ORDEN POUR LE MÉRITE
FÜR WISSENSCHAFTEN UND KÜNSTE

REDEN UND GEDENKWORTE

ZWÖLFTER BAND
1974/75

VERLAG LAMBERT SCHNEIDER · HEIDELBERG

REDE VON
WOLFGANG GENTNER

WOLFGANG GENTNER

KOLLISIONEN IM LAUFE DER GESCHICHTE UNSERES PLANETENSYSTEMS

Das Zeitalter der Aufklärung wurde durch eine ganze Reihe von revolutionären astronomischen Entdeckungen an der Wende des 16. zum 17. Jahrhundert eingeleitet. Es sind dies – kurz aufgezählt – die Erscheinung neuer hell aufleuchtender Sterne am »ewigen« Fixsternhimmel, das heliozentrische System mit den Keplerbahnen, die Jupitermonde, die Bahnbeobachtung von Kometen und die Entdeckung der Sonnenflecken und Protuberanzen, um nur einige Beispiele zu nennen.

Diese Messungen am nächtlichen Sternenhimmel bedeuteten schon einzeln und noch viel mehr zusammengenommen das Todesurteil für das ewig bestehende, wohlgeordnete Weltbild, den Kosmos des Aristoteles. Diesem einzigartigen Kosmos, diesem Schmuckstück der göttlichen Schöpfung hatte Ptolemäus von Alexandria im zweiten Jahrhundert nach Christus mit der Erde als Mittelpunkt und einem System von geozentrischen Schalen und von Planetenbahnen auf Epizykeln eine solide

Grundlage gegeben, die das ganze Mittelalter überdauerte. Damit versuchte man, die unregelmäßigen Bahnen der Planeten zu verstehen und das Himmelsgebäude in feste Sphären einzuteilen, die wie Zwiebelschalen jedem Planeten – wozu auch Mond und Sonne gehören – als feste durchsichtige, aber undurchdringliche Hohlkugeln zugeordnet waren. Zwar hatten schon griechische Naturphilosophen – als Hauptvertreter gilt wohl Aristarch aus Samos – im dritten Jahrhundert v. Chr. das heliozentrische System verteidigt. Aber er blieb ein Einzelgänger, und erst recht das christliche Mittelalter konnte diese Vorstellung einer kreisenden und sich drehenden Erde nicht akzeptieren, schon weil die Bibel an vielen Stellen von der aufgehenden und sich bewegenden Sonne spricht. So hat sich auch Nikolaus Kopernikus, dessen 500. Geburtstag wir vor einigen Jahren an vielen Orten Europas gefeiert haben, nur sehr zögernd und erst am Ende seines Lebens mit seinem berühmten Werk *De revolutionibus orbium coelestium* an die Öffentlichkeit gewagt (Abb. 1).

Dem 100 Jahre jüngeren Johannes Kepler, ebenso wie seinem Amtsvorgänger Tycho Brahe und Galileo Galilei in Padua, war die Bedeutung des Werkes von Kopernikus ganz klar. Gleichzeitig aber hat Kepler mit größter Liebe und Begeisterung an dem geometrisch idealen Gebäude von ineinander verschachtelten Polyedern des Planetensystems herumgebastelt, weil er die symmetrische Ordnung, »den Kosmos«, im Planetensystem suchte.

Der beste und genaueste Beobachter des Sternenhimmels, Tycho Brahe, hat als erster experimentelle Beweise angeführt, die mit den zu Dogmen gewordenen Behauptungen des Aristoteles und der ptolemäischen Schule in Alexandria nicht übereinstimmen konnten. Er konnte insbesondere zeigen, daß

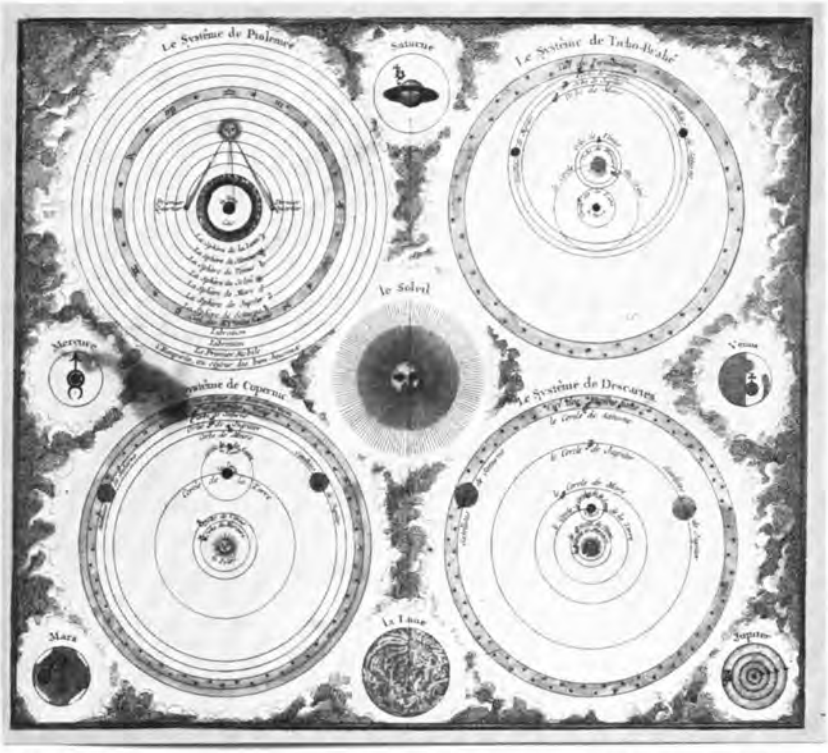

Abb. 1. Darstellung des geozentrischen Systems von Ptolemäus mit den Sphären, des halbgeozentrischen Systems von Tycho Brahe und der geozentrischen Bahnen bei Kopernikus und Descartes. (Aus einem französischen Werk vom Ende des 17. Jh.)

der Komet von 1577 sicherlich jenseits der Sonne seine Bahn zog und quer durch die Sphäre der Venus lief. Damit mußte er die Kristallschalen der festen Himmelssphären durchstoßen und zertrümmert haben. So verwarf er die undurchdringlichen Himmelssphären und damit auch die aristotelische Theorie der Kometen als Erscheinungen innerhalb der irdischen Atmosphäre (Abb. 2).

Schon vorher, nämlich im November 1572, hatte Tycho Brahe einen plötzlich sehr hell aufleuchtenden, neuen Stern im Sternbild der Kassiopeia vermessen. Er fand keine Parallaxe, also mußte er jenseits der Planeten im Gebiet der Fixsterne und der Milchstraße stehen. Damit war deutlich geworden, daß die Himmelssphäre der Fixsterne keineswegs ein ewiges, unvergängliches Gebäude ist, was bisher als selbstverständlich galt.
Aber Tycho Brahe konnte sich von dem geozentrischen System nicht ganz frei machen. Er versuchte einen Kompromiß zwischen Kopernikus und Ptolemäus mit der Erde als Mittelpunkt der Welt, aber der Sonne als Mittelpunkt des kreisenden Planeten. Erst sein Assistent und Nachfolger am Kaiserlichen Hof in Prag, Johannes Kepler, hat dann auf Grund der vorzüglichen Beobachtungen seines Meisters die berühmten drei Keplerschen Gesetze aufgestellt und damit zum Begründer der modernen Astronomie werden können. Wie Walther Gerlach sagt, stellte er erstmals für alle Naturwissenschaften den Grundsatz auf, daß eine Theorie quantitativ die Beobachtungen, die »Wahrheit der Natur«, wiedergeben muß. In einem Brief an den Astronomenpastor David Fabricius schreibt er am 16. Oktober 1605 die kühnen, neuen Schlußfolgerungen nieder: »Nun aber habe ich das Ergebnis, mein Fabricius: Die Planetenbahn ist eine vollkommene Ellipse, die Dürer oft Oval nennt«. Damit war das alteingesessene Dogma der idealen Kreisbewegung gebrochen.
Auch Kepler hatte das Glück, im Jahre 1604 eine Supernova zu beobachten, wie wir heute diese für kurze Zeit hell aufleuchtenden Fixsterne nennen, obwohl es von dieser Sternensorte nur rund drei in tausend Jahren gibt. Erst 1885 war wieder eine Supernova im Andromedanebel zu sehen.
Noch ein kurzes Wort zu den zu Dogmen gewordenen Aus-

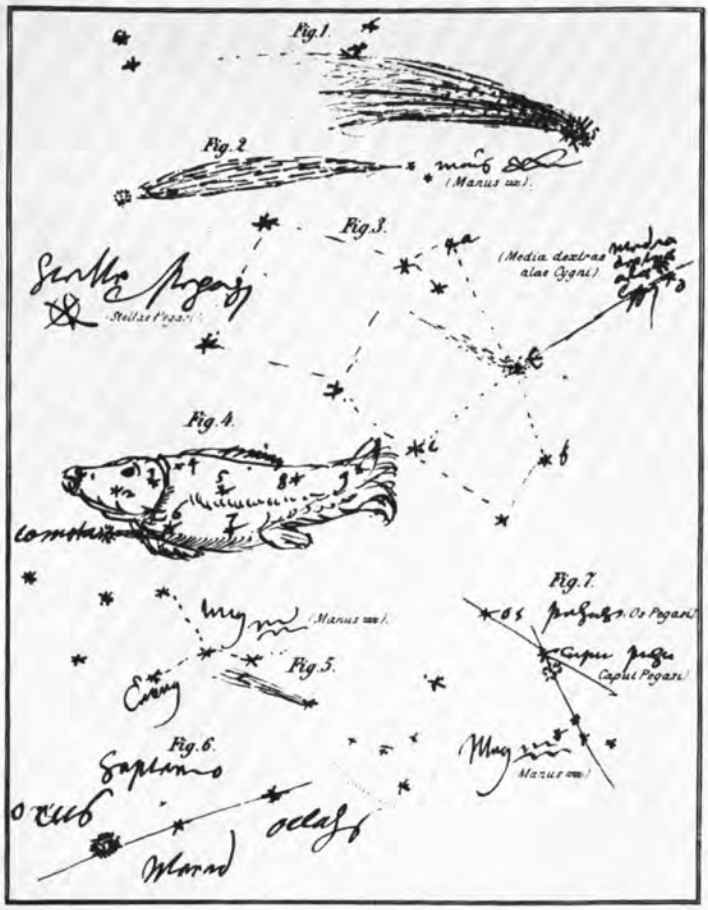

Abb. 2. Beobachtungsnotizen aus der Hand Tycho Brahes über den Lauf und die Gestalt der Kometen von 1577 und 1580.

sagen des Aristoteles. Ptolemäus und die Schule in Alexandria hatten sie in eine beherrschende Theorie gekleidet, die viele Jahrhunderte überlebte. Aber dieses ganze griechische Gedankengut ist mit dem Untergang des Römischen Reiches aus dem

Gesichtskreis des westlichen Europa verschwunden und erst über Byzanz aus arabischen Quellen wieder aufgetaucht. Erst um die Mitte des 13. Jahrhunderts waren fast alle wichtigen naturwissenschaftlichen Werke der antiken Griechen in lateinischer Übersetzung, der damaligen Gelehrtensprache, verfügbar. Aber auch dann wurde die aristotelische Lehre nicht unbesehen gelehrt. Sie wurde sogar des öfteren an manchen Orten kategorisch verdammt. Angriffspunkte der Theorien des Aristoteles waren z. B. der Begriff der ewigen Welt, der mit der christlichen Lehre ganz unvereinbar erschien. Auch der Determinismus wirkte für viele christliche Denker geradezu abstoßend und wurde deswegen ebenfalls mancherorts verdammt.

Das sind nur Beispiele zum Streit der mittelalterlichen Philosophen um die Lehre des Aristoteles. Aber trotzdem galt das heliozentrische System des Ptolemäus mit seinen festen Sphären als das Endglied menschlicher Erkenntnis auf dem Gebiet der Astronomie, denn geozentrische Überlegungen waren kaum bekannt, wenn auch Thomas von Aquin offenbar die Lehre von Aristarch kannte. Das Gebäude des Himmels galt als gegeben, und niemand diskutierte die Frage über die Entstehungsweise unserer Planeten. Das war der Zeit der Aufklärung vorbehalten und wurde, wie gesagt, ausgelöst durch solche aufregenden Ereignisse, wie die beiden Supernovae von 1572 und 1604, die kurze Zeit mindestens zehnmal heller als der Sirius für alle Welt sichtbar am Nachthimmel nicht zu übersehen waren. Dazu kamen die damals ebenfalls zufällig sehr häufigen Kometen, deren Bahnen mit den modernen Instrumenten im Planetensystem verfolgt werden konnten und heftige Diskussionen auslösten.

Bevor wir uns den heutigen Vorstellungen über die Frühge-

schichte des Planetensystems zuwenden, soll noch kurz einiges aus dem alten Gedankengut erzählt werden, das sich mit der Frage nach der Entstehung der Welt beschäftigt hat, weil wir damit unserem eigentlichen Thema näher kommen.

Abb. 3. Blatt aus dem Arbeitsbuch von Samuel Reyer mit Eintragungen über den Lauf des Kometen von 1665 durch das Sternbild der Andromeda.

In seinem grandiosen Werk der Theogonie sagt Hesiod im 8. Jahrhundert v. Chr. an einer Stelle: »Wahrlich, zuerst entstand das Chaos und später die Erde.« Ganz ähnlich lautet der Anfang des Alten Testaments: »Am Anfang schuf Gott Himmel und Erde, und die Erde war wüst und leer«. Mit diesen Worten hat Martin Luther das hebräische »Tohuwabohu« übersetzt, das ganz dem griechischen Chaos entspricht. Dagegen bezeichnet Plinius der Ältere in seiner *Naturalis Historia* die Welt als ewig, unermeßlich, weder gezeugt noch jemals vergehend, und stellt sich damit auf den Standpunkt der Stoiker und des Aristoteles.

Im Zeitalter der Aufklärung hat man selbstverständlich die Ewigkeit der Welt angezweifelt und die Frage nach dem Entstehungsprozeß der Welt und speziell des Planetensystems weidlich erörtert. So kam man wieder auf den alten Begriff vom Chaos des Hesiod oder des Tohuwabohus der Bibel als Urzustand zurück. Dies wird deutlich 1755 von Kant angesprochen, als er in jungen Jahren (1755) eine *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* schrieb: »Ich nehme die Materie aller Welt in einer allgemeinen Zerstreuung an und mache aus derselben ein vollkommenes Chaos«, und weiter unten: »Dieser Zustand der Natur scheint uns der einfachste zu sein, der auf das Nichts folgen kann«. Unter Berufung auf die Atomisten Epikur, Leukipp und Demokrit und unter Benutzung der für Kant sehr modernen Gesetze von Isaac Newton kommt es aus dem Chaos zur Bildung des Planetensystems. Unter dem weltweiten Einfluß des genialen Newton hatten sich nämlich um die Wende vom 17. zum 18. Jahrhundert viele Gelehrte mit den Folgerungen aus seinen weitreichenden Anziehungskräften, dem Gravitationsgesetz, beschäftigt.

Mit diesen weitreichenden Gravitationskräften Newtons war außerdem ein anderes Rätsel einer Lösung näher gebracht worden, nämlich der Lauf der Kometen am Fixsternhimmel. Ihre aufregende Erscheinung am Nachthimmel war nun nicht mehr eine göttliche Warnung vor Unheil, sondern ein Beweis für die Keplerschen und Newtonschen Gesetze. Die besonders prächtigen Kometen von 1665 und 1680 hatten Newton die Gelegenheit gegeben, diese Gesetze exakt zu prüfen. Mit der langgestreckten, elliptischen Bahn dieser Kometen, die weit über die Bahnen der entferntesten Planeten führte und andererseits die erdnahen Planetenbahnen kreuzte und ganz nahe zur Sonne heranreichte, wurde auch zum ersten Mal die Möglichkeit von Kollisionen diskutiert. Die genaue Vermessung der Umlaufzeiten zeigte nämlich oft eine deutliche Verkürzung und deutete auf ein schließliches Eintauchen in die Sonne hin (Abb. 3). Damit war das Verschwinden der vielen beobachteten Kometen erklärt, von denen schon Kepler sagte, es gäbe mehr als Fische im Ozean. Die Herkunft der Kometen ist dagegen auch heute noch ein Rätsel, wenn man auch einige vernünftige Hypothesen hat. Die im 18. Jahrhundert erkannte Möglichkeit der Kollision eines Kometen mit der Sonne brachte den französischen Enzyklopädisten Georges Louis Leclerc, Comte de Buffon – meist kurz M. de Buffon zitiert – auf den Gedanken, daß auch die Planeten auf diese Weise entstanden sein könnten. Für seine *Histoire Naturelle* hat er für die verschiedenen Ausgaben prächtige Kupfer stechen lassen, die diesen Vorgang illustrieren (Abb. 4). Allerdings hat er später diese Vorstellung widerrufen und allein der Bibel recht gegeben, nachdem er auch die Abkühlungszeit einer feurigen Eisenkugel von der Größe der Erde berechnet hatte und zu wesentlich längeren Zeiten gekommen war als das biblische Alter der Erde. Eine

ganz ähnliche Kollisionstheorie mit einem Stern hat dann wieder Sir James Jeans 1919 aufgestellt.

Noch eine letzte geschichtliche Bemerkung soll diese Einführung beschließen. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts, genau am 1. Januar 1801, wurde von Abbé Piazzi ein kleiner Himmelskörper entdeckt, den er zunächst für einen Kometen hielt. In den folgenden Tagen wurde es ihm aber klar, daß dieser wandernde Stern wegen seiner scharfen Konturen ein kleiner Planet sein mußte, der genau in die Lücke paßte, die nach der Titius-Bodeschen Regel zwischen Mars und Jupiter noch frei war. Dieser erste Planetoid oder auch Asteroid, der von seinem Entdecker Piazzi in Palermo »Ceres« genannt wurde, blieb nicht allein. In den folgenden Jahren wurden im gleichen Sonnenabstand noch mehr kleine Planeten entdeckt, und als zu Ende des vorigen Jahrhunderts die Photoplatte in den Dienst der Astronomie gestellt wurde, mehrte sich die Zahl der Asteroiden erheblich, so daß man jetzt rund 2000 mit sicheren Bahnelementen kennt; es wird geschätzt, daß noch rund 40 000 zu entdecken sind.

Aus Helligkeitsschwankungen weiß man, daß diese Planetoiden meist keine Kugelgestalt haben, sondern mehr unregelmäßigen Bruchstücken ähneln. Ihr Durchmesser beträgt beim größten rund 1000 km, aber bei allen anderen erheblich weniger. Eine ganze Reihe von ihnen hat sehr exzentrische Bahnen, z. B. der 1949 von Baade entdeckte Ikarus. Er kreuzt nicht nur die Erdbahn, sondern auch die Bahn des Merkurs. 1968 hat er sich der Erde bis zu der geringen Entfernung von 6 Millionen

Abb. 4. Zusammenstoß eines Kometen mit der Sonne, der zur Entstehung des Planetensystems führen sollte. (Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon, l'histoire naturelle, époques de la nature, ed. Deux Ponts 1785.)

Choc de la Comète contre le Soleil.

km genähert, und die Frage einer möglichen Kollision wurde in weiten Kreisen gern erörtert. Sogar an Abwehrmaßnahmen durch Raketenbeschuß mit einer Atombombe weit außerhalb der Erdbahn wurde gedacht.

Es ist einleuchtend, daß man die große Zahl dieser Asteroiden z. T. als Trümmer von Kollisionen zwischen Planetoiden ansieht, die mit primärer Kondensationsmaterie gemischt sind.

Um dieselbe Zeit, als der erste Planetoid entdeckt wurde, hat sich auch dank der systematischen Untersuchungen von Chladni die Erkenntnis durchgesetzt, daß hin und wieder Bruchstücke von Eisen und Steinen auf der Erde landen, die wir mit dem Namen Meteorite bezeichnen. In seinem Übereifer hatte nämlich das Zeitalter der Aufklärung mit allen überirdischen Erscheinungen, die nicht erklärbar schienen, aufgeräumt und dabei auch die beobachteten Meteoritenfälle in das Gebiet des Aberglaubens verdammt. Erst ein massives Ereignis, ein Streuregen auf das Dorf l'Aigle nicht sehr weit von Paris, hat die berühmte Pariser Akademie 1803 zu einer Revision ihres Urteils bringen können.

Seit dieser Zeit hat man sich wissenschaftlich mehr und mehr mit diesen Eisen- und Steinmeteoriten beschäftigt, die auch auf der Erde erhebliche Einschlagskrater bilden können, wenn ihr Gewicht 1000 to überschreitet. Soviel wir heute aus Bahnbeobachtungen dieser Meteoriten wissen, stammen sie aus dem Asteroidengürtel, der zwischen Mars und Jupiter liegt und in dem Tausende von Brocken (Abb. 5 und 13) und in sehr viel größerer Zahl Staubkörner verschiedener Größe kreisen. Bei besonders günstigen atmosphärischen Bedingungen, die heutzutage in unserer Region auch dank der überall hinreichenden Straßenbeleuchtung kaum noch vorhanden sind, kann man den Widerschein dieses Staubgürtels bald nach Sonnenuntergang als

schrägen Kegel, der in die Richtung der Ekliptik zeigt, mit bloßem Auge sehen. Er ist von alters her als Zodiakallicht bekannt.

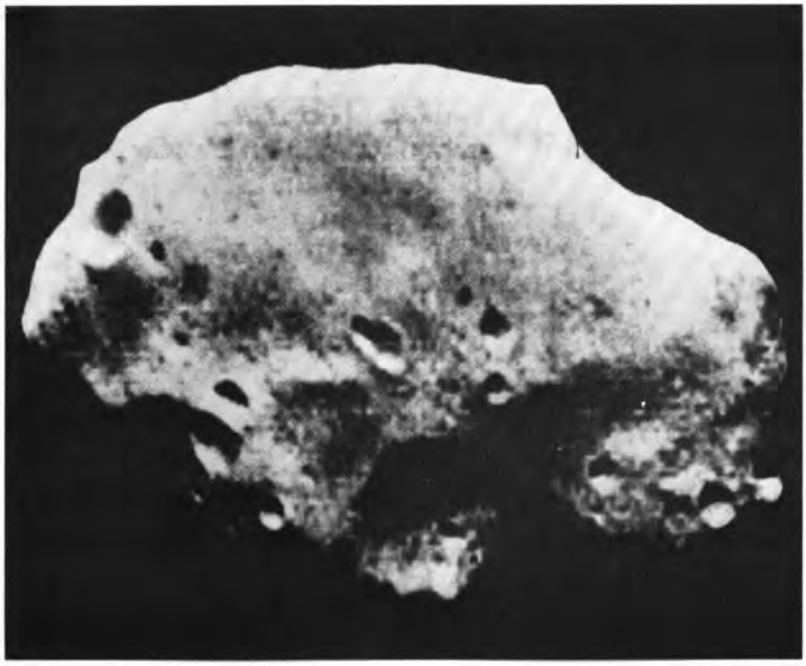

Abb. 5. Eine der erstaunlichsten Aufnahmen einer Planetensonde: der Marsmond Phobos (Länge ~ 20 km) mit zahlreichen Einschlagskratern gilt als Prototoyp der vielen Planetoiden im Asteroidengürtel.

Im folgenden soll etwas genauer unsere heutige Kenntnis über das Asteroidenband und die kleinen Planeten dargelegt werden. Es ist nämlich zu vermuten, daß dort noch viele Geheimnisse verborgen liegen, die uns Aufschluß über die Frühgeschichte unseres Planetensystems geben.

Die früher weit verbreitete Hypothese, daß die kleinen Planeten Überreste eines zerstörten großen Planeten seien, der sich etwa in der Mitte zwischen Mars und Jupiter aufgehalten haben könnte, ist heute in dieser primitiven Form fallen gelassen worden. Sehr sicher ist uns heute das Alter der Planeten bekannt, da wir mit Hilfe von radioaktiven Uhren die Zeit seit der Kondensation des Urnebels direkt messen können. Daraus wissen wir, daß sich die Planeten vor 4.6 Milliarden Jahren gebildet haben. Auch ist heute die Messung der Zeitdauer dieses Kondensationsvorganges möglich; sie beträgt nur rund 15 Millionen Jahre, wie man aus Spuren ausgestorbener radioaktiver Isotope weiß. Als dieser Kondensationsvorgang vor 4.6 Milliarden Jahren ablief, haben sich zunächst unabhängig voneinander viele Planetoiden gebildet. Auch Objekte mit gleichbleibendem Bahntyp blieben nicht von gegenseitigen Zusammenstößen verschont. Es herrschte in dieser ersten Phase unseres Planetensystems sicherlich ein erhebliches Tohuwabohu, und Zeugen der großen Häufigkeit von Kollisionen sind uns gerade in den letzten Jahren in großer Zahl bekannt geworden, wenn auch noch keine ganz stichhaltige Theorie von der Entstehung des Planetensystems vorliegt. Die modernen Vorstellungen ähneln damit denen von Laplace, der in seinem berühmten Werk *Exposition du système du monde* (1808) folgende Schlußbemerkungen schrieb: »Wie aber hat die Sonnenatmosphäre die Dreh- und Umlaufbewegungen der Planeten und Satelliten bestimmt? Wären diese Körper tief in sie eingedrungen, so hätte ihr Widerstand sie auf die Sonne fallen lassen; man kann also vermuten, daß die Planeten aus der Kondensation der Nebelzonen entstanden sind an den Grenzen, welche die Sonnenatmosphäre sukzessive bei ihrer Abkühlung in der Ebene ihre Äquators aufgeben mußte.« In neue-

ster Zeit hat dann der englische Astronom F. Hoyle eine Modifizierung dieser Vorstellung unter Heranziehung der Untersuchungen des schwedischen Physikers H. Alfvén vorgeschla-

Abb. 6. Landschaftsbild des irdischen Mondes mit Einschlagskratern verschiedenen Alters. Die Erosion auf der Mondoberfläche geschah vorwiegend in der Frühzeit durch unzählige Einschläge von Staubkörnern bis hinauf zu großen Meteoriten. (Aufnahme AS 10–34–5173.)

gen. Danach durchdringen die von der Sonne ausgehenden Kraftlinien des magnetischen Feldes den ganzen interplanetarischen Raum, und diese übernahmen in der Vergangenheit die Übertragung des Drehmoments auf die Planeten. Damit war eine wesentliche Schwierigkeit der alten Vorstellungen ausgeräumt.

Die großartigen Nahaufnahmen unseres irdischen Mondes, die Satellitenaufnahmen von Mars und Merkur haben weiterhin ganz neuartige Einblicke in die Struktur der Oberfläche dieser Himmelskörper und auch Einblicke in das Innere gegeben (Abb. 6). Dabei hat sich zunächst einmal als sicher herausgestellt, daß die vielen Kraterbecken und Kraterfelder zum allergrößten Teil nichts mit einem Vulkanismus zu tun haben, wie wir ihn von der Erde her kennen. Vielmehr stammt die weit überwiegende Zahl kleiner und größerer Krater aus Einschlägen von Staubkörnern, Meteoriten, kleinen Planeten und wohl auch Kometen. Aus direkten Alterbestimmungen des Oberflächengesteins unseres Mondes und der Kraterhäufigkeit in geologisch verschieden alten Gebieten kann man auch direkt die zeitliche Abnahme der Häufigkeit von Kollisionen unserer Himmelskörper ermitteln (Abb. 7). Diese Kraterstatistik ergibt, daß in der Anfangszeit unseres Planetensystems die Zahl der Kollisionen um viele Größenordnungen häufiger war als heute (Abb. 8). Die großen Planeten sind auf Kosten der kleinen immer größer geworden. Bei ihrem Umlauf in der Scheibe der Ekliptik haben sie durch ihre wachsende Anziehungskraft das System immer mehr gereinigt. Das kann man klar erkennen an dem Rückgang der Einschlagshäufigkeit auf dem Mond in der Zeit von 4 bis 3 Milliarden Jahren.

Ein Rest dieser Protoplaneten ist heute noch im Asteroidengürtel zu entdecken. Die Mehrzahl dieser kleinen Planeten be-

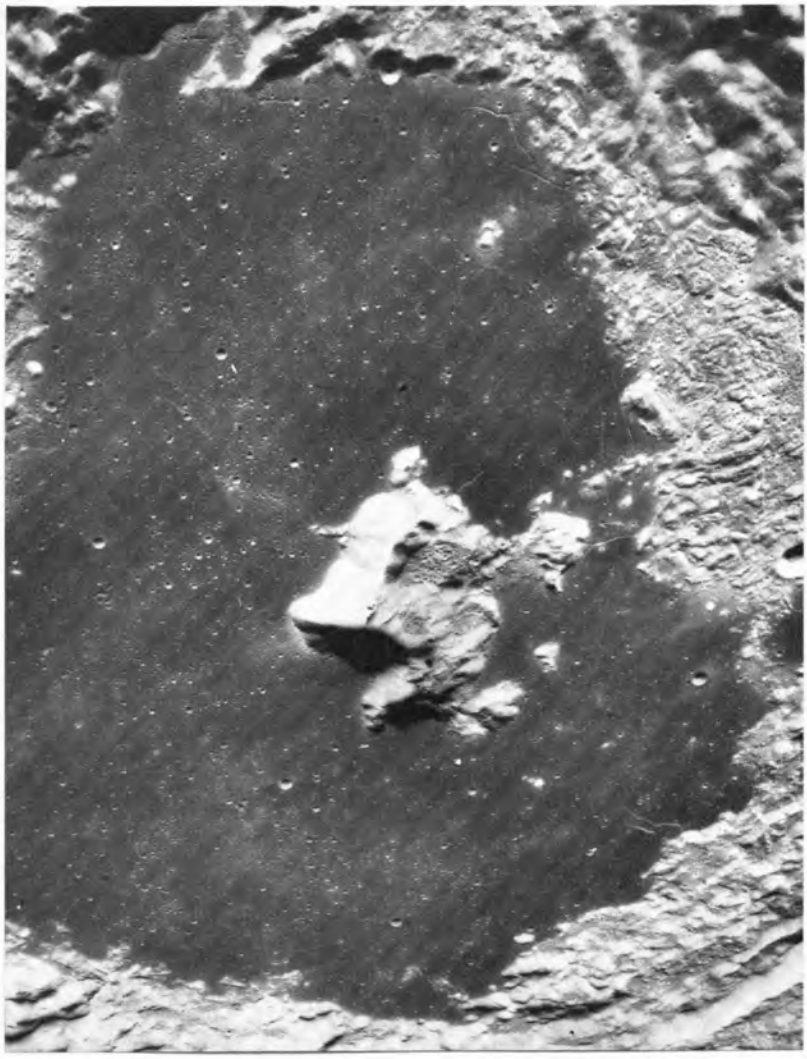

Abb. 7. Ziolkovsky-Krater mit Mare und Zentralkegel. Man sieht deutlich die wesentlich größere Kraterhäufigkeit auf dem alten Zentralkegel im Gegensatz zur geringeren Kraterhäufigkeit im später mit Lava aufgefüllten Becken (Mare).

findet sich offenbar heute in einem stationären Zustand. Ihr Aussehen dürfte dem Marsmond Phobos ähneln, dessen wunderbare Aufnahme von einem Satelliten aus gelang (Abb. 5). Wenn auch die Zahl der Kollisionen, gemessen an der Zahl zur Zeit des Anfangschaos, ungeheuer zurückgegangen ist, so ist

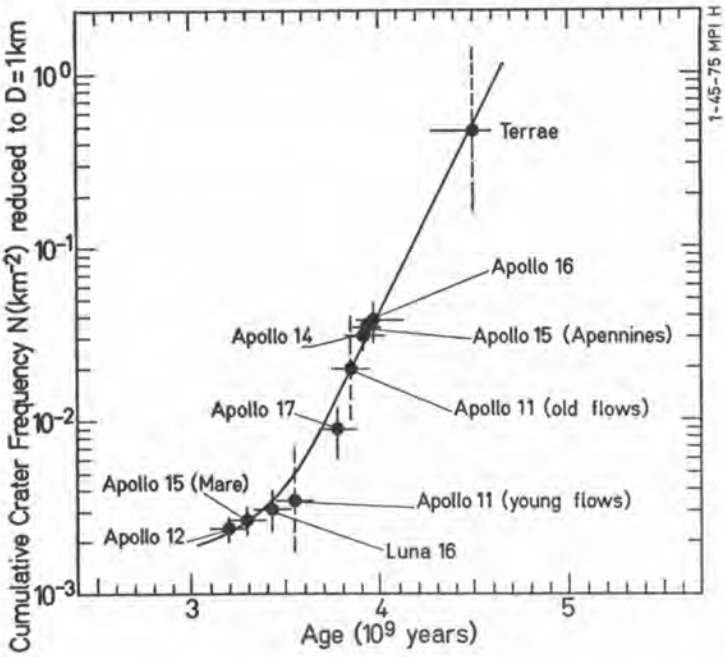

Abb. 8. Die kumulative Kraterhäufigkeit in Abhängigkeit vom radiogenen Alter (Milliarden Jahre) verschiedener Landeplätze der Apollo-Missionen. (Fechtig und Neukum, Heidelberg 1975.)

sie doch nicht gleich Null zu setzen. Die Meteorite, die mit nächtlichen Leuchtspuren auch heute noch immer auf der Erde landen, stammen alle aus Kollisionen, die vielleicht schon lange zurückliegen (Abb. 12, 13). Auch die Zahl und der Zeitpunkt

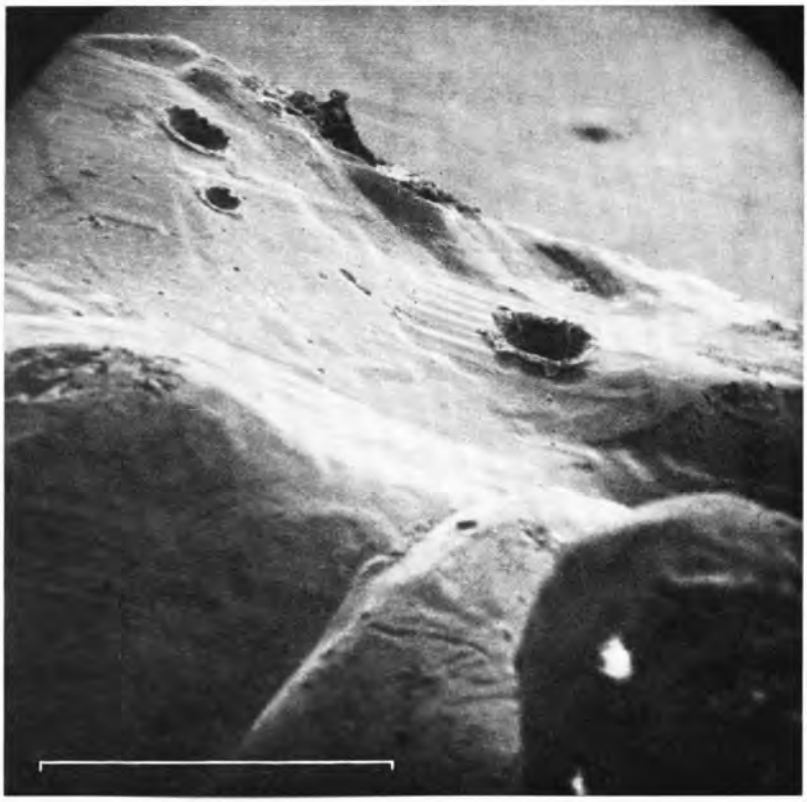

Abb. 9. Mikroeinschlagskrater auf dem Bruchstück eines Eisenmeteoriten, der aus dem Mondstaub einer Apollo-Mission stammt. (Aufnahme Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg 1974.) Skala: 250 μm. $\alpha = 70°$.

dieser Kollisionen, die zur Zertrümmerung zweier größerer Körper geführt haben, sind heute der Messung zugänglich (Abb. 9). Schon vor einigen Jahren haben wir uns mit dem Alter von Meteoriten nach der Kalium-Argon-Uhr beschäftigt. Diese Uhr wird so abgelesen, daß in einem Meteoriten die Menge des Edelgases Argon gemessen wird, das beim langsamen radioaktiven

Zerfall des Kaliums entsteht. Im allgemeinen kommt bei diesen Zeitmessungen das Entstehungsalter unseres Planetensystems, nämlich 4.6 Milliarden Jahre, heraus. Stammt aber ein Meteorit aus einer Kollision, die wesentlich später stattfand,

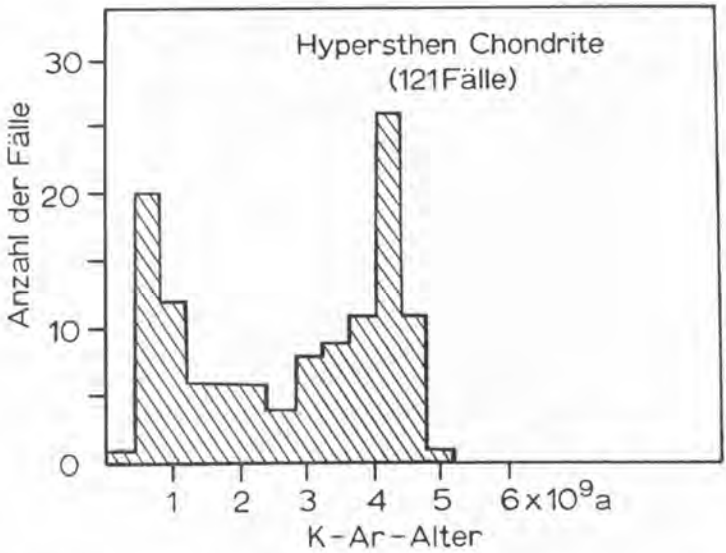

Abb. 10. Radiogene Altersbestimmungen mit der Kalium-Argon-Methode an verschiedenen Steinmeteoriten eines Typs. Die Gruppe von 4.5 Milliarden Jahren stammt aus primären Kondensationsprodukten, während die jüngeren alle Kollisionen erlebt haben, wodurch das radiogene Alter herabgesetzt wurde. Besonders auffallend ist die Kollisionsgruppe vor rund 1 Milliarde Jahren, die sich deutlich heraushebt.

dann wird durch die Schockwelle bei der Kollision der Meteorit entgast, und die Kalium-Argon-Uhr wird auf Null zurückgestellt. Andere radioaktive Uhren tun das nicht. So kann man aus den Zeitdifferenzen verschiedener Uhren auf den Zeitpunkt der Kollision schließen (Abb. 10).

Natürlich ist unsere eigene Erde im Laufe der Geschichte, genau so wie der Mond, besonders im Anfangsstadium ihrer Existenz einem heftigen Bombardement durch Kollisionen mit großen und kleinen Bruchstücken und Protoplaneten ausgesetzt gewesen. Im Gegensatz zum Mond und Merkur hat aber die Erde eine reiche geologische Vergangenheit, durch Vulkanismus, Kontinentalverschiebungen, Erosion durch Regen und Eis, so daß aus grauer Vorzeit kaum noch Spuren vorhanden sind.

Impakt-Krater von Meteoriten, Durchmesser > 10 km auf dem Kanadischen Schild (Fläche $\sim 3 \cdot 10^6$ km^2)

	Name (Lake)	Lage	Durchmesser (km)	Radiometrisches Alter Ma
1.	Manicouagan Mushalagan	51.4° N 68.6° W	65	220
2.	Carswell	58.4° N 109.5° W	~ 35	485
3.	Charlevoix Male Baie	47.5° N 70.3° W	~ 32	350
4.	St. Martin	51.7° N 98.5° W	24	225
5.	West- Clear Water Ost-	56.2° N 74.5° W 56.1° N 74.1° W	31 16	290
6.	Steen River	59.5° N 117.6° W	~ 24	95
7.	Mistastin	55.9° N 63.4° W	~ 18	202
8.	Lac Couture	60.1° N 75.3° W	~ 13	Tertiär Präkambrium
9.	Nicholson	62.7° N 102.7° W	13	Ordovizium 450-500
10.	Deep Bay	56.4° N 103.0° W	~ 12	~ 100

124-75 MPI H

Aber Einschlagskrater aus der jüngeren Vergangenheit, also aus den letzten hundert Millionen Jahren, sind gerade im letz-

ten Jahrzehnt viele gefunden worden, nachdem man die Indizien für Einschlagskrater besser kennt und sie damit von Vulkankratern unterscheiden kann. Als Beispiel für eine geologisch relativ gut erhaltene Region sind in der Tabelle die

Abb. 11. Lageplan des Rieskraters mit dem Steinheimer Becken. Die Gewalt der Explosion bei dem Einschlag des Riesenmeteoriten vor 14.6 Millionen Jahren wird auf rund 1000 moderne Wasserstoffatombomben geschätzt.

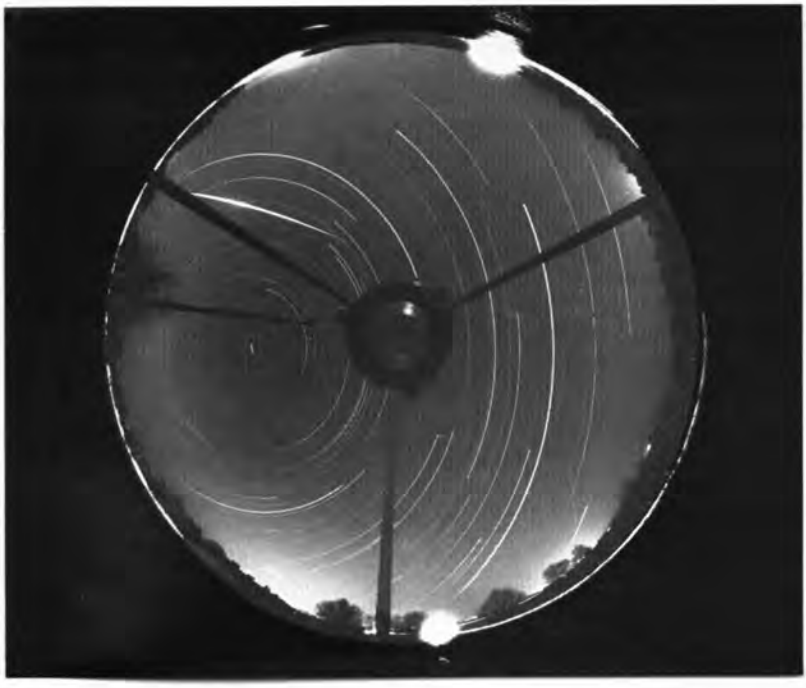

Abb. 12. Langzeitaufnahme des nächtlichen Himmels. Quer zu den Kreisbahnen der Sterne läuft eine helle Spur eines Meteoriten, der beim Eintauchen in die Atmosphäre hell aufleuchtet. (Aufnahme Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg.)

Einschlagskrater auf dem kanadischen Schild aufgeführt. Seit 1960 wissen wir auch, daß der berühmte Rieskrater auf den Einschlag eines Riesenmeteoriten vor 14.6 Millionen Jahren zurückzuführen ist. Auch das in der Nähe liegende Steinheimer Becken ist gleichzeitig entstanden. Offenbar ist der Meteorit schon vor Eintritt in die Atmosphäre durch Gezeitenkräfte gespalten worden (Abb. 11).

Mein Ziel war es, Ihnen einen kurzen Einblick in die Geschichte unseres Planetensystems zu geben, mit einem beson-

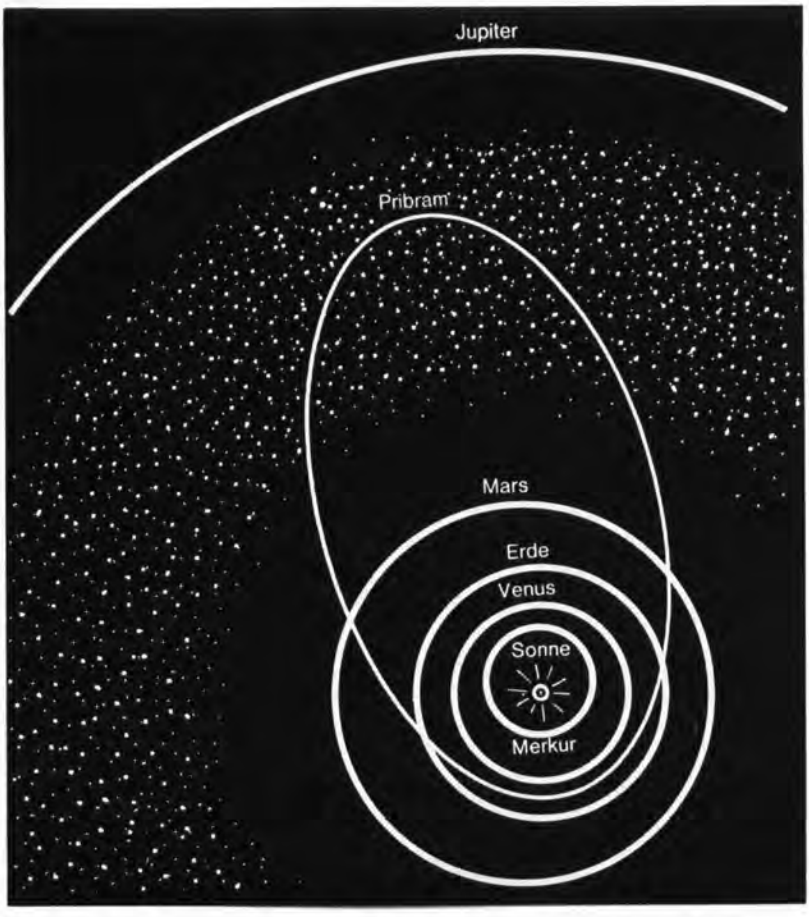

Abb. 13. Beobachtete Bahn (vgl. Abb. 12) des aufgefundenen Meteoriten »Přibram«, der durch Kollision im Asteroidengürtel in das Innere des Planetensystems abgelenkt wurde.

deren Akzent in Richtung der Kollisionen. Denn gerade diese Kollisionen haben aus dem Chaos zu unserem Planetensystem geführt – dessen Geburtsstunde wir heute vor 4.6 Milliarden Jahren ansetzen. – In dem schon zitierten Werk hat Kant als

erster eine richtige Größenordnung für den Zeitraum angegeben, den er für die Bildung eines Planetensystems als notwendig ansah. Er sagte: »Es werden Millionen und ganze Gebürge von Millionen Jahrhunderten verfließen, binnen welchen immer neue Welten und Weltordnungen nacheinander in den entfernten Weiten von dem Mittelpunkt der Natur sich bilden und zur Vollkommenheit gelangen werden.« Dann weiter unten heißt es bei Kant: »Man kann von der Ewigkeit sagen, was der Erhabenste unter den deutschen Dichtern schreibt« (gemeint ist Albrecht von Haller):

Unendlichkeit! wer misset dich?
Vor dir sind Welten Tag und Menschen Augenblicke.
Vielleicht die tausendste der Sonnen wälzt jetzt sich,
und tausend bleiben noch zurücke.
Wie eine Uhr, beseelt durch ein Gewicht
Eilt eine Sonn', aus Gottes Kraft bewegt:
Ihr Trieb läuft ab, und eine andre schlägt,
Du aber bleibst und zählst sie nicht.