitationellt till protoplaneten, och sedan spiraliserar in mot protoplaneten på grund av den fortsatta energiförlusten (se figur 5).

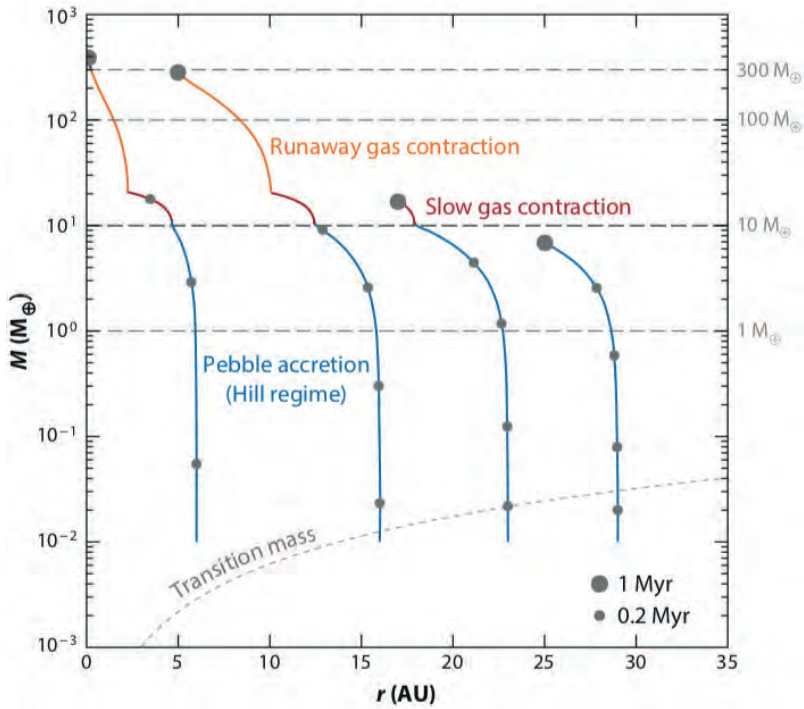
Planetmigration

Men planetbildningen står inför ännu en svår utmaning – nämligen planetmigration. När en planet kretsar i en protoplanetär skiva påverkas gasen av planetens gravitation, vilket ger upphov till en spiralvågstruktur i gasen (se figur 6). Spiralvågens gravitation på planeten får den att sakta ner i sin bana, samtidigt som en del av planetens rörelsemängdsmoment överförs till spiralvågen, med resultatet att planetens banradie minskar – planeten migrerar mot

stjärnan. Processen är analog med hur en båt på havet bromsas ner av den V-formade svallvåg som bildas bakom båten, med den viktiga skillnaden att svallvågen i den protoplanetära skivan bromsar planeten med sin gravitation. Det enda som kan rädda planeten från att så småningom falla in i stjärnan är att den protoplanetära skivan efter några miljoner år försvinner, dels genom att den sugas upp av stjärnan, dels genom att den förflyktigas av stjärnans högenergetiska fotoner (UV- och röntgenstrålning). Datorsimuleringar visar att migrationsproblemet kan lösas om jätteplaneter som Jupiter och Saturnus bildas relativt långt från stjärnan, vid 15–30 astronomiska enheter; detta ger tillräckligt med tid för att planeterna ska hinna växa till sina slutmassor under den långa migrationen till slutpositionerna vid 5 respektive 10 astronomiska enheter (se figur 7).



Figur 6: Datorsimulering av en protoplanet i en protoplanetär skiva. Protoplaneten påverkar gasen med sin gravitation, vilket leder till att det uppstår en spiralvåg i skivan (ungefär som en svallvåg bakom en båt). Spiralvågens gravitation tillbaka på planeten får den att migrera mot stjärnan. (Bild från www.fis.unam.mx/~masset/moviesmpegs.html. Webbplatsen innehåller animationer som visar planetmigration. © Frédéric Masset.)



Figur 7: Tillväxtkurvor för protoplaneter, som visar hur de växer och migrerar i en protoplanetär skiva. Protoplaneterna i simuleringen startar från avstånden 6, 16, 23 respektive 29 astronomiska enheter från stjärnan. Först växer de genom småstensinfångning (blå linjer). När kärnan har växt till 10 gånger jordens massa kan den även fånga in gas från protoplanetära skivan, först långsamt och sedan genom en snabbare process (röda och gula linjer). Men så tunga protoplaneter migrerar också snabbt mot stjärnan. Den protoplanet som började vid 6 astronomiska enheter växer till samma massa som Jupiter, men har då migrerat väldigt nära stjärnan. En bättre motsvarighet till Jupiter, som numera kretsar 5 astronomiska enheter från solen, erhålls om protoplaneten börjar vid 16 astronomiska enheter. Protoplaneter som uppstår längre bort har inte tillräckligt med tid för att fånga in gas och hinner bara växa till massor som hos Uranus och Neptunus. (Från Johansen, Lambrechts, *Forming planets via pebble accretion*, *Ann. Rev. of Earth and Planetary Sciences* 45:1, 359 (2017) (DOI: 10.1146/annurev-earth-063016-020226).)

Stenplaneter

Hur passar då jorden och de andra stenplaneterna (Merkurius, Venus och Mars) in i allt detta? Ett problem för teorier för jordens bildande är att vi faktiskt inte har observerat särskilt många stenplaneter kring andra stjärnor. Detta beror på att små planeter med ett avstånd från stjärnan som jordens avstånd till solen är svåra att detektera; de flesta metoder för exoplanetobservationer fungerar bäst för stora planeter som är väldigt nära sin stjärna. Vi vet där- emot att nästan hälften av alla stjärnor har superjor- dar kring sig. Vad skälet är till att vårt eget solsystem inte innehåller några super- jor- dar vet man inte riktigt. Teorier visar att de planetesimaler som sedan växt till superjor- dar kan ha bildats vid vattens islinje – det vill säga på det avstånd från stjärnan där det blir tillräckligt kallt för att vattenånga ska kondensera och bilda is. I solens protoplanetära skiva låg denna linje sannolikt mellan 2–3 astronomiska enheter från solen. Diffusion av vattenånga från varma till kalla sidan av is- linjen kan öka densiteten av småstenar utanför islinjen, när vatten- ångan täcker småstenarna som rimfrost, och denna ökade densitet kan fungera som utlösande faktor för tvåströmsinstabiliteten som bildar planetesimaler. Dessa planetesimaler som bildas vid vattens islinje växer sedan till protoplaneter som migrerar mot stjärnan och fortsätter att växa till superjor- dar. Det är möjligt att Jupiters bildande i solsystemet blockerade strömningen av småstenar mot stjärnan och att protoplaneterna i solsystemet därför strandade på en massa på bara 10 % av jordens massa, ungefär som Mars massa.

Planeten Mars kan därför ge insikt i hur stenplaneterna har bildats i solsystemet. Mars ålder har bestämts genom analys av ra- dioaktiva grundämnen i meteoriter från Mars. Dessa mätningar tyder på att Mars separerade sin järnkärna från sin stenmantel bara några miljoner år efter solens bildande, vilket tyder på att Mars hade uppnått sin nuvarande massa när gasen i den protoplanetära skivan fortfarande fanns kvar. Den inre delen av solsystemet kan ha varit fylld av många sådana protoplaneter med massor som hos Mars när den protoplanetära skivan dunstade bort efter några miljoner år. Jorden verkar ha bildats över en längre tidsskala, upp emot 100 miljoner år. Denna skillnad i ålder mellan jorden och Mars skulle kunna bero på att jorden (och sannolikt även Venus) bildades genom jättekollisioner mellan protoplaneterna, över en tidsskala på 100 miljoner år efter solens bildning.

Kan man hitta belägg för att sådana jättekollisioner faktiskt

ägde rum när stenplaneterna i solsystemet bildades? Ja, menar man. En av dessa kollisioner kan nämligen även ha gett upphov till månen. Månens struktur är konstig på många sätt jämfört med andra små stenkroppar i solsystemet, bland annat för att månens densitet är väldigt låg: Månen har en ovanligt låg andel järn jämfört med jorden, Venus och Mars. En sådan järnfattig sammansättning skulle stämma med att en kollision med en proto-planet, med massa som Mars, förångade en del av jordens mantel som sedan förtätades i kretslopp kring jorden och bildade månen. Detta förklarar naturligt varför månen är fattig på järn, eftersom jorden ju har sitt järn i kärnan, och dessutom fattig på flyktiga grundämnen, som visserligen lätt förångas men som inte kunde kondensera igen i den materia som bildade månen. Månens ovanliga komposition ger alltså ett starkt stöd till denna kollisionsteori. Men det finns även andra teorier för månens bildning, exempelvis att jorden och månen skulle ha bildats när jorden delades i två på grund av proto-jordens höga rotationshastighet.

Nya rön tyder på att Mars har upplevt en liknande jättekollision. Mars har två ganska små månar, Phobos och Deimos, båda bara 10 kilometer i storlek. Man menade tidigare att dessa månar var infångade asteroider. Men det är väldigt svårt för en planet att fånga in månar. En asteroid som passerar nära en planet kommer nämligen in med så hög energi att den inte kan bindas gravitationellt till planeten, om det inte finns en tredje kropp som energi kan överföras till. Detta kan ske exempelvis om den inkommande asteroiden vore en binär asteroid som bröts itu av tidvattenkrafter, och där en av delarna sedan flög iväg med överskottsenergin. Men en kollision ter sig som en troligare förklaring. Spektroskopiska observationer av månarna tyder dessutom på att deras ytor innehåller mineraler väldigt lika de på Mars yta. Dessutom kretsar månarna kring Mars ekvator, vilket inte är lätt att förklara om månarna skulle vara infångade. Allt detta stämmer i stället med att Mars månar också har bildats efter en jättekollision med en proto-planet. Datorsimuleringar visar att kollisionen kan ha bildat stora månar också, men att dessa ramlade ner på Mars igen på grund av tidvattenkrafter, och att Mars nuvarande månar hade turen att vara så små att deras kretslopp är stabila över miljarder av år.

Hur planeter och planetsystem bildas är en fascinerande fråga som numera kan besvaras allt bättre i och med stora framsteg i observationer av exoplaneter och i utforskningen av planeter

och småkroppar i solsystemet. Att förstå planetbildningen handlar även om att förstå livets ursprung. Utvecklingen av livet på jorden har bara varit möjlig för att här finns flytande vatten och för att jorden har haft ett relativt stabilt klimat över miljarder av år. Hur ofta bildas beboeliga planeter som jorden och hur stabila är sådana planeters banor i olika typer av planetsystem? Hur mycket vatten och kol – essentiella ingredienser för liv – transporteras via asteroidkollisioner till stenplaneter i solsystemet och kring andra stjärnor? Dessa är frågor som driver utforskningen av planeterna i Vintergatan just nu.

Nya teleskop ska hjälpa oss att hitta svaren. Det europeiska teleskopprojektet ELT (Extremely Large Telescope), som planeras stå klart 2023, kommer att direkt kunna mäta spektra av stenplaneter kring de närmaste stjärnorna i jakt på spår av syre eller metan som skulle kunna vara producerat av liv. Amerikanska rymdteleskopet JWST (med europeiskt bidrag), med planerad uppskjutning 2021, ska göra extremt noggranna mätningar av storleken hos planeter som passerar framför sin stjärna, och även ta reda på vilka molekyler i planetens atmosfär som blockerar stjärnljuset. Det är därför sannolikt att vi inom ett decennium har kunskap om det finns liv på beboeliga planeter kring solens närmaste grannar. ❖

För vidare läsning

www.knowablemagazine.org/article/physical-world/2018/building-planets-piece-piece

