

Die Entstehung des Mondes – noch immer eine schwere Geburt

Unser Erdmond ist eine Ausnahmeerscheinung in unserem Planetensystem, hat er doch als Trabant eines Planeten ungewöhnliche Eigenschaften. Verschiedenste Modelle einer möglichen Entstehungsgeschichte wurden durchgespielt, ohne bisher zu einem stimmigen Gesamtbild geführt zu haben. Eine aktuelle Veröffentlichung nimmt eine alte Idee auf, nämlich die von multiplen Impakt-Vorgängen, die erfreulicherweise den anzusetzenden Parameterraum erheblich erweitert. Im Ernstfall sollten Ergebnisse von Simulationen an der Chemie des Mondes überprüfbar sein.

Norbert Pailer

Historie

Die Entstehung des Mondes wird seit Jahrhunderten diskutiert und ein Ende scheint nicht absehbar: Mit ungewöhnlichen Eigenschaften umkreist er einsam unsere Erde, die sich nicht ohne weiteres in ein geschlossenes Modell einfügen. Seine Gezeitenkräfte gehören zwar zum Strandurlaub, und in Kinderliedern darf er nicht fehlen. Ihm widmen sich gar spezielle Kalender. Dennoch entzieht sich seine Entstehung einem geschlossenen Bild. Hauptproblem ist seine ungewöhnliche Größe, seine chemische und isotopische Zusammensetzung. Vier grundlegende Ansätze wurden untersucht, ohne eine umfassende Stimmigkeit erreicht zu haben:

1. Eine rasant rotierende Erde könnte sich in ihrer Frühzeit von ihm gelöst haben (DARWIN 1878).

2. Die junge Erde hat ihn eingefangen (SEE 1909).

3. Beide Himmelskörper sind zufällig nebeneinander entstanden (VON WEIZSÄCKER 1944).

4. Vor 4,5 Milliarden Jahren könnte die Kollision eines marsgroßen Körpers den Mond in Form von Ejekta (Auswürfen) ausgelöst haben, die sich anschließend aus der Trümmerwolke zu einem Körper, unserem Erdmond, zusammenfanden (HARTMANN & DAVIS 1975).

Obwohl er nur einen kosmischen Steinwurf weit von uns entfernt ist, ist seine Entstehungsgeschichte noch immer unklar.

Bisher bevorzugte Lösung

Ein gutes Entstehungsmodell zu entwickeln, ist nicht einfach, muss es doch nicht nur physikalisch realistisch sein, sondern auch mit den Eigenschaften des Mondes beziehungsweise des Erde-Mond-Systems vereinbar sein und diese möglichst weitgehend und widerspruchsfrei erklären:

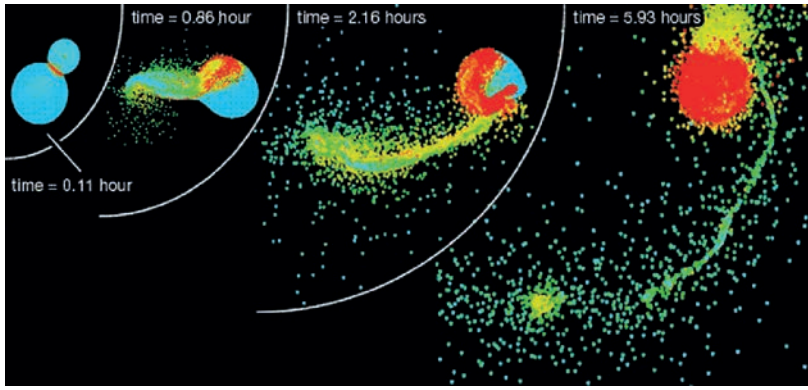


Abb. 1 Simulation eines zentralen Impact-Vorgangs eines marsgroßen Objekts mit der Proto-Erde, der Ausbildung einer Staubwolke bis hin zur Ausprägung eines Objekts, dem Ur-Mond. (Aus CANUP 2004, mit freundlicher Genehmigung)

- Die durchschnittliche Dichte des Mondes ist mit $3,3 \text{ g/cm}^3$ deutlich geringer als die der Erde mit $5,5 \text{ g/cm}^3$.
- Der Mond hat im Vergleich zur Erde ein großes Defizit an leicht flüchtigen Elementen und daraus zusammengesetzten Stoffen, z. B. Wasser, sowie an Eisen.
- Die isotopische Zusammensetzung der Gesteine der Erdkruste und der Mondoberfläche ist nahezu identisch, im Gegensatz zum Rest des Sonnensystems.
- Der Drehimpuls des Erde-Mond-Systems ist ungewöhnlich hoch.
- Der Mond dreht sich im gleichen Drehsinn genauso schnell um sich selbst wie um die Erde. Er hat also eine an seine Umlaufbewegung gebundene Rotation und zeigt der Erde immer dieselbe Seite.

Die vierte oben genannte Theorie ist die bislang führende Mondentstehungstheorie und passt am ehesten zur Planetenentstehungstheorie, da nach dem betreffenden Modell statistisch gesehen größere Objekte gegen Ende der Planetenentstehung als Impact-Körper zur Verfügung standen. Der „chemische Fingerabdruck“ des hypothetischen Impact-Körpers mit dem Namen Theia sollte sich deutlich auf dem Mond zeigen, denn marsgroße Objekte sollten in größerer Sonnener Entfernung eine etwas andere chemische Zusammensetzung als die Erde haben. Und diese sollte sich – das zeigen Berechnungen – auch auf dem Mond andeuten.

Numerische Analysen simulierten, wie die Kollision eines einfallenden, marsgroßen Planeten-Embryos mit der Proto-Erde eine heiße, massive, schnell rotierende Staubscheibe um die Erde bildete, aus der unser Mond kondensiert sein sollte. Das Modell war simpel und simulierte die Bildung des Mondes grob in seinen

bekannten globalen Parametern nach hohem Drehmoment, geringem Eisengehalt, großer Masse und wenig leichtflüchtigen Elementen, und das alles in einem Impact-Vorgang.

Das Kollisionsszenario ist bisher die plausibelste aller „Kreißaaltheorien“ zum Ursprung des Mondes. Sie erklärt ziemlich genau, weshalb die Mond-Erde-Kombi ein Unikat im Sonnensystem ist. Abb. 1 zeigt die simulierte Entwicklung eines großen Einschlags mit der Proto-Erde bis hin zur Ausbildung eines Objekts in einer Erdumlaufbahn, des Ur-Mondes.

Doch abgesehen von kleineren Schwächen hatte sie bislang einen entscheidenden Makel: Chemiker und Geologen fanden keine Spuren von Theia im Mondgestein. Diese müssten aber vorhanden sein, denn praktisch alle Modellrechnungen zur Geburt des Mondes gehen davon aus, dass der Mond nicht nur zu großen Teilen aus zertrümmertem Erdmantel bestehen müsse, sondern vor allem auch aus Theia. Einschlags-Simulationen zeigen, dass die Projektillmasse mehr als 70 % der der Mondentstehung vorlaufenden Staubscheibe entsprechen sollte (CANUP 2004). Deshalb geben

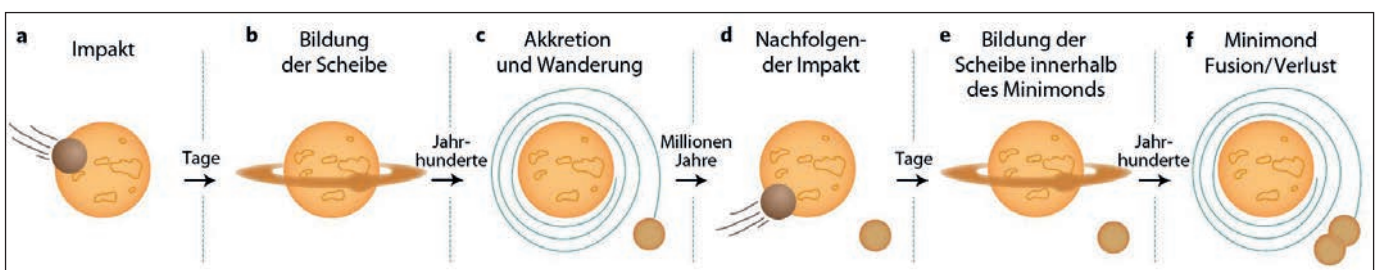
- der Projektill-Massenbeitrag zum Aufbau des Mondes
 - die hochpräzise vermessene Isotopen-Zusammensetzung
 - der Gesamtdrehimpuls des Erde-Mond-Systems
- immer wieder Anlass für neue Diskussionen.

Ausweitung des Parameterraumes

Jüngstes Beispiel sind Arbeiten des Teams um Raluca RUFU vom Weizmann-Institut in Rehovot, Israel, die eine alte Idee neu aufleben lassen. Als Alternative zu bisherigen Szenarien wurde eine ganze Sequenz von Einschlägen auf der jungen Erde modelliert (RUFU et al. 2017). Mit einer Serie von Einschlagsobjekten ist natürlich auch der zur Verfügung stehende Parameterraum erheblich erweitert – und die Anpassung eines Entstehungsmodells an die vorliegenden Gegebenheiten erleichtert.

In einer aufwändigen Simulationsreihe von knapp 800 Durchläufen sind unterschiedliche Massen von Einschlagskörpern (Variationsbreite um Faktor 10), unterschiedlichste Einschlag-

Abb. 2 Schematische Darstellung der Mondentstehung mittels eines mehrfachen Einschlags-szenarios:
a Mond- bis marsgroße Körper schlagen auf der noch jungen Erde ein.
b Ejekta formen eine Staubscheibe um die Erde.
c Durch Gezeitenkräfte kommt es zur Akkretion kleiner Objekte, die „Moonlets“ (kleine Monde) formen, welche nach außen wandern.
d Es ereignen sich weitere Einschläge.
e Die Vorgänge b und c schließen sich an.
d+e: Vor der nächsten Kollision erreichen die Moonlets entferntere Bahnen und machen Platz für weitere Kollisionen.
f Akkretion der Moonlets zur Ausformung des Ur-Mondes. (Aus RUFU et al. 2017, mit freundlicher Genehmigung)

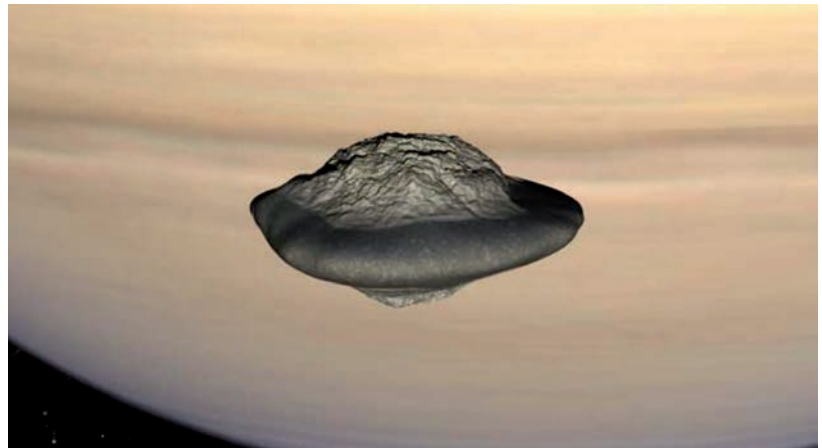
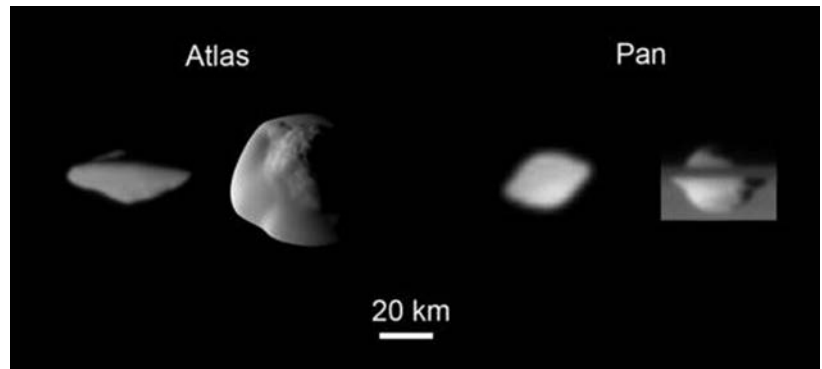


winkel, verschiedene Geschwindigkeiten etc. variiert worden, um eine passende Staubwolke um die Proto-Erde zu erzeugen, aus der sich dann per Akkretion (Anwachsen) kleinere Monde bilden sollten. Alle Simulationen fanden in einer Bahnebene statt. Durch gravitative Wechselwirkung wandern dann diese Objekte weiter nach außen und machen so Platz für eine durch einen weiteren Einschlag erzeugte Staubwolke. Dort sollte Ähnliches passieren, sodass am Ende mehrere, durch weitere Einschläge erzeugte Partnerobjekte sich um die Erde kreisend einfinden und durch Akkretion zusammenwachsen. Der Vorgang ist schematisch in Abb. 2 dargestellt.

Jenseits der Computer-Simulationen

Computer-Simulationen sind für die junge Generation ein nicht zu überbietendes, hilfreiches Instrumentarium für die Erstellung physikalischer Modelle. Aber sie verleiten auch zu Spielereien mit freien Parametern, die so lange variiert werden, bis das Ergebnis „passt“. Das Ergebnis sind daher oft Modelle mit großer „Maschenweite“, d.h. mit großer Ungenauigkeit. Gleichzeitig fördern Computer mit ihren Simulationsmöglichkeiten und wegen der exakten Zahlen, die sie ausgeben, den Glauben an die Realitätsnähe solcher Modellierungen. Auf Knopfdruck spucken diese Wundermaschinen simulierte Wirbelstürme und Steuererklärungen aus. Hier muss wegen der Gefahr der Verselbständigung aufgepasst werden.

Daher nutzen Astrophysiker den Weltraum zusätzlich gerne als kostenloses Labor für eine Überprüfung der „Hardware“ extremer Verhältnisse. Das ist das Beste, was Physik leisten kann! So hat die NASA zusammen mit der ESA die letzte der großen Planetenmissionen, *Cassini-Huygens* und *Huygens*, der Erkundung des Saturn, seines komplexen Staubringes und seiner Monde gewidmet. Nicht zuletzt hat man erwartet, im Ringsystem die Akkretion von Staubeilchen zu größeren Objekten beobachten zu können (quasi Simulation einer Art „Planetenentstehung“). So wiesen z.B. gewisse Wellenstrukturen im sogenannten F-Ring auf kleinere Objekte hin, die im Ringsystem gebildet und eingebettet wurden. Die dabei in den Wellenbergen entstandenen, bis zu 20 Kilometer großen Gebilde sind aber keine festen Körper, sondern eher lockere Ansammlungen von Ringmaterial. Viele von ihnen werden bei weiteren Passagen vom Mond Prometheus wieder auseinandergerissen. Aber manche überstehen die Vorübergänge und klumpen fester zusammen. Die langlebigeren Objekte sind offenbar so dicht



gepackt, dass sie immerhin von ihrer schwachen Eigenschwerkraft zusammengehalten werden. Dadurch können sie weitere Ringpartikel an sich ziehen und noch größer werden. Diese Fähigkeit hängt aber grundsätzlich davon ab, ob der Ort der Objekte außerhalb oder innerhalb der sog. Roche-Grenze liegt. Diese wurde erstmals vom französischen Astronomen und Mathematiker Eduard Albert ROCHE (1820–1883) beschrieben und gibt an, bei welchem Abstand ein im Umlauf befindliches Objekt von den Gezeitenkräften des größeren Mutterkörpers auseinandergerissen wird, wenn diese stärker als die Eigenschwerkraft des kleineren Objekts werden.

Die Saturnmonde Atlas und Pan

Unser einfaches Bild von der prinzipiellen Entstehung (fester) Körper im Weltraum besteht darin, dass sich Planeten aus den Materieresten eines Sterns – aus dessen Müllkippe, protoplanetare Scheibe genannt – durch Wirbelbildung und Akkretion von Teilchen bilden (können). Bei der Bildung von Monden stellt man sich die Vorgänge im Wesentlichen analog vor. Allerdings soll der Erdmond eine Ausnahme in dem Sinne sein, als hier (durch einen Impakt-Vorgang) zuerst eine zirkumpolare Staubscheibe etabliert werden musste.

Trotz der großen Anzahl von rund 170 Monden von > 10 km und $< 2\,000$ km Durchmesser in unserem Planetensystem (ohne Monde von

Abb. 3 Oben: Die Saturnmonde Atlas und Pan mit ihrer Aufdickung im Bereich des jeweiligen Äquators als „Fliegende Untertassen“ (http://kuffner-sterne.at/im_brennp/archiv2007/Saturnmonde.php)
Unten: Computersimulation des Mondes Atlas (© CEA/ANIMEA; <http://www.space.com/4711-flying-saucers-saturn-explained.html>)

Pluto und Monde um Planetoiden) kann die Akkretion von Staubteilchen zu einem Mond offensichtlich nur an zwei Objekten andeutungsweise festgestellt werden. Das Vorzeigebeispiel ist der Saturnmond Atlas (PAILER & KRABBE 2016, S. 158), der hier zur Demonstration eingeführt werden soll. Abb. 3 zeigt ihn mit seinem feinkörnigen Äquatorwulst zusammen mit dem Mond Pan.

Der Mond Atlas ist ungefähr 46 x 38 x 19 km groß. Die Höhe des (gebildeten) Äquatorwulstes misst zwischen drei und fünf Kilometer. Er sieht aus wie ein feinkörniger Kieshaufen. Sollte also im Saturnstaubring eine Art Mondbildungsprozess vor unserer planetaren Haustüre stattfinden, so ist das nur am Mond Atlas und eventuell bei Pan angedeutet. Bei anderen Monden (Schäfermonden) geht man davon aus, dass sie neben der Bereinigung ihrer Bahn unter dem Bombardement von Staubringteilchen als Quelle für den Ersatz für Staubverluste im Ringsystem selbst dienen. Wegen ihrer Kleinheit lässt sich allerdings ihr Einfluss nicht so leicht quantifizieren.

Sollte allerdings der Saturnstaubring Trümmer eines ehemals großen Mondes sein, dann wäre der „Kern“ von Atlas möglicherweise der größere Rest dieses Vorgangs, der dann Staubteilchen auf diesem (festen) Kern aufsammlte.

Ob der Ansatz multipler Einschlagsprozesse uns der wirklichen Entstehungsgeschichte näherbringt, bleibt offen.

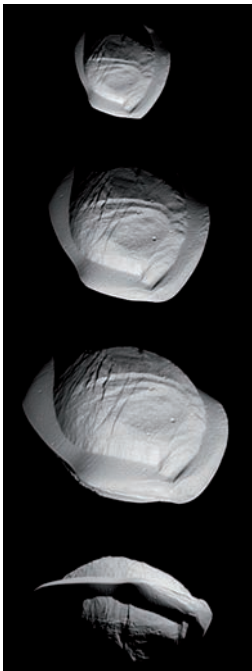


Abb. 4 Detaillierteste Aufnahmen vom Saturnmond Pan aufgenommen im März 2017 von der Saturnsonde Cassini-Huygens (NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute)

Carolyn PORCO, Leiterin des Cassini-Huygens-Imaging-Teams, stellte fest, dass beide Monde leicht porös erscheinen. Zusätzlich legen Computer-Simulationen nahe, dass eine Hälfte oder vielleicht auch zwei Drittel der Monde aus Ringmaterial aufgebaut sind und der dichtere Kern aus der möglichen Zertrümmerung des erwähnten ehemals großen Mondes stammt. Dieser bereits vorhandene Kern sollte dann Staub aus dem Ringsystem aufgesammelt und zu der angedeuteten, äquatornahen Aufdickung geführt haben (CHOI 2007). Abb. 4 zeigt die aktuellsten und detailliertesten Aufnahmen des Mondes Pan von Cassini-Huygens vom März 2017 aus verschiedenen Perspektiven, die das angesprochene Bild bestätigen. Ein visueller Abgleich mit der in Abb. 3 gezeigten Simulation zeigt eine bemerkenswerte Übereinstimmung – allerdings nun mit viel größerem Detail.

Möglicherweise lässt sich das Szenario der Mehrfacheinschläge auf der Erde zur Erdmondbildung künftig überprüfen: Bei einem einzigen Impaktvorgang wird von einer nahezu homogenen Akkretionsscheibe ausgegangen und damit lassen sich Einzelmessungen der Chemie auf den

gesamten Mond übertragen. Wenn der Erdtrabant allerdings durch Akkretion von mehreren Mini-Monden entstanden ist, könnte dort nach Bereichen mit unterschiedlichen geochemischen Eigenschaften gesucht werden. Anhand dieser chemischen Signaturen ließe sich beispielsweise das Alter des Materials ablesen. Die verschiedenen Bereiche würden somit wie Puzzlestücke verraten, wie der Mond einst entstand – oder eben die Diskussion um eine weitere interessante Variante bereichern.

Fazit

Aus Gründen der Flexibilität einer Modellierung ist der Ansatz eines multiplen Einschlagsszenarios auf der Erde durchaus erfolgsversprechend, auch wenn er die Modellierung nicht gerade vereinfacht. Aber dafür gibt es ja Computer.

Bedauerlicherweise haben in-situ-Beobachtungen im Saturnstaubring mit Hilfe von Cassini-Huygens keine eindeutigen Einsichten bezüglich der hypothetischen Akkretionsprozesse fester Körper gebracht.

Ob nun allerdings die willkommene Erweiterung des durch multiple Einschlagsprozesse erhaltenen Parameterraumes – und damit die Möglichkeiten der Anpassung – uns der wirklichen Entstehungsgeschichte näherbringt, bleibt offen. Sie wird aber einen Möglichkeitsrahmen abstecken, womit immerhin die Modellierung einen Schritt weiter wäre. Modelle sind eben nur „Ideen mit Hochschulbildung“. Gleichzeitig wird an anderer Stelle auch an der single-impact Theorie weiter gearbeitet (WYATT et al. 2016).

Literatur

- CANUP RM (2004) Simulations of a late lunar forming impact. *Icarus* 168, 433-465.
- CHOI CQ (2007) 'Flying saucers' around Saturn explained. <http://www.space.com/4711-flying-saucers-saturn-explained.html>
- DARWIN GH (1878) On the precession of a viscous spheroid. *Nature* 18, 580-582.
- HARTMANN WK & DAVIS DR (1975) Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus* 24, 504-515.
- PAILER N & KRABBE A (2016) Der vermessene Kosmos. Ursprungsfragen kritisch betrachtet. Holzgerlingen, 2. erweiterte Auflage.
- RUFU R, AHARONSON O & PERETS HB (2017) A multiple-impact origin for the Moon. *Nature Geoscience*. doi:10.1038/ngeo2866
- SEE TJJ (1909) Origin of the lunar terrestrial system by capture, with further considerations on the theory of satellites and on the physical cause which has determined the directions of the rotations of the planets about their axes. *Astronomische Nachrichten* 181, 365-386.
- VON WEIZSÄCKER CF (1944) Über die Entstehung des Planetensystems. *Zeitschrift für Astrophysik* 22, 319-355.
- WYATT BM, PETZ JM, et al. (2016) Creating an isotopically similar earth-moon system with correct angular momentum from a giant impact. arXiv:1611.02769