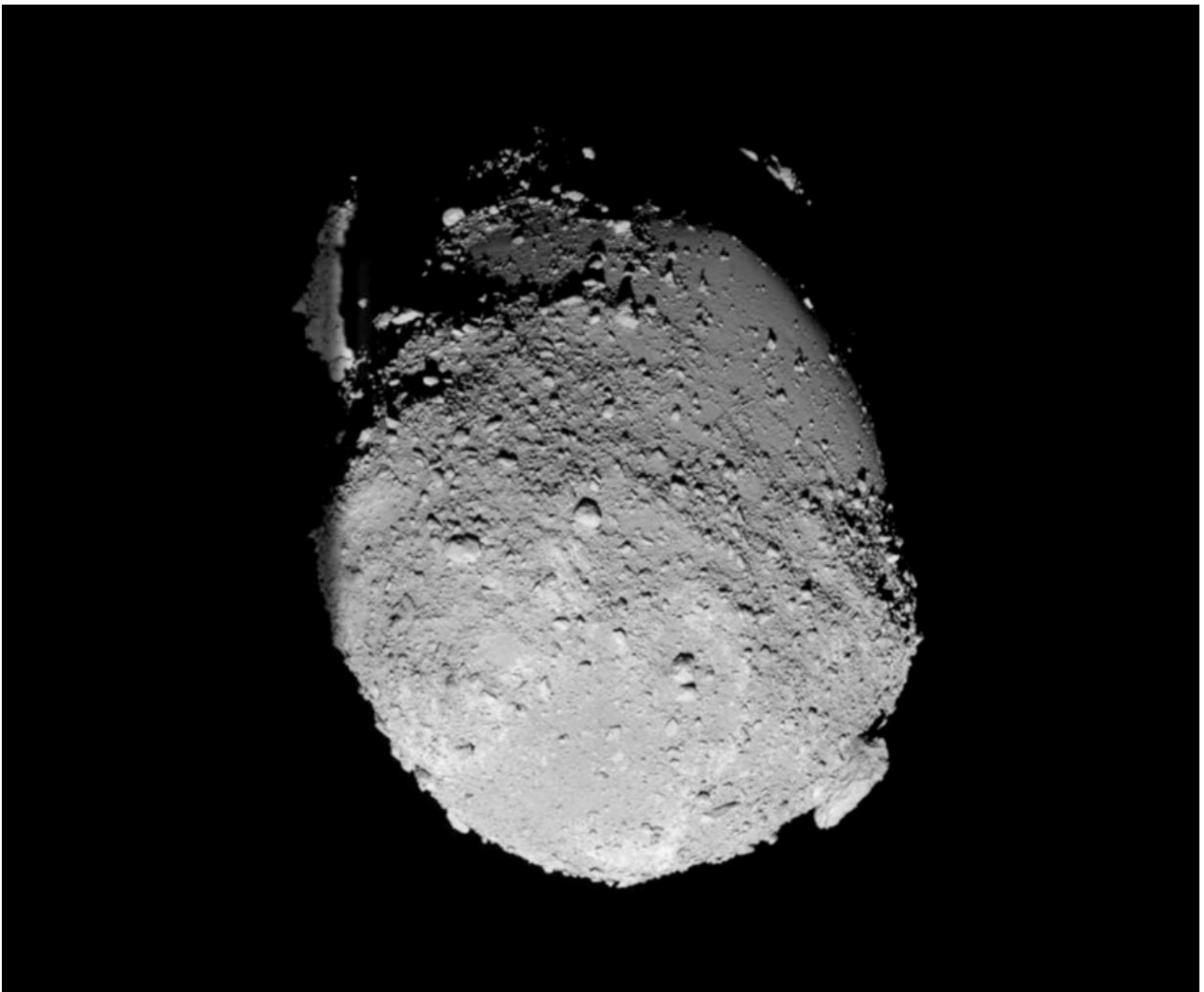


Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

Band 7: Planetoiden und Kuiper-Belt-Objects



Objekte im Planetoiden- und Kuipergürtel

M.Scholz

Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

Band 7: Planetoiden und Kuiper-Belt-Objects

Objekte im Planetoiden – und Kuipergürtel

E-Book-Ausgabe 2009

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig.

Bildnachweis: Wikipedia Commons, NASA, ESA, Autor

M.Scholz

Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

Band 7

Planetoiden und Kuiper-Belt Objects

Objekte im Planetoiden- und Kuipergürtel

Ausgabe 2009

mathias.scholz@t-online.de

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| KLEINPLANETEN ODER PLANETOIDEN | 2 |
| Was sind Planetoiden und aus was bestehen sie? | 4 |
| Bahnen und Gruppierungen | 5 |
| ATEN | 7 |
| APOLLO | 7 |
| AMOR | 8 |
| HUNGARIAS | 9 |
| FLORAS | 9 |
| PHOCAEAS | 9 |
| KORONIS | 9 |
| EOS | 9 |
| THEMIS | 10 |
| CYBELES | 10 |
| HILDAS | 10 |
| THULE | 10 |
| Jupiter-TROJANER | 10 |
| Kleinplaneten außerhalb der Jupiter-Bahn: | 11 |
| CENTAUREN | 11 |
| Kuiper-Belt-Objekte (KBOs) | 11 |
| Morphologie und Geologie | 13 |
| Größe und Gestalt | 15 |
| Aufbau und mineralogische Zusammensetzung | 21 |
| Kosmogonie des Planetoidengürtels | 26 |
| Der Yarkovsky-Effekt | 28 |
| Der YORP-Effekt | 29 |
| Near Earth Objects – NEO's | 30 |
| Einschläge von NEO's auf der Erde | 32 |
| Katastrophennumerologie – die Torino-Skala | 34 |
| Die „Palermo Technical Impact Hazard Scale“ | 36 |
| Raumfahrtmissionen zu Planetoiden | 38 |
| Gaspra | 39 |
| Ida und Dactyl | 40 |
| Mathilde | 41 |
| Eros | 42 |
| Itokawa | 47 |

| | |
|--|-----------|
| KUIPER-BELT-OBJECTS (KBO'S) | 48 |
| Klassifizierung nach den Bahnen | 51 |
| Plutinos (Resonanzobjekte) | 51 |
| Klassische KBO's (CKBO's oder „Cubewanos“) | 52 |
| Scattered KBO's (SKBO's) | 52 |
| Neptun-Trojaner | 53 |
| Morphologie und Geologie | 54 |
| Pluto | 56 |
| Allgemeines | 56 |
| Innerer Aufbau | 60 |
| Oberfläche | 60 |
| Atmosphäre | 61 |
| Daten | 64 |
| Die Transplutos | 65 |
| Sedna | 68 |
| Eris | 69 |
| Quaoar | 71 |
| Orcus | 72 |

Vorwort

Das Ziel dieser mehrbändigen Lehrbuchreihe ist es, grundlegende Erkenntnisse über die Welt außerhalb unserer Erde in systematischer Weise auf einem Niveau, den man im amerikanischen als „undergraduate“ bezeichnen würde, dem Leser näher zu bringen. Dabei wurde sowohl eine gewisse Ausführlichkeit als auch Aktualität (hier etwa 2007) – soweit das bei den einzelnen Themenkomplexen überhaupt möglich ist – angestrebt. Gerade in der Astronomie und Astrophysik beobachtet man gegenwärtig innerhalb kürzester Zeiträume einen enormen Wissenszuwachs, wie man es bei anderen Wissenschaften in diesem Umfang her nur begrenzt kennt. Allein während der Arbeit an dieser Buchreihe erforschte die Raumsonde „Galilei“ das Jupitersystem, erreichte „Cassini“ den Saturn mit seinem komplexen Ringsystem und „Huygens“ die Oberfläche des Saturnmondes Titan; eine ganze Anzahl von „Transplutos“ mit „Eris“ an der Spitze wurden entdeckt, was u.a. dazu führte, daß der neue Begriff „Zwergplanet“ in die astronomische Terminologie eingeführt wurde und die bekannten Merksätze für die Planeten unseres Sonnensystems nur noch bedingt gültig waren und umformuliert werden mußten ...

Während es vor 30 Jahren nicht sonderlich schwierig war, die Anzahl und die Namen der Satelliten der Planeten unseres Sonnensystems aufzusagen, ist das heute längst nicht mehr möglich. Man hat sogar den Eindruck, daß es zunehmend schwieriger wird, für die neuentdeckten Objekte überhaupt Namen zu finden, wie die vielen noch vorläufigen Bezeichnungen der neuentdeckten Jupiter- und Saturnmonde zeigen. Und schließlich soll in diesem Zusammenhang nur noch auf den inflationären Zuwachs an Entdeckungen von Exoplaneten allein im letzten Jahrzehnt hingewiesen werden, die uns viele neue Einsichten in die Struktur und Entstehung von Planeten und Planetensystemen gewährt haben. Gerade an Planeten um weit entfernte Sterne entzündet sich unsere Phantasie, wie die vielen künstlerischen Darstellungen beweisen, die man bei der Recherche im Internet leicht auffinden kann.

Ziel dieser „Einführung“ in die Astronomie und Astrophysik ist es Leser anzusprechen, die einen nicht zu kompakten Einstieg in diese Wissenschaft in deutscher Sprache wünschen und auch daran interessiert sind, an die im Internet oder über Zeitschriften zugängliche Fachliteratur herangeführt zu werden. Angesprochen sind in erster Linie Schüler der Abiturstufe unserer Gymnasien, ihre Lehrer, Studenten der ersten Studienjahre sowie selbstverständlich auch die wachsende Zahl an Liebhaberastronomen (so wie der Autor), die mehr wissen wollen über die Objekte, die sie in ihren „Backyard“- Observatorien oder an Volks- und Schulsternwarten beobachten.

Auf Zitierungen wurde im Text – dem Charakter eines Lehrbuches entsprechend – weitgehend verzichtet. Fachaufsätze lassen sich mittlerweile leicht über Google Scholar oder über das Astrophysics Data System (ADS) recherchieren.

Zum Schluß möchte ich mich noch bei meinem Freunden, Bekannten und Kollegen bedanken, die mich mittelbar und unmittelbar während der Zeit der Erarbeitung dieser Buchreihe unterstützt haben.

M.Scholz

Herbst 2007

Kleinplaneten oder Planetoiden

Das Rätsel der „großen Lücke“ zwischen Mars und Jupiter, die es – wenn man der Titius-Bode'schen Reihe glauben schenken will – eigentlich gar nicht geben dürfte, wurde in der Neujahrsnacht des Jahres 1801 gelöst. Ja, es gibt einen Planeten zwischen Mars und Jupiter und GUISEPPE PIAZZI (1746-1826) hat ihn im Rahmen eines systematischen Beobachtungsprogramms gefunden. Dieses Ereignis ist vom heutigen Standpunkt aus gesehen gar nicht mehr so spektakulär (man ist geneigt zu sagen, Planetoiden, also „Kleine Planeten“ oder Asteroiden gibt es in unserem Sonnensystem wie „Sand am Meer“). Zu jener Zeit, wo man noch mit dem Auge am Okular den Himmel beobachtete (was heute eigentlich nur noch Amateurastronomen tun), schlug diese Entdeckung in der Fachwelt wie eine Bombe ein. Insbesondere auch deshalb, weil PIAZZI das neue Objekt zwar bis zum 11. Februar 1801 noch einige Male verfolgen konnte, aber es danach nicht mehr auffindbar war. Dadurch, daß seine Beobachtungen in der „Monatlichen Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmelskunde“ des damals sehr bekannten Astronomen FRANZ XAVER VON ZACH (1754-1832) abgedruckt wurden, erfuhr der noch junge Göttinger Mathematiker CARL FRIEDRICH GAUß (1777-1855) davon, was seinen Ehrgeiz anstachelte, eine Ephemeride für diesen neuen Himmelskörper zu berechnen. Was dabei herauskam war nicht nur eine Tabelle mit Zahlen, die es WILHELM OLBERS (1758-1840) aus Bremen erlaubte, das Objekt genau ein Jahr nach seiner Entdeckung wieder aufzufinden. GAUß lieferte zugleich ein neues Verfahren mit, wie sich aus relativ wenigen Beobachtungen die Bahnelemente eines solchen Himmelskörpers bestimmen lassen („*Theoria motus*“). Auf diese Weise wurde Ceres (benannt nach der römischen Göttin der Fruchtbarkeit der Erde, der griechischen Demeter entsprechend) entdeckt.

Sie sollte aber nicht lange allein bleiben. In der „Lücke“ zwischen der Mars- und Jupiterbahn wurden in den darauffolgenden Jahren noch weitere kleine Planeten – Planetoiden – entdeckt:

- Am 28. März 1802 fand OLBERS die Pallas
- Am 2. September 1804 entdeckte KARL LUDWIG HARDING (1765-1834) die Juno
- Am 29. März 1807 entdeckte OLBERS die Vesta

Da sie alle im Vergleich zu den „richtigen Planeten“ recht kleine Objekte sind, war es irgendwie folgerichtig, sie als Bruchstücke eines zerfallenen Planeten zu betrachten. Auf jedem Fall waren es mehr, als damals erwartet wurden. JOHANN HIERONYMUS SCHRÖTER (1745-1816), der damalige Direktor der Lilienthaler Sternwarte, schrieb z.B. anlässlich der Entdeckung Junos *"Statt des vorausgesagten achten Hauptplaneten hat, wie uns nun die Erfahrung überzeuget und so weit bis jetzt die Entdeckungen vorgedrungen sind, die Allmacht vier kleine Planeten aus der chaotischen Materie entwickelt und ausgebildet."* In diesem Satz offenbaren sich uns die ersten Ansätze kosmogonischen Denkens in einer Zeit, wo die Positionsmessung und die Himmelsmechanik als Inbegriff der Astronomie galten. Heute wissen wir, daß es in der Titius-Bode'schen Lücke nicht nur vier, sondern nach neueren Schätzungen weit über eine Million Planetoiden größer als 1 km gibt. Zumindest die Untersuchungen mit dem ESA *Infrared Space Observatory* (ISO) im Rahmen des Programms „*ISO Deep Asteroid Search*“ legen das nahe.

Jedes Jahr werden immer wieder neue Planetoiden entdeckt. Die heute vorhandenen technischen Möglichkeiten – Teleskope mit CCD-Kameras – machen die Suche nach neuen Objekten selbst für Amateurastronomen zu einem wissenschaftlich wertvollen Sport mit besseren Entdeckungschancen als die Kometenjagd. Um über alle diese Kleinkörper den Überblick zu behalten, wurde 1947 an der Universität von Cincinnati das „*Minor Planet Center*“ (MPC) gegründet. 1978 wurde es dem *Smithsonian Astrophysical Observatory* in Massachusetts angegliedert. Es ist eine Institution, die der Kommission 20 der IAU untersteht und deren Aufgabe es ist, alle Informationen über Kleinplaneten im Sonnensystem zu sammeln, ihre Beobachtung weltweit zu koordinieren und regelmäßig Ephemeriden herauszugeben. Ihr wichtigstes Publikationsorgan ist das „*Minor Planet Circulars*“ und – im Zeitalter des Internets fast selbstverständlich – des „*Minor Planet Electronic Circulars*“. Darin werden u.a. astrometrische Beobachtungen von Planetoiden und Kometen veröffentlicht, Neuentdeckungen bekanntgegeben und Beobachtungskampagnen angestoßen. Ein besonderer Forschungsschwerpunkt sind dabei die erdbahnkreuzenden Planetoiden (sie könnten uns ja mal auf den Kopf fallen) und die transneptunischen Kuiper-Objekte.

Neben der Bahnbestimmung nimmt seit einigen Jahrzehnten auch die Untersuchung der physischen Beschaffenheit einen immer größer werdenden Platz in der Erforschung der Kleinplaneten ein. Ergänzend zu den klassischen erdgebundenen Untersuchungsmethoden (Photometrie, Spektroskopie) haben auch einige Raumfahrtmissionen neue Erkenntnisse geliefert. Ein Höhepunkt war dabei zweifellos die vor-Ort-Untersuchung von 433 Eros durch die Raumsonde NEAR-Shoemaker im Jahr 2001, die mit einer weichen Landung auf diesem knapp 20 km großen Gesteinsbrocken endete. In diesem Zusammenhang ist aber auch die japanische Sonde Hayabusa zu nennen, die im September 2005 den Kleinplaneten (25143) Itokawa erreichte. Ob es dabei den japanischen Wissenschaftlern gelungen ist, Staubproben von dessen Oberfläche einzusammeln, wird erst das Jahr 2010 zeigen, wenn Hayabusa wieder auf der Erde zurückerwartet wird.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß ein Teil der Planetoiden Bruchstücke von planetenähnlichen Körpern sind, die sich genauso wie die großen Planeten aus Planetesimals gebildet haben. Nur wurden sie nach ihrer Differenzierung durch Kollisionen nach und nach zerstört. Das erklärt auch das mineralogische Spektrum der Meteorite, die man auf der Erde findet sowie das Phänomen, daß einzelne Planetoiden quasi Gruppen bildet, die man als „Familien“ bezeichnet und die auf einen gemeinsamen Ursprungskörper hindeuten.

Viele sehr kleine Planetoiden, die nicht durch den Zerfall eines größeren planetaren Körper entstanden sind, hatten aufgrund ihrer Größe kaum die Möglichkeit einer chemischen Differenzierung. Man erwartet deshalb, daß sie aus einem Material bestehen, daß sich seit seiner Entstehung vor mehr als 4 Milliarden Jahren kaum verändert hat. Das macht sie kosmogonisch so interessant. Man hofft durch ihre Erkundung durch Raumsonden Informationen zu erlangen, die für eine Rekonstruktion der Ereignisse, die zur Entstehung unseres Planetensystems aus einer präsolaren Gas- und Staubwolke führte, unerlässlich sind.

Was sind Planetoiden und aus was bestehen sie?

Planetoiden sind „kleine Planeten“. So schön diese Definition auch ist, sie sagt nichts darüber aus, was in diesem Zusammenhang „klein“ eigentlich bedeuten soll. Ein anderer gebräuchlicher Begriff für diese Himmelskörper ist auch „Asteroid“, also „kleiner Stern“. Diese Bezeichnung trifft vom Wortstamm her noch weniger zu, denn mit „Sternen“ haben diese Himmelskörper nur das gemeinsam, daß sie im Gegensatz zu den Planeten im Fernrohr i.d.R. völlig punktförmig erscheinen (das ist auch der Grund, warum WILHELM HERSCHEL (1738-1822) genau diesen Namen für diese Objektgruppe gewählt hat).

Also was ist nun ein Planetoid? Ceres, der ehemals größte unter ihnen (Kuiper-Objekte einmal ausgenommen), hat einen Durchmesser von knapp 1000 km. Aus diesem und einigen anderen Gründen wird er heute jedoch zu den Zwergplaneten gezählt. Planetoiden sind also – grob gesagt - Himmelskörper, die kleiner als 1000 km sind und die sich auf Kepler-Bahnen um die Sonne bewegen. Um sie von den Kometen abzugrenzen muß man zusätzlich noch verlangen, daß sie aus möglichst keinen oder möglichst wenigen flüchtigen Stoffen bestehen. (2060) Chiron, der einsam zwischen Saturn und Uranus seine Bahn zieht, ist solch ein Grenzfall. Spektroskopisch hat man um ihn eine Gashülle, die bei einem Kometen der Koma entspricht, entdeckt. Chiron ist also eher ein Komet. Und nach unten? Ab welcher Größe soll ein Planetoid kein Planetoid mehr sein? Auch über diese Frage herrscht keine Einigkeit. Zumindest gibt es schon einen Namen für derartig kleine Körper – Meteoroiden. Fallen Sie auf die Erde, nennt man sie Meteorite und man kann sie aufsammeln, wenn man sie findet. Fallen dagegen Planetoiden auf die Erde, dann ist alles zu spät. Ihr Absturz führt in einer so hochtechnisierten Welt wie heute unweigerlich zu einer globalen Katastrophe. Vielleicht ist deshalb diese Definition nicht ganz schlecht: Alle kleinen Himmelskörper (Raumstationen ausgenommen), die – wenn sie auf die Erde fallen würden – keine globalen Katastrophen hervorrufen, sind Meteoroiden - unabhängig davon, wo sie im Sonnensystem gerade herum kreisen. Überschlagsmäßig bedeutet das, daß Planetoiden immer größer als rund 100 m sein müssen um als „Planetoid“ bezeichnet werden zu dürfen.

Wenn Planetoiden zusammenstoßen, was in geologisch relevanten Zeiten bei ihrer riesigen Anzahl doch öfters vorkommt, dann können sie zerbröseln, wobei in großer Anzahl wiederum „Meteoroiden“ entstehen... Wie man sieht, gibt es einen engen Zusammenhang zwischen Planetoiden und den auf der Erde aufgefundenen Meteoriten. Beide bestehen wahrscheinlich aus dem gleichen Material und beide zeigen eine ähnliche Variationsbreite in ihrem mineralogischen Aufbau.

Nach ihren photometrischen (Albedo) und spektroskopischen Eigenschaften (Reflektionsspektrum, Farbe) unterteilt man die Planetoiden (geologisch) in folgende Kategorien (nach D.J.THOLEN):

C-Typ (entspricht den kohligen Chondriten)

Planetoiden von diesem Typ sind tiefschwarz oder genauer, ihr Albedo liegt bei lediglich 0.03 – 0.09. Sie enthalten sehr viel Kohlenstoff und haben ungefähr die gleiche chemische Zusammensetzung wie die Sonne - wenn man von den flüchtigen Elementen einmal absieht. Ihre Reflektionsspektren sind im sichtbaren Bereich recht flach und ihre Farbe tendiert leicht ins bläuliche. Das Material, aus dem sie bestehen, entspricht dem Meteoritentypus des kohligen Chondriten, d.h. man hat es hier mit sehr

primitivem unverändertem Material aus der Frühzeit des Sonnensystems zu tun. Ungefähr 3/4 der bekannten Planetoiden gehören zu dieser Gruppe, die besonders im Außenbereich des Planetoidengürtels zwischen Mars und Jupiter beheimatet ist.

S-Typ (entspricht den silikatischen Steinmeteoriten)

Mit einem Albedo zwischen 0.1 und 0.22 reflektieren Planetoiden vom S-Typ relativ viel Sonnenlicht. Das liegt an ihrer chemischen Zusammensetzung, die man als ein Gemisch von Nickel-Eisen mit Magnesium-Silikaten auffassen kann. Das entspricht in etwa dem der Steineisenmeteoriten und der normalen Chondrite. Ungefähr 17% der Bewohner des Planetoidengürtels gehören zu dieser Gruppe. Sie bevölkern hauptsächlich den mittleren Teil dieser Region.

M-Typ (entspricht den Eisenmeteoriten)

Planetoiden vom M-Typ sind recht selten. Ihr Albedo liegt zwischen 0.1 und 0.18. Dabei scheint es sich um Körper aus nahezu reinem Nickel-Eisen zu handeln. Man findet sie am häufigsten im mittleren Teil des Planetoidengürtels.

P-Typ

Planetoiden vom P-Typ sind auffallend rötlich getönt (etwa wie Amalthea im Jupiter-System). Ihre chemische Zusammensetzung ist unbekannt.

D-Typ

Auch hier handelt es sich um auffällig rötliche Planetoiden, nur dass der Rot-Ton noch stärker ist als bei den Objekten vom P-Typ.

E-Typ

Die Zusammensetzung entspricht in etwa dem der seltenen Enstatit-Chondrite. Das sind Meteorite, die ursprünglich in einer extrem sauerstoffarmen Umgebung (wahrscheinlich im inneren Sonnensystem im Bereich der Merkurbahn) entstanden sind. Das Eisen tritt in ihnen fast vollständig in reduzierter, metallischer Form auf während das Pyroxen nur in der magnesiumreichen Form Enstatit vorkommt, was dieser Meteoritenklasse zu seinem Namen verhalf.

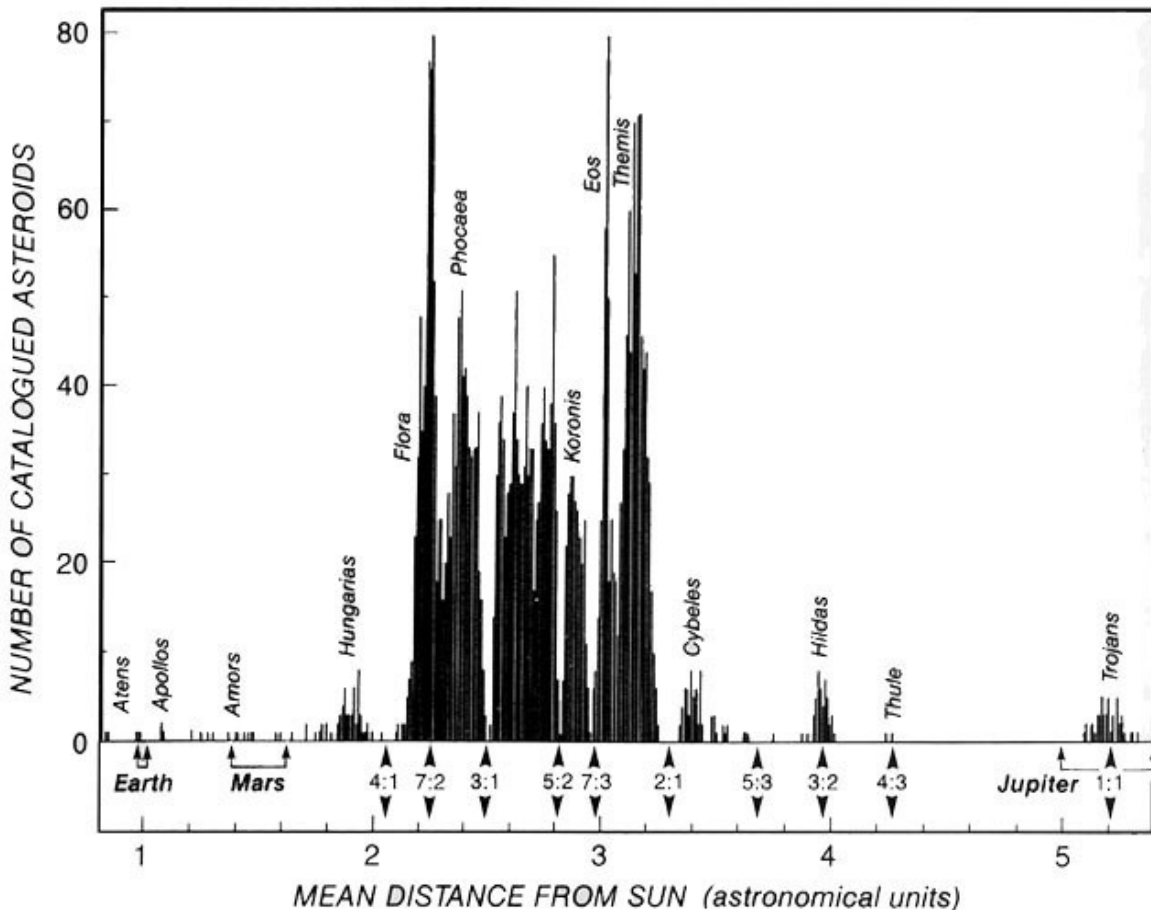
Bahnen und Gruppierungen

Mit dem Einsatz photographischer Methoden zum Auffinden kleiner Planeten durch MAX WOLF (1863-1932) in Heidelberg haben sich die Entdeckungszahlen dieser Himmelskörper inflationsartig erhöht. Er selbst entdeckte 228 und bei 21 war er an der Entdeckung beteiligt. Heute sind die Bahnen von mehr als 20000 Planetoiden soweit gesichert, daß sie einen offiziellen Namen erhalten haben. Die meisten davon bewegen sich in einem Abstand zwischen 2.2 und 3.2 AU rechtläufig um die Sonne. Dieser Bereich wird als Planetoidengürtel bezeichnet. Ein ähnlicher und wahrscheinlich noch viel reichhaltiger Gürtel befindet sich im äußeren Sonnensystem. Er beginnt knapp hinter der Neptun-Bahn und erstreckt sich nach vorsichtigen Schätzungen bis in eine Entfernung von ca. 500 AU. Er wird als

Planetoiden und Kuiper-Belt-Objekte

Kuiper-Gürtel bezeichnet und enthält die sogenannten Kuiper-Belt-Objekte, deren größter Vertreter der Zwergplanet Pluto mit seinem Mond Charon ist.

Die Planetoiden sind im Planetoidengürtel nicht gleichmäßig verteilt. Trägt man ihre Anzahl über ihre mittlere Entfernung zur Sonne auf, dann erkennt man in dem Diagramm auffällige Häufungen und Lücken. Die Lücken werden als Kirkwood-Lücken bezeichnet und entstehen durch Resonanzstörungen in bezug auf Jupiter. Ihre Entstehung konnte durch Computersimulationen (JACK L. WISDOM) nachvollzogen werden.



Große Halbachsen a [in AU], welche Kirkwood-Lücken im Planetoiden-Hauptgürtel entsprechen

| a | Resonanz | |
|-------|----------|--------------|
| 2.065 | 1:4 | |
| 2.501 | 1:3 | Hestia-Lücke |
| 2.825 | 2:5 | |
| 2.958 | 3:7 | |
| 3.278 | 1:2 | Hecuba-Lücke |
| 3.700 | 3:5 | |

Interessanterweise ist es aber auch möglich – und es gibt Beispiele dafür – das bei bestimmten Resonanzen Stabilisierungsprozesse auftreten können, die zu einer Anhäufung von Planetoiden führen. Neben dem himmelsmechanisch gut verstandenen Fall der Trojaner (sie entsprechen der 1:1-Resonanz in Bezug auf Jupiter) ist die sogenannte Hilda-Gruppe zu nennen, welche die 3:2-Resonanz im äußeren Bereich des Planetoidengürtels besetzt.

Ein weiteres Merkmal der Planetoidenbahnen ist, daß man sie in Gruppen und Familien einteilen kann. Darauf hat zuerst der japanische Astronom KIYOTSUGU HIRAYAMA (1874-1943) im Jahre 1918 hingewiesen. Als Gruppen bezeichnet man lose dynamische Assoziationen. Familien dagegen bilden Planetoiden mit nahezu identischen Bahnparametern (Große Halbachse a , Bahnneigung i Exzentrizität e). Es spricht einiges dafür, daß die Mitglieder einer solchen Hirayama-Familie aus Teilen eines zerstörten (z.B. durch eine katastrophale Kollision) Ursprungsplanetoiden entstanden sind. Die wahre Anzahl derartiger Planetoidenfamilien ist unbekannt. Bei einer detaillierten Revision des Hauptgürtels zwischen 2 und 4 AU wurden bis zu 72 Familien gezählt (manche Autoren unterscheiden sogar mehr als 100), von denen jedoch eine ganze Anzahl umstritten ist. Im Folgenden sollen kurz einige wichtige Gruppen und Familien vorgestellt werden:

ATEN

Der Hauptvertreter dieser Familie, deren Bahnhalbachsen zwischen 0.7 und 1.0 AU (also innerhalb der Erdbahn) liegen, ist (2062) Aten. Aten wurde 1976 durch ELEANOR HELIN im Rahmen des NEAT-Projekts (einem automatischen Suchprogramm nach Planetoiden der Universität Hawaii) entdeckt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Mai 2007) sind 392 Vertreter der Planetoidenfamilie bekannt. Sie erfreuen sich besonderer Aufmerksamkeit, da sie zur Gruppe der *Near-Earth Objects* (NEO's) gehören, die der Erde u.U. gefährlich nahe kommen können. In diesem Zusammenhang ist der Planetoid (99942) Apophis zu einer gewissen Popularität gelangt, in dem zum Jahreswechsel 2004/2005 sein Name sogar den Weg in die Boulevardpresse gefunden hat... (BILD-Zeitung: „NASA: Weltuntergang in 96 Jahren“).

Eine besondere Spielart unter den Aten-Planetoiden stellen die Mitglieder der (wohl in Zukunft so genannten) Apohele-Gruppe dar, die sich immer innerhalb der Erdbahn aufhalten. Bis heute (Anfang 2007) konnten jedoch lediglich zwei ihrer Mitglieder entdeckt werden.

Planetoiden der Aten-Gruppe, deren Perihel innerhalb der Venus- bzw. Merkurbahn liegt, werden gewöhnlich als Venusbahnkreuzer oder Merkurbahnkreuzer bezeichnet.

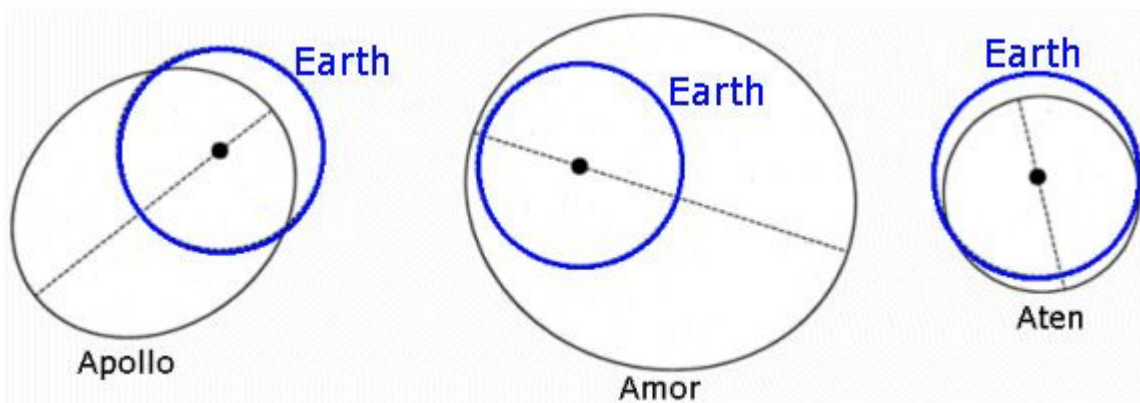
APOLLO

Als Apollo-Planetoiden werden alle Planetoiden bezeichnet, deren Perihelabstand innerhalb der Erdbahn und deren Aphel-Abstand außerhalb der Erdbahn liegt. Die meisten von ihnen bewegen sich auf Ellipsenbahnen hoher Exzentrizität (im Mittel 0.5) um die Sonne. Da sie dabei zwangsläufig die Erdbahn kreuzen müssen, nennt man sie auch „Erdbahnkreuzer“. Bekannte Vertreter dieser Gruppe, die gegenwärtig (Mai 2007) 2271 Mitglieder umfaßt, sind (1566) Icarus, (1685) Toro, (3200) Phaeton, (2101) Adonis und (1862) Apollo.

AMOR

Amor-Planetoiden bewegen sich knapp außerhalb der Erdbahn zwischen Mars und Erde, genauer, ihre große Bahnhalbachse übersteigt 1 AU und ihre Periheldistanz liegt zwischen 1.017 und 1.3. Die meisten von ihnen kreuzen die Marsbahn weshalb sie folgerichtig auch „Marsbahnkreuzer“ genannt werden. Ihr Prototyp – (1221) Amor – wurde 1932 von EUGENE DELPORTE entdeckt. Der bekannteste Vertreter ist jedoch (433) Eros, dessen Oberfläche dank der NEAR-Shoemaker-Mission bis zu einer Auflösung in den Zentimeter-Bereich hinein fotografiert werden konnte. Zur Amor-Familie gehören z.Z. (Mai 2007) insgesamt 1978 Mitglieder.

Die kleinen Planeten der ATEN / APOLLO / AMOR –Familien gehören zu den sogenannten AAA-Planetoiden, die der Erde potentiell gefährlich werden können („Gefährliche Planetoiden in Erdnähe“ werden auch als „PHAs“ = „Potentially Hazardous Asteroids“ bezeichnet). Deshalb werden ihre Bahnen in speziellen Überwachungsprogrammen (z.B. der SPACEWATCH der Universität von Arizona) laufend überwacht.



Man vermutet, daß es auch innerhalb der Merkurbahn ($a < 0.4$ AU) einen Planetoidengürtel gibt, dessen Objekte aufgrund der Sonnennähe natürlich nur extrem schwer zu beobachten sind. Sie werden „Vulkanoide“ genannt (nach dem hypothetischen Planeten, der nach URBAIN J.J. LEVERRIER (1811-1877) innerhalb der Merkurbahn seine Bahn ziehen sollte). Trotz umfangreicher Suchprogramme sind jedoch bis heute (Anfang 2007) keine Vertreter gefunden worden.

Numerische Untersuchungen der zeitlichen Entwicklung der Bahnen von Aten-Objekten weisen darauf hin, daß sich ihre Bahnparameter derartig verändern, daß sie irgendwann einmal vollständig innerhalb der Erdbahn gelangen. Sie sollten dort eine spezielle Population, die man IEOs nennt (für „Inner-Earth Objects“, neuerdings auch „apohelie asteroids“), bilden. Die einzigen Objekte dieser Art wurden 2003 und 2004 (2003CP20, 2004JG6) entdeckt. Der Planetoid mit der (vorläufige) Katalogbezeichnung 1998 DK36 konnte nicht wieder aufgefunden werden und gilt deshalb als verschollen. Das ist auch nicht weiter verwunderlich, da es sich dabei lediglich um einen Felsbrocken von ca. 40 m Durchmesser gehandelt hat...

Zwischen Mars und Jupiter im Bereich des Hauptgürtels findet man folgende Planetoidenfamilien (Auswahl):

HUNGARIAS

Als Hungarias werden Planetoiden bezeichnet, die sich knapp außerhalb der Marsbahn ($a \sim 1.9$ AU) auf Bahnen mit großer Neigung zur Ekliptik ($16^\circ < i < 34^\circ$) und relativ geringer Exzentrizität ($e < 0.18$) um die Sonne bewegen.

FLORAS

Große Bahnhalbachse: $2.1 < a < 2.3$, Bahnneigung $< 11^\circ$. Bei den Mitgliedern dieser Gruppe handelt es sich nach neueren Untersuchungen um die Bruchstücke einer Planetoidenkollision, die vor ca. 470 Millionen Jahren stattgefunden hat und von der viel Material in Form von Meteoriten die Erde erreichte (sogenannte L-Chondrite).

PHOCAEAS

Die große Halbachse der Bahnen liegt zwischen $2.25 < a < 2.5$ und die Exzentrizitäten sind größer als 0.1. Die Bahnneigungen entsprechen im Wesentlichen der der Hungarias ($18^\circ < i < 32^\circ$).

KORONIS

Der Hauptvertreter der Koronis-Familie ist (208) Lacrimosa, der einen Durchmesser von ungefähr 44 km besitzt. Die Mitglieder dieser Familie (z.Z. sind mehr als 200 bekannt) bewegen sich in einer mittleren Entfernung von 2.88 AU um die Sonne. Ihre Bahnneigung ist kleiner als 3.5° . Sie sind alle vom silikatischen Typ und viele zeigen einen Lichtwechsel, was auf eine unregelmäßige Gestalt hindeutet. Offensichtlich handelt es sich dabei um die Bruchstücke einer Planetoidenkollision. Die Familie ist nach dem 1876 entdeckten Planetoiden (158) Koronis benannt. Das prominenteste Mitglied ist (243) Ida mit ihren Mond Dactyl.

EOS

Die Mitglieder der Eos-Familie bewegen sich in einer Entfernung von 3.02 AU um die Sonne. Spektroskopische Untersuchungen haben ergeben, daß ihre Mitglieder sowohl vom kohligen C-Typ als auch vom silikatischen S-Typ sind. Wahrscheinlich sind vor langer Zeit einmal zwei Planetoiden unterschiedlicher Zusammensetzung einmal zusammengestoßen und dabei zersplittert. (45) Eos ist ein sehr kleiner Himmelskörper (Durchmesser ungefähr 1 km). Er wurde 1882 von JOHANN PALISA (1848-1925) entdeckt.

THEMIS

Die Themis-Familie besteht vollständig aus Planetoiden vom C-Typ. Sie bewegen sich in einer Entfernung von 3.13 AU um die Sonne. Ihr Hauptvertreter – (25) Themis – ist mit einem Durchmesser von 228 km für einen Planetoiden schon relativ groß. Er wurde am 5. April 1853 von A. DE GASPARIS entdeckt.

CYBELES

Diese relativ kleine Familie besiedelt ein Gebiet um die 4:7 –Resonanz mit Jupiter in der Zone zwischen 3.27 AU und 3.7 AU. (65) Cybele gehört mit einem Durchmesser von ungefähr 246 km zu den größeren Planetoiden. Er wurde 1861 von dem Astronomen ERNST W. L. TEMPEL (1821-1889) entdeckt.

HILDAS

Typische Hilda-Planetoiden besetzen das Gebiet der 2:3 –Resonanz in bezug auf Jupiter ($3.7 < a < 4.2$). Durch diese Resonanz bilden die Aufenthaltsorte der Hilda-Kleinplaneten für einen außen stehenden Betrachter ein gleichseitiges Dreieck, das starr mit Jupiter die Sonne umläuft

THULE

(279) Thule bewegt sich in einer 3:4 –Resonanz in bezug auf Jupiter. Weitere Mitglieder sind nicht bekannt. Hinter diesem einsamen Planetoiden öffnet sich eine große planetoidenfreie Lücke die erst in Jupiterentfernung durch die Trojaner geschlossen wird.

Jupiter-TROJANER

Als „Trojaner“ werden ganz allgemein Planetoiden bezeichnet, die in einer 1:1 –Resonanz mit ihren Mutterplaneten die Bereiche um die Librationspunkte L4 und L5 besetzen. Speziell bei Jupiter unterscheidet man zwei Gruppen von Trojanern: die Achilles-Gruppe, deren Mitglieder den Jupiter um durchschnittlich 60° vorausseilen (um L4) und die Patroklos-Gruppe (um L5), die 60° hinterherlaufen.

Zurzeit (Mai 2007) sind 1155 Mitglieder der Achilles-Gruppe und 1038 Mitglieder der Patroklosgruppe bekannt. Besonders exotische Planetoiden sind die sogenannten „springenden Trojaner“, die zwischen L4 und L5 hin und her springen können. Das bekannteste Beispiel ist 1868 Thersites. Ein großer Teil der irregulären Jupiter-Monde scheinen eingefangene Trojaner zu sein.

Kleinplaneten außerhalb der Jupiter-Bahn:

CENTAUREN

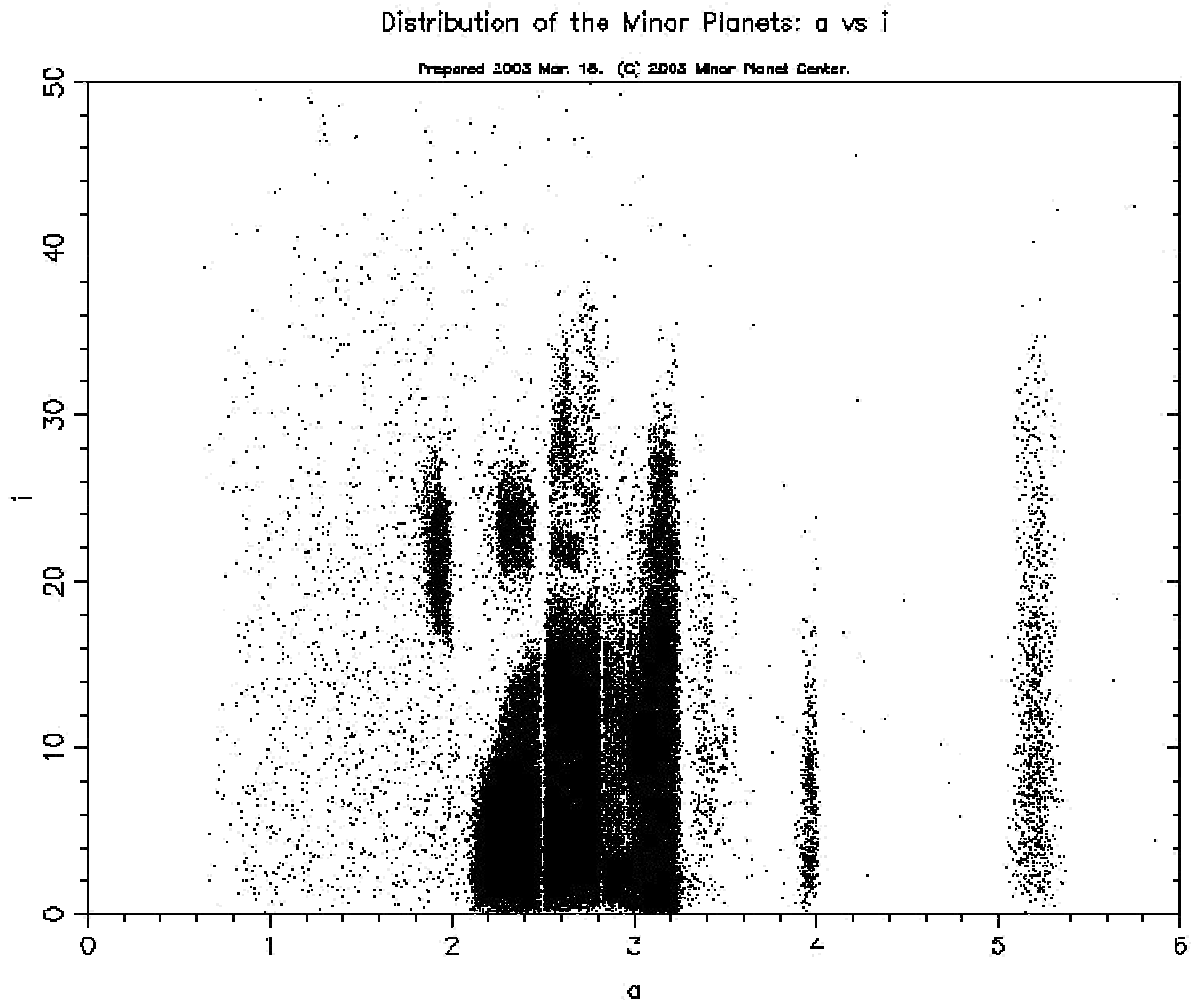
Planetoiden, die sich zwischen Jupiter und Neptun bewegen ($5.5 < a < 29$ AU), werden als Centauren bezeichnet. C.T.KOWAL entdeckte 1977 ein Objekt genau in diesem Bereich. (2060) Chiron bewegt sich in ca. 50 Jahren einmal um die Sonne, wobei seine Bahn größtenteils zwischen Saturn und Uranus verläuft. Kleinplaneten im äußeren Sonnensystem außerhalb der Jupiter-Bahn scheinen zumindest teilweise mit gefrorenen Gasen bedeckt zu sein. Chiron jedenfalls bildet eine komaartige Atmosphäre aus was dazu führte, daß er jetzt als Komet klassifiziert wird. Irgendwie ist es deshalb konsequent, diese Objekte als Centauren – Fabelwesen zwischen Pferd und Mensch – zu bezeichnen. Bis zum Anfang Mai 2007 waren 196 derartige Objekte bekannt.

Kuiper-Belt-Objekte (KBOs)

Alle Kleinplaneten außerhalb der Neptunbahn werden dieser Gruppe zugeordnet. Aufgrund der riesigen Entfernung ($a > 30$ AU) sind sie nur schwer zu entdecken, obwohl sie einige Objekte enthält, die größer als 1000 km sind. Der prominenteste Vertreter ist der Planet Pluto, der sich in einer 3:2 – Resonanz mit Neptun befindet, was sehr effektiv eine sonst mögliche Kollision verhindert. KBO's mit ähnlichen Bahnparametern wie Pluto ($39 < a < 40.5$) werden als „Plutinos“ bezeichnet. „Hyperplutinos“ sind dann KBOs, die sich in ähnlicher Entfernung, aber in einem anderen Resonanzverhältnis in bezug auf Neptun bewegen (z.B. 2001 FQ185, 1999 RB215 und (40314) KR16 in einer 2:1 – Resonanz, 1994 JS und 2002 GL32 in einer 4:3 – Resonanz). Die Gesamtzahl der KBO's dürfte die Zahl der Planetoiden im Hauptgürtel um Größenordnungen übersteigen. Gegenwärtig (03.07.2005) sind 942 KBO's katalogisiert. Darunter solche riesigen Brocken wie (50000) Quaoar ($d = 1200 \pm 200$ km), (28978) Ixion ($d = 1065 \pm 165$ km), (20000) Varuna ($d = 900 \pm 140$ km), (90377) Sedna ($d = 1400 \pm 200$ km) und (136199) Eris ($d = 2400 \pm 100$ km), von denen Eris mittlerweile offiziell als Zwergplanet geführt wird.

Vielfach stellt man sich den Planetoidengürtel zwischen Mars und Jupiter (also den Hauptgürtel) als diskusartige Scheibe vor, in der dicht gedrängt die Planetoiden ihre Bahn ziehen – als eine Gefahr für jeden Forschungssatelliten auf seinem Weg ins äußere Sonnensystem. Das ist trotz der großen Zahl der Kleinkörper jedoch nicht der Fall, da das zur Verfügung stehende Volumen das Volumen, welches die Planetoiden selbst einnehmen, um viele Größenordnungen übersteigt. Zieht man in die Betrachtung nicht nur die Häufigkeitsverteilung als Funktion des mittleren Abstandes von der Sonne ein, sondern betrachtet auch die Bahnexzentrizitäten e und die Bahnneigungen i , dann erkennt man außerdem, daß der Hauptgürtel nicht die Form einer Disk, sondern eher die Form eines Torus hat.

Kollisionen größerer Planetoiden untereinander treten darin nur in geologischen Zeiträumen auf. Bezieht man sich auf das Alter des Sonnensystems (ca. 4.6 Milliarden Jahre), dann sind derartige Zusammenstöße dagegen ein gewöhnliches und systemprägendes Phänomen, wie die zahlreichen Hirayama-Familien zeigen.

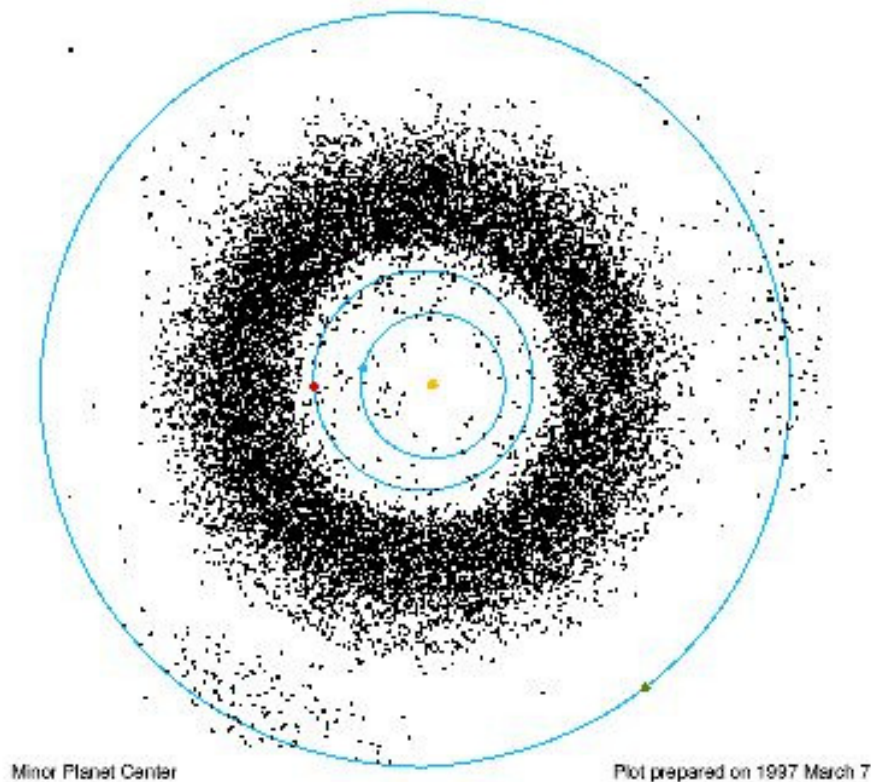


Verteilung der bekannten Planetoiden entsprechend ihrer großen Bahnhalbachse (in AU) und Bahnneigung i . © MPC

Nach dem vorliegenden Datenmaterial kann man davon ausgehen, daß am Ende der Phase der Planetenentstehung aus Planetesimale ungefähr 80 kleinere „Mutterkörper“ zwischen der Mars- und Jupiterbahn entstanden sind, die teilweise so groß waren, daß sie aufschmolzen und in einen metallischen Kern und einen silikatischen Mantel differenzierten. Aufgrund der gravitativen Einflußnahme Jupiters konnten sich diese Körper jedoch nicht mehr zu einem „richtigen“ Planeten vereinigen.

Bei Zusammenstößen mit einer geschätzten Relativgeschwindigkeit von ca. 5 km/s kommt es nicht mehr zu Akkretionsprozessen. Vielmehr zerbrechen die Ursprungkörper in mehrere Teile die im Laufe der Zeit wiederum miteinander kollidieren können, so daß die Anzahl der Bruchstücke schnell anwächst. Die Teilkörper, die dabei entstehen, müssen sich aus himmelsmechanischen Gründen immer wieder am Kollisionspunkt der Bahn unter der Voraussetzung treffen, daß es keine Bahnstörungen gibt. Da die großen Planeten jedoch solche Störungen bewirken, dissipieren die Bahnen im Laufe der Zeit auseinander. Auf diese Weise entstanden die nach Bahnform und Typus ähnlichen Hirayama-Familien. Der bei den Kollisionen entstandene Staub sowie die sehr vielen kleinen Bruchstücke werden relativ schnell durch die gravitative Wirkung der großen Planeten aus dem inneren Sonnensystem entfernt. Da

die Bruchstücke oft eine unregelmäßige Form haben, zeigen viele Planetoiden einen mehr oder weniger stark ausgeprägten Lichtwechsel. Durch den Vergleich von photometrisch ermittelten Lichtkurven mit den Lichtkurven verschieden geformter Planetoidenmodelle (die man im Labor ausgemessen hat) kann man auf die ungefähre Gestalt und die räumliche Lage (Spin) der Rotationsachse schließen.



Verteilung der Kleinplaneten im Bereich des Planetoidengürtels zwischen Mars und Jupiter. Man beachte auch die beiden von Trojanern belegten Wolken um die Lagrangepunkte L4 und L5.

Morphologie und Geologie

Informationen über die Größe eines Planetoiden erhält man aus seiner Helligkeit und Entfernung sobald ein verlässlicher Wert für sein Albedo vorliegt. Das Albedo hängt von der Art von Material ab, aus dem seine Oberfläche besteht. Darüber wiederum geben die Reflektionsspektren Auskunft, die man mit den spektralen Eigenschaften von auf der Erde aufgefundenen meteoritischen Materials vergleichen kann. Das Rückstrahlungsvermögen läßt sich aber auch aus dem Vergleich der vom Planetoiden emittierten Wärmestrahlung (dargestellt durch die Infrarothelligkeit) mit seiner optischen Helligkeit bestimmen. Nach dieser Methode wurden z.B. die Durchmesser der größeren Objekte im Kuiper-Gürtel ermittelt.



Aus Radardaten rekonstruiertes Bild des Planetoiden 1999 JM8, der einen Durchmesser von ca. 3.5 km hat und zu den Objekten (NEO`s) gehört, welche der Erde sehr nahe kommen können. © NASA

Aussagen über die Gestalt und Lage der Rotationsachse in bezug auf die Bahnebene kann man bei unregelmäßigen Kleinplaneten aus der Analyse ihrer Lichtkurven erhalten. Eine weitere Methode besteht in der Beobachtung von „Sternfinsternissen“, die dann entstehen, wenn ein Planetoid einen Stern bedeckt und sein Schatten über die Erde huscht. Dabei wird quasi seine Form auf die Erdoberfläche projiziert. Deshalb lassen sich durch eine genaue Messung der Ein- und Austrittszeiten mehrerer über die Verfinsterungszone verteilter Beobachter zumindest grob der Durchmesser und die Form des jeweiligen Planetoiden bestimmen. Auf diese Weise konnten 1983 mehrere Hundert Amateurastronomen in Zusammenarbeit mit Fachastronomen die Gestalt von (2) Pallas ermitteln, als sie den Stern 5 Größe ($4''7$) 1 Vulpeculae bedeckte und ihr Schatten über die Vereinigten Staaten wanderte: Die Querschnittsfläche von Pallas hat danach die Form eines dreiachsigen Ellipsoids mit den Maßen 574 x 526 x 510 km.

Noch bessere Resultate – insbesondere bei Planetoiden, die der Erde recht nahe kommen – liefern Radarmethoden. Aus den reflektierten Radiowellen läßt sich nicht nur die Größe des untersuchten Objekts ableiten. Sogar Oberflächendetails sind auf manchen der rekonstruierten Bilder zu sehen.

Größe und Gestalt

Um die Helligkeiten von Planetoiden vergleichbar zu machen hat man ähnlich wie in der Stellarastonomie eine „absolute Helligkeit“ eingeführt. Darunter versteht man die scheinbare Helligkeit („Größe“) die ein Planetoid hätte, wenn er sich genau 1 AU von der Erde und 1 AU von der Sonne entfernt befinden würde und sein Phasenwinkel den Wert Null hat. Diese Helligkeit ist – da sie ja vom beleuchteten Querschnitt abhängt - zugleich auch ein grobes Maß für die Größe des Kleinplaneten. Genauer gesagt, beide Größen (Durchmesser d und absolute Helligkeit H) sind zueinander direkt proportional, wobei in den Proportionalitätsfaktor das Albedo eingeht. Und gerade diese Größe ist ziemlich schwierig zu bestimmen.

Formelmäßig läßt sich die absolute Helligkeit H eines Planetoiden folgendermaßen fassen, wenn m seine scheinbare Helligkeit, R_{Erde} seine Entfernung von der Erde und R_{\odot} seine Entfernung von der Sonne ist (in AU, Oppositionsstellung wird angenommen). Mit A wird das Albedo bezeichnet:

$$m = H + 5 \log R_{Erde} + 5 \log R_{\odot} \quad [1.1]$$

$$H = 16.4 - 5 \log \left(d \sqrt{A} \right) \quad (\text{Objektdurchmesser } d \text{ in [km]}) \quad [1.2]$$

Bis auf A lassen sich alle Größen relativ leicht bestimmen. Es gibt aber eine Möglichkeit A abzuschätzen. Aus Helligkeitsmessungen im nahen infraroten Spektralbereich läßt sich die ungefähre Oberflächentemperatur T ermitteln die wiederum mit dem Rückstrahlungsvermögen A über folgende Näherungsformel verknüpft ist:

$$A = \left(T \frac{\sqrt{R_{\odot}}}{279} \right)^4 \quad [1.3]$$

(siehe auch die Box „Indirekte Bestimmung der Planetoidendurchmesser“)

Eine weitere Möglichkeit A zu bestimmen beruht auf der Messung des Reflektionsspektrums des Planetoiden. Dieses Spektrum wird mit im Labor erhaltenen Spektren von Meteoriten unterschiedlichen Typs verglichen mit dem Ziel, den Meteoritentyp zu identifizieren, der mit dem Spektrum des Planetoiden am besten verträglich ist. Für A verwendet man dann einfach das Albedo des entsprechenden Meteoritentyps.

Tabelle: Absolute Helligkeit und ungefährender Durchmesser eines Kleinplaneten

| Abs. Helligkeit | Durchmesser Minimal [km] | Durchmesser Maximal [km] |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| 3 | 670 | 1490 |
| 4 | 420 | 940 |
| 5 | 270 | 590 |
| 6 | 170 | 380 |
| 7 | 110 | 240 |
| 8 | 65 | 150 |
| 9 | 40 | 90 |
| 10 | 25 | 60 |
| 11 | 15 | 40 |
| 12 | 11 | 24 |
| 13 | 7 | 15 |
| 14 | 4 | 9 |
| 15 | 3 | 6 |
| 16 | 2 | 4 |
| 17 | 1 | 2 |
| 18 | 0.67 | 1.5 |
| 19 | 0.42 | 0.94 |
| 20 | 0.27 | 0.59 |

Im Vergleich zu ihrer Gesamtzahl gibt es nur wenige Kleinplaneten deren Durchmesser 100 km übersteigt. Die größten Planetoiden sind (KBO's ausgenommen) (1) Ceres (Zwergplanet) mit einem Durchmesser von 975 x 909 km, gefolgt von (2) Pallas mit 570x525x482 km, (4) Vesta mit 530 und (10) Hygeia mit 428 km. Alle anderen sind kleiner als 400 km. Man vermutet, dass fast alle Kleinkörper im Hauptgürtel mit einem Durchmesser > 100 km bekannt und katalogisiert sind. Die Zahl der Planetoiden > 1 km wird auf 1 bis maximal 2 Millionen geschätzt. Die Größenverteilung kann grob durch eine Funktion der Form

$$n(d) \sim d^{-2} \text{ bis } d^{-3.5} \quad [1.4]$$

beschrieben werden. Genauere Untersuchungen zeigen, daß sich die Verteilungsfunktionen von S-Typ-Planetoiden im Vergleich zu C-Typ-Planetoiden im Durchmesserbereich zwischen 1 und 10 km geringfügig unterscheiden.

Die Verteilung (1.4) ist außerdem ein wichtiges Indiz dafür, daß die kleineren Planetoiden durch Zertrümmerung jeweils Größerer entstanden sind. Man schließt das daraus, weil sich auch beim Zermahlen von Gestein in einer Kugelmühle eine ähnliche Verteilungsfunktion der Bruchstücke einstellt.

Tabelle: Planetoidenmassen ($1 M_{\odot} = 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$)

| Planetoid | Masse in M_{\oplus} | ρ in kg/m^3 |
|------------------|------------------------------------|---------------------------|
| (1) Ceres | $(4.39 \pm 0.04) \cdot 10^{-10}$ | 2050 |
| (2) Pallas | $(1.59 \pm 0.05) \cdot 10^{-10}$ | 4200 |
| (4) Vesta | $(1.69 \pm 0.11) \cdot 10^{-10}$ | 4300 |
| (10) Hygiea | $(4.7 \pm 2.3) \cdot 10^{-11}$ | |
| (11) Parthenope | $(2.58 \pm 0.10) \cdot 10^{-12}$ | |
| (15) Eunomia | $(4.2 \pm 1.1) \cdot 10^{-12}$ | |
| (16) Psyche | $(8.7 \pm 2.6) \cdot 10^{-12}$ | 1800 |
| (20) Massalia | $(2.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-12}$ | 2700 |
| (45) Eugenia | $(3.05 \pm 0.13) \cdot 10^{-12}$ | 1100 |
| (121) Hermione | $(4.7 \pm 0.8) \cdot 10^{-12}$ | 1800 |
| (216) Kleopatra | $(1.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-12}$ | |
| (243) Ida | $(2.18 \pm 0.32) \cdot 10^{-14}$ | 2700 |
| (253) Mathilde | $(5.193 \pm 0.022) \cdot 10^{-14}$ | 1300 |
| (433) Eros | $(3.6 \pm 0.9) \cdot 10^{-15}$ | 2500 |
| (704) Interamnia | $(3.7 \pm 1.7) \cdot 10^{-11}$ | |

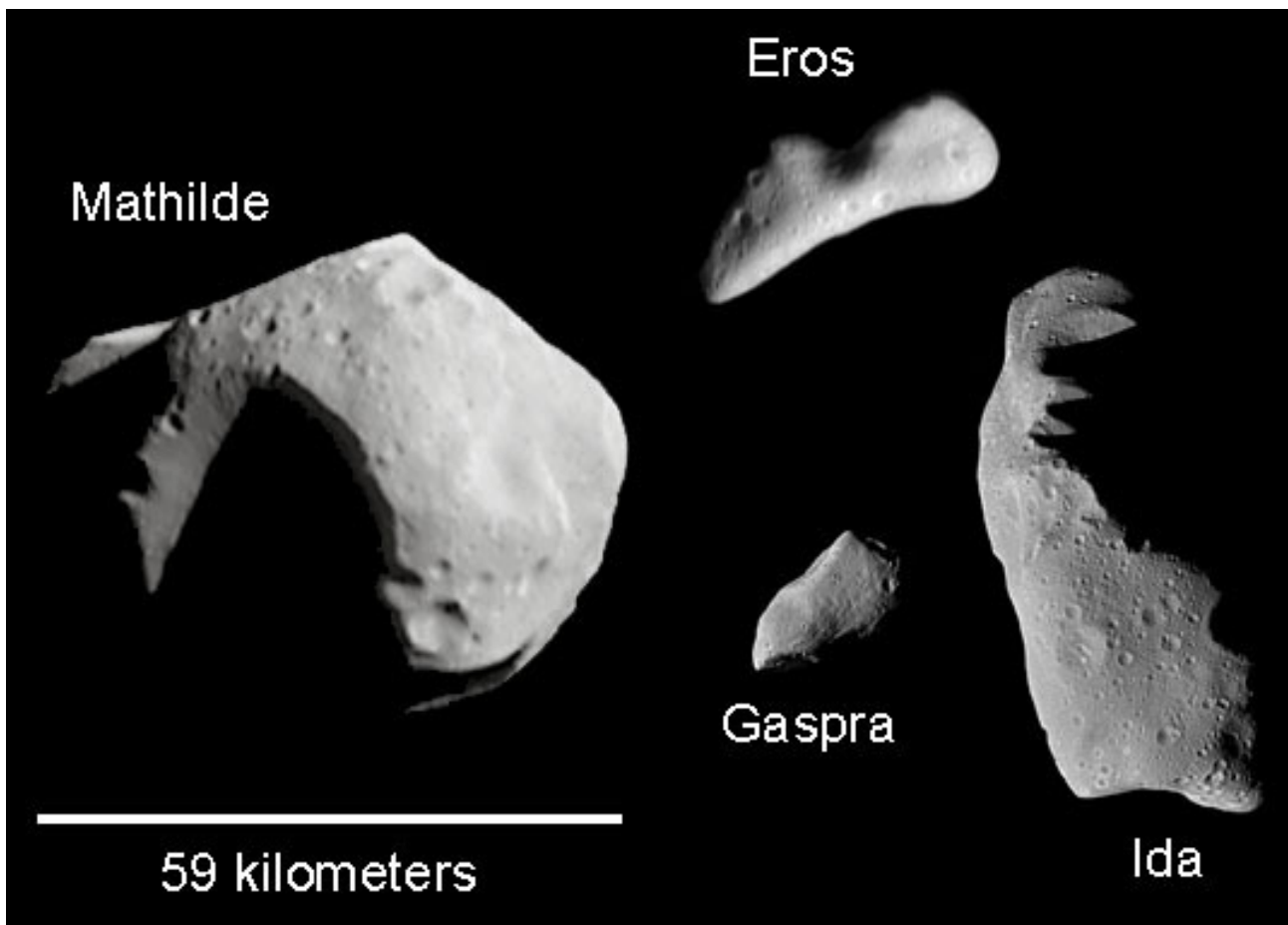
Die Massenbestimmung von Planetoiden ist ziemlich schwierig, da man nur bei den größeren Objekten über Bahnstörungen auf ihre Massen schließen kann. Möglichkeiten dafür bieten sich dann, wenn sich zwei Planetoiden selbst sehr nahe kommen und sich dabei gegenseitig merklich anziehen, was zu einer kleinen Veränderung ihrer Bahnparameter führt. Durch die Analyse dieser Änderungen konnten schon die Massen einiger Planetoiden bestimmt oder zumindest realistisch abgeschätzt werden. Sehr hilfreich ist es natürlich auch, wenn ein Planetoid einen Mond hat (wie z.B. (243) Ida und Dactyl) oder von einem künstlichen Satelliten umkreist wird (NEAR Shomeaker und (433) Eros). In diesem Fall lassen sich über die genauen Bahnparameter die Massensummen vergleichsweise einfach errechnen.

Wie aus der Tabelle zu entnehmen ist, liegt die Ungenauigkeit der Massenbestimmung – die drei größten Kleinplaneten einmal ausgenommen – bei mehr als 20%. Betrachtet man die Dichte von (45) Eugenia und (253) Mathilde, dann scheinen das keine kompakten Körper aus silikatischen Material zu sein sondern eher lockere, poröse Schutthalden, die gerade so durch Kohäsionskräfte und Eigengravitation zusammengehalten werden.

Planetoiden und Kuiper-Belt-Objekte

Sehr viele Kleinplaneten zeigen einen Lichtwechsel was auf eine überwiegend irreguläre Gestalt hindeutet. Das ist auch verständlich, da nur die Allergrößten unter ihnen (wie z.B. (1) Ceres) eine annähernd kugelförmige Gleichgewichtsfigur ausbilden konnten, als sie in ihrer frühesten Geschichte einmal vollständig aufgeschmolzen waren. Alle anderen Planetoiden scheinen nur Bruchstücke von solchen Körpern zu sein bzw. Reste von primitiven Material, welches aus der Zeit der Entstehung des Sonnensystems übriggeblieben ist. Aus den Lichtkurven, die bei unterschiedlichen Phasenwinkeln gewonnen wurden, kann man auf die Rotationsdauer, die Lage der Rotationsachse (Spin) im Raum und die ungefähre geometrische Form schließen. Um zumindest ungefähr die Gestalt aus Lichtkurven abzuleiten, ist es unerlässlich, die beobachteten Lichtkurven mit Lichtkurven von Modellplanetoiden, die im Labor unter verschiedenen Orientierungen von Objektachse, Lichtquelle und Photometer angefertigt wurden, zu vergleichen. Das ist sehr mühsam und der Erkenntnisgewinn auch nicht sonderlich groß.

Eindeutigere Aussagen über die Gestalt lassen sich am besten bei einem Vorbeiflug (Beispiele: (951) Gaspra, (243) Ida, (433) Eros, (253) Mathilde, (5535) Annefrank, (25143) Itokawa) oder bei größeren oder nahe an der Erde vorbeibewegenden Objekten durch teleskopische Beobachtungen ((4) Vesta, (1) Ceres, Hubble-Teleskop) oder Radarmethoden (z.B. (4769) Castalia, (4179) Toutatis) gewinnen.



Alle derartig beobachteten Objekte hatten eine unregelmäßige Gestalt. Besonders hübsch sieht (216) Kleopatra aus. Im Gegensatz zu seiner Namenspatronin ähnelt er verblüffend einem „Hundeknochen“ wie man ihn z.B. auf dem Polenmarkt kaufen kann.

Schon aus der Lichtkurve hat man aufgrund der außergewöhnlich großen Amplitude auf ein schlankes triaxiales Ellipsoid mit den Achsen $a/b=2.6$ und $b/c=1.3$ geschlossen. Auf Aufnahmen, die mit Hilfe des adaptiven optischen Systems ADONIS am 3.6 m-Teleskop der ESO in La Silla gewonnen wurden, erkennt man bereits deutlich die zweigeteilte erdnußartige Gestalt. Detaillierte Radaruntersuchungen mit Hilfe des Arecibo-Teleskops konnten die Gestalt weiter präzisieren. Danach ist der Kleinplanet etwa 217 km lang und etwa 94 km breit mit einer Einschnürung in der Mitte. Er rotiert in 5.385 Stunden einmal um seine Achse.

Indirekte Bestimmung des Durchmessers eines Planetoiden aus dem gemessenen Strahlungsfluß im Infrarotbereich

Mit Hilfe einer vernünftigen Abschätzung des Albedos A eines Planetoiden läßt sich aus dem Strahlungsfluß im IR indirekt seine Größe bestimmen. Ist r_p der Radius des Planetoiden, R_\odot sein aktueller Abstand von der Sonne und R_{Erde} die Entfernung zur Erde und kennt man seine Helligkeit im optischen und im IR (hier in Form des Strahlungsflusses), dann kann man auf folgende Weise eine Abschätzung für r_p erhalten:

Die Strahlungsleistung $F(R_\odot)$ in der Entfernung R_\odot zur Sonne beträgt (siehe (5.23))

$$F(R_\odot) = \frac{L_\odot}{4\pi R_\odot^2}$$

Der Planetoid mit dem Albedo A reflektiert an seiner Oberfläche davon pro Sekunde:

$$F(R_\odot) A \pi r_p^2 = \pi A r_p^2 \frac{L_\odot}{4\pi R_\odot^2}$$

Für den in der gleichen Zeit absorbierten Anteil gilt dann:

$$F(R_\odot) (1-A) \pi r_p^2 = \pi (1-A) r_p^2 \frac{L_\odot}{4\pi R_\odot^2}$$

Im Gleichgewichtsfall muß der reflektierte Anteil mit der „optischen Helligkeit“ L_{opt} des Planetoiden korrespondieren, also

$$L_{opt} = \pi A r_p^2 \frac{L_\odot}{4\pi R_\odot^2}$$

während die absorbierte Energie der „IR-Helligkeit“ L_{IR} entspricht:

$$L_{IR} = \pi (1-A) r_p^2 \frac{L_\odot}{4\pi R_\odot^2}$$

Auf der Erde werden also simultan zwei Strahlungsflüsse gemessen, die sich entsprechend dem Albedo und der Größe der reflektierenden Oberfläche voneinander unterscheiden:

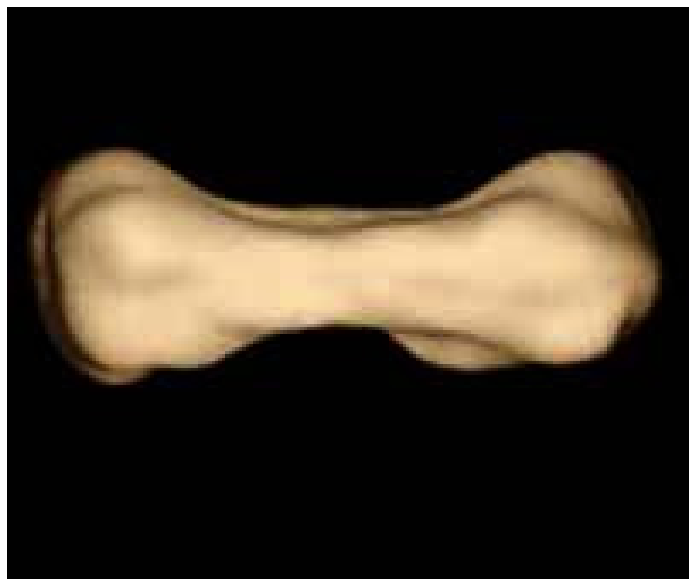
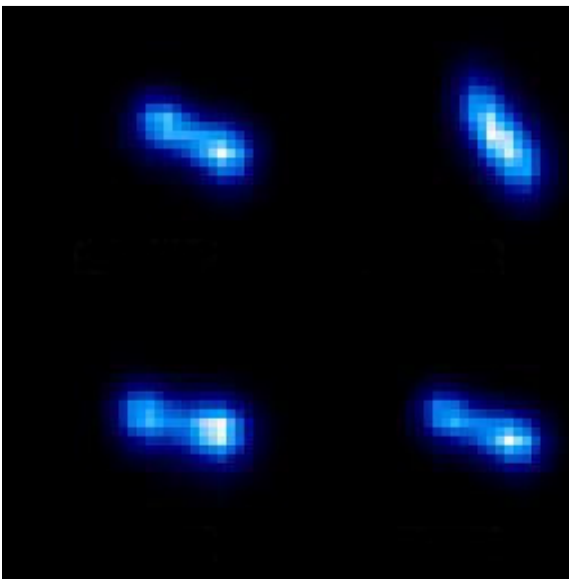
$$F_{opt} = \frac{L_{opt}}{4\pi R_{Erde}^2} \quad F_{IR} = \frac{L_{IR}}{4\pi R_{Erde}^2}$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung $F_{\text{Gesamt}} = F_{\text{opt}} + F_{\text{IR}}$ folgt schließlich über

$$F_{\text{IR}} = \frac{L_{\odot} r_p^2}{16 \pi R_{\text{Erde}}^2 R_{\odot}^2} - F_{\text{opt}}$$

der Planetoidenradius:

$$r_p = 4 R_{\text{Erde}} R_{\odot} \left(\frac{\pi (F_{\text{IR}} - F_{\text{opt}})}{L_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}}$$



Aufnahme von (216) Kleopatra mit dem 3.6 m-Spiegelteleskop der ESO. Zum Aufnahmezeitpunkt hatte der Planetoid einen scheinbaren Winkeldurchmesser von ungefähr $0.33''$. Rechts daneben die Abbildung eines Modells von Kleopatra, wie es aus den Radardaten des Arecibo-Observatoriums abgeleitet wurde.

Aller von Raumsonden fotografierten Planetoiden haben Impaktkrater auf ihrer Oberfläche so daß man davon ausgehen kann, daß das im Wesentlichen auch für alle anderen Kleinplaneten gilt. Einschläge auf einen Planetoiden können aufgrund ihrer geringen Masse zu einer Gefährdung ihrer Integrität führen. Bei größeren Impakten führt der Energieeintrag zu einer Fragmentierung sowohl des Planetoiden als auch des Impaktors (Entstehung von Planetoidenfamilien). Kleinere Impakte führen zumindest zu Rißbildungen, Verklüftungen und Zertrümmerungen wodurch ein Körper entstehen kann, der nur noch schwach gravitativ zusammengehalten wird. Derartige Kleinplaneten ähneln dann mehr einer „fliegenden“ Schutthalde („*rubble pile*“) als einem kompakten Felsen. Der von Galileo untersuchte Kleinmond „Amalthea“ im Jupitersystem scheint genau solch eine „Schutthalde“ zu sein. Aber auch im Hauptgürtel gibt es einige Kandidaten, deren Spektren sie als silikatische Körper ausweisen obwohl ihre Dichte z.T. weit unter 2000 kg/m^3 liegt (z.B. (45) Eugenia).



Bei seinem langen Weg zu Jupiter stattete die Planetensonde Galileo am 29.10.1991 den Kleinplaneten (951) Gaspra einen Kurzbesuch ab. Gaspra gehört zur Flora-Familie, ist vom silikatischen Typ und bewegt sich im inneren Teil des Planetoidengürtels um die Sonne. Ihre Maße sind: 18x11x9 km. Auf seiner Oberfläche sieht man eine ganze Anzahl von Impaktkratern unterschiedlicher Größe.

Aufbau und mineralogische Zusammensetzung

Schon relativ früh hat man einen Zusammenhang zwischen Planetoiden und den auf der Erde aufgefundenen Meteoriten vermutet. Die einzige Methode um einigermaßen verlässliche Informationen über den mineralogischen Aufbau kleiner Planeten zu erhalten, ist die spektrale Untersuchung des von ihnen reflektierten Sonnenlichts (man kann natürlich auch hinfliegen, aber solange man nicht landet, braucht man auch hier Spektrometer). Man nutzt dazu die Beobachtung aus, daß die chemischen Elemente, aus denen die Minerale der Planetoiden bestehen, Teile des elektromagnetischen Spektrums auf eine charakteristische Art und Weise absorbieren. Neben dem optischen Spektralbereich machen sich derartige Absorptionen besonders im nahen und mittleren Infrarotbereich bemerkbar. In dem man optische und Infrarotspektren von Kleinplaneten aufnimmt, kann man sie a) klassifizieren und b) die chemische Zusammensetzung ihrer Oberflächengesteine bestimmen. Letzteres geschieht in der Praxis durch den Vergleich mit Laborspektren ausgewählter Meteorite.

Planetoiden und Kuiper-Belt-Objekte

Die Erforschung des mineralogischen Aufbaus erschließt Informationen über die Entstehung und über die thermische Entwicklung der Kleinplaneten und öffnet damit ein Fenster zu der Epoche in der Geschichte des Sonnensystems, wo sich die ersten Planeten aus einer Gas- und Staubwolke gebildet haben.

Die spektralen Merkmale der Reflektionsspektren der Kleinplaneten führten zu einer Einteilung, die gegenwärtig 14 durch Großbuchstaben gekennzeichnete Klassen enthält:

| Typ | Spektralmerkmale |
|-----|--|
| A | starke Absorptionen im UV-Bereich und bei $\lambda = 1.1 \mu m$ durch olivinhaltige Minerale |
| B | ähnelt dem C-Typ, aber etwas heller und in der Farbe mehr Grau |
| C | relativ flache Spektren ohne auffällige Merkmale, Absorptionsbanden im UV-Bereich und bei $\lambda = 3 \mu m$. Extrem dunkel (A ≈ 0.03), Farbe leicht ins bläuliche gehend. |
| D | etwas rötlicher als P-Typ. Sehr geringes Albedo (0.02 .. 0.05) |
| E | lineares und flaches Spektrum, Farbe leicht ins rötliche gehend |
| F | flaches Spektrum ohne Absorptionen im UV-Bereich. Farbe neutrales Grau |
| G | ähnelt dem C-Typ, aber heller und sehr starke UV-Absorptionen |
| M | ähnelt dem P-Typ, aber etwas rötlicher und moderates Albedo (0.10 .. 0.18) |
| P | etwas rötlicher als der M-Typ, aber sehr geringes Albedo (0.02 .. 0.06) |
| Q | Wie S-Typ, aber mit stärkeren Absorptionen |
| R | Wie S-Typ, aber mit stärkeren, teilweise durch Olivin hervorgerufenen Absorptionen, erscheint rötlich |
| S | Leicht rötlich mit schwachen bis mittleren Absorptionen bei $\lambda = 1 .. 2 \mu m$ |
| T | Mittelding zwischen D- und S-Typ, auffallend rötlich, Albedo zwischen 0.04 und 0.11 |
| V | ähnelt dem S-Typ, aber stärkere, teilweise durch Pyroxen hervorgerufene Absorptionen |

Die hier fett dargestellten Haupttypen koinzidieren mit bestimmten Gruppen von Meteoriten:

C: für „*carbonaceous chondrite*“ – kohlenstoffhaltige Chondrite

E: entspricht den Enstatiten

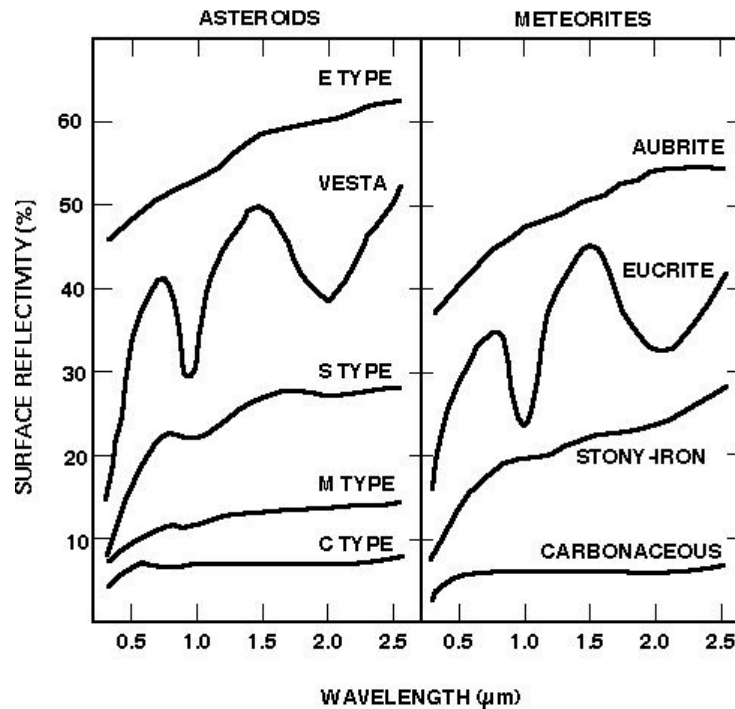
M: für „*metallic*“, entsprechen reinem Nickel-Eisen

R: für „Rot“

S: für „*silicaceous*“, entspricht den gewöhnlichen Steinmeteoriten

Neben den Reflektionsspektren geben auch Polarisationsmessungen Aufschluß über den mineralogischen Aufbau der Oberflächen der Kleinplaneten. Man nutzt in diesem Fall aus, daß sich über einen längeren Beobachtungszeitraum der Phasenwinkel eines Planetoiden in bezug zur Erde kontinuierlich ändert. In dem man den Polarisationsgrad des reflektierten Lichts als Funktion des

Phasenwinkels bestimmt und mit Labordaten verschiedener Materialien vergleicht, kann man auch hier Informationen über die Art der Oberflächengesteine erhalten.



Vergleich von Planetoiden- und Meteoritenspektren

Wenn man weiß, daß in der Entwicklungsgeschichte der Kleinplaneten Kollisionen eine wichtige Rolle spielen und bei diesen Zusammenstößen eine große Bandbreite von Bruchstücken unterschiedlicher Größe entsteht, dann ist es nicht verwunderlich, daß einige von ihnen irgendwann einmal auf die Erde fallen und als Meteorite ihren Weg in Museen, Forschungseinrichtungen und Privatsammlungen finden. Deshalb ist es eine legitime Methode, den stofflichen Aufbau von Planetoiden über den Umweg über Meteorite zu erforschen. Die in der Tabelle angegebene und aus den spektralen Merkmalen abgeleitete Typisierung läßt sich deshalb mit den spektralen Eigenarten der verschiedenen Meteoritenarten in Verbindung bringen.

Meteoriten unterteilt man entsprechend ihrer mineralogischen Zusammensetzung in zwei große Gruppen: Undifferenzierte (primitive) und Differenzierte. Zur ersten Gruppe gehören die sogenannten Chondrite. Sie erhielten ihren Namen nach kleinen, meist millimetergroßen kugelförmigen Einschlüssen, die man als Chondren bezeichnet. Sie stellen dahingehend „primitives“ Material dar, da sie noch nicht – z.B. durch Aufschmelzvorgänge – durch geochemische Fraktionierungsprozesse beeinflusst sind. Sie sind quasi bis heute überdauernde Überbleibsel aus den frühen Tagen des Sonnensystems, als sich aus Planetesimals die ersten planetaren Körper gebildet haben.

Bei den differenzierten Typen unterscheidet man im Wesentlichen die Achondrite (besitzen meistens keine Chondren mehr, da sie zumindest einmal aufgeschmolzen waren), die Eisenmeteorite (bestehen hauptsächlich aus Nickel-Eisen-Mineralien) und die Stein-Eisenmeteorite (bestehen ungefähr zu gleichen Teilen aus Eisen-Nickel-Mineralien und Silikaten). Am einfachsten kann man sie als Bruchstücke eines in Kruste, Mantel und (metallischen) Kern ausdifferenzierten planetaren Körper interpretieren (bzw. Zwischenstufen davon). Wenn solch ein Körper nach seiner Erstarrung durch

Planetoiden und Kuiper-Belt-Objekte

Kollisionen zerstört wird, entstehen Bruchstücke, deren Zusammensetzung etwa diesen Meteoritentypen entspricht (aber nicht alle Meteorite stammen aus zerbröselten Planetoiden!).

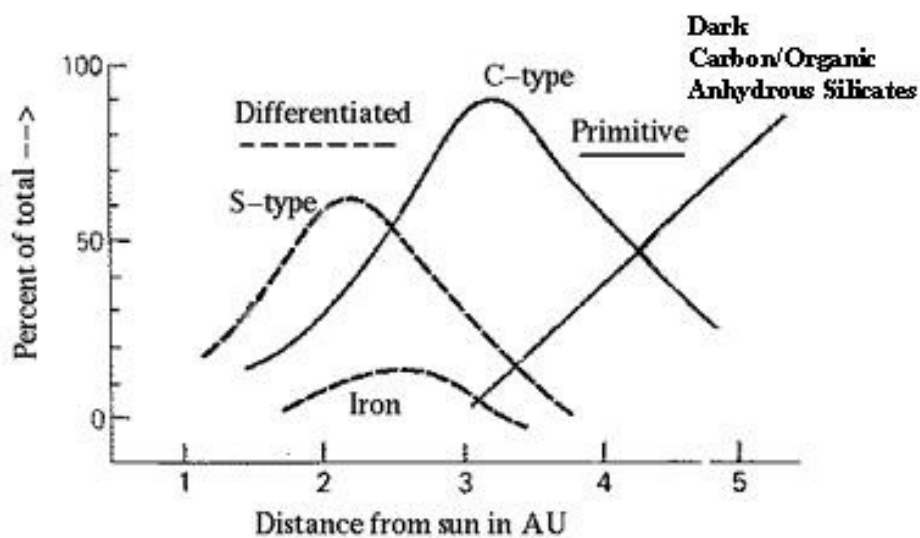
Den in der Tabelle angegebenen Planetoiden-Typen entsprechen nach ihren spektralen Merkmalen ungefähr folgenden Meteoritenfamilien:

| Typ | Meteoritenfamilie |
|------------|--|
| A | Brachinite, olivinreiche primitive Achondrite, wahrscheinlich älter als 4.5 Milliarden Jahre |
| B | Kohlige Chondrite, stark kohlenstoffhaltige Konglomerate aus urtümlicher Materie deren chemische Zusammensetzung in etwa der prozentualen Elementhäufigkeit der Sonne entspricht (natürlich ohne Berücksichtigung der volatilen Stoffe). Während ihrer Existenz sind sie nie oder kaum über 50° C erhitzt worden. |
| C | Kohlige Chondrite vom CM-Typ, deutlich sichtbare Chondren und Einschlüsse von Calcium-Aluminium-Inklusionen (z.T. mit mikroskopischen Diamanten) die wahrscheinlich außerhalb des solaren Urnebels im interstellaren Raum entstanden sind und später im chondritischen Material eingeschlossen wurden. Die spektrale Signatur von (1) Ceres ähnelt stark diesem primitiven Material. |
| D | Unsicher, ähneln entfernt Geopolymeren vom Kerogen-Typ (tendiert also zu kohligen Chondriten) |
| E | Achondritisches Material vom Aubrite-Typ, bestehen aus fast eisenfreien magnesiumreichen Pyroxenen (Enstatit). Es wird eine magmatische Entstehung unter reduzierenden Bedingungen angenommen. Beispiele für Planetoiden, die wahrscheinlich aus diesem Material bestehen, sind (44) Nysa und (3103) Eger. |
| F | Keine Entsprechung bekannt, Albedo wie C-Typ |
| G | Kohlige Chondrite |
| M | Eisenmeteorite, insbesondere Nickeleisen und Enstatit, bei dem nahezu alles Eisen in reduzierter metallischer Form vorliegt und das Pyroxen kein Eisen, sondern Magnesium enthält) |
| P | Keine Entsprechung bekannt |
| Q | Gewöhnliche Chondrite |
| R | Keine Entsprechung bekannt |
| S | Stein-Eisen-Meteorite und gewöhnliche Chondrite |
| T | Keine Entsprechung bekannt |
| V | Basaltische Achondrite, Beispiel (4) Vesta |

Die einzelnen Typen der Planetoiden zeigen eine interessante Verteilung über den Planetoidengürtel. Primitive Kleinplaneten (insbesondere der Typen C und D) findet man besonders im äußeren Bereich des Hauptgürtels in einer Entfernung von ungefähr 3 bis 4 AU. Im inneren Bereich dominieren dagegen Planetoiden, die dem S- und M-Typ zugeordnet werden. Oder anders ausgedrückt, je weiter

man sich von der Sonne entfernt, desto mehr primitives Material wird angetroffen. Diese Beobachtung hat große kosmogonische Bedeutung, da man aus einer detaillierten Analyse der Verteilung der mineralogischen Konglomerate Erkenntnisse über die Bedingungen während der Planetenentstehung gewinnen kann.

Das S- und M-Typ Planetoiden ungefähr die gleichen Regionen des Planetoidengürtels bevölkern liegt daran, daß sie aus differenzierten Ausgangskörpern entstanden sind. Durch Kollisionen ist von ihnen nach und nach der silikatische Mantel („Steinmeteorite“) vom Metallkern („Eisenmeteorite“) abgesprengt worden. Die Steinbrocken bildeten grob gesagt die S-Typ-Planetoiden und die freigelegten Eisenkerne die leicht rötlich schimmernden M-Typ-Planetoiden, zu denen u.a. der bereits erwähnte „Hundeknochenplanet“ Kleopatra gehört.



Die in den letzten Jahren nach dem Hollywood-Reißer „Deep Impact“ mit ROBERT DUVALL und VANESSA REDGRAVE stark intensivierte Suche nach *Near Earth Objects* (NEO's) hat ergeben, daß auch entgaste Kometenkerne eine nicht zu vernachlässigende Population von Planetoiden bilden. Manche Planetologen (u.a. WETHERILL) vermuten z.B. das fast die Hälfte aller Mitglieder der Apollo-Amor-Familie nichts anderes als entgaste Kometenkerne sind. Sobald Kometen ihre flüchtigen Elemente verloren haben, sind sie von C, D und F-Typ Planetoiden so gut wie nicht mehr zu unterscheiden. Sie verraten sich aber durch ihre Bahnen, die denen bestimmter Gruppen kurzperiodischer Kometen – insbesondere der der sogenannten Jupiter-Familie – stark ähneln bzw. aus ihnen durch Störungen hervorgegangen sind. Es ist deshalb auch nicht verwunderlich, daß es unter den nummerierten Planetoiden einige Kandidaten gibt, die man u.U. eher den Kometen zurechnen müßte. Neben die bereits erwähnten (2060) Chiron betrifft das z.B. (944) Hidalgo, (3200) Phaeton (verbunden mit dem Gemini-Meteorstrom) und (3553) Don Quixote.

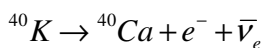
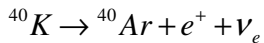
Kosmogonie des Planetoidengürtels

Liest man alte Lehr- oder Sachbücher zur Astronomie, dann erfährt man gewöhnlich, daß sich die kleinen Planeten zwischen der Mars- und Jupiterbahn bei der „Zerstörung“ eines etwa marsgroßen Himmelskörpers gebildet haben. Nach der Titius-Bode'schen Reihe sollte in dieser Region ja eh ein größerer Planet seine Bahn ziehen - was ja nicht der Fall ist. Man begründete diese „Katastrophentheorie“ mit der Beobachtung, daß ein Teil der auf der Erde gefundenen Meteoriten offensichtlich aus bereits weitgehend ausdifferenziertem Material besteht. Eisenmeteorite sollten nach dieser Hypothese aus dem Kern, Stein-Eisenmeteorite aus dem Kern-Mantelbereich und Steinmeteorite aus der Kruste dieses hypothetischen Planeten stammen. Wenn man sich den Aufbau des Planetoidengürtels und die Beschaffenheit seiner Bewohner aber etwas genauer anschaut, kommt man schnell zu Erkenntnissen, die sich mit einer „Katastrophentheorie“ der beschriebenen Art nur schwer vereinbaren lassen. Besonders folgende Punkte sind in diesem Zusammenhang hervorzuheben:

- Die Gesamtmasse der Objekte im inneren Planetoidengürtel beträgt weniger als 1/100 der Masse eines terrestrischen Planeten.
- Keine der Mineralien, die man in den verschiedenen Typen von Meteoriten gefunden hat, zeigen Anzeichen dafür, daß sie unter hohem Druck (wie er im Innern von Planeten herrschen muß) entstanden sind.
- Es ist kein vernünftiger, in sich logisch schlüssiger Mechanismus bekannt, der einen weitgehend ausdifferenzierten Planeten zerstören kann.
- Sowohl die Bahnlagen (hohe Exzentrizitäten und Bahnneigungen) als auch die Verteilung der Planetoiden im Gürtel sind mit der Katastrophentheorie nicht vereinbar.

Die Alternativhypothese, nach der sich der Planetoidengürtel als natürliche Folge der Entstehung der Planeten herausgebildet hat, kann einen Großteil der genannten Schwierigkeiten vermeiden. Sie wird deshalb heute bevorzugt diskutiert. Insbesondere die Bedingungen, die zur Herausbildung eines protoplanetaren Körpers in einer rotierenden Gas- und Staubwolke, die mit Planetesimals angereichert ist, führen, scheinen in der Frühzeit des Sonnensystems lokal unterschiedlich gewesen zu sein. Wie bekannt, hängt der Wachstumsprozeß eines Protoplaneten ganz wesentlich von der Relativgeschwindigkeit der Planetesimale in der näheren Umgebung seiner Bahn ab. Die Geschwindigkeit, mit der die Planetesimalbrocken aneinanderstoßen, ist in diesem Zusammenhang ein ausschlaggebender Parameter dafür, ob die zusammenstoßenden Körper „zusammenbacken“ (konstruktive Kollisionen) oder weiter bzw. wieder auseinanderbrechen (destruktive Kollisionen). Nur wenn der erste Prozeß überwiegt, können sich im Laufe der Zeit durch Akkretion größere Planeten bilden. Was die Ausbildung des heutigen Planetoidengürtels betrifft, scheint dabei die Entstehung des massereichen Jupiters eine wichtige Rolle gespielt zu haben. Um seinen Einfluß abzuschätzen ist zu untersuchen, welche gravitativen Wirkungen ein schnell wachsender jupitergroßer Planet auf die Gas- und Staubscheibe in dem fraglichen Bereich zwischen Mars und Jupiter gehabt hat. Neuere Modellrechnungen (die jedoch noch unsicher sind und kontrovers diskutiert werden) ergaben z.B. (MEYER, QUINN et.al. 2002), daß sich Riesenplaneten in Akkretionsscheiben wahrscheinlich extrem schnell - in der Größenordnung von einigen Tausend Jahren - ausbilden können. Ihre Störungen äußern sich in Kommensurabilitäten, die wiederum zu einer Umverteilung der Materie im gravitativen Einflußbereich des Riesenplaneten führen. Man kennt bereits einige extrasolare protoplanetare Scheiben, die quasi „Lücken“ - ähnlich wie in den Saturnringen - enthalten. Diese „Ausdünnungen“ in

der protoplanetaren Scheibe können u.U. für das Massedefizit in dieser Region verantwortlich sein, weshalb sich dort - neben einigen anderen Gründen - kein einzelner größerer planetarer Körper ausbilden konnte. Stattdessen sind wahrscheinlich eine Anzahl kleinerer Körper (die teilweise später durch Zusammenstöße wieder fragmentiert wurden) entstanden. Diese Körper waren so groß, daß sie z.T. ausdifferenzieren konnten in dem sie aufschmolzen. Da der Energieeintrag durch Akkretion bei Planetoiden bis zu einem Durchmesser von 1000 km zu gering ist um eine totale Aufschmelzung zu ermöglichen, muß es andere Mechanismen für die interne Aufheizung gegeben haben. In Frage kommt dafür eigentlich nur die Wärmeerzeugung durch den Zerfall radioaktiver Isotope wie z.B. von ^{40}K :



In beiden Zerfallsmoden wird jeweils ungefähr 1 MeV frei. Bei einer Halbwertszeit von 1.3 Milliarden Jahren steht bei entsprechender Konzentration dieses Kaliumisotops für einen langen Zeitraum eine sehr effektive interne Energiequelle zur Verfügung. Radioaktives Kalium allein liefert aber immer noch einen zu geringen Energiefluß, um im Innern dieser recht kleinen Körper eine Schmelze zu erzeugen. Deshalb nimmt man an, daß es weitere Isotope mit einer weitaus kürzeren Halbwertszeit gegeben haben muß, um die beobachteten mineralogisch differenzierten Kleinplaneten zu ermöglichen. Das Schlüsselisotop dafür ist ^{26}Al mit einer Halbwertszeit von lediglich 726000 Jahren. Es wird in signifikanter Menge bei einer Supernovaexplosion erzeugt was darauf hinweist, daß wahrscheinlich bei der Entstehung des Sonnensystems eine Supernova eine gewisse Rolle gespielt hat. Untersuchungen der Zusammensetzung von CV-Meteoriten scheinen diese These zu bestätigen.

Zu der Zeit, als die größeren Planetoiden aufschmolzen, befand sich die Sonne im sogenannten T-Tauri-Stadium ihrer Entwicklung, das durch einen besonders intensiven „Sonnenwind“ ausgezeichnet ist. Wie auch beim heutigen Sonnenwind transportierte damals das abfließende Plasma eingefrorene Magnetfelder, die - beim Umströmen eines Planetoiden - in seinem Inneren elektrische Ströme induzieren und damit Joule'sche Wärme freisetzen konnte. Auch auf diese Weise kann es im Zusammenwirken mit der Wärmeentwicklung durch den radioaktiven Zerfall zu einer relativ kurzzeitigen Aufschmelzung auch kleiner Himmelskörper gekommen sein. Um z.B. einen metallischen Kern auszubilden, sind Kerntemperaturen um ca. 1600 K erforderlich. Die Vielzahl heute bekannter Meteoritentypen dokumentiert, daß diese Aufschmelzvorgänge in unterschiedlichen Urkörpern zu einer unterschiedlich ausgeprägten mineralogischen Differentiation geführt haben. Da die freigesetzte Energie durch die Oberfläche sehr schnell in den Weltraum abgeführt wird und auch die Bedingungen, die zur internen Aufheizung geführt haben, nur relativ kurze Zeit anhielten, kühlten die Kleinplaneten recht schnell - d.h. innerhalb von wenigen Hundert Millionen Jahren - vollständig aus. Die Abkühlzeit kann mit folgender Beziehung grob abgeschätzt werden:

$$\tau(\text{Jahre}) \sim 10^4 R_{pl}^2 (\text{km})$$

Durch zerstörerische Kollisionen entstanden daraus schließlich die zumeist unregelmäßig geformten Planetoiden unterschiedlicher spektraler Eigenschaften, wie man sie heute beobachtet.

Schematisch kann man sich die Entstehung der heutigen Planetoidenpopulation ungefähr so vorstellen:

- a) Ein Planetoid, das sich aus Planetesimalen bildet, besteht aus einem Material, das ungefähr den kohlig-chondriten ähnelt oder entspricht.
- b) Ist der Ursprungskörper groß genug, kommt es zu einer teilweisen oder totalen Aufschmelzung. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte der stofflichen Bestandteile können sich ein metallreicher Kern, ein Mantel und eine Kruste ausbilden.
- c) Durch zerstörerische Kollisionen entstehen schließlich unregelmäßig geformte Bruchstücke, die heute in großer Zahl den Planetoidengürtel bevölkern

Daß insbesondere Planetoiden, deren spektrale Eigenschaften dem der Eisenmeteoriten entsprechen, im inneren Hauptgürtel zu finden sind, erklärt sich vielleicht damit, daß ihr relativ weicher silikatischer Mantel in den Jahrmilliarden ihrer Existenz bei Zusammenstößen abgesprengt wurde. Die dabei entstandenen kleinen Bruchstücke sind entweder nur schwer zu beobachten (was ihr Defizit erklärt) oder bereits durch verschiedene Effekte graduell aus dem Planetoidengürtel entfernt worden.

Der Yarkovsky-Effekt

Die Seite eines Planetoiden, die der Sonne zugewandt ist, absorbiert einen Teil von deren Strahlung, was zu einer Erwärmung führt. Wenn der Planetoid rotiert, ist diese Erwärmung nicht gleichmäßig über die beleuchtete Fläche verteilt. Wenn über einem Punkt des Planetoiden die Sonne aufgeht, dann nimmt mit steigendem Sonnenstand die Erwärmung zu um zu Mittag bzw. am frühen Nachmittag ihren Höhepunkt zu erreichen. Danach beginnt sich die Bodenschicht wieder abzukühlen, in dem sie die darin gespeicherte Energie in Form von Wärmestrahlung reemittiert. Da die Bodenschicht diese Wärme aber etwas langsamer abgibt, als sie sie aufgenommen hat („thermische Trägheit“), wird die nachmittägliche Hemisphäre im Mittel immer etwas wärmer sein als die morgendliche Hemisphäre. Das bedeutet aber auch, daß diese Hemisphäre nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz in der Summe mehr Strahlung abgibt als die andere. Es besteht also ein thermisches Ungleichgewicht zwischen den beiden Hälften der von der Sonne beschienenen Seite. Dieses Ungleichgewicht in der Emissionsrate der thermischen Strahlung hat Einfluß auf die Impulsbilanz des gesamten Systems aus Eigendrehimpuls (Rotation) und Bahndrehimpuls des Planetoiden. Nun ist ja bekannt, daß auch Photonen einen Impuls besitzen. Ihre Abstrahlung bewirkt deshalb einen (wenn auch sehr kleinen) Rückstoß. Die Auswirkung dieses Rückstoßes auf die Impulsbilanz hängt von der Lage der Rotationsachse und von der Drehrichtung des Planetoiden ab. Ein Planetoid, dessen Spin in etwa senkrecht auf seiner Bahnebene steht, kann ja in bezug auf seine Bahnbewegung entweder prograd oder retrograd rotieren. Eine prograde Rotation erhöht den Eigendrehimpuls und vermindert den Bahndrehimpuls, was zu einem kontinuierlichen Anwachsen der großen Bahnhalbachse führt. Der Planetoid entfernt sich von der Sonne. Bei retrograder Rotation ist der Effekt gerade umgekehrt: die Bahnhalbachse wird kleiner und der Planetoid bewegt sich auf einer Spiralbahn in Richtung Sonne. Der letztere Fall ist bei vielen Planetoiden des Hauptgürtels erfüllt soweit ihre Rotationsachsen ungefähr senkrecht zu ihrer Bahnebene stehen. Abschätzungen ergaben, daß für eine Änderung der Bahnhalbachse um 0.1 AU eine Zeitskala in der Größenordnung von 50 bis 100 Millionen Jahren anzusetzen ist.

Neben diesem „täglichen“ Effekt gibt es auch noch einen jahreszeitlich bedingten Yarkovsky-Effekt. Er wird dann wesentlich, wenn die Rotationsachse des Planetoiden nahezu in dessen Bahnebene liegt.

Dieser Effekt führt immer (unabhängig von der Rotationsrichtung) zu einer kontinuierlichen Verringerung der Bahnhälbachse.

Für die Entstehung und Aufrechterhaltung der Population von Near Earth Asteroids (NEA`s) ergibt sich stark vereinfacht in etwa folgendes Szenario: Bei Kollisionen im Hauptgürtel bilden sich Gruppen von Bruchstücken (Hirayama-Familien). Je nach ihrer Größe und ihrem Eigendrehimpuls ändern diese Bruchstücke unter der Einwirkung von Störkräften (planetar, z.B. durch Jupiter oder durch den Yarkovsky-Effekt) langsam ihre Bahn bis sie u.U. in Resonanzbereiche geraten, wo ihre Bewegung chaotisch wird und sie den Hauptgürtel verlassen können um z.B. zu Marsbahnkreuzern zu werden. Dort wird ein Teil im Laufe der Zeit in Richtung Erdbahn wandern wo sie die Population der AAA-Planetoiden, die durch Kollisionen mit der Erde und dem Mond bzw. durch Abwanderungsvorgänge in Gebiete innerhalb der Erdbahn ausgedünnt wird, wieder auffüllen. Auf diese Weise entsteht ein Fließgleichgewicht, dessen heutiger Zustand Abschätzungen über die Einschlagwahrscheinlichkeiten auf der Erde erlauben. Es ist deshalb wichtig, möglichst viele Mitglieder dieser Population zu entdecken und ihre Bahnen zu verfolgen.

Der YORP-Effekt

Eng mit dem Yarkowsky-Effekt verwandt ist ein weiterer Effekt, der zu einer kontinuierlichen Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit von insbesondere kleineren, nichtsphärischen Planetoiden führt. Die anisotrope Abstrahlung der während eines Planetoidentages von der Sonne absorbierten Energie führt bei unregelmäßigen Körpern zu einem winzig kleinen Drehmoment, wodurch sich im Laufe der Zeit deren Rotationsgeschwindigkeit entweder erhöhen oder erniedrigen kann – je nach dem, wie der Vektor der Rotationsgeschwindigkeit zum Vektor des Bahndrehimpulses der Planetoidenbahn gerichtet ist. Außerdem kann sich aufgrund dieses Drehmomentes auch die Lage der Rotationsachse im Raum verändern. Obwohl die bei diesem Effekt wirkenden Kräfte extrem gering sind, können sie über sehr lange Zeiträume doch zu dramatischen Konsequenzen führen. Dazu gehört z.B. das Auseinanderbrechen eines Planetoiden aufgrund der Zentrifugalkräfte, die sich bei hohen Rotationsgeschwindigkeiten einstellen.

Erste Hinweise darauf, daß der YORP-Effekt Auswirkungen auf das Rotationsverhalten von Planetoiden hat, lieferte eine genaue Untersuchung der Mitglieder der Koronis-Familie, die im Planetoiden-Hauptgürtel beheimatet ist. Sie stellen Bruchstücke einer Kollision zweier größerer Objekte dar, die vor etwa 2 Milliarden Jahren stattgefunden hat. Auffällig ist, daß die Verteilung der Richtung der Rotationsachsen nicht etwa zufällig ist, wie man es erwarten würde (Genauer gesagt, sollten die Spinverteilung von Planetoiden, die durch Kollisionsprozesse beeinflusst bzw. entstanden sind, einer dreidimensionalen Maxwell-Verteilung genügen. Das trifft für Körper mit einem Durchmesser von mehr als 40 km auch durchaus zu, wie entsprechende Surveys zeigen. Kleinere Körper (d.h. < 10 km) halten sich dagegen – statistisch gesehen – nicht daran. Ihre Spinverteilung ist im Gegensatz dazu nahezu flach). Sie zeigen vielmehr Übereinstimmungen, die sich am besten durch das langandauernde Wirken des YORP-Effektes erklären lassen. Diese Erklärung ist auch deshalb sehr wahrscheinlich, weil die Auswirkungen dieses Effektes mittlerweile auch direkt gemessen und mit der Theorie verglichen werden konnten. Ein sehr gut untersuchtes Objekt ist in diesem Zusammenhang der Planetoid (1862) Apollo. Aufgrund seiner irregulären Form besitzt er einen für Planetoiden nicht ganz

untypischen Rotationslichtwechsel, aus dem sich die Rotationsdauer jeweils sehr genau ableiten läßt. Durch eine genaue Analyse dieses Rotationslichtwechsels konnte MIKKO KAASALAINEN et.al. vor kurzem überzeugend nachweisen, daß die Rotationsperiode von (1862) Apollo seit den ersten Messungen im Jahre 1980 um ca. 10^{-8} Stunden pro Jahr abgenommen hat. Dieser Wert stimmt innerhalb der Fehlergrenzen mit den Vorhersagen des YORP-Effektes sehr gut überein. Noch überzeugender fiel die Untersuchung des NEO's 2000 PH5 aus. Es handelt sich dabei um einen länglichen und gerade einmal 100 m großen Himmelskörper, der lediglich 12 Minuten für eine vollständige Rotation benötigt. Eine detaillierte Untersuchung seines Rotationsverhaltens über 4 Jahre hinweg – und zwar sowohl mit optischen als auch mit Radarmethoden – ergab eine Zunahme der Rotationsdauer um ca. eine Millisekunde pro Jahr. Da mittels der Radarbeobachtungen die Form des Planetoiden recht gut bestimmt werden konnte, ließen sich Computersimulationen des YORP-Effektes entwickeln, welche den beobachteten Effekt bestätigen konnten. Wenn sich die Bahnlage von 2000 PH5 nicht dramatisch ändert, dann wird sich seine Rotationsperiode innerhalb der nächsten 35 Millionen Jahre auf weniger als 20 Sekunden verringern.

Seitdem bei immer mehr Planetoiden kleine Begleiter (Planetoidenmonde) entdeckt werden, vermutet man, daß zumindest teilweise ihre Entstehung etwas mit dem YORP-Effekt zu tun hat. Es ist nämlich durchaus denkbar, daß mit immer kürzer werdender Rotationsdauer die damit einhergehenden Zentrifugalkräfte so groß werden, daß Teilstücke des Planetoiden abbrechen und ihn dann als Mond begleiten.

Der YORP-Effekt wurde im Jahr 2000 zum ersten Mal beschrieben (DAVID P. RUBIN CAM) und ist nach den Wissenschaftlern benannt (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack), welche die theoretischen Vorarbeiten zu dessen Entdeckung geleistet haben.

Near Earth Objects – NEO's

Seitdem ziemlich sicher ist, daß die besonders unter Kindern lange Zeit sehr beliebten Dinosaurier – die vermutlichen Vorfahren unseres Haussperlings – durch die Folgen des katastrophalen Einschlags eines kleinen Planetoiden quasi schlagartig ausgerottet wurden, geht die nicht ganz unbegründete Angst um, daß uns das auch einmal passieren könnte. Jedenfalls ist nach Meinung der Forscher, die sich mit derartigen Phänomenen beruflich auseinandersetzen, solch ein Ereignis eigentlich längst überfällig. Damit so etwas überhaupt passieren kann, muß als hinreichende Bedingung ein potentiell gefährlicher Planetoid (oder Komet) irgendwann der Erde einmal recht nahe kommen, d.h. er muß gemäß der Katalogisierung der Astronomen zu den sogenannten „*Near Earth Objects*“, kurz NEOs genannt, gehören. Kommt er dagegen irgendwann einmal der Erde gefährlich nahe, dann ist er ein „*Potentially Hazardous Object*“ oder PHO. Fällt er schließlich auf die Erde, dann ist u.U. alles zu spät – siehe Saurier. Außerdem kann man in diesem unerfreulichen Fall völlig sicher sein, daß es sich bei dem Objekt um einen sogenannten „*Erdbahnkreuzer*“ („*Earth Crossing Object*“, ECO) gehandelt hat. Besteht jedoch nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit, daß er die Erde in der Zukunft vielleicht irgendwann einmal treffen könnte, dann handelt es sich um einen sogenannten „*Virtual Impactor*“.

Diese Vorbemerkungen und Begriffsbestimmungen sollen zeigen, daß es durchaus existentielle Gründe gibt, die Erforschung der NEO's voranzutreiben. Deshalb wurde eine ganze Anzahl von

Suchprogrammen initiiert, die mittlerweile schon beachtliche Erfolge verbuchen können. Die Anzahl der entdeckten Objekte – z.T. deutlich kleiner als 1 km – scheint immer noch weiter zuzunehmen. Im April 2003 waren bereits mehr als 2300 NEO's katalogisiert. Davon hat man bereits mehr als 500 als PHO's eingestuft!

NEO Bestandsaufnahme 3. Juli 2005

| ATEN | APOLLO | AMOR | Gesamt |
|------|--------|------|--------|
| 283 | 1648 | 1465 | 3396 |

Die Suche nach NEO's ist übrigens eine der wenigen astronomischen Surveys, die außerhalb der astronomischen Kreise mit Beachtung zur Kenntnis genommen werden. Schlagzeilen wie „Weltuntergang am 16. März 2880“ machen immer Eindruck und veranlassen auch Laien darüber nachzudenken, wie man so etwas verhindern könnte. Der – offen gesagt - vollkommen unrealistischen Film „Armageddon“ mit BRUCE WILLIS in der Hauptrolle versuchte zumindest dem breiten Publikum das Problem visuell nahezubringen...

Noch einmal zur Begriffsbestimmung: NEO's sind planetare, kometarische oder meteoroidische Körper die sich der Erdbahn bis auf 0.3 AU oder weniger annähern können. PHO's müssen sich der Erdbahn sogar bis auf 0.025 AU nähern, um als „potentiell gefährlich“ eingestuft zu werden. Für die Größe gibt es keine untere Grenze. In dem Sinne sind alle Meteoroiden, die als Sternschnuppen ihr Dasein beenden, genaugenommen auch NEO's ohne aber jemals in den Genuß einer Nummer oder eines eigenen Namens zu kommen es sei denn, sie sind wiederum so groß, daß ein kleiner Rest – z.B. in der Nähe von Ludwigs Märchenschloß „Neuschwanstein“ – als Meteorit auf die Erde fällt. Man schätzt, daß jährlich etwa 50000 derartige Bruchstücke die Erdoberfläche erreichen.

Die Population der erdnahen Planetoiden wird nach Meinung vieler Planetologen aus dem Hauptgürtel zwischen Mars und Jupiter sowie von entgasteten Kometenkernen von Kometen der Jupiter-Familie gespeist. Die Frage ist: wie gelangen sie in diesen Bereich? Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten, die man nach ihrer Ursache in „physikalische“ und „dynamische“ einteilen kann. Zur letzteren Gruppe gehören die Störungen durch die großen Planeten – insbesondere Jupiter die sich z.B. in Resonanzphänomenen oder chaotischen Bahnen äußern können. Insbesondere Planetoiden ($R < 10$ km) im Bereich der Kirkwood-Lücke, die der Resonanz 1:3 entspricht, neigen zu chaotischen Verhalten, d.h. ihre Bahnen sind instabil und können auf dramatische und unvorhersagbare Weise ihre Parameter (insbesondere die Exzentrizität) derartig ändern, daß sie in das innere Sonnensystem gelangen können wo sie zuerst die Marsbahn und später – durch weitere Störeinflüsse bedingt – die Erdbahn kreuzen. Man vermutet, daß der Teil der AAA-Planetoiden, die nicht kometarischen Ursprungs sind, aus diesem Reservoir gespeist werden. Eine ganze Anzahl von Meteoriten die man auf der Erde gefunden hat – insbesondere die vom seltenen V-Typ, deren Ursprung mit großer Wahrscheinlichkeit (4) Vesta ist - scheinen aus dieser Region zu stammen.

Zu den physikalischen Ursachen von Bahnänderungen gehören die bereits mehrfach erwähnten Kollisionen, die über längere Zeiträume zu einer Zerkleinerung des planetoiden Materials führen. Diese Kleinkörper sind - was ihre Bahn betrifft - weiteren dynamischen Entwicklungsprozessen ausgesetzt.

Auf Staubteilchen in Sonnennähe wirken der Strahlungsdruck, der die Partikel nach außen treibt sowie der Poynting-Robertson-Effekt, der die Teilchen in Richtung Sonne spiralen läßt. Bei rotierenden Körpern im Meter bis Kilometer-Bereich bewirkt ein weiterer Prozeß sehr effektiv die Änderung der Bahnparameter. Auf diesen Prozeß hat als erster ein Hobbyforscher, ein polnischer Ingenieur mit dem Namen IVAN OSIPOVICH YARKOVSKY (1844-1902), hingewiesen. Er wird seitdem als Yarkovsky-Effekt bezeichnet.

Einschläge von NEO`s auf der Erde

Der Einschlag von kosmischen Körpern auf die Erdoberfläche ist astronomisch gesehen ein gewöhnliches Phänomen welches - in geologischen Zeitskalen gemessen - relativ häufig und - in menschlichen Zeitmaßen gemessen - (glücklicherweise) nur sehr selten auftritt. Das letzte größere Ereignis fand am 30.Juni 1908 in einem abgelegenen und schwer zugänglichen Gebiet Sibiriens, im Gebiet des Flusses „Steinige Tunguska“ statt. Obwohl die Energie, die bei diesem Impakt freigesetzt wurde, das rund 1000-fache der Hiroshimabombe (eigentlich kein schöner Vergleichsmaßstab) betrug (ca. 10 bis 15 Mt TNT), hat man Anfangs von diesem Ereignis kaum Notiz genommen (es soll dabei lediglich zwei menschliche Opfer gegeben haben). Erst Jahrzehnte später sind Expeditionen in das Katastrophengebiet unternommen worden, die aber meist mehr Fragen aufwarfen als sie beantworten konnten (man hat z.B. keinen Meteoritenkrater gefunden). Heute nimmt man an, daß ein großer Steinmeteorit in den dichteren Atmosphärenschichten vollständig zerplatzt und explosionsartig in eine riesige Anzahl kleiner und kleinster Steinfragmente zerfallen ist (V.V.SVETSOV, 1996) - einem Vorgang, den man als „vollständige Ablation“ bezeichnet.

Das Impakte aber auch durchaus globale, also erdumfassende Katastrophen (insbesondere für das Leben auf der Erde), hervorrufen können, zeigen eine Anzahl von Faunenschnitten in der Erdgeschichte die zweifelsfrei mit einem derartigen kosmischen Ereignis zusammenhängen. Erinnerung sei wieder an das tragische Ende der armen Dinosaurier vor ca. 65 Millionen Jahren...

Um trotz der diffusen Gefahr einer „kosmischen Bombe“ ruhig schlafen zu können ist es nützlich, Abschätzungen über die Einschlagwahrscheinlichkeiten verschieden großer und verschieden aufgebauter kosmischer Körper anzustellen. Um dabei zu realistischen Vorhersagen zu kommen, benötigt man eine möglichst zuverlässige Datenbasis. Diese kann man erhalten aus

- einer möglichst lückenlosen Überwachung des erdnahen Raums in bezug auf Kleinkörper (Planetoide, Meteoroiden, Kometen) mit dem Ziel realistische Angaben über Häufigkeiten, Bahnlagen und Größenverteilungen zu erhalten.
- Untersuchung von irdischen Impakten und Impaktstrukturen in bezug auf Größe des Impaktors und Alter der Strukturen.
- Ableitung der Impakthäufigkeiten für verschieden große Körper als Funktion der Zeit über die Kraterstatistik von Mond, Erde und Planetoiden (z.B. (433) Eros)
- Ableitung von Tsunami-Häufigkeiten in der Vergangenheit mittels geologischer Indikatoren an ausgewählten Küstenbereichen und Versuch der Abgrenzung von impaktinduzierter Tsunamis von denen, die durch seismische oder vulkanische Ereignisse hervorgerufen werden.

- Theoretischen Untersuchungen über die Dynamik der Population erdnaheer Planetoiden und Kometen.

Ob ein Zusammenstoß mit einem NEO zur Katastrophe wird, hängt neben der Eintrittsgeschwindigkeit in erster Linie von der Größe (und damit Masse) und in zweiter Linie von seiner Beschaffenheit (z.B. ob Eis – oder Eisenklumpen) ab. Da die Anzahl potentiell gefährlicher Körper mit der Größe abnimmt, sind wirklich katastrophale Ereignisse entsprechend seltener. Eine grobe Abschätzung ergibt als Richtwert etwa folgende Zeitskalen:

| Durchmesser | Ein Einschlag aller | Beispiel |
|-------------|---------------------|-----------------|
| 100 m | 250 a | Tunguska |
| 1.5 km | 500 000 a | Nördlinger Ries |
| 10 km | 100 000 000 a | Saurierkiller |

Die mittleren Impaktintervalle lassen allerdings keine Rückschlüsse auf den nächsten Einschlag zu. Es ist aber davon auszugehen, daß die weltweit laufenden NEO-Überwachungsprogramme in nächster Zeit wohl die meisten der Erde gefährlich werdenden Objekte > 1 km erfassen werden. Wenn Sie bekannt sind, kann man durch „*follow-up observations*“ ihre Bahndaten laufend überwachen. Damit ist man in der Lage, Zusammenstöße mit der Erde mit einer entsprechenden Vorlaufzeit vorherzusagen. Das bedeutet aber noch lange nicht, daß man etwas Ernsthaftes zur Abwehr einer Katastrophe a la „Armageddon“ tun kann. Die Möglichkeiten, einen kilometergroßen Gesteinsbrocken, der sich auf die Erde zu bewegt, auf irgendeine Art und Weise von seiner Bahn abzubringen, ist eher als außergewöhnlich schwierig einzustufen und überhaupt nur bei einer entsprechend großen Vorwarnzeit (mehrere Jahre bis Jahrzehnte) realistisch in Angriff zu nehmen.

Nach den heute möglichen Technologien sind nur folgende Abwehrszenarien denkbar:

1. Objekt zerstören – sehr riskant, da u.U. viele gefährliche Bruchstücke entstehen
 - realistisch nur für kleine NEO's (<100 m), damit die Bruchstücke in der Erdatmosphäre weitgehend verglühen können
 - Nukleare Sprengkörper notwendig
2. Bahnänderung – bei genügender Vorwarnzeit optimalste Möglichkeit
 - Abwehrsystem muß beim Zielobjekt einmalig oder kontinuierlich eine nach Betrag und Richtung abgestimmte Impulsänderung bewirken
 - Nuklearsprengkopf wird in unmittelbarer Nähe des NEO's gezündet ohne ihn zu zerstören (abdampfendes Material bewirkt Rückstoß)
 - Dem NEO wird ein chemischer „Raketenantrieb“ verpaßt – unrealistisch wegen Treibstoffproblem

- Ein oder mehrere „Impaktoren“ werden auf den NEO gelenkt und deren Impuls auf das Zielobjekt übertragen - bei entsprechend langer Anlaufzeit und mehreren Versuchen durchaus effektiv. Problem: Impulsübertragung bei lockeren Kometenkernen und „fliegenden Geröllhaufen“ zu uneffektiv und Gefahr des Auseinanderbrechens des NEO`s
- Ausnutzung des Strahlungsdrucks der Sonnen über Sonnensegel – bei langen Vorwarnzeiten (einige Jahre bis Jahrzehnte) sehr effektiv. Die technologischen Probleme scheinen mit der heute zur Verfügung stehenden Technologie beherrschbar zu sein.

Auch wenn die Wahrscheinlichkeit gering ist, daß in absehbarer Zeit die Erde eine größere Impaktkatastrophe heimsucht, ist es trotzdem wichtig, rechtzeitig ausreichende Vorsorgemaßnahmen zu treffen. Eine hochentwickelte Zivilisation ist aufgrund ihrer inneren Abhängigkeiten und Beziehungsgefüge bei solch einer Katastrophe als Gesamtheit viel mehr gefährdet als unsere Vorfahren zur Zeit der Sintflut (die, wie einzelne Wissenschaftler annehmen, auch einem Impaktereignis geschuldet sein soll).

Katastrophennumerologie – die Torino-Skala

Bei einem astronomischen Kongreß im Jahre 1999 haben sich die daran teilnehmenden Wissenschaftler in Anlehnung an die berühmte Mercalli-Skala der Seismologie auf eine Gefahrenskala von NEO-Impakten geeinigt, die seitdem als Torino-Skala (nach der Stadt Turin in Italien, wo der Kongreß stattfand) bekannt geworden ist. Sie teilt Impakte in Gefahrenstufen von 0 bis 10 ein, wobei, etwas flapsig ausgedrückt, die Stufe „0“ Sternschnuppen und Feuerkugeln beschreibt, die in der Atmosphäre vollständig verglühen und die Stufe „10“ globale Katastrophen, nach deren Eintreten sich niemand mehr für diese Skala zu interessieren braucht (Hinweis: es ist keine lineare Skala, siehe Abbildung). Diese Vereinfachung trifft aber nicht ganz den Kern. Man verwendet diese Skala genaugenommen als eine Art von Klassifizierung von NEO`s nach dem Grundsatz „was wäre, wenn“, in dem in die Gefahrenstufen sowohl Trefferwahrscheinlichkeiten als auch der von der Größe der jeweiligen Himmelskörper abhängende Energieumsatz bei einem möglichen Impakt eingeht. Die Klassifizierung erfolgt demnach auf Grund eines funktionalen Zusammenhangs zwischen der Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes mit der Erde und der dabei wahrscheinlich freigesetzten kinetischen Energie. Auf diese Weise kann man jedem NEO eine ganze Zahl zwischen 0 und 10 zuordnen wobei Objekte, die sich der Erde mehrmals nähern für jede Annäherung eine separate Torino-Nummer erhalten.

Die ursprüngliche Form dieser Skala – damals noch „*Near Earth Object Hazard Index*“ genannt, wurde von RICHARD P. BINZEL (MIT) bereits 1995 vorgeschlagen. Sie hat sich in der modifizierten Torino-Skala mittlerweile weltweit für Gefahren- und Risikoanalysen durchgesetzt und dient auch als politisches Druckmittel zur Erlangung von Geldern für Planetoiden-Überwachungsprogramme und zur Untersuchung von effektiven Abwehrtechnologien zur Impaktvermeidung. Die folgende Tabelle listet alle 11 Gefahrenstufen auf:

TORINO-Skala

Stufe 0 – Ereignisse ohne Konsequenzen

Die Wahrscheinlichkeit einer Kollision ist null, oder deutlich kleiner als jene, daß ein zielloses Objekt der gleichen Größe zufällig die Erde innerhalb der nächsten wenigen Jahrzehnte treffen wird. Die Bezeichnung gilt auch für irgendein kleines Objekt welches, im Falle einer Kollision, zerbricht, bevor es die Erdoberfläche erreicht.

Stufe 1 – Ereignisse, die sorgfältig überwacht werden sollten

Die Möglichkeit einer Kollision ist äußerst unwahrscheinlich, etwa genau so groß, wie die Wahrscheinlichkeit, daß ein zielloses Objekt der gleichen Größe zufällig die Erde innerhalb der nächsten wenigen Jahrzehnte treffen wird.

Stufe 2 bis 4 – Ereignisse, die Sorgen bereiten

(2) Eine etwas nahe, aber nicht ungewöhnliche Begegnung. Eine Kollision ist sehr unwahrscheinlich.

(3) Eine nahe Begegnung mit einer Wahrscheinlichkeit von 1% oder größer für eine Kollision, welche eine lokale Zerstörung verursachen kann.

(4) Eine nahe Begegnung mit einer Wahrscheinlichkeit von 1% oder größer für eine Kollision, welche regionale Verwüstungen verursachen kann.

Stufe 5 bis 7 – Bedrohliche Ereignisse

(5) Eine nahe Begegnung mit einer bedeutsamen Wahrscheinlichkeit einer Kollision, welche regionale Verwüstungen verursachen kann.

(6) Eine nahe Begegnung mit einer bedeutsamen Wahrscheinlichkeit einer Kollision, welche eine globale Katastrophe verursachen kann.

(7) Eine nahe Begegnung mit einer extrem großen Wahrscheinlichkeit einer Kollision, welche eine globale Katastrophe verursachen kann.

Stufe 8 bis 10 – Sichere Zusammenstöße

(8) Eine Kollision welche lokale Zerstörungen verursachen kann. Solche Ereignisse finden irgendwo auf der Erde alle 50 bis 1000 Jahre einmal statt.

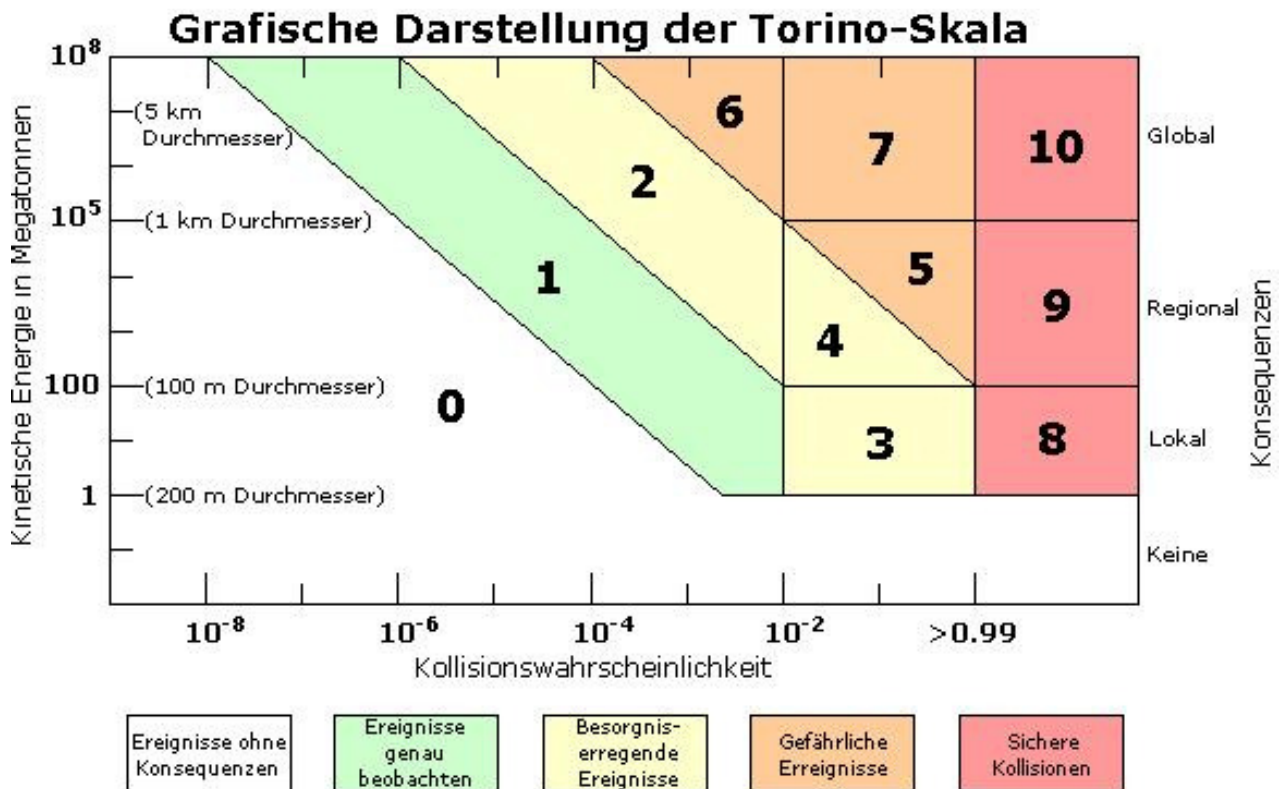
(9) Eine Kollision welche regionale Verwüstungen verursachen kann. Solche Ereignisse finden etwa alle 1000 bis 100'000 Jahre einmal statt.

(10) Eine Kollision die eine globale klimatische Katastrophe verursachen kann. Solche Ereignisse finden etwa alle 100000 Jahre einmal oder seltener statt,

Bis jetzt gibt es kaum Anwärter für NEO's, deren Torino-Wert 0 übersteigt. Der am 29. September 2000 entdeckte Planetoid 2000 SG344 war der erste Anwärter, dem zumindest bis zum Widerruf die Nummer 1 zuerkannt wurde. Nach einer genaueren Bahnbestimmung weiß man lediglich, daß es die Erde am 23. September 2030 in elffacher Mondentfernung passieren wird. Es kann sogar sein – und das wird ernsthaft diskutiert – daß dieser rund 30 m große Himmelskörper nur eine ausgebrannte Saturn-5 Endstufe aus dem Apollo-Programm ist, die man wie soviel anderen Weltraumschrott aus den Augen verloren hat...

Es gibt nur wenige NEO's, die z.Z. mit einer Torino-Zahl belegt sind. Es handelt sich dabei einmal um das ca. 230 m große Objekt 1997 XR2 mit einer kumulativen Impaktwahrscheinlichkeit von $P=9.7 \cdot 10^{-5}$. Es könnte theoretisch am 1. Juni 2101 auf die Erde krachen...

Desweiteren sind noch (144898) 2004 VD17 und 2004 MN4 in der Liste enthalten. Das Letztere Objekt ist mit dem ca. 250 m großen Planetoiden vom Aten-Typ (99942) Apophis identisch, welcher - zumindest laut Springers „Bild“-Zeitung - im Jahre 2029 auf die Erde krachen wird. Richtig ist dagegen, daß er am 13. April 2029 mit hoher Geschwindigkeit (84 Vollmonddurchmesser pro Stunde) als 3.3 mag hellen Stern durch das Sternbild Krebs eilt, wobei er sich der Erde maximal bis auf 30.000 Kilometer annähert.



Die „Palermo Technical Impact Hazard Scale“

Zur Planung von Vorsorgemaßnahmen ist es viel wichtiger die Frage nach dem Risiko – also der Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines katastrophalen Ereignisses – zu beantworten als nach den potentiellen Wirkungen, wenn es einmal eingetreten ist. Man spricht im allgemeinen Fall von der Notwendigkeit einer Risikoabschätzung. Im Fall von NEO's ist das die Frage nach der Wahrscheinlichkeit, daß ein Planetoid oder Komet der Größe soundso und der Bahnlage soundso auf die Erde trifft und dort Zerstörungen einer bestimmten Größenordnung anrichtet. Außerdem muß in diesem Fall in die Risikoabschätzung auch die Frage nach dem „wann“ mit eingehen. Eine nahezu 100% Wahrscheinlichkeit, daß ein größerer Gesteinsbrocken in zehn Jahren auf der Erde einschlägt bedeutet für uns heute Lebenden ein offensichtlich höheres Risiko als ein Ereignis mit ähnlichen Parametern, welches erst in 100000 Jahren eintritt. Der erstere Fall würde eine Erhöhung der Lebensversicherungs-Police rechtfertigen, der Zweite nicht. Offensichtlich ist die Torino-Zahl eines NEO für eine derartige Risikobeschreibung nur bedingt geeignet. Deshalb hat man für diesen Zweck eine andere, was das Impaktrisiko betrifft aussagekräftigere Skalierung entwickelt. Da sie auf einer

Astronomen-Tagung in Palermo auf Sizilien (wo 1801 GIUSEPPE PIAZZI (1746-1826) die Ceres entdeckte) eingeführt wurde, wird sie seitdem als Palermo-Skala bezeichnet. Diese Skala vergleicht die Wahrscheinlichkeit, daß ein bestimmtes Objekt mit der Erde zusammenstößt mit dem Risiko, das von einem „Durchschnitts-NEO“ der gleichen Größe bis zum potentiellen Impaktermin ausgeht. Als Palermo-Zahl wird jeweils der dekadische Logarithmus dieser Wahrscheinlichkeit verwendet. Der Wert „-2“ für einen Kleinplaneten bedeutet demnach, daß bis zum erwarteten Einschlagtermin der Einschlag eines ähnlichen anderen Körpers hundertmal wahrscheinlicher ist. „0“ bedeutet, daß die Impaktwahrscheinlichkeit genauso groß ist wie die eines jeden anderen Himmelskörpers gleicher Größe und Beschaffenheit. Erst eine positive Palermo-Zahl weist auf ein erhöhtes Impaktrisiko hin.

Die konkrete Berechnung der Palermo-Zahl für einen neuentdeckten NEO ist nicht einfach, da die dafür notwendigen Parameter nur schwer abzuschätzen sind.

Ausgangspunkt ist eine Größe, die man als „erwartete“ Impaktenergie \tilde{E} bezeichnen kann. Sie berechnet sich aus dem Produkt von kinetischer Energie E_{kin} und Impaktwahrscheinlichkeit P:

$$E = \tilde{E}_{kin} P \quad [1.5]$$

E ergibt sich aus der Masse m des Impaktors und der aus seinen Bahnparametern folgenden Auftreffgeschwindigkeit v. Die Masse kann man im Normalfall nur grob abschätzen in dem man versucht, aus den photometrischen Daten und dem Spektraltyp auf die ungefähre Größe und Gestalt (Lichtkurve) des Objektes zu schließen um daraus über das Volumen und die mittlere Dichte (abhängig vom Typ des Kleinplaneten) die Masse zu berechnen.

Die Impaktwahrscheinlichkeit P bestimmt man aus himmelsmechanischen Simulations-Rechnungen. Dabei wird unter Berücksichtigung der Fehler der Bahnelemente und der planetaren Störungen versucht die Region zu bestimmen, in welchem sich die Position des Himmelskörpers zu einem bestimmten Zeitpunkt auf jedem Fall befinden muß, wenn er die Erdbahn passiert (ohne jedoch genau sagen zu können, wo genau das innerhalb dieses Volumens ist). Diese Region wird als „*region of uncertainty*“ bezeichnet. Die Querschnittsfläche der Zielebene wird sich immer mehr verkleinern, je besser die Bahnelemente und ihre Änderungen (die meist über einen Zeitraum von 50 Jahren berechnet werden) bekannt sind.

Das normalisierte Risiko R ist dann das Verhältnis zwischen der Impaktwahrscheinlichkeit P und dem Produkt aus der Wahrscheinlichkeit f_a , daß ein Impaktereignis der Energie E innerhalb eines Jahres eintritt, und Δt , der Zeit in Jahren, innerhalb der das erwartete Ereignis eintritt:

$$R = \frac{P}{f_a \Delta t} \quad [1.6]$$

f_a als Funktion der Impaktenergie E kann man z.B. aus Kraterzählungen auf dem Mond abschätzen. Ein brauchbarer Wert ist etwa (nach RON BAALKE):

$$f_a \approx 0.03 \cdot E^{-\frac{4}{5}} \quad [1.7]$$

wenn E in Megatonnen TNT-Äquivalent gemessen wird (1 MT TNT = $4.184 \cdot 10^{15}$ J).

Die Palermo-Zahl ist dann der dekadische Logarithmus von (1.6):

$$L_p = \lg R \quad [1.8]$$

Im Gegensatz zur Torino-Skala hat die Palermo-Skala einen kontinuierlichen Wertebereich. Objekte, denen eine negative Palermo-Zahl zugeordnet ist, sind aus der Sicht der Risikoanalyse unbedenklich. NEO's mit $L_p > 0$ sind dagegen potentiell gefährlich und müssen deshalb regelmäßig überwacht werden. Zu diesen Objekten gehört z.B. der Planetoid (29075) 1950 DA, der nach Radarbeobachtungen eine nahezu sphärische Gestalt mit einem Durchmesser von etwa 1.1 km hat. Ihm wird eine Palermo-Zahl von +0.17 zugeordnet. Wenn er in den nächsten Jahrhunderten seine Bahnparameter nicht ändert (was aus verschiedenen Gründen eher unwahrscheinlich ist), besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, daß er im Jahre 2880 mit der Erde zusammenstößt.

Raumfahrtmissionen zu Planetoiden

Gut ein halbes Dutzend Planetoiden waren bisher das Ziel von Forschungssatelliten. Ihnen verdanken wir eine Menge interessanter Informationen und Bilder über diese Kleinkörper des Sonnensystems. Ein Höhepunkt war ohne Zweifel die mehrmonatige Erkundung von (433) Eros durch NEAR Shoemaker, die in einer gelungenen Landung auf diesem kartoffelförmigen Himmelskörper gipfelte.

| Planetoid | Mission | Vorbeiflug / Ankunft |
|------------------------|------------------------------|-----------------------|
| (951) Gaspra | Galileo | Okt. 1991 |
| (243) Ida / Dactyl | Galileo | Aug. 1993 |
| (253) Mathilde | NEAR Shoemaker | Juni 1997 |
| (433) Eros | NEAR Shoemaker | Dez.1998 / April 2000 |
| (9969) Braille | Deep Space 1 | Juli 1999 |
| (5535) AnneFrank | Stardust | Nov. 2002 |
| (25143) Itokawa | Hayabusa | Sept. 2005 |
| <i>Phobos / Deimos</i> | <i>Diverse Marsmissionen</i> | |

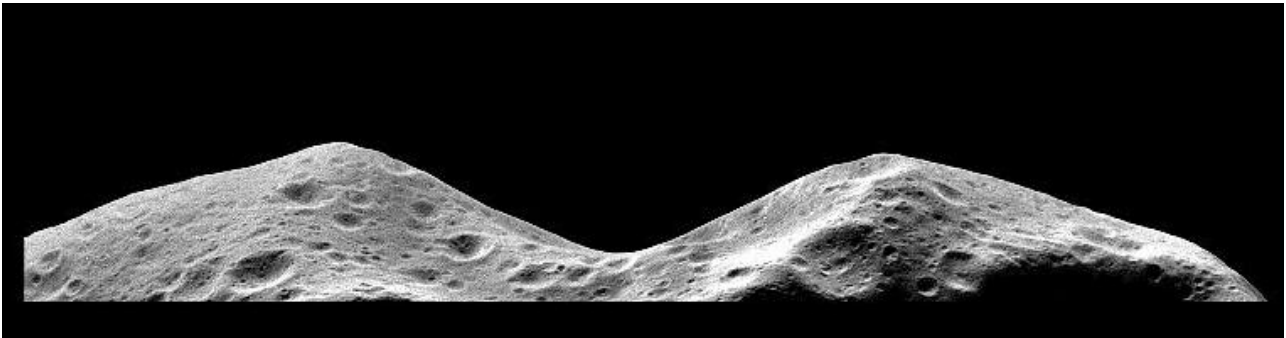
Am 9. Mai 2003 hatten die Japaner die Sonde Muses-C (neuer Name „Hayabusa“) (*Mu space Engineering Spacecraft*) gestartet, welche den Planetoiden 1998 SF36 (Itokawa) anflieg mit dem Ziel, dort zu landen. Am 12. September 2005 war es dann soweit. An diesem Tag erreichte die Sonde den gerade einmal 500 m langen Kleinplaneten, um ihn eine zeitlang zu begleiten und um Landeversuche zu unternehmen, deren Ziel es war, ein paar Gramm Materie von Itokawas Oberfläche einzusammeln.

Gaspra



Der kleine Planet Gaspra, der zur Flora-Familie gehört, wurde 1916 von dem ukrainischen Astronomen GRIGORI NIKOLAJEWITSCH NEUMIN (1886-1946) entdeckt und nach einem Ort auf der Krim am Schwarzen Meer benannt. Die Jupitersonde Galileo kreuzte ihre Bahn 1991 auf ihrem langen Weg zum Jupitersystem wobei eine Anzahl aufsehenerregender Aufnahmen entstanden. Nach seinem Spektrum wurde Gaspra als S-Typ Planetoid klassifiziert. Das Material, aus dem er besteht, scheint sehr viel Olivin zu enthalten. Seine unregelmäßige Gestalt hat etwa folgende Maße: 19x12x11 km. Auffällig sind die vielen Einschlagkrater auf seinem Antlitz. Aus ihrer Untersuchung hat man abgeleitet, daß die Oberfläche ungefähr 300 bis 400 Millionen Jahre alt ist. Es scheint, daß Gaspra das Bruchstück eines ehemals viel größeren Körpers war (er gehört der Flora-Familie an, deren Mitglieder wahrscheinlich alle bei einem Crash vor 470 Millionen Jahre entstanden sind). Interessant ist außerdem, daß die Färbung über der Oberfläche subtil variiert. Ein Grund dafür könnte an einer fleckigen Regolithverteilung liegen. Die bläulich angehauchten Gebiete (meist um Impaktkrater) scheinen aus dem Untergrundmaterial des Planetoiden zu bestehen. Als Rotationsdauer wurde aus Galileos Aufnahmeserie ein Wert von rund 7 Stunden abgeleitet.

Ida und Dactyl



Ida ist genauso wie Gaspra ein Planetoid vom S-Typ. Nur gehört er der Koronis-Familie im inneren Teil des Planetoidengürtels an. Am 28. August 1993 flog Galileo in nur 2400 km Entfernung an diesem unregelmäßigen Gestein- und Metallbrocken vorbei. Bei dieser Gelegenheit konnte man seine Ausmaße zu 56x24x21 km bestimmen.

Die wahre Überraschung war aber, daß man auf einer der von Galileo zur Erde gefunkten Aufnahmen den ersten Planetoidenmond entdecken konnte. Er erhielt den Namen Dactyl. Mit einer Größe von 1.2x1.4x1.6 km erscheint er gegenüber Ida geradezu winzig und wäre beinahe übersehen worden.



Auch Dactyl scheint dem S-Typ anzugehören. Man nimmt aber an, daß er nicht mit Ida zusammen bei einer Planetoidenkollision entstanden ist sondern eher später von ihr eingefangen wurde.

Die Daktylen sind übrigens eine Gruppe von Dämonen, die in ferner Vergangenheit den Berg Ida auf Kreta besiedelt haben sollen und als Erfinder der Eisenbearbeitung gelten.

Mathilde



JOHANN PALISA (1848-1925) entdeckte 1885 diesen Planetoiden um die Frau seines Chefs, den Vizedirektor der Pariser Sternwarte, MORITZ LOEWY, zu ehren ;-). Was ihn im Einzelnen dazu bewog, ist leider unbekannt geblieben. Über 100 Jahre später hat man sich wieder an diesen Himmelskörper erinnert und die Raumsonde NEAR („*Near Earth Asteroid Rendezvous*“) auf ihrem Weg zu (433) Eros einen Blick darauf werfen lassen. Das Rendezvous fand gegen 13 Uhr GMT am 27. Juni 1997 statt und war eher flüchtig. Trotzdem gelang eine ganze Anzahl von Aufnahmen, die einen kraterbedeckten und unregelmäßig geformten Himmelskörper der Größe 59x47 km zeigen.

Im Gegensatz zu Gaspra und Ida ist Mathilde ein ausgesprochen dunkler Planetoid (Albedo ~ 4%) vom C-Typ. Seine mittlere Dichte von lediglich 1400 kg/m³ erinnert eher an Schaumstoff als an einen kompakten Gesteinsbrocken. Er scheint durch und durch porös zu sein und die Theorie der „fliegenden Schutthalden“ zu bestätigen. Seine unregelmäßige Form und der große kraterähnliche Abschlag zeigen, daß der Planetoid in seiner Geschichte mehrfach mit anderen Kleinplaneten zusammengestoßen sein muß. Das ist wahrscheinlich auch der Grund für seine geringe Rotationsdauer von nur 17.4 Tagen.

Eros



Die Entdeckung des ersten erdnahen Planetoiden Eros war eigentlich eine Doppelentdeckung, die ein Entdecker – der Franzose AUGUST H.P.CHARLOIS – dadurch, daß er die Photoplatte mit der Strichspur des Kleinplaneten erst Tage nach ihrer Aufnahme inspiziert hat, quasi verschenkt hat. So kommt die Ehre, Eros entdeckt zu haben, allein dem deutschen Astronomen GUSTAV WITT (1866-1946) zu Gute. Das Ereignis datiert auf dem 13. August 1898 und der Ort war die Urania-Sternwarte in Berlin. Eigentlich war zu jener Zeit die Entdeckung eines Kleinplaneten schon gar nichts Besonderes mehr. Erste Bahnrechnungen zeigten aber, daß es sich bei Eros – wie er von GUSTAV WITT genannt wurde – doch um etwas Außergewöhnliches handelt:

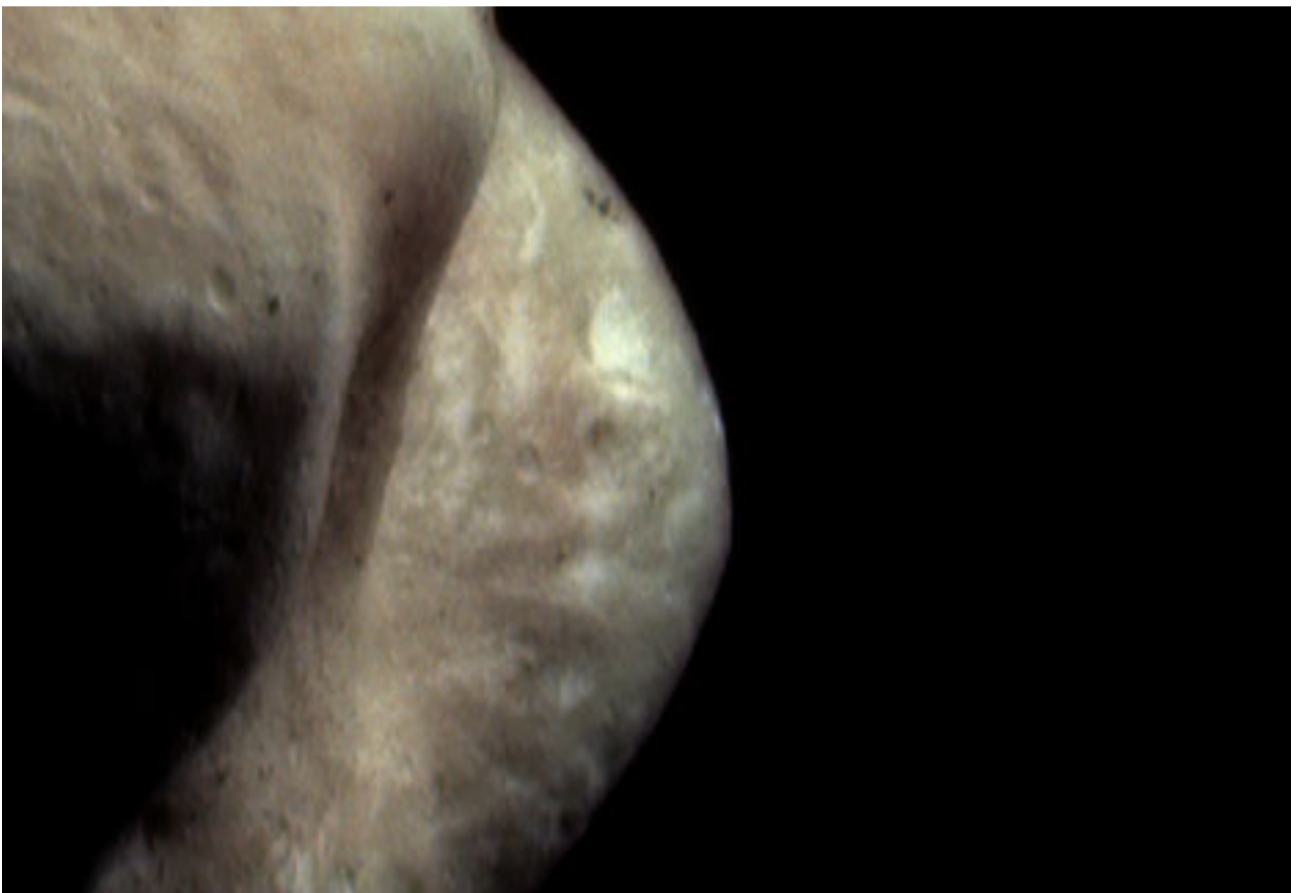
| | |
|---------------------|--------------|
| Bahnelemente | |
| Große Halbachse a | 1.4582516 AU |
| Exzentrizität e | 0.2229287 |
| Bahnneigung i | 10.82998° |
| Perihelabstand | 178.64746° |
| Absolute Helligkeit | 11.16 |

Auffällig ist die außergewöhnlich große Bahnexzentrizität. Aufgrund seiner Bahnlage hat man Eros verwendet um die Entfernung von Erde – Sonne (Astronomische Einheit AU) sehr genau zu bestimmen. Außerdem zeigte Eros einen auffälligen Lichtwechsel, der auf eine unregelmäßige Gestalt hindeutet.

Im Jahre 2000 war Eros das Ziel der Ersten, nur einem Planetoiden gewidmeten Forschungsmission NEAR der NASA. Nach einer ersten mißglückten Annäherung im Dezember 1998 (die Sonde schaltete sich nach einer Fehlfunktion in den „Save-Modus“ und flog dicht an Eros vorbei) erreichte NEAR am

14.2.2000 den Planetoiden und schwenkte in eine Umlaufbahn um ihn ein, die er erst wieder am 28.2.2001 verließ, in dem er weich auf der Oberfläche aufsetzte. Während der 1 Jahr andauernden Primärmission konnten die Meßinstrumente der in NEAR-Shoemaker (nach dem bekannten Geologen und Planetologen EUGENE SHOEMAKER (1928-1997), der 1997 bei einem Autounfall in Australien ums Leben kam) umbenannten Sonde viele und z.T. unerwartete Daten zur Erde übermitteln. Deshalb gilt Eros auch als der z.Z. bestuntersuchte Planetoid im Sonnensystem.

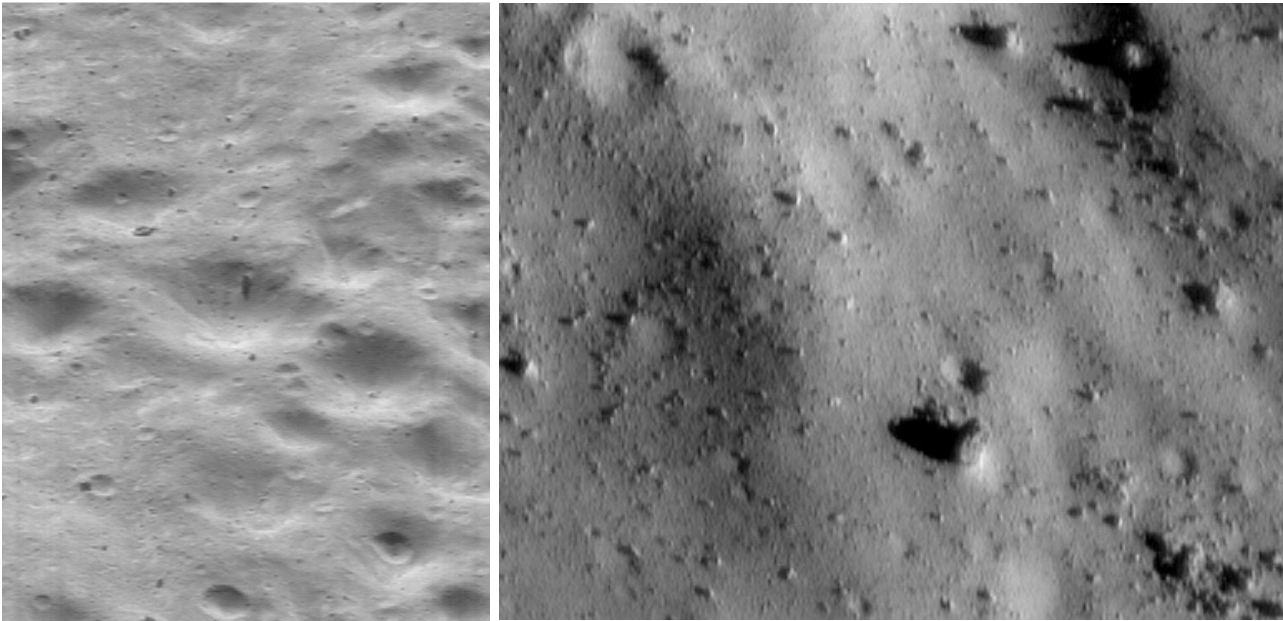
Die wichtigsten wissenschaftlichen Geräte von NEAR waren eine Multispektralkamera (MSI), ein Nah-Infrarot-Spektrometer, ein Röntgen- und Gammastrahlen-Spektrometer (zur Bestimmung der Elementhäufigkeit in Eros seiner Oberflächenschicht), ein Laser-Höhenmesser und ein Magnetometer. Am meisten war man natürlich auf die ersten Bilder gespannt. Sie zeigen wie erwartet (Eros hat einen ausgeprägten Lichtwechsel) einen länglichen Körper mit den Abmessungen 33x13x13 km. Nach seinen spektralen Eigenschaften wurde er bereits als S-Typ-Planetoid eingestuft. Dem entspricht auch ungefähr seine mittlere Dichte von 2400 kg/m^3 . Er scheint also – im Gegensatz zu Mathilde – ein ziemlich kompakter Gesteinskörper zu sein. Auffällig ist neben einer Vielzahl von Kratern eine größere Depression im mittleren Teil des Planetoiden. Man erkennt darin Strukturen, die irgendwie auf Schichtungen hindeuten. Die relativ weichen Formen der Einschlagskrater deuten eh darauf hin, daß der gesamte Planetoid von einer ausgedehnten Regolithschicht bedeckt ist, dessen Mächtigkeit schwer abzuschätzen ist.



Diese Aufnahme der großen Depression (Sattel) zeigt subtile Farbänderungen auf der Oberfläche. (Falschfarbaufnahme aus ca. 200 km Höhe)

Planetoiden und Kuiper-Belt-Objekte

Insbesondere findet man auf seiner Oberfläche kaum „frische“ Krater. Die Impaktstrukturen sind zwar sehr zahlreich (ähnlich wie bei Ida), aber erscheinen sehr sanft als ob sie von einer dicken Staubschicht überdeckt sind. Besonders auffällig – sichtbar auf hochauflösenden Detailaufnahmen – sind Gesteinsblöcke unterschiedlichster Größe, die in großer Anzahl überall auf der Oberfläche herumliegen.

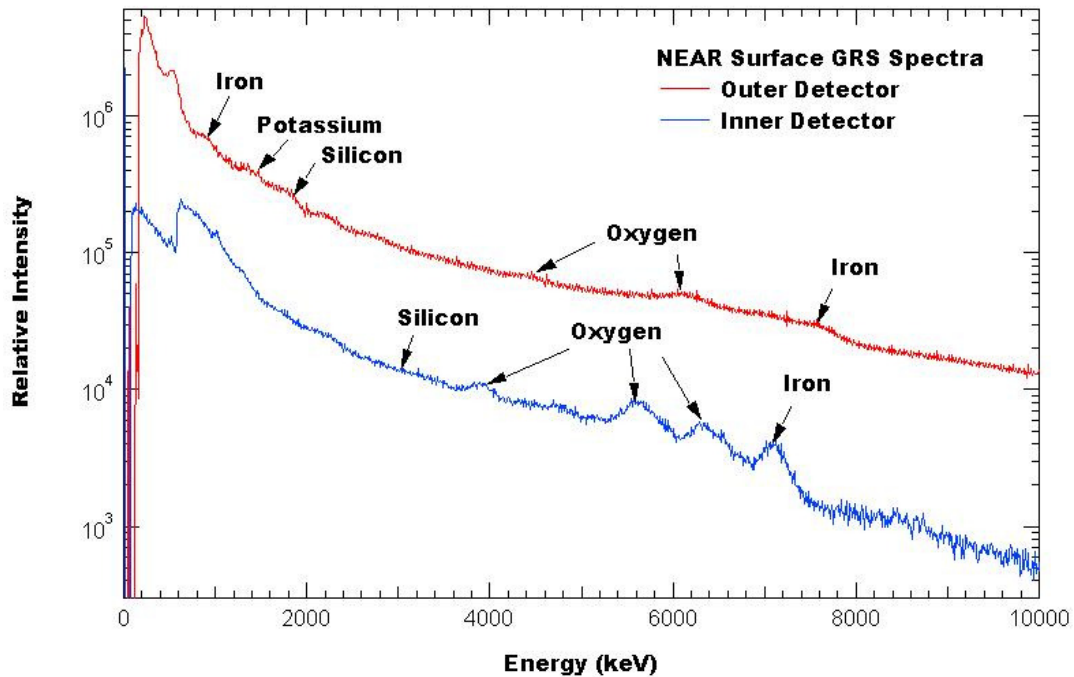


Eine Erklärung dafür könnte sein, daß Eros im Hauptgürtel als Bruchstück eines größeren Körpers, der vor 4.6 Milliarden Jahren zerstört wurde, entstanden ist und auch die meisten Kraternarben aus jener Zeit stammen. Nachdem er nach einer Bahnstörung den Hauptgürtel verlassen hat, sind weitere größere Impakte weitgehend ausgeblieben oder seltener geworden. Vielmehr hat er seitdem Staub und Gesteinsbrocken, die aufgrund des Yarkovsky-Effekts in Richtung Sonne gewandert oder bei Impakten entstanden sind, eingefangen und auf seiner Oberfläche abgelagert.

Um Informationen über die chemische Beschaffenheit der Gesteine auf Eros zu erhalten, wurden zwei spezielle Spektrometer eingesetzt: ein *X-Ray Fluorescence Spectrometer* und ein *Gamma Ray Spectrometer*. Außerdem waren noch weitere Geräte an Bord, die das Spektrum der von der Sonne einfallenden Röntgenstrahlung ermittelten. Die von der Planetoidenoberfläche reemittierte Röntgenstrahlung ist, was ihre Energie betrifft, für viele Elemente charakteristisch. In dem man die Intensität der Röntgenstrahlung in Abhängigkeit ihrer Energie mißt, kann man Aussagen über Elemente und Elementhäufigkeiten machen. Außerdem hoffte man, daß man einen auf die Erde gefallenen Meteoriten Eros als Ursprungskörper zuordnen kann, was für vergleichende Untersuchungen (z.B. radioaktive Altersbestimmungen) natürlich sehr nützlich wäre.

Während eines starken solaren Flares, der mit einem Anwachsen der Röntgenstrahlungsemission der Sonne einherging, konnte die Röntgenfluoreszenzstrahlung der Oberflächengesteine von Eros mit beiden X-Ray-Spektrometern der NEAR-Sonde erfaßt und die Spektren aufgezeichnet werden. Das Ergebnis ihrer Analyse ist, daß Eros offensichtlich ein sehr alter und – mineralogisch gesehen – sehr primitiver Körper ist. Die gemessenen Elementhäufigkeiten korrespondieren in etwa mit dem von Meteoriten vom chondrischen Typ. Daß das Material, aus dem Eros größtenteils besteht, irgendwann in

der Vergangenheit einmal aufgeschmolzen war, kann deshalb fast definitiv ausgeschlossen werden. Grob gesagt kann man das Gestein, aus dem er besteht, als primitive Mischung von Silikaten und Metall (insbesondere Eisen) bezeichnen, welches nach modernen kosmogonischen Vorstellungen das Ausgangsmaterial der erdartigen Planeten war bevor sie durch Aufschmelzen und Differentiation ihre heutige sphärische Form annahmen.



Trotz des relativ hohen Eisengehaltes des chondrischen Materials konnte das Magnetometer von NEAR-Shoemaker keine Anzeichen eines Magnetfeldes entdecken.



Eines der letzten Bilder von der Oberfläche, die NEAR-Shoemaker am 12. Februar 2002 kurz vor seiner Landung zur Erde übertragen hat

Planetoiden und Kuiper-Belt-Objekte

Als nach einem Jahr der Treibstoff der kleinen Sonde langsam zu Ende ging, entschloß man sich im Missionszentrum zu einem spektakulären Finale: Der ersten Landung eines von Menschen gebauten technischen Geräts auf einem Kleinplaneten. Das zuvor kaum für möglich gehaltene Kunststück gelang am 12. Februar 2001. Bei seinem langsamen Abstieg sendete NEAR-Shoemaker während der letzten 5000 m noch knapp 70 Bilder zur Erde die u.a. zerbrochene Felsblöcke, einen staubgefüllten Krater und einem mysteriösen Einbruch in der Oberfläche zeigen. Der vorausberechnete Landeplatz wurde nur um 200 m verfehlt. Die Auftreffgeschwindigkeit lag bei ca. 1.4 m/s. Offensichtlich verursachte der relativ sanfte Aufprall keine Schäden an der Sonde denn sie konnten noch ein paar Tage lang Messungen ausführen und die Daten zur Erde senden. Ihr Schicksal ist es nun, langsam – sehr langsam – zu verstauben. Ob sie ein Mensch je noch einmal zu Gesicht bekommen wird?

Warum GUSTAV WITT (1866-1946) Eros Eros genannt hat, ist nicht überliefert. Auf jeden Fall hat er einen sehr populären Gott als Namenspatron gewählt, dessen Name auch heute noch in aller Munde ist. Die Eros-Mission der NASA hat – wie ausführlich erläutert - ergeben, das der Planetoid aus sehr primitivem Material aus der Frühzeit des Sonnensystems besteht. Das ist auch nicht weiter verwunderlich wenn man bedenkt, daß nach HESIOD Eros zusammen mit Gaia, Nyx und Tartaros dem Chaos entsprungen ist... Übrigens, NEAR schwenkte am 14. Februar (2000) in seine Bahn um Eros ein. Wenn das kein Zufall ist?

Itokawa



Dieser sehr kleine Planetoid ($535 \times 294 \times 209$ m) aus der Apollo-Familie ist der Inbegriff einer durch den Weltraum fliegenden Schutthalde, wie die Ergebnisse der japanischen Sonde Hayabusa eindrucksvoll zeigen. Daß es sich bei Itokawa um eine lockere Anhäufung von meteoritischen Materials handeln muß erkennt man sofort, wenn man seine mittlere Dichte von 1950 kg/m^3 mit der Dichte von LL-Chondriten (3200 kg/m^3) vergleicht, deren Spektren mit denen des Planetoiden sehr genau übereinstimmen. Das entspricht einer Porosität von ca. 40% und ist ein unerwartet hoher Wert. Diese Porosität bewirkt, daß es bei kleineren Impakten so gut wie zu keiner Kraterbildung kommt. Die auftreffenden Meteoriten bewirken nur eine lokale Umverteilung des den Einschlagkanals umgebenden Gerölls ähnlich wie bei einem Schuß in einen Sandhaufen. Deshalb sind auf Itokawa auch so gut wie keine Impaktkrater nachweisbar.

Nach einer eingehenden Untersuchung der Oberfläche des Planetoiden, die im September 2005 begann, erfolgten am 20. Und am 26. November 2005 Landeversuche in einem relativ flachen Bereich, den man Muses Sea nennt. Nachdem der erste Versuch gescheitert war, ist auch der Erfolg des zweiten Versuchs ungewiß. Auch ob die Sonde mit dem Behälter für die Gesteinsproben zur Erde zurückkehren wird, ist nach diversen technischen Problemen unklar: Nachdem das Startfenster für den Rückflug im Dezember 2005 nicht genutzt werden konnte, soll Hayabusa den Asteroiden 2007 verlassen und sich auf den Weg zur Erde begeben, um diese dann 2010 zu erreichen. Wenn dieser Rückflug gelingt und auch der Sammelbehälter mit dem Planetoidenmaterial (soweit er überhaupt welches enthält) heil auf der Erde ankommt, dann werden mit etwas Glück die Wissenschaftler zum ersten Mal native Materie eines Planetoiden untersuchen können.

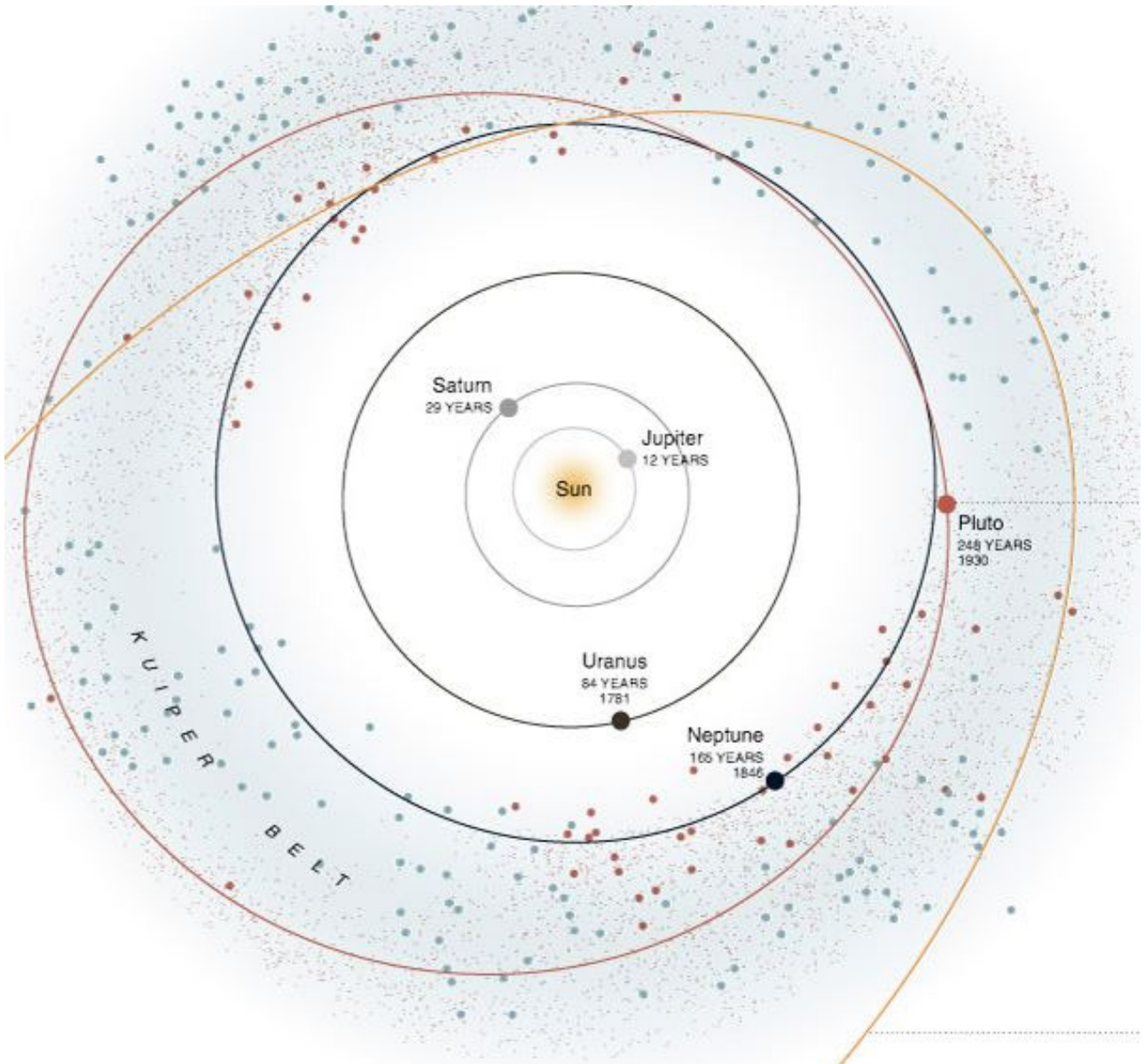
Kuiper-Belt-Objects (KBO's)

In der Physik ist es immer wieder aufregend, wenn aus irgendwelchen Theorien Dinge vorhergesagt werden, die zuvor völlig unbekannt waren und die sich dann auf einmal bei Experimenten als wirklich existent erweisen. Es gibt viele Beispiele dafür. Man braucht nur an die elektromagnetischen Wellen, die Quarks oder an das Bose-Einstein-Kondensat zu denken. Auch in der Astronomie wurden in der Vergangenheit Himmelskörper postuliert, die es – wie wir heute wissen – wirklich gibt. Auch hier ein paar Beispiele: der Planet Neptun, Weiße Zwergsterne, Neutronensterne, Schwarze Löcher...

Ähnliches ist auch von den „Transneptuns“ zu berichten. Schon in den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts fiel eine spezielle Gruppe von Kometen auf, welche die sogenannte Jupiter-Familie bildeten. Sie waren irgendwie anders als die Kometen, die ab und an auf scheinbar parabelartigen Bahnen aus den äußeren Gebieten des Sonnensystems in die Nähe der Sonne gelangten. Die Bahnen der Kometen der Jupiterfamilie lagen fast alle in der ekliptikalen Ebene und verliefen in der Nähe der Jupiterbahn. Solche periodische Kometen sind in der Geschichte des Sonnensystems nur temporäre Erscheinungen da sie in Sonnennähe sehr schnell Gas verlieren und in kosmisch gesehen sehr kurzer Zeit vollständig entgasen. Sie sind dann wegen ihrer geringen Größe nicht mehr beobachtbar, d.h. sie müssen von irgendwo her ständig nachgeliefert werden. JAN OORT (1900-1992) hatte 1950 die Hypothese aufgestellt, daß die nicht-periodischen Kometen aus einem riesigen Reservoir weit außerhalb der Pluto-Bahn stammen, das sphärisch das gesamte Sonnensystem umgibt. Ungefähr zur gleichen Zeit haben GERARD KUIPER (1905 - 1973) und der irische Gelehrte KENNETH ESSEX EDGEWORTH (1880-1972) unabhängig voneinander den Gedanken geäußert, daß die Kometen der Jupiter-Gruppe (inklusive der damals noch unbekanntenen Centauren) vielleicht aus einem Gebiet außerhalb der Neptun- Bahn, aber noch innerhalb der Oortschen Wolke, stammen, wo aus der Zeit, als sich das Planetensystem gebildet hat, noch viele verklumpte Reste des ursprünglichen Baumaterials vorhanden sind. Jahrzehnte später wurden Computersimulationen durchgeführt, welche die Entstehung der äußeren Planeten aus einer Gas- und Staubwolke modellierten. Auch hier blieb Material übrig, das wie ein Torus das äußere Sonnensystem ab der Neptun- und Plutobahn bis in 500 AU Entfernung umgibt. Außerdem konnten verschiedene Wissenschaftler zeigen – auch unter Berücksichtigung der gravitativen Wirkung der Großplaneten außerhalb der Jupiterbahn – daß die Wahrscheinlichkeit, daß die Kometen der Jupiterfamilie aus der Oortschen Wolke stammen, eher als gering einzuschätzen ist. Wenn man als Kometenreservoir dagegen einen torusartigen Gürtel außerhalb der Neptun- und Plutobahn annimmt, dann ließen sich die meisten Widersprüche aufklären. Dieser hypothetische Gürtel wurde nach dem 1973 verstorbenen GERARD KUIPER „Kuiper-Gürtel“ oder engl. „*Kuiper-Belt*“, manchmal auch „*Edgeworth-Kuiper-Belt*“ genannt. Soweit die Hypothese.

Im IAU-Circular Nr. 5611 vom 14. September 1992 ist die Entdeckung eines Objektes mit der vorläufigen Bezeichnung 1992 QB bekanntgegeben worden. D. JEWITT und seine Mitarbeiter fanden auf CCD-Aufnahmen, die mit dem 2.2 m Teleskop der Universität Hawaii auf Mauna Kea aufgenommen wurden, dieses sehr langsam bewegende Objekt mit einer Rot-Helligkeit von lediglich $22^m.8$. Aus weiteren Positionsbestimmungen ließ sich eine erste Bahn rechnen die zeigte, daß sich dieser schwache Himmelskörper (Planetoid Nr. 15760) weit außerhalb der Neptun-Bahn um die Sonne bewegt. Es gab sie also doch – die Kuiper-Belt-Objekte.

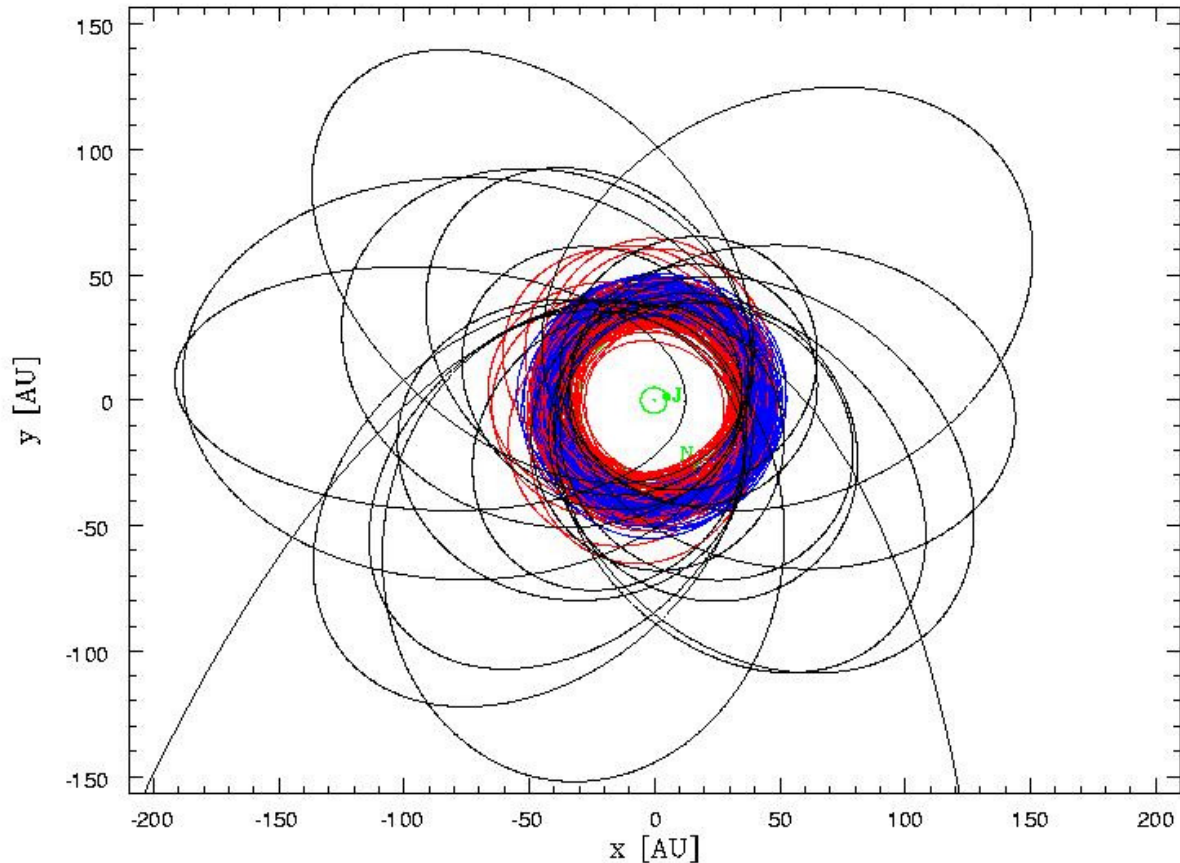
Seitdem ist gerade einmal ein Jahrzehnt vergangen. Während dieser Zeit sind weltweit eine ganze Anzahl von Suchprogrammen angelaufen und durchgeführt worden, deren Erfolg man an mittlerweile über 1000 entdeckten KBO's messen kann. Besonders spektakulär war dabei die Entdeckung der besonders großen Brocken „Quaoar“, „Ixion“, „Varuna“, „Sedna“ und „Eris“, die nahe dran waren, dem ehemaligen Planeten Pluto Konkurrenz zu machen oder ihn sogar in der Größe übertrafen (z.B. (136199) Eris). Das von den Astronomen bis heute zusammengetragene Datenmaterial erlaubt erste Detailuntersuchungen der eisigen Welten am Rande unseres Sonnensystems.



Bahnen und Gruppierungen

Die Untersuchung der Bahnen der Kleinkörper im Bereich des Kuiper-Gürtels ist in mehrfacher Hinsicht interessant. Einmal im Zusammenhang mit der Entstehung und Entwicklung der Population der kurzperiodischen Kometen und zum anderen in Hinblick auf die Kosmogonie des Sonnensystems selbst.

Während die Innenkante des Kuipergürtel nach Definition durch die Lage der Neptunbahn eindeutig festgelegt ist, kann man über ihre äußere Begrenzung nur spekulieren. Für klassische KBO`s (s.u.) mit Bahnen geringer Exzentrizität schält sich als Grenzfernung ein Wert von ungefähr 50 AU heraus. KBO`s mit Bahnen hoher Exzentrizität (sogenannte *Scattered KBO`s* = SKBO`s) erreichen sogar Apheldistanzen von z.T. mehr als 200 AU (z.B. 1999 CF119).



Verteilung der Bahnen bekannter KBO`s , gesehen vom Pol der Ekliptik. Plutinos sind rot, klassische KBO`s blau und SKBO`s schwarz dargestellt

Genauere Aussagen über die Verteilung der Objekte im Gürtel zu machen, ist schwierig, da natürlich die Entdeckungswahrscheinlichkeit mit wachsender Objektentfernung und kleiner werdendem Objektdurchmesser abnimmt. Man geht davon aus, daß es weit mehr als 50000 KBO`s mit einem Durchmesser > 100 km in diesem Gebiet gibt.

Klassifizierung nach den Bahnen

Entsprechend ihrer Bahnen hat man sich auf folgende Klassifizierung der KBO`s geeinigt:

Plutinos (Resonanzobjekte)

Unter Plutinos versteht man eine spezielle Untergruppe der klassischen KBO`s, deren Umlaufzeiten in einem bestimmten Resonanzverhältnis in bezug auf Neptun stehen. Genauer gesagt, sie besetzen in erster Linie zusammen mit dem Planeten Pluto (eigentlich auch ein Plutino) die Resonanz 3:2, die sich dadurch ergibt, daß sich die Umlaufzeiten von Pluto (247.7 a) zu Neptun (164.82 a) um die Sonne wie 3:2 verhalten. Die Bahnen der Plutinos müssen demnach entsprechend dem 3. Keplerschen Gesetz ungefähr die gleichen großen Halbachsen a besitzen. Sie liegen zwischen 39.37 und 40.05 AU was etwas größer ist als Pluto's Wert, für den $a=36.529$ AU gilt. Außerdem unterscheiden sich die einzelnen Bahnen der Plutinos durch ihre Exzentrizität. Viele von Ihnen können genauso wie Pluto Neptuns Bahn kreuzen weshalb man sie manchmal auch als „Neptune crosser“ bezeichnet. Diese spezielle Resonanzsituation scheint langfristig die Population der Plutinos zu stabilisieren. Es sind auch einzelne „Plutinos“ bekannt, deren Umlaufzeiten um die Sonne im Verhältnis 4:3 zur Neptun Umlaufperiode stehen (z.B. 1995 DA2). Mittlerweile wurden auch KBO`s im Bereich der Resonanz 2:1 gefunden denen man deshalb den lustigen Namen „Twotinos“ gegeben hat.

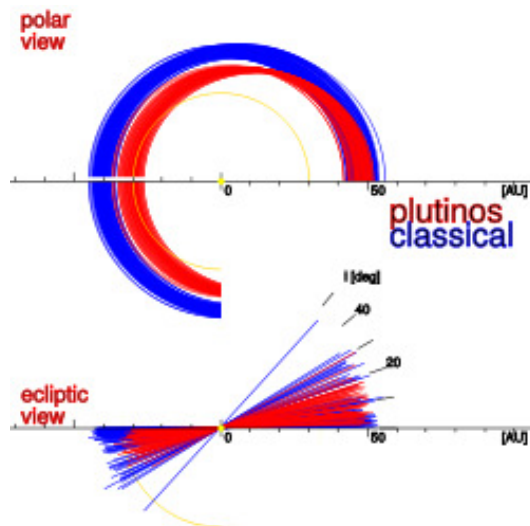
Etwas über 30% der bekannten Objekte außerhalb der Neptunbahn sind z.Z. als „Plutinos“ katalogisiert. Genauer, Mitte 2005 waren 172 dieser Objekte katalogisiert.

Große und bekannte Plutinos

| Name | Durchmesser km | große Halbachse AE | Perihel AE | Aphel AE | Umlaufzeit Jahre | Inklination | Exzentrizität |
|-----------|-------------------|--------------------------|---------------|-------------|---------------------|-------------|---------------|
| Pluto | 2320 | 39,2 | 29,6 | 48,8 | 248 | 17,1° | 0,244 |
| Charon | 1270 | Mond des Pluto | | | | | |
| 1993 RO | ~140 | 39,06 | 31,5 | 46,6 | ~247 | 3,7° | 0,194 |
| 1993 SB | ~130–200 | 39,24 | 26,7 | 51,8 | 248 | 1,9° | 0,320 |
| 1993 SC | ~300 | 39,40 | 32,10 | 46,71 | 247 | 5,2° | 0,185 |
| 1999 TC36 | ~405 | 39,23 | 30,55 | 47,91 | 246 | 8,4° | 0,221 |
| Huya | 540 | 39,72 | 28,6 | 50,9 | ~250 | 15,5° | 0,281 |
| Ixion | 400–550 | 39,48 | 29,9 | 49,0 | ~250 | 19,6° | 0,242 |
| Orcus | 1600–1800 | 39,47 | 30,9 | 48,1 | ~250 | 20,6° | 0,218 |

Klassische KBO's (CKBO's oder „Cubewanos“)

Alle KBO's mit moderaten Bahnexzentrizitäten, deren große Bahnhalbachsen zwischen 42 und 48 AU liegen, werden als „*Classical Kuiper-Belt Objects*“ – oder neuerdings als „Cubewanos“ – bezeichnet, wobei sich der Name „Cubewano“ von dem ersten gefundenen Transneptunischen Objekt, 1992 QB1, ableitet (es wurde als "Q B one-o's" bezeichnet). Die Neigungen ihrer Bahnen bezüglich der Ekliptikalebene überstreichen einen großen Winkelbereich, wobei sogar Objekte mit $i > 30^\circ$ gefunden wurden. Dieser Umstand ist kosmogonisch interessant weil er Rückschlüsse auf die Entstehung dieses Systems erlaubt. Klassische Kuiper-Objekte weisen keine Bahnresonanzen mit den äußeren Planeten auf. Läßt man diesen Fakt beiseite, dann kann man die Plutinos durchaus als eine Subgruppe der CKBO's auffassen, wie folgende Abbildung schön zeigt:



Lage der Bahnen von Plutinos (rot) und Cubewanos (blau) im Bereich des Kuipergürtels.

Die bekanntesten Objekte dieser Gruppe sind (50000) Quaoar und (20000) Varuna.

Scattered KBO's (SKBO's)

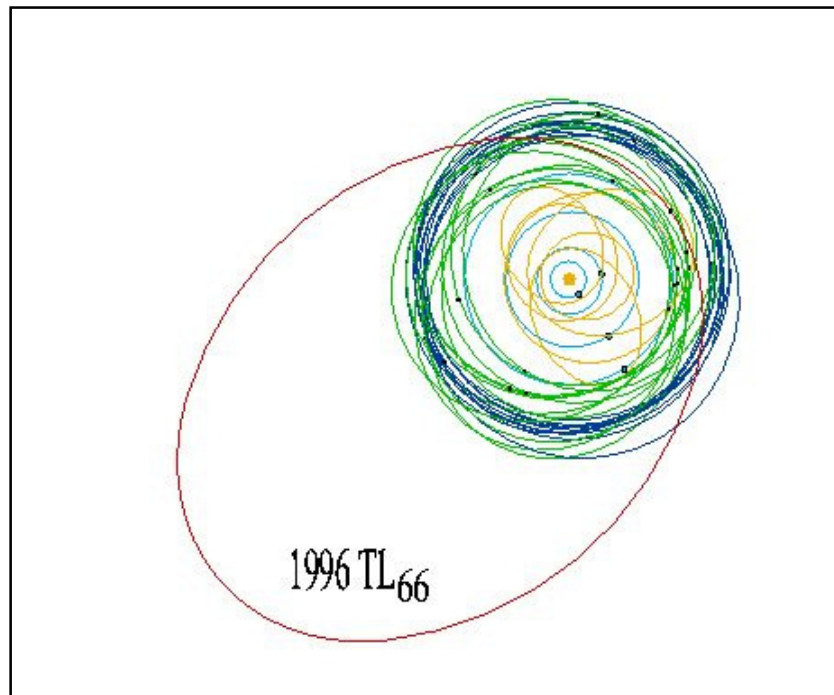
Diese Gruppe umfaßt alle transneptunischen Objekte, deren Aphel im Bereich der Neptunbahn liegt ($a \sim 35$ AU) und deren langgestreckten Bahnen sich weit über die 50 AU –Marke erstrecken. Der Prototyp dieser Gruppe, 1996 TL66, hat z.B. folgende Bahnparameter:

- Große Halbachse $a = 83.935$ AU
- Exzentrizität $e = 0.583$
- Bahnneigung $i = 24^\circ$

Ungefähr 3 bis 4 % der bekannten transneptunischen Objekte gehören zu dieser Objektklasse. Daraus kann man noch keine gesicherten Aussagen über ihre wahre Häufigkeit ableiten. Immerhin hat man bereits SKBO's mit Bahnhalbachsen in der Größenordnung von 200 AU gefunden (z.B. 1999 CF119).

Da mit größer werdender Entfernung die Entdeckungswahrscheinlichkeit abnimmt, ist die überwiegende Mehrzahl auch der größeren SKBO's der Beobachtung unzugänglich. Nur wenn sie sich nahe ihrer Periheloposition befinden, kann man sie mit den größten Fernrohren der Welt nachweisen. Da SKBO's im Perihel der Neptunbahn sehr nahe kommen können, sind sie nach Meinung vieler Planetologen die potentielle Quelle der kurzperiodischen Kometen. Wie Simulationsrechnungen zeigen, können die durch Neptun verursachten Störungen derartige Körper in den inneren Bereich des Sonnensystems ablenken.

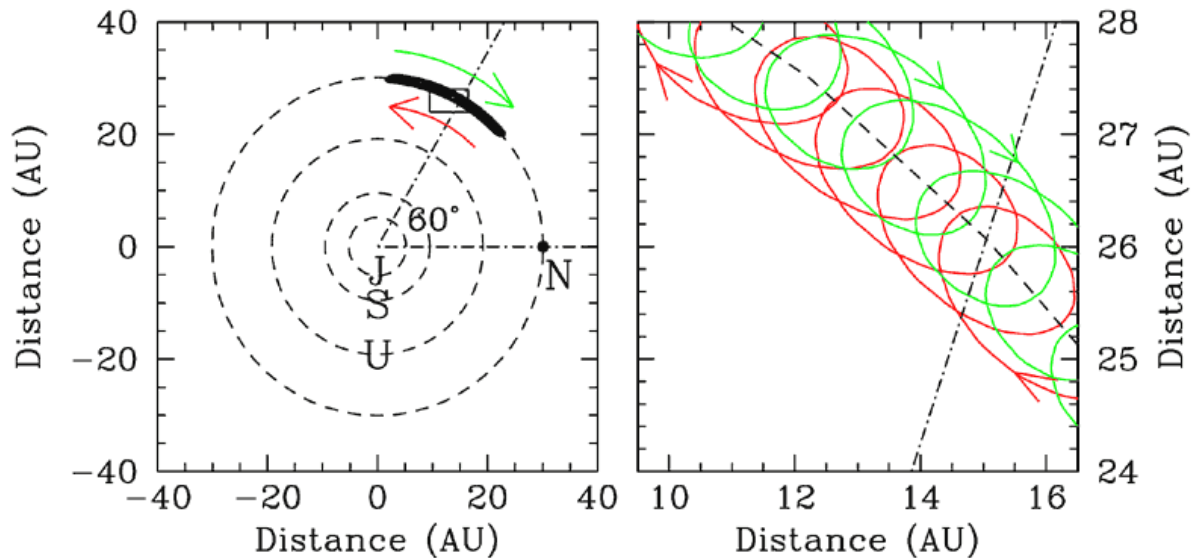
Das größte bekannte Objekt dieser Kategorie ist (136199) Eris. Dieses mittlerweile als Zwergplanet eingestufte Kuiper-Objekt besitzt einen Mond („Dysnomia“) und bewegt sich momentan in einer Entfernung von 14,6 Milliarden km auf einer stark exzentrischen und geneigten Bahn um die Sonne.



Bahn des Prototypen der SKBO's. Die blau gezeichneten Kreise kennzeichnen die Bahnen der großen Planeten Jupiter bis Neptun. Die nahezu kreisförmigen Bahnen außerhalb der Neptunbahn gehören zu den CKBO's.

Neptun-Trojaner

Schon seit langem vermutet man, daß es auch in den Librationspunkten Neptuns analog zu Jupiter Kleinplaneten gibt. Mit der Entdeckung von 2001 QR322 konnte der erste Vertreter dieser Objektklasse zweifelsfrei nachgewiesen werden. Seitdem gelangen nur drei weitere Entdeckungen (z.B. 2004 UP10) wobei alle 4 Objekte an den Librationspunkt L4 gekoppelt sind. Aufgrund der großen Entfernung und der extrem geringen Helligkeit dieser Objekte ist ihr Nachweis auch bei gezielter Suche äußerst schwierig. Deshalb kann man nur Vermutungen darüber äußern, ob diese Kleinplanetenfamilie genauso viele Mitglieder hat wie die klassischen Trojaner Jupiters.



Der Trojaner pendelt im Bereich des Lagrange-Punktes L4 entlang der Umlaufbahn Neptuns immer wieder vor und zurück, was in der Ausschnittsvergrößerung an den mit Richtungspfeilen versehenen roten und grünen Kurven dargestellt ist. Für eine komplette Schwingungsperiode benötigt 2001 QR322 ungefähr 10000 Jahre.

Morphologie und Geologie

Als Prototypen für die Himmelskörper im Bereich des Kuiper-Gürtels gelten natürlicherweise die Zwergplaneten Eris und Pluto (inklusive seinem großen Mond Charon) sowie der Neptunmond Triton. Die Frage ist nun, ob auch die kleineren KBO's mit diesen im Vergleich dazu recht großen Himmelskörpern sinnvoll verglichen werden können. Die vorläufige Antwort auf diese Frage müßte wahrscheinlich „Ja“ lauten. Pluto, Charon und Triton haben mittlere Dichten z.T. unter 2000 kg/m^3 was darauf hindeutet, daß sie zu einem großen Anteil aus sogenannten „flüchtigen“ Stoffen (d.h. solchen, die unter irdischen Bedingungen flüssig oder gasförmig wären) bestehen. Anders ausgedrückt, ihre chemische Zusammensetzung ähnelt weniger den klassischen Planetoiden sondern eher dem der Kometen. Das ist auch aus kosmogonischen Überlegungen heraus für das äußere Sonnensystem zu erwarten. Alle hier aufgefundenen Objekte sind Überbleibsel aus der Zeit der Entstehung des Sonnensystems. Hier konnten die Eis- und Silikatbestandteile der ursprünglichen Planetesimale ohne große Veränderungen bis in die heutige Zeit überdauern.

Um etwas über die Stoffe zu erfahren, aus denen die KBO's bestehen, stehen z.Z. nur spektroskopische Untersuchungen im sichtbaren und infraroten Spektralbereich zur Verfügung. Aufgrund ihrer extrem geringen Helligkeit ist der apparative Aufwand dafür jedoch extrem hoch. Genaugenommen kommen für derartige Untersuchungen nur Teleskope der 8 – bis 10 m -Klasse und eventuell das Hubble-Weltraumteleskop in Frage. Eine Alternative zur herkömmlichen Spektroskopie stellt – wenn der zu gewinnende Informationsgehalt auch etwas geringer ist – die Breitbandphotometrie mit Hilfe von Farbfiltern dar. Mit ihrer Hilfe kann man zumindest die Farbe einzelner KBO's bestimmen um daraus Rückschlüsse auf die Stoffe auf deren Oberfläche zu gewinnen. Überraschenderweise ist die

Farbpalette der KBO's sehr reichhaltig. Man findet „graue“ Objekte bis hin zu solchen mit deutlich roter Färbung (S. TEGLER, W. ROMANISHIM 1998). Erklären läßt sich diese Beobachtung mit dem Einfluß der kosmischen Strahlung, die ununterbrochen auf die Objektoberfläche auftrifft und dort je nach chemischer Zusammensetzung die Entstehung eine Vielzahl von organischen Stoffen bis hin zu komplexen Polymeren ermöglicht (die etwas unorthodoxen Astrophysiker HOYLE und WICKRAMASINGHE vermuteten sogar, das irgendwelche „Bakterien“ dafür verantwortlich sind). Ursache dafür ist der Verlust von Wasserstoffatomen im Oberflächenmaterial, deren Bindungen von kosmischen Strahlen am einfachsten aufgebrochen werden können. Die unterschiedlichen Farben lassen sich im Rahmen einer verbreiteten Modellvorstellung primär auf Kollisionsprozesse zurückführen. Danach sind „rote“ Objekte sehr alte Objekte während bei den mehr „grauen“ an den jüngeren Abbruchflächen das ursprüngliche Material zum tragen kommt, welches noch nicht solange der kosmischen Strahlung ausgesetzt war. Interessant in diesem Zusammenhang ist auch, daß sich „Rote“ und „Graue“ etwas in ihren Bahnen unterscheiden. Die „Roten“ sammeln sich im Bereich der Ekliptik während die „Grauen“ stark dagegen geneigte Bahnen haben (MARSDEN, 2000). Warum das so ist, ist noch Gegenstand der Forschung.

Für die ausgesprochen dunkle Färbung (oder anders ausgedrückt, für das geringes Albedo) macht man dagegen eine kohlenstoffreiche, mit dem erwähnten teerartigen Kohlenwasserstoffen durchsetzte Oberflächenschicht verantwortlich, wie man sie auch von Kometenkernen her kennt.

Weiter nimmt man an, daß viele der kleineren Kuiper-Objekte eine unregelmäßige Gestalt haben, da ihre Gravitationskraft nicht ausreicht, um ihnen eine dauerhafte kugelförmige Gestalt zu verleihen. Zumindest bei einigen von ihnen hat man einen Rotationslichtwechsel nachweisen können. Ein Beispiel ist 1996 TO66, der an mehreren Nächten 1997 mit dem ESO 3.6-m-Teleskop (La Silla-Observatorium) beobachtet werden konnte. Aus seiner Lichtkurve kann man ablesen, daß dieser Körper (wahrscheinlich seit seiner Entstehung vor mehr als 4.5 Milliarden Jahren) mit einer Periode von ca. 6 Stunden rotiert.

Die Untersuchung von Kuiper-Objekten einschließlich Eris, Pluto und Charon liefert wichtige Informationen über die Entstehung des Sonnensystems als Ganzes. Aus diesem Grund war es sinnvoll und erwünscht, eine interplanetare Sonde in diese Regionen zu entsenden. Am 19. Januar 2006 wurde die Sonde „New Horizons“ gestartet, welche am 14. Juli 2015 Pluto erreichen und danach weiter in den Kuipergürtel vordringen wird.

Pluto

Pluto ist der bis heute zweitgrößte bekannte planetare Körper, der den Kuiper-Gürtel bevölkert. Mit einem Durchmesser von 2390 km ist Pluto sogar noch um über 1000 km kleiner als der Erdmond. Er wird u.a. auch deshalb nach der Neuen, von der IAU verbindlich festgelegten Planetendefinition nicht mehr als „Großer Planet“, sondern als Zwergplanet gelistet. Deshalb besitzt er jetzt auch eine gewöhnliche Planetoidennummer (1343409).

Was weiß man über Pluto? – Genaugenommen nicht sonderlich viel. Er wurde bis heute noch von keiner Planetensonde angesteuert („New Horizon“ ist seit Anfang 2006 auf dem Weg) und auf den Aufnahmen mit dem Hubble-Teleskop kann man auf seiner winzig kleinen Scheibe nur grob ein paar Albedostrukturen sowie seinen ungefähr halb so großen Begleiter Charon ausmachen. Außerdem besitzt er noch zwei weitere Kleinmonde, die sich aber offensichtlich langsam auflösen.

Seine Entdeckung wurde am 13. März 1930 bekanntgegeben, genau 149 Jahre nach der Entdeckung von Uranus durch WILHELM HERSCHEL. Sein Entdecker war CLYDE W. TOMBAUGHT (1906-1997), ein damals junger Assistent am berühmten Flagstaff-Observatorium in Arizona. Durch Vergleich von Fotografien aus verschiedenen Nächten fand er am 18. Februar 1930 ein sehr schwaches Sternchen im Sternbild Gemini (Zwillinge), welches seine Position langsam veränderte. Eine genaue Analyse seiner Bahn führte recht schnell zu der Erkenntnis, daß das der berühmte Planet X sein muß, dessen Existenz schon lange vermutet wurde und dessen Position PERCIVAL LOWELL (1855-1916) und WILLIAM PICKERING (1858-1938) aus Abweichungen der Neptun-Bahn zu berechnen suchten. Heute weiß man, daß sie keinen Erfolg haben konnten. Der von TOMBAUGHT entdeckte Planet war immerhin mehr als 6° (das entspricht 12 Vollmonddurchmesser) von dem berechneten Ort entfernt. So gesehen war die Entdeckung doch mehr oder weniger ein Zufall. Kein Zufall war, daß man diesen Planeten „Pluto“ genannt hat – ein bekannter Hundename, der auf den römischen Gott der Unterwelt zurückgeht. Er wurde damals von der 11-jährigen VENETIA BURNEY vorgeschlagen, die sich sehr gut in griechischer Mythologie auskannte. Und vielleicht hat auch folgender Sachverhalt mit dazu geführt, daß dieser Name schnell von den Astronomen akzeptiert wurde: „PL“ war nämlich das Initial vom Gründer der Flagstaff-Sternwarte und überzeugten Planet-X Befürworter und Mars-Erforscher PERCIVAL LOWELL...

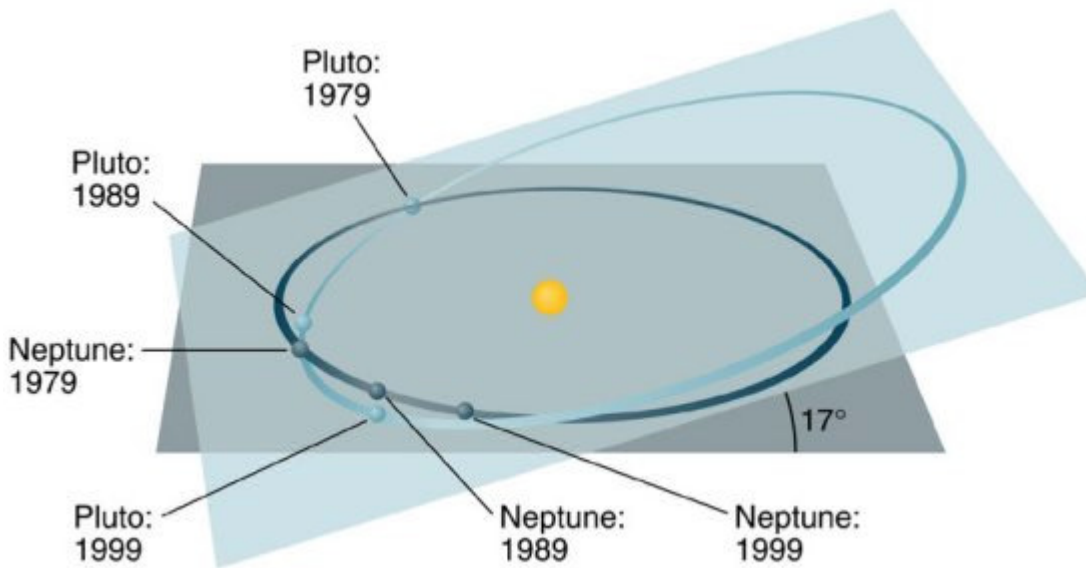
Mit Amateurmitteln und mit modernem fotografischem Material oder mit CCD-Kameras ist es relativ einfach, Pluto zu beobachten. Objekte mit einer Helligkeit von 14^m9 sind für das heute Amateurastronomen verfügbare Equipment kaum mehr ein Problem. Aber mehr als die langsame Bewegung unter den Sternen kann man damit auch nicht in Erfahrung bringen.

Allgemeines

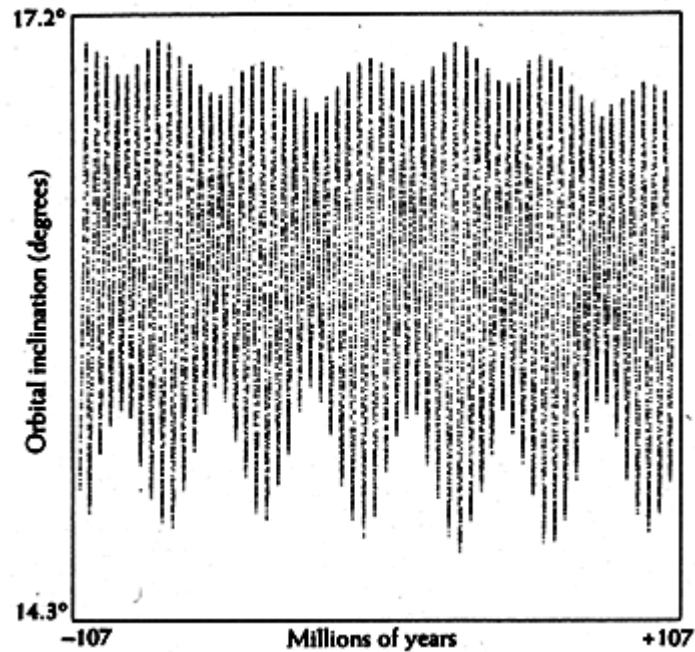
Pluto besitzt eine außergewöhnliche Bahn um die Sonne. Sie ist 17.14° gegen die Ekliptik geneigt und hat eine Exzentrizität von 0.249. Im Aphel ist er 39.54 AU – das sind 5.916 Milliarden Kilometer – und im Perihel 29.79 AU von der Sonne entfernt. Damit kommt er der Sonne zeitweise näher als Neptun, dessen Perihelabstand 29.84 AU beträgt. Das war zuletzt beispielsweise von 1979 bis 1999 der Fall. Für einen kompletten Umlauf um die Sonne benötigt er 248 Jahre. Mit der Entdeckung des Pluto-Mondes Charon konnte man erstmalig eine sichere Bestimmung der Masse des Planeten vornehmen. Während man in älteren Lehrbüchern als Durchmesser noch 5700 km und für die Masse ca. 0.9

Pluto

Erdmassen findet, ergeben moderne Beobachtungen mit dem Hubble-Teleskops nur noch einen etwa halb so großen Durchmesser (2390 km) und für die Masse nur noch einen Bruchteil der Erdmasse (0.0021 Erdmassen oder ungefähr 1/5 der des Mondes).

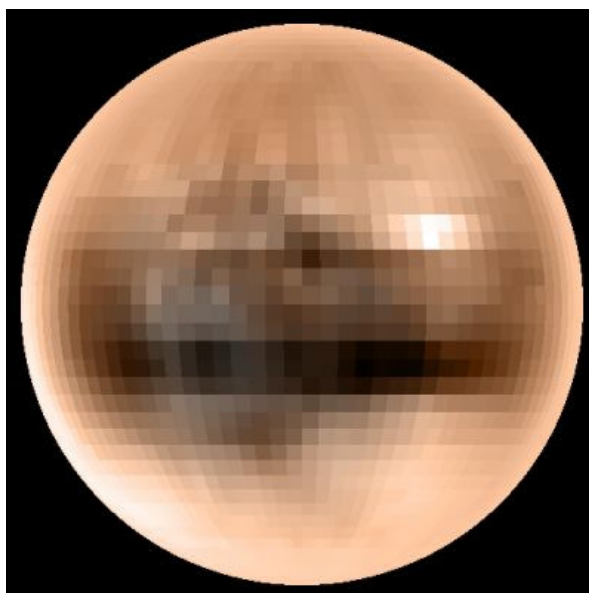


Da die Bahn von Pluto eine außergewöhnlich große Neigung von 17° gegenüber der Ekliptik aufweist, kann er sich Neptun maximal nur bis auf eine Entfernung von 16.7 AU nähern. Eine Kollision dieser beiden Planeten ist damit zumindest für die nächste und übernächste Zukunft ausgeschlossen. Betrachtet man die Umlaufzeiten von Neptun und Pluto, dann erkennt man, daß beide Planeten in einer 2:3 –Resonanz zueinander stehen. Das bedeutet, daß Pluto unter den Kuiper-Objekten ein typischer „Plutino“ ist. Zwar scheinen bestimmte Resonanzen Planetenbahnen über längere Zeiträume zu stabilisieren, was aber nicht in einem absoluten Sinn gilt. Genaue himmelsmechanische Untersuchungen haben vielmehr ergeben, daß die Bewegung Pluto's bereits über gar nicht allzu große Zeiträume „chaotisch“ wird, d.h. man kann z.B. seine genaue Position am Himmel bereits nach etwa 100 Millionen Jahren nicht mehr vorhersagen. Das bedeutet natürlich nicht unbedingt, daß sich seine Bahnform während dieser Zeit merklich ändert. Aber die Position auf dieser Bahn wird völlig unvorhersagbar. Das ist ein typisches Beispiel von deterministischem Chaos, wo kleine Störungen sich in einem System so aufschaukeln können, das deren Zustand für spätere Zeitpunkte nicht mehr vorhersagbar wird (WISSDOM, SUSSMAN, 1991). Im Fall von Pluto entdeckte man bei entsprechenden Computersimulationen außerdem, daß sich neben der Bahnexzentrizität e auch die Bahnneigung i (die z.Z. rund 17° beträgt) innerhalb gewisser Grenzen periodisch (d.h. nichtchaotisch) variiert. Diese Variationen sind aber nicht so gravierend, daß man höchstens von einem schwachen Chaos sprechen kann. Sie deuten eher darauf hin, daß sich dieser Zwergplanet z.Z. in einen Parameterbereich bewegt, die weitgehende Stabilität anzeigt. Die Chancen, daß Pluto in den nächsten Hundert Millionen Jahren in eine chaotische Phase gleitet und seine Bahn derart ändert, daß er das Sonnensystem verläßt, sind deshalb eher gering.



Änderung der Bahnneigung der Plutobahn über einen Zeitraum von ca. 200 Millionen Jahren. Die Simulationsrechnungen ergeben ein zyklisches Schwanken dieser Größe mit einer Periode von 3.8 Millionen Jahren.

Pluto dreht sich wie alle anderen Planeten auch um seine Rotationsachse, die um 118° gegen seine Bahnebene geneigt ist (deshalb hat er auch eine retrograde Rotation wie Uranus). Durch die Gezeitenreibung hat sich die Rotationsdauer im Laufe der Zeit mit der Umlaufzeit seines Mondes Charon synchronisiert. Sie beträgt 6.387 Tage. Das führt dazu, daß Pluto Charon und Charon Pluto immer die gleiche Seite zuwendet.



Pluto in natürlichen Farben. Das Bild wurde aus den Bedeckungslichtkurven berechnet, die entstanden, als der Mond Charon - von der Erde aus gesehen - vor der Plutoscheibe vorbei wanderte.

Pluto

Aufgrund der Bahnlage Charons kann es von der Erde aus gesehen zu einer zyklischen Bedeckung Pluto's durch diesen Mond kommen, die sich innerhalb dieses Zyklus alle 6.4 Tage wiederholt und jeweils ungefähr 5 Minuten andauert. Solch ein Bedeckungszyklus begann 1985 und endete 1991. Die dabei auftretenden Helligkeitsänderungen wurden dabei in verschiedenen Spektralbereichen sorgfältig registriert. Mit ihrer Hilfe konnte mit Hilfe von Computern – trotzdem Pluto aufgrund seiner geringen Größe im Teleskop nicht auflösbar war – eine Oberflächenkarte abgeleitet werden. Man erkennt grob hellere und dunklere Gebiete, wie man sie auch auf den geradeso in wenige Pixel aufgelösten Hubble-Teleskopaufnahmen sehen kann.

Den Mond Charon (Charon ist nach der römischen Form der griechischen Mythologie der Fährmann, der die Seelen der Verstorbenen über den mystischen Fluß Styx in die Unterwelt begleitet, wo Pluto (Hades) regiert) hat 1978 JAMES CHRISTY auf einer Photoplatte entdeckt, wo er sich als kleine Ausbuchtung des Schwärzungsscheibchens, welches Pluto repräsentiert, bemerkbar machte. Mit dem Hubble-Teleskop ist er bei günstiger Position zu Pluto leicht aufzulösen. Seine Bahnlage war – wie bereits erwähnt - von 1985 bis 1991 so, daß er bei seinem Umlauf regelmäßig Pluto bedeckte. Das hat man ausgenutzt, um die Größe beider Körper genauer zu vermessen. Danach hat Charon einen Durchmesser von 1207 km, d.h. er ist ziemlich genau halb so groß wie Pluto selbst. Dabei beträgt der Abstand beider Körper lediglich acht Plutodurchmesser. Man kann also mit Recht davon sprechen, das Pluto und Charon (ähnlich wie Erde und Mond) einen Doppelplaneten bilden.

Im Jahre 2005 wurden mit dem Hubble-Teleskop zwei weitere Kleinmonde im Plutosystem entdeckt, die mittlerweile die Namen Hydra und Nix erhalten haben. Ihr Durchmesser liegt irgendwo zwischen 40 und 130 km.



Pluto und Charon, aufgenommen mit dem Hubble-Teleskop

Innerer Aufbau

Pluto hat eine mittlere Dichte von 2030 kg/m^3 . Das ist die wesentlichste Information die man hat, um etwas über sein Inneres auszusagen. Man vermutet, daß er dem Neptunmond Triton ähnelt, der von Voyager 2 1989 genauer inspiziert werden konnte (zum Vergleich, Triton hat mit 2050 kg/m^3 die fast gleiche Dichte wie Pluto und ist mit einem Durchmesser von 2700 km auch nur unwesentlich größer).

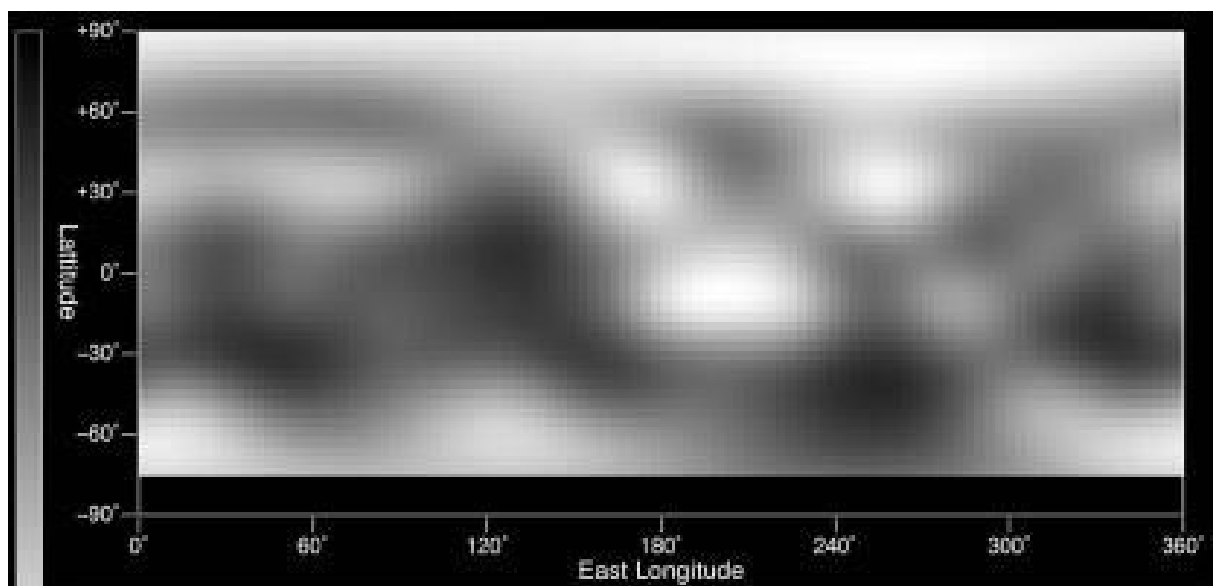
Aus der geringen Dichte kann man schlußfolgern, daß Pluto nur zu 50% bis 75% aus silikatischen Material bestehen kann. Der Rest dürfte zum größten Teil Wassereis sein. Ein einfaches Dreischichten-Modell sieht dann in etwa folgendermaßen aus (nach MCKINNON und S.MUELLER):

1. Wenige Kilometer starke Oberflächenschicht, welche neben Wassereis Methaneis, gefrorenes CO_2 (?), sowie CO und Stickstoff enthält.
2. Darunter schließt sich bis in eine Tiefe von 210 bis 320 km eine dicke Eisschicht an. An deren Unterkante wird ein Druck von 0.14 bis 0.21 GPa erreicht.
3. Den Kern bilden teilweise mit Wasser durchsetzte Silikate. Im Zentrum erreicht der Druck 1.1 bis 1.4 GPa.

Charon dagegen scheint aus einer weitgehend undifferenzierten Mischung aus Eis und Gestein zu bestehen, wobei der Eisanteil überwiegt.

Oberfläche

Pluto hat ein Albedo von 0.49 bis 0.66 und erscheint damit heller als sein Mond Charon (Albedo ca. 0.37). Da es auf seiner Oberfläche verschieden helle Gebiete gibt, führt seine Rotation zu einem Lichtwechsel geringer Amplitude. Auf diese Weise konnte man bereits 1955 seine Rotationsdauer zu 6.384 Tagen bestimmen, was nur sehr unwesentlich von dem modernen Wert (6.387 Tage, retrograd) abweicht.



Eine direkte Kartierung der Albedostrukturen gelang mit Hilfe des Hubble-Teleskops. Naturgemäß ist die Auflösung dieser Strukturen nur sehr gering, so daß es unmöglich ist, daraus auf morphologische Oberflächenstrukturen zu schließen. Auf jeden Fall heben sich die hellen Polkappen recht deutlich von

dem etwas dunkleren, leicht rötlich angehauchten Äquatorregionen ab. Wassereis und ausgefrorene Gase wie Stickstoff, Methan und CO scheinen auf der Oberfläche zu dominieren. Für die hellen Regionen wird gefrorener Stickstoff (N_2) verantwortlich gemacht. Charon ist dagegen eintöniger und erscheint farblich mehr grau. Bei ihm konnten keine fleckenartigen Strukturen ausgemacht werden.

Ähnlich wie auf Triton erwartet man auf Pluto's Oberfläche Gebiete, die mit Stickstoffeis überzogen sind. Da sich die Oberflächentemperaturen in einem Bereich bewegen, wo sowohl das Ausfrieren als auch die Sublimation von Stickstoff möglich ist, existiert auf Pluto wahrscheinlich ein Stickstoffzyklus, der zu einer engen Kopplung von (Stickstoff-) Atmosphäre und Oberfläche führt und auch das jahreszeitliche Temperaturregime steuert.

Außerdem (auch in Hinblick auf den Kern des Halley'schen Kometen) schätzt man, das ca. 10% des Oberflächenmaterials aus organischen Stoffen besteht. Die Entdeckung von Ethan (C_2H_6) im Jahre 2006 scheint diese Vermutung zu untermauern.

Atmosphäre

Die Oberflächentemperatur von Pluto bewegt sich im Bereich von 35 - 60 K mit entsprechenden lokalen Unterschieden, die sich aus der unterschiedlichen Geometrie der Sonneneinstrahlung und der Oberflächenbeschaffenheit ergeben. Die konkreten Werte schwanken im Laufe eines Plutojahrs aufgrund der großen Bahnexzentrizität und der damit wechselnden Entfernung zur Sonne um nochmals einige Grad. Im gleichen Maße sollte sich auch der Zustand der extrem dünne Atmosphäre (Oberflächendruck nur etwa 50 μ Bar, wenn sich Pluto in Sonnennähe befindet) ändern (das Pluto bei seiner geringen Masse überhaupt eine Atmosphäre halten kann, ist nur diesen geringen Temperaturen zu verdanken). Im Perihel erwartet man deshalb eine dichtere Gashülle, was auch durch die Beobachtung einer Sternbedeckung am 9. Juni 1988 bestätigt wurde. Der von Pluto bedeckte Stern der 12. Größenklasse verschwand nicht plötzlich, sondern wurde allmählich schwächer, was ein eindeutiger Hinweis auf die Existenz einer ausgedehnten Atmosphäre ist. Seit 1990 entfernt sich Pluto wieder von der Sonne, d.h. es wird allmählich wieder kälter und die atmosphärischen Gase sollten beginnen, langsam auszufrieren. Der Gasdruck nimmt bei diesem Vorgang ab und auch die dunkleren Gebiete der Plutooberfläche sollten dann von einer Schicht gefrorener Gase (insbesondere Stickstoff) überdeckt werden.

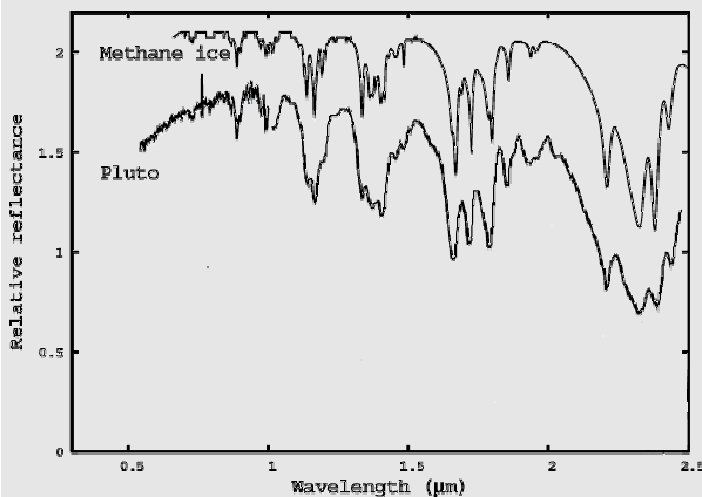
Ob das wirklich so ist, versuchte man im Jahre 2002 zu klären, wo es einer Gruppe von Astronomen gelang, gleich zwei Sternbedeckungen (P 126 und P 131.1 im Sternbild Schlangenträger) mit modernsten technischen Hilfsmitteln (u.a. mit den Riesenteleskopen von Hawaii aus), zu beobachten. Entgegen aller Voraussagen ergab sich jedoch aus den Meßwerten, daß sich der Druck der Plutoatmosphäre seit 1988 mindestens verdoppelt hat und zwar ganz entgegen den Erwartungen. Obwohl sich Pluto wieder von der Sonne entfernt, muß demnach dessen Oberflächentemperatur seit 1988 um ca. 1° bis 2° C angestiegen sein. Eine abschließende Erklärung für diese Anomalie ist noch nicht bekannt. Zwar befindet sich der Stickstoff N_2 auf seiner Oberfläche im gefrorenen Zustand (der Schmelzpunkt liegt bei 63 K) und bereits eine geringe Erwärmung oder Abkühlung kann große Mengen davon in die dünne Atmosphäre sublimieren oder auf die Oberfläche ausfällen lassen. Absolut bedeutet das aber nicht viel, da der „Luftdruck“ nur ungefähr einem Millionstel des Erdluftdrucks

beträgt. Denkbar ist beispielsweise, daß die Südpolkappe, die seit 1987 nach 120 Jahren völliger Finsternis wieder Sonnenlicht abbekommt, langsam ausgast. Die Nordpolkappe taucht entsprechend immer mehr in die „Finsternis“ und die Bedingungen, daß dort Stickstoff verstärkt aus der Atmosphäre ausfriert, werden langsam besser. In der Übergangszeit ist es deshalb durchaus möglich, daß der atmosphärische Druck erst einmal langsam ansteigt, um dann zeitverzögert wieder abzusinken. Die Ursache wäre in diesem Fall in der mit fast 120° recht hohen Neigung der Rotationsachse zur Bahnebene zu suchen.

Neben Stickstoff und Methan konnten spektroskopisch weitere Gase bzw. Spurenstoffe auf Pluto nachgewiesen werden. Dazu gehören z.B. Wassereis, Kohlenmonoxidschnee, Ammoniak und Ethan. Letzteres deutet auf die Präsenz einer interessanten Oberflächenchemie hin, die auf der Umwandlung von Methan in andere organische Stoffe unter dem Einfluß der kosmischen Strahlung beruht.

Stickstoffzyklus auf Pluto

Die Beobachtung von Sternbedeckungen zeigen, daß Pluto eine zwar dünne, aber durchaus nachweisbare Atmosphäre besitzt, die – ähnlich Triton – im Wesentlichen aus molekularem Stickstoff besteht. Sie weist außerdem eine Temperaturinversion auf, d.h., sie ist unten „kalt“ und oben „warm“. Die starke Präsenz von Methanabsorptionsbanden (hervorgerufen von Methaneis auf der Oberfläche) im Spektrum Pluto's sagt vordergründig noch nicht allzuviel über die Bedeutung von Methan in Pluto's Atmosphäre aus. Sie entstehen im Reflektionsspektrum durch Absorption bestimmter Wellenlängen des Sonnenlichts in Methaneis. Da dieses Eis schon bei geringer Konzentration ein guter Absorber ist, sind die Absorptionsbanden (IR) entsprechend stark ausgebildet. Bei festem Stickstoff ist es genau umgekehrt. Hohe Konzentrationen (d.h. wenn Stickstoff in den Aggregatzuständen „Flüssig“ oder „Fest“ vorliegt) führen zu relativ schwachen Absorptionen, da Stickstoff in diesen Zuständen nur innerhalb eines sogenannten „verbotenen Bandes“ Strahlung absorbieren kann.



Vergleich eines reinen Methaneis-Spektrums mit dem Spektrum Pluto's

Die Entdeckung, daß auf Pluto in größerer Menge fester Stickstoff vorhanden ist, gelang 1992. Zu dieser Zeit wußte man bereits, daß es auf Triton Stickstoff-Geysire und eine dünne Stickstoffatmosphäre gibt. Deshalb konnte man gezielt nach den entsprechenden Spektralmarkern suchen. Auch wußte man – wiederum aufbauend auf den Erkenntnissen über den Neptun-Mond Triton – das Stickstoffeis sowohl für das Temperaturregime auf der Oberfläche als auch für das thermische und dynamische Verhalten der dünnen Atmosphäre verantwortlich ist. Dazu muß man wissen, daß fester Stickstoff in verschiedenen Modifikationen (ähnlich dem Schwefel auf Io) vorkommt, ein hohes

Albedo besitzt, sehr volatil ist (der Dampfdruck ist beispielsweise ca. 10^4 mal größer als der von Methan) und an den Stellen, wo es auf der Oberfläche freiliegt, unter Sonneneinstrahlung leicht sublimieren kann (was effektiv einer Kühlung entspricht). Andererseits kann der Stickstoff in kälteren Bereichen der Oberfläche jederzeit wieder auskondensieren, wobei bekanntlich latente Wärme frei wird (was einer Erwärmung entspricht). Man kann sich leicht vorstellen, daß es zwischen Gebieten, wo verstärkt Sublimation auftritt (d.h. dort, wo Sonneneinstrahlung herrscht und das Albedo gering ist) und Gebieten, wo Kondensation auftritt (also in den Bereichen, wo es wenig oder überhaupt keine Sonneneinstrahlung gibt), ein großräumiger Stoff- und Energietransport über die Atmosphäre stattfindet. Auf diese Weise kann nach entsprechenden Berechnungen innerhalb eines Plutojahres (was 248 Erdjahre entspricht) ungefähr eine ein Meter starke Stickstoffeissschicht durch Sublimation an einem Ort abgetragen und woanders wieder aufgeschichtet werden.

Durch die langgestreckte Bahnform (Exzentrizität $e=0.244$) ändern sich die globalen Sublimations- und Kondensationsbedingungen beträchtlich über ein Plutojahr. Da der Dampfdruck von Stickstoff bekanntlich sehr stark temperaturabhängig ist (eine Erhöhung der Temperatur um 1 K erhöht den Gasdruck um ungefähr den Faktor 5), wird sich eine merkliche Atmosphäre nur dann aufbauen können, wenn sich Pluto in der Nähe seines Perihels befindet. In dieser Zeit erfolgt dann auch der größte Teil des bereits erwähnten Stofftransports durch die sich dabei aufbauenden Windsysteme. Je weiter sich Pluto jedoch wieder von seinem Perihel entfernt, desto schlechter werden die Bedingungen, unter der Sublimation stattfindet. Aufgrund des stetigen Gasverlusts durch Auskondensation und Deposition erwartet man deshalb, daß die Plutoatmosphäre nach und nach ausfriert. Die Frage, wie das genau vonstatten geht und wann dieser Prozeß abgeschlossen ist, kann nicht so leicht beantwortet werden. Hier spielt eine Rolle, daß fester Stickstoff in zwei unterschiedlichen Modifikationen vorkommt, die sich in ihrer kristallinen Struktur unterscheiden und die man mit dem griechischen Buchstaben α und β bezeichnet (α -Stickstoff hat eine mehr kristalline, β -Stickstoff eine mehr amorphe Struktur). Zwischen diesen beiden Modifikationen tritt ein Phasenübergang auf, der bei der Umwandlung von β -Stickstoff in den α -Zustand aufgrund der Kristallbildung mit einer Wärmeabgabe verbunden ist. Dieser Vorgang setzt bei einer Temperatur von 35.6 K ein und hält (theoretisch) solange an, bis es nur noch α -Stickstoff gibt. Die bei der Kristallisation ständig stattfindende Wärmeabgabe führt dazu, daß über einen längeren Zeitraum die mittlere Temperatur der Atmosphäre mehr oder weniger konstant bleibt (man vermutet, bei einem Gasdruck von ungefähr 4 bis 5 μBar). Nach diesem Modell sollte es deshalb niemals zu einem völligen Ausfrieren von Pluto's Atmosphäre kommen. Ob das wirklich so ist, werden wahrscheinlich erst die Ergebnisse der New Horizons –Sonde zeigen, die am 14. Juli 2015 an Pluto vorbeifliegen wird.

Daten

BAHNPARAMETER

| | |
|-------------------------------------|---------|
| Große Halbachse (10^6 km) | 5869.66 |
| Umlaufszeit (siderisch) in Tagen | 90465 |
| Umlaufszeit (tropisch) in Tagen | 90588 |
| Perihelabstand (10^6 km) | 4434.99 |
| Aphelabstand (10^6 km) | 7304.33 |
| Mittlere Bahngeschwindigkeit (km/s) | 4.72 |
| Max. Bahngeschwindigkeit (km/s) | 6.10 |
| Min. Bahngeschwindigkeit (km/s) | 3.71 |
| Bahnneigung (Grad) | 17.16 |
| Numerische Exzentrizität | 0.2444 |
| Sidereale Rotationsperiode (Tage) | 6.3872 |

PLANETENPARAMETER

| | |
|---|---------|
| Masse (10^{24} kg) | 0.0125 |
| Volumen (10^{10} km ³) | 0.715 |
| Äquatorradius (km) | 1195 |
| Polradius (km) | 1195 |
| Abplattung | 0.000 |
| Mittlere Dichte (kg/m ³) | 1750 |
| Schwerebeschleunigung (m/s ²) | 0.58 |
| Entweichgeschwindigkeit (km/s) | 1.1 |
| Albedo | 0.4-0.6 |
| Geometrisches Albedo | 0.5-0.7 |
| Solarkonstante (W/m ²) | 0.89 |
| Strahlungstemperatur (K) | ~37.5 |

Die Transplutos

Seit der Entdeckung Plutos durch CLYDE TOMBAUGHT zu Beginn des Jahres 1930 stand immer die Frage im Raum, ob es außerhalb der Plutobahn noch einen weiteren größeren Planeten – einen Transpluto – gibt. Viele Astronomen haben sich seiner Suche angenommen, aber ohne Erfolg. Gleichzeitig begann mit immer besser werdenden Beobachtungsmöglichkeiten eine schleichende Degradierung Pluto's was seine Größe und Bedeutung für die Mechanik des äußeren Sonnensystems betrifft, die in der Entdeckung des Mondes Charon im Jahre 1978 durch JAMES CHRISTY gipfelte. Pluto ist dadurch zwar interessanter, aber als Planet auch mickriger geworden. Mit der Entdeckung von 2003UB313 (heute als Zwergplanet kategorisiert und „(136199) Eris“ genannt, der ein wenig größer als Pluto ist, ist dieser Streit neu aufgebrochen (Eris ist übrigens die griechische Göttin der Zwietracht). Das führte letztendlich zu der etwas unglücklichen Einführung des Terminus „Zwergplanet“ durch die IAU während ihrer Generalversammlung im Jahre 2006 in Prag.



Am 28. November 2000 entdeckte R.S.MCMILLAN auf Aufnahmen mit dem 90-cm SpaceWatch-Teleskop der Universität Arizona ein schwaches und sich langsam bewegendes Objekt. Offensichtlich ein Planetoid. Vom *Minor Planetary Center* erhielt er die vorläufige Bezeichnung 2000 WR106. In der Folgezeit wurde es weiter verfolgt bis genügend Ortsbestimmungen vorlagen, um eine erste Bahnbestimmung durchzuführen. Mit deren Hilfe konnte das Objekt auch auf alten Platten des Oschin-Schmidtspiegels auf Mt. Palomar identifiziert werden. Es zeigte sich, daß es sich um ein klassisches Kuiper-Objekt handeln muß, daß sich in einer Entfernung von 43 AU um die Sonne bewegt. Vergleichende Messungen im optischen und Submillimeterbereich erlaubten eine Abschätzung der Größe dieses Objekts. Es zeigte sich, daß es sich dabei um einen Himmelskörper handelt, der ungefähr so groß wie (1) Ceres ist: Durchmesser rund 900 km. Es erhielt später die bemerkenswerte Nummer 20000 und den für viele Zeitgenossen nichtsagenden Namen „Varuna“. Das liegt daran, das der Name nicht aus dem westlichen Kulturkreis stammt: Varuna ist in der indischen Mythologie der Gott des Wassers.

(20000) Varuna kam damit der Größe von Charon, Pluto's Mond, verdächtig nahe. Das nährte die Vermutung, daß es im Kuiper-Gürtel weitere Himmelskörper der 1000 km - Klasse und Größer gibt.

Gerade einmal ein halbes Jahr später – genauer am 22. Mai 2001 – ging einer Arbeitsgruppe von Astronomen des Lowell-Observatoriums, des MIT in Massachusetts und des gerade im Aufbau befindlichen *Large Binocular Observatory* ein weiteres Objekt jenseits der Plutobahn ins Netz. Für das sehr dunkle Objekt (Albedo $\sim 0.04\%$) konnten Wissenschaftler des MPI für Radioastronomie in Zusammenarbeit mit dem IRAM-Observatorium in Spanien (30-m Mikrowellenteleskop) mit Hilfe des sehr empfindlichen Bolometers MAMBO aus der gemessenen Wärmestrahlung einen Durchmesser von 1055 ± 165 km ableiten. Der neue Transpluto, der den Namen Ixion und die offizielle Nummer (28978) erhielt, ist damit etwa genauso groß wie der Pluto-Begleiter Charon.

Während die Entdeckung Ixions außerhalb der Fachwelt kaum registriert wurde, erlangte das nächste größere Objekt auch außerhalb der Sternwarten und Universitäten eine gewisse Berühmtheit. Gemeint ist Quaoar, der erste „Transpluto“ der von der interessierten Öffentlichkeit auch als der lange vermutete „Transpluto“ oder „Planet X“ akzeptiert wurde. CHAD TRUJILLO und MIKE BROWN vom *California Institute of Technology* fanden ihn im Juni 2002 auf CCD-Aufnahmen, die mit dem Oschin-Schmidtspiegel auf Mt. Palomar erstellt wurden. Er erhielt die vorläufige Bezeichnung 2002 LM60. Als man das Hubble-Teleskop darauf richtete, gelangen Aufnahmen, die das neue Kuiper-Objekt in mehrere Pixel auflöste so daß man seine Größe eigentlich sofort bestimmen konnte: Durchmesser = 1250 ± 50 km. Nun ja, die Eigenschaft „groß“ ist nun mal relativ zu sehen. „Relativ“ zu Pluto ist Quaoar gerade einmal $\frac{1}{2}$ mal so groß (er nimmt $\frac{1}{8}$ von dessen Volumen ein). Für ein Kuiper-Objekt ist er dagegen durchaus außergewöhnlich. Bis heute (2007) sind einschließlich Pluto und Charon 11 Objekte der 1000 km-Klasse (d.h. innerhalb der Fehlergrenzen) bekannt geworden.

Quaoar zieht mehr als 1.6 Milliarden Kilometer hinter Pluto seine fast kreisförmige ($e = 0.04$) und nur moderat zur Ekliptik geneigte Bahn ($i \sim 8^\circ$) um die Sonne ($a \sim 42$ AU). Eine kurze Überschlagsrechnung zeigt, daß er für einen Umlauf rund 287 Jahre benötigt. Ansonsten nimmt man an, daß er wie alle anderen Kuiper-Objekte auch aus urtümlichen Material besteht: Ungefähr die Hälfte davon dürften gefrorene Gasen wie Wasser, Stickstoff, Methan, Methanol, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid und die andere Hälfte Gestein und silikatischer Staub sein. Wasser konnte mit dem Keck-Teleskop spektroskopisch eindeutig nachgewiesen werden.

Übrigens, beinahe hätte Quaoar einen ganz anderen Namen bekommen. Er wurde nämlich bereits 1982 von CHARLES KOWAL fotografiert, aber damals auf der Fotoplatte nicht aufgefunden. Und ob er für diesen außergewöhnliche Himmelskörper auch einen Götternamen aus der Schöpfungsgeschichte der Tongva-People (der Ureinwohner Los Angeles aus der Zeit, wo es Los Angeles und Hollywood noch nicht gegeben hat) gewählt hätte, ist eher unwahrscheinlich.

Quaoar strahlt ungefähr 10% des einfallenden Lichts zurück. Er erreicht deshalb im Visuellen eine Helligkeit von ca. 18^m5 . Er ist damit durchaus in der Reichweite eines gut ausgestatteten Amateurastronomen (10 Zoll Spiegel + CCD-Kamera), der sich einmal an diesem ansonsten schwierigen Objekt versuchen möchte.

Die gleichen Gruppe von Astronomen, denen 2001 die Entdeckung von Quaoar gelang, konnten Anfang 2005 (nach einer Indiskretion) die Entdeckung eines weiteren großes Kuiper-Objekt

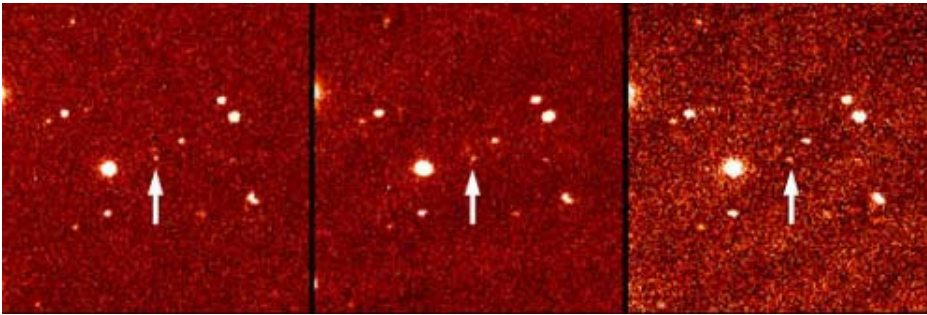
bekanntgeben dessen Helligkeit und Entfernung darauf hindeutete, daß es auf jeden Fall in die Pluto-Klasse gehört - wenn nicht sogar deutlich größer ist. Wie alle neuentdeckten Kuiper-Objekte erhielt es eine vorläufige Bezeichnung: 2003 UB313. Die Entdeckungsaufnahme datiert auf den 31. Oktober 2003 und wurde mit dem berühmten Oschin-Schmidtspiegel des Mount Palomar Observatoriums aufgenommen. Mittlerweile konnten die Parameter von 2003 UB313, der eine zeitlang inoffiziell auch „Xena“ genannt wurde, genauer bestimmt werden. Er ist mit einem Durchmesser von ca. 3000 km deutlich größer als Pluto (Durchmesser 2300 km) und besitzt sogar einen kleinen Mond mit einem Durchmesser von rund 250 km. Heute wird er wie Pluto als Zwergplanet klassifiziert und hat den offiziellen Namen (136199) Eris erhalten. Sein Mond erhielt passend zu Eris den Namen „Dysnomia“.

Die Entdeckung der größeren transplutonischen Himmelskörper hat auch in einer anderen Sparte zu Aufregung und verschärfter „Forschungstätigkeit“ geführt. Immerhin wurden dem Repertoire der Astrologen einige neue „Planeten“ hinzugefügt, deren „Kräfte“ und „Auswirkungen“ auf das Schicksal der Menschen und der Menschheit nun genauestens zu untersuchen sind. Nun ja, was soll's, wenn dadurch deren Prognosen besser werden...

Bekannte Objekte außerhalb der Uranus-Bahn (Stand Februar 2005)

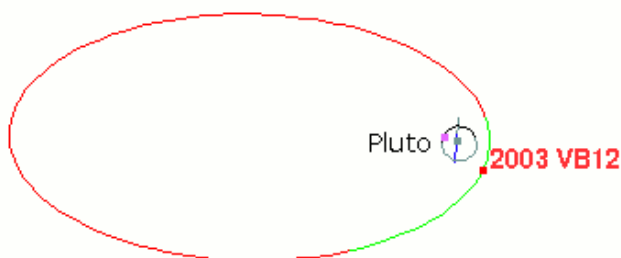
| Typ | Anzahl |
|-----------------------------------|-----------|
| Centauren | 54 |
| Neptun-Trojaner | 1 |
| Plutinos | 172 |
| Cubewanos | 568 |
| Scattered KBO's (SKBO's) | 88 |
| <i>andere</i> | <i>91</i> |
| | |
| Sedna (Innerer Oortscher Bereich) | 1 |

Sedna



2003 VB12 (= (90377 Sedna) ist ein außergewöhnliches Objekt. Als es am 14. November 2003 entdeckt wurde (MIKE BROWN, CHADWICK TRUJILLO, DAVID RABINOWITZ) befand es sich ziemlich nahe am Perihel - in ca. 11.4 Milliarden Kilometer Entfernung von der Sonne. Die Bahn ist relativ gut gesichert, da man es nachträglich auf einigen älteren Aufnahmen identifizieren konnte. Danach bewegt sich 2003 VB12 - oder, wie der offizielle Name ist, „Sedna“ - auf einer stark elliptischen Bahn ($e=0.857$) um die Sonne, wobei sich der sonnennächste Punkt in ca. 76 AU und der sonnenfernste Punkt in ca. 900 AU Abstand befindet. Damit zieht Sedna ihre Bahn zum größten Teil außerhalb des Kuiper-Gürtels im Übergangsbereich zum innersten Teil der Oortschen Wolke. Es ist sehr schwer, für so weit entfernte Objekte physische Merkmale zu bestimmen um etwas über ihren Aufbau und ihre Natur zu erfahren. Aus den photometrischen Daten folgt ein Durchmesser, der irgendwo zwischen 1300 und 1800 km liegt. Sedna ist also ein relativ großer Körper, der z.Z. nur noch von Pluto und Eris übertroffen wird. Die Oberflächentemperatur unterschreitet wahrscheinlich 30 K, so daß fast alle bekannten Gase ausgefroren sein dürften. Auffällig ist die rötlich Färbung, die sich von der dunklen Farbe der meisten Kuiper-Objekte abhebt. Nur der kleine Centaur Pholus (Durchmesser ca. 190 km), der sich auch auf einer langgestreckten Ellipse innerhalb der Saturn- und außerhalb der Neptunbahn bewegt, zeigt ein ähnliches spektrales Verhalten. Durch was diese Färbung hervorgerufen wird, ist noch ziemlich unklar. Das Sedna eine Atmosphäre besitzt, ist eher unwahrscheinlich.

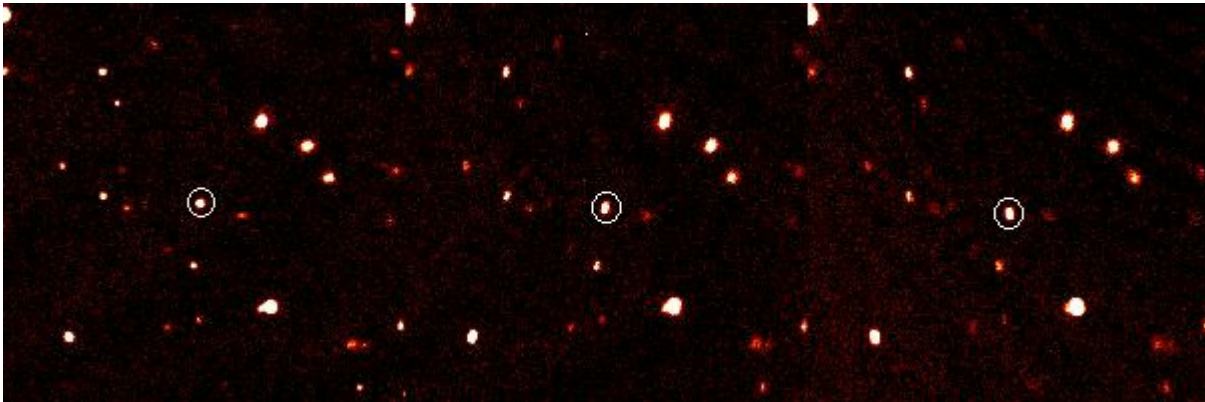
2003 VB12



Bahnellipse von Sedna, rechts Aufnahme mit dem Hubble-Weltraumteleskop.

Wegen seines kalten und entfernten Wesens benannten die Entdecker 2003 VB12 nach Sedna, der Meereshöttin der Inuit, die der Sage nach in den kalten Tiefen des Atlantiks lebte.

Eris



Dieses Objekt mit der ursprünglichen Bezeichnung 2003 UB313, das zu einiger Aufregung sowohl unter den Fachleuten als auch in der Öffentlichkeit gesorgt hat, wurde bei einer nachträglichen Bearbeitung einer CCD-Aufnahme, die am 1.2 Meter Schmidtspiegel des Mount Palomar-Observatoriums (Oschin-Teleskop) am 31. Oktober 2003 belichtet wurde, entdeckt. Bereits erste Untersuchungen dieses der Gruppe der SKBO's zugeordneten Objektes ließen vermuten, daß es sich um einen Himmelskörper handeln muß, dessen Größe mit Pluto vergleichbar ist.

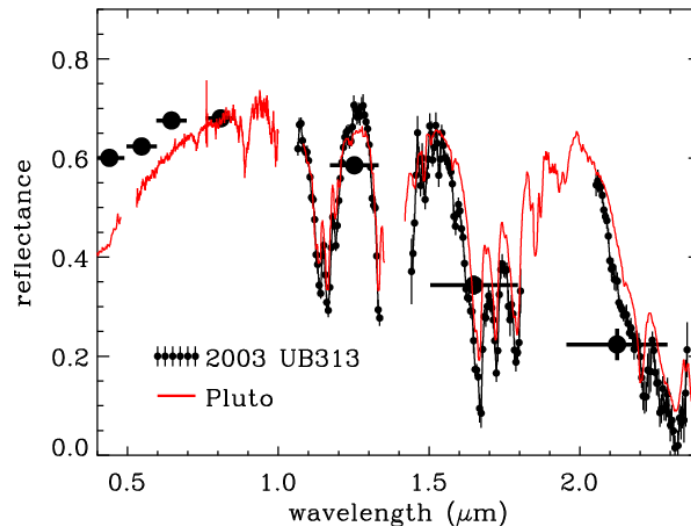
Die Bahn von (136199) Eris ist mit $e=0.441$ stark exzentrisch. Mit einem Perihelabstand von rund 37.84 AU kann er zeitweise der Sonne näher stehen als Pluto, während es sein Aphel (97.54 AU) weit in den Kuipergürtel hinaus führt. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt es ca. 557 Jahre (Pluto 248 Jahre). Die Neigung der Bahn von ca. 44° in bezug auf die Ekliptik ist wahrscheinlich ein nicht unwesentlicher Grund (neben seiner geringen Helligkeit) dafür, daß Eris nicht schon früher entdeckt wurde. In derart hohen ekliptikalen Breiten, wo sich das Objekt gegenwärtig aufhält, werden gewöhnlich keine Planetensuchprogramme durchgeführt.

Mit einer scheinbaren Helligkeit von rund 19^m sollte dieser neue Transpluto, der gegenwärtig im Sternbild Cetus zu finden ist, auch Amateuren mit entsprechenden Equipment fotografisch (CCD) zugänglich sein. Erste Aufnahmen sind bereits im Internet zu bewundern.

Da sich dieses transplutonische Kuiper-Objekt mit irdischen Teleskopen (einschließlich dem Hubble-Teleskop) nicht deutlich auflösen läßt, müssen zu dessen Größenbestimmung andere Methoden angewendet werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang eine realistische Abschätzung des Rückstrahlungsvermögens (Albedo). Je nachdem, was man dafür ansetzt, erhält man aus der beobachteten Helligkeit Werte zwischen 2300 km und 3550 km. Durch Einbeziehung der im Mikrowellenbereich emittierten Strahlung gelang es einer Arbeitsgruppe um den deutschen Astronomen FRANK BERTOLDI, die entsprechenden Messungen am Iram-Mikrowellenteleskop auf dem Pico Veleta in Spanien durchzuführen. Aus der Gesamtemission bei einer Wellenlänge von 1.2 Millimetern konnten im Vergleich zur Helligkeit im visuellen Spektralbereich letztendlich ein Durchmesser von ~ 3000 km abgeleitet werden. Heute gilt als wahrscheinlichster (und auch offizieller) Durchmesser 2400 ± 100 km. Damit ist Eris wirklich ein klein wenig größer als Pluto und es stellte sich - besonders durch die Medien in die Öffentlichkeit kolportiert - die Frage, ob es sich bei Eris um den „Zehnten“ Planeten handelt oder ob es nicht besser sei, Pluto gleich dem Planetenstatus auch

offiziell abzuerkennen, da er ja eh ein Kuiperobjekt und - was seine Größe betrifft - wahrlich nicht gerade stattlich ist (zum Vergleich, der Erdmond hat einen Durchmesser von 3476 km). Die Entscheidung ist im Jahre 2006 dahingehend gefallen, daß Pluto und Eris jeweils in die Gruppe der Zwergplaneten eingeordnet werden.

Um etwas über die physische Beschaffenheit dieses neuen Himmelskörpers zu erfahren, wurden an den größten Teleskopen der Welt spektroskopische Untersuchungen durchgeführt.

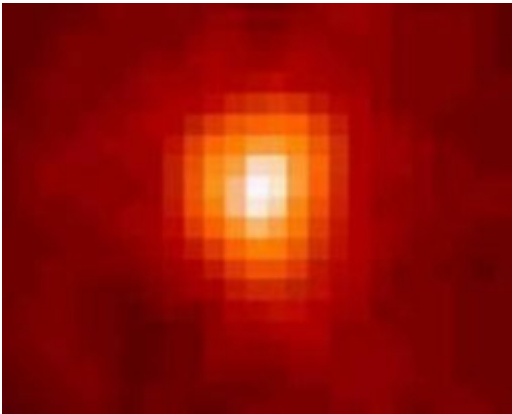


Vergleich des Spektrums von Pluto (rot) mit dem Spektrum von 2003 UB313. Die Peaks zwischen 1.5 und 2 Mikrometer Wellenlänge stellen Methan-Absorptionslinien dar.

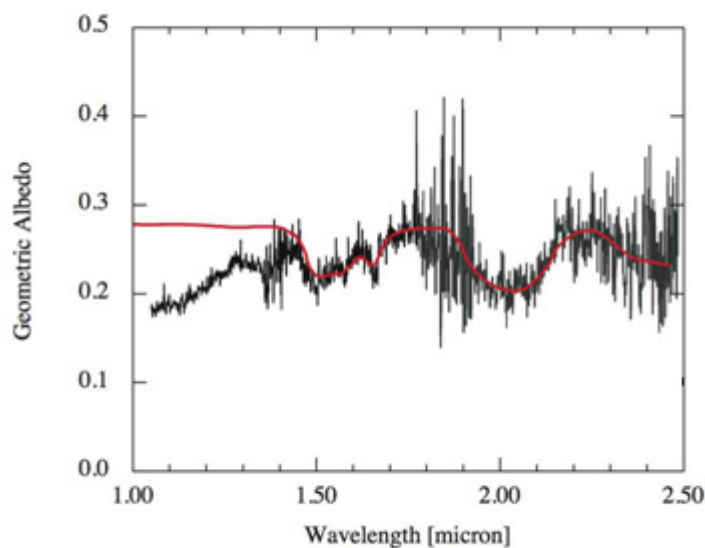
Obwohl sich die Spektren von Pluto und Eris stark ähneln, gibt es doch einige bemerkenswerte Unterschiede. Während die Oberfläche von Pluto vom Gesamteindruck her leicht rötlich angehaucht erscheint, ist das neue Objekt überwiegend grau und ähnelt somit mehr dem Plutomond Charon. Auf jeden Fall existiert auf der Oberfläche, deren Temperatur auf lediglich 30K geschätzt wird, Methaneis. Auch ist - ähnlich wie bei Pluto - eine sehr dünne Atmosphäre aus Stickstoff-, Methan und Kohlendioxid-Molekülen zu erwarten, da diese Gase auch bei den dort herrschenden äußerst geringen Temperaturen durchaus noch sublimieren können und zwar besonders dann, wenn sich Eris in Perihelstellung befindet. Die „Mächtigkeit“ dieser Atmosphäre ist demnach stark von der Position des Objekts auf seiner Bahn respektive seinem Sonnenabstand, abhängig

Eine weitere Überraschung war die Entdeckung eines kleinen Begleiters am 10. September 2005 mittels der adaptiven Optik eines der 10 Meter-Keck-Teleskop auf Hawaii. Sein Durchmesser ist ungefähr 250 km und seine Umlaufzeit beträgt rund 14 Tage. Er hat den Namen Dysnomia erhalten.

Quaoar

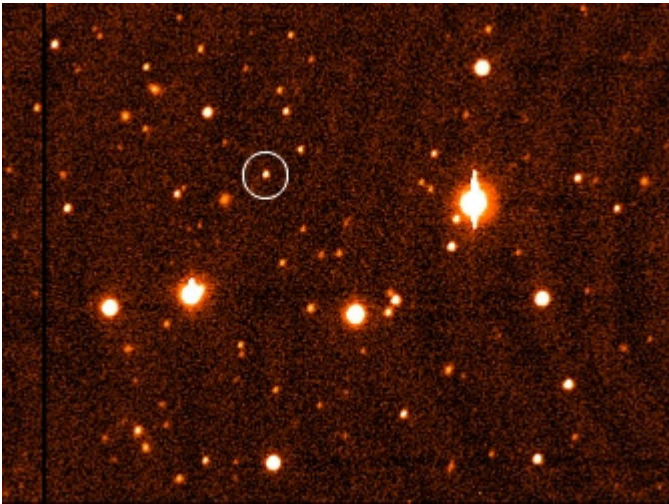


(50000) Quaoar gehört mit einem Durchmesser von ~1250 km zu den großen Objekten des Kuiper-Gürtels. Er wurde am 4. Juni 2002 von Chad Trujillo und Mike Brown entdeckt und erhielt die vorläufige Bezeichnung 2002 LM60. Er benötigt knapp 288 Tage für einen Umlauf um die Sonne. Spektroskopische Untersuchungen des von diesem Objekt reflektierte Sonnenlichts führten zum Nachweis von Wassereis auf dessen kalter ($T \sim 50$ K) Oberfläche. Dabei wurde überraschenderweise auch kristallines Wassereis entdeckt was dahingehend ungewöhnlich ist, da diese Modifikation nur bei Temperaturen oberhalb von 110 K existent ist. Verschiedene Astronomen haben diesen Befund (z.B. JEWITT, LUU, 2004) dahingehend gedeutet, daß es auf Quaoar auch heute noch kryovulkanische Prozesse gibt.

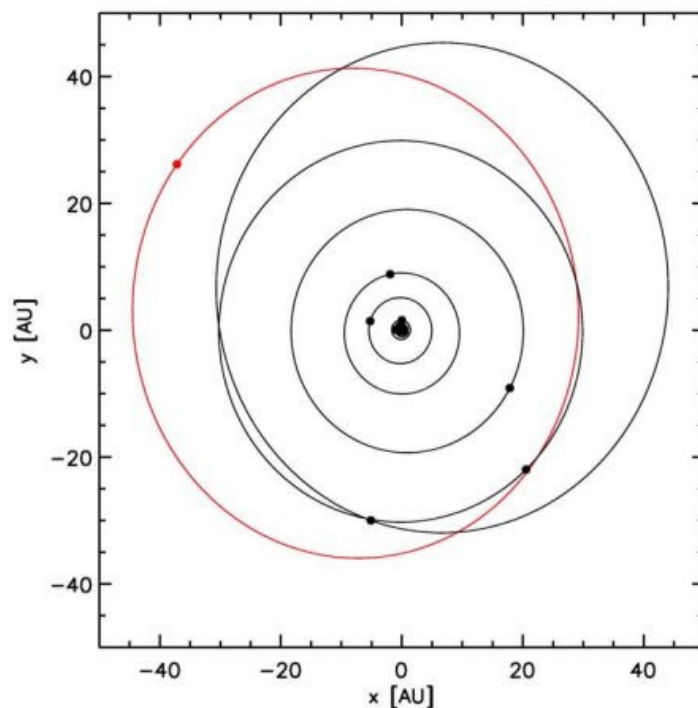


IR-Reflektionsspektrum von Quaoar. Die schwarze Linie stammt von Subaru/CISCO-Daten während die rote Linie das Spektrum von Wassereis darstellt. Die breiten Minima bei 1.5 und 2.0 μm sind ein Hinweis auf die Existenz von Wassereis an der Oberfläche von Quaoar. Ein deutliches Minimum bei 1.65 μm weist dabei eher auf kristallines als auf amorphes Eis hin.

Orcus

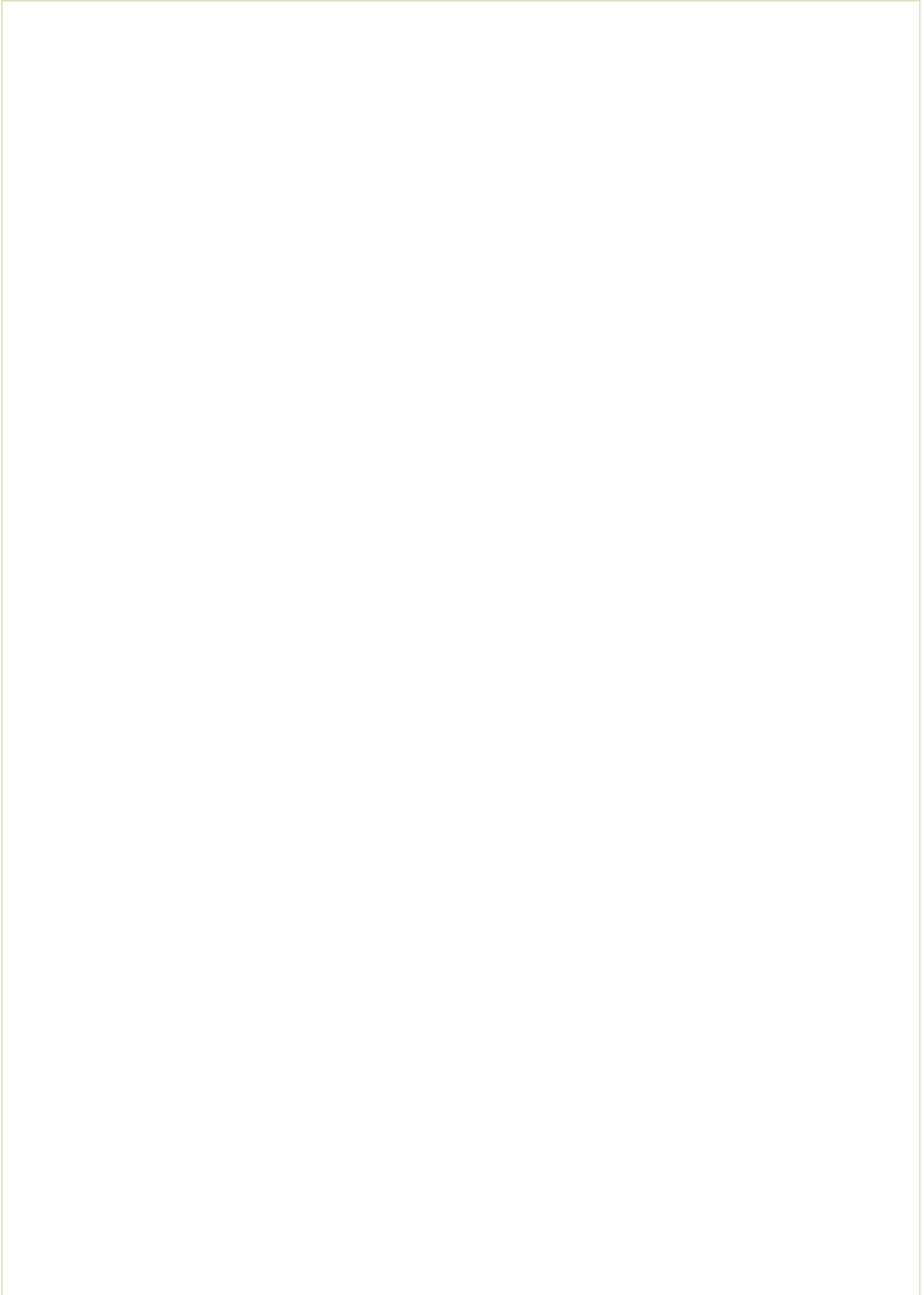


(90482) Orcus ist ein schönes Beispiel, daß die Entdeckung von großen Kuiper-Objekten offenbar nicht abreißt. Seine Bahn ähnelt in Form und Größe der Plutobahn, weshalb auch er zur Gruppe der Plutinos zugeordnet wird. Im Perihel ist er 30.6 AU und im Aphel 48 AU von der Sonne entfernt. Auch die Exzentrizität ($e=0.221$) und die Bahnneigung ($i=20.59^\circ$) unterscheiden sich nicht sonderlich stark von den Werten Pluto's.



Die Bahnellipsen von Pluto (blau) und Orcus (rot) ähneln sich stark in ihrer Form.

Aus photometrischen Beobachtungen und Beobachtungen mit dem Spitzer-Space-Teleskop konnte der Durchmesser in den Bereich 875 -1020 km eingegrenzt werden. Außerdem wurde in dem IAU-Circular vom 22. Februar 2007 die Entdeckung eines Satelliten bekanntgegeben.



Literatur zum Thema

K. Lindner: **Taschenbuch der Astronomie**, Fachbuchverlag Leipzig, 1997

H. Bernhard, K.Lindner, M.Schukowski: **Wissensspeicher Astronomie**, Volk und Wissen 1995

A.Unsöld, B.Baschek: **Der neue Kosmos**, Springer-Verlag 2004

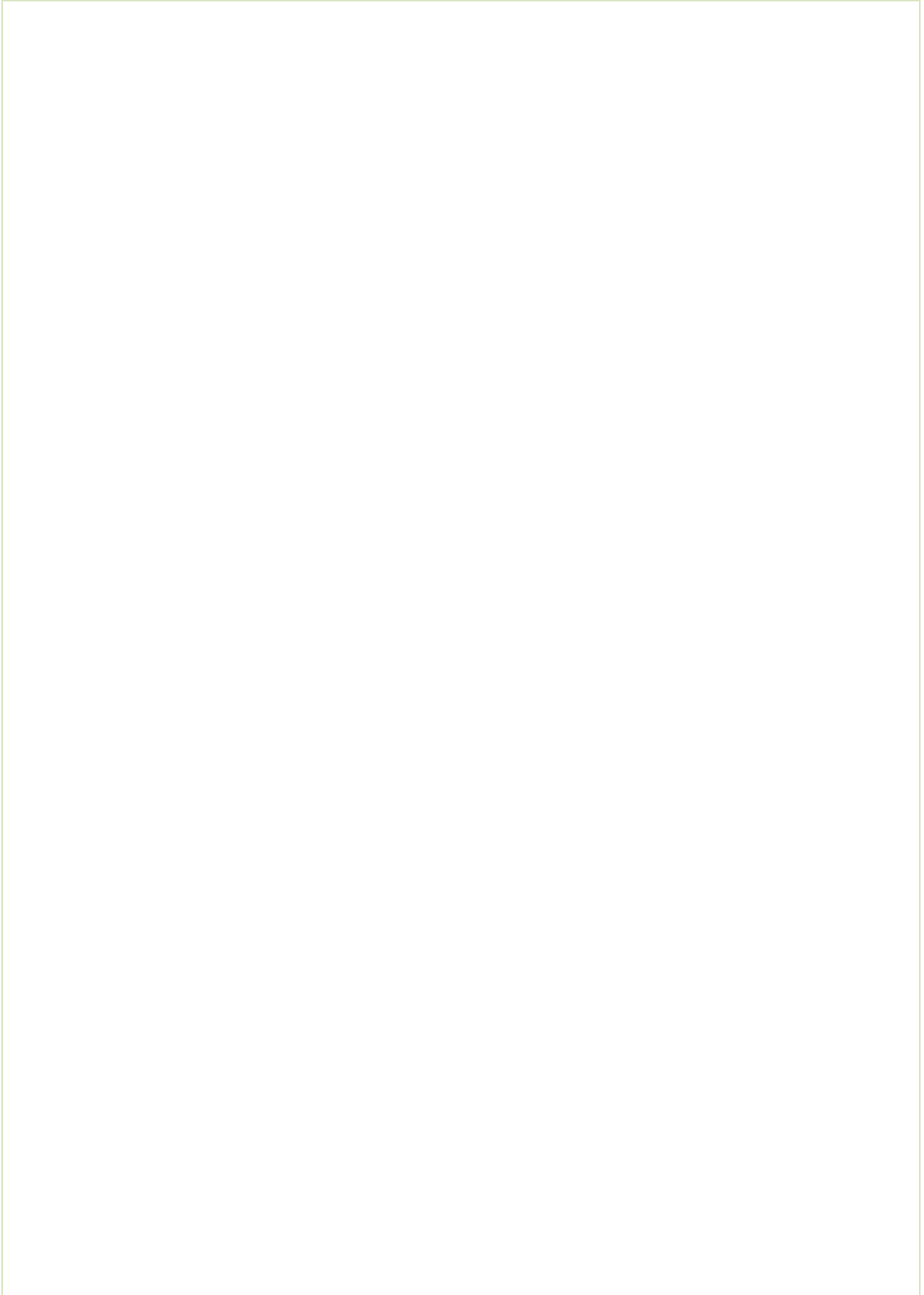
A.Weigert, H.J. Wendker: **Astronomie und Astrophysik**. Ein Grundkurs, Wiley-VCH 2004

H. Karttunen et.al.: **Fundamental Astronomy**, Springer-Verlag 2000

B.W. Jones: **Discovering the Solar System**, Wiley 2000

McBride, Gilmour: **Introduction to the Solar System**, Cambridge University Press 2004

McNab, Younger: **Die Planeten**, RM Buch- und Medienvertrieb 1999



A

AAA-Planetoiden 8, 31
Abwehrszenarien, Impakte 33
Achilles-Gruppe 10
Achondrite 23
Amalthea, Jupitermond 5, 20
AMOR-Familie 8
Annefrank 18
Apohele-Gruppe 7
Apollo-Amor-Familie 25
APOLLO-Familie 7
Apophis 36
ATEN-Gruppe 7
Aubrite 24

B

Baalke, Ron 38
Bertoldi, Frank 69
Binzel, Richard P. 34
Brown, Mike 66, 68
Burney, Venetia 56

C

Cassini, Sonde 5
Castalia 18
CENTAUREN 11
Ceres 2, 4, 16, 18, 37, 65
Charlois, August H.P. 42
Charon, Plutomonnd 6, 54, 58, 60, 65, 66
Chondrite, Enstatit 5
Chondrite, kohlige 4, 24
Christy, James 59, 65
Cubewanos 52
CYBELES-Familie 10

D

Dactyl, Planetoidenmond Ida 40
Dinosaurier 30, 32
Duvall, Robert 25
Dysnomia, Mond Eris 53, 67, 70

E

ECO, earth crossing object 30
Edgeworth, Kenneth Essex 48
Eisenmeteorite 5, 23, 25

EOS-Familie 9
Eris 11, 49, 53, 54, 65, 67, 68, 69, 70
Eros 3, 18, 42, 44, 46

F

Flora-Familie 9, 39

G

Galileo, Sonde 39, 40
Gasptra 18, 21, 39, 41
Gauß, Carl Friedrich 2

H

Harding, Karl Ludwig 2
Hayabusa, Sonde 3, 38, 47
Helin, Eleanor 7
Herschel, Friedrich Wilhelm 4, 56
Hesiod 46
HILDAS-Familie 7, 10
Hirayama, Kiyotsugu 7
Hirayama-Familie 11, 12
Hoyle, Fred 55
HUNGARIAS-Familie 9
Hydra, Plutomonnd 59
Hygeia 16

I

Ida 18, 40, 44
IEO, inner earth objects 8
Itokawa 3, 18, 38, 47
Ixion 11, 49, 66

J

Jewitt, D. 48, 71
Juno 2
Jupiter-TROJANER 10

K

Kaasalainen, Mikko 30
Kirkwood-Lücke 31
Kirkwood-Lücken 6
Klassische KBO's 52
Kometen 4, 30, 32, 36
KORONIS-Familie 9

Kowal, Charles 11, 66
Kuiper, Gerard 48
Kuiper-Belt-Objects 11, 48
Kuiper-Gürtel 13, 66
Kuiper-Objekte 3, 55, 66, 72

L

Leverrier, Urbain J.J. 8
Librationspunkt 10
Loewy, Moritz 41
Lowell, Percival 56
Luu, J.X. 71

M

Marsden 55
Mathilde 18, 41, 43
McKinnon 60
McMillan, R.S. 65
Meteoroid 31, 32
MPC, Minor Planet Center 3
Mueller, S. 60

N

NEAR-Shoemaker, Sonde 3, 38, 41, 42, 46
NEAT-Projekt 7
NEO 7, 25, 30, 33, 34, 35, 36
Neptun 56
Neptun-Trojaner 53
Neuimin, Grigori Nikolajewitsch 39
New Horizons, Sonde 55
Nix, Plutomonnd 59

O

Olbers, Wilhelm 2
Oort, Jan 48
Oortsche Wolke 68
Orcus 72

P

Palermo Technical Impact Hazard Scale 36
Palermo-Zahl 37, 38
Palisa, J. 9
Palisa, Johann 41

Pallas 2, 16
Patriklus-Gruppe 10
PHA, potentially hazardous asteroids 8
PHO 30
PHOCAEAS-Familie 9
Pholus, Cetaur 68
Piazz, Guisepp 2, 37
Pickering, William H. 56
Planetesimal 3
Planetoidendurchmesser, Bestimmung 15
Planetoidengürtel 6
Planetoiden-Massenbestimmung 17
Plutinos 11, 50, 51, 57, 72
Pluto 6, 11, 51, 54, 56, 61, 66, 68, 70, 72
Pluto, Allgemeines 56
Pluto, Atmosphäre 61
Pluto, Innerer Aufbau 60
Pluto, Oberfläche 60
Pluto, Stickstoffzyklus 62

Q

Quaoar 11, 49, 52, 66, 71

R

Rabinowitz, David 68
Redgrave, Vanessa 25
Reflektionsspektren 13
Romanishim, W. 55
Rubincam, David P. 30

S

Scattered KBO's 50, 52
Schröter, Johann Hieronymus 2
Schutthalde, rubble pile 20
Sedna 11, 49, 68
Shoemaker, Eugene 43
SPACEWATCH-Programm 8
Stein-Eisenmeteorite 23
Steinmeteorite 5, 25
Sternfinsternissen 14
Sussman 57
Svetsov, V.V. 32

T

Tegler, S. 55
Tempel, E.W.L. 10
THEMIS-Familie 10
Tholen, D.J. 4
THULE-Familie 10
Titius-Bode'sche Reihe 2
Tombaugh, Clyde W. 56, 65
Torino-Skala 35, 34, 38
Toutatis 18
Transpluto 65
Triton, Neptunmond 54, 60, 61
Trojaner 7, 53
Trujillo, Chadwick 66, 68
Tunguska-Ereignis 32
Twotinos 51

V

Varuna 11, 49, 52, 66
Vesta 2, 16
Voyager 2, Sonde 60
Vulkanoide 8

W

Wetherill 25
Wickramasinghe, N.C. 55
Willis, Bruce 31
Wisdom, Jack L. 6, 57
Witt, Gustav 42, 46
Wolf, Max 5

Y

Yarkovsky, Ivan Osipovich 32
Yarkovsky-Effekt 28, 32
YORP-Effekt 29

Z

Zach, Franz Xaver von 2
Zwergplanet 4, 65
Zwergplaneten 54