

Zwergplanet Ceres – der wasserspeiende Asteroid

In Bezug auf den SuW-Beitrag „Ceres sprüht Wasserdampf ins All“ / Blick in die Forschung (SuW 4/2014)

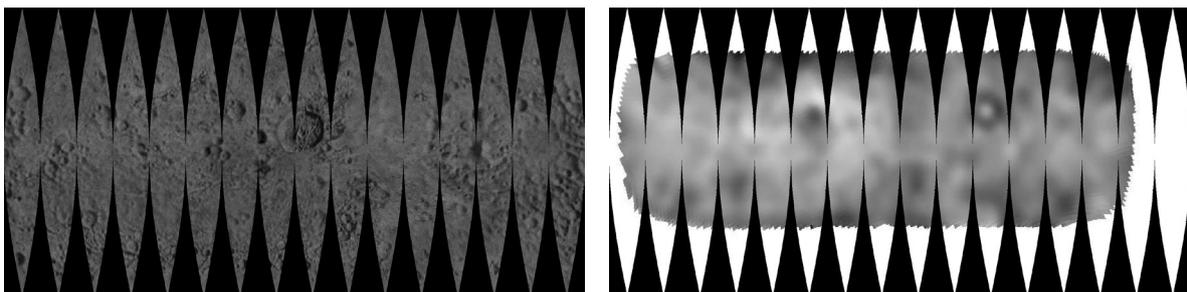
Wolfgang Wieser

Der Asteroidengürtel scheint auf den ersten Blick eine langweilige Ansammlung von unscheinbaren Gesteinsbrocken zu sein, die nur dann in den Fokus der Öffentlichkeit geraten, wenn sie sich auf gefährliche Art und Weise der Erde nähern. Bei genauem Betrachten stellt man dann aber fest, dass sich unter den Himmelskörpern zwischen Mars und Jupiter sehr viele Kandidaten befinden, die interessante Besonderheiten aufweisen. Unter anderem sind sie die uns nächsten Mitglieder des Sonnensystems, die sich seit der Formation des Sonnensystems nicht oder nur kaum verändert haben. Auch deswegen startete die NASA im September 2007 die Raumsonde DAWN, mit der zwei der größten Asteroiden, Ceres und Vesta, besucht werden sollen. Die Erkundung von Vesta wurde im September 2012 abgeschlossen, so dass die Sonde nun auf dem Weg zu Ceres ist, wo sie im Februar 2015 ankommen soll.

Um die die Forschungsaufgaben von DAWN bei Ceres zu präzisieren, werden im Vorfeld sowohl von Weltraumteleskopen wie auch von erdgebundenen Teleskopen Beobachtungen des Zwergplaneten durchgeführt. Mit Hilfe von Nah-Infrarot Beobachtungen, aufgenommen mit dem Keck II Teleskop am Mauna Kea auf Hawaii, konnte eine Karte von Ceres erstellt werden, die unterschiedlich helle Regionen auf der Oberfläche des Asteroiden zeigt. Infrarotbeobachtungen bei deutlich längeren Wellenlängen wurden mit dem Detektor HIFI an Bord des Weltraumteleskops Herschel realisiert. Diese konnten deutliche, zeitlich veränderliche Absorptionssignale von Wasser nachweisen. Es gibt weiterhin Hinweise, dass sich unter der Kruste von Ceres ähnlich viel Süßwasser befindet, wie auf der Erde.

Im vorliegenden Material werden Informationen vermittelt, die das Interesse an der Beschäftigung mit Asteroiden wecken soll. Ein Exkurs in die Kartographie hilft den Schülerinnen und Schülern ein Modell des Asteroiden zu basteln. Weitere Arbeitsbögen stellen einen Zusammenhang zwischen Ceres, der Erde und anderen Körpern im Sonnensystem her.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Physik	Thermodynamik	Energiehaushalt auf einem Asteroiden
Astronomie	Kleinkörper	Entstehung des Sonnensystems
Geologie	Taxonomie	Eigenschaften von Asteroiden
Geographie	Breitenkreise, Kartographie	Entfernungen, Mercator-Projektion
Fächerverknüpfung	Astronomie – Geographie Astronomie – Informatik	Karten, Projektionen Entzerren von Projektionen
Lehre allgemein	Kompetenzen (Fachwissen, Erkenntnisgewinnung), Unterrichtsmittel	Formeln anwenden, Methoden übertragen, Zusammenhänge erkennen, praktische Tätigkeiten

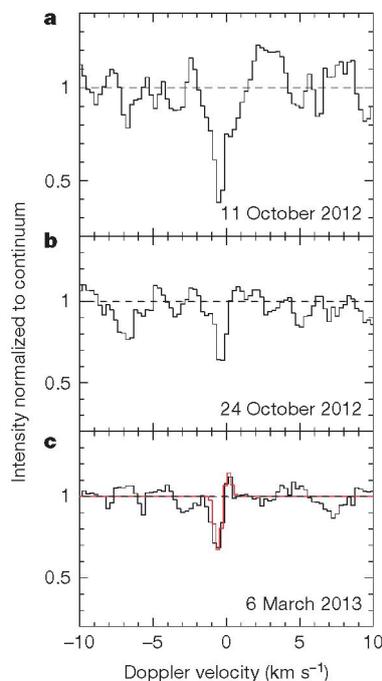


Mögliche Oberflächengestalt des Asteroiden Ceres (links) und die beobachtete Reflexion des Sonnenlichts auf der Oberfläche von Ceres im Infraroten (rechts). Beide Karten können auf eine Styroporkugel geklebt werden und wurden aus einer Mercator-Projektion zurückgerechnet.

Zwergplanet Ceres – der wasserspeiende Asteroid

Astronomische Ausgangslage:

Von 2009 bis 2013 beobachtete das Weltraum-Teleskop Herschel das Weltall im Infrarotlicht. Im April 2013 war der Kühlmittelvorrat – 2367 Liter flüssiges Helium – verbraucht, so dass das Teleskop am 17.06.2013 endgültig abgeschaltet wurde. Kurz vorher, im März 2013, konnten die Untersuchungen des Zwergplaneten Ceres im Asteroidengürtel mit dem an Bord befindlichen Instrument HIFI (Heterodyne Instrument für das Ferninfrarot) abgeschlossen werden. Insgesamt sieben Mal, von November 2011 bis März 2013, wurde das von Ceres reflektierte Licht im Frequenzbereich um 556 GHz analysiert, da bei dieser Frequenz ein Übergang zwischen zwei Rotationszuständen des Wassermoleküls stattfindet. Eine Absorption bzw. Emission von Licht dieser Wellenlänge würde auf ein Vorkommen von Wasser auf Ceres deuten. Am 11.10.2012, 24.10.2012 und 06.03.2013 wurde Herschel fündig und konnte ein starkes Absorptionssignal zur Erde funken.



Absorptionslinie von Wasser bei 556,939 GHz vom Zwergplaneten Ceres, aufgenommen von HIFI an Bord von Herschel:

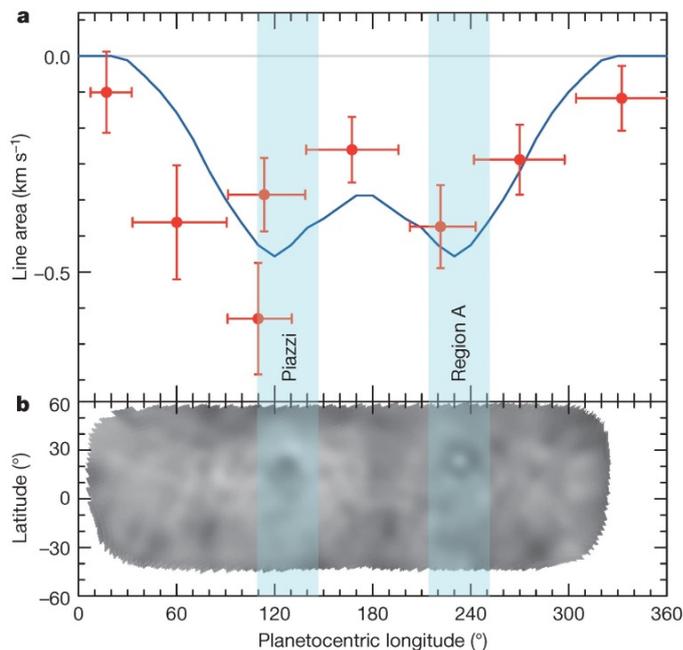
a) Starke Absorption am 11.10.2012, leichte Blauverschiebung der Absorptionslinie – Wasserdampf kommt auf dem Beobachter zu.

b) Deutliche Absorption am 24.10.2012, leichte Blauverschiebung – Wasserdampf kommt auf den Beobachter zu.

c) Deutliche Absorption am 06.03.2013, leichte Blauverschiebung. Daneben eine leicht rotverschobene Emission. Wasser lässt sich somit nicht nur vor Ceres in Absorption beobachten sondern auch daneben als emittierende Wassermoleküle. Die rote Linie zeigt das Ergebnis einer Simulation der Verhältnisse auf Ceres Oberfläche.

(Quelle: Küppers et al. 2014)

Aus der Verschiebung der Absorptionslinie gegenüber der Ruhefrequenz konnte eine Geschwindigkeit des ausströmenden Wasserdampfs von 0,3 – 0,7 km/s ermittelt werden. Die Geschwindigkeitsauflösung von HIFI in diesem Spektralbereich liegt allerdings in der gleichen Größenordnung und beträgt 0,5 km/s, entsprechend einer spektralen Auflösung von 1,1 MHz. Leider gestattete es Herschels räumliche Auflösung von 40 Bogensekunden nicht, den genauen Ort des Wasseraustritts auf Ceres zu lokalisieren. Ceres hatte bei allen Aufnahmen einen Winkeldurchmesser kleiner als einer Bogensekunde. Durch eine geschickte Beobachtungsplanung konnte jedoch der Bereich des Wasseraustritts eingegrenzt werden: Ceres rotiert in 9 Stunden einmal um die eigene Achse. Während dieser Zeit wurden mehrere Messungen vorgenommen und die Stärke der Absorption bestimmt. So konnte die Wassermenge bestimmt werden, die von der aktuell beobachteten Seite von Ceres ausgehen. Zwei Gebiete (Piazzis und Region A) auf dem Zwergplaneten wurden als Quellen des Wasserausstroms identifiziert, die auf Karten als dunkle Gebiete erscheinen. Vermutlich heizen sich diese stärker auf und können dadurch die Sublimation von Wassereis ermöglichen. Die Menge an austretendem Wasserdampf ist allerdings auch auf kurzen Zeitskalen nicht konstant, wie Messungen der Region Piazzis zeigen, die zu einem etwas späteren Zeitpunkt auf eine schwächere Absorption deuten.



Variabilität der Wasserabsorption während der Beobachtungen am 06.03.2013. Die roten Kreuze zeigen die einnehmende Fläche der Absorptionslinie mit entsprechenden Fehlerbalken an. Je tiefer das Kreuz steht, desto mehr Wasserdampf wurde nachgewiesen. Durch die kurzen Beobachtungsintervalle kamen verschiedene Regionen von Ceres in das Blickfeld von Herschel. So konnten die Signalstärken den unterschiedlichen Regionen auf Ceres zugeordnet werden. Die entsprechenden Regionen wurden auf eine Karte von Ceres übertragen b), die aus Nah-Infrarot-Beobachtungen vom Keck II Teleskop auf Hawaii zusammengestellt wurde. Die zwei unterschiedlichen Signalstärken der Region Piazz sprechen für eine kurzfristige Variabilität des Wasseraustritts.

(Quelle Daten: Küppers et al. 2014, Quelle Karte: Carry et al. 2008)

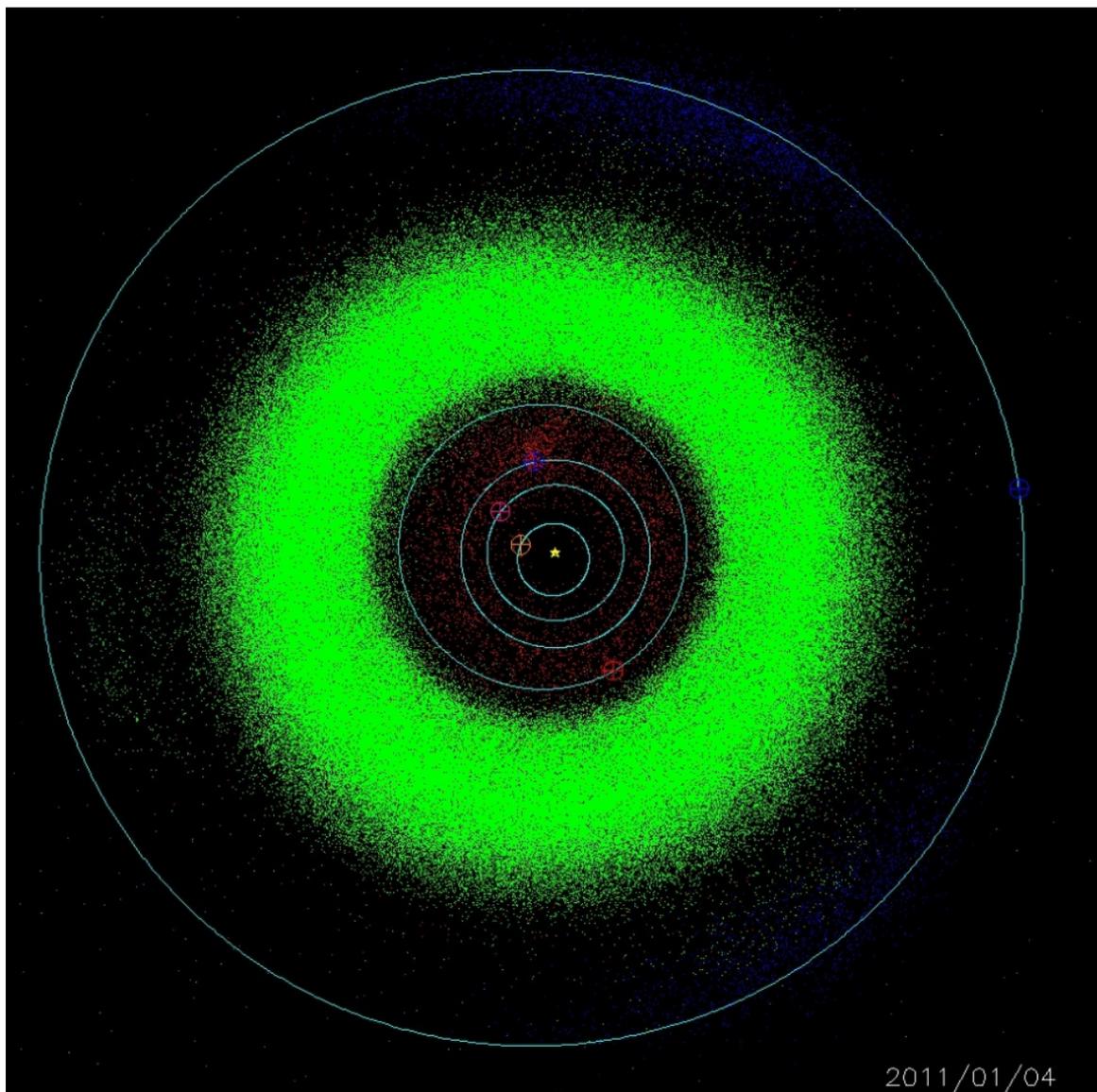
Die Signalstärke ist auch auf längeren Zeitskalen variabel. So zeigte das Spektrum am 23.11.2011 überhaupt keine Absorption von Wasser. Eine Erklärung für die Variabilität über lange Zeiträume könnte der Einfluss des Abstands von Ceres zur Sonne sein. Während der positiven Wasserdetektion befand sich Ceres in der Nähe seines Perihels, weniger als 2,75 Astronomische Einheiten (AE) von der Sonne entfernt, während er sich bei der Nicht-Detektion in einem Sonnenabstand von etwa 3 AE befand.

Um genauere Aussagen über die möglichen Wassermengen und Ausdehnungen der Regionen des Wasseraustritts zu machen, wurden Computersimulationen durchgeführt, die das Ausströmen von Wasserdampf aus räumlich begrenzten Gebieten berücksichtigen und daraus synthetische Absorptionsspektren berechnen. Die Simulationen zeigten, dass ein Teil des Wassers wieder auf Ceres zurückfällt und die Absorptionslinien am besten reproduziert werden können, wenn von einem Auswurf von $2 \cdot 10^{26}$ Wassermolekülen, entsprechend ca. 6 kg Wasser pro Sekunde ausgegangen wird. Für die Sublimation von 1 kg Wassereis sind $2,5 \cdot 10^6$ J notwendig. Der Oberfläche von Ceres müssen demnach pro Sekunde 15 MJ Energie von der Sonne zugeführt werden – also eine Leistung von 15 MW. Bei einer einfallenden Lichtleistung von 50 W pro Quadratmeter, von der ca. die Hälfte für die Sublimation eingesetzt wird, muss also eine Fläche von 0,6 km² das Wasser freisetzen, entsprechend einer Kreisfläche von ca. 440 m Radius. Die identifizierten Regionen auf Ceres, die für die Freisetzung in Frage kommen, haben Durchmesser von etwa 200 km, so dass auch dort nicht überall sondern nur in sehr kleinen Arealen die Sublimation von Wassereis stattfindet.

Die Autoren beschreiben zwei mögliche Mechanismen für die Wasserfreisetzung auf Ceres: Zum einen die oben detailliert beschriebene Sublimation von oberflächennahem Eis durch den Energieeintrag durch die Sonne, ähnlich wie bei einem Kometen. Zum anderen durch warme Schichten im Inneren von Ceres, die durch den Zerfall langlebiger radioaktiver Isotope gewärmt werden. Weitere Informationen darüber, was auf der Oberfläche von Ceres tatsächlich passiert, wird die Raumsonde DAWN liefern, die Ceres im Februar 2015 besuchen wird.

Der Nachweis der Existenz von Wassereis unter der Oberfläche von Ceres ist in zweierlei Hinsicht eine sehr interessante Entdeckung. Er gibt Hinweise auf den Entstehungsort von Ceres im Speziellen und der Asteroiden im Allgemeinen, da normalerweise erst jenseits von fünf AE die Temperaturen niedrig genug sind, um mit gefrorenem Wasser zu rechnen. Des Weiteren vermuten Wissenschaftler (Phillips 2014), dass Ceres eine ebenso große Menge an Süßwasser in Form von Eis oder als Hydrat an Mineralien gebunden transportiert wie die Erde. Die Frage nach dem Ursprung des irdischen Wassers könnte somit neue Nahrung erhalten und macht die Erforschung von Asteroiden so interessant.

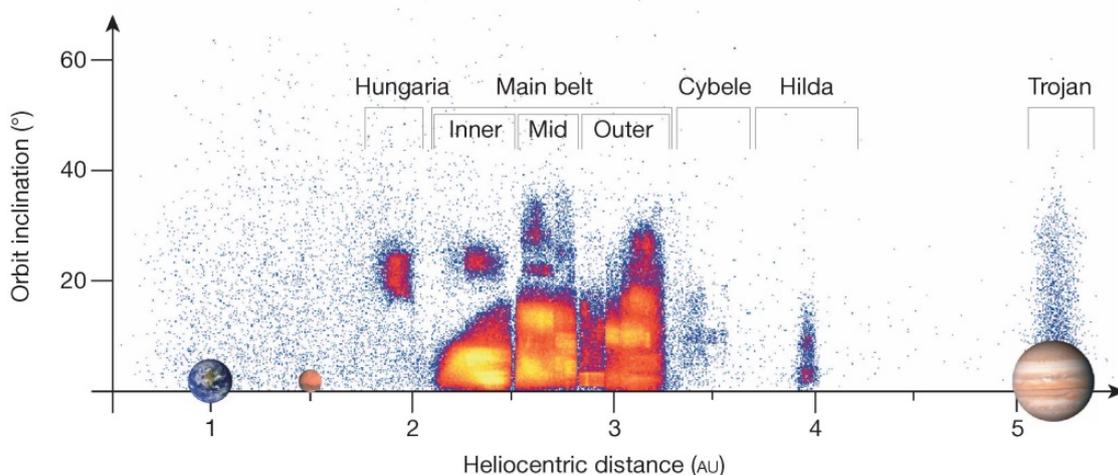
Noch bis in die 1980er Jahre war für die Wissenschaftler der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter eine Ansammlung von Gesteinsbrocken, die den Zusammenschluss zu einem Planeten nicht geschafft hatten. Eine Animation des Minor Planet Centers simuliert in Zeitraffer die Bewegung der bekannten Himmelskörper bis zum Jupiter hinaus in einer Zeitspanne von zwei Erdjahren (<http://www.minorplanetcenter.net/iau/Animations/Animations.html>). Betrachtet man diese Simulation könnte man leicht der Theorie der fehlgeschlagenen Planetenbildung folgen, da in diesen Bildern eine detaillierte Klassifikation der Asteroiden nicht möglich ist.



Snapshot einer Animation des Minor Planet Centers die das Sonnensystems bis zum Jupiter zeigt. Zu sehen sind Near-Earth Asteroiden (rot), Asteroiden des Haupt-Asteroidengürtels (grün) sowie Trojaner (blau) des Jupiter, die sich in der Nähe der Lagrangepunkte L2 und L3 befinden.

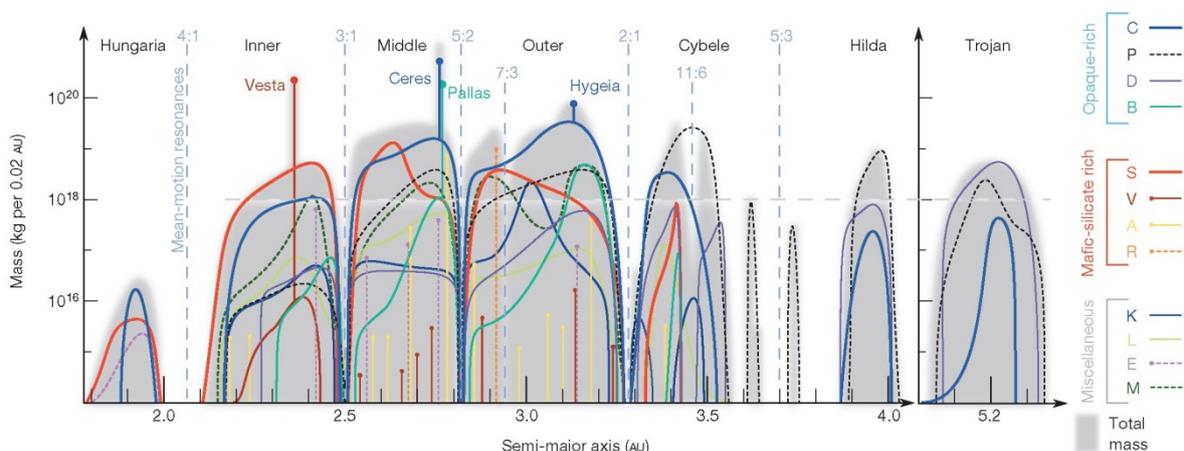
Die Analyse des an den Asteroiden reflektierten Sonnenlichts zeigte, dass ein Teil der Asteroiden eher langwelliges Licht reflektieren („rote“ Asteroiden), der andere eher kurzwelliges Licht („blaue“ Asteroiden). Die Ursache sahen Wissenschaftler in der unterschiedlichen thermischen Entwicklung der Asteroiden und damit in einem Temperaturgradienten bei der Entstehung des Sonnensystems. Die „roten“ Asteroiden befanden sich danach näher an der Sonne, sind aufgeschmolzen und wieder erstarrt, während die „blauen“ Asteroiden keine größeren thermischen Veränderungen erfahren hätten. Unser Sonnensystem wäre demnach seit seiner Entstehung ein sehr statisches Gebilde.

Nach der Entdeckung von über einer halbe Millionen Asteroiden und der Analyse der Reflexionseigenschaften sowie der Nah-Infrarot-Spektren von einigen Tausenden von ihnen hat sich das Bild gewandelt. Trägt man den Neigungswinkel (Inklination) ihrer Bahn um die Sonne gegen ihren Abstand von der Sonne auf, kann man erste Unterschiede in der Verteilung der Asteroiden erkennen:



Inklination der Asteroidenbahnen gegen ihren Abstand von der Sonne. Die Farbe gibt die Dichte an Himmelskörpern an: gelb markiert eine sehr große Anzahl an Asteroiden, blau zeigt nur einzelne Asteroiden an. (Quelle: DeMeo & Carry 2014)

Eine weiter Analyse ihrer spektralen Eigenschaften führte zu einer Einteilung der Asteroiden in 26 Typen (Bus 1999) bzw. 24 Typen (DeMeo 2007) mit z.T. sehr unterschiedlichen mineralischen Zusammensetzungen. Trägt man die Masse aller Asteroiden in einer Kugelschale der Dicke 0,02 AE in einem bestimmten Abstand von der Sonne gegen den Abstand der Kugelschale von der Sonne auf, ergibt sich folgendes Bild:



Gesamtmasse (grau) aller Asteroiden in einer Kugelschale mit Dicke 0,02 AE im Abstand r von der Sonne gegen r aufgetragen. Jede farbige Kurve repräsentiert einen anderen Asteroiden-Typen und zeigt seine Massenverteilung unter den Asteroiden. (Quelle: DeMeo & Carry 2014)

Es lässt sich keine eindeutige Zuordnung der Asteroiden-Typen zu einem bestimmten Sonnenabstand machen. So finden sich Asteroiden vom Typ C in einem Bereich von 1,5 AE bis 5,2 AE. Gesteinsbrocken, die mit Jupiter um die Sonne ziehen, d.h. Trojaner vom Typ D finden sich auch im inneren Asteroidengürtel bei 2,4 AE. Diese Verteilungen stehen in krassem Widerspruch zu einem statischen Sonnensystem. Damit ist auch der Ursprung von Ceres spekulativ. Ein dynamisches Modell (Nizza-Modell) beschreibt die Migration der Gasplaneten im frühen Sonnensystem und die Konsequenzen für kleinere Gesteinsbrocken wie Asteroiden und Zwergplaneten. Numerische Simulationen des ersten Megajahrs des Sonnensystems zeigen, dass Uranus und Saturn die Plätze getauscht haben und Gesteinsmaterial aus dem Inneren des Sonnensystems in den Kuper-Gürtel transportiert wurde. Im Gegenzug wurden Kleinkörper aus der Uranusregion in Sonnennähe gebracht (DeMeo & Carry 2014). Es ist somit durchaus möglich, dass Ceres in einer Entfernung von 8 AE entstanden ist und in den Asteroidengürtel gestreut wurde (McKinnon 2012).

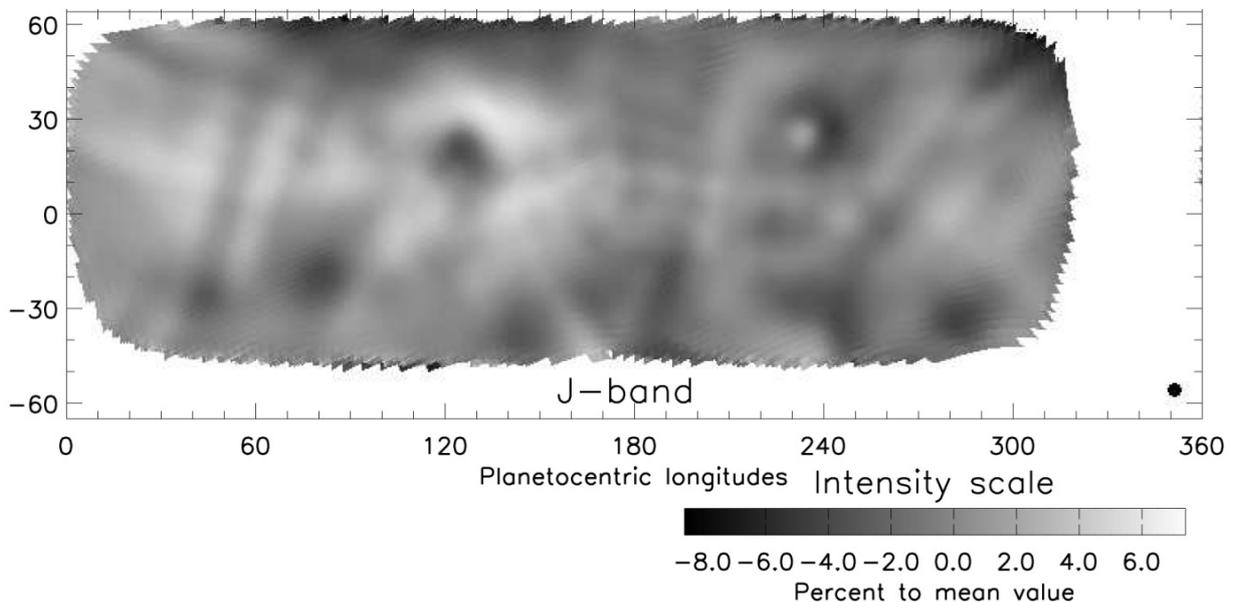
Untersuchungen zum Ursprung des Wassers auf der Erde zeigen, dass es nur aus einem relativ kleinen Raumbereich im Sonnensystem stammen kann. Schon die Asteroiden aus dem inneren Bereich des Asteroidengürtels bei 2,5 AE sind zu wasserarm, als dass sie bei Zusammenstößen mit der Erde ausreichend viel Wasser auf den Planeten hätten bringen können. Kollisionen mit Himmelskörpern aus dem inneren Sonnensystem ($r < 2,5\text{AE}$) scheiden damit für den Wasserhaushalt der Erde aus. Körper aus dem äußeren Sonnensystem enthalten relativ viel Wasser. Dieses weist allerdings ein anderes Verhältnis von Wasserstoff zu Deuterium auf als das irdische Wasser. Als Wasserlieferant bleiben demnach nur Objekte zwischen dem äußeren Asteroidengürtel und der Jupiter-Saturn-Region (Drouart et al. 1999). In einem dynamischen Modell untersuchten Morbidelli et al. (2000) woher genau die Himmelskörper stammen sollten, die genügend Wasser mit dem richtigen Wasserstoff-Deuterium-Verhältnis auf die Erde gebracht haben. Ihre Ergebnisse zeigen, dass massereiche Vorläufer von Planeten (Planetesimale) aus dem Asteroidengürtel mit der jungen Erde kollidiert sein müssten. Diese Planetesimale entstammten allerdings aus dem Raumbereich zwischen 2,5 AE und 10 AE mit genügend Wasser der richtigen Zusammensetzung und sind in der Frühphase des Sonnensystems in den Asteroidengürtel gestreut worden. Ceres könnte ein letzter Zwergplanet aus dieser Migrationsphase sein, der nicht mit der Erde zusammengestoßen ist. Wenn es zusätzlich möglich wäre, dass mit dem Wasser auch organische Moleküle auf die Erde gekommen sind, ist eine genauere Erforschung von Ceres noch spannender. Vielleicht befinden sich im Wassereis von Ceres auch noch organische Moleküle.

Bau eines Modells von Ceres

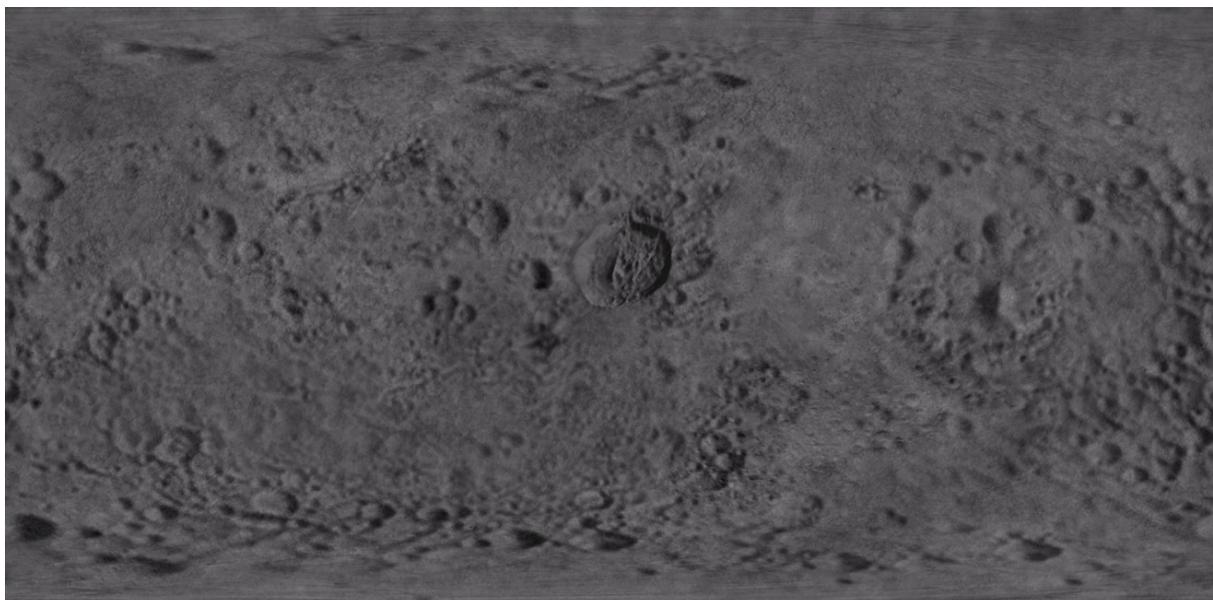
Ceres ist ein Zwergplanet im mittleren Teil des Haupt-Asteroiden-Gürtels zwischen Mars und Jupiter. Seine Form ist ein Sphäroid mit einem Äquatorradius von $a = 479,7$ km und einem Polradius von $b = 444,4$ km. Seine Abplattung $f = 1 - \frac{b}{a}$ beträgt demnach 0,074. Zum Vergleich: Die Abplattung von Jupiter liegt bei 0,065, die der Erde bei 0,004.

Für den Bau eines Ceres-Modells wird der Zwergplanet als Kugel angenommen.

Mit Hilfe des Keck II Teleskops am Mauna Kea auf Hawaii wurde Ceres im Nah-Infraroten ($1,2 \mu\text{m}$) fotografiert und eine Karte mit einer Auflösung von 37 km pro Bildpunkt erstellt (Carry et al. 2008). Die Karte ist eine Mercator-Projektion, also eine entzerrte Zylinderprojektion mit gleichem Maßstab in Nord-Süd-Richtung wie in Ost-West-Richtung.



Teile des Asteroiden, insbesondere die Polregionen, sind noch nicht beobachtet wurden und erscheinen hier weiß. Eine alternative Oberflächenkarte ist unten zu sehen. Diese hypothetische Oberfläche ist die anderer Asteroiden nachempfunden und zeigt zwei große Strukturen ähnlich wie die Regionen A und Piazzi:





Die Karte des Keck II Teleskops wird so weit nach Süden und Norden ausgedehnt, dass die Karte bis zu den Polen reicht:

Um die Karte auf einer Kugel zu befestigen, müssen die Bereiche an den Polen entzerrt werden, denn nur die Länge des Äquators entspricht – unter Berücksichtigung des Maßstabs – dem tatsächlichen Umfang von Ceres. Je weiter man auf der Karte nach Norden bzw. Süden geht, desto stärker ist die Abweichung:

Aufgaben:

1) Die Karte ist 15 cm breit. Bestimme den Maßstab mit dem Ceres abgebildet wurde.

In Wirklichkeit beläuft sich der Umfang von Ceres auf: $U = 2\pi r = 2\pi \cdot 479,8 \text{ km} = 3014 \text{ km}$

Die Äquatorlänge auf der Karte entspricht 15 cm

Maßstab: $M = 15 \text{ cm} : 301,4 \text{ Mio cm} = 1: 20 \text{ Mio}$

2) Region A befindet sich bei einer Länge von 240° und einer nördlichen Breite von 30° . Wie lang ist der 30° -Breitengrad in Wirklichkeit und wie lang müsste er auf der Karte sein?

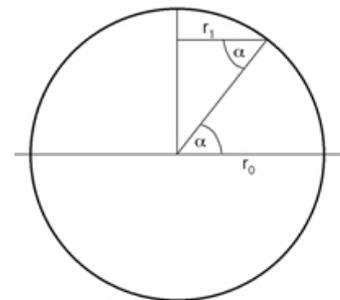
Um den Umfang des Breitenkreises zu bestimmen, benötigt man den Abstand eines Punktes auf dem Breitenkreis zur Rotationsachse:

$$r_{\text{Breitenkreis}} = r_{\text{Ceres}} \cdot \cos(\text{Breitengrad})$$

Dem entsprechend gilt auch für den Umfang des Breitenkreises:

$$U_{\text{Breitenkreis}} = U_{\text{Ceres}} \cdot \cos(\text{Breitengrad})$$

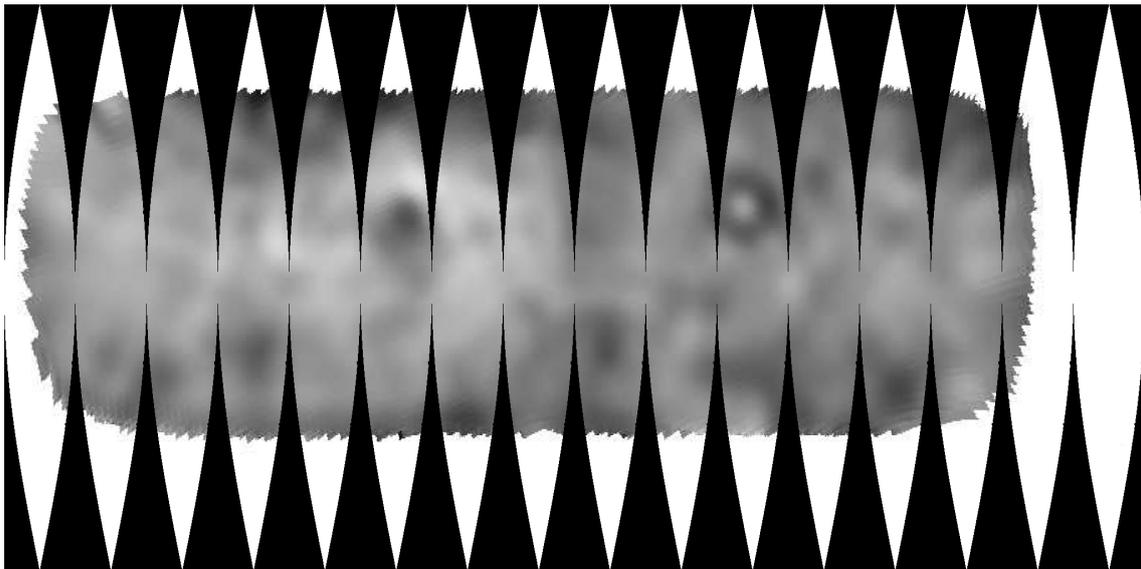
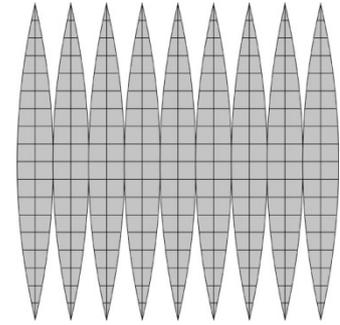
$$U_{\text{Breitenkreis}} = 2610 \text{ km} \text{ entspr. } 13 \text{ cm}$$



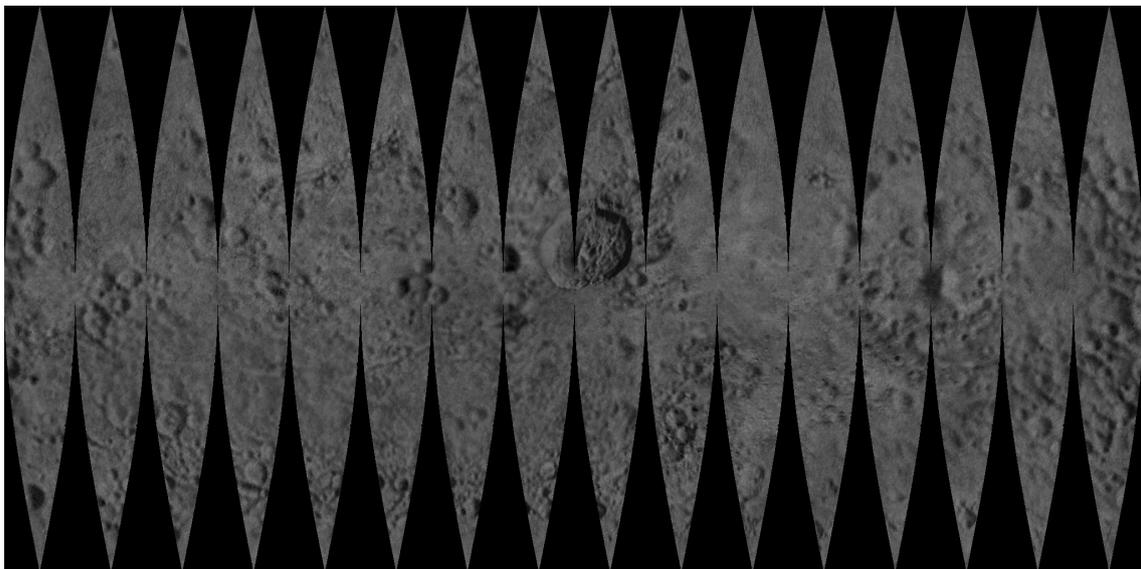
Hinweis: Bei diesem Winkel von 30° kann man auch mit elementargeometrischen Überlegungen (gleichseitiges Dreieck) auf die Verkürzung des Radius um den Faktor $0,5 \cdot \sqrt{3}$ kommen.

Erst bei größeren Entfernungen vom Äquator machen sich die Verzerrungen der Mercator-Projektion bemerkbar. Um die richtigen Längen der Breitenkreise darzustellen, müsste die Karte dann wie rechts dargestellt aussehen.

Dabei darf die ursprüngliche Karte in den Polargebieten nicht einfach zerschnitten werden. In der Nähe der Pole wurden die Informationen in Ost-West-Richtung gedehnt um die Mercator-Projektion zu erhalten. Um diese rückgängig zu machen, müssen die gedehnten Informationen wieder gestaucht werden. Dies kann ein einfaches Computerprogramm erledigen. Das Ergebnis sieht für die von Keck II erstellte Karte folgendermaßen aus:



Für die hypothetische Oberfläche:



Diese Karten können nun ausgeschnitten und auf eine Styroporkugel geklebt werden. Der Durchmesser der Kugel richtet sich nach der Größe der Karte: Bei einem Äquatorumfang von 15 cm muss die Kugel einen Durchmesser von $D = U/\pi$ haben. In diesem Fall also 4,8 cm. Um bei vorgegebener Kugelgröße eine entsprechende Karte herstellen zu können, ist im Anhang eine vergrößerte Karte dargestellt, die entsprechend vergrößert/verkleinert kopiert werden kann. Die Programmier-Routine in der Sprache Visual C# zum Erstellen einer solchen Karte wird separat bereitgestellt.

Ceres und das Sonnensystem

Mit diesem Ceres-Modell kann man das Sonnensystem maßstabsgetreu darstellen

Aufgabe:

Mit obiger Karte hat man ein Modell im Maßstab 1:20 Millionen hergestellt. Berechne folgende Größen und Entfernungen im inneren Sonnensystem:

	Tatsächliche Größe	Im Modell
Erddurchmesser	12,7 Tsd. km	63 cm
Sonnendurchmesser	1,39 Mio. km	69 m
Weiteste Entfernung von Ceres zur Sonne	448 Mio. km	22 km
Kürzeste Entfernung von Ceres zur Sonne	382 Mio. km	19 km
Entfernung der Erde zur Sonne	150 Mio. km	7,5 km

Obwohl eine Kugel von ca. 5 cm Durchmesser als Modell von Ceres nicht besonders groß ist, zeigen diese Vergleiche die riesigen Größen- und Entfernungsverhältnisse in unserem Sonnensystem.

Ceres und der Wasservorrat

Der Vergleich Ceres vs. Erde im Modell 5cm vs. 63 cm lässt die Aussage der Wissenschaftler, Ceres könnte genauso viel Süßwasser besitzen wie die Erde, kaum glaubhaft erscheinen. Die gesamte Wassermenge unseres Planeten verteilt sich auf 71 % der Erdoberfläche und beläuft sich auf 1,4 Mrd. km³, wobei davon nur 3 % Süßwasser sind.

Aufgaben:

1) Angenommen das gesamte Wasser von der Erde ins Weltall gesaugt und bildet dort auf Grund der Oberflächenspannung und Eigengravitation einen Wasserplaneten.

a) Wie groß wäre dessen Durchmesser?

b) Wie groß wäre eine Kugel volle Süßwasser? Vergleiche diesen hypothetischen Süßwasserplaneten mit Ceres.

Zu a)

Für eine Kugel gilt: $V = \frac{4}{3}\pi r^3$. Der Radius des Planeten mit dem gesamten irdischen Wasser beträgt 694 km, d.h. der Durchmesser 1388 km (2/5-tel des Monddurchmessers).

Zu b)

Der Süßwasserplanet hätte einen Radius von 215 km und damit einen Durchmesser von 431 km. Im oben benutzten Maßstab wäre das eine Kugel mit 2,1 cm Durchmesser – kleiner als Ceres von dem man annimmt, dass er 25 % Gewichtsanteile an Wasser besitzt.

2) Um wieviel Meter würde der Meeresspiegel steigen, wenn Ceres seinen Wasservorrat (25 % seiner Masse von $896 \cdot 10^{18} \text{ kg}$) auf der Erde deponieren würde. Gehe vereinfachend davon aus, dass das zusätzliche Wasser einfach auf die vorhandene Wasseroberfläche „gestapelt“ würde.

Wassermenge auf Ceres: 25 % von $896 \cdot 10^{18} \text{ kg} = 2,24 \cdot 10^{20} \text{ kg}$ entspr. $2,24 \cdot 10^{17} \text{ m}^3$
= 224 Mio. km³.

Wasserfläche auf der Erde: 71 % von $4\pi r^2$ also 363 Mio. km².

Stapelhöhe: $224 \text{ Mio. km}^3 : 363 \text{ Mio. km}^2 = 617 \text{ m}$

Ceres und die Sonneneinstrahlung

Als eine mögliche Ursache für die Sublimation von Wassereis auf Ceres gilt der erhöhte Energieeintrag auf die Asteroiden-Oberfläche in der Nähe des Perihels.

Aufgaben:

1) Den Erdboden erhält von der Sonne bei senkrechter Einstrahlung pro Sekunde etwa 1367 J pro Quadratmeter. Wie groß ist die Lichtleistung pro Quadratmeter, die bei Ceres im Perihel und im Aphel ankommt?

Bis zur Erde verteilt sich die von der Sonne abgegebene Leistung auf eine Kugeloberfläche mit Radius: 1 AE. Im Aphel ist Ceres 2,99 AE von der Sonne entfernt. Demnach gilt:

$$S_{Ceres} = S_{Erde} \cdot \frac{4\pi r_{Erde}^2}{4\pi r_{Ceres}^2} \rightarrow S_{Ceres} = S_{Erde} \cdot \frac{r_{Erde}^2}{r_{Ceres}^2} = 153 \text{ W/m}^2$$

Im Perihel ist Ceres 2,55 AE entfernt und erhält dem entsprechend 210 W/m².

Die berechneten Werte gelten nur bei senkrechtem Einfall. Insgesamt kommt auf dem gesamten Zwergplaneten so viel Leistung an, wie von einer Scheibenfläche mit dem gleiche Radius wie Ceres aufgefangen wird ($A = \pi r^2$). Diese Leistung verteilt sich nun auf die gesamte Oberfläche ($A = 4\pi r^2$). Effektiv steht somit nur ein Viertel der eingestrahlt Leistung für den gesamten Asteroiden zur Verfügung, d.h. 38 W/m² im Aphel und 53 W/m² im Perihel.

2) Bei einer Leistungszufuhr von ca. 50 W/m² werden pro Sekunde 6 kg Wasser sublimiert. Die dafür notwendige Energie beläuft sich zu $2,5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$.

a) Wie viel kg Eis können somit pro Sekunde von jedem Quadratmeter sublimieren?

b) Wie groß muss die Eisfläche sein, damit von dieser in einer Sekunde 6 kg Eis als Dampf die Oberfläche verlassen?

Zu a)

Pro Sekunde stehen jedem Quadratmeter 50 J zur Verfügung. Um 2,5 Mio. J zu erreichen die für die Sublimation von 1 kg Eis benötigt werden, vergeht eine Zeit von 50000 Sekunden. In einer Sekunde sublimieren demnach 1/50000 kg also 0,02 g.

Zu b)

Die benötigte Fläche ist $6 \text{ kg/s} : 0,02 \text{ g/(s} \cdot \text{m}^2) = 0,3 \text{ km}^2$, wenn die gesamte Sonnenenergie in die Sublimation fließt.

Weiterführende Aufgaben:

Die unterschiedlichen Energieeinträge im Perihel und Aphel lassen sich auch mit dem Ceres-Modell simulieren. Bestrahlt man mit einer 100 W Glühbirne zwei Ceres Modelle, die man in unterschiedlichem Abstand von der Glühbirne positioniert, kann man mit Hilfe eines Infrarot-Thermometers nach gleichen Zeiten unterschiedliche Temperaturen messen. Dieser Versuchsaufbau kann auch dazu hergenommen werden, ein Abstandsgesetz für die Energieverteilung anzusetzen.

Literatur

Bus, S.J., Compositional structure in the asteroid belt: results of a spectroscopic survey, Doctoral thesis, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1999

Carry, B. et al., Near-Infrared Mapping and Physical Properties of the Dwarf-Planet Ceres, A&A 478/1, S. 235-244, 2008

DeMeo, F.E. & Carry, B., Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt, Nature 505, S. 629-634, 2014

DeMeo, F.E.; DeMeo Taxonomy: Categorization of Asteroids in the Near-Infrared, Master thesis, MIT, Cambridge, Massachusetts, 2007

Drouart, A. et al., Structure and Transport in the Solar Nebula from Constraints on Deuterium Enrichment and Giant Planets Formation, Icarus 140/1, S. 129-155, 1999

Küppers, M. et al., Localized sources of water vapour on the dwarf planet (1) Ceres, Nature 505, S. 525-527, 2014

McKinnon, W.B., Where did Ceres accrete? Asteroids, Comets, Meteors, 2012

Morbidelli, A., Source regions and time scales for the delivery of water to Earth, M&PS 35/6, S. 1309-1320, 2000

Phillips, T., Water Detected on Dwarf Planet Ceres, Online verfügbar unter: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/22jan_ceres/ [Stand: 14.03.2014]

