

# Asteroiden



**Thomas Hebbeker**

Professor für Experimentalphysik an der RWTH Aachen University  
und Amateurastronom

2024

## **Impressum**

Autor: Thomas Hebbeker

Copyright für alle Texte: Thomas Hebbeker

Copyright für die Bilder ohne Referenz: Thomas Hebbeker

März 2024

Die Weiterempfehlung des Buches ist erwünscht!

Für Verbesserungsvorschläge und Fehlermeldungen bin ich dankbar!



## Vorrede

Wie langweilig! Winzige Pünktchen am Nachthimmel, die man ohne Fernglas nicht mal sehen kann! So ähnlich habe ich vor einigen Jahren auch über Asteroiden gedacht, obwohl ich als Physiker und Amateurastronom durchaus ein gewisses Grundinteresse für alles Kosmische mitbrachte. Im Vergleich zu Kometen, die manchmal mit dem Auge beobachtbar sind und spektakuläre Bilder liefern, fristen die Asteroiden eher ein Schattendasein in der öffentlichen Wahrnehmung. Lediglich frühere Asteroideneinschläge auf der Erde und die Gefahr möglicher zukünftiger Kollisionen mit unserem Planeten stimulieren das Interesse der Medien.

Mit der Zeit ist meine Beachtung dieser Felsbrocken aber gewachsen, nicht zuletzt deshalb, weil ich selbst einige Beobachtungen von Asteroiden und Bahnmessungen durchgeführt habe. Es ist erstaunlich, welche Genauigkeit man dabei heute mit amateurastronomischen Mitteln erzielen kann. Und die professionelle Astronomie wartet regelmäßig mit faszinierenden Projekten und Ergebnissen auf, zum Beispiel mit Berichten über Raumsonden, welche Asteroiden Besuche abstatten.

Dieses Buch richtet sich an wissenschaftlich Interessierte und an Amateurastronomen. Ich versuche - etwa im Stil von 'Frequently Asked Questions' - in kurz gehaltenen und thematisch abgeschlossenen Kapiteln auf bestimmte Aspekte wie Beobachtungsmöglichkeiten, Bahnkurven von Asteroiden oder Gefahren durch irdische Einschläge einzugehen. Daher kann man nach dem Lesen der folgenden zwei Kapitel 1 und 2 ohne Probleme zu anderen Themen 'springen'. Die weitgehende Eigenständigkeit der einzelnen Kapitel bedeutet, dass es auch mal zu inhaltlichen Wiederholungen kommen kann.

Das Titelbild zeigt eine Überlagerung von eigenen Aufnahmen des Asteroiden (143649) 2003 QQ<sub>47</sub> beim Durchgang durch das Sternbild Andromeda, die mit Hilfe eines Teleskops gemacht wurden. Die sichtbare 'Spur' des Kleinplaneten entspricht einem Zeitraum von einer Stunde, der zeitliche Abstand zwischen zwei Fotos betrug eine Minute. Der Mond war nicht in der Nähe (er ist niemals im Sternbild Andromeda zu sehen!), er wurde lediglich für einen Größenvergleich eingeblendet.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorrede</b>	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Ein Asteroid - was ist das?</b>	<b>1</b>
<b>2 Welche Namen gibt man Asteroiden?</b>	<b>9</b>
<b>3 Kann man Asteroiden sehen?</b>	<b>15</b>
3.1 Helligkeiten . . . . .	15
3.2 Feldstecher . . . . .	17
3.3 Teleskop . . . . .	21
<b>4 Wie bewegen sich die Asteroiden?</b>	<b>25</b>
4.1 Ellipsen . . . . .	25
4.2 Bahnelemente der Asteroiden . . . . .	28
4.3 Trojaner und Co . . . . .	30
4.4 Keplersche Gesetze . . . . .	33
4.5 Rekorde . . . . .	33
4.6 Strukturen und Instabilitäten . . . . .	35
4.7 Geschwindigkeiten . . . . .	38
4.8 Irdische Perspektive . . . . .	40

<b>5</b>	<b>Wie klassifiziert man Asteroiden?</b>	<b>45</b>
5.1	Klassifizierung nach Bahneigenschaften . . . . .	45
5.2	Klassifizierung nach Oberflächenmerkmalen . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Was wissen wir über die Eigenrotation?</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Wie wurden die ersten Asteroiden entdeckt?</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>Gibt es besonders interessante Asteroiden?</b>	<b>61</b>
8.1	Asteroid (3200) Phaethon . . . . .	61
8.2	Asteroid (69230) Hermes . . . . .	62
8.3	Asteroid (16) Psyche . . . . .	65
<b>9</b>	<b>Was ist das Besondere an den Zwergplaneten?</b>	<b>69</b>
9.1	Haumea – eine Hawaiische Göttin . . . . .	70
9.2	Makemake – eine kalte Eiswelt . . . . .	72
9.3	Eris – der zehnte Planet? . . . . .	73
9.4	Sedna und Co. . . . .	75
<b>10</b>	<b>Kann man Asteroiden fotografieren?</b>	<b>77</b>
10.1	Asteroidenfotos mit einfachen Mitteln . . . . .	77
10.2	Fotografie mit Nachführung . . . . .	79
10.3	Asteroideneinschläge auf dem Mond . . . . .	81
10.4	Asteroiden-Marathon . . . . .	81
<b>11</b>	<b>Wie vermisst man Asteroiden?</b>	<b>87</b>
11.1	Ort und Zeit . . . . .	88
11.2	Abstand eines Asteroiden von der Erde . . . . .	92
11.3	Schwankende Helligkeiten . . . . .	92
11.4	Wenn Asteroiden ferne Sterne verfinstern... . . . .	94

11.5	Asteroiden vor Sonne oder Mond? . . . . .	98
11.6	Radar-Überwachung . . . . .	101
11.7	Aufnahmen mit Großteleskopen . . . . .	102
11.8	Masse und Gewicht . . . . .	105
11.9	Einige Messergebnisse . . . . .	106
11.10	Spektroskopie von Asteroiden . . . . .	108
11.11	Professionelle Observatorien . . . . .	115
<b>12</b>	<b>Was können Amateurastronomen messen?</b>	<b>119</b>
12.1	Entdeckungen . . . . .	121
12.2	Positionen . . . . .	122
12.3	Abstände . . . . .	127
12.4	Helligkeiten und Lichtkurven . . . . .	130
12.5	Spektren . . . . .	131
12.6	Sternbedeckungen . . . . .	132
<b>13</b>	<b>Welche Sonden haben Asteroiden besucht?</b>	<b>137</b>
13.1	Übersichtstabellen . . . . .	137
13.2	Die Erkundung von (433) Eros . . . . .	142
13.3	Hayabusa2 sammelt Asteroidengestein . . . . .	143
13.4	Ein Asteroid wird aus der Bahn geworfen . . . . .	146
<b>14</b>	<b>Wie sind die Asteroiden entstanden?</b>	<b>151</b>
14.1	Die Entstehung des Sonnensystems . . . . .	151
14.2	Die Geschichte der Asteroiden . . . . .	157
<b>15</b>	<b>Woraus bestehen Asteroiden?</b>	<b>163</b>
<b>16</b>	<b>Wie verändern sich Asteroiden mit der Zeit?</b>	<b>169</b>

16.1	Berührungen und mehr . . . . .	169
16.2	Bahnänderungen . . . . .	170
16.3	Selbstzerstörung . . . . .	173
16.4	Erosion . . . . .	176
<b>17</b>	<b>Kann es Leben auf Asteroiden geben?</b>	<b>177</b>
17.1	Suche nach Leben auf Asteroiden . . . . .	178
17.2	Kolonisation von Asteroiden . . . . .	181
<b>18</b>	<b>Können auch Asteroiden Monde haben?</b>	<b>183</b>
<b>19</b>	<b>Können Asteroiden mit der Erde kollidieren?</b>	<b>187</b>
19.1	Geschwindigkeiten und Energien . . . . .	188
19.2	Was bisher geschah . . . . .	191
19.3	Was passiert bei einem Einschlag? . . . . .	195
19.4	Wie häufig sind Einschläge? . . . . .	195
19.5	Wie hoch ist das Risikopotential eines großen Asteroidenein- schlags? . . . . .	196
19.6	Welche zukünftigen Kollisionen werden heute vorhergesagt? . .	200
19.7	Sind auch winzige Meteoriten gefährlich? . . . . .	202
19.8	Kann man Kollisionen mit Asteroiden verhindern? . . . . .	206
<b>20</b>	<b>Kann man Asteroiden nutzen?</b>	<b>209</b>
<b>21</b>	<b>Gibt es Exoasteroiden?</b>	<b>213</b>
<b>22</b>	<b>Asteroiden und (Science-)Fiction?</b>	<b>217</b>
	<b>Dank</b>	<b>223</b>
	<b>Bildnachweise</b>	<b>227</b>

*INHALTSVERZEICHNIS*

ix

**Literaturverzeichnis**

**241**

**Index**

**241**





# Kapitel 1

## Ein Asteroid - was ist das?

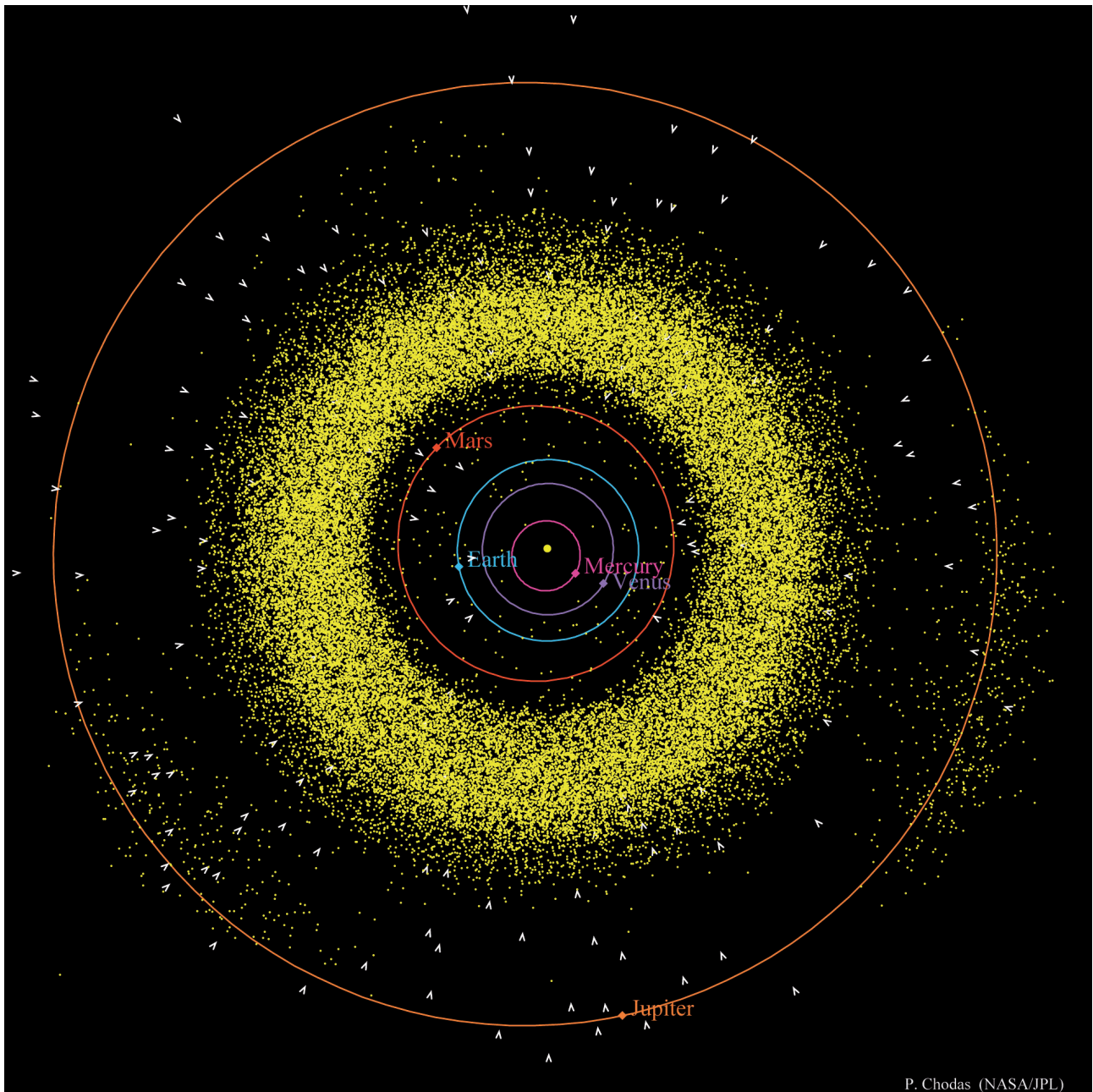
Nein, den in der Zoologie verwendeten Begriff für Seesterne meinen wir nicht, obgleich er nicht unpassend ist: Das griechische Wort **Asteroid** bedeutet so viel wie 'sternengleich'. In diesem Buch geht es natürlich um die Himmelskörper, die als Asteroiden bezeichnet werden. Das Wort 'Asteroid' ist heute vertraut und wohlklingend, aber auch sehr missverständlich, denn diese Objekte unseres Sonnensystems haben mit Sternen praktisch nichts gemein.

Die Kurzfassung der Asteroidendefinition lautet: Mehr oder weniger große, meist felsige Brocken, die sich zwischen den Planeten unseres Sonnensystems auf elliptischen Bahnen um die Sonne bewegen.

Die acht Planeten sind schon seit mehr als 175 Jahren bekannt, deren Namen und Reihenfolge man sich mit dem Merkspruch 'Mein Vater Erklärt Mir Jeden Sonntag Unseren Nachthimmel' ins Gedächtnis zurückrufen kann: Vom sonnennahen **Merkur** geht es über **Venus** und Erde zum **Mars**, dann folgen in weiterer Entfernung die deutlich größeren Gasplaneten **Jupiter**, **Saturn**, **Uranus** und **Neptun**. Bis auf die beiden letztgenannten kann man alle mit dem bloßen Auge am Nachthimmel beobachten. Die Planeten bewegen sich auf ungefähr kreisförmigen **Bahnen** um die Sonne, alle im Gegenuhrzeigersinn (von 'Norden' gesehen). Sie bewegen sich in Ebenen, die nur wenig von der Bahnebene der Erde auf ihrem Orbit um die Sonne – das ist die **Ekliptik** – abweichen.

Abbildung 1.1 illustriert, wo die meisten Asteroiden ihre Bahnen ziehen. Etwa 90% der derzeit bekannten Kleinplaneten umfliegen die Sonne auf Bahnen zwischen Mars und Jupiter und bilden den **Asteroidengürtel**. Mehr dazu in Kapitel 4.

Durch das von den Asteroiden reflektierte Sonnenlicht sehen wir sie im **Fernglas** oder **Teleskop** als helle Punkte - sie sehen also genauso aus wie ferne Sterne. Das erklärt die historische Bezeichnung, die **Charles Burney Jr** zugeschrieben wird [161]. Er hat das Wort Anfang des 19. Jahrhunderts für die von



P. Chodas (NASA/JPL)

Abbildung 1.1: Draufsicht auf den inneren Teil unseres Sonnensystems (Erdbahn-Ebene) mit Planeten, Asteroiden und Kometen [75]. Das Zentrum bildet die Sonne. Die kleinen Punkte zeigen die Positionen am 1.1.2018 an, Asteroiden sind gelb. Für die Planeten **Merkur**, **Venus**, **Erde**, **Mars** und **Jupiter** sind auch die kompletten **Bahnen** eingezeichnet. Die kleinen weißen Pfeilspitzen repräsentieren Kometen.

**William Herschel** untersuchten Himmelskörper vorgeschlagen. Damals wurden die ersten Asteroiden entdeckt, den Anfang machte **Ceres**, den **Giuseppe Piazzi** im Jahr 1801 fand. Abb. 1.2 zeigt ein Bild dieses Asteroiden, der im Jahr 2015 von der vorbeifliegenden Raumsonde **Dawn** aus fotografiert wurde. Heute benutzen die Astronomen die etwas profaneren Bezeichnungen **Klein-**

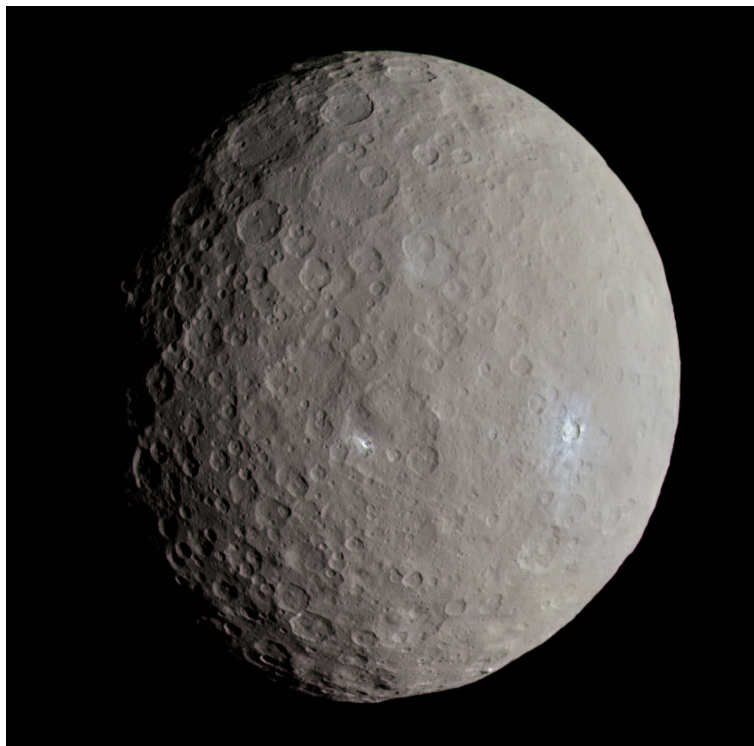


Abbildung 1.2: Asteroid **Ceres**, im Jahr 2015 von der NASA-Sonde **Dawn** fotografiert [6].

**planeten** oder **Planetoiden**. Diese wurden von der **International Astronomical Union (IAU)** definiert. Wir bleiben in diesem Buch bei der historischen Namensgebung, sprechen also meist von Asteroiden, verwenden aber gerne hin und wieder zur Abwechslung auch mal die anderen Begriffe. ‘Asteroid’ ist allerdings kein von der IAU festgelegter Terminus, daher müssen wir diesen selbst definieren. Es kann durchaus sein, dass anderswo abweichende Begriffsbildungen benutzt werden<sup>1</sup>.

Um die Asteroiden genauer zu definieren, müssen wir sie von anderen Himmelskörpern abgrenzen. Wie wir sehen werden, ist das gar nicht trivial. Wir

---

<sup>1</sup>So werden die weit entfernten ‘**transneptunischen Objekte**’ manchmal nicht zu den Asteroiden gezählt. Für mich gehören diese aber auch zu den Asteroiden, wie auch die Unterklasse der **Zwergplaneten**.

definieren erst mal, welche Himmelskörper **keine** Asteroiden sind.

- Da Asteroiden nicht selbst leuchten, sind sie keine **Sterne**.

Im Folgenden beschränken wir uns zunächst auf unser Sonnensystem:

- **Planeten** sind sie auch nicht; letztere wurden von der **Internationalen Astronomischen Union IAU** im Jahre 2006 genau definiert, es sind große Objekte, die durch die Gravitation nahezu Kugelform erhalten haben. Ferner müssen sie ihre Umlaufbahn um die Sonne 'gereinigt' haben, also im Laufe der Zeit andere in der Nähe befindliche Himmelskörper verdrängt oder geschluckt haben. Diese Definition erfüllen die acht Planeten **Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun**.
- **Kometen** sind ebenfalls nicht selbst leuchtende kleinere Objekte im Sonnensystem. Sie werden durch ihren Schweif und ihre Koma, die als diffuse Hülle den Kern umgibt, charakterisiert. Der Schweif besteht aus ionisierten Gasteilchen und/oder Staub; diese Materialien werden bei Annäherung des Kometen an die Sonne freigesetzt. Asteroiden haben weder Koma noch Schweif und sind daher im Prinzip leicht von Kometen zu unterscheiden. Wie die Forschung in den letzten Jahren gezeigt hat, ist das aber nicht immer so einfach. Auch manche Asteroiden können Gas oder Staub emittieren, zum Beispiel der von der Raumsonde **Osiris-Rex** genau untersuchte Asteroid **(101955) Bennu**<sup>2</sup>. So gibt es heute Kleinkörper des Sonnensystems, die gleichzeitig sowohl in den Kometen-Katalogen als auch in den Asteroiden-Katalogen aufgeführt sind. Es wird auch vermutet, dass einige der Asteroiden mit erdnahen **Umlaufbahnen** erloschene Kometenkerne sind, denn kurzperiodische Kometen bewegen sich auf ähnlichen Bahnen. In Sonnennähe verlieren sie nach und nach alle gasförmigen Materialien der Oberfläche. Gleiches gilt für Substanzen wie Wasser, welche durch die Sonneneinstrahlung zuerst vom festen in den flüssigen Aggregatzustand wechseln, dann setzt Verdampfung ein und die schnellen Moleküle verlassen das Schwerefeld des Kometen. Auch Sublimation tritt auf, also der direkte Übergang von der festen in die gasförmige Phase. Am Ende überlebt nur ein aus Staub und festen Gesteinsbrocken bestehender Kern.
- **Meteoroiden** - ja, ein schwieriger Begriff: es handelt sich um Objekte, die sich ähnlich wie Asteroiden verhalten, aber kleiner sind. Beim Eintreten in die Erdatmosphäre und anschließendem Verglühen in der irdischen Lufthülle erzeugen die Meteoroiden Sternschnuppen, diese Lichterscheinungen werden **Meteore** genannt. Bleibt etwas Festes übrig, das

---

<sup>2</sup>Die Nummern und Namen der Asteroiden werden in Kapitel 2 erklärt.

auf die Erde fällt, sprechen wir von **Meteoriten**. Eine von der **IAU** festgelegte oder eine allgemein akzeptierte Abgrenzung von **Meteoroiden** und Asteroiden gibt es nicht: wir folgen der Definition der Wikipedia [5]: Asteroiden müssen mindesten einen Meter groß sein. Diese Klassifizierung ist nicht ganz unproblematisch, nicht zuletzt deshalb, weil die Größen dieser vergleichsweise winzigen Himmelskörper nur schwer messbar sind. Übrigens spricht man von **Meteoriten** immer dann, wenn ein Brocken die Erdoberfläche erreicht hat, unabhängig von Größe und Masse, also auch wenn ein Komet oder Asteroid auf unserem Planeten einschlägt. Einige Meteoriten stammen sogar von Mond oder Mars; sie bezeugen, dass bei einem dortigen Einschlag eines größeren Objekts Materie aus der Oberfläche herauskatapultiert und bis zur Erde geschleudert wurde.



Abbildung 1.3: Asteroid **(243) Ida** (links) mit ‘seinem’ kleinen Mond **Dactyl** [1], im Jahr 1993 aufgenommen von der NASA-Raumsonde **Galileo** [92].

- Viele der Planeten werden von **Monden** umrundet, Beispiele sind ‘unser’ Erdmond oder der Jupitermond Ganymed. Diese Satelliten der Planeten zählen wir nicht zu den Asteroiden, obwohl es sich möglicherweise um



vor vielen Jahren eingefangene Asteroiden handeln könnte. Interessanterweise können aber auch Asteroiden Monde haben - kleinere Asteroiden, die die größeren umkreisen. Diese Asteroidenmonde rechnen wir auch zur Klasse der Asteroiden. Ein schönes Beispiel zeigt Abbildung 1.3: Der Asteroid (243) *Ida* wird vom Mond (243) *Ida I Dactyl* umkreist.

- In den letzten Jahren wurden Asteroiden-ähnliche Objekte identifiziert, die durch unser Sonnensystem hindurchfliegen; die Gravitationskraft unseres Zentralgestirns reicht nicht aus, um sie festzuhalten. Einer dieser Himmelskörper trägt den schönen Namen 'Oumuamua ('Bote'), er wurde als **interstellares Objekt** klassifiziert. Auch solche Objekte wollen wir im Hauptteil des Buches ausklammern. Da sie natürlich besonders faszinierend sind, gehen wir im ihnen gewidmeten Kapitel 21 kurz auf sie ein.

Alle anderen durch obige Kriterien nicht ausgeschlossenen Himmelskörper des Sonnensystems nennen wir Asteroiden. Insbesondere zählen wir dazu auch die **Zwergplaneten**, die im Jahr 2006 von der IAU definiert wurden. Das sind Himmelskörper, die 'fast' die Kriterien für Planeten erfüllen. Konkret bedeutet dies, dass sie kugelförmig sein müssen, aber bisher ihre Bahn um die Sonne nicht 'gereinigt' haben. Bisher schaffen das fünf Asteroiden im Sonnensystem, darunter **Ceres** und **Pluto**. Man darf die **Zwergplaneten (dwarf planets)** nicht mit den Kleinplaneten (**minor planets** = (kleinere) Asteroiden) verwechseln<sup>3</sup>. Insbesondere gilt, dass die 'Zwerge' im Allgemeinen größer sind als die 'Kleinen'! Die 'Trennlinie' liegt bei einem Durchmesser von etwa 600 km. Unterhalb dieses Wertes ist die Gravitationskraft zu schwach, um eine Kugelgestalt zu erzwingen.

Abbildung 1.4 illustriert die Klassifizierung der verschiedenen Körper unseres Sonnensystems. Die Achsen sind als grobe Orientierung gedacht, und dürfen nicht als exakte Größen verstanden werden. Mit 'Volatilität' soll die Neigung zur Emission von Gasen gekennzeichnet werden. Neben der Bezeichnung der Kategorie (z.B. **Zwergplanet**) findet sich in kursiver Schrift der Name eines Vertreters (in diesem Beispiel **Pluto**). Der berühmte **Halleysche Komet** trägt die offizielle Bezeichnung 1P/Halley, weil es der erste periodische Komet ist, der entdeckt wurde. Meteoroiden haben meist keine Namen, erst die resultierenden Meteorite werden benannt, in der Abbildung ist es der in der Schweiz gefundene kleine **'Rafrüti'**.

Die IAU hat übrigens noch eine allgemeine Klasse für die 'Kleinen' des Sonnensystems geschaffen: Die **'Small Solar System Bodies' (SSSB)** umfassen Asteroiden, Meteoroiden und Kometen. Um es nicht zu einfach zu machen,

<sup>3</sup>Die Zwergplaneten bilden eine Unterklasse der Kleinplaneten.



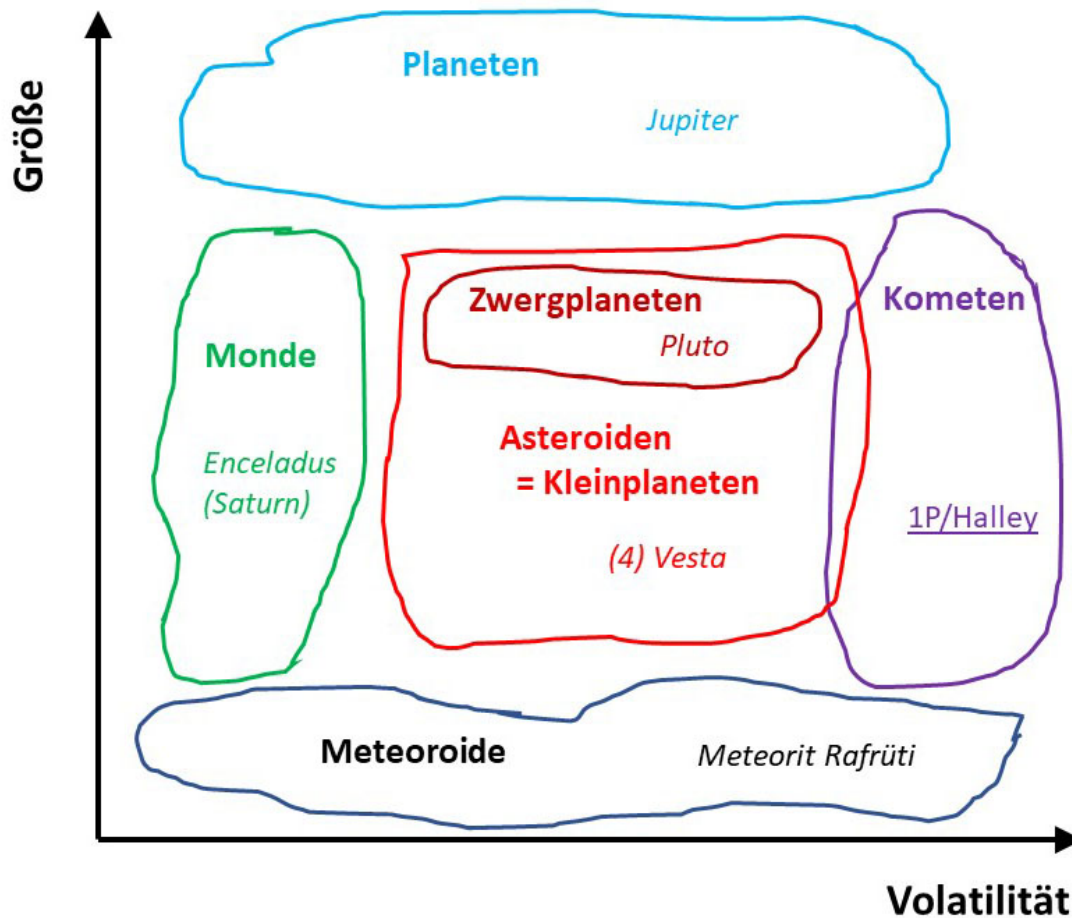


Abbildung 1.4: Klassifizierung der Objekte des Sonnensystems. In kursiver Schrift werden typische Vertreter genannt.

gehören die Zwergplaneten wie **Ceres** oder **Pluto** aber nicht dazu!

In diesem Buch geht es hauptsächlich um 'lebendige' Asteroiden, solche, die (noch) ihre **Bahnen** im Sonnensystem ziehen und (noch) nicht als Meteoriten geendet sind.

Schließlich noch ein paar Bemerkungen zu den Entfernungen im Sonnensystem: In der Astronomie benutzt man die '**Astronomische Einheit** AE (englisch: '**Astronomical Unit** AU), das ist der mittlere Abstand Erde-Sonne, und beträgt 150 Millionen km. Das ist etwa 400-mal mehr als der mittlere Abstand Erde-Mond von ungefähr 400 000 km. Die Erde ist winzig klein im Vergleich zur AE: ihr Durchmesser ist etwa 12000-mal kleiner.

In der Astronomie benutzt man zur Beschreibung von Distanzen auch die

Zeit, die Licht braucht, um die entsprechende Strecke zurückzulegen. Im Vakuum rasen elektromagnetische Wellen mit der **Lichtgeschwindigkeit** von 300000 km/s. Von der Sonne kommend braucht die Strahlung etwa 8 Minuten bis zur Erde. Der äußere Planet Neptun ist etwa 30 AE von unserem Zentralgestirn entfernt, das entspricht rund 250 **'Lichtminuten'**. Der nächste von der Nordhalbkugel aus beobachtbare Stern, Sirius, hat eine Entfernung von etwa 8 **'Lichtjahren'**.

## Kapitel 2

### Welche Namen gibt man Asteroiden?

Bis jetzt sind weit mehr als 1 Million Asteroiden entdeckt worden. Informationen zu diesen, insbesondere die Bahndaten, sammelt das **Minor Planet Center (MPC)** in den USA. Auf dessen Webseite [76] findet man eine ohne Einschränkung herunterladbare große Textdatei mit Namen MPCORB.DAT [77]. Diese enthält in jeder Zeile die Bezeichnung eines Asteroiden und die zugehörigen **Bahnparameter**. Am 1. Januar 2024 wies diese Liste mehr als 1 300 000 Einträge auf.

Es ist klar, dass man den Asteroiden eindeutige, weltweit akzeptierte Namen geben muss, deshalb gibt es strenge Regeln für die Benennung. Die **IAU (International Astronomical Union)** legt diese Vorschriften fest, angewandt werden sie durch das **MPC**. Anders als bei der auf Kometen angewandten Terminologie werden Asteroiden nicht nach ihren Entdeckern benannt. In der Regel machen die Entdecker von Asteroiden aber Namensvorschläge, die dann von der **IAU** genehmigt werden. 'Verkauft' werden dürfen diese aber nicht, Wettbewerbe zur Namensvergabe sind jedoch erlaubt. Der Name macht in der Regel keinerlei Aussagen über Form, Größe oder andere Eigenschaften des Asteroiden - diese sind ja bei der Entdeckung normalerweise noch nicht bekannt. Der erste Asteroid wurde von seinem Entdecker **Giuseppe Piazzi** nach der römischen Göttin Ceres benannt, die gleichzeitig Patronin von Sizilien ist, von wo aus er die ersten Beobachtungen des Kleinplaneten machte.

Wir müssen uns hier mit den Namen vertraut machen, denn die kommen naturgemäß in einem Buch über Asteroiden immer wieder vor. Die schon länger bekannten Asteroiden, deren Bahnen und andere Eigenschaften recht gut bekannt sind, haben sowohl eine Nummer (meist zwischen Klammern gesetzt) als auch einen Namen. Beispiele zeigt die obere Hälfte von Tabelle 2.1. Endgültige Namen haben bisher nur etwa 2% aller bekannten Asteroiden bekommen. Neu entdeckte Asteroiden bekommen zunächst eine provisorische Bezeichnung, Beispiele findet man im unteren Tabellenteil. Die Namen allein legen

übrigens den zugehörigen Himmelskörper leider nicht eindeutig fest: So gibt es die Asteroiden (38) *Leda* und (52) *Europa*, aber auch Jupitermonde, die *Leda* bzw. *Europa* heißen! Die in Klammern gesetzte Katalognummer wird erst

Nummer und dauerhafter Name	Entdecker und Jahr	Kommentar
(1) <i>Ceres</i>	Giuseppe Piazzi 1801	Erster Asteroid, auch Zwergplanet
(4) <i>Vesta</i>	Heinrich Olbers 1807	
(1134) <i>Kepler</i>	Max Wolf 1929	
(134340) <i>Pluto</i>	Clyde Tombaugh <sup>a</sup> 1930	bis 2006 Planet, jetzt Zwergplanet
(332706) <i>Karlheidas</i>	Teide-Observatorium 2009	<i>Karl Heidas</i> , Aachener Volkssternwarte

Nummer und vorläufige Designation	Entdecker und Jahr	Kommentar
(85275) 1994 <i>LY</i>	Eleanor Helin 1994	im Fokus von Kapitel 12.3
(143649) 2003 <i>QQ<sub>47</sub></i>	LINEAR <sup>b</sup> 2003	Titelbild dieses Buches
(543060) 2013 <i>RQ<sub>95</sub></i>	Jost Jahn 2013	seit 2022 "Liefke" ( <i>Carolin Liefke</i> )
2021 <i>GV<sub>122</sub></i>	KMTNet <sup>c</sup> -CTIO 2021	noch keine Nummer [Jan. 2024]

<sup>a</sup>Lowell-Observatorium

<sup>b</sup>Lincoln Near-Earth Asteroid Research

<sup>c</sup>Korea Microlensing Telescope Network

Tabelle 2.1: Beispiele für die Benennung von Asteroiden, Stand Januar 2024

vergeben, wenn die Bahn gesichert ist, so dass man die Position des Asteroiden zu späteren Zeitpunkten voraussagen kann, und ihn dann mit Teleskopen an dieser Stelle wiederfinden kann.

Die Katalognummern spiegeln ungefähr die Reihenfolge der Entdeckung wider, kleine Zahlen entsprechen 'alten' Asteroiden, große Nummern gehören zu den 'neueren'. Da große Himmelskörper leichter zu beobachten sind, kann man auch ganz grob auf die Größe der Himmelskörper schließen: Kleine Zahlen versprechen große und schwere Asteroiden. Ausnahmen bestätigen die Regel: *Pluto* wurde relativ früh entdeckt und ist sogar der größte Asteroid. Da er aber erst 2006 vom Planeten zum Zwergplaneten (und damit zum Asteroiden) 'herabgestuft' wurde, ist seine Nummer mit (134340) entsprechend groß.

Zu beachten ist auch, dass im Fall von binären Systemen, also zwei gravitativ aneinander gebundenen Asteroiden, die sich gegenseitig umrunden, leider die gleiche Katalognummer vergeben wird, so dass diese allein den Himmelskörper nicht mehr eindeutig identifiziert. Ein Beispiel ist der Doppelasteroid (65803), ein 800 m großer Asteroid mit Namen (65803) *Didymos* mit seinem

kleineren Partner, dem Mond **Dimorphos** mit etwa 170 m Durchmesser [103]. Dessen offizielle Bezeichnung lautet **(65803) Didymos I Dimorphos**, die Katalognummer ist also die gleiche. Entsprechendes gilt für Asteroidensysteme mit mehr als zwei Komponenten.

Die finalen Namen wie **Ceres**, **Karlheidlas** oder **Kepler** bestehen aus maximal 16 Zeichen, meist ist es ein einzelnes Wort [2]. Nicht erlaubt sind Namen von zeitgenössischen politischen Führern und von Firmen oder kommerzielle Markennamen, auch Haustiernamen will man nicht vergeben. Wie immer bestätigen Ausnahmen die Regel: **(851) Zeissia** steht für die berühmte Optikfirma, und **(2309) Mr. Spock** ehrt die Katze des Entdeckers, James B. Gibson. Es hat sich eingebürgert, für bestimmte Klassen von Asteroiden nur gewisse Namen zuzulassen, siehe auch Kapitel 5. So werden die Jupiter-Trojaner nach Helden der Sagen des Trojanischen Krieges benannt, zum Beispiel **(588) Achilles**. Gewisse **Trans-Neptun-Objekte (TNO)**, die **Plutinos**, werden mit den Namen von Amazonen geschmückt, etwa **(385571) Otrera**. Inzwischen gibt es sogar Abkürzungen: **(132524) APL** bezeichnet das 'Applied Physics Lab' der Johns-Hopkins-Universität.



Abbildung 2.1: **Karl Heidlas** in der Sternwarte Aachen [80] am 15.5.2014 beim Empfang der Urkunde mit den Daten des Asteroiden **(332706) Karlheidlas** [7]. Foto von **Kurt Schäfer**, dem Leiter des Aachener Arbeitskreises Astronomie.

Mehr zu den historischen Hintergründen vieler Asteroidennamen findet man

im großartigen ‘Dictionary of Minor Planet Names’ [193]. Um die Namensgebung, insbesondere in früheren Zeiten, ranken sich viele Anekdoten, die sehr lebhaft im Buch ‘Die Kleinen Planeten’ von Joachim Ekrutt [134] erzählt werden. So erfährt man, dass zunächst nur weibliche Namen zugelassen waren, zum Beispiel wird der Astronom Heinrich Olbers durch den Asteroiden (1002) Olbersia geehrt. Inzwischen gibt es keine Bevorzugung mehr von Frauennamen, wie (9007) James Bond beweist. Viele Asteroiden tragen griechische Namen, auch verdiente Astronomen und Astronominnen sind zu finden, und häufig tauchen auch geographische Begriffe auf, wie (469) Argentina oder (526) Jena. Ein Beispiel für die Vergabe eines Namens aus neuerer Zeit zeigt Abb. 2.1: Der langjährige Leiter der Aachener Volkssternwarte, Karl Heidlas, wurde für seine Verdienste um die Rettung der vom Verfall bedrohten Sternwarte in den 1980 Jahren geehrt. Der Asteroid (332706) Karlheidlas, der im Jahr 2009 entdeckt worden war, trägt jetzt seinen Namen.

Kompliziert ist die Konstruktion der vorläufigen Namen, die unmittelbar nach der Entdeckung eines Asteroiden vergeben werden. Im Wesentlichen spiegelt diese Bezeichnung den Zeitpunkt<sup>1</sup> der Entdeckung wider. Die allgemeine Form und ein Beispiel sind<sup>2</sup>

$$\text{yyyy mr}_n \quad 2021 \text{ GV}_{122} \quad (2.1)$$

wobei yyyy die Jahreszahl ist und m für den Halbmonat (!) der Entdeckung steht: die erste Januarhälfte wird mit A abgekürzt, die Zeit vom 16.-31.1. mit B, bis zum Großbuchstaben Y, der für die zweite Dezemberhälfte steht, siehe Tabelle 2.2. Im obigen Beispiel steht also 2021 G für die erste Aprilhälfte des

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
1.-15.	A	C	E	G	J	L	N	P	R	T	V	X
ab 16.	B	D	F	H	K	M	O	Q	S	U	W	Y

Tabelle 2.2: Schema der vorläufigen Benennungen von Asteroiden. Achtung: der Buchstabe I wird nicht benutzt, auch Z kommt nicht vor.

Jahres 2021<sup>3</sup>. Nun werden aber pro Halbmonat heutzutage viele Asteroiden entdeckt, und diese werden in der Entdeckungsreihenfolge durchgezählt,  $N = 1, 2, \dots$ ; dazu wird der Buchstabe r benutzt, er wird durch A ersetzt, wenn es sich um die erste Entdeckung im entsprechenden Zeitraum handelt (also

<sup>1</sup>Man verwendet die **universelle Zeit UT = Universal Time**. In London entspricht das zumindest im Winter der gewöhnlichen Uhrzeit.

<sup>2</sup>also yyyy = 2021, m = G, r = V und n = 122.

<sup>3</sup>Die erste Monatshälfte umfasst immer die Tage zwischen dem 1. und 15., auch für den Monat Februar.



$N=1$ ), B steht für die zweite und Z für die Entdeckung  $N = 25$ . Dabei wird der Buchstabe I übersprungen. Somit wäre 2021 GV also der 21. Asteroid in der besagten Aprilhälfte. Aber diese mit der Buchstabenkodierung verbundene Maximalzahl von 25 reicht in der Regel auch nicht! Dann kommt die Zahl  $n$  ins Spiel: sie besagt, wie viele Asteroiden schon vorher entdeckt wurden, immer im gleichen Halbmonatszeitraum, in Einheiten von 25:

$$n = N/25 \quad (2.2)$$

wobei auf die nächstliegende ganze Zahl abgerundet wird. In **2021 GV<sub>122</sub>** steht das V ja für 21, und insgesamt ergibt sich  $N = 122 \cdot 25 + 21 = 3071$ . Es handelt sich also um die 3071ste Asteroidenentdeckung zwischen dem 1.4.2021 und dem 15.4.2021. Dieses Beispiel gibt nicht nur einen Einblick in die oft bizarren Notationen in der Astronomie, die oft historischen Entwicklungen geschuldet sind, es zeigt auch, wie häufig heutzutage neue Asteroiden entdeckt werden. Dividiert man den Zeitraum von gut zwei Wochen durch 3071, so folgt, dass im Mittel alle 7 Minuten eine Entdeckung gemacht wird! Wahrscheinlich sind es sogar mehr, denn 2021 GV<sub>122</sub> muss ja nicht die letzte Asteroidenentdeckung gewesen sein in diesen 15 Tagen!

Den ersten Asteroiden hat man - ähnlich wie den **Planeten** - auch graphische Symbole zugeordnet, die heute in der Wissenschaft keine große Bedeutung mehr haben. Abbildung 2.2 zeigt diese für die ersten 4 entdeckten Asteroiden, wie sie im **Berliner Astronomischen Jahrbuch für 1853** gedruckt wurden [51], nebst Erläuterungen. Alle vier Himmelskörper sind nach Göttinnen benannt, entsprechend symbolisieren die 'Icons' diese Gottheiten. Zum Beispiel wird **Ceres** als Schutzpatronin der Landwirtschaft durch eine Sichel gekennzeichnet.

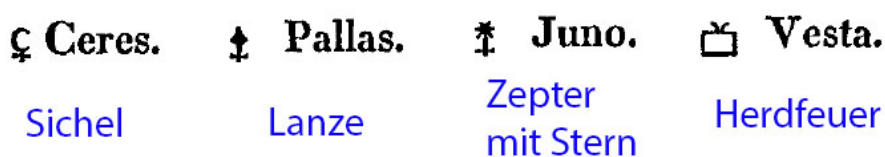


Abbildung 2.2: Symbole für die ersten vier Asteroiden, aus dem **Berliner Astronomischen Jahrbuch für 1853**, herausgegeben von **Johann Franz Encke** [51].

Wie schon erwähnt und in Kapitel 5 erläutert, ähneln manche Asteroiden schwach ausgasenden **Kometen**, und haben deshalb gleichzeitig einen 'Asteroidennamen' und einen 'Kometennamen' bekommen. Ein Beispiel ist **(2060) Chiron** alias **95P/Chiron**, der als Mitglied der Klasse der '**Zentauren**' jenseits von **Jupiter** seine Bahnen zieht. Dabei sagt uns die Bezeichnung 95P, dass es



sich um einen (kurz)periodischen Kometen- mit der fortlaufenden Nummer 95 - handelt.

## Kapitel 3

### Kann man Asteroiden sehen?

Die kurze Antwort lautet: mit dem bloßen Auge nicht, wohl aber mit Hilfe eines **Feldstechers**. Das erklärt auch, wieso diese Himmelskörper in der Antike unbekannt waren. Es gab derzeit nur indirekte Hinweis auf kleinere, nicht direkt beobachtbare Objekte im Sonnensystem, nämlich die in der Atmosphäre aufleuchtenden Sternschnuppen sowie die manchmal auf der Erde gefundenen Meteoriten. Erst 1801 wurde der erste Asteroid, **Ceres**, entdeckt. Das gelang **Giuseppe Piazzi** mit Hilfe eines in England gebauten Teleskops von 7.5 cm Linsendurchmesser, das kurz vorher an der Sternwarte Palermo installiert worden war [197].

#### 3.1 Helligkeiten

Um Planeten, Kometen oder Asteroiden nachts sehen zu können, müssen die Himmelskörper natürlich oberhalb des Horizonts stehen, und die Sicht muss frei sein. Schließlich muss er hell genug sein. Die erdnahe **Venus** und der große Planet **Jupiter** erfüllen letztere Bedingung leicht, sie sind oft das hellste Objekt am Nachthimmel, abgesehen vom Erdmond. Bei den vergleichsweise kleinen Asteroiden wird es schwieriger.

Um das quantitativ zu diskutieren, benutzt man die logarithmische Helligkeitsskala der Astronomie: Scheinbare **Helligkeiten** eines Himmelsobjektes, wie sie von der Erde aus gesehen werden, werden in **Magnituden** oder **Größenklassen** gemessen. Objekte der 1. Größenklasse ('mag 1') sind die hellsten, mit 6. Magnitude ('mag 6') bezeichnet man die schwächsten, mit dem dunkeladaptierten Auge gerade noch wahrnehmbaren Lichtpunkte. Soweit die historischen Definitionen, angewandt insbesondere auf Sterne. Wie man sieht, ist das deutsche Schulnotensystem ähnlich konstruiert. Es gibt mehrere Tausend Sterne mit Helligkeiten kleiner (!) als 6 mag, alle diese kann man im

Prinzip mit dem bloßen Auge sehen - einen klaren Himmel ohne Lichtverschmutzung vorausgesetzt.

Inzwischen wissen wir, dass es noch hellere Sterne gibt als die der Magnitude 1, und auch die Venus kann sehr hell werden, wir sprechen dann von den Magnituden 0 und -1 etc. Beispiele für helle Himmelskörper listet Tabelle 3.1. Und natürlich kann man heute mit Teleskopen und langbelichteten Astrofo-

Objekt	Helligkeit	Typ	Kommentar
Venus	-3,0 — -4,9 mag	Planet	Helligkeit hängt von Abstand ab
Sirius	-1,5 mag	Stern	hellster Stern des Nordhimmels
Vega	0,0 mag	Stern	
Polarstern	2,1 - 1,9 mag	Stern	Helligkeit variiert periodisch
Messier M5	5,6 mag	Sternhaufen	

Tabelle 3.1: Beispiele für scheinbare visuelle Helligkeiten von astronomischen Objekten [89]. Die Lichtabschwächung in der Atmosphäre ist hier vernachlässigt.

tos weit in die andere Richtung vorstoßen, nämlich zu Magnituden 6, 7, . . . 20 . . . Die so ausgedrückten Helligkeiten sind reelle Zahlen, es gibt also auch Zwischenwerte wie 6.2 oder -0.7. Die Helligkeiten sind so definiert, dass eine Differenz von 5.0 Magnituden einen Faktor 100 in der Lichtintensität bedeutet. Eine Helligkeitsstufe, also eine Differenz von 1.0 mag, entspricht damit einem Faktor von  $\sqrt[5]{100} = 2.51$  in der Leuchtkraft.

Wie hell 'leuchten' nun die Objekte des Sonnensystems? Die Anführungszeichen sollen daran erinnern, dass alle Planeten und Asteroiden lediglich das Sonnensystem an ihrer Oberfläche reflektieren, also nicht selbst Licht ausstrahlen wie Sterne es tun. Tabelle 3.2 listet die 20 hellsten Objekte des Sonnensystems auf - Sonne und Mond sind dabei ausgeklammert, ebenso wie Kometen, die ja meist nur einige Monate lang beobachtbar sind und dann wieder in die äußeren Zonen des Planetensystems zurückfliegen. Die angegebenen scheinbaren visuellen Helligkeiten sind die maximal von unserem Planeten aus beobachtbaren. Je nach Entfernung von der Erde und der Beleuchtung durch die Sonne können sie sehr viel lichtschwächer erscheinen.

Tabelle 3.2 zeigt, dass genau ein Asteroid, (4) *Vesta*, unter sehr günstigen Umständen mit dem bloßen Auge als schwach leuchtendes Pünktchen erkennbar ist. Das ist aber sehr schwierig, deshalb greifen wir lieber gleich zu einem lichtstarken *Feldstecher*! Damit kann man dann auch – im Prinzip – die anderen in der Tabelle angeführten Asteroiden beobachten.

Rang	Objekt	Helligkeit	Rang	Objekt	Helligkeit
1	Venus	-4.9 mag	11	Jupitermond Callisto	5.7 mag
2	Jupiter	-2.9 mag	12	Asteroid (2) Pallas	6.5 mag
3	Mars	-2.9 mag	13	Asteroid (1) Ceres	6.7 mag
4	Merkur	-2.5 mag	14	Asteroid (7) Iris	6.7 mag
5	Saturn	-0.6 mag	15	Asteroid (433) Eros	6.8 mag
6	Jupitermond Ganymed	4.6 mag	16	Asteroid (153814) 2001 WN <sub>5</sub>	6.9 mag
7	Jupitermond Io	5.0 mag	17	Asteroid (367943) Duende	7.0 mag
8	Asteroid (4) Vesta	5.2 mag	18	Asteroid (6) Hebe	7.5 mag
9	Jupitermond Europa	5.3 mag	19	Asteroid (3) Juno	7.5 mag
10	Uranus	5.4 mag	20	Asteroid (18) Melpomene	7.5 mag

Tabelle 3.2: Die 20 hellsten Objekte des Sonnensystems (ohne Sonne und Erdmond), und ihre größte scheinbare visuelle Helligkeit, auf der Magnituden-Skala [4, 176, 185].

## 3.2 Feldstecher

Ein handelsüblicher **Feldstecher** wird durch zwei Zahlen gekennzeichnet, etwa 8x30 oder 10x50. Der erste Wert ist die Winkelvergrößerung, im zweiten Beispiel ist dieser Faktor gleich 10. Wie der Name sagt, wird der scheinbare Winkel entsprechend vergrößert, also der Vollmonddurchmesser erscheint dann unter einem Blickwinkel von etwa  $5^\circ$ , statt nur  $0.5^\circ$  ohne optische Hilfsmittel. Diese Vergrößerung ist allerdings für die Beobachtung von Asteroiden nicht relevant. Diese sind so klein, dass sie uns immer punktförmig erscheinen.



Abbildung 3.1: Feldstecher 10x50. Ein solcher ist geeignet, die hellsten Asteroiden zu beobachten.

Die zweite Zahl, die das Fernglas charakterisiert, gibt den Durchmesser  $D$  des Objektivs in der Einheit mm an, durch das das Licht in den Feldstecher eintritt. Das ist die für Asteroidenbeobachtungen entscheidende Größe, wie folgende Überlegungen zeigen: Im Idealfall kommt das in den Feldstecher ein tretende Licht vollständig im Auge des Beobachters an. Letzteres hat einen Pupillendurchmesser von etwa  $d = 6$  mm. Wegen  $D > d$  sammelt der Feldstecher mehr Licht als das Auge, um den Faktor der entsprechenden Flächen, also  $D^2/d^2$ .

Zahlenbeispiel: **Fernglas** 10x50, siehe Abbildung 3.1:

$$\frac{D^2}{d^2} = \frac{(50 \text{ mm})^2}{(6 \text{ mm})^2} \approx 70 .$$

Dieser Faktor in der Helligkeits-Empfindlichkeit übersetzt sich in eine Verbesserung der Sensitivität von mehr als 4 **Größenklassen**. Die allgemeine Formel für den Gewinn an Empfindlichkeit, in **Magnituden**, lautet

$$\Delta m = 5 \text{ mag} \cdot \log_{10} \frac{D}{d} .$$

Man kann also im Prinzip mit einem guten Feldstecher Himmelsobjekte bis zur Magnitude von 9-10 sehen. Das setzt voraus, dass der Asteroid recht hoch über dem Horizont steht, um die Lichtabschwächung in der Atmosphäre so gering wie möglich zu halten. Um zu testen, welche Helligkeiten man an seinem Standort mit dem verfügbaren **Fernglas** noch zu erkennen vermag, kann man Test-Sterne heranziehen. Besonders geeignet ist die 'Polsequenz', eine Gruppe von Sternen verschiedener Helligkeiten in der Nähe des immer über dem Horizont stehenden Polarsterns [8, 167].

Die große Herausforderung besteht nur darin, den Asteroiden am Himmel mit dem Feldstecher zu lokalisieren! Sternkarten helfen hier nicht weiter, da die Asteroiden sich ja relativ zu den Sternen bewegen. Man benötigt ein Programm wie Stellarium [140], welches für einen gegebenen Zeitpunkt die Position des Himmelskörpers anzeigt. Das genannte Programm läuft auch im Web, muss also nicht installiert werden. Als Beispiel wählen wir den Asteroiden **(4) Vesta**, der im Herbst 2022 gut zu beobachten war. Abbildung 3.2 zeigt einen Himmelsausschnitt am Abend des 25. Oktober 2022. Der gesetzte Beobachtungsort (Aachen) ist hier nicht wichtig: da **(4) Vesta** relativ weit entfernt ist, ist der **Parallaxeneffekt**<sup>1</sup> klein, so ergibt sich für alle Erdbeobachter praktisch das gleiche Bild.

Ausgehend von einer solchen Aufsuchkarte identifiziert man zunächst hellere Objekte, hier bieten sich der Planet **Saturn** und der horizontnahe Stern

<sup>1</sup>Ein nahes Objekt verschiebt sich scheinbar relativ zu einem fernen Hintergrund, wenn

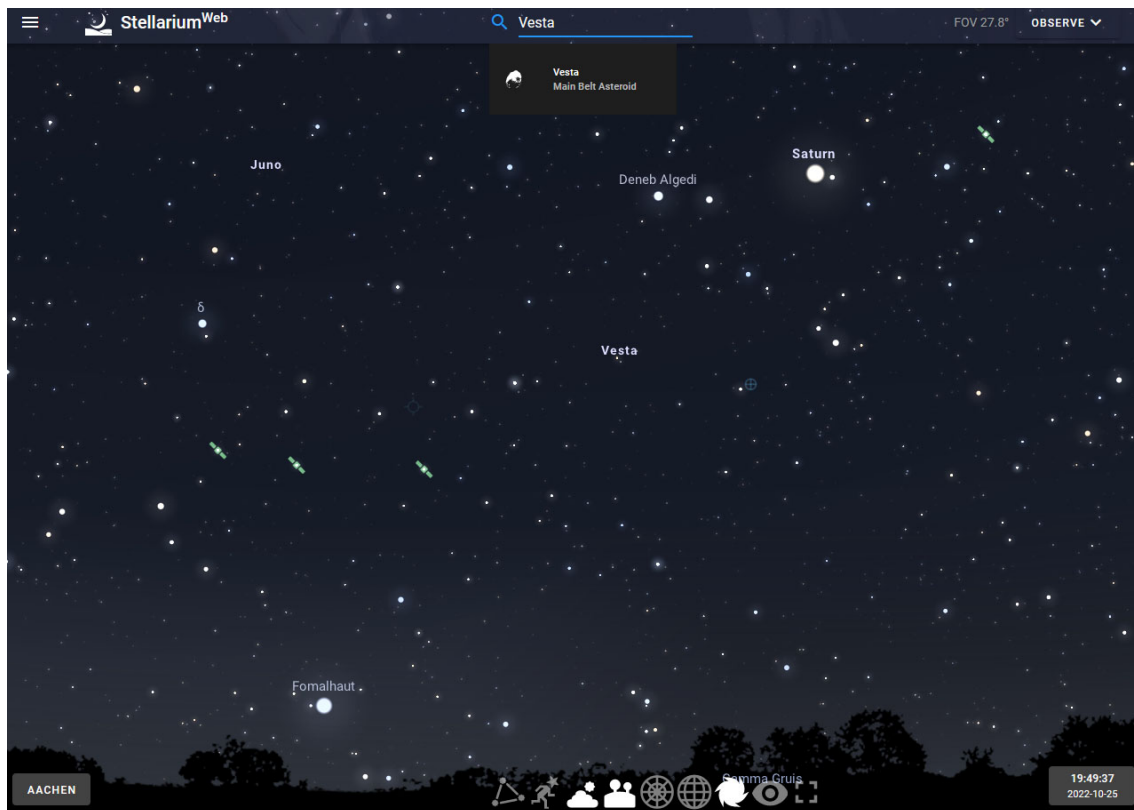


Abbildung 3.2: Mit der Software Stellarium [140] erstellte Himmelsansicht für den Abend des 25. Oktober 2022. Der Asteroid (4) **Vesta** befindet sich in der Mitte.

Fomalhaut an. Wenn man diese im **Fernglas** klar erkannt hat - anhand ihrer jeweiligen Sternumgebungen - startet man mit dem 'Starhopping': Man hangelt sich gewissermaßen von einem bekannten Himmelskörper etwa Saturn, zu Sternen in der Nachbarschaft und versucht diese zu identifizieren. Dieses Verfahren setzt man fort, bis das Objekt der Begierde erreicht und eindeutig erkannt wurde. In diesem Beispiel wird die Suche dadurch erleichtert, dass **Vesta** ungefähr in der Mitte zwischen Saturn und dem Stern Fomalhaut steht. Zur Identifizierung können sowohl die Positionen als auch die Helligkeiten herangezogen werden. Wenn zum Beispiel Vesta laut Stellarium heller ist als der direkt benachbarte Stern, so muss das im **Fernglas** natürlich auch so zu sehen sein. Dieser Suchprozess ist durchaus mühsam und kann leicht eine halbe Stunde dauern. Aber dann hat man - vielleicht zum ersten Mal in seinem Leben - mit eigenen Augen einen Asteroiden gesehen!

---

man seine Beobachtungsposition ändert.

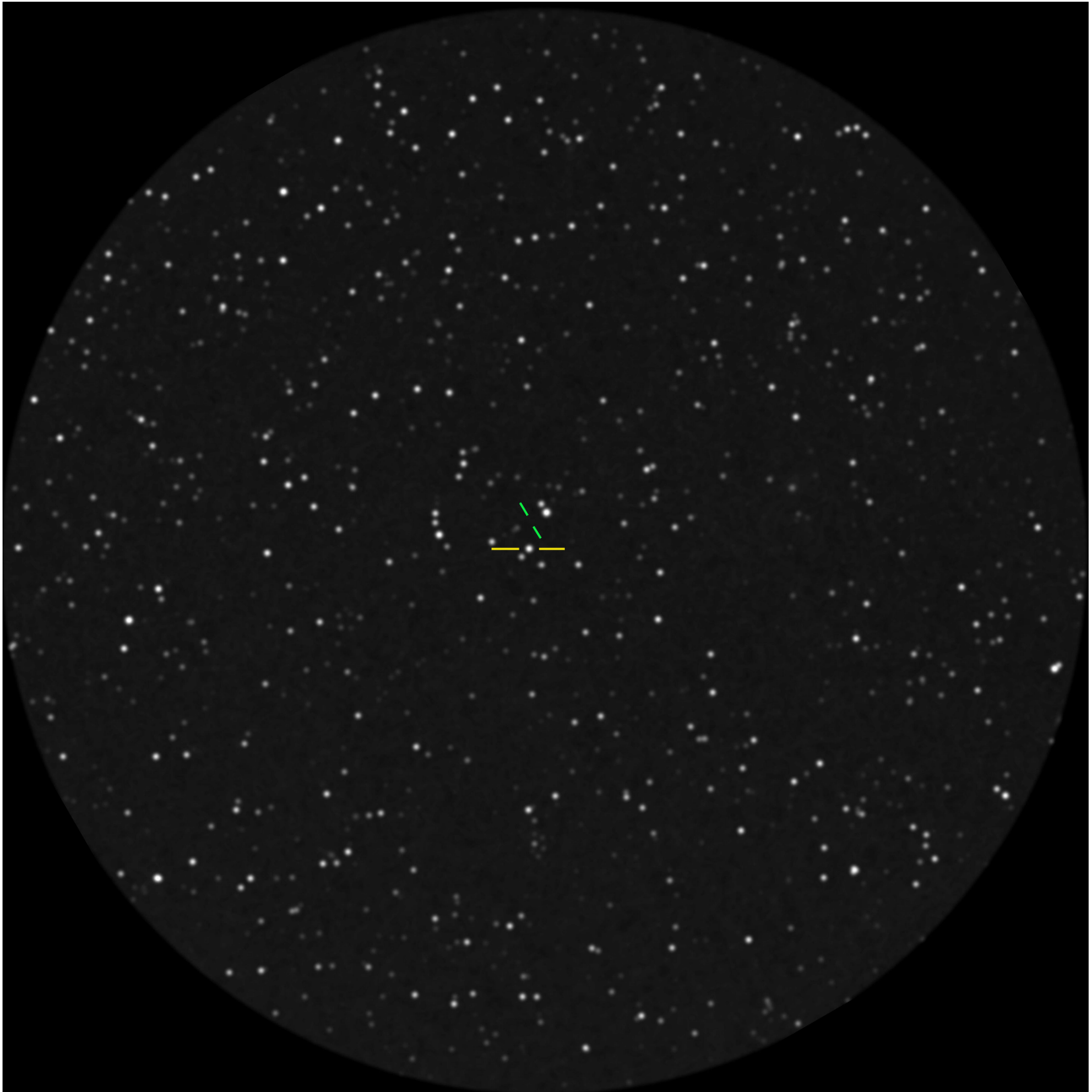


Abbildung 3.3: Asteroid (1) Ceres durch einen Feldstecher beobachtet. Das Gesichtsfeld hat einen Durchmesser von etwa 5 Grad und zeigt einen Teil des Sternbildes Jungfrau. Der Kleinplanet befindet sich in der Bildmitte und ist durch zwei horizontale gelbe Striche markiert. Der zugehörige Zeitpunkt ist Mitternacht am Abend des 14.2.2023. Die beiden kürzeren schräggestellten grünen Linien deuten die Position an, die der Asteroid 24 Stunden später erreicht hat.



Abbildung 3.3 versucht zu zeigen, wie sich (1) Ceres bei der Beobachtung mit einem guten Feldstecher präsentiert. Natürlich ist hier eine Fotografie zu sehen, die ich aber so bearbeitet habe, dass sie dem visuellen Eindruck einigermaßen nahekommt. Man beachte, dass es keinerlei Möglichkeiten gibt, auf einem solchen relativ kurzbelichteten Foto zwischen Sternen und Asteroiden zu unterscheiden - sie hinterlassen den gleichen visuellen Eindruck. Im Bild ist auch angedeutet wie langsam bzw. schnell der Asteroid sich relativ zu den Fixsternen im Hintergrund bewegt. Nach 24 Stunden ist die Verschiebung deutlich erkennbar.

### 3.3 Teleskop

Falls man ein Teleskop und ein Stativ besitzt, kann man die beschriebene Methode zum Auffinden eines Asteroiden natürlich auch anwenden. Jedes Amateurteleskop ist hinreichend lichtstark um hellere Asteroiden erkennen zu können. Es wird aber insofern schwieriger, als der beobachtbare Himmelsausschnitt noch kleiner ist als beim Feldstecher, man kann den Kleinplaneten also leichter verpassen, zumal sich der sichtbare Himmelsausschnitt ja durch die Erdrotation laufend verschiebt. Hier hilft eine motorisierte Nachführung entscheidend weiter, sie gleicht die Erddrehung aus, so dass das Fernrohr immer den gleichen Himmelsausschnitt zeigt und man in aller Ruhe die sichtbaren Himmelskörper studieren kann.

Abbildung 3.4 zeigt ein kleines Spiegelteleskop vom Typ Newton, auf einer motorisierten Montierung, die das Teleskop kontinuierlich um die Nord-Süd-Achse dreht, um die Erdrotation zu kompensieren. Natürlich kann man die Ausrichtung verändern, und oft kann man diese mit einem eingebauten Computer entsprechend den Himmelskoordinaten eines vom Benutzer zu definierenden Sterns automatisch anfahren lassen. Dann muss man nur vorher einen Stern in unmittelbarer Nähe des interessierenden Asteroiden identifiziert haben, zum Beispiel mit Hilfe von Stellarium, und bekommt so auch den Kleinplaneten ins Gesichtsfeld. Allerdings wird man auch mit einem guten Amateurteleskop die Ausdehnung der Asteroiden nicht erkennen können. Selbst (1) Ceres hat nur einen Winkeldurchmesser von weniger als einer Bogensekunde (=  $1/3600$  Winkelgrad) und erscheint im Sucher nur als Pünktchen, ununterscheidbar von einem Stern ähnlicher scheinbarer Helligkeit. Dieses Buch soll keine Einführung in die Teleskopkunde darstellen, stattdessen sei auf speziellere Werke verwiesen [168, 198].

Um sicher zu sein, dass es sich wirklich um einen Asteroiden handelt, sollte man dessen Bewegung relativ zu den fernen Sternen überprüfen. Schon nach

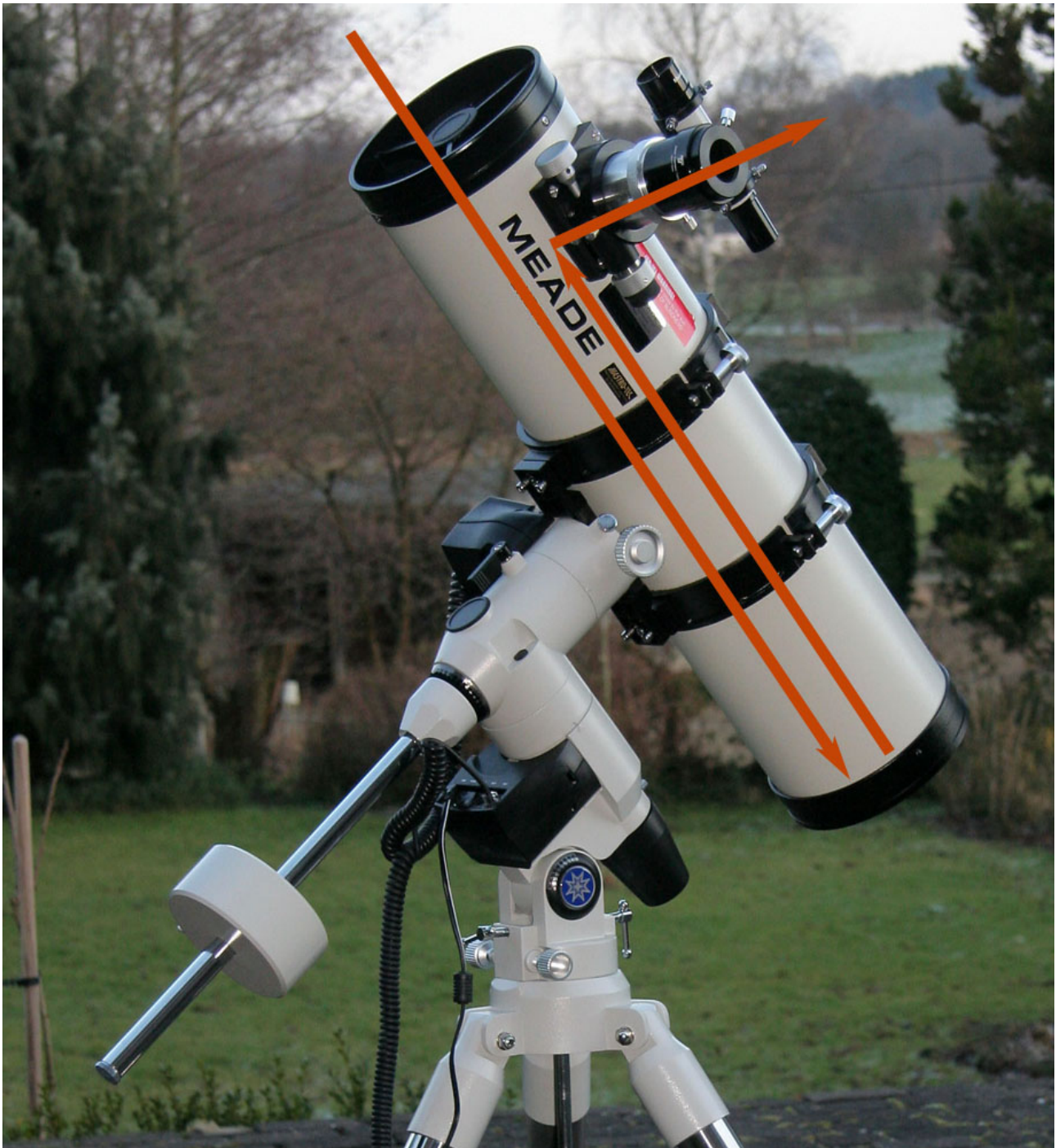


Abbildung 3.4: **Newton-Spiegelteleskop** auf Dreibein und motorisierter Nachführeinheit. Das Licht fällt oben links ein und trifft auf einen Hohlspiegel mit 15 cm Durchmesser, der rechts unten versteckt im Tubus sitzt. Von diesem Spiegel wird das Licht reflektiert und dabei auf einen kleinen planaren - ebenfalls nicht sichtbaren - Umlenkspiegel fokussiert, der innerhalb des Tubus sitzt, gegenüber dem schwarzen, vorn sichtbaren Okularauszug. Schließlich verlässt das Licht den Tubus. An der Austrittsstelle wird ein Okular, das ist eine Linse oder eine Linsengruppe, eingesteckt, und dort kann man dann beobachten. Alternativ wird hier eine Kamera angeschlossen, siehe Kapitel 10.

einigen Stunden ist diese 'Eigenbewegung' groß genug um erkannt zu werden. Also: an mindestens zwei Abenden beobachten.

Besonders gut gelingt die Asteroiden-'Beobachtung', wenn durch das Teleskop fotografiert werden kann. Dazu mehr im Kapitel 10.



## Kapitel 4

### Wie bewegen sich die Asteroiden?

#### 4.1 Ellipsen

In der Regel folgen die Asteroiden **Ellipsenbahnen**, genauso wie die **Planeten**. Das ist der Inhalt des vor mehr als 400 Jahren von **Johannes Kepler** formulierten ersten **Keplerschen Gesetzes**: Planetenbahnen sind **Ellipsen**, in einem der beiden Brennpunkte steht die Sonne. Dies ist in Abbildung 4.1 illustriert. Eine solche **Umlaufbahn** bedeutet, dass der Asteroid nicht genug Energie hat,

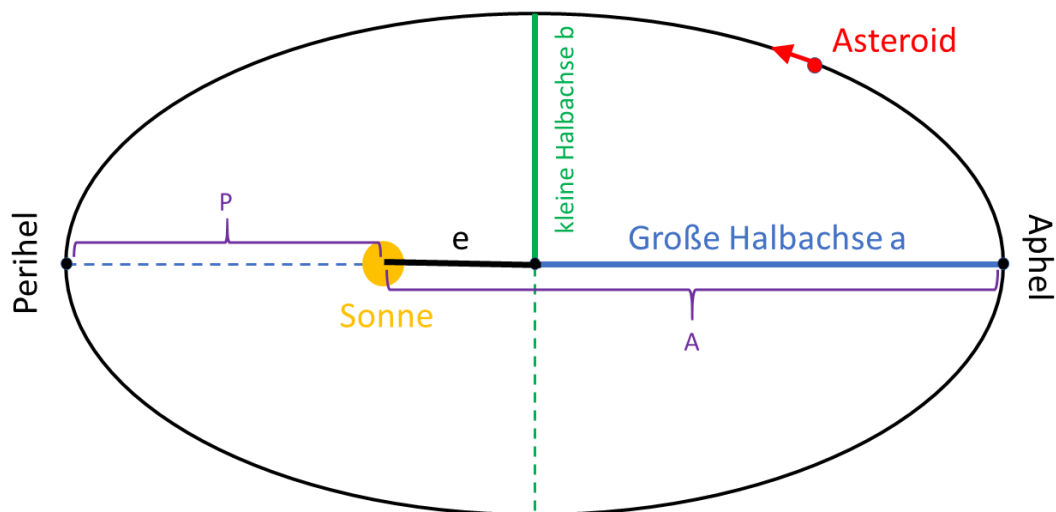


Abbildung 4.1: Elliptische Bahn eines Asteroiden im Sonnensystem. Draufsicht auf die Bahnebene.

das Gravitationsfeld der Sonne zu verlassen, es also nicht schafft, für immer in den Weiten des Alls zu verschwinden. Er ist also gewissermaßen im Schwerefeld der Sonne gefangen.

**Ellipsenbahnen** sind raumfest, das bedeutet, die Asteroiden kommen immer wieder an den gleichen Orten im Sonnensystem vorbei. Das gilt aber nicht exakt, denn die Schwerkraft der anderen Himmelskörper, insbesondere der Planeten, führt zu meist kleinen Bahnstörungen, so dass sich Lage und Form der **Ellipse** mit der Zeit allmählich verändern können.

**Elliptische Bahnkurven** sind durch insgesamt sechs Parameter vollständig bestimmt. Man nennt diese in der Astronomie '**Bahnelemente**'. Kommt es auch auf den **zeitlichen Verlauf** der Asteroidenposition an, muss zusätzlich noch der **Zeitpunkt** eines **Periheldurchgangs** – dann hat der Asteroid den kleinsten Abstand von der Sonne – angegeben werden. Kennt man alle Bahnelemente, kann man für jeden Zeitpunkt in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft die Asteroidenposition berechnen; diese zeitabhängigen Ortskoordinaten nennt man '**Ephemeriden**'.

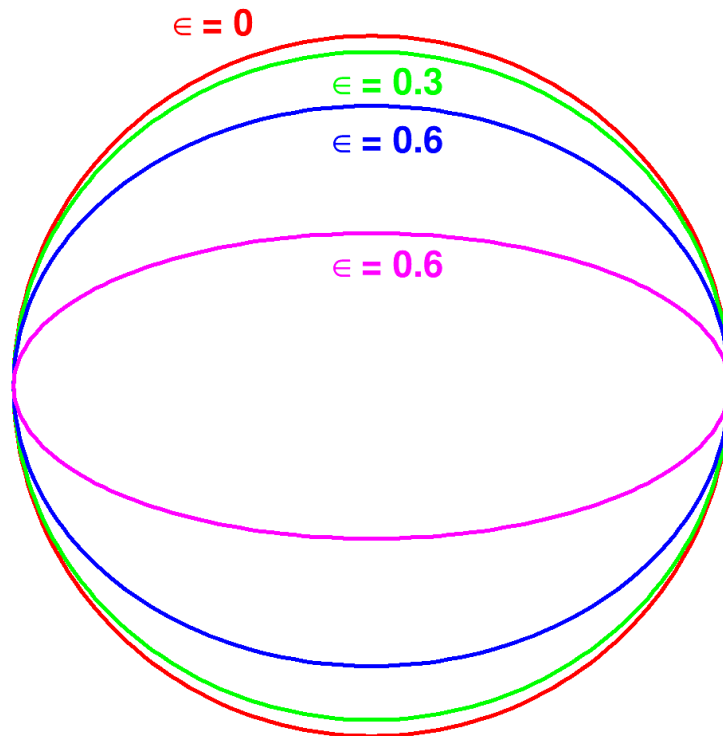


Abbildung 4.2: Ellipsen mit unterschiedlicher **Exzentrizität**  $\epsilon$ .

Zwei der sechs Parameter bestimmen die Größe und Form der **Ellipse**, sie-



he Abbildung 4.1. Eine dritte Größe gibt die Neigung der **Asteroidenbahn** im Raum an, relativ zur **Erdbahnebene**, welche **Ekliptik** heißt. Die genannten drei wichtigen Bahnelemente werden im Folgenden erklärt:

- **Große Halbachse**  $a$ : Das ist der Abstand vom Zentrum der **Ellipse** zum **Aphel**, dem sonnenfernsten Punkt auf der Asteroidenbahn. Gleiches gilt für die Distanz Ellipsenmittelpunkt - **Perihel**. Praktischerweise benutzen wir als Längeneinheit die '**Astronomische Einheit**' AE, den mittleren Abstand Erde-Sonne. Beispiele: Erde:  $a = 1,00$  AE, Asteroid **(4) Vesta**:  $a = 2,36$  AE, **Jupiter**:  $a = 5,20$  AE. Die große Halbachse sagt noch nichts aus über den Abstand des Kleinplaneten von der Erde. Wenn aber dessen Bahn angenähert kreisförmig ist, und  $a$  den Wert 1 AE deutlich überschreitet, kommen sich Asteroid und Erde niemals nahe.
- (Numerische) **Exzentrizität**  $\epsilon$ : Diese Zahl ist definiert als das Verhältnis des Abstandes  $e$  zwischen Sonne und Zentrum der Ellipse einerseits zur großen Halbachse  $a$  andererseits, siehe Abbildung 4.1:

$$\epsilon = \frac{e}{a} .$$

Die Exzentrizität ist null für eine Kreisbahn und nähert sich der Zahl eins an für eine sehr langgestreckte Ellipse. Beispiele aus dem Sonnensystem: Erde:  $\epsilon = 0,017$ , **Mercur**:  $\epsilon = 0,206$ , **(4) Vesta**:  $\epsilon = 0,089$ . Abbildung 4.2 visualisiert Ellipsenbahnen mit unterschiedlicher Exzentrizität  $\epsilon$  bei fester **großer Halbachse**  $a$ .

- **Bahnneigung** oder **Inklination**  $i$ : Dieser positive Winkel gibt die Neigung der Asteroiden-Bahnebene relativ zur **Erdbahnebene** an. Für die **Planeten** und viele Asteroiden ist dieser Winkel kleiner als  $10^\circ$ . Ein positiver Wert kleiner als  $90^\circ$  bedeutet, dass sich der Himmelskörper im Gegenuhrzeigersinn um die Sonne bewegt, wenn man von der Nordseite her auf das Planetensystem blickt. Alle Planeten und die allermeisten Asteroiden bewegen sich auf solchen **Bahnen**, welche man auch **Orbits** nennt. Solche Bahnen heißen **prograd**. Bahnneigungswinkel von mehr als  $90^\circ$  werden Asteroiden zugewiesen, die entgegen dem allgemeinen Trend 'falsch' herum um die Sonne fliegen: man spricht von **retrograden Bahnen**. Beispiele: **(4) Vesta**:  $i = 7,1^\circ$  (prograd), **(20461) Dioretsa**:  $i = 160,4^\circ$  (retrograd). Seinen Namen hat der Asteroid (20461) der Tatsache zu verdanken, dass er der erste entdeckte retrograde Asteroid ist: 'Dioretsa' entsteht aus dem Wort 'Asteroid' durch Umkehrung der Buchstabenreihenfolge...

Wenn man  $a$  und  $\epsilon$  kennt, kann man den **Perihelabstand**  $P$  von der Sonne und die **Apheldistanz**  $A$  leicht berechnen, siehe auch Abbildung 4.1.

$$P = a \cdot (1 - \epsilon) \qquad A = a \cdot (1 + \epsilon) \qquad (4.1)$$

Drei weitere Bahnparameter, und zwar drei Winkelgrößen, fixieren die genaue Lage der Ellipsenbahn im Raum, also zum Beispiel wo die Schnittlinie zwischen Asteroidenbahnebene und **Ekliptik** verläuft. Diese Angaben sind hier aber nicht so interessant, deswegen diskutieren wir im Folgenden nur  $\epsilon$ ,  $a$  und  $i$ .

## 4.2 Bahnelemente der Asteroiden

Die folgenden Graphiken zeigen die Verteilung dieser drei **Bahnparameter** – **Exzentrizität**  $\epsilon$ , **Große Halbachse**  $a$  und **Bahnneigung**  $i$  – für alle bis heute bekannten 1,34 Millionen Asteroiden – Stand Januar 2024 [76].

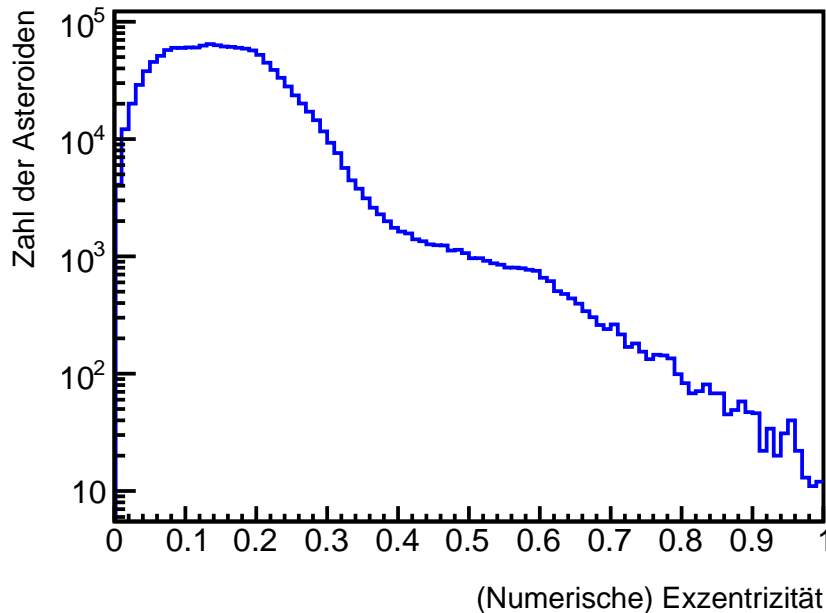


Abbildung 4.3: Verteilung des Bahnparameters **Exzentrizität**  $\epsilon$  der bekannten Asteroiden. Logarithmische Auftragung.

Die Exzentrizität ist meist klein, wie Abbildung 4.3 zeigt. Man beachte die logarithmische Darstellung auf der vertikalen Achse. Die meisten **Orbits** unterscheiden sich also nicht allzu sehr von einer Kreisbahn. Der Mittelwert ist  $\langle \epsilon \rangle = 0,16$ . Die Verteilung der Neigungswinkel  $i$  zeigt Abbildung 4.4. Auch hier sind nur wenige Strukturen zu erkennen; der Mittelwert beträgt  $\langle i \rangle = 9,3^\circ$ . Nur 149 der zu Anfang des Jahres 2024 bekannten Asteroiden haben eine



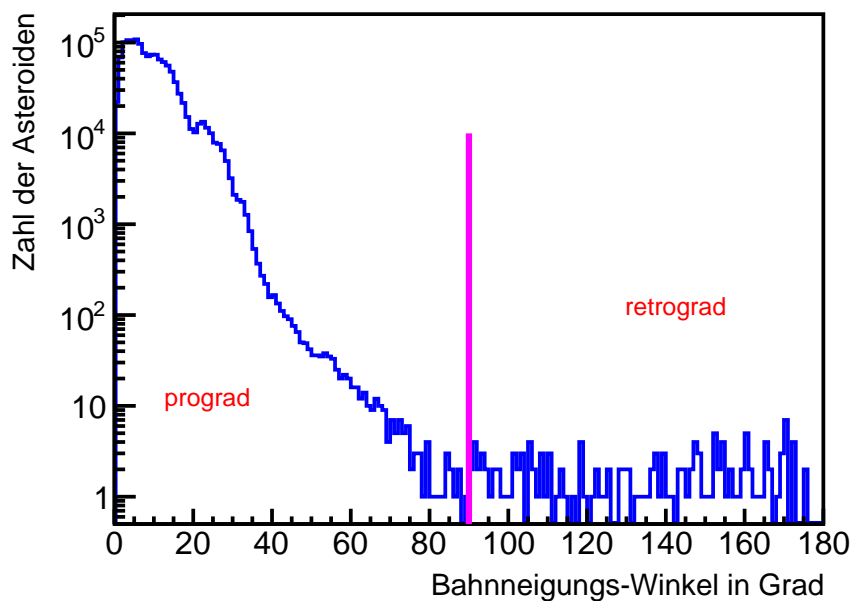


Abbildung 4.4: Verteilung der **Bahnneigungswinkel**  $i$  der bekannten **Asteroidenbahnen**, relativ zur **Ekliptik**. Logarithmische Auftragung.

retrograde Bahn, also  $i > 90^\circ$ .

Besonders interessant ist die Verteilung der **großen Halbachsen**  $a$ , die in Abbildung 4.5 gezeigt ist. Die meisten Asteroiden sind zwischen Mars ( $a = 1,52$  AE) und Jupiter ( $a = 5,20$  AE) unterwegs. Diesen Bereich nennt man **Asteroidengürtel** oder **Hauptgürtel**. Genauer: man rechnet die Asteroiden mit  $a$  zwischen 2,0 und 3,4 AE zum Hauptgürtel. Über Vermutungen, wie diese Ansammlung entstanden ist, berichtet Kapitel 14; hier wollen wir erst mal nur den Ist-Stand dokumentieren. Im Asteroidengürtel findet man auch die großen und seit mehr als 200 Jahren bekannten Asteroiden (1) **Ceres**, (2) **Pallas**, (3) **Juno** und (4) **Vesta**.

Eine zweite Häufung sticht bei großen Halbachsen  $a$  zwischen 30 und 50 AE ins Auge. Das ist der nach **Gerard Peter Kuiper** benannte **Kuiper-Gürtel**. Auch viele Kometen haben hier ihren Ursprung. Zu den bekanntesten Asteroiden in dieser Region gehören die **Zwergplaneten** (134340) **Pluto**, (136108) **Haumea**, und (136472) **Makemake**, die alle mehr als 1000 km groß sind.

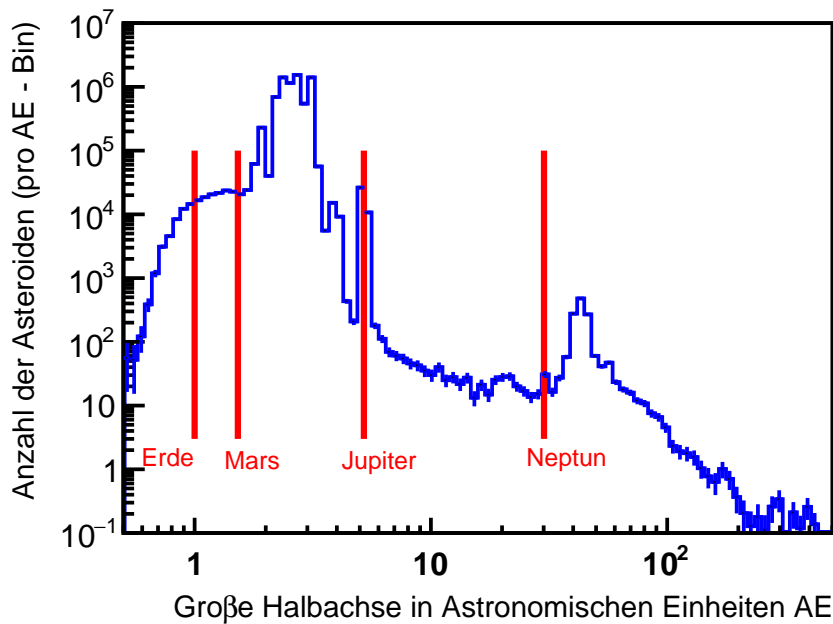


Abbildung 4.5: Verteilung der Werte der **großen Halbachsen**  $a$  der bekannten Asteroidenbahnen. Man beachte die logarithmische Auftragung für beide Achsen.

### 4.3 Trojaner und Co

Auch in der Nähe der **Jupiterbahn** wird in Abbildung 4.5, die die Verteilung der **großen Halbachsen**  $a$  von Asteroidenbahnen zeigt, eine deutliche Anhäufung sichtbar. Das ist zunächst überraschend, da man von einem Planeten erwartet, dass er im Laufe der Zeit seine Umgebung von anderen Himmelskörpern 'gereinigt' hat, siehe Kapitel 1. Allerdings beträgt die Gesamtmasse der Trojaner weniger als 1 Millionstel der Jupitermasse, eine so kleine 'Verschmutzung' ist erlaubt. Um diese **Asteroidenbahnen** – mit einer großen Halbachse von ungefähr 5,2 AE – genauer zu analysieren, ist in Abbildung 4.6 die Verteilung des Winkelabstandes dieser Kleinplaneten von Jupiter aufgetragen. Dieser Winkel wird in Abbildung 4.7 erklärt: Er ist definiert als die Differenz der Winkelgrößen 'ekliptikale Länge'  $l$  von Asteroid und von Jupiter, also  $\Delta l = l_A - l_J$ . Zur Bestimmung der ekliptikalischen Längen werden die Bahnen von Jupiter und Asteroid auf die **Ekliptik** projiziert. Negative Winkel  $\Delta l$  bedeuten, dass die Objekte hinter Jupiter herlaufen. Positive ekliptikale Längendifferenzen besagen, dass die Asteroiden Jupiter auf seiner prograden **Umlaufbahn** um die Sonne (entgegen dem Uhrzeigersinn) vorausseilen. Die Positionen des Planeten und

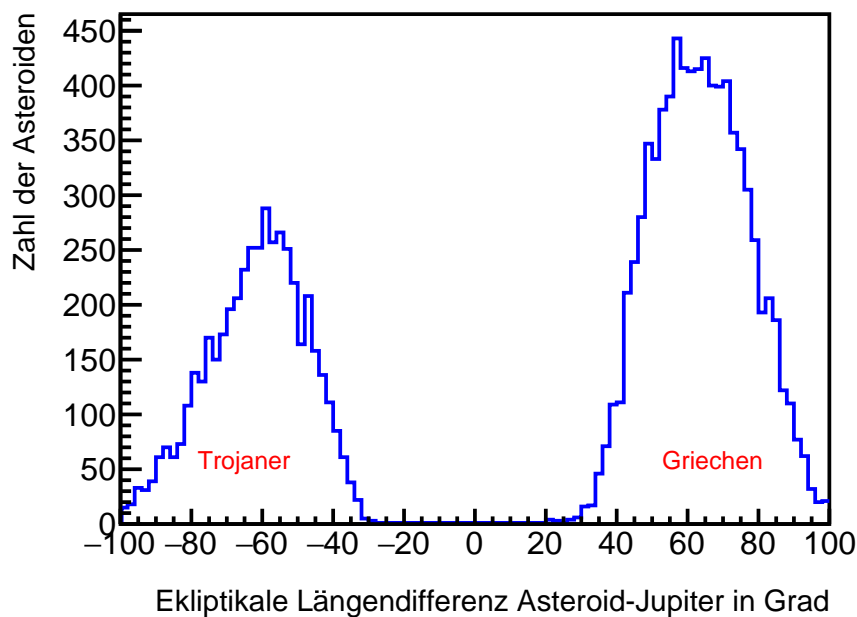


Abbildung 4.6: Verteilung der ekliptikalen Längendifferenz  $\Delta l$  der **Jupiter-Trojaner**.

der Asteroiden ändern sich natürlich mit der Zeit, der Winkelabstand aber nur sehr langsam.

In Abbildung 4.6 sind alle Asteroiden aufgenommen worden, deren große Halbachse um maximal 0,1 AE vom Wert für **Jupiter** abweicht und deren **Inklination**  $40^\circ$  nicht überschreitet. Es wurden die Positionen für das Datum 1.1.2022 eingezeichnet. Man erkennt zwei Anhäufungen, in der Nähe der **Lagrange-Punkte** L4 und L5 des Sonne-Jupiter-Systems. Diese Punkte wurden nach **Joseph-Louis Lagrange** benannt, und heißen auch **Librationspunkte** (Lateinisch: Waage, Gleichgewicht). An den Punkten L4 und L5 sind – vereinfacht gesprochen – die Gravitationskräfte einerseits und die Fliehkräfte andererseits bis auf das Vorzeichen gleich groß, so dass ein Asteroid am Punkt L4 oder L5 (ungefähr) auf der Jupiterbahnlinie antriebslos die Sonne umkreisen kann und dabei den Winkelabstand zu Jupiter beibehält.

Die insgesamt 13000 ‘Bewohner’ der beiden Lager in Abbildung 4.6 heißen **‘Trojaner’** (**Lagrange-Punkt** L5) und **‘Griechen’** (L4), der griechischen Mythologie folgend. Manchmal spricht man auch allgemein von **Trojanern**, und spezifiziert dann noch, ob sie zum trojanischen oder griechischen Lager gehören. Die zugehörigen Asteroiden sind nach trojanischen beziehungsweise griechischen Sagenhelden benannt. Natürlich bestätigen auch hier Ausnahmen die Regel:

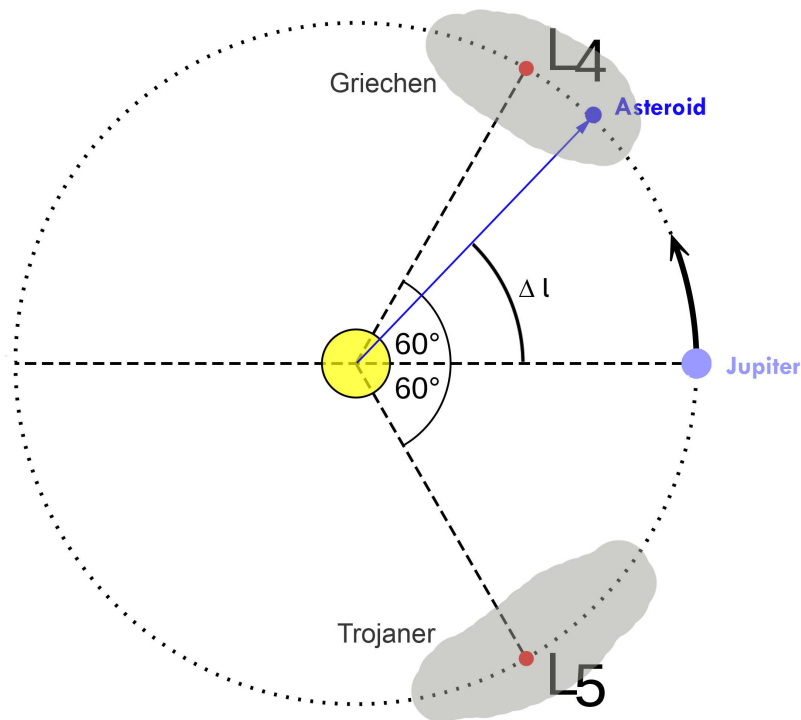


Abbildung 4.7: Draufsicht auf die Ekliptik. Definition der ekliptikalen Längendifferenz  $\Delta l$  und der **Lagrange-Punkte** L5 und L4 für das System Sonne-Jupiter. Angedeutet sind auch die nierenförmigen Regionen, in denen sich die 'Trojaner'-Asteroiden (L5) und die 'Griechen' (L4) tummeln.

so bekam der schon 1907 entdeckte große 'Trojaner' (624) **Hektor** seinen Namen noch vor der Aufteilung in die beiden gegnerischen Lager und befindet sich heute zumindest am Himmel auf Seite der 'Griechen'. Umgekehrt ist der zu Ehren des griechischen Helden Patroclus benannte **Asteroid** (617) bei den Trojanern gelandet.

Auch die anderen **Planeten** haben 'Trojaner' als Begleiter, sogar die Erde. Davon gibt es aber nur wenige, der unangefochtene Sieger in diesem Wettbewerb ist **Jupiter**.

## 4.4 Keplersche Gesetze

Aus der **großen Halbachse**  $a$  kann man mit dem dritten **Keplerschen Gesetz** der Planetenbewegung<sup>1</sup> die **Umlaufperiode**  $T$  bestimmen. Das ist die Zeitdauer für einen kompletten Umlauf des Planeten um die Sonne. Das Gesetz besagt, dass das Verhältnis

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{const} \quad (4.2)$$

für alle Objekte des Sonnensystems, die sich auf **elliptischen Bahnen** um unser Zentralgestirn bewegen, gleich ist. Kennt man die große Halbachse  $a$  eines Asteroiden, kann man mit dem dritten Keplerschen Gesetz (4.2) seine Umlaufzeit  $T$  berechnen, am einfachsten durch Vergleich mit der Erdbahn ( $a_E = 1 \text{ AE}$ ,  $T_E = 1 \text{ Jahr}$ ):

$$T = \sqrt{(a/\text{AE})^3} \text{ Jahre}$$

Man beachte, dass die **Exzentrizität** in der Formel *nicht* auftaucht.

Beispiel (1) **Ceres**:  $a = 2,77 \text{ AE} \rightarrow T = 4,61 \text{ Jahre}$ .

In der Praxis argumentiert man eher andersherum: Die Umlaufzeit  $T$  eines Asteroiden kann man relativ leicht aus mehreren zu verschiedenen Zeiten gemachten Positionsbestimmungen bestimmen. Den Abstand zu Sonne und Erde und die damit verbundene **großen Halbachse**  $a$  lässt sich aber ohne Weiteres nicht messen. Also verwendet man (4.2) um aus  $T$  den Wert für  $a$  zu berechnen.

Außer dem ersten und dem dritten von **Kepler** formulierten Gesetz für die Planetenbewegung gibt es natürlich auch das zweite **Keplersche Gesetz**. Dessen qualitative Aussage ist, dass die Planeten im sonnennächsten Punkt auf ihrer Bahn (im **Perihel**) schneller fliegen als im entferntesten Bahnabschnitt (**Aphel**). Alle drei Gesetzmäßigkeiten gelten auch für Asteroidenbahnen!

## 4.5 Rekorde

Die kleinste und die größte zu Beginn des Jahres 2024 bekannte **große Halbachse**  $a$  der Asteroiden sind  $0,462 \text{ AE}$  und  $7200 \text{ AE}$ . Entsprechend liegen deren **Umlaufperioden** um die Sonne zwischen  $T = 0,31$  und  $T = 610\,000$  Jahren!

Wie oben in den Gleichungen (4.1) formuliert, kann man aus  $a$  und  $\epsilon$  den **Minimalabstand**  $P$  und den **Maximalabstand**  $A$  zur Sonne berechnen. Von

---

<sup>1</sup>das genauso auch für Asteroidenbahnen gilt

allen bekannten Asteroiden kommt **2005 HC<sub>4</sub>** der Sonne am nächsten, mit einem Perihelabstand von  $P = 0,070 \text{ AE} \approx 10$  Millionen km. Besonders weit entfernt sich Asteroid **2010 LN<sub>135</sub>** von der Sonne, er erreicht auf seiner sehr exzentrischen Bahn eine Apheldistanz von  $A = 14400 \text{ AE}$  und befindet sich damit im äußeren und sehr kalten Bereich des Sonnensystems, in der **Oort-schen Wolke**<sup>2</sup>, in der viele Kometenkerne vermutet werden. Möglicherweise ist **2010 LN<sub>135</sub>** auch eher ein Komet oder Kometenkern, obwohl weder Koma noch Schweif erkennbar sind. Um ein besseres Gefühl für diese riesigen Entfernungen zu bekommen, berechnen wir mit Hilfe der **Lichtgeschwindigkeit** von 300 Millionen km pro Sekunde die entsprechenden Lichtlaufzeiten: Eine **Astronomische Einheit** übersetzt man damit in 8 Minuten, so lange benötigt das Licht von der Sonne bis zu uns. **Neptun** mit  $a = 30 \text{ AE}$  sehen wir mit einer 'Verspätung' von mehr als 4 Stunden. Und 14400 AE sind mehr als ein Fünftel **Lichtjahr**, das Licht braucht fast drei Monate um uns zu erreichen.

Asteroid **2010 LN<sub>135</sub>** hält auch einen weiteren Rekord: Seine **Exzentrizität** beträgt  $\epsilon = 0.99976$ . Das bedeutet, dass er im Perihel so viel kinetische Energie hat, dass er beim Wegfliegen von der Sonne durch deren Schwerkraft gerade noch gebremst werden kann, und unser Planetensystem nicht für immer verlässt.

Natürlich stellt sich auch die Frage, welche Asteroiden der Erde sehr nahekommen und potentiell mit unserem Planeten kollidieren können. Diesem Thema ist Kapitel 19 gewidmet. In diesem Zusammenhang ist ein weiterer Rekord zu berichten: der Kleinplanet **2020 QG** flog im Jahr 2020 so dicht an der Erdoberfläche vorbei, wie kein anderer vorher – soweit bekannt<sup>3</sup>. Er überflog den indischen Ozean in einer Höhe von nur 2950 km [79]. Zum Vergleich: geostationäre Satelliten halten einen Abstand von 36000 km zur Erdoberfläche.

Im Januar 2020 wurde der Asteroid **(594913) 'Ayló'chaxnim** entdeckt [56] – seine Bahn verläuft komplett innerhalb des **Venusorbis**. Derartige sonnen-nahe Himmelskörper sind nur kurz vor Sonnenaufgang oder wenige Minuten nach Sonnenuntergang zu beobachten - ähnlich wie der innere Planet **Merkur**. Der nicht leicht auszusprechende Name 'Ayló'chaxnim ist übrigens einer nord-amerikanischen Indianersprache entlehnt - mit der Bedeutung 'Venus girl'.

---

<sup>2</sup>nach **Jan Oort** benannt

<sup>3</sup>Hier rechnen wir Kleinplaneten, welche die Erdatmosphäre erreicht haben, nicht mit - siehe dazu Kapitel 19 und insbesondere Abbildung 19.4 auf Seite 194.

## 4.6 Strukturen und Instabilitäten

Im aktuellen Kapitel haben wir bisher die Verteilungen einzelner Bahnparameter studiert. Jetzt wollen wir untersuchen, welche Beziehungen es zwischen diesen gibt. Exemplarisch betrachten wir den in Abb. 4.8 gezeigten Zusam-

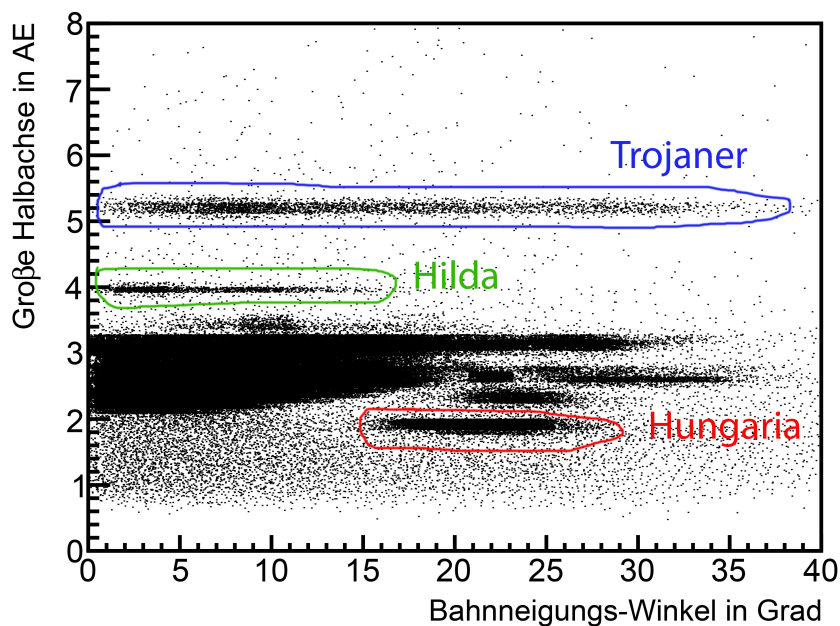


Abbildung 4.8: Häufigkeitsverteilung der Asteroidenbahnen als Funktion von **Bahnneigung**  $i$  und **großer Halbachse**  $a$ . Einige Asteroidenfamilien sind farblich markiert.

menhang zwischen **Bahnneigung**  $i$  (horizontale Achse) und **großer Halbachse**  $a$  (vertikale Achse). Hier ist für jeden Asteroiden ein Punkt eingetragen, gemäß seinen Bahnparametern  $i$  und  $a$ .

Es sind deutlich verschiedene Strukturen erkennbar, die bestimmten **Asteroidenfamilien** entsprechen. Zum Beispiel erkennen wir bei  $a \approx 2$  AE und  $i$  zwischen  $17^\circ$  und  $26^\circ$  eine Anhäufung; diese Asteroidenfamilie nennt man die **Hungaria-Gruppe**, nach ihrem prominentesten Vertreter **(434) Hungaria**. Ein zweites Beispiel ist die Anhäufung bei  $a \approx 3,9 - 4,0$  AE. Der Namensgeber für diese **Hilda-Gruppe** ist der Asteroid **(153) Hilda**. Mehr zu den Klassifizierungen und **Asteroiden-Gruppen** folgt in Kapitel 5.

Und auch die **Jupiter-Trojaner** finden wir in Abbildung 4.8 wieder, bei  $a \approx 5,2$  AE, mit einer breiten Verteilung im Neigungswinkel  $i$ .

Schließlich ist es auch interessant zu untersuchen, wo nur sehr wenige oder keine Asteroiden zu finden sind. Solche Lücken in der Verteilung der großen Halbachse tun sich insbesondere im **Hauptgürtel** auf. Dort findet man die nach **Daniel Kirkwood** benannten **Kirkwood-Lücken**. Diese hat der Namensgeber schon 1866 entdeckt, aufgrund statistischer Analysen der Bahnparameter der seinerzeit bekannten Asteroiden. Abbildung 4.9 zeigt für die mehr als eine Million 'heutigen' Asteroiden die Verteilung der **großen Halbachse** im Bereich des Hauptgürtels. Deutliche Minima gibt es zum Beispiel bei  $a_3 = 2,50$  AE und  $a_2 = 3,28$  AE. Die Wahl der Bezeichnungen  $a_3$  und  $a_2$  wird später klar. Um zu verstehen, wieso diese hypothetischen Asteroidenbahnen nicht lang-

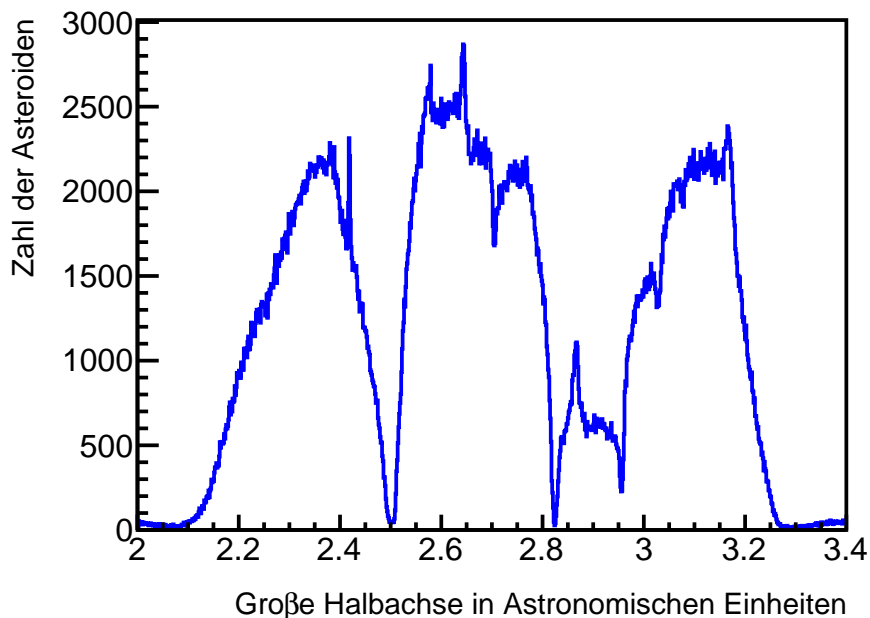


Abbildung 4.9: Häufigkeitsverteilung der **Bahnen** der Asteroiden im **Hauptgürtel** als Funktion der **großen Halbachse**  $a$ . Auswahlbedingungen:  $a = 2,0 - 3,4$  AE, **Bahnneigung**  $i \leq 20^\circ$ .

fristig stabil sind, also heute nicht (mehr) vorkommen, berechnen wir mit dem dritten **Keplerschen Gesetz** (4.2) die zugehörigen Umlaufperioden: zu  $a_2$  gehört  $T_2 = 5,94$  Jahre und hypothetische Asteroiden mit  $a_3$  brauchen  $T_3 = 3,95$  Jahre für einen Umlauf um die Sonne. Vergleicht man diese Werte mit der Umlaufperiode  $T_J = 11,86$  Jahre von **Jupiter**, ist der 'Schuldige' schon gefunden, denn seine Umlaufzeit ist ein ganzzahliges Vielfaches von  $T_2$  und  $T_3$  – das kann kein Zufall sein! Der Riesenplanet Jupiter 'stört' die Asteroidenbahnen und erzeugt die Kirkwood-Lücken!



Im Folgenden versuche ich dies zu erklären: Nicht nur die Sonne, sondern auch der massereiche Planet Jupiter mit seinem starken Gravitationsfeld beeinflusst die Asteroidenbahnen. Je nach relativer Position kann dies zur Beschleunigung oder zur Abbremsung des Asteroiden auf dessen Bahn führen. Im zeitlichen Mittel gleicht sich das mehr oder weniger aus, so dass die meisten Bahnen des Hauptgürtels auch langfristig nur kleine Änderungen erfahren. Bei den diskutierten Halbachsen  $a_2$  und  $a_3$  sieht das aber anders aus. Offenbar gilt

$$\frac{T_J}{T_2} = 2 \qquad \frac{T_J}{T_3} = 3 \quad .$$

Bei solchen ganzzahligen Vielfachen der Umlaufzeiten spricht man von **Bahnresonanzen**, konkret beobachten wir bei  $a_2$  eine 2:1-Resonanz zwischen Asteroid und Jupiter und bei  $a_3$  tritt eine 3:1-Resonanz auf. Was passiert hier? Betrachten wir die 2:1-Resonanz: Wie in Abbildung 4.10 illustriert nehmen wir

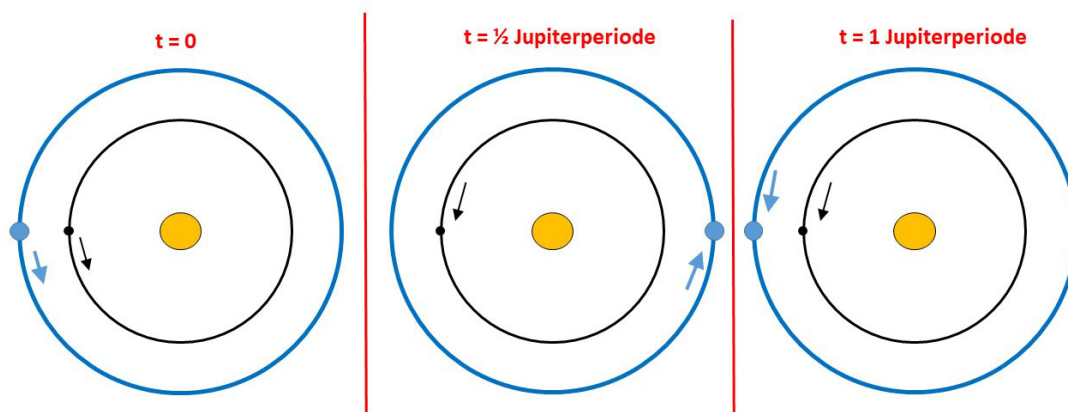


Abbildung 4.10: Illustration zur 2:1-Resonanz von Jupiter (blau) und Asteroid (schwarz) die sich um die Sonne (gelb) bewegen.

an, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt Asteroid und Jupiter den minimalen Abstand zueinander haben. Wenn der Asteroid mit  $T_2$  zwei Umläufe gemacht hat, hat sich Jupiter einmal um die Sonne bewegt, und beide Himmelskörper sind wieder in der genau gleichen relativen Position wie zuvor. Das wiederholt sich alle 11,86 Jahre. Jupiter mit seinem starken Gravitationsfeld beeinflusst also den Asteroiden periodisch immer mit dem gleichen Vorzeichen der Schwerkraft, so dass sich die resultierenden Bahnänderungen 'aufschaukeln' und die **Bahnparameter** geändert werden, bis die Resonanzregion verlassen ist. Das bedeutet, dass die meisten Asteroiden mit  $a_2$  (und entsprechend  $a_3$  etc.) in benachbarte Bereiche abgedrängt wurden, also jetzt eine größere oder verkleinerte Halbachse  $a$  haben.

Wegen des eindeutigen Zusammenhangs zwischen **Umlaufperiode  $T$**  und **großer Halbachse  $a$**  übersetzen sich die bei einfachen ganzzahligen Verhältnissen von  $T_{\text{Jupiter}}/T_{\text{Asteroid}}$  auftretenden Resonanzen also in Lücken bei **großen Halbachsen  $a$**  mit

$$\frac{a_{\text{Asteroid}}}{a_{\text{Jupiter}} = 5,204 \text{ AE}} = \left( \frac{T_{\text{Asteroid}}}{T_{\text{Jupiter}} = 11,86 \text{ J}} \right)^{2/3} .$$

Dies folgt direkt aus dem 3. **Keplerschen Gesetz** (4.2). Die **Kirkwood-Lücke** bei  $a = 2,50 \text{ AE}$  entspricht somit der dreifachen Umlaufzeit von **Jupiter** im Vergleich zur Periode des hypothetischen Asteroiden. Man spricht hier von der **Hestia-Lücke**; sie wurde nach dem Kleinplaneten (46) **Hestia** benannt, der sich mit  $a = 2,526 \text{ AE}$  in unmittelbarer Nachbarschaft befindet. Man beachte, dass zwar die Verteilung der Halbachsen Lücken aufweist, aber nicht die Abstände von der Sonne, denn die Asteroidenbahnen sind ja alle mehr oder weniger elliptisch und daher variieren die Distanzen zu unserem Zentralgestirn mit der Zeit. Es gibt also keine ‘asteroidenfreie’ Zone im **Hauptgürtel**.

Auch im **Kuiper-Gürtel** machen sich **Bahnresonanzen** bemerkbar, jetzt aufgrund der Wechselwirkung mit dem äußeren Planeten **Neptun**. Im Gegensatz zu den **Jupiter-Resonanzen** sind die im **Kuiper-Gürtel** stabil, führen also nicht zu Lücken in der Verteilung der großen Halbachse, sondern zu Anhäufungen. Die 3:2-Resonanz mit Neptun entspricht  $a \approx 40 \text{ AE}$  und die hier umlaufenden Asteroiden nennt man **Plutinos**, denn (134340) **Pluto** gehört auch dazu. Hier kommt es zu stabilen Asteroidenbahnen, weil die periodischen Störungen durch Neptun nicht immer punktuell am gleichen Ort Einfluss nehmen, sondern diese entlang der gesamten Asteroidenbahn wirken und so ausgleichend wirken. Grund dafür ist, dass Asteroid und Neptun, die fast zur gleichen Zeit ihre jeweilige Aphel-Position erreichen, sich nie sehr nahekommen, bei größter Annäherung beträgt der Abstand von Neptun im Fall des Zwergplaneten Pluto immerhin  $17 \text{ AE}$ . Bei den Jupiter-Resonanzen sind diese minimalen Abstände nur von der Größenordnung 2 bis 3 **AE**.

## 4.7 Geschwindigkeiten

Last not least werfen wir einen Blick auf die Geschwindigkeiten der Asteroiden. Zunächst müssen wir klären, relativ zu welchem Himmelskörper wir die berechnen: wir wählen die **Sonne**. Die Geschwindigkeit ändert sich entlang der Bahn, die höchste Geschwindigkeit wird im **Perihel** erreicht, also bei minimalem Abstand von der Sonne. Auf dem Flug dorthin ist ein großer Teil der Gravitationsenergie in kinetische Energie umgewandelt worden. Abbildung 4.11 zeigt die Häufigkeitsverteilung der **Perihelgeschwindigkeiten  $v_p$** . Diese hängt

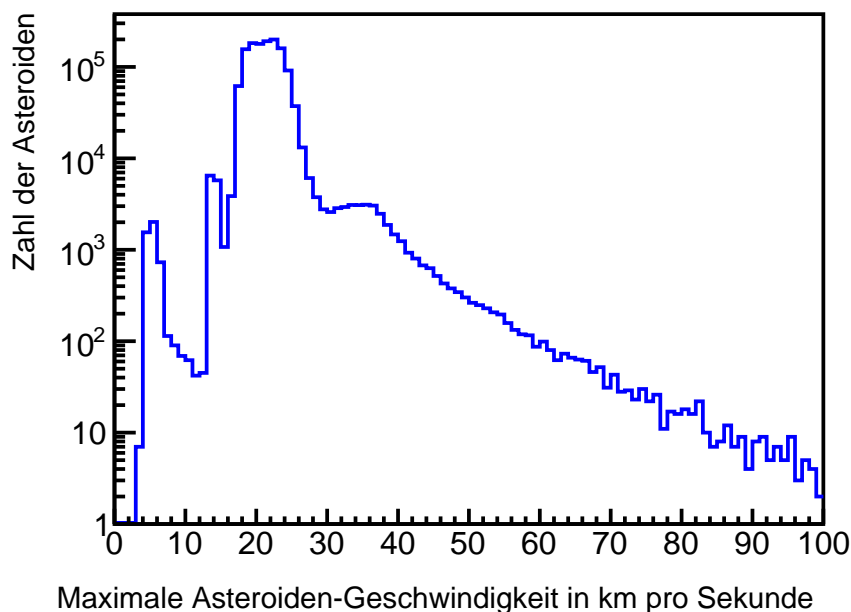


Abbildung 4.11: Häufigkeitsverteilung der **Perihelgeschwindigkeiten** aller bekannten Asteroiden bis zu Werten von 100 km/s, relativ zu Sonne. Logarithmische Auftragung.

von der **großen Halbachse**  $a$  und der **Exzentrizität** der Bahn ab. Wenn letztere nicht zu groß ist, wächst  $v_P$  näherungsweise mit dem Kehrwert der Wurzel aus  $a$ ,

$$v_P \sim \frac{1}{\sqrt{a}} \quad .$$

Das bedeutet, dass die entfernten Asteroiden, also die **Trans-Neptun-Objekte**, links in Abbildung 4.11 wiederzufinden sind. Die Anhäufungen in der Nähe von 15 km/s und 22 km/s entsprechen dem äußeren und dem inneren Bereich des **Asteroidenhauptgürtels**. Rechts im Bild findet man die Asteroiden des inneren Teils des Sonnensystems, im Bereich **Merkur** bis **Mars**. Weltmeister ist der uns schon durch die minimale Periheldistanz aufgefallene Asteroid **2005 HC<sub>4</sub>** mit einer sehr exzentrischen Bahn. Er erreicht 157 km/s = 570000 km/h bei seinem Vorbeiflug an der Sonne. In Abbildung 4.11 ist er gar nicht mehr eingezeichnet, sein Geschwindigkeitswert liegt weit rechts außerhalb der Grafik. Zum Vergleich: Die Bahngeschwindigkeit der Erde um die Sonne beträgt etwa 30 km/s.

Die höchste Geschwindigkeit relativ zu *Erde* hat der Asteroid **(343158) Marsyas** im Jahr 1956 erreicht [195]: 81 km/s! Dieser Wert ist so hoch, weil sich

dieser Kleinplanet auf einer retrograden **Bahn** bewegt, also der Erde auf seinem Weg um die Sonne entgegenkommt; erfreulicherweise werden die beiden Himmelskörper aber nicht kollidieren.

## 4.8 Irdische Perspektive

Bisher haben wir die **Bahnen** in ihrer mathematischen Form analysiert. Ein hypothetischer Beobachter außerhalb des Sonnensystems nimmt – über einen Zeitraum von einigen Jahren – tatsächlich die diskutierten **Ellipsenbahnen** wahr. Aber wie präsentiert sich die Bewegung des Asteroiden den Astronominen und Astronomen auf der Erde? Ähnlich wie die der **Planeten**. Da sich die meisten Asteroiden im **Hauptgürtel** zwischen **Mars** und **Jupiter** bewegen, kann man in erster Näherung die Bewegung unseres hellen roten Nachbarplaneten am Nachthimmel als Beispiel heranziehen.

Stellen wir uns vor wir stehen (besser: sitzen) auf der Nordhalbkugel und blicken ohne spezielle optische Hilfsmittel in südliche Richtung. In einer einzigen Nacht ist die Bewegung von Planeten und Asteroiden relativ zu den Sternen mit dem bloßen Auge nicht erkennbar. Daher wird **Mars** – die richtige Jahreszeit vorausgesetzt – genauso wie die ‘benachbarten’ Sterne abends am Nordosthorizont aufgehen, in der Mitte der Nacht seine höchste Position im Süden erreichen und schließlich im Westen wieder untergehen, wie in Abbildung 4.12 qualitativ illustriert ist. Hintergrund für diese scheinbare Bewegung entlang einer Bogenlinie ist natürlich die Rotation der Erde um ihre eigene Achse.

Interessanter ist die Bewegung des Planeten beziehungsweise Asteroiden relativ zu den entfernten Fixsternen. Ein äußerer Planet wie **Mars** und Asteroiden des **Hauptgürtels** bewegen sich langsamer um die Sonne als die Erde, die Umlaufzeiten sind größer als ein Jahr. Das bedeutet, dass die Erde einen solchen Kleinplaneten auf der inneren Bahn überholt. Deshalb wird der Asteroid sich aus Erdsicht – tendenziell – von rechts (Westen) nach links (Osten) relativ zu den Sternen bewegen, siehe Abbildung 4.13. Ganz so einfach ist es aber nicht. In den Wochen um die Oppositionsstellung (Sonne-Erde-Mars bilden eine Linie) kommt es zu einer scheinbaren retrograden Bewegung. Wie diese zustande kommt, zeigt ebenfalls Abbildung 4.13. Die von der Erde wahrgenommenen Positionen relativ zu den Fixsternen ergeben sich durch Verlängerung der Linie Erde-Mars. Man erhält die weiß gestrichelt gezeichnete ‘**Oppositionsschleife**’. Eine Zeitlang scheint Mars also ‘falsch’ herum zu fliegen, von West nach Ost. Man spricht deshalb von ‘**retrograder**’ Bewegung.

Für den Asteroiden und Zwergplaneten (1) **Ceres** ist eine solche Oppositionsschleife in Abbildung 4.14 gezeigt. Zwischen dem 1.10.2026 und dem 1.5.2027

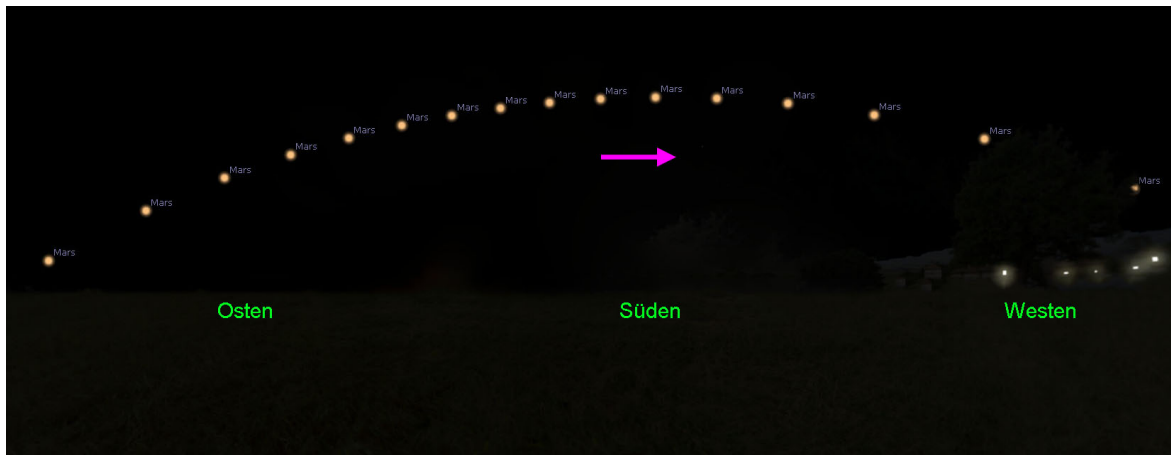


Abbildung 4.12: **Mars**-Bogen am Nachthimmel. Sterne sind nicht gezeigt. Am Westhorizont sind auch einige Bäume, Häuser und Lichter eingeblendet. Das Zeitfenster umfasst etwa 15 Stunden (Winternacht). Die Graphik basiert auf Simulationen mit dem Programm Stellarium [140].

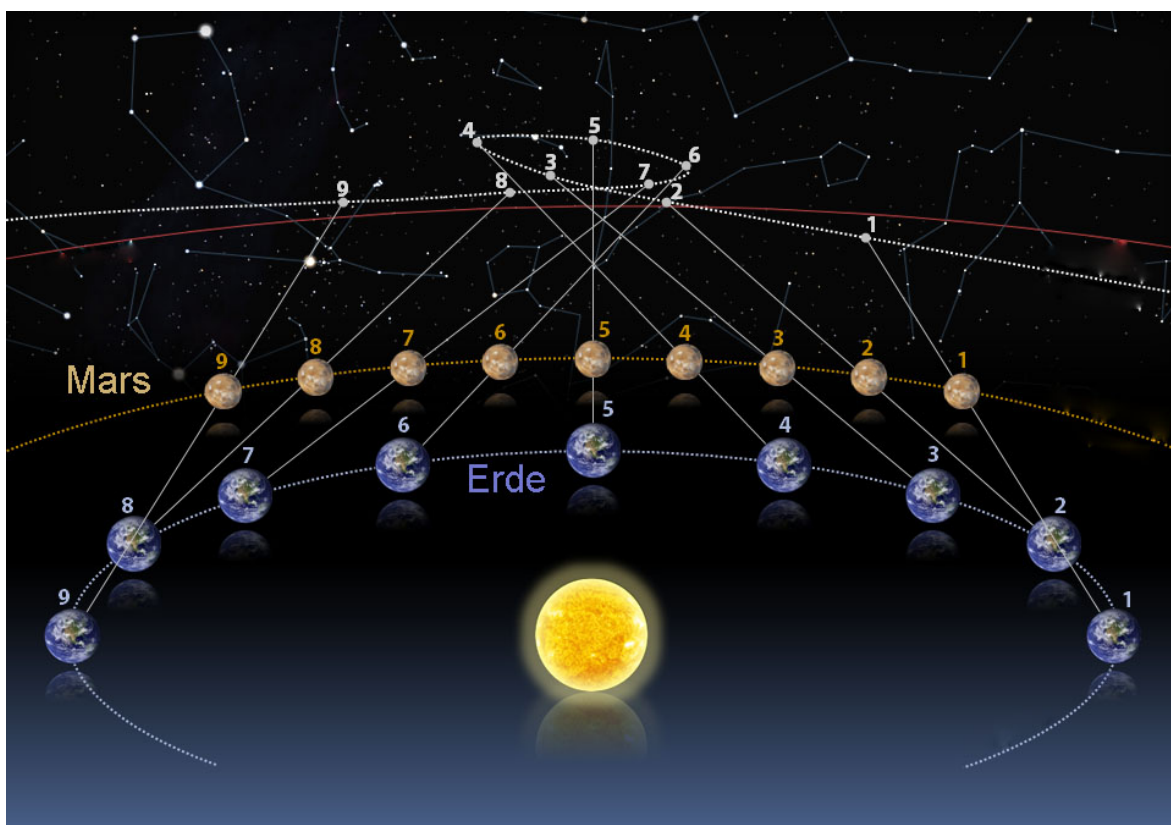


Abbildung 4.13: **Mars**-Bewegung relativ zu den Fixsternen [107].

ist die scheinbare Bahn durch das Sternbild Zwillinge dargestellt. Eine solche Asteroiden-Bewegung kann nur mit gutem Fernglas oder Teleskop beobachtet oder – besser – fotografisch festgehalten werden, siehe Kapitel 3 und 10.

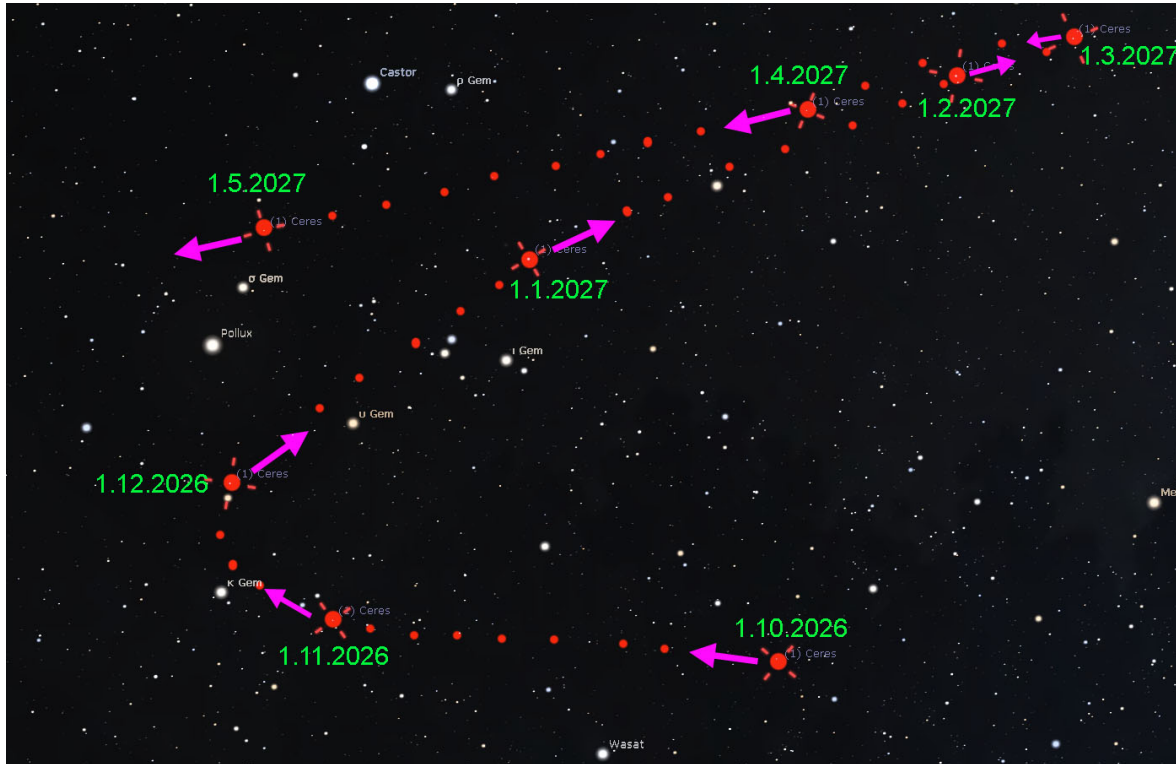


Abbildung 4.14: Die scheinbare Bewegung des Asteroiden (1) Ceres relativ zu den Fixsternen zwischen dem 1.10.2026 und dem 1.5.2027. Im Hintergrund sieht man das Sternbild Zwillinge mit seinen prominenten Vertretern Castor und Pollux. Die Graphik basiert auf Simulationen mit dem Programm Stellarium [140].

Die Geschwindigkeit der Relativbewegung Asteroid-Fixsterne kann man abschätzen. Bei einem relativ weit entfernten und damit langsamen Asteroiden liefert die kürzere Erdumlaufzeit von einem Jahr, also 365 Tagen, die relevante Referenz. In diesem Zeitraum bewegt sich der Asteroid kaum, und die Erde kreist einmal um die Sonne, der entsprechende Drehwinkel ist somit  $360^\circ$ .

Die **Größenordnung** der scheinbaren Asteroidenbewegung – relativ zum Fixsternhimmel – an einem Tag ist daher durch den Winkel

$$\approx 360^\circ \cdot \frac{1}{365} \approx 1^\circ$$



gegeben. Bei Asteroiden, die dicht an der Erde vorbeirasen, ist die entsprechende Winkelgeschwindigkeit<sup>4</sup> natürlich viel größer. Andererseits bleibt bei Umkehr der Bewegungsrichtung während des Durchlaufens der Oppositionsschleife der äußere Planet oder Asteroid sogar kurzzeitig stehen – von der Erde aus gesehen. Dann ist die Winkelgeschwindigkeit null. In Abbildung 4.13 entspricht das den Punkten 4 und 6.

---

<sup>4</sup>Richtungsänderung pro Zeit





## Kapitel 5

### Wie klassifiziert man Asteroiden?

Wissenschaft fängt oft damit an, dass man beobachtete Phänomene katalogisiert und klassifiziert. Letzteres bedeutet, dass man Strukturen und Gesetzmäßigkeiten erkennt, deren Hintergründe und Entstehung man dann durch geeignete Modelle zu erklären versucht. So erlangt man ein tieferes Verständnis.

#### 5.1 Klassifizierung nach Bahneigenschaften

Die Erforschung der Asteroiden bildet hier keine Ausnahme: Seit der Entdeckung des ersten Asteroiden (1) Ceres im Jahr 1801 hat man inzwischen mehr als 1 Million dieser Kleinplaneten beobachtet und deren Bahnen um die Sonne vermessen.

Andere Eigenschaften der Asteroiden sind in der Regel nur schwer zu bestimmen, dazu gehören Größe, Form, Masse und Oberflächeneigenschaften. Deshalb beruht die wichtigste Typisierung auf den Charakteristika der Bahnen um die Sonne. Diese werden in Kapitel 4 präsentiert und statistisch untersucht. Klar zeichnen sich Gruppierungen in Form von Häufungen in den Verteilungen der Bahnparameter ab, insbesondere bei der großen Halbachse  $a$  der elliptischen Orbits. Der Astronom Kiyotsugu Hirayama hat im Jahr 1918 als Erster erkannt, dass es Gruppen von Asteroiden mit ähnlichen Bahnen gibt [158]. Nach ihm wurde der Asteroid (1999) Hirayama benannt.

Im Laufe der Zeit sind die Einteilungen in Asteroiden-Gruppen (die auch Familien oder Hirayama-Familien genannt werden) immer weiter verfeinert und erweitert worden. Im Folgenden sollen nur die wichtigsten vorgestellt und erläutert werden:

- **Asteroidengürtel = Hauptgürtel**

Das sind Asteroiden zwischen **Mars** und **Jupiter**, genauer mit **großen Halbachsen**  $a$  zwischen 2,0 und 3,4 AE; zum Vergleich: Mars:  $a = 1,52$  AE, Jupiter:  $a = 5,20$  AE. Asteroidenbahnen, welche dicht an die von benachbarten **Planeten** heranreichen, sind in der Regel instabil und werden daher vergleichsweise selten beobachtet. Manchmal beschränkt man die Definition der Hauptgürtel-Asteroiden auf solche mit nicht zu großen Bahnneigungen bis  $i = 20^\circ$ , eine scharfe Grenze gibt es aber nicht. Die meisten der bekannten Kleinplaneten sind hier zu finden, und ihre aufsummierte Masse macht den größten Teil der insgesamt in allen bekannten Asteroiden steckenden Masse aus. Im Asteroidengürtel findet man auch den Asteroiden **(1) Ceres**. Über Theorien zur Entstehung des Asteroidengürtels berichtet Kapitel 14.

- **Kuiper-Gürtel**

Diese Asteroiden haben **große Halbachse**  $a$  der Größenordnung 30 – 50 AE, befinden sich also jenseits der **Neptun**-Bahn. Prominentester Vertreter des Kuiper-Gürtels ist der Zwergplanet **(134340) Pluto**, und auch die recht großen Zwergplaneten **(136199) Eris**, **(136108) Haumea** und **(136472) Makemake** sind in dieser fernen Region beheimatet. Man spricht von den **Kuiper-Belt-Objekten (KBO)**, falls  $a$  zwischen 30 AE und 50 AE beträgt. Wie diese vage Bezeichnung 'Objekt' schon andeutet, will man sich nicht so recht festlegen, ob es sich eher um Asteroiden oder Kometen handelt. Namensgeber dieses Gürtels ist **Gerhard Peter Kuiper**<sup>1</sup>. Die Himmelskörper mit einem mittleren Abstand von mehr als 30 AE von der Sonne werden auch als **TNOs** bezeichnet: **Trans-Neptun-Objekte**. Bis zum Jahr 2023 sind etwa 3000 TNOs entdeckt worden [111]. Die Zwergplaneten und anderen Asteroiden des äußeren Sonnensystems werden detailliert im Buch von **Michael Moltenbrey** vorgestellt [177].

- **Jupiter-Trojaner**

Kapitel 4 hat diese schon beschrieben. Es handelt sich um Asteroiden, die **Jupiter** auf dessen Bahn folgen oder ihm 'vorauslaufen'. Als Namensgeber dieser Familie könnte man **(3912) Troja** vermuten - das ist aber falsch, letzterer gehört zum **Hauptgürtel**!

- **Erdnahe Asteroiden**

Diese werden mit **NEO (Near-Earth Object)** oder **NEA (Near-Earth Asteroid)** abgekürzt. Diese sind von besonderem Interesse, weil sie der Erde sehr nahekommen und potentiell in der Zukunft mit unserem Planeten kollidieren können. Ein Beispiel ist der ein paar Meter große Asteroid

---

<sup>1</sup>Seine wissenschaftlichen Leistungen werden durch den Asteroidennamen **(1776) Kuiper** gewürdigt.

'2023 BU', der am 27. Januar 2023 in weniger als 4000 km Abstand an der Erde vorbeiflog. Zum Vergleich: die geostationären Fernsatsatelliten fliegen in 36 000 km Höhe. Mehr dazu im Abschnitt 19.6; dort wird auch eine weitere (Unter-)Klassifizierung vorgenommen.

- **Gruppen außerhalb des Hauptgürtels**

Hier gibt es verschiedene **Asteroiden-Gruppen**, die jeweils nach einem typischen Vertreter benannt wurden. Auch Asteroiden mit großen Halbachsen zwischen denen von **Mars** und **Jupiter** können dazu gezählt werden, wenn die Asteroiden-Bahnebenen ungewöhnlich stark zur Ekliptik geneigt sind mit einem **Inklinationswinkel**  $i > 20^\circ$ . Beispiele sind die **Hungaria-Gruppe** – mit (434) **Hungaria** – und die **Hilda-Gruppe** – um (153) **Hilda**; letztere wurden schon in Kapitel 4 angesprochen. Weitere Familien dieser Sorte folgen den 'Anführern' (2) **Pallas**, (65) **Cybele** und weiteren. Bei einigen dieser Gruppen vermutet man, dass sie aus einem größeren Himmelskörper entstanden sind, der durch eine Kollision oder aufgrund der Gravitationswirkung von Jupiter vor langer Zeit zerstört wurde.

- **Zentauren.**

Namensgeber sind die Kentauren – Mischwesen aus Mensch und Pferd in der griechischen Mythologie. Diese Himmelskörper haben einen minimalen Abstand zur Sonne (Perihelabstand), der zwischen den mittleren Bahnradien von **Jupiter** (5,2 AE) und **Neptun** (30 AE) liegt. Die **Zentauren** sind insofern Zwitterwesen, als sie manchmal auch Kometen ähneln. Man spricht auch von **aktiven Asteroiden**. So hat man auf (5145) **Pholus** Eis auf der Oberfläche entdeckt. Würde dieses Objekt in Sonnennähe geraten, könnte das Wasser schmelzen und verdampfen und Pholus einen Schweif ausbilden. Die zwei größten Zentauren sind (2060) **Chiron** und (10199) **Chariklo** mit mehr als 200 km Durchmesser. Beide zeigen schwach ausgeprägtes Koma, einen blassen Schweif und sogar Ringe!

Bei Himmelskörpern welche sich jenseits der Jupiterbahn bewegen, kann man nur schwer zwischen Asteroiden und Kometen unterscheiden, da letztere in diesem Sonnenabstand noch sehr kalt sind und daher noch nicht ausgasen. Das interessante Buch '**Weird Comets and Asteroids**' [195] von **David A.J. Seargent** berichtet mehr über Himmelskörper, die sich hartnäckig einer einfachen Klassifizierung widersetzen.

Die Positionen der Asteroiden bis zur Jupiterbahn zeigt Abb. 1.1 auf Seite 2. Links unten sind die Trojaner und in der rechten Bildhälfte die Griechen zu sehen.

Schließlich gibt es noch eine weitere interessante Art von Asteroiden: solche, die zumindest für eine Zeit zum Mond eines **Planeten** werden. Ende 2022 hat

man erkennt, dass **2022 YG** seit mehreren Jahrzehnten um die Erde fliegt, auf einer Ellipsenbahn. Langfristig sind solche Bahnen aber nicht stabil, so dass derartige Minimonde dann wieder ihre eigenen 'Wege' gehen werden.

## 5.2 Klassifizierung nach Oberflächenmerkmalen

Ein anderes Klassifikationsschema bezieht sich auf die Asteroidenoberfläche. Deren chemische Zusammensetzung kann man durch Messung der Wellenlängenverteilung des vom Kleinplaneten reflektierten Sonnenlichtes untersuchen, siehe auch Kapitel 11.10. Diese **spektroskopischen Analysen** sind von großer Bedeutung, wenn man etwas über die Herkunft der Asteroiden lernen will. So kann man etwa zwischen solchen, die aus Eisen und Nickel bestehen und den eher Kohlenstoff- oder Silizium-haltigen Typen unterscheiden. Natürlich darf man nicht vorschnell von den messbaren Eigenschaften der Oberfläche auf das Innere des Asteroiden schließen. Die Kenntnis der Massendichte ist in diesem Zusammenhang sehr hilfreich, denn Kohlenstoff-Asteroiden sind weniger dicht als metallische Kleinplaneten.

Der Technik der Asteroiden-Spektroskopie ist in diesem Buch der Abschnitt 11.10 gewidmet. Hier geht es um die Ergebnisse. Abbildung 5.1 zeigt vier repräsentative Spektren. Auf der vertikalen Achse ist der Prozentanteil des reflektierten Lichtes aufgetragen, **Albedo** genannt. Man erkennt vier Asteroidentypen C (dunkle Oberfläche), M, S und E (helle Oberfläche). Zusätzlich ist als fünfte Kurve das 'irreguläre' Spektrum V von **(4) Vesta** eingezeichnet. Die Albedo ist also im Allgemeinen eine Funktion der Wellenlänge.

Die heute gebräuchliche Klassifikation – basierend auf den Spektraleigenschaften – geht auf **David J. Tholen** zurück, man spricht vom **Klassifikationsschema nach Tholen**. Es umfasst insgesamt 14 Typen, von denen man die meisten zu drei Gruppen zusammenfassen kann<sup>2</sup>:

- **C-Gruppe**

Die meisten Asteroiden, etwa zwei Drittel, gehören in diese Gruppe. Das C steht für kohlenstoffartig (Carbon). Diese Kleinplaneten sind – wie Kohle – sehr dunkel, nur wenige Prozent des auftreffenden Sonnenlichtes wird reflektiert, siehe Abb. 5.1. Zu dieser Gruppe gehören die Typen B, C, F, D und T, die ähnliche Spektren aufweisen [37, 38]. Die genauen Unterschiede können hier nicht diskutiert werden. Ein prominenter Vertreter des C-Typs und damit automatisch der C-Gruppe ist **(10) Hygiea**. Die

---

<sup>2</sup>Vorsicht: Spektral-Typen und -Gruppen darf man nicht durcheinanderwerfen. Es gibt eine C-Gruppe und auch einen C-Typ!

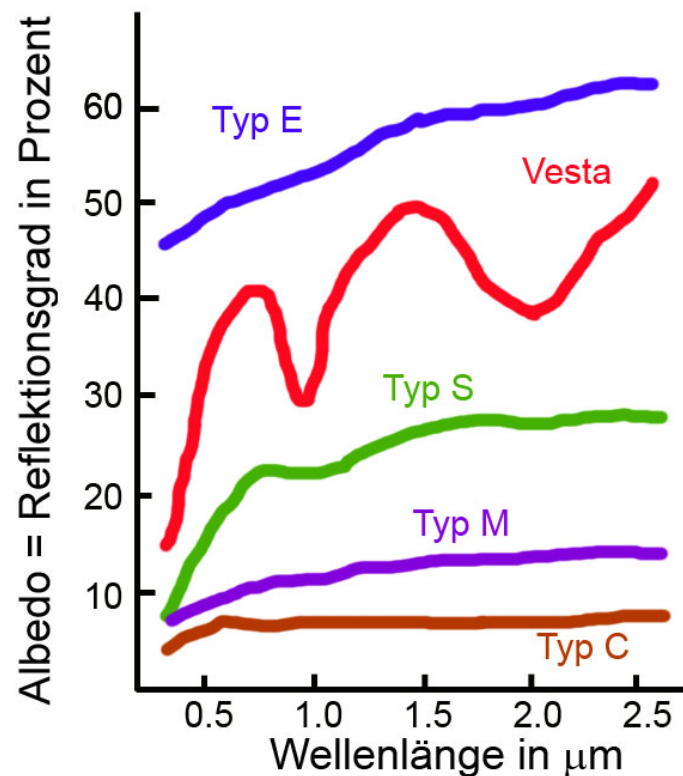


Abbildung 5.1: Fünf gemessene Wellenlängenspektren im sichtbaren Licht (Wellenlängen bis  $0.8 \mu\text{m}$ ) und im nahen Infrarot (größere Wellenlängen) für verschiedene Asteroiden-Typen, nach [118, 191].

Himmelskörper dieser Gruppe zeigen keine spektralen Besonderheiten, also keine Bevorzugung bestimmter Wellenlängenbereiche, sie sind somit *nicht* farbig. Auf der Erde gefundene 'Kohlige Chondrite', eine Form von Steinmeteoriten mit hohem Kohlenstoffanteil, weisen ein ähnliches Reflexionsspektrum auf. Die Bezeichnung Chondrite weist auf Silikat-kügelchen hin, Chondren genannt, die in eine feinkörnige Grundmasse eingelagert sind.

- **S-Gruppe**

Der in Kapitel 10 auf Seite 78 im Bild 10.1 gezeigte Asteroid (15) Euno-mia ist repräsentativ für diese Gruppe. Die zugehörigen Typen sind A, Q, R, S und V. Etwa 15% aller bekannten Kleinplaneten gehören in die S-Gruppe, man findet sie vor allem im **Hauptgürtel**. Das S bedeutet 'Silikat', vereinfacht gesagt, handelt es sich um große Steine! Die entsprechende Meteoritenklasse ist die mit der Bezeichnung 'Gewöhnliche Chondrite'. Die Asteroiden der S-Gruppe haben Albedos zwischen 0.15 und 0.25 und

sind daher deutlich heller als die der Gruppe C. Die Spektren der meisten zur S-Gruppe gehörenden Typen haben nur wenig Struktur, wie Abb. 5.1 für einen S-Typ-Asteroiden zeigt. Eine Ausnahme bilden die 'Vestoiden', seltene Kleinplaneten, die ein ähnliches Spektrum wie (4) Vesta zeigen, siehe Abb. 5.1. Das kann man einer bestimmten Art von Mineralien, Ketensilikaten, zuschreiben.

- **X-Gruppe**

Das ist gewissermaßen die 'Reste-Gruppe', die die recht verschiedenen Typen E, M, P umfasst. Besonders interessant ist der M-Typ: Das M steht für metallisch, die zugehörigen Kleinplaneten enthalten hohe Anteile von Eisen und Nickel. Sie sind die Quellen der auf der Erde gefundenen Eisenmeteoriten. Ein bekannter Vertreter der X-Gruppe ist der M-Typ-Asteroid (16) Psyche, über den man mehr im Kapitel 8.3 erfährt. Insgesamt machen die metallischen Kleinplaneten ungefähr 5% aller Asteroiden aus.

Interessant ist auch, wo im Sonnensystem man welche Asteroiden-Typen findet. Das zeigt Abbildung 5.2 als Funktion des Abstandes von der Sonne.

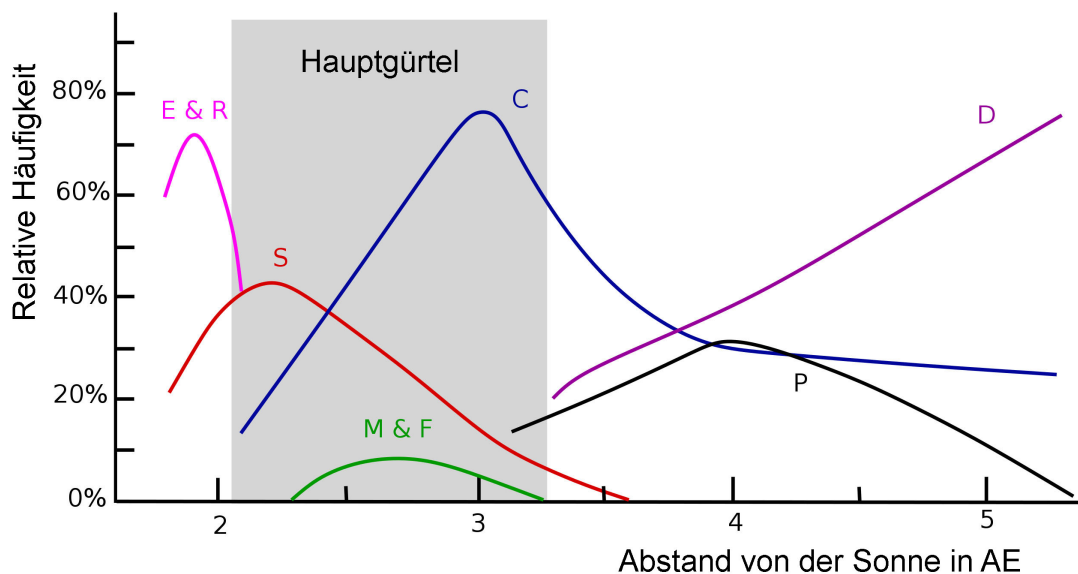


Abbildung 5.2: Anteile der verschiedenen Spektrentypen als Funktion des mittleren Abstandes von der Sonne [93]. Metallhaltige Asteroiden (Typ M) sind also eher selten und vornehmlich im Hauptgürtel anzutreffen. Im äußeren Bereich des Asteroidengürtels dominiert der Spektrentyp C - das sind kohlenstoffhaltige Kleinplaneten.

## Kapitel 6

### Was wissen wir über die Eigenrotation?

Die **Planeten** bewegen sich auf **Ellipsenbahnen** um die Sonne, und gleichzeitig drehen sie sich um eine Achse durch ihren Schwerpunkt. Die Erde benötigt etwa 24 Stunden für die Rotation um ihre Nord-Süd-Achse. Der resultierende Tag-Nacht-Rhythmus ist der wichtigste astronomische Zyklus, der das Leben auf der Erde beeinflusst.

Die Asteroiden, die sich ja in vielfacher Hinsicht wie kleine Planeten verhalten, machen da keine Ausnahme: auch sie haben solare Umlaufzeiten in der Größenordnung von Jahren und vollführen gleichzeitig Drehbewegungen um eine Achse durch ihren Schwerpunkt mit **Perioden** von meist einigen Stunden. Es gibt also auch auf Kleinplaneten sowohl Jahreszeiten wie auch einen täglichen Hell-Dunkel-Takt. Man kann die Eigenrotation insbesondere an der variablen Helligkeit der Kleinplaneten erkennen, denn diese sind ja im Allgemeinen erstens nicht kugelförmig, und zweitens zeigen sie dunklere und hellere Regionen auf ihrer Oberfläche. Entsprechend wird mehr oder weniger Sonnenlicht vom Asteroiden in Richtung Erde reflektiert. Die gemessene Helligkeit bzw. Lichtintensität als Funktion der Zeit nennt man **Lichtkurve**, mehr dazu findet man im Kapitel 11. Abbildung 6.1 illustriert dies.

Eine direktere Messmethode der Umdrehungsgeschwindigkeit benutzen die in Kapitel 11.6 vorgestellten großen aktiven Radarantennen. Sie bestimmen die durch den Dopplereffekt hervorgerufene Frequenzverschiebung zwischen ausgesandten und empfangenen Radio-Signalen. Bewegt sich eine Oberflächenregion des Asteroiden auf uns zu, so ist die Frequenz leicht erhöht, andernfalls verringert. Mit Hilfe der gemessenen Lichtlaufzeit kann man gleichzeitig uns zugewandte und weiter entfernte Regionen des Kleinplaneten unterscheiden. Diese Kombination der Messungen nennt man 'Delay-Doppler'-Verfahren.

Unter den mit Nummer und Namen versehenen (also den etablierten) Asteroiden weist **(646) Lipperta** die langsamste **Eigenrotation** auf, es dauert 68 Tage



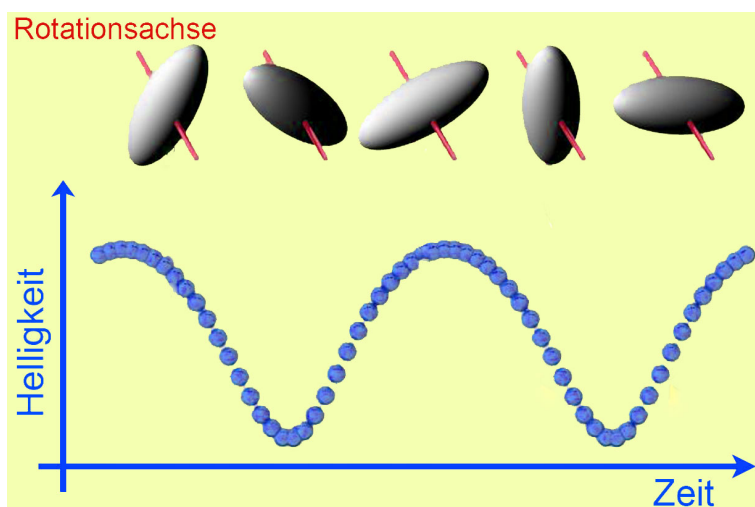


Abbildung 6.1: Illustration des Zusammenhangs zwischen Rotation und **Lichtkurve** eines Asteroiden [175] (adaptiert).

bis eine Umdrehung relativ zum Fixsternhintergrund vollzogen ist [4].

Rasend schnell rotiert der etwa 20 m große Kleinplanet **2014 RC**, die gemessene Periode beträgt nur  $P = 16$  Sekunden [4]! Hier stellt sich natürlich sofort die Frage nach der Stabilität: werden die Fliehkräfte einen solchen Himmelskörper nicht sofort auseinanderreißen?

Um diese Frage zu beantworten, approximieren wir den Asteroiden als homogene Kugel mit Radius  $r$  und Massendichte  $\rho = 3 \text{ g/cm}^3 = 3 \text{ kg/Liter}$ . Die Gesamtmasse  $m_A$  dieses Asteroiden ist dann durch das Produkt von Dichte und Kugelvolumen  $V$  gegeben:

$$m_A = \rho \cdot V = \frac{4\pi}{3} \cdot \rho \cdot r^3 \quad (6.1)$$

Ein Staubteilchen dicht über der Oberfläche spürt die zum Mittelpunkt der Kugel gerichtete Gravitationskraft

$$F_G = G_N \cdot \frac{m_S \cdot m_A}{r^2} \quad (6.2)$$

mit der Masse  $m_S$  des Staubteilchens und der Newtonschen Gravitationskonstanten  $G_N = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}/\text{s}^2$ . Daraus resultiert die Gravitations-Beschleunigung in Richtung Asteroidenzentrum

$$a_G = \frac{F_G}{m_S} = G_N \cdot \frac{m_A}{r^2} = G_N \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot \rho \cdot r \quad (6.3)$$



Auf der Erde nennen wir  $a_G$  Erdbeschleunigung, der Wert beträgt hier  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ . Rotiert die Kugel um ihr Zentrum mit der **Periodendauer**  $P$ , so wirkt auf das Staubteilchen auch eine nach außen gerichtete Fliehkraft. Die entsprechende Zentrifugalbeschleunigung in der Äquatorregion des Kleinplaneten ist

$$a_Z = \omega^2 \cdot r = \left( \frac{2\pi}{P} \right)^2 \cdot r \quad (6.4)$$

wie man im Physikunterricht lernt. Dabei ist  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit der Eigenrotation mit Periode  $P$ . Nur dann, wenn die Gravitations-Beschleunigung  $a_G$  die Zentrifugalbeschleunigung  $a_Z$  überwiegt, wenn also

$$a_G > a_Z \quad (6.5)$$

erfüllt ist, bleibt ein Teilchen an der Oberfläche liegen. Die aus den Gleichungen (6.3), (6.4) und (6.5) folgende Stabilitätsbedingung lautet

$$P > \sqrt{\frac{3\pi}{G_N \cdot \rho}} \approx 2 \text{ h} \quad (6.6)$$

Für unseren Planeten ist diese Bedingung offenbar erfüllt. Wie kann aber Asteroid **2014 RC** überleben, dessen Rotationsdauer beträgt ja nur 0.2% dieses Grenzwertes von 2 Stunden? Bisher haben wir implizit vorausgesetzt, dass der Asteroid ein 'Schutthaufen' ist, der aus kleinen gravitativ zusammengehaltenen Geröllsteinen besteht. Das kann hier aber nicht zutreffen, wie wir gerade berechnet haben. Wir müssen vielmehr aus der beobachteten Periode von nur 16 Sekunden schließen, dass der Asteroid durch andere, stärkere Kräfte als die Gravitation zusammengehalten wird, das sind die auf atomarer Ebene wirkenden elektrischen Kräfte, die materielle Objekte zusammenhalten. Wie nennen diese Festkörper, sie können aus verschiedenen Materialien bestehen, und sind in unserem Alltag allgegenwärtig, von der Büroklammer über den Kieselstein bis zum Baumstamm. Alle diese werden durch elektrische Anziehungskräfte zusammengehalten. Besonders stabile Materialien stellen die Metalle dar. Im Fall des Asteroiden 2014 RC kann man auf einen Eisen-Nickel-Klumpen schließen, denn diese Metalle sind im Sonnensystem häufig anzutreffen, und man weiß, dass viele Kleinplaneten diese chemische Zusammensetzung aufweisen, siehe Kapitel 15.



## Kapitel 7

### Wie wurden die ersten Asteroiden entdeckt?

Die nach ihm benannten vier großen **Jupiter**-Monde hat **Galileo Galilei** schon im Jahr 1609 entdeckt, mit einem der ersten **Teleskope**. In der Oppositionsstellung, also wenn mit Jupiter auch die Galileischen Monde gegenüber der Sonne stehen – von der Erde aus gesehen, dann sind diese alle heller als 6 Magnituden (siehe Kapitel 3). Der hellste Asteroid, **(4) Vesta**, erreicht bei günstigen Randbedingungen einen ähnlichen Wert, 5.2 mag. Vesta wurde aber erst 1807 entdeckt, von **Heinrich Olbers**, also knapp 200 Jahre nach den Galileischen Beobachtungen. Das ist überraschend, denn die technischen Möglichkeiten, einfache Teleskope, waren vorhanden. In dieser Zeitspanne wurden viele andere wichtige astronomische Entdeckungen gemacht: der Messier-Katalog von ‘Nebelobjekten’ wurde von **Charles Messier** veröffentlicht, die Eigenbewegung der ‘Fixsterne’ wurde erkannt, und **William Herschel** entdeckte den **Planeten Uranus**, der mit bestenfalls 5,4 mag nicht heller ist als Vesta. Man kann heute nur spekulieren, warum im 17. und 18. Jahrhundert noch keine Asteroiden entdeckt wurden – vielleicht hat man sie einfach nicht erwartet und daher nicht gesucht? Oder gab es zu wenige beobachtende Astronomen auf der Welt?

Dafür war die Anfangsphase der Asteroidenentdeckungen umso spannender [126, 167, 197]: Sie begann mit der Erkenntnis, dass die Abstände der **Planeten** (von **Venus** bis **Uranus**) zur Sonne bestimmte Regelmäßigkeiten aufweisen. Diese wurden in der sogenannten **Titius-Bode-Reihe** ausgedrückt. Heute wissen wir, dass es keine physikalische Begründung für diese empirische Formel gibt, deswegen schreiben wir sie erst gar nicht auf. Aber die um 1770 aufgestellte Titius-Bode-Reihe wurde seinerzeit sehr ernst genommen, da sie den Abstand des 1781 entdeckten Planeten Uranus von der Sonne gut vorhergesagt hatte. Es gab nur ein Problem: nach der von **Johann Daniel Titius** und **Johann Elert Bode** aufgestellten Gleichung sollte es einen weiteren Planeten geben, mit einer **Umlaufbahn** zwischen denen von **Mars** und **Jupiter**. Man gab

dem hypothetischen Himmelskörper den Namen **Phaeton**<sup>1</sup>. Hatte man diesen übersehen?

Im Jahre 1800 initiierten daher die Astronomen **Baron Franz Xaver von Zach**, **Johann Hieronymus Schroeter** und weitere eine internationale und groß angelegte Suchaktion nach diesem **Planeten**. Dazu wurde der Himmel um die Ekliptik herum in 24 Sektoren eingeteilt und verschiedenen Sternwarten jeweils einer davon zur Beobachtung zugeteilt. Diese **'Himmels-Polizey'** hat zwar den ersten Asteroiden nicht entdeckt war aber dennoch sehr erfolgreich, denn **(2) Pallas**, **(3) Juno** und **(4) Vesta** wurden so gefunden, von **Heinrich Olbers**, (1802), **Karl Ludwig Harding** (1804) und wieder Olbers (1807). Diese drei Neuzugänge wurden auch erst mal als Planeten bezeichnet.

Am 1. Januar des Jahre 1801, dem ersten Tag des 19. Jahrhunderts, wurde der erste Asteroid entdeckt [197]. Heute trägt er den Namen **(1) Ceres** [39]. In Palermo auf Sizilien hatte der Astronom **Giuseppe Piazzi** ein in England gebautes Teleskop benutzt, um von seiner Sternwarte aus den Palermo-Sternkatalog zu vervollständigen. Er wusste zu der Zeit nichts von der Zach'schen Himmelspolizey. Das Teleskop war Teil eines Vertikalkreises, mit dem es um eine horizontale Achse nach oben oder unten verschwenkt werden konnte. Mit Hilfe einer Winkelskala konnte die Höhe des angepeilten Sternes genau abgelesen werden. Bei seinen Beobachtungen, die er zusammen mit seinem Assistenten **Niccolò Cacciato** durchführte [126], fiel ihm ein Himmelsobjekt im Sternbild Stier auf. Beobachtungen der folgenden Tage zeigten, dass es sich tatsächlich relativ zu den Sternen bewegte, und dass es sich dabei nicht um einen Fehler bei der Positionsmessung handelte, wie zunächst befürchtet. Piazzi vermutete, dass es sich um einen Planeten oder einen Kometen handeln könnte. Die Positionsdaten waren aber eher mit Planetenbahnen verträglich.

Diese spannenden Messresultate wurden auch Zach bekannt, der in der von ihm herausgegebenen 'Monatlichen Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels-Kunde' die von Piazzi gemessenen Himmelskoordinaten des neuen 'Gestirns' abdruckte, siehe Abbildung 7.1. Es geht uns hier nicht darum, die Einträge alle im Detail zu verstehen, es soll aber vermittelt werden, dass es sich hier um eine auch heutigen Maßstäben genügende, hervorragende wissenschaftliche Arbeit handelte. Die Tabelle endet in der ersten Februarhälfte. Schlechtes Wetter, eine Erkrankung von Piazzi und schließlich die Konjunktionsstellung von Ceres (befindet sich dann aus Erdsicht nahe der Sonne und ist damit nicht beobachtbar) verhinderten die weitere Verfolgung, so dass Ceres erst mal wieder verloren ging. Leider hatte der italienische Astronom seine Beobachtungen zunächst geheim gehalten, so dass von anderen Standorten

---

<sup>1</sup>nicht zu verwechseln mit dem später tatsächlich gefundenen Asteroiden **(3200) Phaethon**, siehe Abschnitt 8.1.

aus die Observierung von Ceres nicht möglich war.

Der auf einen Vorschlag Piazzis zurückgehende Name ehrt die römische Göttin und Patronin von Sizilien, Ceres. Die Entdeckungen von Piazzis und Zach wurden unter anderem dadurch gewürdigt, dass heute Asteroiden mit den Namen (1000) *Piazzia* und (999) *Zachia* um die Sonne kreisen<sup>2</sup>.

Beobachtungen des zu Palermo d. 1 Jan. 1801 von Prof. Piazzis neu entdeckten Gestirns.

1801	Mittlere Sonnen-Zeit			Gerade Aufsteig in Zeit			Gerade Aufsteigung in Graden			Nördl. Abweich.			Geocentrische Länge			Geocent. Breite			Ort der Sonne + 20" Aberration			Logar. d. Distanz ☉ ☽						
	St	'	"	St	'	"	°	'	"	°	'	"	Z	'	"	°	'	"	Z	'	"							
Jan.	1	8	43	17.8	3	27	11	25	51	47	48.8	15	37	43.5	1	23	22	58.3	3	6	42.1	9	11	1	30.9	9.9926156		
	2	8	39	4.6	3	26	53	85	51	43	27.8	15	41	5.5	1	23	19	44.3	3	2	24.9	9	12	2	28.6	9.9926317		
	3	8	34	53.3	3	26	38	4	51	39	36.0	15	44	31.6	1	23	16	58.6	2	58	9.9	9	13	3	26.6	9.9926324		
	4	8	30	42.1	3	26	23	15	51	35	47.3	15	47	57.6	1	23	14	15.5	2	53	55.6	9	14	4	24.9	9.9926418		
	10	8	6	15.8	3	25	32	1	51	23	1.5	16	10	32.0	1	23	7	59.1	2	29	0.6	9	20	10	17.5	9.9927641		
	11	8	2	17.5	3	25	29	73	51	22	26.0																	
	13	7	54	26.2	3	25	30	30	51	22	34.5	16	22	49.5	1	23	10	37.6	2	16	59.7	9	23	12	13.8	9.9928490		
	14	7	50	31.7	3	25	31	72	51	22	55.8	16	27	5.7	1	23	12	1.2	2	12	56.7	9	24	14	13.5	9.9928809		
	17											16	40	13.0														
	18	7	35	11.3	3	25	55		51	28	45.0																	
	19	7	31	28.5	3	26	8	15	51	32	2.3	16	49	16.1	1	23	25	59.2	1	53	38.2	9	29	19	53.8	9.9930607		
	21	7	24	2.7	3	26	34	27	51	38	34.1	16	58	35.9	1	23	34	21.3	1	46	6.0	10	1	20	40.3	9.9931434		
	22	7	20	21.7	3	26	49	42	51	42	21.3	17	3	18.5	1	23	39	1.8	1	42	28.1	10	2	21	32.0	9.9931886		
	23	7	16	43.5	3	27	6	90	51	46	43.5	17	8	5.5	1	23	44	15.7	1	38	52.1	10	3	22	22.7	9.9932348		
	28	6	58	51.3	3	28	54	55	52	13	38.3	17	32	54.1	1	24	15	15.7	1	21	6.9	10	8	26	20.1	9.9935062		
	30	6	51	52.9	3	29	48	14	52	27	2.1	17	43	11.0	1	24	30	9.0	1	14	16.0	10	10	27	46.2	9.9936332		
	31	6	48	25.4	3	30	17	25	52	34	18.8	17	48	21.5	1	24	38	7.3	1	10	54.6	10	11	28	28.5	9.9937007		
Febr.	1	6	44	59.9	3	30	47	2	52	41	48.0	17	53	36.5	1	24	46	19.3	1	7	30.9	10	12	29	9.6	9.9937703		
	2	6	41	35.8	3	31	19	06	52	49	45.9	17	58	57.5	1	24	54	57.9	1	4	10.5	10	13	29	49.9	9.9938423		
	5	6	31	31.5	3	33	2	70	53	15	40.5	18	15	1.0	1	25	22	43.4	0	54	28.9	10	16	31	45.5	9.9940751		
	8	6	21	39.2	3	34	58	50	53	44	37.5	18	31	23.2	1	25	53	29.5	0	45	5.0	10	19	33	33.3	9.9943276		
	11	6	11	58.2	3	37	6	54	54	16	38.1	18	47	58.8	1	26	26	40.0	0	36	2.9	10	22	35	11.4	9.9945823		

Abbildung 7.1: Beobachtungsdaten von *Giuseppe Piazzis* [59] des Asteroiden *Ceres*. Diese Tabelle wurde in der Zeitschrift 'Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels-Kunde' veröffentlicht. Die beiden linken Spalten enthalten das Beobachtungsdatum und die Zeit (Abendstunden). Dann folgen Angaben zu den gemessenen Positionsdaten und weitere Informationen. Insbesondere findet man in den Spalten 4 und 5 die äquatorialen Koordinaten Rektaszension ('Gerade Aufsteigung') und Deklination ('Nördl. Abweichung').

Dass der neue Himmelskörper 'verloren' ging, barg aber auch eine Chance, die der Mathematiker *Carl Friedrich Gauß* nutzte. Ihm gelang es, in nur wenigen Monaten eine Methode zu entwickeln, um aus den Messdaten der Tabelle 7.1 die Umlaufbahn zu berechnen. So konnte die Position von *Ceres* zu einem späteren Zeitpunkt vorhergesagt werden, und tatsächlich wurde *Ceres* von *von Zach* am 7.12.1801 in der vorausberechneten Himmelsregion wiedergefunden.

<sup>2</sup>Man beachte die weiblichen Namen - siehe Kapitel 2.

Der neue Himmelskörper wurde als **Planet** eingestuft, denn man suchte ja nach einem Planeten, und aus der Helligkeit von Ceres konnte man auf eine Größe von mehreren 100 km schließen. Die im Jahr 1801 entfachte Diskussion, ob die neu entdeckten Objekte nun Planeten oder etwas anderes, wenn auch ähnliches, darstellen, hält bis heute an. 1867 wurde **Ceres** [39] - ähnlich wie **Pluto** im Jahre 2006 - herabgestuft, zu einem Asteroiden. Seit 2006 ist er immerhin wieder aus der Masse der Kleinplaneten aufgewertet worden, wie Pluto gehört er seitdem zu den **Zwergplaneten**. Heute ist Ceres bestens erforscht, insbesondere durch die in Kapitel 13 beschriebene **Dawn-Mission**.

Schon 1802 wurden die ersten Bücher über Asteroiden – genauer, den einzigen bis dato bekannten und zunächst als Planeten eingestuften Kleinplaneten Ceres – verfasst: Der Direktor der Sternwarte von Palermo, **Giuseppe Piazzi** beschrieb seine Entdeckung in ‘**Della scoperta del nuovo pianeta Cerere Ferdinandea**’. **Johann Bode**, Direktor des Berliner Observatoriums, veröffentlichte ‘**Von dem neuen, zwischen Mars und Jupiter entdeckten achten Hauptplaneten des Sonnensystems**’.

In den Folgejahren 1802-1807 wurden die hellen Asteroiden (2) **Pallas**, (3) **Juno** und (4) **Vesta** gefunden. Dann war erst mal Ruhe, erst 1841 wurde (5) **Astraea** entdeckt. Er ist mit bestenfalls 8,7 mag deutlich lichtschwächer als die ersten vier Kleinplaneten. Bis 1890 wurden so etwa 300 Asteroiden aufgespürt. Dann, im Jahr 1891, wurde dieser Zweig der Astronomie revolutioniert, durch die **Fotografie**. Führt man das Teleskop den Sternen nach, werden diese punktförmig abgebildet, aber Asteroiden hinterlassen auf langbelichteten Aufnahmen kurze Strichspuren. Diese neue Methode wurde insbesondere von **Max Wolf** in Heidelberg perfektioniert. Er allein entdeckte so 228 Asteroiden, angefangen mit (323) **Brucia**. Ihm wird übrigens nachgesagt, dass er die Asteroiden immer nur mit Hilfe seiner Fotoplatten ‘gesehen’ hat, sie aber nie direkt durch ein Teleskop beobachtet hat [192]. Die Asteroiden (827) **Wolfiana** und (1217) **Maximiliana** ehren sein Andenken. Mehr über die Entdeckungsgeschichte der Asteroiden präsentiert das schöne Buch ‘**Asteroids**’ von **Clifford J. Cunningham** [126].

Bis heute nutzt man die **Astrofotografie** um Asteroiden zu entdecken oder wiederzufinden. Man vergleicht mindestens zwei zu verschiedenen Zeiten aufgenommene (digitale) Bilder der gleichen Himmelsregion und sucht (mit Computern) nach Punkten die sich relativ zu den ebenfalls abgebildeten Sternen verschieben. Abbildung 7.2 illustriert diese Methode am historischen Beispiel der **Pluto**-Entdeckung im Jahre 1930 durch **Clyde Tombaugh**.



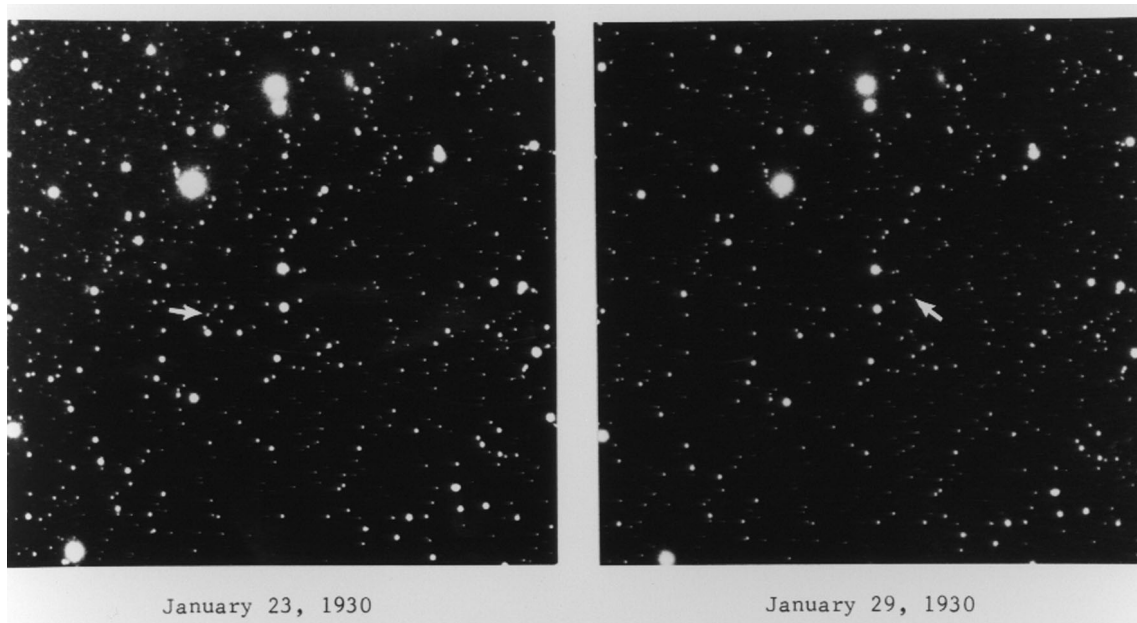


Abbildung 7.2: Fotoplatten die zur Entdeckung von **Pluto** führten. Die Pfeile deuten die Position des Himmelskörpers an. Die Verschiebung der Lage des kleinen Pünktchens innerhalb von 6 Tagen ist deutlich erkennbar [172]. Kredit: Lowell Observatory Archives.





## Kapitel 8

### Gibt es besonders interessante Asteroiden?

Ja, es gibt besonders interessante Asteroiden! Viele sogar! Objektive Kriterien für diese Einstufung existieren natürlich nicht. Zu den Besonderheiten, die einige Kleinplaneten aufweisen und deshalb eine detaillierte Betrachtung motivieren, gehören Entdeckungsgeschichte, Besuch von Raumsonden, naher Vorbeiflug an der Erde, ungewöhnliche **Bahnen**, eigene Monde . . .

Im Folgenden stelle ich drei Asteroiden näher vor, die aus der Menge der über 1 Million mehr oder weniger gut bekannten Kleinkörper in der einen oder anderen Weise 'herausragen', aber nicht 'in aller Munde' sind und auch in diesem Buch nicht an anderer Stelle ausführlich besprochen werden. Die Zwergplaneten sind natürlich auch faszinierende Objekte - ihnen ist ein eigenes Kapitel 9 gewidmet.

#### 8.1 Asteroid (3200) Phaethon

In der griechischen Mythologie hat sich Phaethon, der Sohn des Sonnengottes Helios, dessen Sonnenwagen ausgeliehen, mit dem man zwischen Erde und Sonne reisen kann. Das führt zur Katastrophe, da Phaethon das Viergespann nicht beherrscht. In einigen Versionen kommt er der Erde zu nah, in anderen Varianten der Legende wird der Wagen durch die große Hitze der Sonne zerstört, weil er sich letzterer zu sehr genähert hat.

Diese populäre Auslegung ist Grundlage der Namensgebung des Asteroiden **(3200) Phaethon** [30]. Er ist bis heute (Anfang 2024) von allen mit dem endgültigen Namen versehenen Asteroiden derjenige, der der Sonne am nächsten kommt, mit einer Periheldistanz von  $0,14 \text{ AE}$ <sup>1</sup>. Die starke Annäherung an

---

<sup>1</sup>Andere später gefundene bisher nicht mit Namen versehene Kleinplaneten nähern sich unserem Zentralgestirn bis auf  $0,07 \text{ AE}$ , siehe Unterkapitel 4.5.

die Sonne wird trotz der **großen Halbachse** seiner Bahn von 1,27 AE durch die außergewöhnlich hohe **Exzentrizität** von 0,890 ermöglicht. Dieser **Apollo-Asteroid** (Abschnitte 5 und 19.6) gelangt deshalb auch in entsprechend große Entfernungen, er kreuzt nicht nur die Bahnen von **Merkur**, **Venus** und **Erde**, sondern auch die des Planeten **Mars**. Der Erde kann sich Phaethon bis auf 0,05 AE nähern. Damit fällt der Asteroid in die Kategorie der '**Potentially Hazardous Asteroids**' (PHA), in den kommenden Jahrhunderten bleibt er aber ungefährlich.

Wenn **(3200) Phaethon** der Sonne nahekommt, ergeht es ihm ähnlich wie dem Sonnenwagen in der griechischen Mythologie - er wird sehr warm und die steinige Oberfläche emittiert Staub. Man spricht auch von einem 'Fels-Kometen' oder von einem '**aktiven Asteroiden**'. Der dadurch entstehende Staub-Schweif konnte in den letzten Jahren beobachtet werden und wird in Abbildung 8.1 gezeigt. Man vermutet heute, dass diese Staubpartikel Ursache des immer im Dezember beobachtbaren Geminiden-Meteoriten-Schauers sind. Dann 'kollidieren' diese im Laufe der Zeit in der Nähe der Erdbahn angesammelten Partikel mit der Erdatmosphäre und werden als Sternschnuppen sichtbar. Ganz neue Untersuchungen, die auf Daten der Raumsonden **SOHO** und **STEREO** basieren, welche eigentlich nur für Sonnenbeobachtungen ausgelegt sind, haben aufgedeckt, dass der Schweif auch Natrium enthält [146]. Formal gehört Phaethon aber trotzdem nicht zur Klasse der Kometen.

Interessant sind auch die Entdeckungsgeschichte und in den kommenden Jahren geplante Beobachtungen. **Phaethon** war der erste Asteroid, der von einer Raumsonde aus entdeckt wurde, und zwar mehr oder weniger zufällig, mit dem Infrarot-Satelliten IRAS, im Jahr 1983. Die noch in der Planungsphase befindliche Raumsonde **DESTINY+** [149] soll an **(3200) Phaethon** in einigen Jahren vorbeifliegen und dessen Staub genauer analysieren.

Ansonsten ist Phaethon ein etwa 6 km großer Brocken, der im günstigsten Fall von der Erde aus mit einer scheinbaren Helligkeit von 10,7 mag beobachtet werden kann - für Amateurastronomen also kein spektakuläres Objekt.

## 8.2 Asteroid (69230) Hermes

Der Götterbote! Die Bahndaten sind denen von **(3200) Phaethon** nicht unähnlich: Auch **(69230) Hermes** [31, 194] ist ein Asteroid der **Apollo-Klasse** mit einer **großen Halbachse** von 1,66 AE und einer überdurchschnittlichen **Exzentrizität** von  $\epsilon = 0,623$ . Mit einem Durchmesser von 0,8 km ist er aber deutlich kleiner und masseärmer als Phaethon.

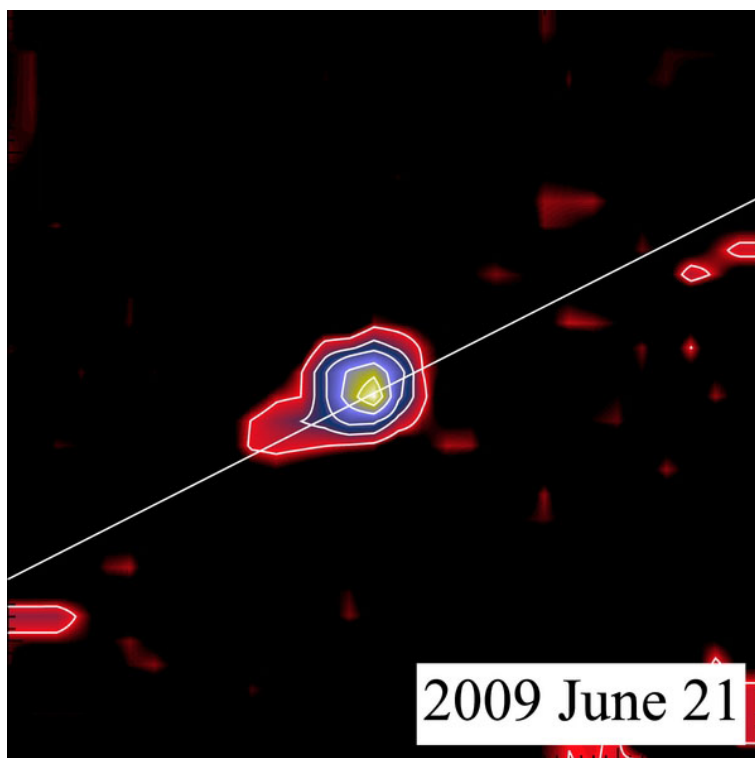


Abbildung 8.1: Schweif des Asteroiden (3200) Phaethon, aufgenommen mit einer der beiden STEREO-Raumsonden, in der Perihelphase 2009 [128]. Die Linie zeigt die Richtung zur Sonne an (oben rechts, außerhalb des Bildfeldes). Die Farben spiegeln die empfangene Lichtintensität wider. Man erkennt den von der Sonne wegweisenden kleinen Schweif. Der Bildausschnitt beträgt  $0,14^\circ \times 0,14^\circ$ .

Spannend ist die Entdeckungsgeschichte: Er wurde am 28. Oktober 1937 in Heidelberg von Karl Reinmuth entdeckt. Zu der Zeit kam uns der Kleinplanet sehr nahe, der minimale Abstand von unserem Planeten betrug etwa den zweifachen Abstand Erde-Mond. Leider konnte der Asteroid nur fünf Tage lang beobachtet werden - das war zu wenig für eine genaue Bahnbestimmung. Er bekam die vorläufige Bezeichnung 1937 UB - aber wegen des unbekanntenen Orbits noch keinen offiziellen Namen. Dafür hatte sich der Entdecker 'Hermes' gewünscht - nach der griechischen Gottheit. Grund für diese Wahl war die schnelle Bewegung des Objektes am Himmel von  $5^\circ$  pro Stunde.

Der Asteroid war im November 1937 also vom Himmel scheinbar verschwunden. Er blieb verschollen bis zum Jahr 2003, als mit dem Asteroiden-Suchprojekt LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth-Object Search) ein Kleinplanet gefunden wurden, dessen Bahndaten mit 1937 UB verträglich waren. Der

verlorene Asteroid war wiederentdeckt worden! Abbildung 8.2 zeigt das von **Brian Skiff** aufgenommene Wiederentdeckungsfoto, genauer: eine Überlagerung von vier im Abstand von 20 Minuten gewonnenen Einzelaufnahmen, die die Bewegung des Asteroiden von links nach rechts deutlich zeigen. Jetzt be-

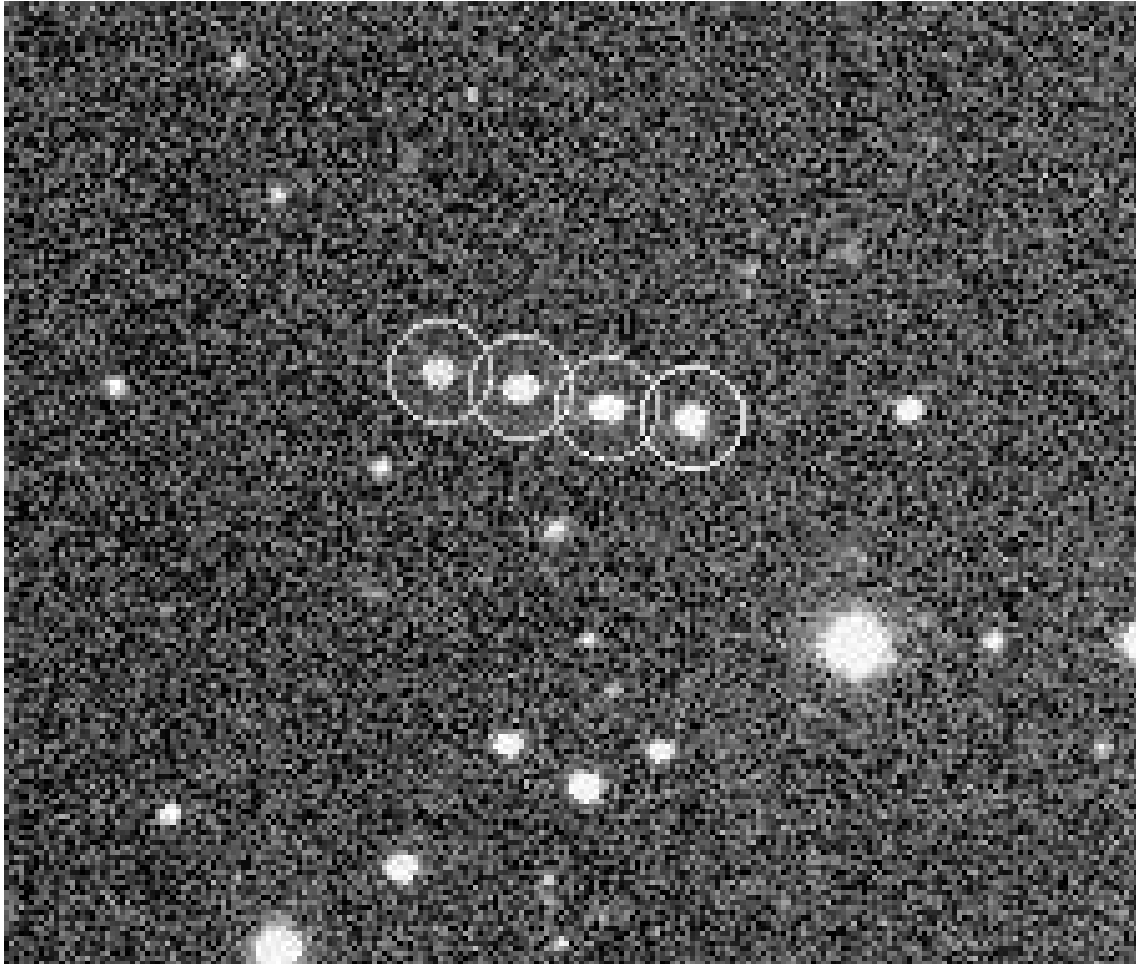


Abbildung 8.2: Wiederentdeckung des Asteroiden **(69230) Hermes** im Sternbild Fische am 15. Oktober 2003 durch **Brian Skiff** [196]. Kredit Einzelbilder: Brian Skiff, LONEOS, Lowell Observatory.

kam er auch eine Nummer und den gewünschten Namen: **(69230) Hermes**. **Karl Reinmuth** (1892-1979) konnte das nicht mehr miterleben. Man beachte, dass die Nummer ungewöhnlich hoch ist für einen schon 1937 entdeckten Kleinplaneten - seinerzeit waren erst weniger als 2000 Asteroiden bekannt!

Aus den inzwischen gut gemessenen Bahndaten kann man rekonstruieren, dass Hermes im April 1942 der Erde noch näherkam als 1937, mit einem minimalen Abstand von 630 000 km. Aber keiner hat's gemerkt! Auch im Jahr

1986 wurde ein Vorbeiflug verpasst. Derartig dichte Vorbeiflüge an unserem Planeten sind sehr selten. Hermes war bis 1989 in dieser Disziplin der Rekordhalter. Klar, er gehört zu den gefährlichen Asteroiden, zu den PHAs.

Zu unseren Lebzeiten gibt es aber Entwarnung: es wird keine Kollision mit der Erde geben. Langfristig ist eine genaue Vorhersage der Bewegung schwierig, da der Asteroid durch nahe Vorbeiflüge an der Erde und auch an der Venus regelmäßig abgelenkt wird, und die Bahn relativ 'chaotisch' variiert.

Interessant ist auch, dass der Steinmeteorit (69230) Hermes einen Begleiter hat, der fast genauso voluminös ist und Peitho [31] getauft wurde<sup>2</sup> – so hieß die Frau des Götterboten Hermes. Peitho wurde mit Hilfe von Radarechos entdeckt, Näheres zu dieser Beobachtungsmethode findet man in Kapitel 11. Von einem Mond zu sprechen ist naheliegend, allerdings nicht gerechtfertigt, denn es ist nicht klar, welchem der beiden ähnlich großen und daher gleichberechtigten Himmelskörper diese Rolle zugewiesen werden soll. Die beiden Partner dieses Binärsystems umkreisen sich gegenseitig im Abstand von nur 1200 km.

### 8.3 Asteroid (16) Psyche

Wie die kleine Nummer (16) andeutet, wurde dieser Planetoid schon früh entdeckt, und zwar im Jahr 1852 von Annibale de Gasparis. Der Himmelskörper bekam den Namen der griechischen Göttin der Seele, Psyche. Die besten Aufnahmen hat bisher das chilenische Very Large Telescope VLT geliefert. Abb. 8.3 zeigt mehrere VLT-Bilder des Asteroiden. Man erkennt die kartoffelförmige Gestalt von (16) Psyche.

In die Schlagzeilen ist dieser Asteroid in den letzten Jahren gelangt, als die NASA ankündigte, eine Sonde mit Namen Psyche zum gleichnamigen Kleinplaneten zu schicken, siehe Kapitel 13. Das Besondere an diesem Himmelskörper ist seine chemische Zusammensetzung: es handelt sich um einen Hauptgürtel-Asteroiden vom Spektraltyp M (siehe Kapitel 5), er besteht zu einem großen Teil aus Eisen und Nickel [29]. Auch über Gold spekuliert die Presse [121].

Da Psyche mit 220 km Durchmesser recht groß ist, beherbergt er auch viel von diesen kostbaren Metallen. Pfiffige Rechner haben ermittelt, dass der entsprechende heutige irdische Rohstoffpreis mehr als 1 Milliarde Euro pro Erdbewohner ausmacht [121]. Das ist natürlich eine völlig irreführende Zahl - denn der Transport zur Erde wäre viel teurer als der Materialwert - siehe dazu auch Kapitel 20.

---

<sup>2</sup>Achtung: Nicht zu verwechseln mit dem Hauptgürtel-Asteroiden (118) Peitho.

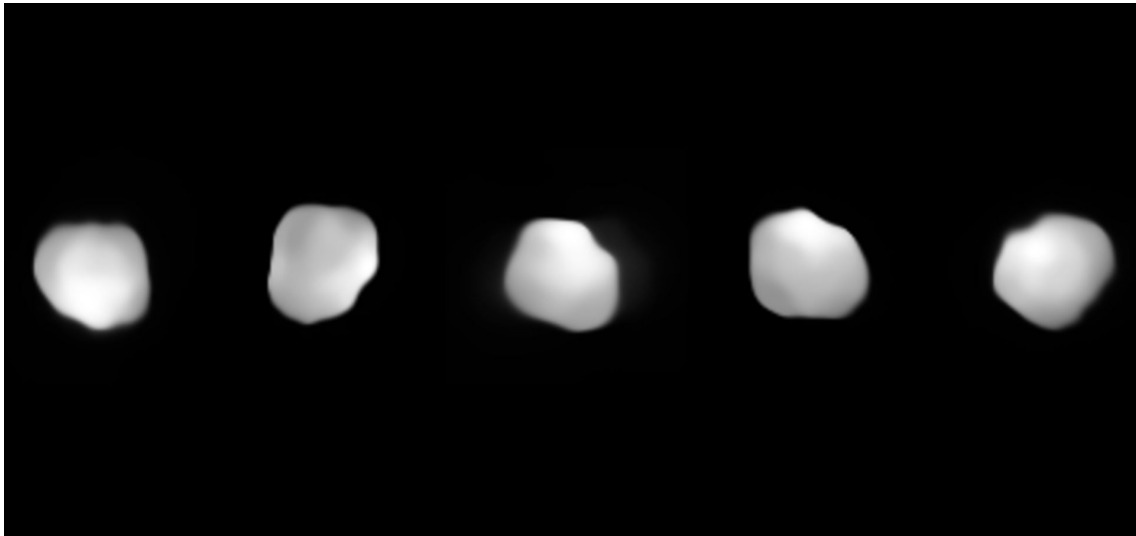


Abbildung 8.3: Asteroid (16) Psyche aufgenommen mit dem Very Large Telescope VLT, das von der ESO in Chile betrieben wird [99].

Wie hat man die metallische Natur erkannt? Wegen seiner Größe hat Psyche durch seine Schwerkraft einen messbaren Einfluss auf andere Asteroiden - so dass man die Masse von (16) Psyche bestimmen konnte. Die Größe (und damit das Volumen) konnten insbesondere durch Sternbedeckungen gemessen werden, mehr zu dieser Methode findet man in Unterkapitel 11.4. Es ergibt sich eine mittlere Dichte von etwa  $4 \text{ g/cm}^3$  [29], das ist mehr als man bei Gesteinsasteroiden findet, so dass man auf einen hohen (aber nicht 100-prozentigen) Gehalt an Metallen schließen kann. Radarmessungen zeigen, dass der Reflexionsgrad (= Albedo) mit etwa 30% recht hoch ist<sup>3</sup> - das deutet ebenfalls auf einen hohen Metallgehalt hin.

In Abbildung 8.4 ist eine **künstlerische Darstellung** von (16) Psyche zu bewundern. So **könnte** dieser Asteroid also aussehen. Das Bild basiert auf den bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen, insbesondere sind die von der Erde aus gemachten Fotos, die die Form dieses Kleinplaneten zeigen, berücksichtigt, siehe Abbildung 8.3 oben. Die Abbildung 8.4 will also der Realität möglichst nahekommen, ist aber natürlich **kein** Foto.

Hier sind ein paar generelle Bemerkungen zu 'künstlerischen Darstellungen' in der Astronomie angebracht. Sie dienen einmal der Illustration von Dingen oder Szenarien, die man (noch) nicht fotografieren kann. In diesem Buch gehören dazu die Abbildung 14.2 der protoplanetaren Scheibe auf Seite 156 in Kapitel 14 und die Darstellung 13.4 der DART-Mission in Kapitel 13, Seite 147.

<sup>3</sup>zum Vergleich: Der Erdmond reflektiert nur 12% des auftreffenden Sonnenlichtes.



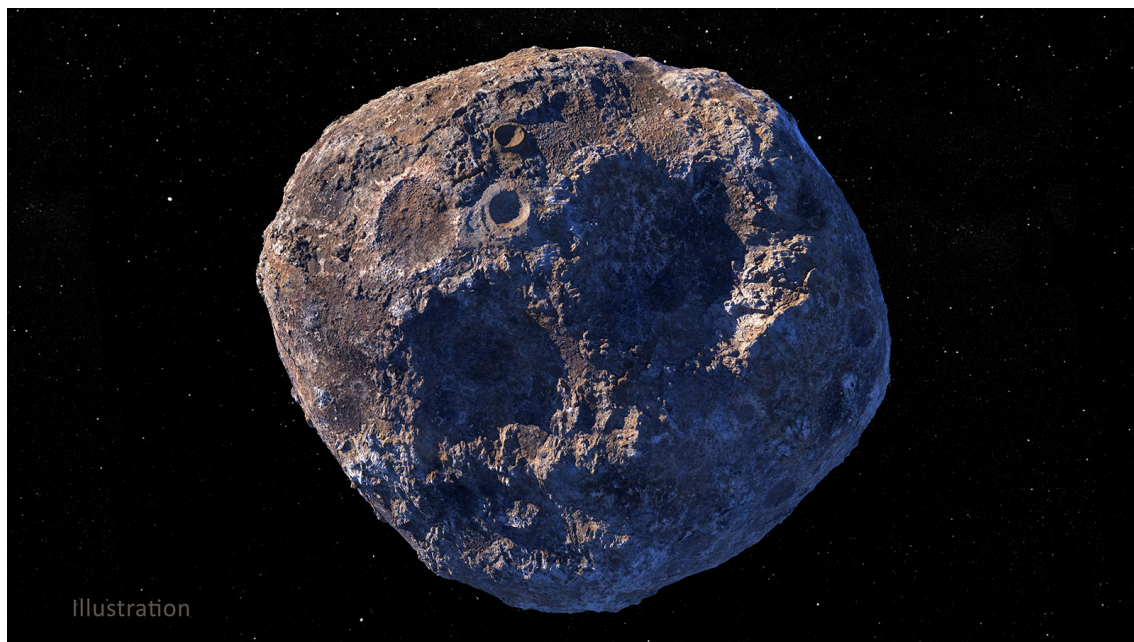


Abbildung 8.4: Asteroid (16) Psyche – **Künstlerische Darstellung**, von der NASA veröffentlicht [100].

Man versucht dabei so realistisch wie möglich zu sein, und auf Unvollkommenheiten wie etwa nicht maßstabgerechte Abstände zwischen Himmelskörpern hinzuweisen. Ich finde diese Bilder oft sehr gelungen und lehrreich, und deshalb sehe sie mir gerne an. Aber man muss sehr vorsichtig sein, und sich immer bewusst bleiben, dass es eben keine Fotos oder exakte Rekonstruktionen sind. In die zweite Kategorie fallen künstlerische Darstellungen, welche 'science fiction' - Szenarien zeigen. Hier ist man weniger an solides Fachwissen gebunden und kann der Phantasie freien Lauf lassen. Auch diese Werke haben ihre Berechtigung und sind oft sehr ästhetisch. Wirklich ärgerlich aber ist das Präsentieren von astronomischen künstlerischen Darstellungen in den Medien ohne klar darauf hinzuweisen, dass es sich eben **nicht** um Fotos handelt. Leider verbreitet sich diese Unart immer mehr.

Um diesen wegen seiner Zusammensetzung interessanten Kleinplaneten genauer zu studieren, soll ihn die unbemannte NASA-Sonde Psyche 20 Monate lang umkreisen, um Oberfläche, Magnetfeld und Schwerkraft zu studieren. Das Treffen von Psyche und Psyche wird aber frühestens im Jahr 2029 erfolgen, obwohl die Raumsonde schon am 13. Oktober 2023 gestartet ist. In einigen Jahren wird es also hoffentlich echte Fotos von Psyche geben - die wir dann mit der Vision in Abbildung 8.4 vergleichen können. . .





## Kapitel 9

### Was ist das Besondere an den Zwergplaneten?

Das ist eines der spannendsten Themen der Asteroidenforschung. Einmal, weil alle diese Objekte – mit Ausnahme von **Ceres** – in den äußeren bisher noch nicht gut verstandenen Bereichen des Sonnensystems ‘leben’. Zweitens, sie sind planetenähnlich und erlauben viele Rückschlüsse auf die Entstehung unseres Sonnensystems. Drittens ist damit ein sehr aktives Forschungsfeld verbunden, in dem laufend neue Beobachtungen gemacht werden. Zwar sind bisher nur fünf Körper des Sonnensystems offiziell als **Zwergplaneten** [71] klassifiziert worden, es gibt aber viele Kandidaten und auch höchstwahrscheinlich eine große Zahl noch unentdeckter großer ferner Asteroiden, die die Kriterien erfüllen. Letztere wurden schon in Kapitel 1 angerissen: Zwergplaneten müssen aufgrund ihrer Masse und der damit verbundenen Gravitationskraft eine ungefähre Kugelform angenommen haben, um aus der Masse der ‘Kleinplaneten’ hervorstechen. Anders als die **Planeten** haben Zwergplaneten es aber nicht geschafft, entlang ihres Orbits alle kleineren Objekte zu eliminieren. Abbildung 9.1 zeigt die größten bekannten **Trans-Neptun-Objekte (TNOs)**. Die vier umfangreichsten und massereichsten sind oben abgebildet, das sind die vier Zwergplaneten in der TNO-Klasse.

Interessant ist auch, dass der (134340) **Pluto**-Mond **Charon** an Größe Ceres überbietet: wäre er nicht der Satellit eines anderen Zwergplaneten, hätte er selbst dieses Etikett verdient.

Die folgende Tabelle 9.1 fasst die wesentlichen Eigenschaften der offiziellen fünf Zwergplaneten sowie einiger Titelanwärter zusammen.

Die Zwergplaneten **Pluto** und **Ceres** sind natürlich auch sehr interessant, werden aber in den Medien schon ausführlich diskutiert (**Pluto**) bzw. wurden in diesem Buch schon eingehend beschrieben (**Ceres**, Kapitel 7).

Daher beschränken wir uns bei den folgenden Steckbriefen auf die drei unbekannteren aber keineswegs weniger interessanten exotischen Asteroiden



Abbildung 9.1: Die größten bekannten **Trans-Neptun-Objekte (TNO)** [90]. **Künstlerische Darstellung!** Für einen Größenvergleich sind unten Erdmond und Erde angedeutet.

(136199) **Eris**, (136108) **Haumea** und (136472) **Makemake**. Sie wurden fast gleichzeitig entdeckt und ihre Existenz im Jahr 2005 der Öffentlichkeit bekanntgegeben. Achtung: schöne Fotos im Sinne von Nahaufnahmen der Oberfläche dieser Objekte gibt es leider nicht: sie sind von der Erde zu weit weg, und Besuche durch Raumsonden haben noch nicht stattgefunden. Abbildung 9.1 ist 'nur' eine **künstlerische Darstellung**; mit Ausnahme von Pluto plus Charon wissen wir nicht genau wie diese TNOs aussehen.

## 9.1 Haumea – eine Hawaische Göttin

Das kann doch gar kein **Zwergplanet** sein! Das war meine erste Reaktion auf die Messdaten zur Form dieses Himmelskörpers. Er ist keineswegs kugelförmig, sondern vielmehr langgestreckt, wie Abbildung 9.1 richtig zeigt. Das El-

Name	große Halbachse in AE	Durchmesser in km	Masse in Erdmassen	Kommentar
(1) Ceres	2,77	939	0,0157 %	Asteroidengürtel
(134340) Pluto	39,5	2377	0,218 %	Entdeckg. 1930
(136108) Haumea	43,2	1560	0,067 %	Entdeckg. 2004
(136472) Makemake	45,6	1400	0,052 %	Entdeckg. 2005
(136199) Eris	67,9	2300	0,28 %	Entdeckg. 2003
(225088) Gonggong	67,5	1200	0,029 %	Entdeckg. 2007
(50000) Quaoar	43,7	1090	0,020%	Entdeckg. 2002
(90377) Sedna	506 (!)	1000	0,02 %	Entdeckg. 2003

Tabelle 9.1: Zwergplaneten und solche, die es werden wollen [71].

lipsoid hat die ungefähren Abmessungen 2200 km x 1700 x 1050 km [64]. Ein Grund dafür ist die sehr schnelle Eigenrotation mit einer Periode von weniger als 4 Stunden – das ist Sonnensystem-Rekord für Objekte, die mehr als 100 km groß sind [64]! Deswegen ist die Äquatorregion durch die Zentrifugalkräfte deutlich gestreckt und der Äquatordurchmesser etwa doppelt so groß wie die der zwischen den beiden Polen ermittelte Abstand. Allerdings ist (136108) Haumea auch nicht rotationssymmetrisch, denn in der Äquatorebene sind maximaler und minimaler Durchmesser mit 2200 km und 1700 km auch deutlich verschieden voneinander. Tatsächlich verlangt die IAU, dass der Himmelskörper sich im ‘hydrostatischen Gleichgewicht’ befinden muss, um das Kriterium für Zwergplaneten zu erfüllen. Ohne signifikante Eigenrotation impliziert das die Kugelgestalt. Ein schnell drehender Asteroid kann aber davon abweichen und sich trotzdem im hydrostatischen Gleichgewicht befinden. Die Asymmetrie in der Äquatorebene wird offenbar als akzeptabel angesehen.

Um den Ruhm der Entdeckung streiten sich zwei Gruppen, die Haumea 2003 und 2004 zum ersten Mal gesichtet haben. Die Kontroverse entbrannte, weil die eine Gruppe möglicherweise Daten des anderen Teams, die durch das **Minor Planet Center (MPC)** öffentlich gemacht worden waren, in unethischer Weise benutzt hatte, um die eigenen Beobachtungen zu konsolidieren. Wir wollen hier nicht weiter in diese Diskussion einsteigen; es soll damit nur gezeigt werden, dass auch in der Asteroidenforschung – wie überall im Leben – Ehrgeiz, Anerkennung und Ruhm eine wichtige Antriebsfeder sind.

Haumea hat zwei Monde, **Hi'iaka** und **Namaka**, siehe Abbildung 9.1. Die bei-

den sind 350 bzw. 160 km groß. Sogar ein Ring um Haumea wurde nachgewiesen.

Alle drei Namen, Haumea, Hi'iaka und Namaka entstammen der Hawaiischen Mythologie. Diese Bezeichnungen wurden in Einklang mit den IAU-Richtlinien gewählt, die verlangen, dass **Kuiper-Belt-Objekte** 'mythological or mythic names, particularly those associated with creation' erhalten sollen [70]. Haumea ist die Gottheit der Fruchtbarkeit, Hi'iaka und Namaka sind ihre beiden Töchter.

Die Bahndaten von Haumea sind denen von **Pluto** recht ähnlich und eher unspektakulär, siehe auch Tabelle 9.1. Die Exzentrizität ist mit 0,19 moderat, auch die Inklination zur Ekliptik liegt mit  $28^\circ$  im Rahmen des Üblichen für KBOs.

## 9.2 Makemake – eine kalte Eiswelt

Es gibt viele Ähnlichkeiten zwischen (136108) Haumea und (136472) Makemake [65] was Größe und **Orbit** angeht. Abbildung 9.2 zeigt die **Bahnkurven** von Makemake im Vergleich zu denen der anderen äußeren Zwergplaneten. Einen Mond fand man auch hier, er hat aber keinen sehr poetischen Namen: **S/2015 (136472) 1**. Sein Spitzname ist 'Mk2'. Makemake steht für eine Gottheit der Osterinseln, und zwar den Schöpfergott.

Die **Bahn** von Makemake ist recht genau bekannt, denn man fand ihn – im Nachhinein – auf Fotoplatten aus dem Jahr 1955, diese wurden also etwa 50 Jahre vor dem offiziellen Entdeckungsdatum belichtet. Damit ist ein großer Teil des 308 Jahre dauernden Umlaufs mit Messungen erfasst. Mit einer maximalen scheinbaren Helligkeit von 'besser' als 17 Magnituden kann er auch von Amateurastronomen fotografisch festgehalten werden, wie Abbildung 9.3 beweist. Derzeit ist Makemake nach **Pluto** das hellste **Trans-Neptun-Objekt (TNO)**.

Es gibt auch bemerkenswerte Unterschiede zwischen Makemake und Haumea: Einmal ist die Rotationsperiode von Makemake mit knapp 23 Stunden viel länger, entsprechend die durch Fliehkräfte erzeugte Abplattung deutlich moderater. Zweitens ist die Oberflächentemperatur sehr niedrig, sie liegt bei  $-230^\circ\text{C}$ , das ist nur etwa  $40^\circ\text{C}$  über dem absoluten Temperatur-Nullpunkt. Grund dafür ist der hohe Wert von 0,8 für die Albedo, das meiste Sonnenlicht wird also reflektiert, statt den Zwergplaneten aufzuwärmen. Grund dafür ist wohl die Beschaffenheit der Oberfläche, die zu einem großen Teil aus festem Methan-Eis besteht. Das ist anders bei Haumea: Hier findet man vor allem

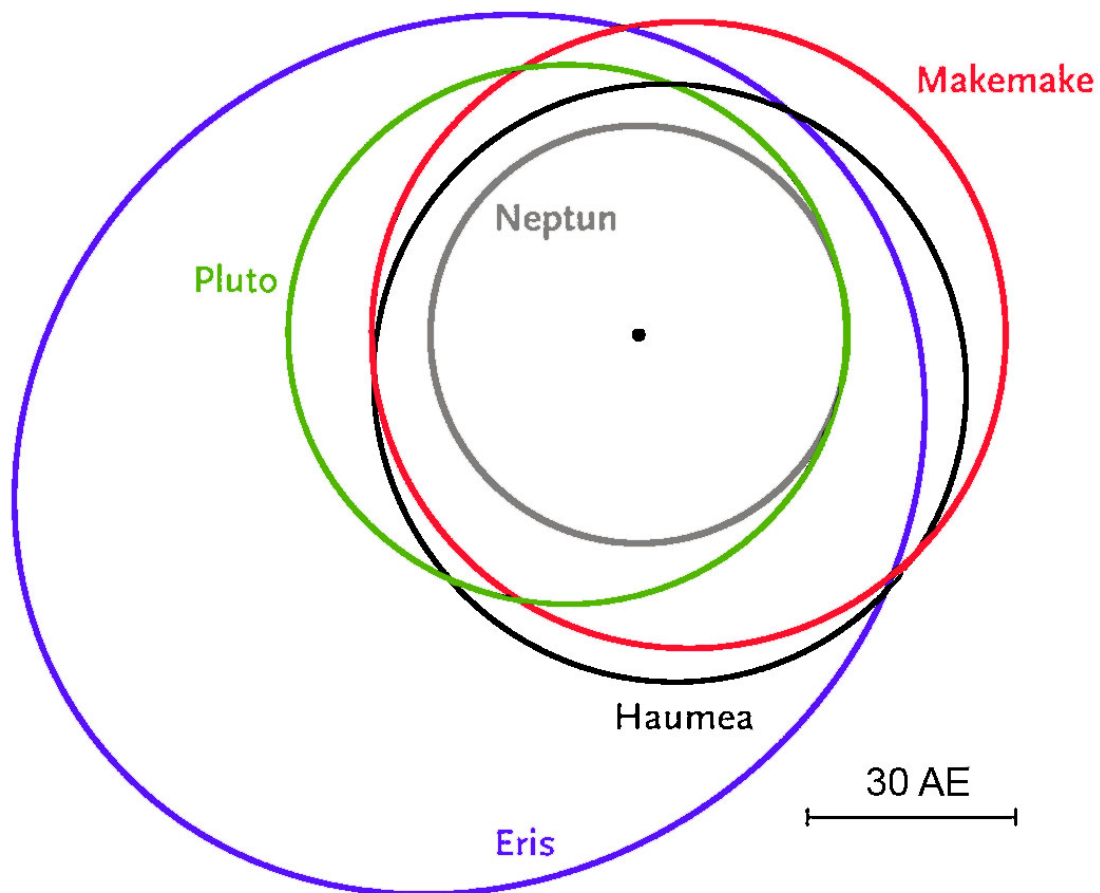


Abbildung 9.2: Die Bahnkurven von **Neptun** und der äußeren **Zwergplaneten** [163] (adaptiert), projiziert auf die **Ekliptik**.

Wassereis. Die Albedo beträgt 0,5, entsprechend 'wärmer' geht es dort zu, das Thermometer klettert an der Haumea-Oberfläche auf fast  $50^{\circ}\text{C}$  über dem absoluten Nullpunkt.

### 9.3 Eris – der zehnte Planet?

Wie Tabelle 9.1 ausweist, ist **(136199) Eris** [63] fast genau so groß wie **Pluto** und sogar ein wenig massereicher. Nach der Entdeckung des **Zwergplaneten** Eris im Jahre 2005 stand die **IAU** vor folgendem Dilemma: Eris steht Pluto in nichts nach, sie gehören in die gleiche Klasse von Himmelskörpern. Zwei



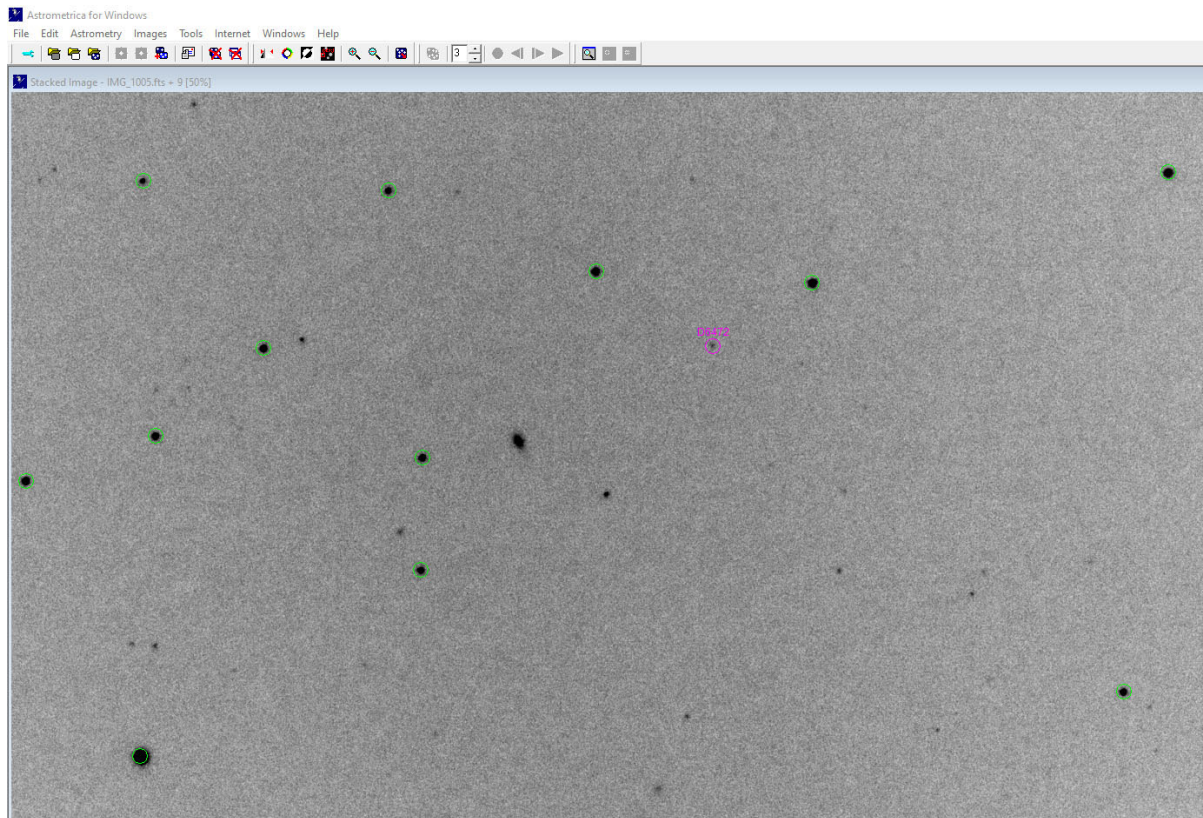


Abbildung 9.3: **Zwergplanet (136472) Makemake**, mit einer digitalen Spiegelreflexkamera an einem Celestron C8-Teleskop mit 20 cm großer Öffnung am 18.11.2020 aufgenommen von T. Hebbeker. Die Helligkeiten sind invertiert. Das Bild zeigt eine Überlagerung von 10 Einzelfotos. Die astrometrische Analyse und Positionsbestimmung erfolgte mit dem Programm Astrometrica [190]. Referenzsterne sind grün umzirkelt, Makemake ist rosa markiert.

Alternativen boten sich an: a) Eris wird der zehnte **Planet**, Pluto bleibt Planet Nummer neun. Oder – und so hat die IAU es im Jahr 2006 entschieden – b) beide werden zu Zwergplaneten. Natürlich war das keine auf die einzelnen Himmelskörper angewandte ad-hoc-Entscheidung, aber die für die Klasse der Planeten festgelegten Kriterien, insbesondere die Forderung zur ‘Bereinigung’ der Bahn, konnten die beiden genannten **Trans-Neptun-Objekte (TNO)** nicht erfüllen. So sind heute Pluto und Eris ‘nur’ Zwergplaneten.

Ein paar Fakten: Die Eris-Bahn ist mit einer Exzentrizität von 0,44 sehr langgestreckt und erreicht in der Aphelion-Position fast die 100 AE-Marke, siehe Abbildung 9.2. Damit liegt die **Bahn** schon etwas außerhalb des zwischen 30 und 50 Astronomischen Einheiten angesiedelten **Kuiper-Gürtels**. Die Albedo ist mit einem Wert von 0,96 extrem hoch und weist auf Methaneis an der



Oberfläche hin. Sie ist in der Aphel-Position noch mal  $10^\circ\text{C}$  kälter als auf Makemake. Dieser Temperatur-Wert variiert natürlich mit der Distanz zur Sonne. Eris wird von einem Mond namens **Dysnomia** umrundet.

Die Namensgebung ist wieder etwas traditioneller: Eris wurde nach der griechischen Göttin benannt, Dysnomia ist ihre Tochter. Beide mythologischen Figuren sind allerdings keine sehr angenehmen Gestalten: Eris steht für Zwietracht und Streit und Dysnomia für Gesetzlosigkeit. Offenbar wollte man so auf die durch die Eris-Entdeckung ausgelöste Kontroverse Planet-Zwergplanet hinweisen.

## 9.4 Sedna und Co.

Die schon in der Tabelle 9.1 aufgeführten Kandidaten für Zwergplaneten, nämlich (225088) **Gonggong** und (50000) **Quaoar** sind den oben beschriebenen drei Zwergplaneten nicht unähnlich. Sie gehören zu den größten **Trans-Neptun-Objekten (TNOs)** und wurden in den Jahren 2007 bzw. 2002 entdeckt. Quaoar gehört mit einer **großen Halbachse** von  $a = 43,5\text{ AE}$  noch zum **Kuiper-Gürtel**. Der **Orbit** von Gonggong mit  $a = 67,5\text{ AE}$  liegt dagegen schon etwas außerhalb.

Aber das ist noch gar nichts im Vergleich mit (90377) **Sedna** [68]. Die **Bahnelemente**  $a = 506\text{ AE}$  und **Exzentrizität**  $\epsilon = 0,85$  führen zu Perihelion- und Aphel-Distanzen zur Sonne von  $76\text{ AE}$  und fast  $1000\text{ AE}$ . Damit bewegt sich Sedna zwischen Kuiper-Gürtel und **Oortscher Wolke**. Die Entdeckung im Jahr 2003 wurde nur möglich, weil der Abstand seinerzeit 'nur' etwa  $90\text{ AE}$  betrug. Sedna bewegt sich auf uns zu und erreicht das Perihel in 50 Jahren. Die Bewegung ist sehr langsam, denn die riesengroße Halbachse führt zu einer **Periodendauer** eines Umlaufs um die Sonne von mehr als  $11000$  Jahren. Sedna zeigt, dass es wohl noch sehr viele bisher unentdeckte große Asteroiden im äußeren Bereich des Sonnensystems gibt.

Mehr zu den TNOs findet man im sehr empfehlenswerten Buch [177] von **Michael Moltenbrey**.



## Kapitel 10

### Kann man Asteroiden fotografieren?

Jein! Man kann mit recht bescheidener Ausrüstung den Asteroiden und die umgebenden Sterne in einem Foto festhalten. Dabei erscheint der Kleinplanet aber immer nur als leuchtender Punkt<sup>1</sup>. Mehr als die Position und die scheinbare Helligkeit kann man nicht fotografisch festhalten. Aber das ist ja schon interessant genug!

#### 10.1 Asteroidenfotos mit einfachen Mitteln

Eine auf einem unbeweglichen Fotostativ befestigte Digitalkamera reicht aus, die helleren Asteroiden 'festzuhalten', solche mit scheinbaren Helligkeiten bis etwa 10 mag - siehe Kapitel 3. Abbildung 10.1 zeigt einen Ausschnitt aus einer Aufnahme von (15) Eunomia die kurz nach Mitternacht am 19. Juli 2023 gemacht wurde. Der zu dieser Zeit etwa 9 mag helle Asteroid befand sich recht nah am Horizont, und ist im Foto am besten in der Ausschnittvergrößerung (gelbes Rechteck) oben zu erkennen, markiert durch ein kleines grünes Quadrat. Einen Tag später befand er sich im kleineren roten Quadrat - man kann also auch die Bewegung leicht feststellen. Zum Einsatz kam eine Spiegelreflexkamera Canon 90D mit einem einfachen 50 mm Objektiv, die Blende war auf 4 eingestellt. Belichtet wurde 2,5 Sekunden lang bei einem ISO-Wert von 12800. Viel längere Belichtungszeiten (je nach Objektivbrennweite maximal einige Sekunden) sind wegen der Erddrehung natürlich nicht möglich.

Versuchen Sie es doch selbst einmal! Dabei sollte man nicht vergessen, die Uhrzeit der Kamera genau einzustellen. Dann kann man später aus dem Vergleich zweier Fotos die Winkelgeschwindigkeit des Asteroiden am Himmel be-

---

<sup>1</sup>Vor einigen Jahren ist es dem Amateurastronomen [John Sussenbach](#) gelungen, (1) Ceres so abzubilden, dass man seine Größe zumindest erahnen kann [133, 165].

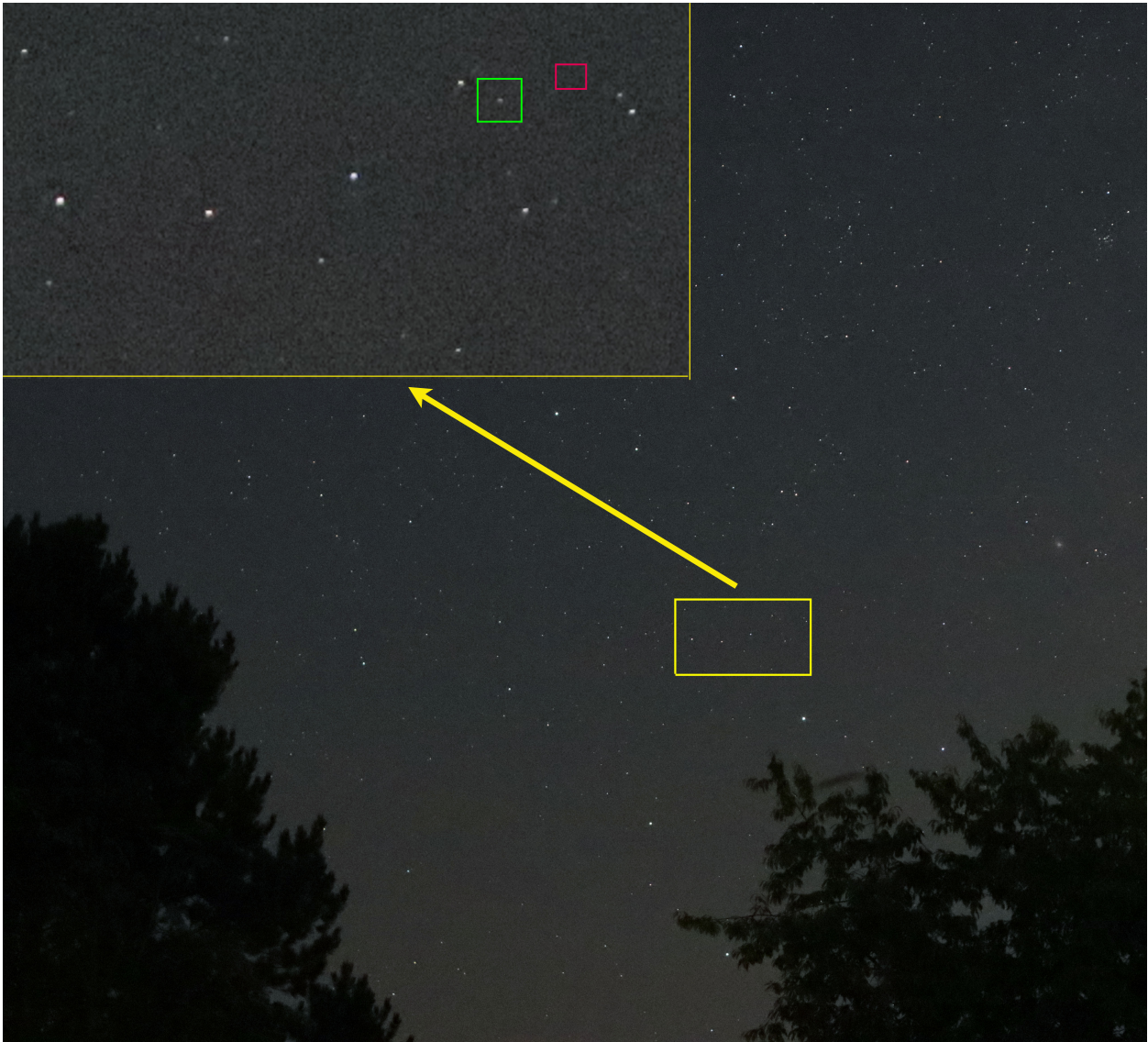


Abbildung 10.1: Kleinplanet (15) *Eunomia*, am 19.7.2023 aufgenommen mit feststehender Kamera. In der Vergrößerung der gelb eingerahmten Region, oben im Bild, ist der Asteroid durch ein grünes Quadrat markiert, das leere rote Viereck deutet die Position an, die *Eunomia* 24 Stunden später erreichte. Der helle Stern im großen Bild unterhalb des gelb gekennzeichneten Himmelsausschnitts ist Nunki im Sternbild Schütze. Der verwaschene Fleck in der Mitte des rechten Bildrandes ist der Sternhaufen M22.

stimmen, also die zeitliche Veränderung der Winkelposition relativ zu den 'benachbarten' Fixsternen im gleichen Bildausschnitt. Idealerweise macht man die Vergleichsfotos in zwei aufeinanderfolgenden Nächten, dann haben sich auch die 'langsameren' Asteroiden schon deutlich weiterbewegt.

## 10.2 Fotografie mit Nachführung

Ist eine astronomische 'Montierung' verfügbar, die die Erddrehung ausgleicht, so kann man länger belichten. Die Montierung trägt das Teleskop und ist selbst auf einem stabilen Stativ befestigt, zum Beispiel auf einem Dreibein wie in Abbildung 3.4 auf Seite 22 zu sehen. Zwei Motoren können das Fernrohr in eine beliebige Richtung schwenken und insbesondere laufend die Erddrehung kompensieren. Mit etwas Glück kann man so auch zwei Asteroiden gleichzeitig 'einfangen', wie Abbildung 10.2 zeigt.

Besitzt man ein (Spiegel-)Teleskop, mit einer für Amateurastronomen typischen Öffnung (Durchmesser auf der Lichteintrittsseite) von 6" - 11" (15 cm bis 28 cm, siehe Kapitel 3), sind jetzt auch Asteroiden bis zu 18 mag zu 'schaffen'. Davon gibt es jede Nacht Hunderte am Himmel [110]!

Überlagert man mehrere in einem festen Zeitabstand gewonnene Aufnahmen eines 'schnellen' Asteroiden, so entstehen Bilder wie sie Abbildung 10.3 und auch die Titelseite dieses Buches zeigen. Dabei muss die Belichtungszeit der einzelnen Fotos kurzgehalten werden, wenn man 'Strichspuren' vermeiden möchte.

Belichtet man länger, kann man die Bewegung des Asteroiden als Strichspur sichtbar machen. Abbildung 10.4 illustriert dies am Beispiel von 2014 JO<sub>25</sub>.

Einige astronomische Montierungen können mit den zumindest ungefähr bekannten Bahndaten von Asteroiden 'gefüttert' werden. Sie berechnen dann die aktuelle Position am Himmel und auch die Bewegung relativ zu den Fixsternen – diese wird dann in der motorischen Nachführung ausgeglichen, so dass der Asteroid im Bild immer an der gleichen Stelle steht. Man führt also auf den Kleinplaneten nach. Bei größeren Belichtungszeiten führt das unweigerlich dazu, dass alle Sterne Strichspuren zeigen. Das zeigt Abbildung 10.5 am Beispiel des Asteroiden (162173) Ryugu. Diese Aufnahmemethode hat den Vorteil, dass alles ankommende Licht des Asteroiden auf einen Punkt konzentriert wird, so dass auch schwach leuchtende Vertreter noch erkennbar sind.

Man kann auch die Helligkeit des Asteroiden als Funktion der Zeit messen, also eine Lichtkurve aufzeichnen, typischerweise über einen Zeitraum von mehreren Tagen und Wochen. Dazu fotografiert man den Asteroiden zusammen





Abbildung 10.2: Zwergplanet (1) Ceres (= C im Bild) und Kleinplanet (4) Vesta (= V), aufgenommen am 4. Juli 2014 mit einem 200 mm Teleobjektiv an einer Digitalkamera, Belichtungszeit 32 Sekunden, mit Nachführung. Drei Sterne ( $\zeta$  Vir, HIP<sup>3</sup>66097 und HIP 65545) sind ebenfalls markiert, um die Position (Sternbild Jungfrau) und die Größe des Bildausschnitts (ca. 2°) erkennen zu lassen.

mit 'benachbarten' Referenzsternen, deren Helligkeiten bekannt sind. Mehr dazu in den Kapiteln 11 und 12. Wie man aus Aufnahmen wie den gezeigten quantitative Aussagen über die **Bahn** des Asteroiden gewinnen kann, wird in Kapitel 12 erklärt.

## 10.3 Asteroideneinschläge auf dem Mond

Wie in Kapitel 11.5 diskutiert, sind Transits von Asteroiden vor der Sonne (ähnlich wie die der Planeten Merkur und Venus) praktisch nicht zu beobachten.

Mond-Transits sind für die Planeten natürlich nicht möglich, denn sie sind viel weiter weg als unser Erdtrabant. Asteroiden aber können sehr wohl zwischen Mond und Erde vorbeifliegen, aber auch solche Transits sind selten und wegen der geringen Größe dieser erdnahen Asteroiden praktisch unbeobachtbar, wie in Kapitel 11.5 begründet wird.

Am 20. Januar 2019 gab es aber einen 'Glückstreffer'. Während der dann stattfindenden Mondfinsternis schlug ein Meteorit auf die im Erdschatten liegende dunkle Oberfläche des Erdtrabanten - durch einen kurzen Lichtblitz erkennbar - visuell und natürlich auch mit Kameras. Nachfolgende Analysen zeigen allerdings, dass der Brocken wohl zu klein war, um unsere Definition von Asteroiden (Mindestgröße 1 Meter, siehe Kapitel 1) zu erfüllen. Umso spektakulärer wäre ein echter Asteroideneinschlag – der nächste kommt bestimmt. . .

## 10.4 Asteroiden-Marathon

Der Mensch ist Jäger und Sammler, und entwickelt dabei auch gerne einen gewissen sportlichen Ehrgeiz. Einige sammeln Briefmarken, andere verbringen ihre Freizeit mit 'Trainspotting' oder versuchen an so vielen offiziellen Marathon-Läufen wie möglich teilzunehmen.

In der (Amateur-)Astronomie-Szene ist der 'Messier-Marathon' berühmt und berüchtigt. Hier geht es darum, in einer *einzig* (langen) Nacht so viele der insgesamt 110 'Messier-Objekte' zu 'sammeln', also mit einem **Teleskop** (kurz) zu beobachten wie möglich. Es liegt nahe, diese Erfolge auch fotografisch festzuhalten. Die meisten dieser entfernten Himmelsobjekte wurden von **Charles**

---

<sup>3</sup>HIP = Sternkatalog des Astrometriesatelliten Hipparcos



**Messier** im 18. Jahrhundert katalogisiert. Er hat diffuse – ‘neblige’ – ausgedehnte Strukturen ‘gesammelt’, um sie in Zukunft nicht mit **Kometen** zu verwechseln, die im Fokus seines Interesses standen! Wie wir heute wissen handelt es sich hauptsächlich um Galaxien und Sternhaufen.

Wie wäre es mit einem **Asteroiden-Marathon**? Damit beziehen wir uns natürlich **nicht** auf den Asteroiden **(4356) Marathon**, der nach der griechischen Stadt Marathon benannt wurde. Sondern ich schlage vor, die ersten 100 Asteroiden von **(1) Ceres** bis **(100) Hekate** jeweils (mindestens) zweimal zu fotografieren. Eine zeitliche Beschränkung gibt es nicht - in einer einzigen Nacht wäre das auch gar nicht möglich. Die beiden Aufnahmen des gleichen Asteroiden sollen minimal 100 Minuten und maximal  $100 \times 100 = 10\,000$  Minuten, also knapp 7 Tage auseinanderliegen. Sie dienen dazu, den Kleinplaneten als bewegliches Objekt eindeutig von einem Stern zu unterscheiden. In Abbildung 10.1 ist eines von zwei Fotos von **(15) Eunomia** zu sehen. Zusammen mit einem etwa 24 Stunden später aufgenommenen Bild sind damit die Asteroiden-Marathon-Bedingungen für diesen Planetoiden erfüllt. Bis zur Zielgeraden fehlen also nur noch 99 Kleinplaneten . . .

Offenbar ist eine wichtige Voraussetzung für diesen Wettbewerb, dass die ersten 100 Asteroiden überhaupt von Westeuropa aus beobachtbar sind und eine für Amateure ausreichende Helligkeit aufweisen. Alle diese im 19. Jahrhundert entdeckten Kleinplaneten bewegen sich relativ langsam durch den **Asteroidengürtel** und sind mehr als 40 km groß. Die maximalen scheinbaren Helligkeiten, die die 100 Asteroiden von Vesta bis Hekate im günstigsten Fall erreichen, liegen alle unter (!) 13 mag und sind damit für uns heller als **(134340) Pluto**. In der Regel muss durch ein Teleskop fotografiert werden. Um die Beobachtungen vorzubereiten, sind Werkzeuge wie ‘Stellarium’ [140] sehr nützlich. Eigene Erfahrungen zeigen, dass man an einem langen Abend etwa 20 dieser Asteroiden ‘erwischen’ kann.



Abbildung 10.3: Am 30. Oktober 2016 durchquerte Asteroid (164121) 2003  $YT_1$  das Sternbild Stier, er war etwa 14 mag hell. Die Bilder wurden mit einer digitalen Spiegelreflexkamera an einem Celestron C8-Teleskop mit 20 cm großer Öffnung aufgenommen. Ein 'Reducer' zwischen Optik und Kamera sorgte für eine Aufweitung des Bildfeldes auf etwa 0.8 Grad. Insgesamt 47 kurzbelichtete Fotos wurden so überlagert, dass die Hintergrundsterne immer die gleiche Position annehmen. Die Einzelbilder wurden im Abstand von 1 Minute gemacht, die Belichtungszeit jedes Fotos betrug nur 2.5 Sekunden.



Abbildung 10.4: Asteroid **2014 JO<sub>25</sub>** im Sternbild Jagdhunde, aufgenommen am 20. April 2017 mit einer digitalen Spiegelreflexkamera an einem Celestron C8-Teleskop mit 20 cm großer Öffnung. Man erkennt deutlich die Bewegung des Himmelskörpers, in Form eines hellen Striches, während der 32 Sekunden dauernden Belichtung. Der Asteroid war an diesem Abend 12 mag hell. Das Bildfeld ist etwa 0,4 Grad hoch.



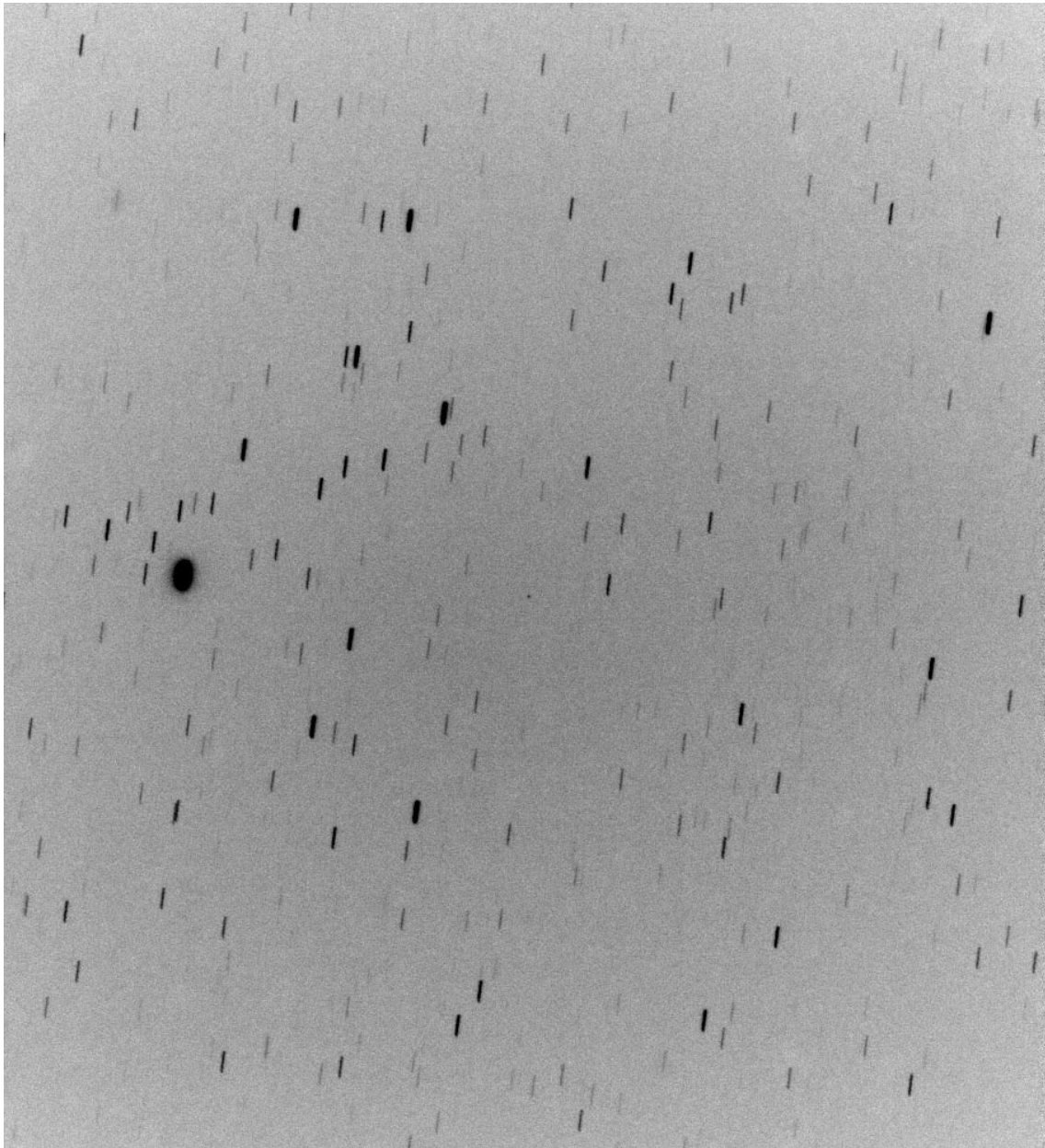


Abbildung 10.5: Asteroid **(162173) Ryugu** [21] im Sternbild Pegasus, aufgenommen am 4. Oktober 2020 mit einer digitalen Spiegelreflexkamera an einem Celestron C8-Teleskop mit 20 cm großer Öffnung. Ein Dutzend Bilder wurden so überlagert, dass die Gesamtbelichtungszeit etwa 10 Minuten beträgt. Montierung und Bildverarbeitung haben dafür gesorgt, dass der 17 mag 'helle' Asteroid immer genau in der Bildmitte steht, dort ist er als winziges Pünktchen gerade noch zu erkennen. Entsprechend haben sich die Sterne während der Gesamtbelichtungszeit bewegt und im Bild Strichspuren hinterlassen. Das Bildfeld ist etwa 0,5 Grad hoch. Hell und Dunkel sind vertauscht, so dass die Sterne schwarz erscheinen. Der elliptische Fleck stammt vom relativ hellen Stern HIP 115979.



# Kapitel 11

## Wie vermisst man Asteroiden?

Alles was wir heute über die vielen Asteroiden wissen, baut auf einer Vielzahl von Beobachtungen und quantitativen Auswertungen, also Messungen, auf.

Für die allermeisten der mehr als einer Million bekannten Kleinplaneten wurden diese Daten mit Messinstrumenten aufgezeichnet, die eine große Entfernung zum Asteroiden haben: Das sind astronomische Observatorien auf der Erde oder im erdnahen Weltraum, wo zum Beispiel die Raumsonde **Hipparcos** auf ihrer Umlaufbahn viele genaue Positionsmessungen durchgeführt hat, auch von Asteroiden.

Professionelle Projekte zum automatischen Auffinden und Nachverfolgen von Asteroiden haben in den letzten Jahren deutlich an Einfluss gewonnen, und damit den Charakter dieses Forschungszweiges grundlegend geändert. Heute grasen Weitwinkelteleskope von der Erde oder von Satelliten aus systematisch den Himmel nach lichtschwachen Kleinplaneten und **Kometen** ab. Einzelnen Astronomen und Astronominnen und Amateuren gelingt heute daher nur noch selten eine Entdeckung, obwohl sie inzwischen mit Digitalkameras und leistungsfähiger Software natürlich auch viel besser ausgerüstet sind als noch vor 20-30 Jahren. Aber es gibt Ausnahmen: so entdeckte der brasilianische Hobbyastronom **Leonardo Amaral** den etwa einen Kilometer großen Asteroiden **2020 QU<sub>6</sub>** als dieser im Jahr 2020 relativ dicht an der Erde vorbeiflog [127].

In nur ganz wenigen Fällen wurden Asteroiden aus der Nähe untersucht, mit vorbeifliegenden oder gar landenden Raumsonden, siehe Kapitel 13. Das eröffnet nicht nur viel höhere Genauigkeiten, zum Beispiel für Größe, Form oder Masse des Himmelskörpers, andere Messungen werden so überhaupt erst möglich, wie die der Oberflächenstruktur oder der chemischen Zusammensetzung von Ausgasungen.

Spezielle Messmöglichkeiten ergeben sich, wenn ein Asteroid kurzzeitig einen

Stern bedeckt, siehe Abschnitt 11.4. Prinzipiell interessant wären auch Vorbeiflüge vor der Sonne oder dem Mond. Diese und Einschläge in die Mondoberfläche werden kurz in den Unterkapiteln 10.3 und 11.5 angesprochen.

Im Folgenden konzentrieren wir uns auf Messungen, die von der Erdregion aus gemacht werden können. Zu diesen gehören die ersten Bestimmungen der sich relativ zu den Hintergrundsternen verändernden Position des Zwergplaneten (1) Ceres im Jahre 1801, bis hin zu modernen Präzisionsmessungen mit Raumsonden auf Erdumlaufbahnen oder in der Nähe des Lagrange-Punktes L2. Dieser ist zwar 1.5 Millionen km von unserem Planeten entfernt, aber im Vergleich zur Größe des Sonnensystems lassen wir ihn auch noch als 'erdnah' gelten.

Zunächst listen wir auf, welche Messgrößen uns aus großer Distanz überhaupt zugänglich sind:

- **Positionen**, also Himmelskoordinaten, als Funktion der Zeit.
- **Entfernung** des Asteroiden von Erde oder Sonne.
- **Helligkeit** und deren Variabilität.
- **Größe und Form** des Asteroiden.
- **Masse** des Asteroiden.

Für das Gros der Asteroiden konnten 'nur' die Position(en) präzise bestimmt werden - und zwar so genau, dass man die Bahn berechnen, also die zukünftigen Koordinaten als Funktion der Zeit vorhersagen kann.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die wichtigsten Messverfahren.

## 11.1 Ort und Zeit

Um den Ort, also die Position am Himmel, zu bestimmen, muss man erst einmal ein Koordinatensystem festlegen. In der Regel kann man nur die Richtung bestimmen, in der wir einen Asteroiden am Himmel beobachten, und nicht die Entfernung. Wir brauchen also zwei Winkelkoordinaten. Eine naheliegende Wahl ist das **Horizontsystem**: die Messgrößen für einen Stern oder Asteroiden sind **Höhe** über dem Horizont und Himmelsrichtung auf der Erdoberfläche, ausgedrückt durch den **Azimutwinkel**, wie er in Abbildung 11.1 erklärt ist. Dieses Referenzsystem hat aber zwei gravierende Nachteile: Ers-



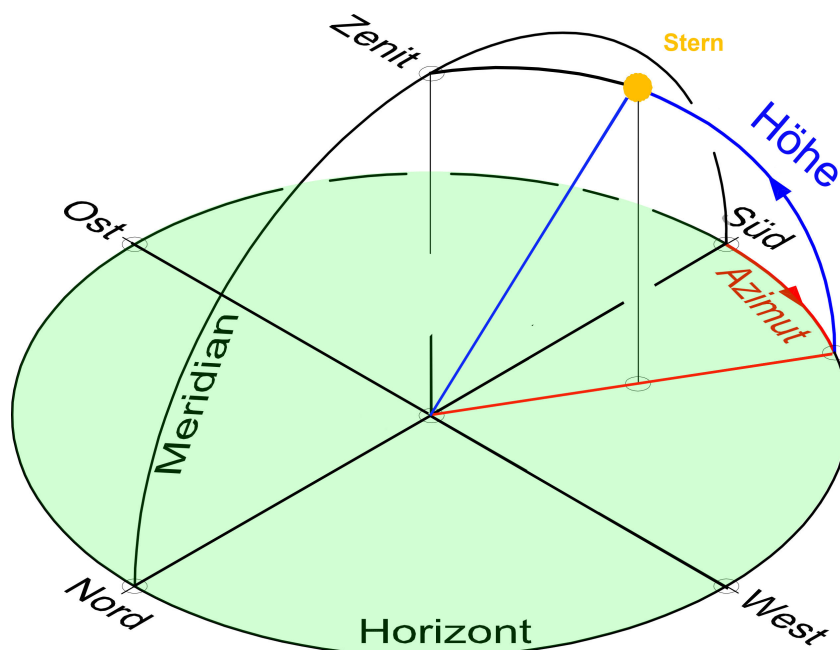


Abbildung 11.1: **Horizontsystem** in der Astronomie, adaptierte Zeichnung [106]. Der Beobachter steht im Zentrum der Horizontebene. Die Winkelkoordinaten des Sternes sind **Azimut** und **Höhe**.

tens ändern sich Azimut und Höhe laufend wegen der Erdrotation, zweitens hängen die Horizontkoordinaten von der Beobachterposition auf der Erde ab.

Deshalb benutzt man in der Astronomie meist das **Äquatorialsystem** für Sternpositionen. Als Referenzebene für den Höhenwinkel dient nicht die lokale Erdoberfläche am Ort des Beobachters, sondern die Äquatorebene unseres Planeten. Und statt der Südrichtung wird eine relativ zu den Sternen feste Richtung genutzt, die durch den Frühlingspunkt definiert ist; an diesem 'virtuellen' Ort schneidet am 20. oder 21. März die scheinbare Bahn der Sonne am Himmel die Erdäquatorebene. Abbildung 11.2 zeigt, wie die äquatorialen Winkelkoordinaten **Rektaszension** und **Deklination** definiert sind. Meist werden sie mit  $\alpha$  und  $\delta$  abgekürzt.

Ferne 'Fixsterne' sind gewissermaßen am Himmelsgewölbe festgeklebt, ihre äquatorialen Koordinaten sind nicht zeitabhängig. So hat der Stern Deneb in der Konstellation Schwan die Koordinaten  $\alpha = 310,4^\circ$ ,  $\delta = 45,3^\circ$ . Die Äquatorialkoordinaten vieler Sterne unserer Milchstraße sind sehr genau bekannt. Die entsprechenden 'Kataloge' sind auch online abrufbar [78]. Aus historischen Gründen wird die Rektaszension oft nicht in Grad, sondern in 'Stunden' ( $h$ ) angegeben. Da sich die Erde in 24 Stunden um 360 Grad um die

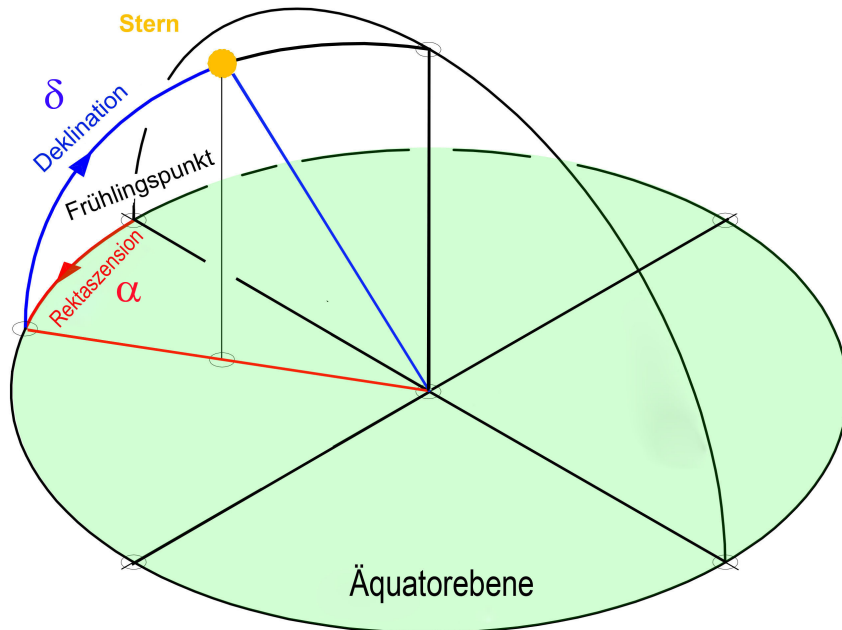


Abbildung 11.2: **Äquatoriales Koordinatensystem** in der Astronomie. Im Zentrum ist der Erdmittelpunkt. Die Winkelkoordinaten sind **Rektaszension**  $\alpha$  und **Deklination**  $\delta$ .

eigene Achse dreht<sup>1</sup>, gilt  $1 \text{ h} \hat{=} 15^\circ$ . Für Deneb bedeutet dies  $\alpha = 20.79 \text{ h}$ .

Kennt man die geographische Position des Beobachters, kann man zu jeder Zeit die Horizontalkoordinaten in die abstrakteren Äquatorialkoordinaten umrechnen und umgekehrt [105].

Asteroiden bewegen sich relativ zu den Sternen, wie die Planeten ('Wanderer'). Deshalb sind auch ihre äquatorialen Koordinaten **Rektaszension** und **Deklination** zeitabhängig. Zur genauen Messung verwendet man Fotos, auf denen neben dem Asteroiden auch 'benachbarte' Sterne abgebildet sind - das ist praktisch immer der Fall, denn der Himmel ist ja voll davon! Einige dieser Sterne müssen identifiziert werden, und deren Koordinaten  $\alpha$  und  $\delta$  aus geeigneten Sternkatalogen entnommen werden. Dann kann man durch lineare Interpolation die Koordinaten des Asteroiden bestimmen. Ein stark vereinfachtes Szenario zeigt Abb. 11.3. In diesem konkreten - etwas an den Haaren herbeigezogenem - Beispiel kann man die äquatorialen Koordinaten  $\alpha_A$  und  $\delta_A$  des Asteroiden so berechnen:

$$\alpha_A = \frac{2}{3} \alpha_1 + \frac{1}{3} \alpha_2 \quad \delta_A = \frac{1}{2} \delta_3 + \frac{1}{2} \delta_4 \quad (11.1)$$

<sup>1</sup>Eigentlich müsste man hier zwischen Sonnenzeit und Sternzeit unterscheiden, das ist

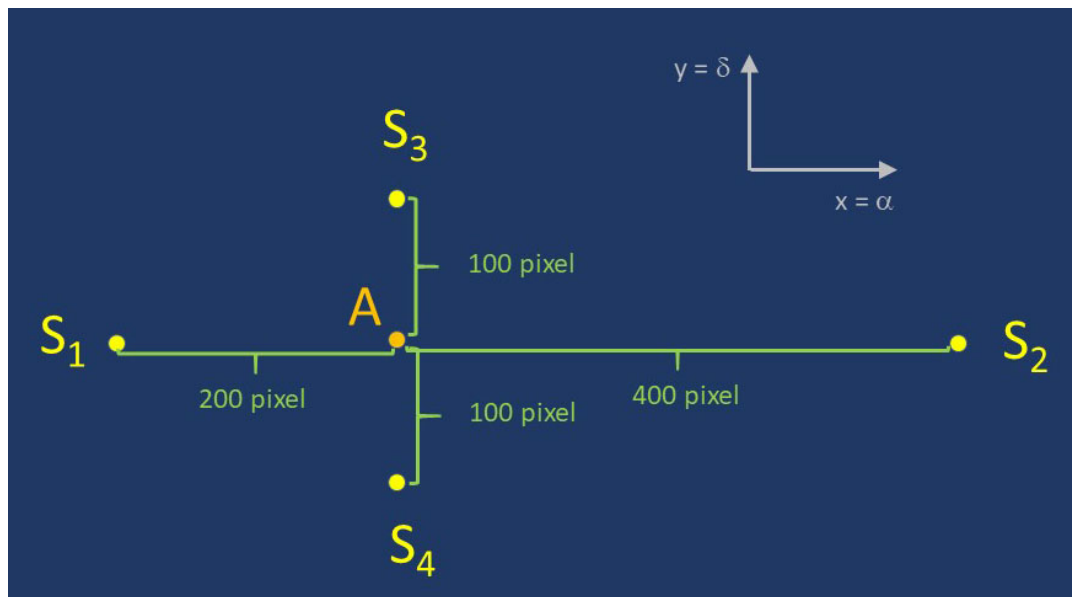


Abbildung 11.3: Einfaches Beispiel für die Koordinatenbestimmung eines Asteroiden A auf einem Digitalfoto. Das Bild ist so ausgerichtet, dass die horizontale  $x$ -Koordinate der Rektaszensionsachse entspricht, die  $y$ -Achse misst die Deklination.  $S_1$  bis  $S_4$  sind Referenzsterne, deren äquatoriale Koordinaten  $\alpha_1, \alpha_2 \dots$  und  $\delta_1, \delta_2 \dots$  bekannt sind. Die Abstände auf dem Foto werden durch die entsprechende Zahl von Pixeln charakterisiert.

In der Astronomie spricht man in diesem Zusammenhang von **'plate solving'**: Damit bezieht man sich auf die früher verwendeten Fotoplatten und das zu lösende Koordinatenrätsel. Man erreicht Messgenauigkeiten von etwa  $1/10000$  Grad! Heutzutage spricht man im Kontext solcher Messungen von **'Astrometrie'** - der Sternörter messenden Astronomie. Inzwischen gibt es natürlich Computerprogramme, die 'plate solving'-Verfahren auf Digitalfotos anwenden [190] und dabei auf umfangreiche Sternkataloge zugreifen.

Noch ein Wort zur Zeitbestimmung: Bei nicht zu schnell bewegten Asteroiden reicht es, den Zeitpunkt der Messung auf eine Sekunde genau zu kennen. In der Astronomie verwendet man die **'Universal Time' (UT)**, die man aus der mitteleuropäischen Zeit (mitteleuropäischen Sommerzeit) durch Subtraktion von einer (zwei) Stunden bekommt.

---

aber ein Detail, das wir hier ignorieren dürfen.

## 11.2 Abstand eines Asteroiden von der Erde

Eine direkte Distanzmessung ist schwierig. Ein Asteroid erscheint von der Erde aus punktförmig, also kann die scheinbare Größe keinen Anhaltspunkt liefern. Aus der hier gemessenen *scheinbaren Helligkeit* des Himmelskörpers kann man den Abstand nur schätzen, denn die hängt zwar von der Entfernung, aber natürlich auch von der *absoluten Helligkeit* des Asteroiden ab – und die kennt man in der Regel nicht, da sie vom Reflexionsgrad stark beeinflusst wird, siehe Abbildung 5.1 auf Seite 49.

Bei nicht zu weit entfernten Asteroiden kann man die Parallaxenmethode anwenden. Dabei wird ausgenutzt, dass bei gleichzeitiger Beobachtung von verschiedenen irdischen Beobachtungspunkten aus der Asteroid relativ zu den Fixsternen eine leicht verschobene Position hat. Dieses Verfahren wird ausführlicher anhand eines konkreten Beispiels in Abschnitt 12.3 erläutert.

Man kann Abstände von Asteroiden oder Kometen aber auch indirekt bestimmen: Durch genaue Messungen der Himmelspositionen, also der Winkelkoordinaten und der zugehörigen Zeiten, kann man die *Bahn* des Himmelskörpers um die Sonne berechnen. Das setzt voraus, dass man die Masse unseres Zentralgestirns kennt. Das ist der Fall, denn die Sonnenmasse kann man mit Hilfe des Newtonschen Gravitationsgesetzes aus den bekannten Planetenbahnen ableiten. Aus den Beobachtungsdaten für einen Kleinplaneten bestimmt man auf diese Weise dessen *Bahnparameter*, und damit kann man dann für jeden Zeitpunkt die Position des Asteroiden voraussagen, einschließlich dessen Entfernung von der Sonne und von der Erde. Tatsächlich ist das die Methode der Distanzbestimmung, die bei mehr als 99% aller Asteroiden angewandt wird.

## 11.3 Schwankende Helligkeiten

Planeten und Kleinplaneten leuchten nicht selbst, sondern reflektieren das auftreffende Sonnenlicht. Die auf der Erde von einem Asteroiden empfangene Lichtmenge kann man in dessen scheinbare *Helligkeit* umrechnen. Als '*Lichtkurve*' bezeichnet man die über einen längeren Zeitraum (Stunden oder Tage) aufgezeichneten Helligkeitsvariationen. Abbildung 11.4 zeigt die für den Asteroiden (250) *Bettina* gemessene Lichtkurve, über einen Zeitraum von etwa 8 Stunden [112]. Dabei variiert die Helligkeit um bis zu 0.35 mag, das entspricht einer Schwankung der Lichtintensität von rund  $\pm 20\%$  um den Mittelwert. Zur Definition der astronomischen Helligkeitsskala und der Einheit *Magnitude (mag)* siehe Kapitel 3.1. Eine Lichtkurve hängt einerseits vom zeitlich veränderlichen Abstand Erde-Asteroid ab, aber auch von Eigenschaften

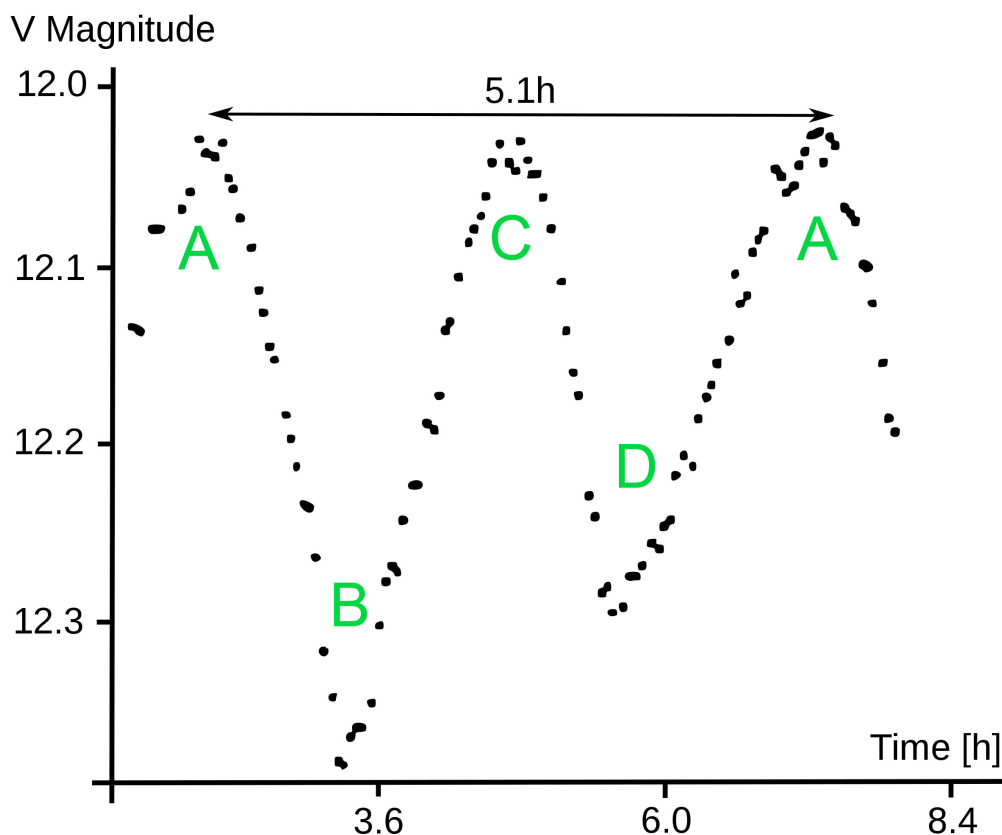


Abbildung 11.4: Lichtkurve für den Asteroiden (250) Bettina. Auf der horizontalen Achse ist die Uhrzeit aufgetragen, auf der vertikalen Achse die scheinbare visuelle (V) Helligkeit, in Magnituden [112]. Man beachte, dass die Magnitude nach oben hin kleiner wird (und damit die Helligkeit größer!).

des Asteroiden selbst: Oberflächenbeschaffenheit (starke oder geringe Reflexion), Form des Himmelskörpers und Rotationsdauer. Wie Erde und Planeten rotieren Asteroiden um ihre eigene Achse. Kleine Asteroiden sind in der Regel keineswegs kugelförmig, sondern eher 'kartoffelförmig'. Ihre Reflexion<sup>2</sup> kann in verschiedenen Regionen auf der Oberfläche durchaus unterschiedlich ausfallen. Das führt im Allgemeinen zu einer recht komplexen Lichtkurve.

Bei der Interpretation ist zu beachten, dass sich die Entfernung des Asteroiden von unserem Planeten sowie die relative Stellung von Asteroid, Erde und Sonne mit der Zeit verändern. Entsprechend wird die scheinbare Helligkeit beeinflusst.

<sup>2</sup>Der Reflexionsgrad, das ist der Anteil des einfallenden Lichtes, das reflektiert wird, heißt **Albedo**. Unser Mond hat eine Albedo von (nur) 0.12 = 12%.

Um zu verstehen, wie die einzelnen Effekte zur Lichtkurve beitragen, betrachten wir den in Abb. 11.5 dargestellten hypothetischen Asteroiden. Der Ein-

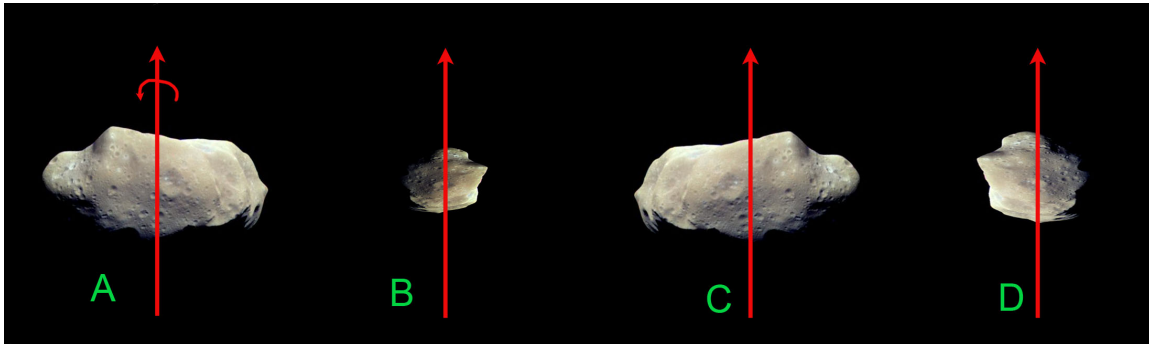


Abbildung 11.5: Hypothetischer rotierender Asteroid (mit einer Form die durch die von (243) *Ida* inspiriert ist). Die verschiedenen Ausrichtungen führen zu unterschiedlichen Helligkeiten, und könnten so die in Abbildung 11.4 gezeigte Lichtkurve von (250) *Bettina* qualitativ erklären.

fachheit halber nehmen wir an, dass sich der Asteroid in Opposition zur Sonne befindet, und daher aus Sicht der Erde voll ausgeleuchtet wird. Die Abstandsänderung während einer Beobachtungsnacht kann meist vernachlässigt werden. In den Ausrichtungen A und C zeigt uns der hypothetische Asteroid seine Breitseiten, die gemessenen Helligkeiten sind ähnlich, siehe Abbildung 11.4. Die Positionen B und C erzeugen deutliche Minima in der Lichtkurve, weil die reflektierende Oberfläche kleiner ist. Da die in Position B beobachtete Seite des Asteroiden auch recht dunkel ist, hat zu diesem Zeitpunkt die Helligkeit ein absolutes Minimum. Nach einer Rotationsperiode  $P$  wiederholt sich das Helligkeitsmuster und man kann so diese Dauer messen. Im Fall von *Bettina* liest man aus Abbildung 11.4 ab:  $P = 5,1$  Stunden.

Aus einer Lichtkurve kann man natürlich nicht die genau Form bestimmen, aber sie gibt immerhin Anhaltspunkte, ob der Asteroid eher kugelförmig oder langgestreckt ist. Die erste Asteroiden-Lichtkurve wurde schon 1901 gemessen, für (433) *Eros* [126].

## 11.4 Wenn Asteroiden ferne Sterne verfinstern. . .

In der Nacht vom 8. auf den 9. Juli 2010 verschwand der Stern  $\delta$  des Sternbilds Schlangenträger (Ophiuchus) plötzlich vom Himmel, nach knapp 6 Sekunden war er wieder da. Der Asteroid (472) *Roma* hatte ihn kurzzeitig be-

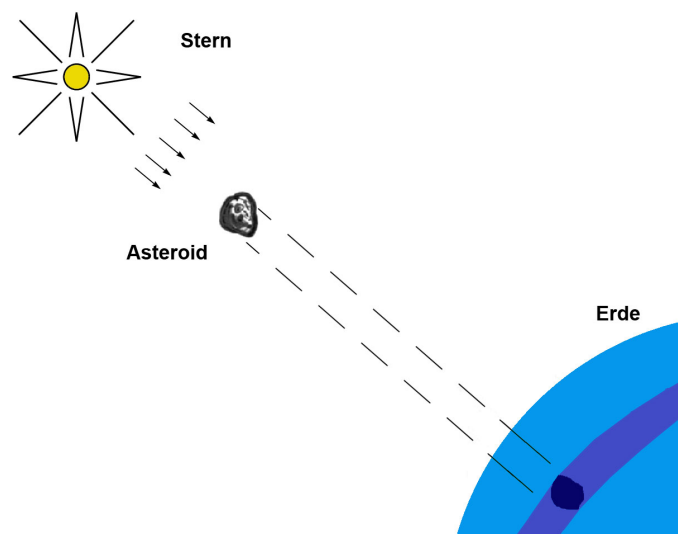


Abbildung 11.6: Illustration der Okkultation eines Sternes durch einen Asteroiden [129] (adaptiert). Zu einem bestimmten Zeitpunkt erzeugt der Asteroid den dunkelblau eingezeichneten rundlichen Schatten auf der Erde. Im Laufe der Zeit wandert dieser entlang des violett kolorierten Streifens, wegen der Bewegung von Erde und Asteroid. Die Zeichnung ist nicht maßstabgerecht.

deckt, war also zwischen Stern und Erde vorbeigeflogen. Dieses seltene Ereignis war vorhergesehen worden, und viele Astronomen haben versucht, diese Okkultation aufzuzeichnen. Dabei muss man beachten, dass der Schatten, den Roma auf unseren Planeten wirft, nicht die ganze Erdoberfläche abdeckt, Beobachter außerhalb der streifenförmigen Schattenregion gehen also 'leer' aus, siehe Abbildung 11.6. Dennoch tragen auch diese Beobachtungen zur Messung bei, sie zeigen, dass der Asteroid eine endliche Größe besitzt. Für die Sternbedeckung durch **(472) Roma** wurde die in Abbildung 11.7 gezeigte Vorhersage für den Schattenstreifen auf der Erde gemacht.

Der bedeckte Stern ist zwar absolut erheblich größer als der Asteroid, aber auch sehr viel weiter entfernt, so dass wir dessen Ausdehnung hier in erster Näherung vernachlässigen können, er funktioniert quasi wie eine Punktlichtquelle. Die Schattengröße ist also ein direktes Maß für die Ausdehnung des Kleinplaneten.

Abbildung 11.8 zeigt das Ergebnis dieser internationalen Beobachtungskampagne des Asteroidenprofils. Jede der farbigen Linien entspricht einem Beobachter, dessen Standort bekannt sein musste und der jeweils nur die Zeitpunkte von Beginn und Ende der Okkultation genau registrieren musste. Falls eine Linie weder Anfang noch Ende besitzt, wurde der Stern  $\delta$  Oph zu keiner



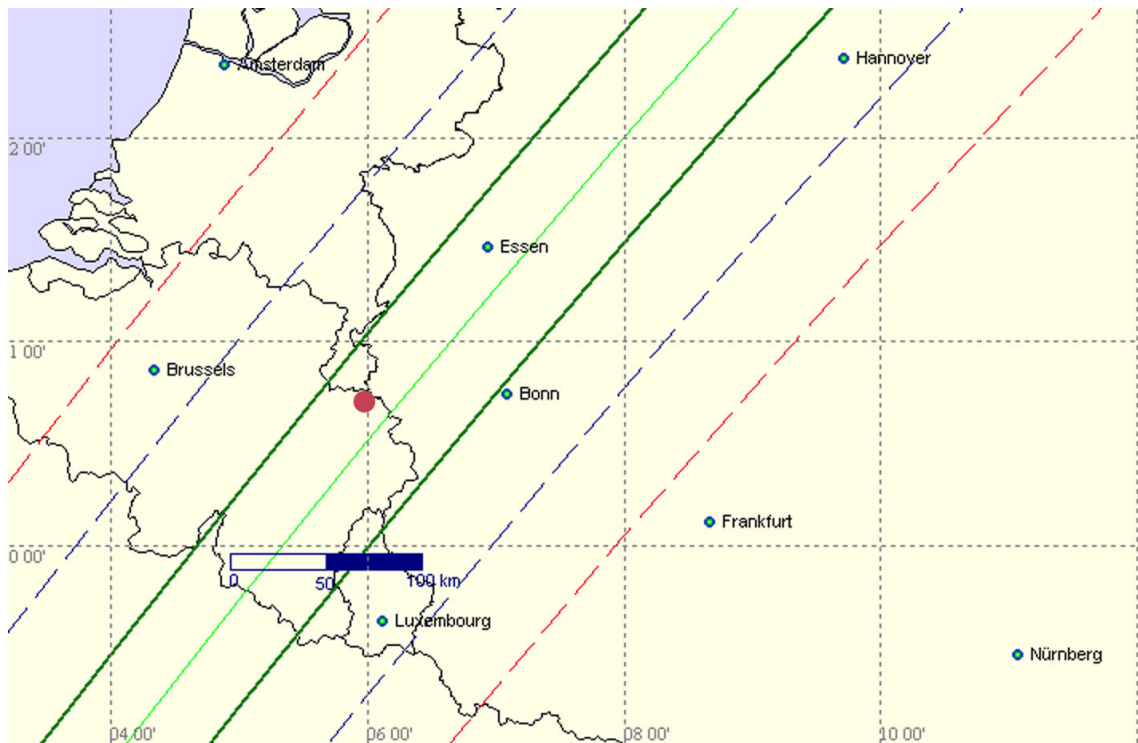


Abbildung 11.7: Am 30. Juni 2010 veröffentlichte Vorhersage für die Bahn des Asteroidenschattens am 8. Juli 2010, verursacht durch die Bedeckung des Sterns  $\delta$  Oph durch den Asteroiden (472) Roma [159] (Karte von Oliver Klös). Die beiden dunkelgrünen Linien markieren den Bereich an, in dem mit 52% Wahrscheinlichkeit der Schatten vorbeizieht. Der Beobachtungsort Neu-Moresnet des Autors ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet und befindet sich nah der hellgrünen Zentrallinie.

Zeit bedeckt, die Linie bedeutet somit ‘Helligkeit’. Die Linien mit Begrenzung, in der Mitte des Bildes, zeigen die Bedeckung an, die Dauer  $t$  der Okkultation ist proportional zur eingezeichneten Länge. In diesem Fall signalisiert eine Linie also ‘Dunkelheit’! Man kann in der Abbildung sehr schön die Konturen des Asteroiden Roma ausmachen: Die Bedeckungsdauer  $t$  ist maximal, wenn Stern, Asteroid und Beobachter genau auf einer Linie liegen. Aus diesem Wert  $t_{max} \approx 6$  s kann man den Durchmesser  $d$  des Asteroiden bestimmen:

$$d = v \cdot t \approx 60 \text{ km} \quad (11.2)$$

wobei  $v$  die Geschwindigkeit des Asteroiden relativ zum Stern ist, aus Sicht des irdischen Beobachters. Diese kannte man 2010 sehr gut, da die Bahn des schon 1901 entdeckten Planetoiden Roma sehr gut vermessen ist:  $v \approx 10$  km/s.

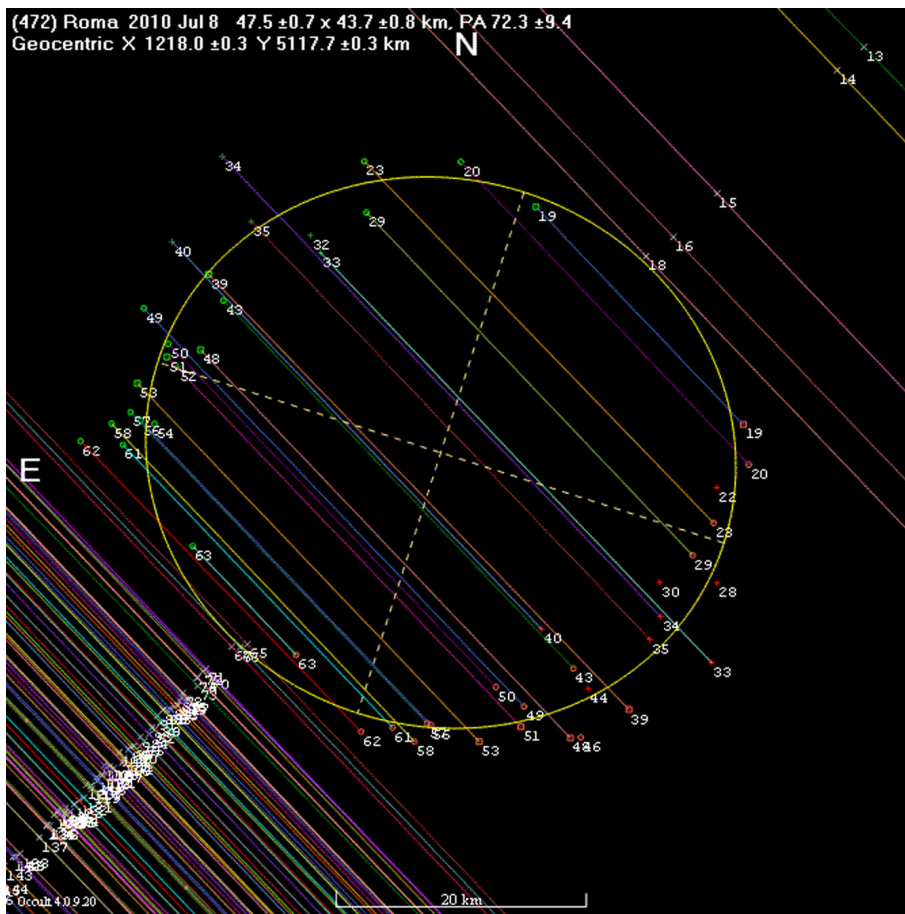


Abbildung 11.8: Bedeckung des Sterns  $\delta$  Oph durch den Asteroiden **(472) Roma** am 8. Juli 2010 [152, 153]. Erläuterungen siehe Text. Kredit: Eric Frappa.

Auch ich habe im Juli 2010 mitgemacht, vom belgischen Grenzort Neu-Moresnet nahe Aachen aus. Wie sich dann herausstellte, gehörte ich zur Kategorie der 'Unbeschatteten': 'Meine' durchgehende Linie verläuft in Abbildung 11.8 knapp unterhalb des Asteroidenschattens. Dieser ist etwas weiter westlich als prognostiziert vorbeigezogen, so dass ich keine Verdunklung von  $\delta$  Oph gesehen habe.

Man bekommt durch diese Messungen also die Größe des Asteroiden und kann auch dessen Gestalt zumindest eingrenzen.

Derartige Vermessungen von Okkultationen haben auch schon zu Entdeckungen von Asteroidenmonden (siehe Kapitel 18) geführt, die sich durch einen 'Nebenschatten' bemerkbar machen.

Könnte man die Größe von **(472) Roma** nicht einfach mit einem guten Teleskop

bestimmen, ohne auf eine seltene Sternbedeckung warten zu müssen? Nein, denn der Winkeldurchmesser betrug - im Juli 2010 - nur ungefähr  $0,03''$ , also 3% einer Bogensekunde<sup>3</sup>, das ist viel weniger als der Störeffekt der atmosphärischen Turbulenzen, das 'Seeing', welches die Größe von Asteroiden oder Sternen auf mehr als  $1''$  verschmiert, und damit eine Größenbestimmung verhindert. Siehe dazu auch Unterkapitel 11.7. Deswegen ist es auch nicht verwunderlich, dass die ersten Versuche der Bestimmung von Asteroidendurchmessern Anfang des 19. Jahrhunderts bestenfalls deren Größenordnung und die relativen Größenverhältnisse ergaben. Erste direkte Messungen an (1) Ceres und (2) Pallas wurden von William Herschel mit einem 6 m langen Teleskop durchgeführt [126]. Aus den beobachteten Helligkeiten schloss Heinrich Olbers, dass Ceres größer als Pallas und (3) Juno sein muss.

Bisher konnten nur relativ wenige der mehr als 1 Million bekannten Asteroiden bei einer Okkultation beobachtet werden, obwohl diese gar nicht so selten auftreten; derzeit gibt es im Mittel etwa eine Beobachtungsmöglichkeit (in irgendeiner Weltregion) pro Tag.

Auf besonderes Interesse stieß die Bedeckung des hellen Sterns Beteigeuze im Sternbild Orion durch den Asteroiden (319) Leona am 12. Dezember 2023. Von Europa aus konnte dieses extrem seltene Himmelsereignis mit bloßem Auge beobachtet werden, allerdings nur von einem schmalen Streifen aus, welcher durch Südspanien, Sizilien und Griechenland führte. Entgegen ursprünglichen Erwartungen wurde der Riesenstern Beteigeuze aber nicht komplett durch den Kleinplaneten abgedeckt, es kam 'nur' zur einer Lichtabschwächung um den Faktor 5 [160]. Offenbar ist Leona nicht groß genug. Bei dieser Bedeckung spielte also auch die Sterngröße eine Rolle.

## 11.5 Asteroiden vor Sonne oder Mond?

Können Asteroiden auch 'unseren' Stern, die Sonne abschatten? Das kann niemals vollständig gelingen, es sei denn der Kleinplanet würde in extrem geringer Höhe über den Beobachter hinwegfliegen. Zwar gibt es genug Asteroiden die irgendwo zwischen Sonne und Erde vorbeifliegen. Aber nur falls der Kleinplanet genau die Verbindungslinie Sonne-Erde passiert, sieht man - im besten Fall - von der Erde aus einen winzigen dunklen Fleck auf der Sonnenoberfläche. So ähnlich funktioniert dies bei einem Merkur- oder Venustransit, wenn also einer dieser Planeten zwischen Erde und Sonne vorbeifliegt, siehe Abbildung 11.9. Beobachtungen von solchen Planetentransits sind nicht nur spektakulär, sie erlauben auch genaue Positionsmessungen der vorbeifliegenden

---

<sup>3</sup>Bogensekunde =  $1/3600$  Winkelgrad

Planeten, welche eine wichtige Rolle bei frühen Bestimmungen der **Astronomischen Einheit** gespielt haben. Es wäre schön, wenn man auch Asteroiden-



Abbildung 11.9: Merkur-Transit am 9. Mai 2016, vom Autor aufgenommen. Mehrere Fotos sind überlagert worden, um die Bewegung des Planetenschattens relativ zur Sonne erkennen zu lassen. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Einzelbildern betrug 15 Minuten. Einige Schattenpunkte fehlen, da die Sonne durch Wolken verdeckt war. Oberhalb des Zentrums der Sonnenscheibe sieht man Sonnenflecken.

Transits vor der Sonne nutzen könnte. Kombiniert man Positionsmessungen, die von verschiedenen Punkten auf der Erde gemacht wurden, kann man so die Entfernung des Asteroiden bestimmen. Da aber Asteroiden sehr viel kleiner sind, ist so ein Transit leider noch nie gesehen worden, und wird wohl auch auf absehbare Zeit nicht beobachtbar sein [199]. Übrigens kann auch die Internationale Raumstation **ISS** kurzzeitig einen Schatten auf Sonne oder Mond hinterlassen. Abbildung 11.10 zeigt einen insgesamt nur etwa 1 Sekunde dauernden Transit.

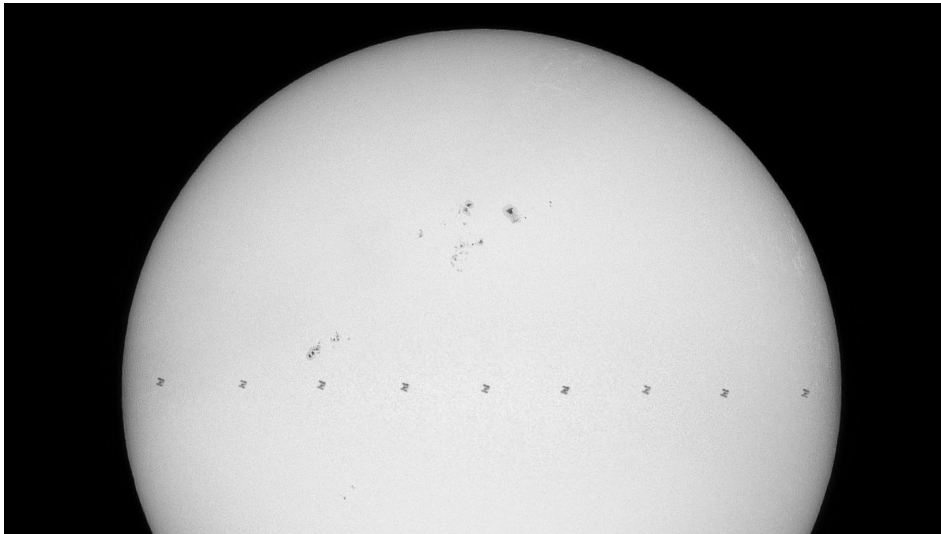


Abbildung 11.10: Die **internationale Raumstation ISS** fliegt vor der Sonne vorbei, erkennbar an den kleinen dunklen Schattenbildern entlang der Horizontalen. Überlagerung von 10 Aufnahmen, die am 9. Oktober 2022 im zeitlichen Abstand von etwa einer zehntel Sekunde gemacht wurden. Auch deutlich zu erkennen sind einige Sonnenflecken.

Und der Mond? Auch vor dessen beleuchteter Oberfläche kann ein kleiner schwarzer Fleck vorbeiziehen. Aber dazu muss der Asteroid der Erde sehr nahekommen - und das ist sehr selten, denn der Abstand des Mondes von der Erde ist mit knapp 400 000 km ja sehr viel kleiner als der zur Sonne, und zwar um einen Faktor von ungefähr 400. Nichtsdestotrotz können Asteroiden innerhalb der Mondbahn die Erde passieren, wie zum Beispiel der **NEA (Near-Earth Asteroid) 2023 DZ<sub>2</sub>**, der am 25.3.2023 im Abstand von nur 175 000 km an unserem Planeten vorbeiraste [28]. Allerdings flog er nicht durch die Verbindungslinie Erde-Mond. Bis heute konnte noch kein Asteroidenschatten auf dem Mond beobachtet werden.

Selbstverständlich kommt es auch zu Okkultationen von anderen Himmelskörpern durch Asteroiden, so können Kleinplaneten ähnlich wie die Jupitermonde einen Schatten auf den großen Planeten werfen. Aber auch das ist noch nicht beobachtet worden.

Umgekehrt können Asteroiden auch selbst von anderen Himmelskörpern so bedeckt werden, dass erstere von der Erde aus zeitweilig nicht sichtbar sind. Hier kommen als 'Schattenspender' wegen ihrer Größe insbesondere der Erdmond und die Planeten in Frage. Solche Okkultationen gibt es häufiger, sie sind aber wenig spektakulär, da ja der Planet - oder gar der Erdmond - viel



heller ist als der Asteroid im Hintergrund, also praktisch keine Verdunklung zu beobachten ist. Von Interesse waren solche Okkultationen aber schon im Jahr 1871, als der Astronom **John Russel Hind** in den ‘Monthly Notices of the Royal Astronomical Society’ auf eine von ihm berechnete bevorstehende Bedeckung von **Vesta** durch den Mond am 30. Dezember 1871 hinwies, mit dem Kommentar ‘mereley of astronomical curiosity’ [166].

## 11.6 Radar-Überwachung

Eine ganz andere Methode, sowohl die Entfernung, Größe und Form eines Planetoiden sowie die Rotationsgeschwindigkeit zu messen, basiert auf der Radartechnik. Einige wenige große Radioteleskope, wie das **Arecibo-Observatorium** in Puerto Rico, können nicht nur elektromagnetische Strahlung empfangen, sondern diese auch aktiv aussenden und dann die Radar-Echos aufzeichnen. Die daraus rekonstruierten Bilder zeigen insbesondere Form und Größe des Kleinplaneten. Man erreicht eine viel bessere räumliche Auflösung als optische Teleskope, durch sehr genaue Messung der Laufzeiten der Signale von der Antenne zum Asteroiden und zurück. Von einem unregelmäßig geformten Planetoiden werden zu einem bestimmten Zeitpunkt die Radiosignale von den der Erde nächstliegenden Oberflächen-Regionen zuerst empfangen, die anderen später. Bei einem rotierenden Asteroiden kann man so nach und nach die gesamte Struktur abtasten. Bei einer Zeitauflösung von  $\Delta t \approx 100$  ns erreicht man eine Ortsauflösung von

$$\Delta x = \frac{1}{2} \Delta t \cdot c \approx 15 \text{ m} \quad (11.3)$$

wobei  $c = 300000$  km/s die **Lichtgeschwindigkeit** bezeichnet. Der Faktor 2 berücksichtigt Hin- und Rückweg des Radarpulses.

Ein besonders lang gestreckter Asteroid, **(367789) 2011 AG<sub>5</sub>**, wurde im Februar 2023 mit der 70 m großen **Goldstone-Radarantenne** in Kalifornien auf die beschriebene Weise untersucht, als der Himmelskörper vergleichsweise nah an der Erde vorbeiflog, der geringste Abstand betrug etwa 1,8 Millionen Kilometer. Das Ergebnis ist in Abbildung 11.11 zu bestaunen:

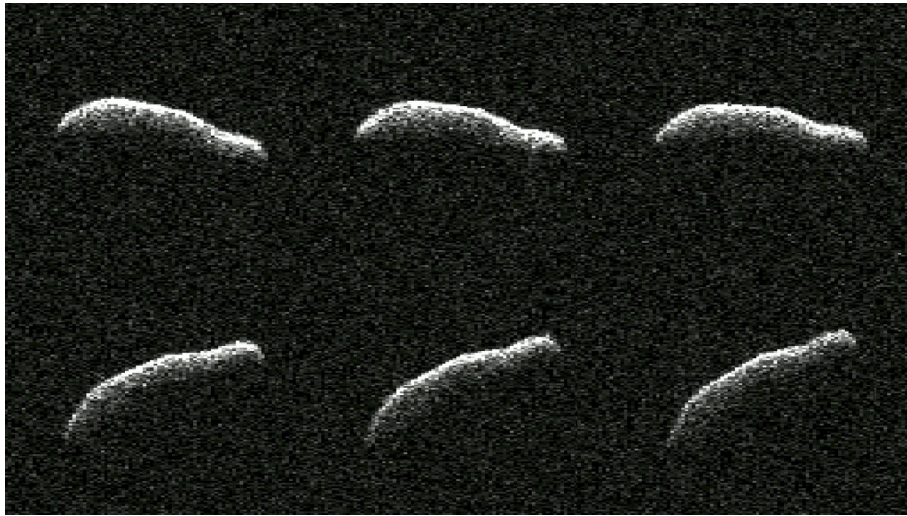


Abbildung 11.11: Radarecho-Bilder des etwa 140 m großen Asteroiden (367789) 2011 AG<sub>5</sub>, mit dem Goldstone-Observatorium am 4. Februar 2023 aufgenommen [170]. Der Zeitabstand der Einzelfotos betrug 5 - 10 Minuten.

Die Form kann man direkt erkennen. Die geometrischen Abmessungen bekommt man aus den Winkelgrößen, welche man aus der Abbildung gewinnt, und der bekannten Entfernung des Asteroiden zur Erde: 2011 AG<sub>5</sub> ist etwa 150 m lang. Ferner sieht man, dass der Kleinplanet rotiert.

Die Arecibo-Antenne war ab Inbetriebnahme im Jahr 1964 mehrere Jahrzehnte lang die größte (aktive) Radioantenne, mit einem Spiegeldurchmesser von 300 m. Diese riesige 'Schüssel' ist leider im Jahr 2020 kollabiert und wird nicht repariert. Im Jahr 1989 gelang mit Arecibo die allererste direkte Abbildung eines Asteroiden, (4769) Castalia. Dieses Radioteleskop hat nicht nur Asteroiden untersucht, sondern auch wichtige andere Entdeckungen gemacht, insbesondere zu nennen sind die Pulsare, rotierende Neutronensterne.

## 11.7 Aufnahmen mit Großteleskopen

In den letzten Jahren ist es sogar gelungen, im optischen Spektralbereich von den größeren und helleren Asteroiden Aufnahmen anzufertigen. Das in der chilenischen Atacama-Wüste in einer Höhe von 2600 m über dem Meeresspiegel operierende Very Large Telescope (VLT) [42] war besonders erfolgreich. Dieses von der Europäischen Südsternwarte (ESO) betriebene Observatorium verwendet mehrere Spiegelteleskope, die größten haben einen Durchmesser



von  $D = 8,2\text{m}$ .

Abbildung 11.12 zeigt die so entstandenen an verschiedenen Tagen aufgenommenen Bilder des Asteroiden (15) Eunomia. Größe, Form und Rotation sind klar zu erkennen. Wenn man die zu verschiedenen Zeiten aufgenommenen

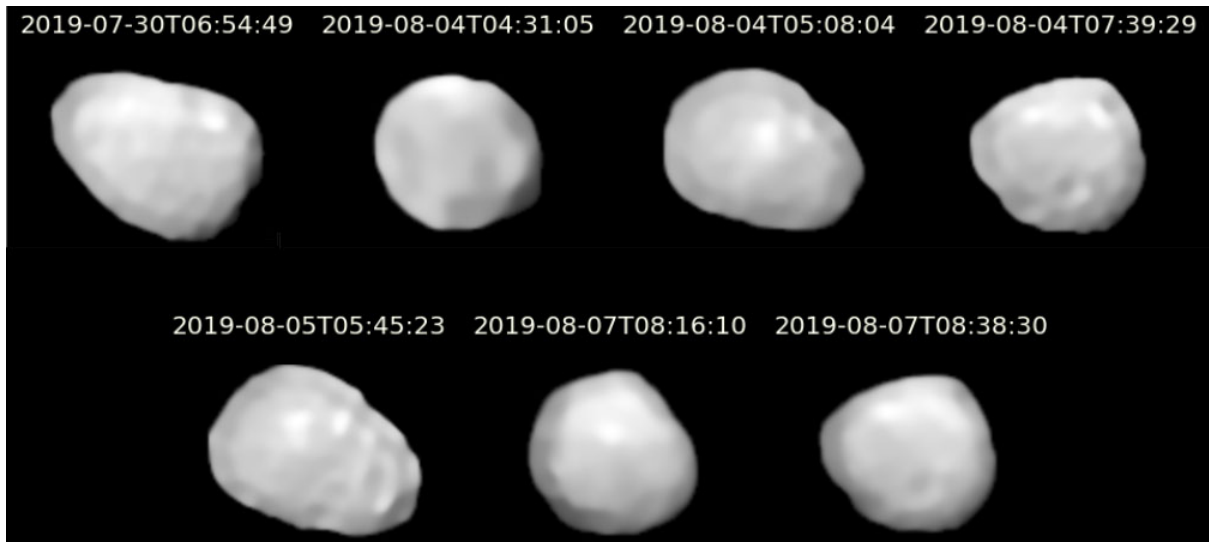


Abbildung 11.12: Mit dem **Very Large Telescope (VLT)** angefertigte Aufnahmen des Asteroiden (15) Eunomia, nach [145].

Fotos kombiniert, und auch von anderen Teleskopen gewonnene Lichtkurven und weitere Daten einbezieht, kann man schließlich 3-dimensionale Modelle der Asteroiden konstruieren – die aber leider in einem 2-dimensionalen Buch nicht adäquat wiedergegeben werden können.

Um zu verstehen, wie mit dem VLT derartige Aufnahmen erzielt werden konnten, beschäftigen wir uns etwas näher mit der zugrundeliegenden Physik. In der klassischen Optik kann man die mit einem Instrument mit einer Öffnung  $D$  theoretisch erreichbare **Winkelauflösung**  $\theta_{\min}$  berechnen<sup>4</sup>:

$$\theta_{\min} \approx \frac{\lambda}{D} \approx 0,01'' \quad (11.4)$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge des beobachteten Lichts ist, im visuellen Spektralbereich sind das rund  $0,5 \mu\text{m}$ .  $\theta_{\min}$  ist der Winkelabstand von zwei benachbarten Strukturen – zum Beispiel zweier kleine Krater auf der Oberfläche eines Asteroiden – die noch getrennt wahrgenommen werden können. Dabei ist  $D$  der

<sup>4</sup>Winkel sind dimensionslose physikalische Größen, sie entsprechen dem Verhältnis zweier Längen. Oft werden sie in der Pseudoeinheit rad oder in Grad angegeben, wobei  $1 = 1 \text{ rad} =$

Durchmesser der Objektivlinse oder des primären Spiegels, man spricht auch von der 'Apertur'. Wenn der Himmelskörper aus einer Entfernung  $d$  beobachtet wird, ist der entsprechende minimale räumliche Abstand  $s_{\min}$ , der auf dem Asteroiden untersucht werden kann

$$s_{\min} \approx \theta_{\min} \cdot d \approx \frac{\theta_{\min}}{1''} \cdot \frac{d}{100000} \quad (11.5)$$

Mit der theoretischen VLT-Auflösung von  $\theta_{\min} = 0,01''$  könnte man eine Kirchturmuhren in München von Hamburg aus (Luftlinie grob  $d \approx 500$  km) bequem ablesen<sup>5</sup>, denn  $s_{\min} = 5$  cm! Auch der Mond soll als Beispiel zur Illustration dieser Formeln herhalten: Mit einem mittleren Abstand von  $d = 400000$  km bekommt man eine Ortsauflösung auf seiner Oberfläche von  $s_{\min} = 40$  m - wenn man denn die theoretisch mögliche VLT-Winkelauflösung wirklich erreichen könnte.

Dem steht aber die Erdatmosphäre entgegen. Zwar sind die in der trockenen und hoch gelegenen Atacama-Wüste vorherrschenden Beobachtungsbedingungen des VLTs exzellent, aber trotzdem begrenzt das 'Seeing' die erreichbare Auflösung auf knapp  $1''$  und Formel (11.4) bleibt erst mal ein schöner Traum.

Welche Auflösung benötigt man denn eigentlich, um zum Beispiel Größe und Form von (15) Eunomia [35] zu bestimmen? Mit einem Radius von  $r \approx 130$  km und einer minimalen Erddistanz von etwa  $d = 1,5$  AE  $\approx 200$  Millionen km ist die Winkelgröße dieses Asteroiden

$$\theta_{\text{Eunomia}} \approx \frac{2r}{d} \approx 0,2'' \quad . \quad (11.6)$$

Um etwas über die Gestalt dieses Himmelskörpers aussagen zu können, benötigt man eine Auflösung die mindestens 10-mal besser (also kleiner) sein muss als die Gesamtgröße des Asteroiden.

Tatsächlich hat man mit dem VLT eine Winkelauflösung von etwa  $\theta_{\min} = 0,02''$  erreicht - mit großen Anstrengungen. Erstens benutzt man 'adaptive Optik' um die atmosphärischen Störungen deutlich zu reduzieren. Dazu misst man die Luftunruhe und korrigiert mit speziellen beweglichen Spiegelementen das Bild des Teleskops in Echtzeit, um den atmosphärischen Einfluss weitgehend zu eliminieren. Das gelingt mit dem SPHERE-System, das auch zur Exoplanetensuche eingesetzt wird [41]. Zweitens kombiniert man mehrere Aufnahmen und wendet spezielle Methoden der Bildverarbeitung an.

---

$180^\circ/\pi \approx 57^\circ$ . In Bogensekunden kann man so umrechnen:  $1^\circ = 3\,600''$ .

<sup>5</sup>wenn es weder Luft noch Erdkrümmung gäbe

## 11.8 Masse und Gewicht

Auf der Erde sprechen wir meist vom Gewicht eines Körpers, das ist die Schwerkraft  $F_G$ , mit der die Erde ihn anzieht:

$$F_G = g_E \cdot m \quad (11.7)$$

mit der für alle Objekte gleichen Fallbeschleunigung, der 'Erdbeschleunigung'  $g_E = 9,8 \text{ m/s}^2$  und seiner Masse  $m$ . Das 'Gewicht' eines um die Sonne reisenden Asteroiden hat keine Bedeutung, die relevante Größe ist die Masse  $m$ . Sie ist sowohl ein Maß für die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern als auch für die Trägheit, also das Beharrungsvermögen gegenüber Geschwindigkeitsänderungen bei angreifenden Kräften. Die Masse  $m$  messen wir in der Einheit kg, bei Asteroiden bietet sich auch der Vergleich mit der Erdmasse von  $m_E = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$  an.

Massenbestimmungen sind schwierig: Zwar kann man aus der Größe (also zum Beispiel dem mittleren Durchmesser bei einer kartoffelartigen Form des Asteroiden) die Masse grob abschätzen, aber dazu muss man natürlich Annahmen machen, insbesondere zur Massendichte  $\rho$ , dem Verhältnis von Masse zu Volumen. Eine direkte Messung der Masse  $m$  ist nur möglich, wenn man deren Wirkung ausnutzt, also die damit verbundene Gravitationskraft, die ja proportional mit  $m$  anwächst.

Aber wieso ist die Masse eigentlich eine so wichtige Größe? Einmal, weil wir so etwas über den Asteroiden lernen können: Zusammen mit dem Volumen ergibt sich die mittlere Massendichte, die Aussagen über die chemische Zusammensetzung erlaubt. Die meisten Asteroiden haben Dichte-Werte zwischen  $1 \text{ g/cm}^3$  und  $5 \text{ g/cm}^3$  [143]. Zum Vergleich: Die mittlere Dichte des 'Gesteinsplaneten' Erde beträgt  $5,5 \text{ g/cm}^3$ , der Gasplanet Neptun bringt es nur auf  $1,6 \text{ g/cm}^3$ . Die Verteilung der Asteroidenmassen im Hauptgürtel ermöglicht Rückschlüsse auf die Entstehung und Evolution dieser Asteroiden. Zweitens, falls es zu einer Kollision - insbesondere mit der Erde - kommen könnte, ist nicht nur die Richtung und Geschwindigkeit  $v$  des Asteroiden wichtig, sondern auch seine Masse, denn seine kinetische Energie ist durch

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (11.8)$$

gegeben, und diese wiederum bestimmt die Schadenshöhe beim Einschlag, siehe dazu auch Kapitel 19. Falls man eine solche Katastrophe vermeiden will, indem man durch eine gezielte Mission den Asteroiden rechtzeitig etwas von seinem Kollisionskurs abbringt, muss man seine Masse auch kennen, denn diese bestimmt ja auch die Trägheit des Himmelskörpers, also dessen 'Beharren' auf seiner ursprünglichen Trajektorie.

Die eleganteste Methode der Massenbestimmung für einen Himmelskörper ist die Vermessung der Bahn eines um ihn herumfliegenden kleinen Satelliten. Auf diesem Orbit stellt sich ein Gleichgewicht zwischen nach außen gerichteter Fliehkraft einerseits und der anziehenden Gravitationskraft andererseits ein. Wie schon Isaac Newton berechnet hat, sind **Umlaufperiode  $T$**  und **große Halbachse  $a$**  für die Satellitenbahn direkt mit der Masse  $m$  des Zentralkörpers<sup>6</sup> verknüpft:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G_N}{4\pi^2} \cdot m \quad (11.9)$$

Dabei ist  $G_N$  die Newtonsche Gravitationskonstante. So kann man zum Beispiel die Masse des **Planeten Jupiter** aus den Umlaufdaten eines seiner Monde (sprich:  $a$  und  $T$ ) auf besser als 0,01% genau bestimmen. Wenn der zu untersuchende Himmelskörper keinen natürlichen Satelliten hat (den wir Mond nennen), kann man einen künstlichen Satelliten in eine Umlaufbahn bringen; so umkreist die in Kapitel 13 vorgestellte Raumsonde Dawn seit vielen Jahren den Zwergplaneten **(1) Ceres**, so dass wir auch dessen Masse sehr genau kennen. Aber die meisten Asteroiden haben weder einen (bekannten) Mond noch wurden sie von Raumsonden besucht.

In einigen Fällen kann man die gegenseitige ‘Störung’ von Asteroiden ausnutzen, wenn sie sich recht nahekommen: dann werden die Bahnen aufgrund der gegenseitigen Gravitationskräfte verändert [157]. Die Stärke der Ablenkung ist proportional zu den Massen der beteiligten Himmelskörper. Die erste derartige Massenbestimmung gelang für den Kleinplaneten **(4) Vesta**, aber erst im Jahre 1966, mehr als 150 Jahre nach dessen Entdeckung. **Hans G. Hertz** hat seinerzeit die Einwirkung des sehr massereichen Asteroiden Vesta auf den vergleichsweise kleinen Asteroiden **(197) Arete** bestimmt [156, 157]. Beide nähern sich bis auf 0,04 AE einander an. Dabei ändert sich die Bahn von Vesta praktisch nicht, wohl aber die von Arete, und diese Störung ist proportional zur Vesta-Masse, hängt aber praktisch nicht von der unbekanntenen Arete-Masse ab, die deutlich weniger als 1 Promille der Masse des viel größeren Kleinplaneten beträgt. Aufgrund der genannten Schwierigkeiten wurden bis heute erst für einige Dutzend Asteroiden deren Massen bestimmt.

## 11.9 Einige Messergebnisse

Die folgende Tabelle 11.1 listet einige repräsentative Beispiele für Messergebnisse von Größe (mittlerer Durchmesser) und Masse auf. Zwei Zwergplaneten

<sup>6</sup>Die Masse des Satelliten spielt dagegen keine Rolle, solange sie klein ist.

sind auch dabei, sie definieren das obere Ende des Massenbereichs von Kleinplaneten unseres Sonnensystems. Zum Vergleich wurde auch der Erdmond mit in die Tabelle aufgenommen. Die Bemerkungen beziehen sich auf die Bestimmungsmethode für die Masse. Die beiden kleinen und damit massearmen Asteroiden runden das Massenspektrum nach unten ab. Die Gesamtmasse al-

Asteroid	Durchmesser in km	Masse in kg	Bemerkung zur Massenbestimmung
(134340) Pluto	2400	$130 \cdot 10^{20}$	Mond Charon
(1) Ceres [39]	950	$9,39 \cdot 10^{20}$	Raumsonde Dawn
(4) Vesta [114]	520	$2,6 \cdot 10^{20}$	Raumsonde Vesta
(15) Eunomia [35]	270	$\approx 0,31 \cdot 10^{20}$	Größe, angenommene Dichte
(101955) Bennu [34]	0,51	$\approx 7,33 \cdot 10^{10}$	Raumsonde OSIRIS-REx
(25143) Itokawa [36]	0,33	$3,5 \cdot 10^{10}$	Raumsonde Hayabusa
Erdmond	3500	$735 \cdot 10^{20}$	Umlaufende Raumfahrzeuge

Tabelle 11.1: Größe (mittlerer Durchmesser) und Masse für einige Asteroiden. Man beachte, dass die Masse teilweise in  $10^{20}$  kg und manchmal in  $10^{10}$  kg (entspricht etwa 20 Riesen-Öltankern) angegeben ist. Zum Vergleich ist auch der Erdmond aufgeführt.

ler bekannten Asteroiden (einschließlich der Zwergplaneten) beträgt übrigens nur einen Bruchteil von etwa ein Prozent der Erdmasse von  $5,97 \cdot 10^{24}$  kg.

Die rekonstruierten Formen und Größen von hellen Asteroiden zeigt Abbildung 11.13 [145]. Die Verteilung der mittleren Durchmesser – sofern veröffentlicht – ist in Abbildung 11.14 für die 640000 mit einer Nummer versehenen Asteroiden gezeigt [171]<sup>7</sup>, sofern sie mindestens 1 km groß sind. So ist zum Beispiel der besonders kleine Asteroid 2022 WJ<sub>1</sub>, der im November 2022 in die Erdatmosphäre eingetaucht ist und dadurch zerstört wurde [202] nicht eingetragen. Er war zu ‘Lebzeiten’ nur etwa 1 m groß, erfüllt also gerade unsere in Kapitel 1 vorgestellte Definition für Asteroiden. (1) Ceres ist mit 950 km Durchmesser rechts zu finden, die anderen Zwergplaneten sind nicht eingetragen, da sie die 1000 km Marke deutlich überschreiten. Da von den größeren Asteroiden die Maße eher bekannt sind als für die kleineren, welche ja auch eher einer Entdeckung entgehen können, ist diese Darstellung zuungunsten der kleinen Himmelskörper verzerrt.

<sup>7</sup>Stand Januar 2024



Abbildung 11.13: Bilder von 42 hellen und großen Asteroiden, alle aufgenommen mit dem **Very Large Telescope** in Chile [138], nach [145].

## 11.10 Spektroskopie von Asteroiden

Das Wort **Spektroskopie** hat sowohl griechische (skopia = Beobachtung) wie lateinische Wurzeln (spektrum = Bild, Vorstellung). In den Naturwissenschaften bezeichnet dieser Fachausdruck allgemein physikalische Methoden, die eine Strahlung nach einer bestimmten Eigenschaft zerlegen. Das gilt insbesondere für die Analyse der auftretenden Wellenlängen  $\lambda$  bei elektromagnetischer Strahlung. Die aus der Messung resultierende Intensitätsverteilung als Funktion von  $\lambda$  nennt man Spektrum.

In den Medien und der populärwissenschaftlichen Literatur kommen Spektroskopie und Spektren eher selten vor. Dort wird die Astronomie in erster Linie als 'Bild-Wissenschaft' präsentiert - und in der Tat gibt es ja auch eine nahezu unerschöpfliche Zahl von faszinierenden Aufnahmen. Nichtsdestoweniger ist die spektroskopische Methode in der Astrophysik von grundlegender Bedeutung. Beobachtungen wie die Rotverschiebung<sup>8</sup> der Galaxien, aus der

<sup>8</sup>Verschiebung des Spektrums hin zu größeren Wellenlängen (rot), wie bei sich von uns

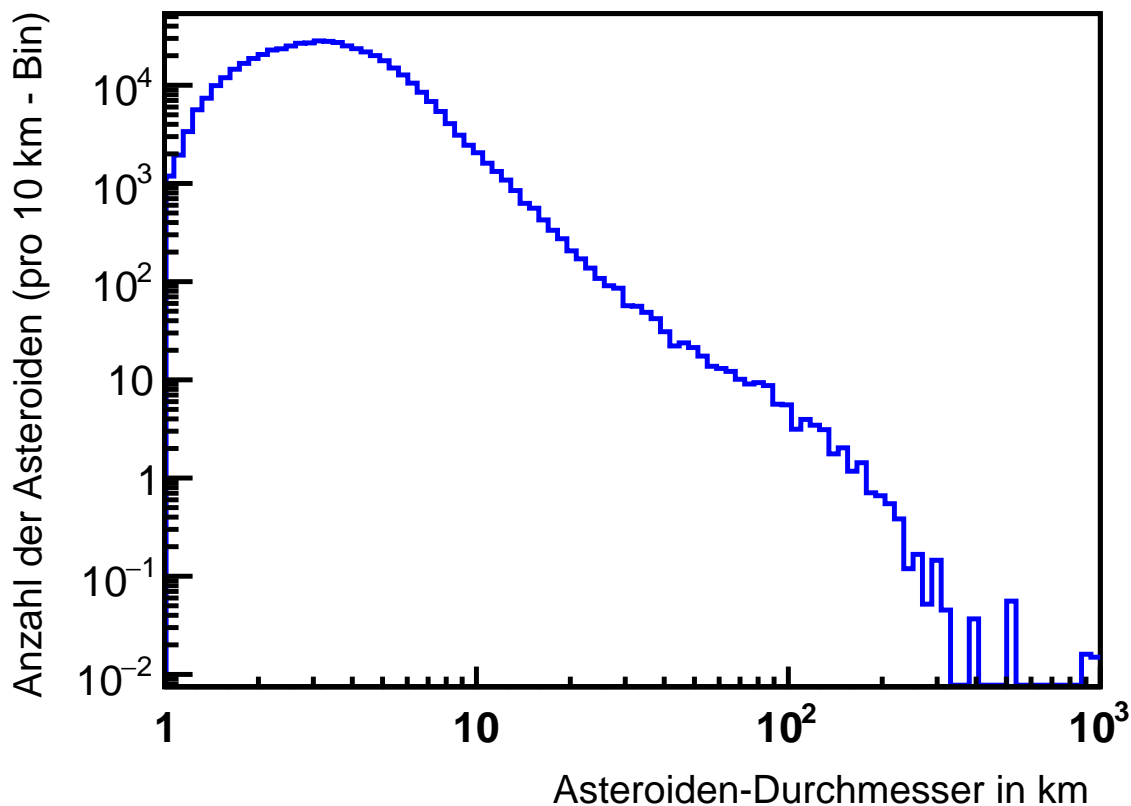


Abbildung 11.14: Verteilung der Werte der bekannten Asteroiden-Durchmesser in km für die nummerierten Asteroiden [171] mit einer Größe zwischen 1km und 1000 km. Man beachte die logarithmische Auftragung für beide Achsen.

man die Expansion des Universums ableitet, oder die Entdeckung des ersten Exoplaneten – den man indirekt über den Dopplereffekt<sup>9</sup> des Lichts vom Muttersterns gefunden hat – sind nur zwei Beispiele.

Wir beschränken uns im Folgenden auf elektromagnetische Wellen, und insbesondere auf Licht im sichtbaren Spektrum, das sind die Wellenlängen im Fenster  $0.4 - 0.8 \mu\text{m}$  sowie die benachbarten Spektralbereiche Infrarot (IR) und Ultraviolett (UV). Die aus der spektroskopischen Untersuchung von Asteroiden resultierende Einteilung in verschiedene Spektraltypen wird in Kapi-

entfernenden Lichtquellen.

<sup>9</sup>Veränderung von Frequenz und Wellenlänge bei Relativbewegung von Quelle und Empfänger. Hier: Stern bewegt sich periodisch auf Erde zu und von ihr weg, da er zusammen mit dem Planeten um den gemeinsamen Schwerpunkt rotiert.



tel 5.2 vorgestellt.

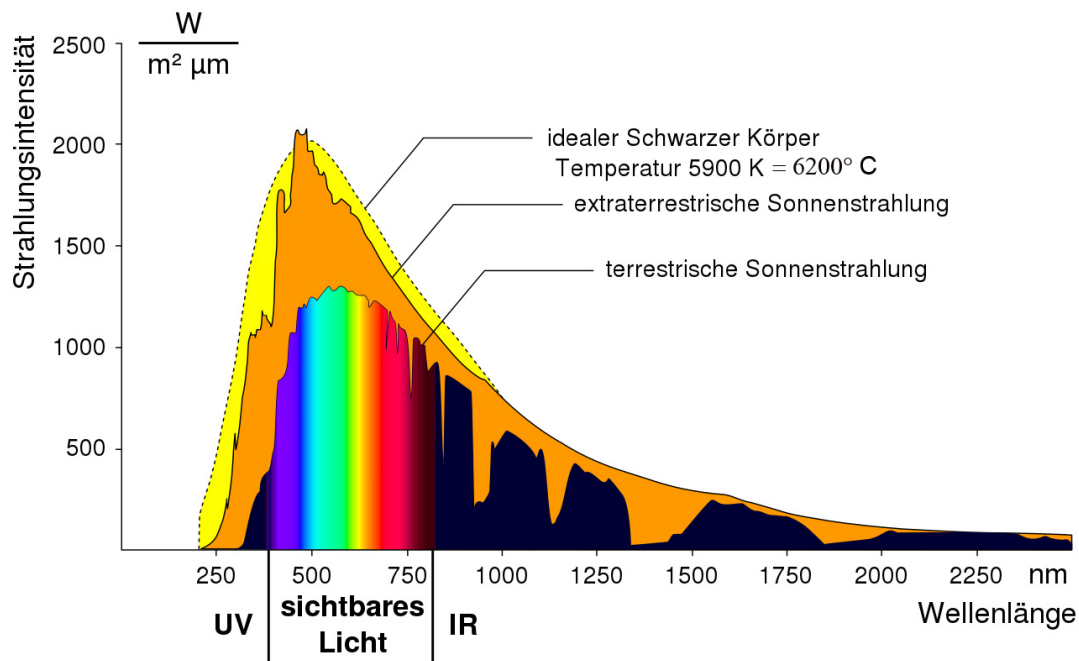


Abbildung 11.15: Spektrum der Sonne [102]. Auf der horizontalen Achse ist die Wellenlänge in Nanometern aufgetragen:  $1000 \text{ nm} = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ . Die vertikale Achse zeigt die Strahlungsintensität an. Neben dem Spektrum eines idealisierten schwarzen Körpers sieht man das außerhalb der Erde und ein am Erdboden gemessenes Spektrum, das durch die Atmosphäre modifiziert wird.

In diesem Kapitel geht es um die Messverfahren. Das solare Spektrum kann man sehr gut durch die Intensitätsverteilung eines **schwarzen Körpers**, der eine Temperatur von gut  $6000^\circ C$  besitzt, approximieren – so sagen es die Physiker. Man könnte sich darunter eine heiße glühende Eisenkugel vorstellen – allerdings schmelzen alle Metalle schon bei viel niedrigeren Temperaturen. . .

Abbildung 11.15 zeigt das auf der Erde und im nahen Weltraum gemessene Spektrum unserer Sonne. Die Wellenlängen im sichtbaren Lichtbereich sind auch durch die entsprechenden Farben gekennzeichnet, von Violett über Blau und Grün nach Gelb und Rot. Man erkennt, dass die Erdatmosphäre das Spektrum deutlich beeinflusst. Das muss man grundsätzlich bei der Analyse von Licht aus dem Kosmos berücksichtigen – es sei denn, man beobachtet vom Weltall aus.

Um Licht wie das der Sonne in seine spektralen Anteile zu zerlegen, kann

man ausnutzen, dass die **Brechung** von Lichtstrahlen in Glas von dessen Wellenlänge abhängt. Man kann daher, wie in Abbildung 11.16 gezeigt, mit einem Prisma das Sonnenlicht in seine Farbanteile zerlegen, also das Spektrum messen. Alternativ kann man ein feinmaschiges Gitter<sup>10</sup> nutzen, siehe Ab-

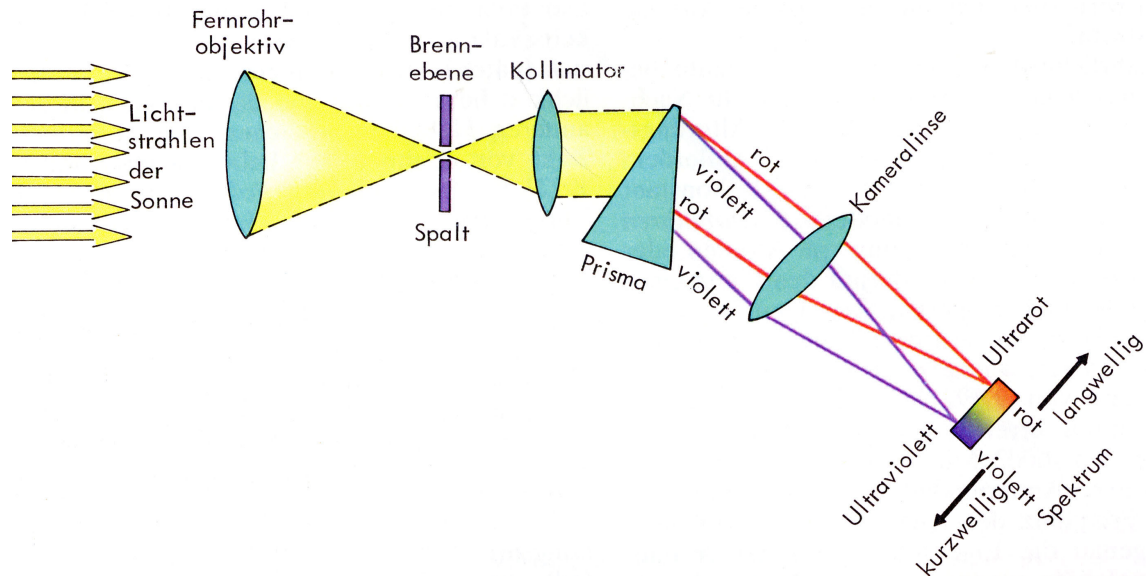


Abbildung 11.16: Prinzip eines Spektrometers welches auf der **Dispersion**, der Abhängigkeit der Lichtbrechung von der Wellenlänge basiert und dazu ein Glasprisma einsetzt [155]. Copyright: Illustration: Harald Bukor © 1973 Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München

bildung 11.17 oben. Durch die wellenlängenabhängige **Interferenz** von Licht kommt es auch hier zu einer spektralen Trennung. Man spricht in diesem Kontext auch von **Diffraktion** oder Beugung und von einem **Beugungsgitter**.

Mit einem exzellenten Spektrometer erkennt man sehr feine dunkle Linien im Sonnenspektrum, die nach **Joseph von Fraunhofer** benannt sind, der diese im 19. Jahrhundert genau analysiert hat. Abbildung 11.18 zeigt diese zusammen mit einer Wellenlängenskala und großen und kleinen Buchstaben, mit denen die Fraunhofer-Linien bezeichnet werden. Die Details interessieren uns hier nicht. Wichtig ist, wie diese Linien zustande kommen und wie man sie interpretiert. Sie entstehen durch Absorption des Sonnenlichtes in der Photosphäre unseres Sterns, also in einer äußeren Hülle. Die Position und Stärke der Linien ist charakteristisch für die dort vorhandenen chemischen Elemente,

<sup>10</sup>Bestehend aus vielen zueinander parallelen Gitterlinien, ohne die dazu senkrechten Linien, wie sie bei einem Hühnerkäfig zu sehen sind!

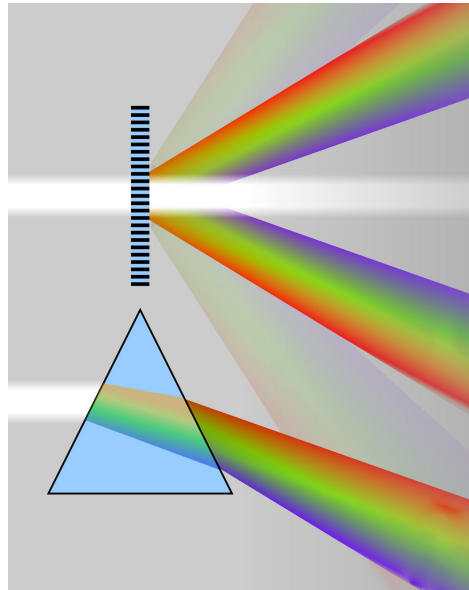


Abbildung 11.17: Aufspaltung von Licht in seine spektralen Komponenten, mit Gitter unter Ausnutzung von Interferenz (oben) und durch ein Prisma, in dem Lichtbrechung stattfindet (unten). [94].

vor allem Wasserstoff und Helium. Die Muster der Fraunhoferlinien stellen gewissermaßen Fingerabdrücke der verantwortlichen Atome oder Moleküle dar. Man kann also aus einem Spektrum sehr viel über die chemische Zusammensetzung des untersuchten Objektes lernen.

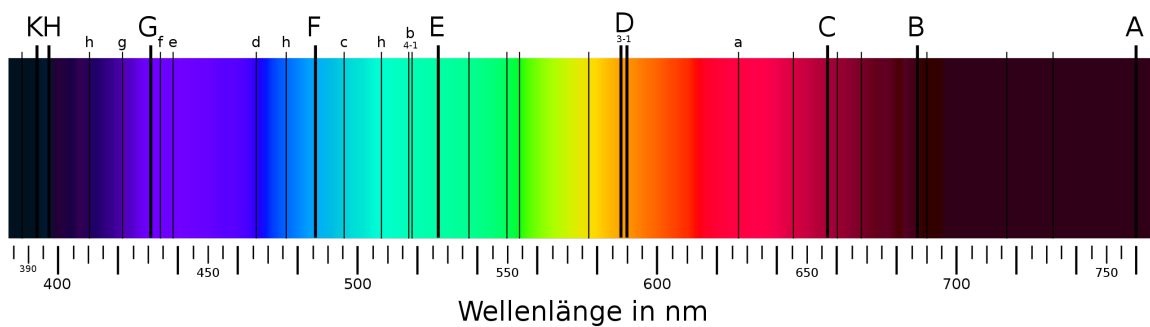


Abbildung 11.18: Spektrum der Sonne mit Fraunhofer-Absorptionslinien [96].

Und was hat das mit Asteroiden zu tun? Die Planetoiden in unserem Sonnensystem reflektieren das Sonnenlicht. Falls ein Kleinplanet wie ein idealer Spiegel wirken würde, also seine Oberfläche alle Wellenlängen des einfallenden

Lichtes vollständig reflektieren würde, so würden wir ein Spektrum messen, das von dem der Sonne nicht zu unterscheiden ist. Das Reflexionsvermögen, die **Albedo**, wäre exakt 100% für alle Werte von  $\lambda$ . Das wäre ziemlich uninteressant.

Tatsächlich modifiziert die Asteroidenoberfläche das von der Erde oder von einer Raumsonde messbare Reflexionsspektrum. Ein Teil des Lichtes wird vom Kleinplaneten absorbiert, das verringert die beobachtete Albedo, die jetzt kleiner als 100% wird und von der Wellenlänge des Lichtes abhängt. Man könnte hoffen, dass im Spektrum eines Asteroiden charakteristische scharfe Linien wie in Abbildung 11.18 auftreten. Dem ist aber leider nicht so, aus mehreren Gründen: Sobald man einzelne Moleküle in einen Festkörper einbettet, verschmiert die scharfe Spektrallinie zu einem 'Band', aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkungen in dem Material. Ferner sind es nicht einzelne einfache Atome oder Moleküle, die Licht absorbieren und emittieren. Stattdessen besteht die Asteroidenoberfläche aus viel komplexeren chemischen Verbindungen. Ein Beispiel ist das Mineral Olivin, ein Mischkristall, das unter anderem aus Silizium, Eisen, Sauerstoff, Magnesium und Mangan aufgebaut ist.

Abbildung 11.19 zeigt unten das Reflexionsspektrum von **(433) Eros**, das mit der Raumsonde **NEAR Shoemaker** gemessen wurde, die in Kapitel 13 kurz vorgestellt wurde. Das Spektrum ist in Form des Reflexionsvermögens, Albedo, als Funktion der Wellenlänge in einem infraroten Wellenlängenbereich dargestellt. Klare Strukturen sind nicht erkennbar. Das gilt auch für andere Asteroiden, wegen der eben genannten Ursachen. Die Interpretation ist entsprechend schwierig: Der obere Teil von Abbildung 11.19 zeigt die auf der Erde im Labor gemessenen Reflexionsspektren der Minerale Olivin und Pyroxen sowie das einer Eisen-Nickel-Legierung. Durch Vergleich mit dem Eros-Spektrum kann man erschließen, wie groß die Anteile der drei genannten und weiterer Stoffe auf der Asteroidenoberfläche sind. Nimmt man Spektren des Kleinplaneten hinzu, die weitere Wellenlängenbereiche bis hin zu hochenergetischer Röntgen- und Gamma-Strahlen abdecken, wird die Analyse erleichtert. Das Ergebnis lautet: Eros enthält chondritisches Material und relativ viele Metalle, er wurde nach dem **Tholen-Schema** in die Spektralklasse S und damit auch in die Spektralgruppe S eingeordnet, siehe Kapitel 5.2.

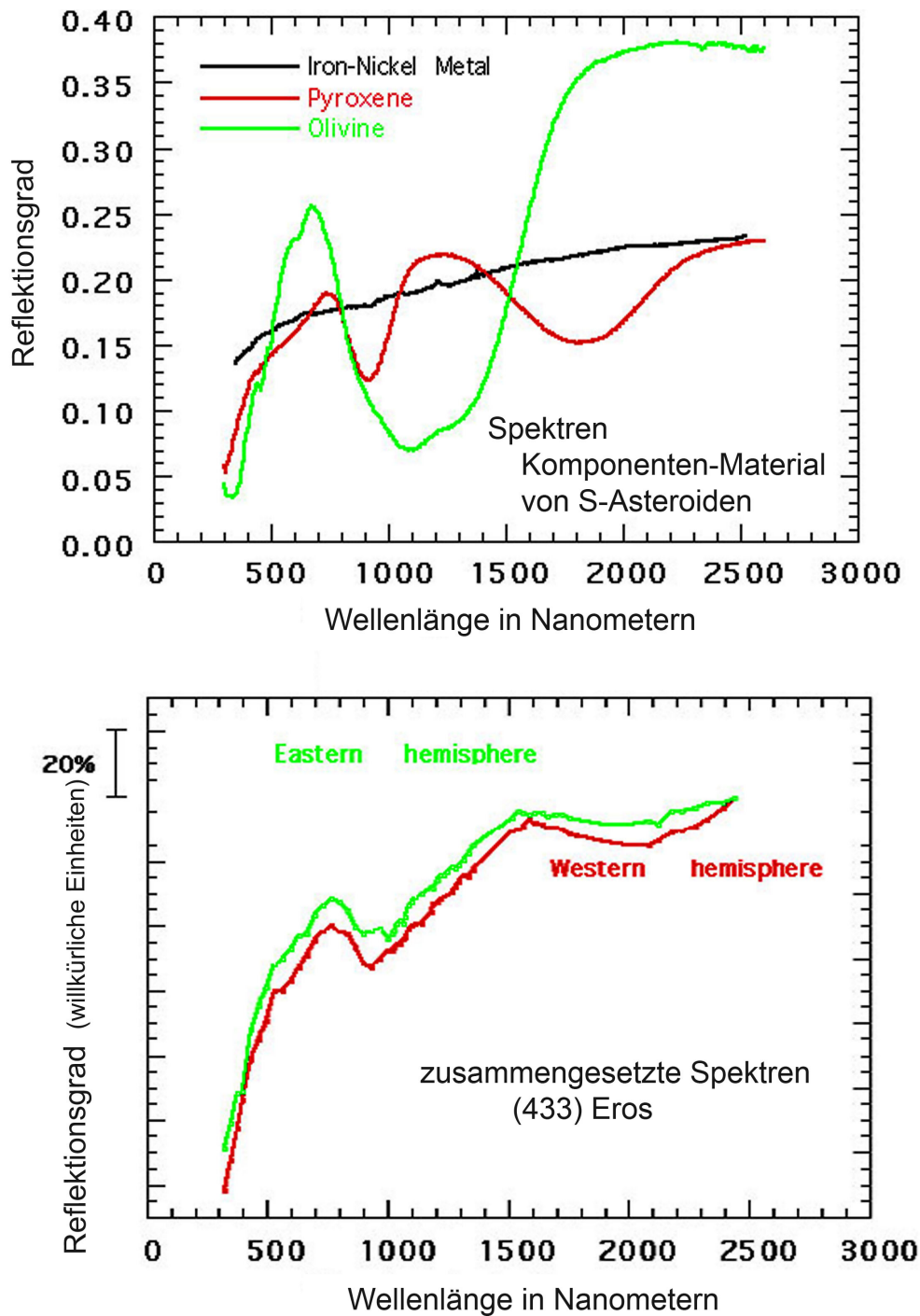


Abbildung 11.19: Oben: Im Labor gemessene Reflexionsspektren von drei Substanzen, die man auch auf den Oberflächen von Kleinplaneten findet. Unten: Spektrum des Asteroiden (433) Eros, aufgenommen mit dem Near-Infrared Spectrograph NIS der Raumsonde NEAR Shoemaker von einer Umlaufbahn um den Asteroiden, aus [53].

Im Bereich des sichtbaren Lichts übersetzen unsere Augen zusammen mit dem Gehirn das Reflexionsspektrum eines Asteroiden in Farben. Wie würden wir – durch ein Teleskop mit sehr großer Öffnung – die Asteroiden sehen? In der Regel würden sie nicht sehr bunt und eher dunkel erscheinen. Die Spektren in Abbildung 11.19 zeigen, dass im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm (blau-violett) über 550 nm (grün) nach 700 nm (rot) die Intensität ansteigt. Das bedeutet, dass diese Planetoiden tendenziell grünlich oder rötlich erscheinen. Ein besonders deutlich rot gefärbter Asteroid ist (545) *Pholus*. Diese Aussage ergibt sich aus dem gemessenen Spektrum. Ein schönes Foto des weit entfernten *Zentauren* *Pholus* gibt es leider nicht.

## 11.11 Professionelle Observatorien

Die meisten Entdeckungen von Asteroiden und die umfangreichsten Messungen werden heutzutage von 'Profi-Astronomen' gemacht. Man unterscheidet zwei Typen von Observatorien:

- Erdgebundene Teleskope, die meist in großer Höhe und in Gegenden mit wenig Lichtverschmutzung aufgestellt werden,
- Instrumente, welche im All – zum Beispiel auf einer irdischen Umlaufbahn oder im *Lagrange-Punkt L2* – ohne störende Erdatmosphäre fotografieren und messen können.

Manche Messprogramme sind gezielt auf Asteroiden (und Kometen) ausgerichtet, andere 'Surveys' (Durchmusterungen) scannen den gesamten Himmel ab. Sie messen Positionen und Helligkeiten von allem was auf ihre großen Kamerasensoren gerät. Oft kommen auch Spektrometer zum Einsatz.

Beispielhaft für eine gezielte Suche nach neuen Asteroiden mit 'klassischen' irdischen Teleskopen soll kurz der '*Catalina Sky Survey*' (CSS) [74] vorgestellt werden. Dies ist ein Zusammenschluss von kooperierenden Teams, die insgesamt drei Teleskope betreiben. An Standorten in Arizona und Australien wird insbesondere nach *NEOs* (*Near-Earth Objects*) gesucht. Im Jahr 2023 war CSS der 'Weltmeister' im Aufspüren dieser potentiell gefährlichen Kleinplaneten – pro Jahr werden mit CSS etwa 1000 (!) Entdeckungen gemacht [74]. Zum Vergleich: Für das Aufspüren der ersten tausend Asteroiden hat man von 1801 bis 1923 gebraucht, in jenem Jahr wurde (1000) *Piazia* entdeckt. Abbildung 11.20 zeigt eines der eingesetzten Optiken, ein *Cassegrain-Teleskop* mit einem Spiegeldurchmesser von 1,5 m.



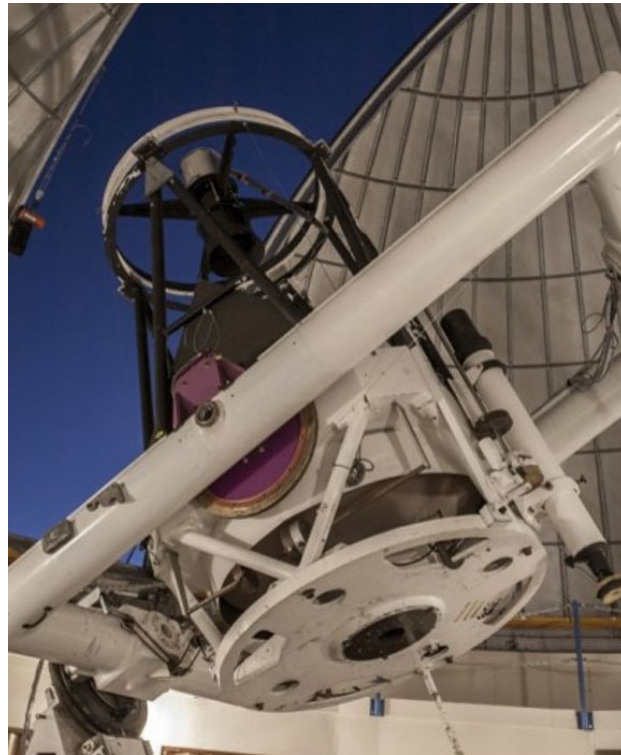


Abbildung 11.20: **Cassegrain-Spiegelteleskop**, das vom **Catalina Sky Survey** zur Asteroidensuche genutzt wird [203] (adaptiert).

Zu den seltenen Funden gehören auch einige von CSS beobachtete Asteroiden, die später auf die Erde aufgeschlagen sind. Einer davon, der nur etwa ein Meter große **2022 WJ<sub>1</sub>**, kollidierte im Jahr 2023 in Kanada mit unserem Heimatplaneten, nur 3,5 Stunden nach der Beobachtung durch ein CSS-Teleskop [202].

Das sehr erfolgreiche **Kepler-Weltraumteleskop** [32] ist ein gutes Beispiel für ein außerhalb der irdischen Lufthülle operierendes Messgerät. Es war in den Jahren 2009 bis 2018 auf der Suche nach Exoplaneten - die man bei einem Transit (siehe Abschnitt 11.5) durch kurzzeitige Abschwächung der Helligkeit des jeweiligen Muttersterns entdecken kann. Insgesamt wurden mehr als 2600 Planeten entdeckt. Das Teleskop ist etwa so groß wie das in Abbildung 11.20 gezeigte. Die digitale CCD-Kamera besteht aus insgesamt 95 Millionen Pixeln und hat ein für astronomische Verhältnisse riesiges Bildfeld von mehr als 12°. Kepler befand sich nicht in einer Erdumlaufbahn, sondern hat die Sonne auf einer erdähnlichen Bahn umrundet – und verbleibt dort auch auf unbestimmte Zeit.

Dieses Teleskop steht exemplarisch für astronomische Observatorien, welche



Messungen an Asteroiden nicht als Hauptziel definiert haben, dies aber gewissermaßen parasitär mit erledigen. So hat Kepler auch hunderte von Asteroiden untersucht. Insbesondere Helligkeiten konnte Kepler sehr genau bestimmen, denn das ist Voraussetzung für das Erkennen von Exoplaneten-Transits.

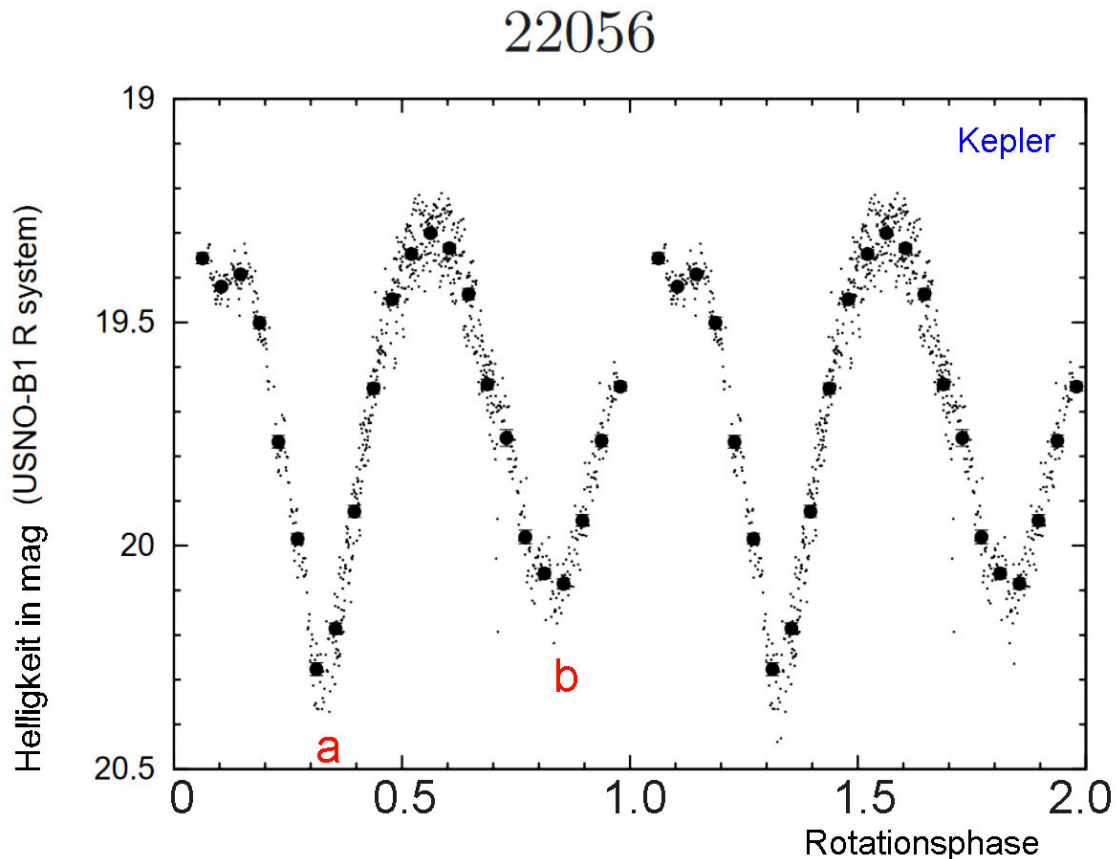


Abbildung 11.21: Lichtkurve für den rotierenden Asteroiden **(22056) 2000 AU<sub>31</sub>**, aufgenommen mit dem **Kepler-Weltraumteleskop** [141] (adaptiert). Es sind zwei Perioden dargestellt. Eine Rotationsphase von 1 entspricht einer Periode, hier 358 Stunden. Kleinere Magnitudenwerte (oben auf der vertikalen Achse) bedeuten größere Helligkeiten!

Abbildung 11.21 zeigt beispielhaft die Lichtkurve des Asteroiden **(22056) 2000 AU<sub>31</sub>**, wie sie mit Kepler gemessen wurde. Er rotiert sehr langsam, die gemessene Periode der Lichtkurve beträgt gut 2 Wochen. Man erkennt ein 'tiefes' (a) und ein weniger ausgeprägtes Minimum (b) in jeder Periode. Die Kurve ähnelt der Lichtkurve von **(250) Bettina**, wie sie in den Abbildungen 11.4 und 11.5 auf den Seiten 93 und 94 gezeigt und interpretiert wird. Da die Hellig-

keitsunterschiede insgesamt aber sehr groß sind, könnte es sich auch um ein Binärsystem handeln: Sind beide Himmelskörper gleichzeitig von der Erde aus zu sehen, weil sie nebeneinander 'stehen' und 'leuchten', so ist die resultierende Gesamthelligkeit maximal. Befindet sich der umlaufende kleinere Begleiter hinter dem größeren Planetoiden – von der Erde aus gesehen, so ergibt sich das Minimum (a). Falls dieser Mond vor dem Asteroiden vorbeifliegt, ist die Lichtabschwächung möglicherweise nicht so stark, etwa weil der Mond eine höhere Albedo hat, dies entspricht dem schwächeren Minimum (b).

## Kapitel 12

### Was können Amateurastronomen messen?

In diesem Kapitel zeigen wir, dass es viele Möglichkeiten für Amateurastronominen und Amateurastronomen gibt, eigene Messungen an Asteroiden durchzuführen. Das ist erstens lehrreich und spannend per se, und zweitens kann man auch echte wissenschaftliche Beiträge leisten.

In den letzten 20-30 Jahren haben grundlegende technische Neuerungen die Amateurastronomie substantiell erleichtert, und die Qualität von Aufnahmen dramatisch verbessert. So werden heute Amateur-Bilder veröffentlicht, die früher nur mit professionellen Teleskopen gemacht werden konnten. Wir leben im 'goldenen Zeitalter' der Amateurastronomie! An moderner technischer Unterstützung ist zu nennen:

- Hochempfindliche Digitalkameras, die sofort das Ergebnis anzeigen können. Die Zahl der Aufnahmen, die man machen kann, ist nahezu unbeschränkt.
- Computer und leistungsfähige Software zur Auswertung der Digitalfotos. Für die Asteroidenforschung sind insbesondere die genaue automatische Positionsbestimmung und die Helligkeitsmessung von Bedeutung.
- Das World Wide Web liefert aktuelle Informationen zu Neuentdeckungen, Bahndaten von Kleinplaneten und Beobachtungshinweise.
- Präzise motorisierte Nachführungen zum Ausgleich der Erdrotation. Diese werden häufig mit einer elektronischen 'Goto'-Steuerung kombiniert. Diese enthält einen Katalog von bekannten Himmelsobjekten, und kann diese direkt ansteuern, oft mit Smartphone-Anbindung. Neue Geräte verfügen auch über einen GPS-Empfänger und erleichtern so die Ausrichtung der Montierung.

Inzwischen gibt es auch immer mehr ‘Komplettsysteme’, die eine genaue Ausrichtung und Nachführung anhand von Sternpositionen auf den Digitalbildern völlig automatisch vornehmen. Mit diesen ‘plug-and-play’-Teleskopen kann man sogar an weltweit koordinierten Asteroiden-Messkampagnen teilnehmen [201].

Dieses Opus kann nur eine Übersicht geben über die zahlreichen Möglichkeiten, wie Amateurastronomen und Amateurastronominnen zur Asteroidenforschung beitragen können. Viel tieferegehende Anleitungen zu eigenen Beobachtungen und Messungen liefert das Buch ‘*Asteroids and Dwarf Planets and How to Observe Them*’ [133]. Das im Jahr 2010 von Roger Dymock veröffentlichte Werk ist natürlich nicht mehr ganz aktuell, aber immer noch die beste Einführung für den anspruchsvollen Amateur.

Voraussetzung für eigene Messungen sind Interesse und viel Geduld, ein geeigneter Beobachtungsort und warme Kleidung . . . Betrachtungen des Himmels mit dem Auge<sup>1</sup> oder einem Feldstecher reichen natürlich nicht aus, man benötigt - in dieser Reihenfolge:

- Eine stabile motorisierte Montierung zum Ausgleich der Erddrehung.
- Ein Refraktor- oder Spiegelteleskop mit mindestens 8 cm (3") bzw. 15 cm (6") großer Öffnung<sup>2</sup>.
- Eine spezielle Astro-Kamera oder eine Spiegelreflexkamera. Digital natürlich.
- Laptop oder PC plus Software zur Auswertung der Bilder.

Die Gesamtkosten für eine solche Ausrüstung liegen bei einigen Tausend Euros. Eventuell kann man auch das Teleskop einer öffentlichen Sternwarte oder eines Astronomievereins (mit)nutzen. In den letzten Jahren gibt es auch immer mehr Angebote zur Mitbenutzung von ‘Remote’-Sternwarten, die in Gegenden mit wenig Lichtverschmutzung aufgestellt sind.

Alternativ kann man auch ganz ohne eigene oder geliehene Ausrüstung zur Asteroidenforschung beitragen. Es gibt ‘citizen science’-Programme, die Aufnahmen und andere Daten bereitstellen. Ein Beispiel ist die International

---

<sup>1</sup>Größere Helligkeitsänderungen können auch mit dem Auge abgeschätzt werden, aber das schränkt die Beobachtungsmöglichkeiten doch sehr ein und führt nicht zu mit Kameras heutzutage leicht zu erreichenden Genauigkeiten.

<sup>2</sup>In der Einstiegsklasse kann man statt eines Linsenteleskop mit einer bestimmten Öffnung auch ein Spiegelteleskop mit doppelter Öffnung bekommen - für das gleiche Geld. Letztere sind aber auch mit Nachteilen verbunden, insbesondere die teilweise Abschattung des Hauptspiegels durch den Fangspiegel ist hier zu nennen.

Astronomical Search Collaboration (IASC), die Himmelfotos und Analyseprogramme zur Verfügung stellt, so dass man selbst 'original astronomical discoveries' machen kann [87] – in diesem Fall einen Asteroiden entdecken, indem man einen sich bewegenden Punkt auf einer Aufnahmeserie identifiziert. Beim 'Active Asteroids'-Projekt soll auf vorgegebenen fotos nach einem möglichen Schweif von Kleinplaneten gesucht werden [54]. Wie in Kapitel 5 ausgeführt, gibt es Zwitter-Objekte die gleichzeitig Asteroiden- und **Kometencharakter** haben. Derartige Himmelskörper sind selten, aber besonders interessant, da sie wahrscheinlich Wasser transportieren, und vor langer Zeit auch die Erde damit versorgt haben könnten.

Auch wenn man nicht zu tief in die Wissenschaft einsteigen will, darf man sich dennoch manchmal zumindest an der Namensgebung von Himmelskörpern beteiligen [126]. Der Name des Asteroiden **(101955) Bennu**, den die Sonde **OSIRIS-REx** besucht hat, wurde erfolgreich von einem Schüler vorgeschlagen, der am 'Name that Asteroid'-Wettbewerb teilgenommen hatte [34]. Der transneptunische Asteroid **(225088) Gonggong** wurde nach einer chinesischen Gottheit benannt [50]. Die Entdecker hatten im Jahr 2019 mehrere Namensvorschläge zur Online-Wahl gestellt. 280 000 Menschen haben sich daran beteiligt! Das letzte Wort hatte natürlich die IAU, die aber den Volkswillen respektiert hat.

## 12.1 Entdeckungen

Der Traum war und ist die eigene Entdeckung - einer neuen Spinnenart, eines Supernova-Ausbruchs oder eines Asteroiden. In der Vergangenheit haben viele Amateurastronomen Asteroiden aufspüren können - denn der Himmel ist weit und die wenigen professionellen Teleskope mit ihren engen Gesichtsfeldern konnten ihre 'Augen' nicht überall gleichzeitig haben. Im Prinzip ist eine solche Entdeckung einfach: Man fotografiert in einer Nacht die gleiche Himmelsregion mehrfach, in Zeitabständen von mindestens einigen Minuten. Bewegt sich einer der hellen Punkte relativ zum stellaren Umfeld, so ist es ein **Planet**, **Komet** oder Asteroid, siehe zum Beispiel Abbildung 10.3 auf Seite 83 im Kapitel 10.

Nachdem in den 1990er Jahren Digitalkameras, die an Teleskope angeschlossen werden konnten, Verbreitung fanden, boomte die Entdeckung von Asteroiden, auch von Amateuren. Unter ihnen ragte **Roy A. Tucker** heraus, der mit Hilfe selbst entwickelter CCD-Kameras etwa 700 bis dahin unbekannte Asteroiden fand [49, 126]. Er verstarb 2021, sein Name lebt aber fort als **(10914) Tucker**. Zum Vergleich: **Max Wolf**, der als einer der ersten Astronomen die

(analoge!) Fotografie einsetzte, entdeckte ‘nur’ 248 Kleinplaneten.

Heute sind Amateur-Entdeckungen selten geworden: Das innere Sonnensystem ist schon weitgehend ‘abgegrast’ und die Asteroiden, die weit außen ihre Bahnen ziehen, sind zu lichtschwach für kleinere Teleskope. Außerdem gibt es immer mehr professionelle Astronomieprojekte, die mit Weitwinkel-Optiken große Teile des Himmels gleichzeitig ‘überwachen’ können, wie zum Beispiel das **Sloan Digital Sky Survey (SDSS)** [40]. Nichtsdestotrotz gelingen auch Amateuren noch spektakuläre Entdeckungen, im Jahr 2017 wurde sogar ein Asteroidenmond gefunden [162].

## 12.2 Positionen

Hat man - typischerweise an mehreren Abenden - einen Asteroiden und sein Sternumfeld jeweils mehrfach fotografiert und die zugehörigen Zeiten registriert, so kann man die Position des Himmelskörpers – beschrieben durch zwei Winkelkoordinaten – messen und daraus auch dessen Bahn bestimmen.

Für die Fotos verwendet man ein Teleskop auf einer computergesteuerten Montierung mit Nachführung, wie in Unterkapitel 10.2 dargestellt. Die Ausrichtung dieses Fernrohrs auf den Asteroiden gelingt, wenn man dessen (ungefähre) äquatoriale Koordinaten für das Beobachtungszeitfenster mit einem Programm wie Stellarium [140] vorher abgefragt hat. Die ‘Goto’-Steuerung der Montierung erlaubt, diese Koordinaten per Handsteuerung einzutippen. Fokussiert wird mit Hilfe eines hellen Sternes in der Umgebung des zu vermessenden Himmelskörpers. Um sicherzustellen, dass der Asteroid wirklich im Bildfeld der an das Teleskop angeschlossenen Kamera ist (und im Beobachtungszeitfenster nicht wieder ‘entwischt’), vergleicht man zwei Fotos, die im Abstand von mehreren Minuten aufgenommen wurden. Es sollte sich ein Pünktchen finden lassen, das sich etwas relativ zu den Umgebungssternen bewegt hat. . . In Abschnitt 10.2 finden sich Beispiele für solche Asteroidenfotos. Pro Abend/Nacht sollte man mindestens zehn Aufnahmen machen - um die Bewegung klar zu erkennen, um schlechte Fotos (starkes Seeing, Wolke) aussortieren zu können, und um eventuell ‘Ausreißer’ bei den Koordinatenmessungen erkennen zu können.

Die Messung der äquatorialen Winkelkoordinaten des Asteroiden sollte man anhand eines eigenen Fotos einmal selbst versuchen, mit Lineal und Taschenrechner und Sternkoordinaten aus Stellarium, damit man das in Abschnitt 11.1 vorgestellte ‘plate solving’ wirklich versteht. Für die genaue, automatische und schnelle Koordinatenmessung gibt es Programme wie Astrometrica [190] oder Tycho [187]. Diese vergleichen nicht nur die Koordinaten

des Asteroiden und der ‘benachbarten’ Sterne, sondern auch die Lichtintensitäten, erlauben also auch eine Messung der scheinbaren Helligkeit des Asteroiden in Magnituden.

Die in Kapitel 9 auf Seite 69 dargestellte Abbildung 9.3 zeigt wie Astrometrica benutzt werden kann, um einen Asteroiden im Foto zu identifizieren und seine Position zu bestimmen, relativ zu ‘benachbarten’ Referenzsternen. In diesem Beispiel wurde der **Zwergplanet (136472) Makemake** ‘wiederentdeckt’.

Abbildung 12.1 zeigt am Beispiel des Asteroiden **(488453) 1994 XD**, wie der ‘output’ (eine Text-Datei) von Astrometrica aussieht. Dieses 80-spaltige For-

```

COD K85
CON T. Hebbeker, B-4721 Neu-Moresnet [thomas@hebbeker.info]
OBS T. Hebbeker
MEA T. Hebbeker
TEL Celestron C8 Edge HD + CCD
ACK MPCReport file updated 2023.06.15 19:40:26
AC2 thomas@hebbeker.info
NET Gaia DR2
m8453          C2023 06 05.92224 17 33 17.37 -01 36 26.9    K85
m8453          C2023 06 05.92641 17 33 18.18 -01 35 52.7    K85
m8453          C2023 06 08.94798 17 53 38.61 +10 48 25.1    K85
m8453          C2023 06 08.96881 17 53 52.97 +10 57 34.9    K85
----- end -----

```

Abbildung 12.1: Beispiel-Ausgabe des Astrometrie-Programms Astrometrica am Beispiel des Asteroiden **(488453) 1994 XD**, hier abgekürzt als ‘m8453’. Das ‘m’ steht für ‘48’. Das Format wurde leicht modifiziert um überlange Zeilen zu vermeiden. Weitere Erläuterungen zu diesem MPC1992-Format findet man im Text.

mat wurde vom **Minor Planet Center (MPC)** [76] definiert, man nennt es MPC1992. Die ersten Zeilen sagen etwas über den Beobachtungsort, den Astronomen und die technische Ausrüstung. K85 ist der vom MPC mir zugeteilte ‘observatory code’, zu dem die geographische Länge und Breite in einer Datenbank hinterlegt sind [43]. Das bedeutet nicht, dass man an diesem Ort eine eigene Sternwarte betreibt, sondern nur, dass die Messungen an dieser Position aufgenommen wurden. Die achte Zeile besagt, dass die Koordinaten und weitere Parameter der Referenzsterne aus dem zweiten Katalog der Astrometrie-Sonde **Gaia** [47] entnommen wurden.



```

# version=2017
# observatory
! mpcCode K85
! name Kelmi's
# submitter
! name T. Hebbeker
# observers
! name T. Hebbeker
# measurers
! name T. Hebbeker
# telescope
! design Celestron C8 Edge HD + Canon 70D
! aperture 0.2
! fRatio 10.0
# detector CCD
# software
! astrometry Astrometrica 4.13.0.451
! photometry Astrometrica 4.13.0.451
permID provID trkSub imode|stn|obsTime|ra|dec|rmsRA|rmsDec|astCat|mag|rmsMag|band|photCat|photAp|logSNR|seeing|exp|rmsFit|nStars
1998 HH49 CCD K85 2023-10-21T18:09:50Z 12.195787 +21.530525 0.420|0.376 Gata2|14.6 0.17 G Gata2|6.6 1.74 5.0 32|0.33 14
1998 HH49 CCD K85 2023-10-21T18:11:23Z 12.197240 +21.532436 0.312|0.330 Gata2|14.6 0.17 G Gata2|6.6 1.78 4.9 32|0.24 12
1998 HH49 CCD K85 2023-10-21T19:15:06Z 12.269278 +21.603369 0.532|0.547 Gata2|15.0 0.16 G Gata2|6.6 1.59 5.7 32|0.29 18
1998 HH49 CCD K85 2023-10-21T19:25:06Z 12.280284 +21.614578 0.376|0.385 Gata2|14.7 0.18 G Gata2|6.6 1.76 1.6 32|0.32 11
1998 HH49 CCD K85 2023-10-21T19:33:45Z 12.289600 +21.624004 0.285|0.276 Gata2|14.7 0.16 G Gata2|6.6 1.79 5.9 32|0.11 14
1998 HH49 CCD K85 2023-10-21T19:39:54Z 12.296452 +21.630458 0.351|0.327 Gata2|15.0 0.15 G Gata2|6.6 1.67 6.2 32|0.17 14

```

Abbildung 12.2: Beispiel-Ausgabe des Astrometrie-Programms Astrometrica im Format ADES-PSV, am Beispiel des Asteroiden 1998 H<sub>49</sub>. Neu im Vergleich zum MPC1992-Format – wie in Abbildung 12.1 gezeigt – ist die Angabe der Messunsicherheiten in den beiden äquatorialen Koordinaten Rektaszension (ra) und Deklination (dec), in Bogensekunden, siehe Spalten ‘rmsRA’ und ‘rmsDEC’. Die beiden letzten Spalten, ‘notes’ und ‘remarks’ sind aus Platzgründen nicht gezeigt.

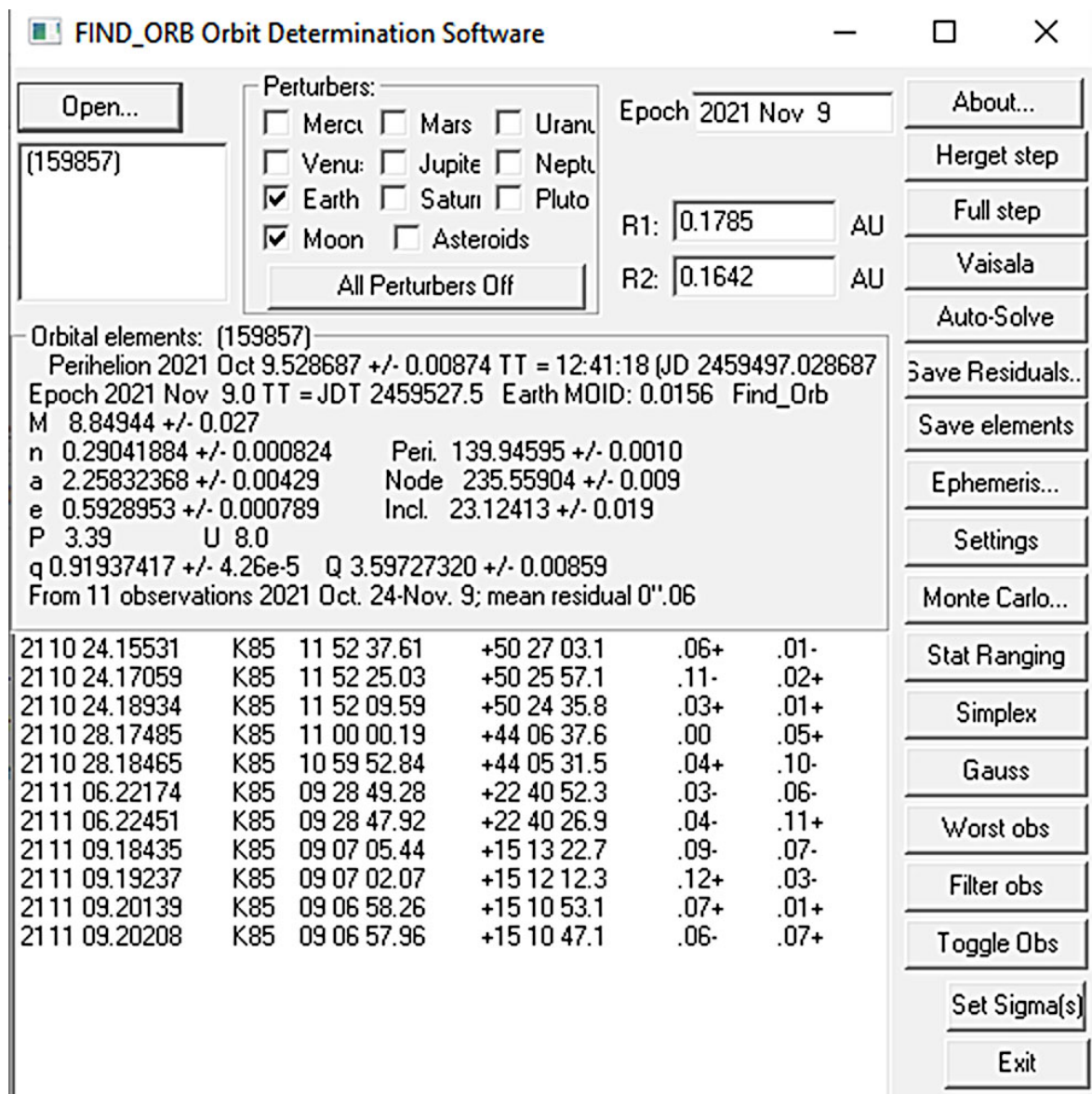


Abbildung 12.3: Benutzer-Interface einer älteren Version des Programms Find\_Orb, gezeigt am Beispiel des Asteroiden (159857) 2004 LJ<sub>1</sub>. Weitere Erläuterungen findet man im Text.

Die folgenden Zeilen enthalten jeweils eine Messung: Zuerst wird der Asteroid bezeichnet<sup>3</sup>, dann kommen Datum und Uhrzeit (Universelle Zeit UT). Der Messzeitpunkt wird durch Bruchteile des Tages angegeben, 06 05.92224 be-

<sup>3</sup>Hier lautet die offizielle Abkürzung m8453, das m steht für die Zahl 48. Es handelt sich also um den Asteroiden (488452).

deutet 5. Juni 0 Uhr plus 92,224 % von 24 Stunden, also 22:08:02 Uhr. Es folgt die **Rektaszension** in Stunden, Minuten und Sekunden, und schließlich die **Deklination**, in Grad, Bogenminuten und Bogensekunden. Helligkeitsinformationen (hier 14 - 15 mag) sind in diesem Beispiel nicht enthalten.

Diese Daten kann man zum **MPC** hochladen – wenn man einen observatory code besitzt – und so zum Wissen über die Asteroiden beitragen. Das MPC berechnet aus allen gesammelten Messdaten die **Orbits** und aktualisiert diese laufend, wenn weitere Messwerte hinzukommen. Genaue Bahnbestimmungen, insbesondere von potentiell gefährlichen '**Erdbahnkreuzern**', werden erst möglich, wenn es viele präzise Messdaten gibt.

Inzwischen gibt es ein neueres Datenformat für Positions- und Helligkeitsmessungen von Himmelskörpern, ADES = Astrometry Data Exchange Standard. Und davon gibt es auch noch zwei äquivalente Repräsentationen, einmal als XML-Datei (Extensible Markup Language) und auch als PSV-File (Pipe Separated Values). Abbildung 12.2 zeigt ein Beispiel für die PSV-Version. ADES-Dateien enthalten mehr Informationen als die traditionellen MPC1992-Textdateien, insbesondere sind auch die Messunsicherheiten aufgeführt.

Man kann auch selbst aus den eigenen Daten die Bahn eines Asteroiden bestimmen. Dazu eignet sich das Programm Find\_Orb [119], welches die Daten insbesondere in dem in Abbildung 12.1 gezeigten MPC-Format direkt einlesen kann. Einen 'Screenshot' zeigt Abbildung 12.3.

Alle Details können hier nicht diskutiert werden. Das Wichtigste: Im unteren Bilddrittel sind die Beobachtungsdaten für den Asteroiden **(159857) 2004 LJ<sub>1</sub>** zu sehen: Datum/Zeit, Observatory Code, Rektaszension, Deklination und dann die Abweichungen des angepassten Orbits von den Messdaten, in der Einheit Bogensekunde. Mit nur 11 Beobachtungen, die an vier Tagen gemacht wurden, lässt sich die Asteroidenbahn schon recht genau bestimmen, wie man an den in der Mitte angegebenen Parametern ablesen kann. So beträgt die **große Halbachse**  $a = (2,258 \pm 0,004)$  AE, der Himmelskörper bewegt sich also im Asteroidengürtel. Die **Exzentrizität** ist mit  $\epsilon = 0,593$  recht groß.

Man kann mit dem Programm Find\_Orb auch – basierend auf den Eingangsdaten – in die Zukunft extrapolieren, also mit den angepassten Bahnelementen zukünftige Positionen des Asteroiden vorhersagen, das sind die '**Ephemeriden**'.

Abbildung 12.4 zeigt eine von mir gemessene Asteroidenbahn, projiziert auf die Ekliptik. Ebenfalls eingezeichnet sind die Bahnen von Erde und Mars; die Sonne steht im Zentrum. Als der Asteroid **(85275) 1994 LY** der Erde im Jahr 2020 recht nahekam, habe ich die Position über einige Wochen hinweg gemessen und aus diesen Daten die Bahn berechnet, die in der Abbildung

blau eingezeichnet ist. Die roten Punkte entsprechen den Messwerten, allerdings kennt man die Entfernung des Asteroiden von der Sonne erst, wenn man die **Bahnelemente** bestimmt hat. Der Wert der **Exzentrizität** ist mit 0,44 überdurchschnittlich hoch, die **große Halbachse** ergibt sich zu 1,89 AE.

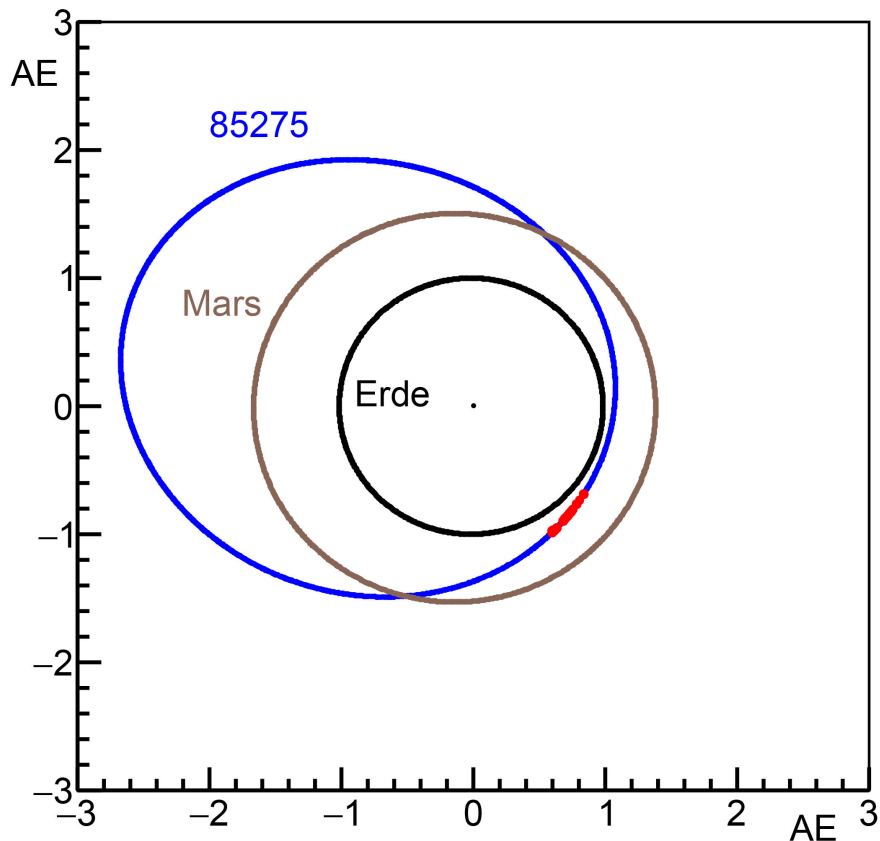


Abbildung 12.4: Gemessene Bahn des Asteroiden (85275) 1994 LY, projiziert auf die Erdbahnebene um die Sonne.

### 12.3 Abstände

Die Winkelkoordinaten von leuchtenden Himmelsobjekten, also die Richtung, aus der die Strahlung kommt, kann man vergleichsweise einfach bestimmen, siehe Kapitel 11 und 12.2. *Direkte* Entfernungsmessungen sind dagegen eine große Herausforderung in der Astronomie. Je nach Größenordnung der Abstände von der Erde werden unterschiedliche Methoden angewandt. Die

Entfernungen der Asteroiden von der Erde sind vergleichsweise gering im Vergleich zu fernen Himmelsobjekten wie Sternen und Galaxien. Deshalb kann man die Distanz  $d$  zu einem Kleinplaneten zu einer bestimmten Zeit mit der **Parallaxenmethode** messen. Dabei nutzt man aus, dass die Position des Asteroiden - relativ zu den sehr weit entfernten Fixsternen - von verschiedenen Beobachtungsorten auf der Erdoberfläche leicht verschoben erscheint, wie Abb. 12.5 erläutert.

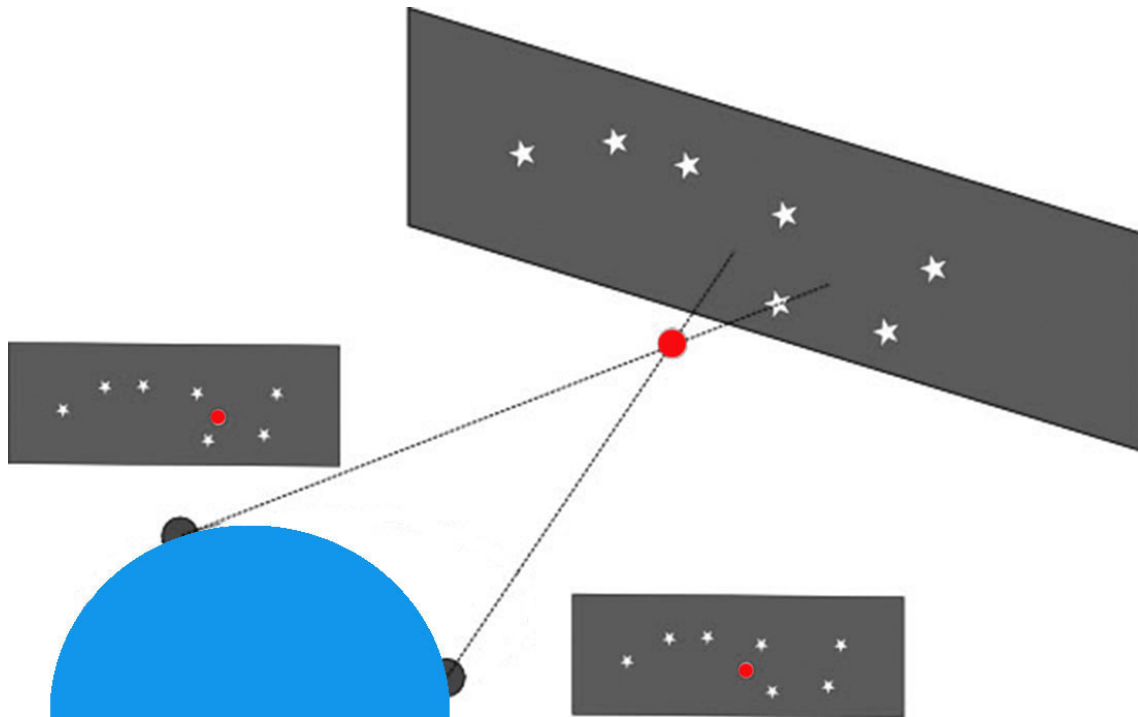


Abbildung 12.5: **Parallaxen-Effekt** [98]. Der Asteroid ist rot eingezeichnet.

Historisch bedeutsam ist die Messung der Entfernung des **Asteroiden (433) Eros** [3] von der Erde, ganz zu Anfang des 20. Jahrhunderts, bei der man diese **Parallaxenmethode** zum ersten Mal auf einen Asteroiden angewandt hat. Wie Abbildung 12.5 zeigt, ist die für zwei Beobachtungsorte auf der Erde beobachtbare Differenz der Winkelkoordinaten vergleichsweise groß, wenn diese Orte weit auseinander liegen, und wenn der Asteroid der Erde nahekommt. Und je größer und deutlicher der Parallaxeneffekt ist, desto genauer wird die Bestimmung der Entfernung zum Asteroiden.

Im Jahr 2020 haben zwei Amateurastronomen, **Jan Hattenbach**<sup>4</sup> und ich, eine solche Entfernungsbestimmung versucht [200]. Dazu haben wir den Asteroi-

<sup>4</sup>ein in der Astro-Szene bekannter Wissenschaftsjournalist

den (85275) 1994 LY ausgesucht, der sich im Sommer 2020 der Erde auf gut ein Zehntel des Abstandes Erde-Sonne (die **Astronomische Einheit, AE**) angenähert hat. Die Bahnbestimmung und der resultierende **Orbit** sind in Unterkapitel 12.2 beschrieben.

Der genaue Beobachtungszeitpunkt war 21:25 Uhr **Universalzeit (UT)** am 28. Juli 2020. Die entsprechende mitteleuropäische Sommerzeit ist 2 Stunden 'weiter' fortgeschritten, also war es 23:25 Uhr in Deutschland. Natürlich haben beide Beobachter gleichzeitig fotografiert/gemessen! Jan Hattenbach hat vom Ort Puntagorda auf der kanarischen Insel La Palma aus den Asteroiden und seine Umgebung fotografiert. Mein Standort war Neu-Moresnet in Belgien, nahe der deutschen Grenze bei Aachen. Der Abstand zwischen den beiden Beobachtern betrug 3100 km. Wir haben beide für Amateurastronomen typische Spiegelteleskope mit Durchmessern von 11,4 und 20 cm eingesetzt, die mit einer Digitalkamera gekoppelt waren. Motorisierte Montierungen haben die Erddrehung ausgeglichen, so dass mehrere Sekunden lang belichtet werden konnte.

Anschließend haben wir die digitalen Fotos ausgetauscht, übereinandergelegt und invertiert, so dass der Himmel hell und die Sterne und der Asteroid dunkel wiedergegeben werden. Abbildung 12.6 zeigt das Ergebnis. Der Asteroid erscheint als Punkt. Man erkennt deutlich, dass die mit dickeren Pfeilen (grün und rot) gekennzeichneten Asteroidenpositionen voneinander abweichen. Eine quantitative Auswertung – unter Berücksichtigung insbesondere des genauen Abstandes zwischen den beiden Beobachtern und des Maßstabes der Abbildung 12.6 – liefert:

$$d = 30,4 \pm 1,0 \text{ Million km}$$

für den Abstand Erde - Asteroid (85275) 1994 LY am 28. Juli 2020.

## 12.4 Helligkeiten und Lichtkurven

Im Unterkapitel 11.3 wurde dieses Thema schon allgemein behandelt. Amateure können zur Messung von **Lichtkurven** wichtige Beiträge liefern. Photometrie, also die quantitative Messung von Helligkeiten und das Erstellen von Lichtkurven, praktizieren nur relativ wenige Amateurastronomen, obwohl viele die nötige Ausrüstung besitzen. Um die eigenen Messergebnisse mit denen anderer Observatorien vergleichen zu können, muss man spektrale Filter einsetzen, also einen der in der Astronomie gebräuchlichen Farbbereiche auswählen. Meist wählt man 'V' für 'Visible'; diese Filter besitzen die höchste Transparenz um die 'grüne' Wellenlänge von 550 nm herum.



Anfänger bekommen Unterstützung zum Beispiel von der BAV – der bundesdeutschen Arbeitsgemeinschaft für Veränderliche Sterne [82]. Die auf der Webseite und in Büchern angebotenen Tutorials und Tipps sind zwar hauptsächlich für Sternbeobachtungen gedacht, lassen sich aber natürlich auch auf Messungen an Asteroiden anwenden. Eine weitere Informationsquelle ist die Webseite ‘A Guide to Minor Planet Photometry’ [81]. Eine Datenbank für Asteroiden-Lichtkurven gibt es auch, die Asteroid Lightcurve Photometry Database (ALCDEF) [205]. Hier kann man eigene Beobachtungsdaten hochladen.

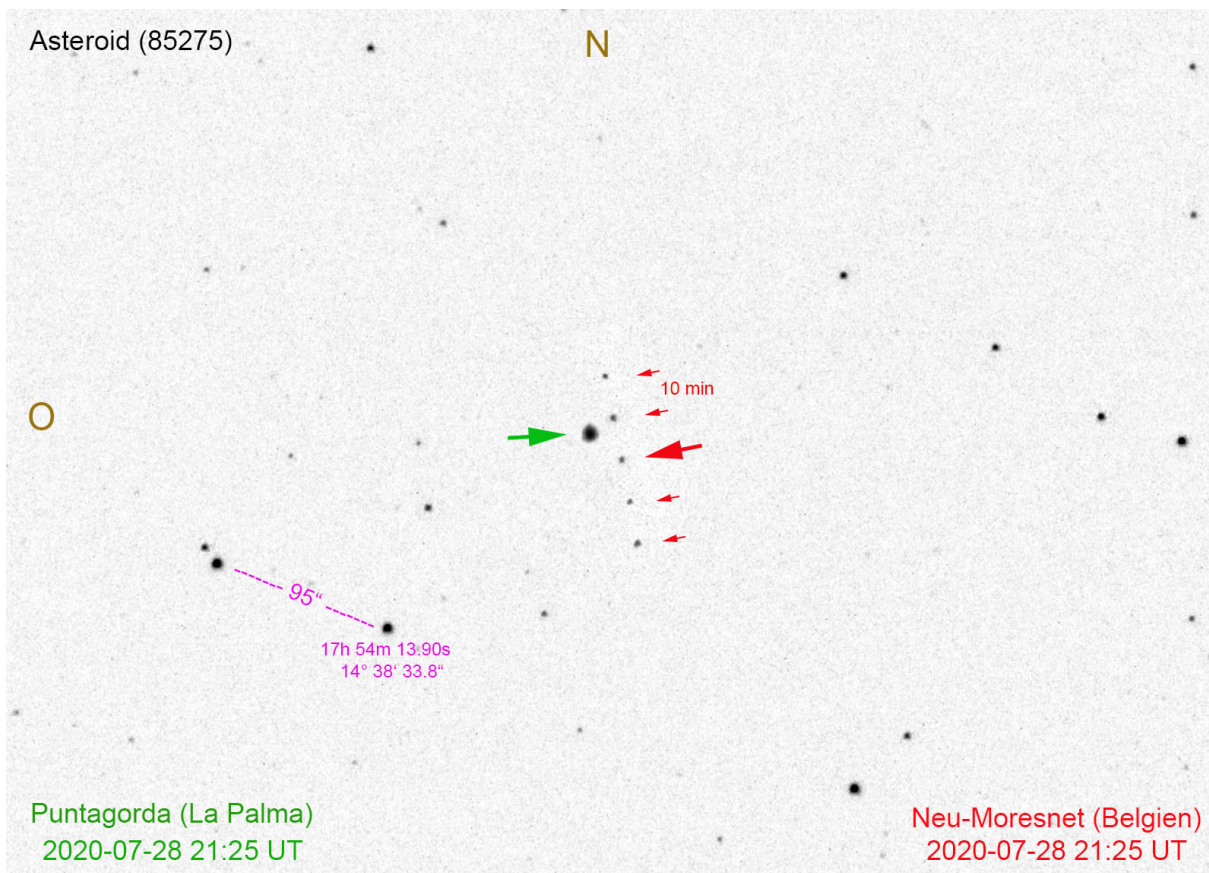


Abbildung 12.6: Gleichzeitige Beobachtung des Asteroiden (85275) 1994 LY von Puntagorda und von Neu-Moresnet aus [200]. Die 5 rot markierten Messpunkte wurden an diesem Tag von Belgien aus im Zeitabstand von 10 Minuten aufgenommen. Überlagert ist ein Asteroidenbild aus La Palma, grün markiert. Der dicke rote Pfeil entspricht zeitlich der grünen Spitze. Zwei Sterne links der Bildmitte dienen als Maßstab zur Winkelkalibration.



## 12.5 Spektren

An dieser Stelle bewegen wir uns in Richtung professionelle Astronomie. Komplexe Spektrographen wollen wir hier nicht besprechen, aber ein vergleichsweise einfaches Gitter, das unter dem Namen 'Star Analyser' [173] vertrieben wird und ähnlich wie ein Farbfilter vor Okular oder Kamera an ein Teleskop angeschlossen werden kann, siehe Abbildung 12.7.



Abbildung 12.7: Durchlass-Gitter-Spektrograph 'Star Analyser 100' [173]. Foto vom Autor.

Für den hellen Stern  $\delta$  Virginis im Sternbild Jungfrau zeigt Abbildung 12.8 ein mit dem Star Analyser erhaltenes Foto. Es wurden ein Refraktor und eine digitale Spiegelreflexkamera benutzt.

Will man die Star-Analyser-Methode auf Asteroiden anwenden, wird es allerdings schon schwieriger, da diese ja deutlich lichtschwächer sind. Es muss aber genug Helligkeit vorhanden sein, um die langgestreckte Region auf dem Foto, über die sich das Licht verteilt, hinreichend auszuleuchten. Mit größeren **Teleskopen** ist es aber schon gelungen, helle Asteroiden mit einem Transmissionsgitter wie dem Star-Analyser zu spektroskopieren, insbesondere für **(1) Ceres** [123]. Für den gut ausgerüsteten Amateur sind die helleren Asteroiden spektroskopisch also durchaus zugänglich. Das in Abbildung 12.8 gezeigte Foto mit der Intensitätsverteilung des gebeugten Lichtes kann man mit speziellen Programmen auch quantitativ auswerten.



Abbildung 12.8: Spektrum des Sterns  $\delta$  Virginis, mit dem Star-Analyser 100 aufgenommen. Auf dem Foto sieht man links den Stern selbst, rechts davon das zugehörige Spektrum. Man erkennt die Regenbogenfarben, und man kann auch ein paar dunklere Stellen, Absorptionslinien entsprechend, zumindest erahnen. Andere Sterne sind nicht zu sehen, da sie deutlich lichtschwächer sind.

## 12.6 Sternbedeckungen

Die in Kapitel 11.4 beschriebenen Methoden können auch von Amateuren angewandt werden. Exzellente Resultate sind allerdings nur bei genauer Zeiterfassung möglich, da eine Sternbedeckung durch einen Asteroiden nur wenige Sekunden dauert. Mit Stoppuhr oder kurzbelichteten Bildserien, die mit einer Digitalkamera aufgenommen werden, kann man Eintritt und Austritt in den Schatten auf jeweils etwa 1 Sekunde genau bestimmen. Besser ist es, die Bedeckung zu filmen und nachher die nur Sekundenbruchteile lang belichteten Einzelbilder zu analysieren. Hierbei sind aber zwei Schwierigkeiten zu meistern:

- Erstens muss der Stern hinreichend hell sein, um ihn filmtechnisch aufzeichnen zu können. Der Asteroid trägt mit dem von ihm reflektierten Sonnenlicht natürlich auch bei, in der Regel ist er aber viel dunkler als der Stern. Falls beide Himmelsobjekte ähnlich hell sind, gibt es nur eine geringe Lichtabschwächung während der Okkultation - umso genauer muss also die Helligkeit bestimmt werden, um Ein- und Austrittsmomente sicher erkennen zu können.

- Zweitens muss jedem Bild des Videos eine genaue Uhrzeit (auf eine zehntel Sekunde genau oder besser) zugeordnet werden. Dazu werden spezielle kommerzielle GPS-basierte 'Video time inserter' angeboten, die die genaue Zeit einblenden. Ich habe eine preiswertere, aber auch weniger elegante Bastel-Lösung gefunden, deren Grundidee im Folgenden in groben Zügen geschildert wird, ohne auf technische Details einzugehen: Als Zeitreferenz dient ein Funkuhrmodul, das bei einer Radio-Frequenz von 77.5 kHz ein exaktes Zeitsignal empfängt, zum Beispiel vom Langwellensender Mainflingen bei Frankfurt. Diese Anlage versorgt in Westeuropa viele Funkuhren mit der Mitteleuropäischen (Sommer-)Zeit. Angegeschlossen wird eine LED, die dann im Sekundentakt kurz blinkt (Ausnahme: wenn volle Minute erreicht ist). Deren Licht wird – eventuell abgeschwächt – mit ins Teleskop geleitet. In der späteren Analyse kann man dann sehen, auf welchen Einzel-Videobildern ein LED-Blitz auftritt, und durch Abzählen der nachfolgenden Aufnahmen (bis zum nächsten LED-Signal) recht genau interpolieren. Wenn also mit 24 Bildern pro Sekunde gefilmt wird, und die Okkultation beginnt 6 Bilder nach dem letzten LED-Sekundensignal, so war der entsprechende Zeitpunkt 0.25 Sekunden später. Diese Methode habe ich angewandt für die in Abbildung 11.8 auf Seite 97 gezeigte Profilmessung des Asteroiden (472) Roma.

Wie schon erwähnt, sind inzwischen astronomische Komplettsysteme auf dem Markt, die aus Montierung, Teleskop, Kamera, GPS-Empfänger, eingebautem Computer und Software bestehen, wie zum Beispiel das 'Unistellar eVscope 2' [62]. Damit kann man auch recht einfach Okkultationen vermessen. Entsprechende Messkampagnen haben sogar schon zu wissenschaftlichen Publikationen beigetragen [126, 144]: Bedeckungen durch den Asteroiden (11351) Leucus wurden vermessen, und so seine Form und Größe bestimmt. Abbildung 12.9 zeigt ein Profilbild; die Darstellung ähnelt der in Kapitel 11.4 beschriebenen und in Abbildung 11.8 auf Seite 97 gezeigten. Die roten Punkte markieren Beginn und Ende der Bedeckung. Der Brocken ist also etwa 40 km groß.

Dieser Kleinplanet ist von besonderem Interesse, da die Raumsonde Lucy in den kommenden Jahren daran vorbeifliegen wird – und man möchte vorher wissen, was da auf einen zukommt.

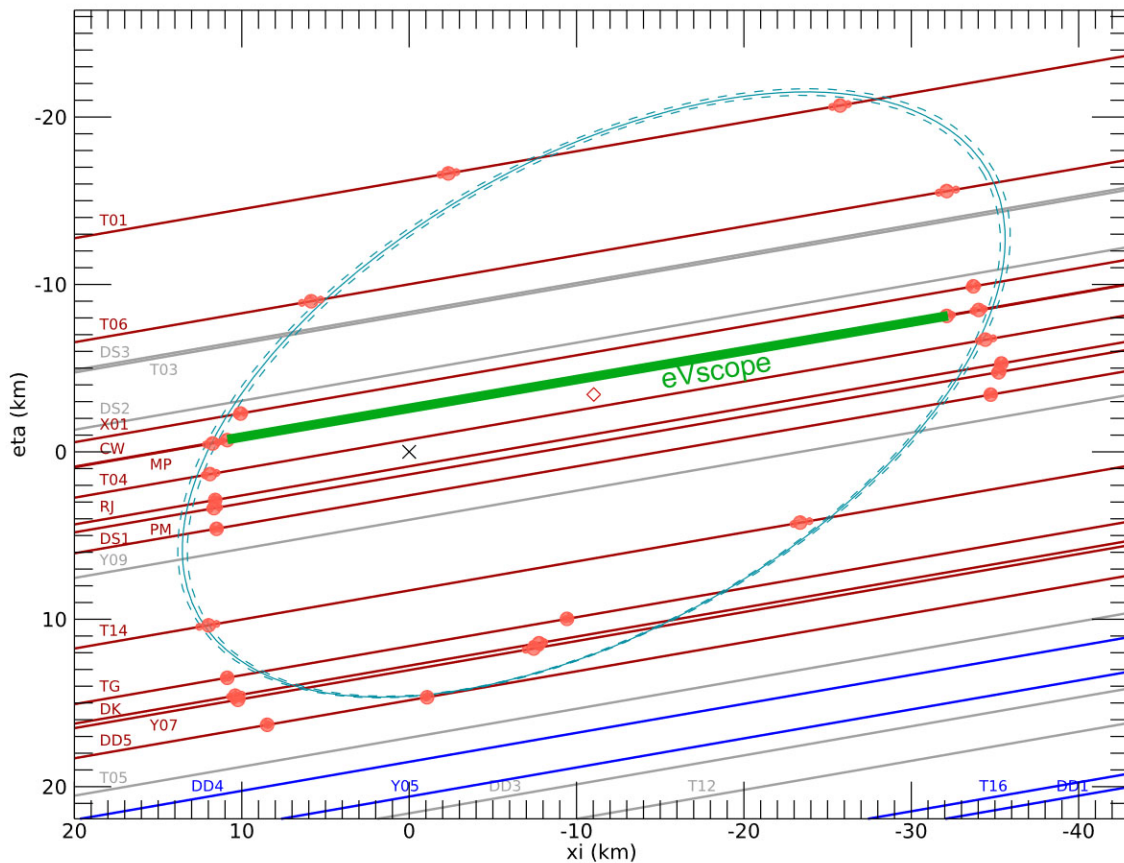


Abbildung 12.9: Profil des Asteroiden (11351) Leucus [144] (adaptiert). Zur Messung der Bedeckung des Sterns durch den Kleinplaneten wurde insbesondere ein Unistellar eVscope (Vorgängermodell vom eVscope 2) eingesetzt (zentrale grüne Linie).

## Kapitel 13

### Welche Sonden haben Asteroiden besucht?

Klar, wenn man hinfliegt, kann man besser sehen und auch viele Messungen durchführen, die einem erdgebundenen Beobachter nicht gelingen können; Beispiele sind detaillierte Untersuchungen der Gestalt oder die Bestimmung des Magnetfeldes des Himmelskörpers. Besonders interessant wird es, wenn die Raumsonde auf dem Asteroiden landet. Das ultimative Ziel ist es, dort Bodenproben zu entnehmen und zur Erde zu transportieren.

Zur Materialprobe, die die Raumsonde **OSIRIS-REx** von **(101955) Bennu** [181] aufgesammelt und zur Erde transportiert hat, werden in Kapitel 14 und Kapitel 15 die Bilder 14.4 (Seite 161) und 15.2 (Seite 161) gezeigt.

#### 13.1 Übersichtstabellen

Die Tabellen 13.1 bis 13.3 sollen zunächst einen Überblick über die bisher durchgeführten oder noch andauernden Erkundungsmissionen zu Asteroiden geben [19, 188]. Besuche von Kometen sind hier nicht aufgeführt, denn die sind zwar auch interessant, aber nicht Gegenstand dieses Buches. Die Einträge sind nach Startdatum chronologisch geordnet. Fehlgeschlagene Unternehmungen wurden weggelassen. Alle bisherigen Missionen waren unbemannt - und das wird sich auf absehbare Zeit auch nicht ändern.

Einige der aufgeführten Missionen sind aus heutiger Sicht weniger spannend, aber von historischem Interesse. Im Jahr 1072 flog die NASA-Sonde **Pioneer-10**, die ja ganz andere Ziele hatte, insbesondere **Jupiter**, am 55 km großen Asteroiden **(307) Nike** vorbei. Das erfolgte allerdings aus Sicht der Sonde unbemerkt, es sind also leider keinerlei Fotos oder Messdaten von Nike aufgezeichnet worden. Dieser schon im Jahr 1891 entdeckte Asteroid war zufällig in der Nähe, als die Raumsonde durch den **Hauptgürtel** flog. Die Bedeutung

Start	Mission	Asteroid	Distanz	Bemerkungen
2.3.1972	Pioneer-10	(307) Nike	8.8 Mill. km	zufälliger Vorbeiflug 1972 keine Daten gesammelt
18.10.1989	Galileo	(961) Gaspra (243) Ida	1600 km 2400 km	zufälliger Vorbeiflug 1991 zufälliger Vorbeiflug 1993 Mond Dactyl entdeckt
17.2.1996	NEAR Shoemaker	(253) Mathilde (433) Eros	1200 km 0 (!)	erstmalig Asteroiden-Umlaufbahn erste Landung einer Sonde auf einem Asteroiden
15.10.1997	Cassini-Huygens	(2685) Masursky	1.5 Mill. km	zufälliger Vorbeiflug 2000
24.10.1998	Deep Space 1	(9969) Braille	28 km	zufälliger Vorbeiflug 1999
7.2.1999	Stardust	(5535) Annefrank	3100 km	zufälliger Vorbeiflug 2002

Tabelle 13.1: Missionen zu Asteroiden [19]. Start vor dem Jahr 2000. Die 'Distanz' ist der kleinste erreichte Abstand zur Asteroidenoberfläche.

Start	Mission	Asteroid	Distanz	Probe	Bemerkungen
9.5.2003	Hayabusa	(25143) Itokawa	Landung	13.6.2010	erster Probentransport Lander MINERVA verfehlte Itokawa
2.3.2004	Rosetta	(2867) Steins (21) Lutetia	800 km 3200 km	- -	Vorbeiflug 2008 Vorbeiflug 2010 auch: Komet 67P/Churyumov-Gerasimenko
19.1.2006	New Horizons	(132524) APL (134340) Pluto (486958) Arrokoth	102000 km 12500 km 3500 km	- - -	Vorbeiflug 2006 2015, auch dessen Monde Vorbeiflug 2019 Beobachtung weiterer Asteroiden aus großen Abständen
27.9.2007	Dawn	(4) Vesta Ceres	210 km 50 km	- -	Umlaufbahn um Vesta Umlaufbahn um Ceres
1.10.2010	Change'e-2	(4179) Toutatis	3.2 km	-	Vorbeiflug 2012

Tabelle 13.2: Missionen zu Asteroiden [19]. Start zwischen 2000 und 2010. Die 'Distanz' ist der kleinste erreichte Abstand zur Asteroidenoberfläche. 'Probe' bezieht sich auf den Transport von Bodenproben zur Erde. Angegeben ist das Ankunftsdatum auf der Erde.



Start	Mission	Asteroid	Distanz	Probe	Bemerkungen
3.12.2014	Hayabusa2	(162173) Ryugu	0 (!)	6.12.2020	Probensammlung, Umlaufbahn mehrere Lander / Rover Impaktor geplant für 2026 geplant für 2031
8.9.2016	OSIRIS-REx	(101955) Bennu	0 (!)	24.9.2023	Probenentnahme, Umlaufbahn
Anschlussmission	OSIRIS-APEX	(99942) Apophis		-	Umlaufbahn geplant 2029
16.10.2021	Lucy	(152830) Dinkinesh (52246) Donaldjohanson mehrere Asteroiden (617) Patroclus	450 km	- - - -	2023, 2 Monde entdeckt geplant 2025 geplant 2027-2028 geplant 2033
24.11.2021	DART	(65803) Didymos	57 km (LICIACube)	-	erste gezielte Ablenkung des Mondes Dimorphos durch Impaktor, 2022
13.10.2023	Psyche	(16) Psyche		-	geplant 2029

Tabelle 13.3: Missionen zu Asteroiden [19]. Start zwischen 2010 und 2023. Die 'Distanz' ist der kleinste erreichte Abstand zur Asteroidenoberfläche. 'Probe' bezieht sich auf den Transport von Bodenproben zur Erde. Angegeben ist das Ankunftsdatum auf der Erde.

der Pioneer-10-Mission bestand darin, dass zum ersten Mal überhaupt eine menschengemachte Raumsonde an einem Asteroiden vorbeiflog. Sicher gab es auch Vorbeiflüge an vielen anderen kleineren Asteroiden, die aber keinerlei Aufmerksamkeit erregt haben. Die kleinste Distanz zwischen Pioneer-10 und Nike war mit 8.8 Millionen km sehr groß - manche Asteroiden fliegen in kleinerem Abstand an der Erde vorbei und können somit von 'hier' aus gut abgelichtet werden - allerdings hat man dafür wenig Zeit, denn der Vorbeiflug dauert nur Stunden oder Tage.

Der am weitesten entfernte Asteroid, der bisher 'besucht' wurde, ist das **Kuiper-Belt-Objekt (486958) Arrokoth**. Die Raumsonde **New Horizons** ist 2019 an diesem Kleinplaneten vorbeigeflogen, der Abstand zur Sonne betrug dabei etwa 44 AU, die minimale Distanz zum Asteroiden 3500 km. So entstand das in Abbildung 13.1 gezeigte beeindruckende Bild des hantelförmigen Kleinplaneten. Entdeckt worden war Arrokoth erst im Jahr 2014, mit Hilfe des **Hubble-Weltraumteleskops**, bei einer gezielten Suche nach geeigneten Zielen für die Raumsonde New Horizons, die schon seit 2006 durchs Sonnensystem reist!

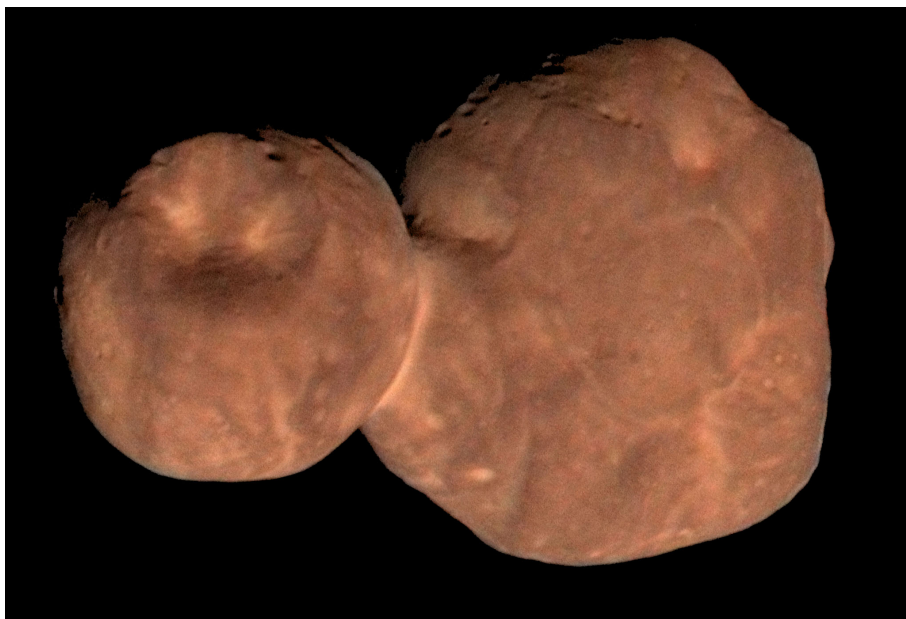


Abbildung 13.1: Asteroid **(486958) Arrokoth**, im Jahr 2019 aufgenommen von der Raumsonde **New Horizons** [86].

Drei der abenteuerlichen Missionen werden wir im Folgenden etwas näher beleuchten: icNEAR Shoemaker, **Hayabusa2** und **DART**.

## 13.2 Die Erkundung von (433) Eros

Diese schon mehr als ein Vierteljahrhundert zurückliegende NASA-Mission [26, 151] war sehr erfolgreich: zum ersten Mal gelang es, eine künstliche Sonde in eine Umlaufbahn um einen Asteroiden – in diesem Fall (253) *Mathilde* – zu bringen. Und auch die erste Landung auf einem Kleinplaneten – (433) *Eros* – gelang, und zwar besser als eigentlich vorgesehen.

*NEAR Shoemaker* war die erste gezielte Asteroiden-Erkundungsmission. ‘NEAR’ steht für ‘Near-Earth Asteroid Rendezvous’. Der später hinzugefügte Zusatz ‘Shoemaker’ ehrt den Geologen und Astronomen *Eugene Shoemaker*, der der Öffentlichkeit durch die (Mit-)Entdeckung des Kometen Shoemaker-Levy-9 bekannt wurde, welcher im Jahr 1994 spektakulär mit Jupiter kollidierte.

Der Kleinplanet (433) *Eros*, das Hauptziel der Mission, wurde schon 1898 entdeckt. Er gehört zu den erdnahen Asteroiden vom Typ *Amor* (siehe Kapitel 19). Es war die erste Detektion eines Kleinplaneten, der die Mars-Bahn kreuzt. Der Gesteins-Asteroid *Eros* nähert sich der Erde auf 22 Millionen km an, ist also relativ leicht zu erreichen. Die Bahn dieses nach dem griechischen Gott der Liebe benannten Asteroiden war bei der Planung der NEAR-Mission natürlich schon gut vermessen. Auch andere Parameter wie Größe, Masse und Rotationsdauer (um die eigene Achse) waren zumindest näherungsweise bekannt.

Am 17.2.1996 wurde die 800 kg schwere Sonde mit einer Delta-II-Trägerrakete von Cape Canaveral aus gestartet. Nach dem Rendezvous mit *Mathilde* im Sommer 1997 erreichte NEAR die Umlaufbahn um *Eros* am Valentinstag 2000, also am 14. Februar. Um die dazu erforderliche Geschwindigkeit zu bekommen, wurde mit einem Swingby-Manöver in Erdnähe deren Gravitationskraft ausgenutzt, um NEAR in Richtung *Eros* zu ‘schleudern’. Die Ankunft hat mit einer einjährigen Verspätung stattgefunden, da die ersten Lenk-Operationen durch Feuern der Triebwerke misslangen, so dass fast der gesamte Treibstoff aufgebraucht wurde - beinahe wäre die Mission gescheitert!

*Eros* wurde zwölf Monate von NEAR aus verschiedenen Umlaufbahnen heraus fotografiert und vermessen. Der kleinste Abstand zur *Eros*-Oberfläche betrug dabei knapp 20 km. Abbildung 13.2 zeigt das Ergebnis der fotografischen Erforschung. Ein solches Bild kann man von der Erde aus auch mit den besten Teleskopen nicht aufnehmen. Es zeigt die Form und die Oberflächenstruktur, mehrere Krater sind klar zu erkennen.

Beim Landemanöver am 12.2.2001 hatte die NASA sehr viel Glück. Eigentlich sollte die Sonde lediglich auf dem Asteroiden ‘entsorgt’ werden. Aber NEAR überstand das Aufsetzen nahezu unbeschadet, und konnte noch bis zum 28. Februar Daten zur Erde senden, dann brach der Kontakt ab, da die Solarzellen

in den Schatten des sich drehenden Asteroiden gerieten und daher praktisch kein Licht mehr empfangen.



Abbildung 13.2: Dieses Mosaik aus sechs Fotos der **NEAR Shoemaker-Sonde** zeigt die unregelmäßige Gestalt des Asteroiden **(433) Eros** [23]. Die Abmessungen betragen 33 km x 13 km x 13 km.

### **13.3 Hayabusa2 sammelt Asteroidengestein**

Schon der japanischen Sonde **Hayabusa** (heute würde man sagen Hayabusa1) war es gelungen, Asteroidenmaterial zur Erde zu bringen. Allerdings waren es nur etwa 1 Gramm, während die hier vorzustellende Nachfolgemission Hayabusa2 [25] immerhin 5.4 Gramm zur Erde transportierte. Hayabusa

steht für 'Wanderfalke'. Beide Asteroidenmissionen wurden (bzw. werden) von der japanischen Weltraumagentur JAXA durchgeführt. **Hayabusa2** ist ein sehr komplexes Projekt, die 'Muttersonde' hat mehrere Lander (Landesonden) und Rover (Roboter-Fahrzeuge) auf den Asteroiden **(162173) Ryugu** gebracht und auch selbst kurz den Boden berührt um Material zu sammeln. Die meisten Teile der Missionen waren erfolgreich, über diese wird im Folgenden berichtet werden.

Zunächst ein paar Worte zum Ziel der Mission: Der Gesteins-Asteroid war erst 1999 entdeckt worden [21]. Er eignet sich für Raummissionen, da er der Erde recht nahekommt, der minimale Abstand beträgt rund 100 000 km. Er ist etwa 900 m groß, nicht kugelförmig aber doch deutlich runder als **(433) Eros**. Der Asteroid ist  $M = 4.5 \cdot 10^{11}$  kg 'schwer'. Der Name Ryugu bezieht sich übrigens auf einen Drachengott aus einer japanischen Sage. Mit Hilfe des Newtonschen Gravitationsgesetzes kann man berechnen, welche Beschleunigung  $g_A$  ein Objekt der Masse  $m$  erfährt, das aus einer Position knapp oberhalb des Asteroiden auf diesen fallen gelassen wird:

$$g_A = \frac{F}{m} = \frac{1}{m} \cdot G_N \cdot \frac{M \cdot m}{r_A^2} = G_N \cdot \frac{M}{r_A^2} = 5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (13.1)$$

mit der Newtonschen Gravitationskonstanten  $G_N = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}/\text{s}^2$  und dem Asteroidenradius  $r_A \approx 450 \text{ m}$ . Zum Vergleich: Auf der Erde hat die entsprechende Größe  $g_E$  den Wert von  $9,8 \text{ m}/\text{s}^2$ , diese 'Erdbeschleunigung' ist also 200 000-mal größer als auf Ryugu.

Gestartet wurde Hayabusa2 am 3. Dezember 2014 vom Tanegashima Space Center in Japan. Mit etwa 600 kg Gewicht war diese Raumsonde etwas leichter als **NEAR Shoemaker**. Im Juni 2018 wurde **(162173) Ryugu** erreicht, und aus einer Umlaufbahn – mit variierender Höhe – anderthalb Jahre lang erforscht. Dazu wurden Kameras eingesetzt, natürlich im sichtbaren Wellenlängenbereich aber auch im infraroten Spektralbereich. Um die Oberfläche von Ryugu zu erforschen, wurden insgesamt vier (!) Rover auf den Asteroiden heruntergelassen – dazu wurden sie einfach aus 50-60 m Höhe fallen gelassen, denn die Gravitationskraft des kleinen Asteroiden ist sehr schwach. Drei der Geräte konnten deshalb unbeschadet die Oberfläche erreichen, der vierte Rover war schon vorher ausgefallen. Die geringe Schwerkraft konnte man auch ausnutzen, um die Rover 'herumfahren' zu lassen: dazu wurden sie einfach durch kurze Sprünge weiterbewegt, kamen also ohne Räder aus. Ein Rover ist in Abb. 13.3 neben Hayabusa2 gezeigt: das ist MASCOT = Mobile Asteroid Surface Scout, der zusammen mit französischen Partnern vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gebaut worden war. Dieser 'Pfadfinder' hat Magnetfeld, Strahlung, Temperatur und Oberflächendetails erkundet. Auch mehre kleine Landesonden wurden zur Oberfläche geschickt, unter an-



derem um die Zielregion für die Probenentnahme von Hayabusa2 zu markieren.



Abbildung 13.3: **Künstlerische Darstellung** der Sonde **Hayabusa2** über dem Asteroiden **(162173) Ryugu** [147]. Kredit: JAXA/Akihiro Ikeshita. Rechts unten ist der MASCOT-Lander abgebildet.

Besonders spannend waren die zwei Entnahmen von Bodenproben: Einmal direkt durch Hayabusa2, dazu hat sich – wie in Bild 13.3 dargestellt – die Sonde der Oberfläche mit einem Trichter, der an einem Greifarm befestigt war, genähert und loses Material eingesammelt. Um dieses in den Trichter zu bekommen, wurde die Asteroidenoberfläche mit einem 5 g schweren Geschoss aufgewirbelt.

In einer zweiten Aktion wurde ein etwas größerer ‘Impaktor’, ein 2,5 kg Kupfer-Projektile, von Hayabusa2 aus auf die Oberfläche geschossen. Dabei entstand ein Loch von 10 m Durchmesser und 2 m Tiefe – jetzt hat Ryugu also einen Krater mehr! Das herausgeschleuderte Asteroidenmaterial legte tiefere Schichten frei, davon wurde später mit Hayabusa2 eine (weitere) Probe entnommen.

Hayabusa2 ist dann wieder Richtung Erde geflogen, ist dort aber nicht gelandet, sondern hat aus 12 km Höhe den Behälter mit den Bodenproben abgeworfen, der mit Hilfe eines Fallschirms am 5.12.2020 sicher in Australien gelandet ist und auch schnell aufgefunden wurde. Die Analyse dieses vor mehr als 4 Milliarden Jahre in der Frühzeit unseres Sonnensystems entstandenen Materials dauert an, Unter anderem wurden mehrere Aminosäuren gefunden, organische Verbindungen, die in Lebewesen vorkommen, aber nicht nur dort. . . Möglicherweise wurde die Entstehung irdischen Lebens durch die schon vorher im Weltall erzeugten Aminosäuren begünstigt.

Die noch gut funktionierende Sonde Hayabusa2 ist inzwischen weitergeflogen und wird in den kommenden Jahren weitere Asteroiden besuchen, siehe Tabelle 13.3, aber keine Proben mehr entnehmen.

### 13.4 Ein Asteroid wird aus der Bahn geworfen

Diese Überschrift ist sehr reißerisch formuliert. Die Bahn des Mondes von Didymos wurde tatsächlich durch einen Impaktor verändert, allerdings nur ganz geringfügig.

Nun, der Reihe nach: **DART** steht für Double Asteroid Redirection Test. Der 'Double Asteroid' ist **(65803) Didymos** (für 'Zwilling') zusammen mit seinem vergleichsweise großen Mond **Dimorphos = (65803) Didymos I**. Der zweite Teil des Akronyms DART weist darauf hin, dass es um die Ablenkung eines Asteroiden aus dessen **Bahn** geht - hier von Dimorphos (= 'hat zwei Formen'). Es ist die erste gezielte Aktion dieser Art. Hintergrund ist die in Kapitel 19 geschilderte Gefahr durch Kollisionen von Asteroiden oder Kometen mit der Erde. Bei frühzeitiger menschlicher Intervention – so die Idee – kann man dem gefährlichen Himmelskörper einen 'kleinen Schubs' geben und ihn so an unserem Planeten vorbeilenken. Dimorphos stellt keine Gefahr dar, aber eine solche Erd-Rettungsmission wollte die NASA einmal ausprobieren. Didymos hat einen ungefähren Durchmesser von 800 m, Dimorphos ist etwa 200 m groß. Beide umrunden den gemeinsamen Schwerpunkt, der wiederum auf einer erdnahen Bahn um die Sonne läuft. Das Didymos-Dimorphos-System wurde schon von der Erde aus über mehrere Jahre hinweg gut vermessen, insbesondere mit Hilfe von Radarechos, so dass die Umlaufperiode  $T$  des Mondes genau bekannt ist:  $T = 11,921473 \pm 0,000044$  Stunden [22].

Abbildung 13.4 illustriert die Mission. Das circa 600 kg schwere Raumschiff DART wurde am 27. September 2022 gezielt mit Dimorphos zur Kollision gebracht. Der Start war im November 2021 mit einer SpaceX-Rakete erfolgt. Der kleine 'Ableger' von DART, LICIACube hat den Impakt fotografisch beobach-



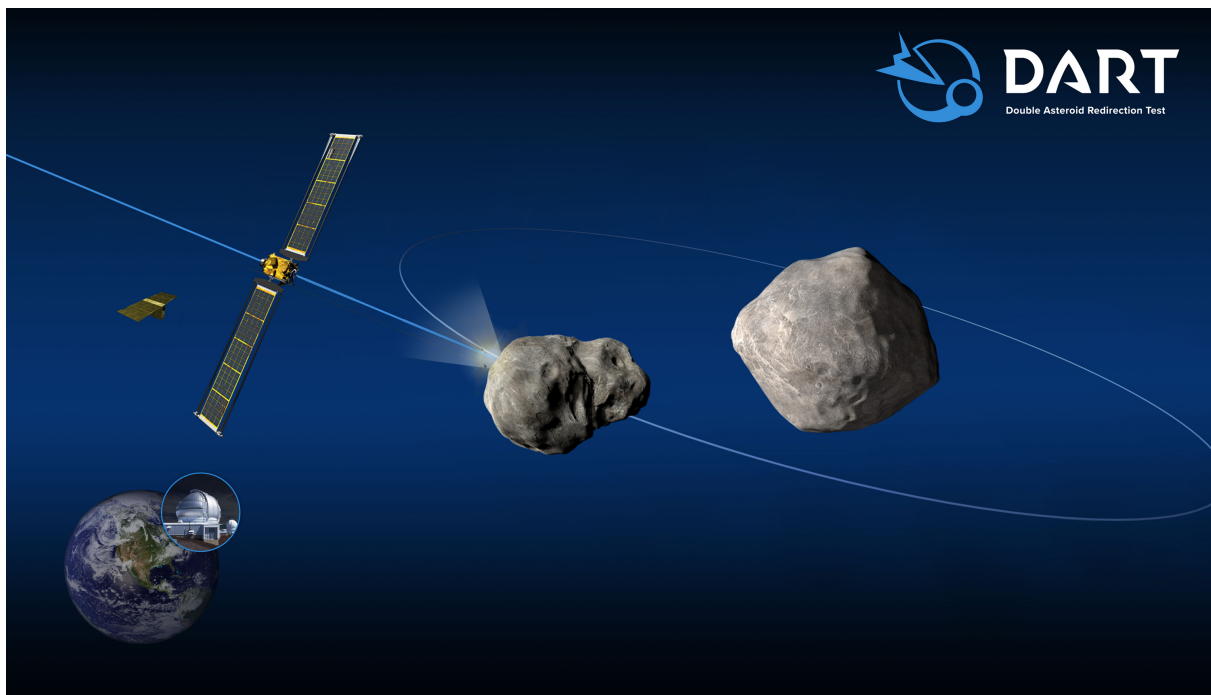


Abbildung 13.4: Nicht maßstabgerechte **künstlerische Darstellung** der **DART-Mission** [20].

tet. Auch DART selbst hat Fotos geschossen, bis zum Aufprall. Abbildung 13.5 zeigt einen etwa 16m x 16m großen Ausschnitt der felsigen Oberfläche des Asteroidenmondes, 2 Sekunden vor der Kollision aufgenommen und noch rechtzeitig zur Erde gefunkt.

Der Test ist geglückt: Dimorphos wurde abgebremst, und die Umlaufzeit des Mondes wurde um gut 30 Minuten auf  $T = 11,3712 \pm 0,0055$  Stunden verkürzt [22].

Der Aufschlag der  $m_S = 600$  kg ‘schweren’ Sonde auf den Mond Dimorphos mit einer ungefähren Masse von  $m_M = 2 \cdot 10^9$  kg erfolgte mit einer Relativgeschwindigkeit von  $v_S = 6$  km/s. Mit diesen Zahlenwerten kann man den Impulsübertrag  $p$  von DART auf den Asteroidenmond berechnen:

$$p = m_S \cdot v_S = 3,6 \cdot 10^6 \text{ kg m/s} \quad (13.2)$$

Wegen der Impulserhaltung kann man daraus die Geschwindigkeitsänderung  $v_M$  von Dimorphos abschätzen

$$m_M \cdot v_M = p \quad v_M \approx 2 \text{ mm/s} \quad (13.3)$$

Diesen Wert kann man vergleichen mit der Bahngeschwindigkeit des Mondes von 177 mm/s (vor dem Impact) [22]. Die Mondmasse  $m_M$  ist nur bis auf einen

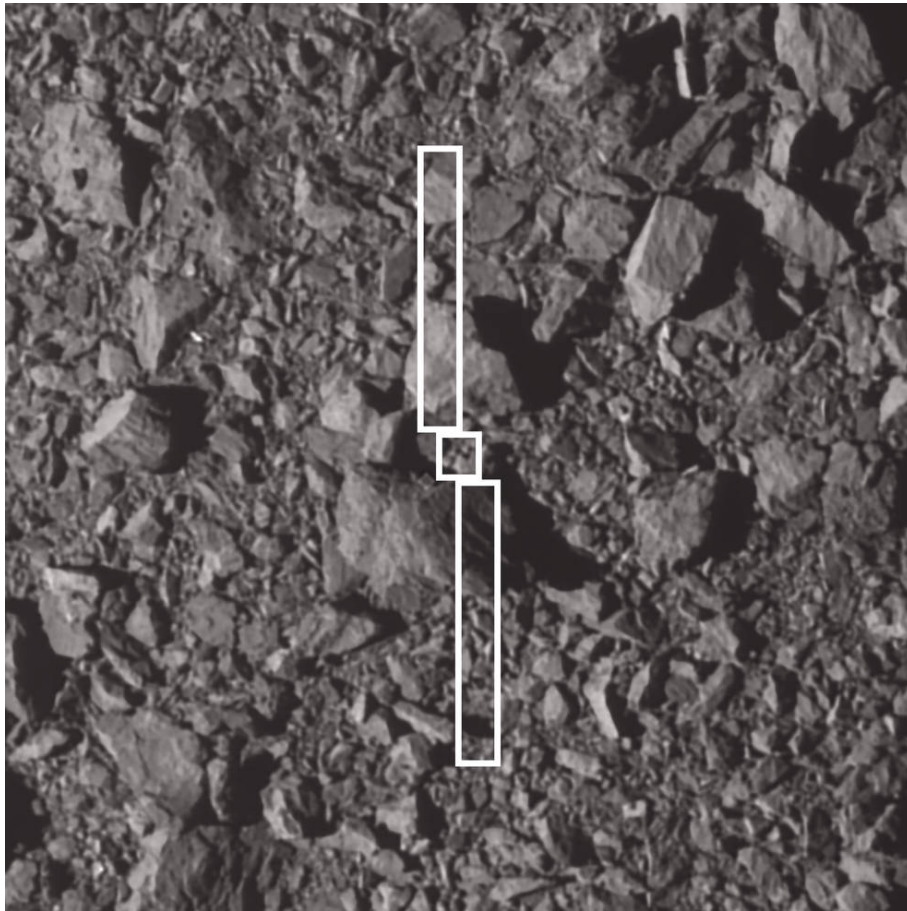


Abbildung 13.5: Von der Sonde **DART** aufgenommenes Foto [24]. Es wurde kurz vor dem Aufprall auf den Asteroidenmond **Dimorphos** gemacht. Eingezeichnet sind die Konturen von DART (mit Solarpanelen) die zeigen, wo die Kollision stattfand.

Faktor 2 genau bekannt, da man sie aus der nicht genau bekannten Dichte abschätzen muss. Entsprechend ungenau war die Vorhersage für den Wert von  $v_M$ . Man beachte, dass wegen des Ausschleuderns von Oberflächenmaterial beim Aufprall die Situation deutlich komplexer ist, also die obige Abschätzung der Geschwindigkeitsänderung nur sehr grob sein kann, aber die Größenordnung stimmt.

In Kapitel 19 wird abgeschätzt, welcher Auftreff-Impuls  $p$  einer Sonde nötig wäre, um den sich der Erde 2029 stark nähernden Asteroiden **(99942) Apophis** hinreichend abzulenken. Dazu bräuchte man einen viele Tausend mal größeren Impuls als mit **DART** erreicht wurde. Es ist also noch ein langer Weg bis zur realistischen Asteroidenabwehr.

Übrigens: die europäische Raumfahrtagentur ESA beabsichtigt, im Jahr 2024 eine Sonde Namens **Hera** zu Didymos zu schicken, um die Konsequenzen des DART-Aufpralls weiter zu analysieren und um die Masse von Dimorphos zu messen. Ob die 2026 dort ankommende Sonde dann wirklich noch nötig und sinnvoll ist, darf allerdings bezweifelt werden.



## Kapitel 14

### Wie sind die Asteroiden entstanden?

Auf die sprichwörtliche 'astronomische Genauigkeit' trifft man insbesondere bei der Vermessung und Berechnung von Planeten- und **Asteroidenbahnen** im Sonnensystem. Es gibt aber auch andere Bereiche der Astronomie, wo man nur ungefähre oder qualitative Aussagen tätigen kann – zum Beispiel bei der Frage nach der Entstehung des Sonnensystems. Hier ist man auf Annahmen und Modelle angewiesen. Diese sind natürlich gut begründet und beruhen auf den bekannten physikalischen Gesetzen. Aber die Extrapolation von heutigen Beobachtungen zurück auf die Prozesse die sich vor 4 Milliarden Jahren abgepielt haben, lässt naturgemäß einen gewissen 'Spielraum' zu. Deswegen ist es auch nicht verwunderlich, dass diese Modelle und entsprechende Computersimulationen laufend verfeinert werden und die so gewonnenen Erkenntnisse nicht in Stein gemeißelt sind. Dessen muss man sich immer bewusst sein. Im Folgenden versuche ich, den heutigen Stand der Forschung komprimiert darzustellen.

#### 14.1 Die Entstehung des Sonnensystems

Unser Sonnensystem besteht im Wesentlichen aus dem Zentralgestirn und den Planeten - was die Massenverhältnisse angeht. Die Monde, Asteroiden und **Kometen** spielen da nur eine Nebenrolle. Vor etwa 4,6 Milliarden Jahren gab es in unserer Galaxie, der Milchstraße, eine Wolke aus viel Gas und etwas Staub, die sich durch die anziehenden Gravitationskräfte verdichtet hat. Möglicherweise hat eine Supernovaexplosion in der Nachbarschaft mit ihren Druckwellen etwas 'nachgeholfen', denn diese führten zu lokalen Verdichtungen und 'Verdünnungen', die dann durch die Schwerkraft verstärkt wurden [46]. Aus diesem 'Sonnennebel', der zum größten Teil aus Wasserstoff und Helium bestand, hat sich also das Sonnensystem entwickelt. Alle Modelle

besagen, dass Sonne und Planeten praktisch gleichzeitig entstanden sind. Dafür spricht insbesondere die Bewegung dieser Himmelskörper in der gleichen Ebene (zumindest angenähert), der **Ekliptik**, und der gleiche Umlaufsinn aller acht Planetenbahnen. Das kann kein Zufall sein. Abbildung 14.1 illustriert die kleinen **Bahnneigungen** der Planeten gegenüber der Ekliptik. Auch das in etwa gleiche Alter der Objekte des Sonnensystems unterstützt diese Vorstellung.

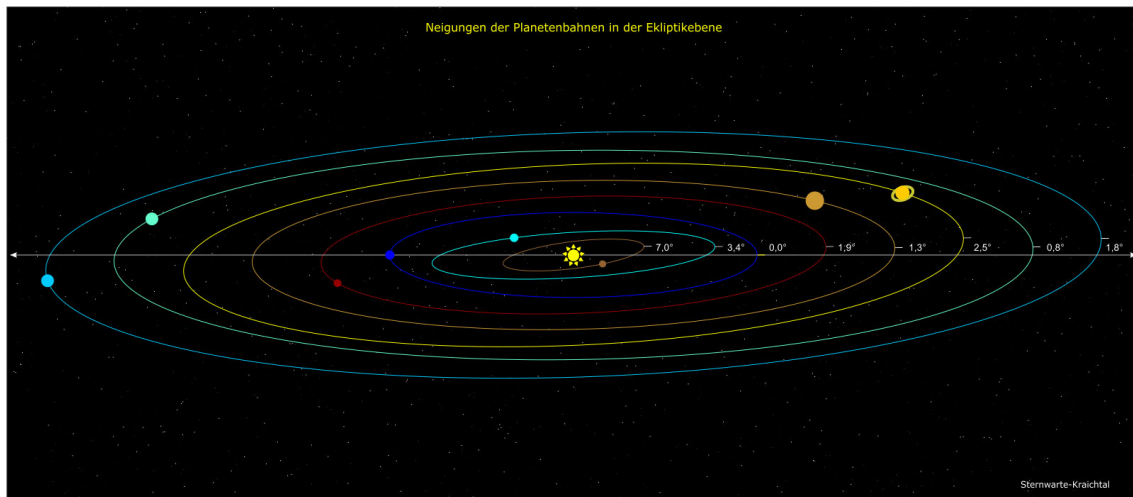


Abbildung 14.1: Illustration der Neigungen der Planetenbahnen relativ zur Ekliptik [189], sie variieren zwischen  $0^\circ$  (Erde, per definitionem) und  $7^\circ$  für Merkur. Die Abstände sind *nicht* maßstäblich korrekt dargestellt. Die 'höchsten' Punkte der Bahnen sind hier der besseren Vergleichbarkeit halber alle auf der rechten Seite der Skizze platziert. Kredit: Roland Zimmermann.

Alternativ könnte man spekulieren, dass aus dem Sonnennebel zunächst die Sonne entstand, und die anderen Himmelskörper später 'eingefangen' wurden. Mit dieser Hypothese aber kann man nicht erklären, warum die Planeten alle ungefähr in der gleichen Ebene umlaufen. Übrigens ist es gar nicht so einfach, einen von außerhalb kommenden vorbeifliegenden Himmelskörper an einen Stern zu binden, ihn also auf eine stabile Umlaufbahn zu zwingen. Zwar wird er durch die Schwerkraft angezogen, aber seine Bewegungsenergie ist fast immer groß genug, um ihn auch wieder herauszukatapultieren: Er wird schneller beim Anflug auf die Sonne, wird dann nach der Passage wieder langsamer und verlässt das Sonnensystem mit ungefähr dem gleichen Geschwindigkeitsbetrag wie vor seinem Besuch<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Oft geistern in diesem Kontext in den Medien falsche Vorstellungen herum, häufig auch im Zusammenhang mit schwarzen Löchern, die vorbeifliegende Raumschiffe 'aufsaugen' sollen.



Wieso können wir das Alter des Sonnensystems auf  $4,6 \pm 0,1$  Milliarden Jahren taxieren? Zunächst eine Einordnung dieser Zahl: Das Alter des Universums beträgt 13,8 Milliarden Jahre, uns Menschen gibt es erst seit etwa 0,003 Milliarden Jahren.

Das Alter der Sonne kann man zum Beispiel aus deren heute beobachtetem Entwicklungsstadium – zusammen mit plausiblen Annahmen zur anfänglichen chemischen Zusammensetzung – ermitteln. Die ‘Helioseismologie’ ist die Wissenschaft der dauernd auftretenden ‘Sonnenbeben’: kleine Vibrationen der Sonnenmaterie an der Sonnenoberfläche werden von der Erde aus vermessen. So kann man etwas über die Ausbreitung der mit den Beben verbundenen Druckwellen im Sonneninneren lernen, insbesondere über die Menge an Helium. Der ursprüngliche Massenanteil von 24% (wie er im frühen Weltall vorhanden war) ist inzwischen auf etwa 28% Massenanteil angewachsen [148]. Das Edelgas entsteht im Sonnenkern aus Wasserstoff durch Fusionsprozesse. Diese Kernreaktionen kennen wir aus irdischen Experimenten, und wir wissen wieviel Energie dabei freigesetzt wird. Auch bekannt ist natürlich die totale Strahlungsleistung der Sonne und damit der ‘Wasserstoffverbrauch’. Nimmt man alles zusammen, ergibt sich ein Sonnenalter von 4,6 Milliarden Jahren.

Das Alter von Erde und Mond, und auch von Meteoriten, also auf der Erde gelandeten Asteroiden, kann man sehr genau durch radiometrische Datierung bestimmen. Diese Methode basiert auf Untersuchungen der in einer Probe enthaltenen Atomkernsorten, den Isotopen. Die Grundidee der radioaktiven Altersbestimmung ist einfach: Radioaktive Kerne des Typs  $A$  mögen auf natürliche Weise in Tochterkerne  $B$  zerfallen. Im einfachsten Fall ist zum Zeitpunkt der Probenentstehung  $B$  noch nicht vorhanden, dann erhöht sich deren Anteil mit der Zeit  $t$  auf Kosten der Zahl  $N_A$  der  $A$ -Kerne:

$$N_A(t) = N_A^0 \cdot e^{-t/\tau} \quad N_B(t) = N_A^0 - N_A(t) \quad (14.1)$$

Das ist das radioaktive Zerfallsgesetz. Hier ist  $\tau$  die als bekannt vorausgesetzte mittlere Lebensdauer; oft verwendet man stattdessen auch die Halbwertszeit  $T_{1/2} = 0.693 \cdot \tau$ , die angibt, nach welcher Zeit die Hälfte der Teilchen  $A$  zerfallen ist. Aus dem gemessenen Verhältnis von

$$\frac{N_B}{N_A}(t) = e^{t/\tau} - 1 \quad (14.2)$$

kann man dann  $t$  berechnen. Die ursprüngliche Menge  $N_A^0$  muss man dazu nicht wissen. Sehr wohl aber muss man annehmen, dass im Laufe der Zeit nicht neue  $A$ -Kerne entstehen können.

---

Um die Methode der radioaktiven Datierung auf sehr alte Objekte wie etwa den Mond anzuwenden, muss man sehr langlebige radioaktive Isotope wie Uran-238 (das aus 238 Nukleonen besteht, das sind die Kernteilchen Protonen und Neutronen) verwenden, sonst findet man keine 'Mutterteilchen', also Isotope vom Typ A mehr. Beispiel Mond: Im von den Apollo-Missionen mitgebrachten Mondgestein wurde bei der Entstehung unseres Erdtrabanten unter anderem Uran eingeschlossen, und seitdem nicht mehr nachgeliefert. Heute findet man noch Spuren von Uran-238 und auch vom Zerfallsprodukt Blei-206. Aus den relativen Anteilen dieser, und aus der Analyse von anderen Isotopen, bekommt man ein Mondalter von 4,5 Milliarden Jahren. Auch aus der Untersuchung irdischen Gesteins und von Meteoriten kann man mit der radioaktiven Datierung deren Alter bestimmen – wiederum findet man etwa 4,5 - 4,6 Milliarden Jahre. Für die Gasplaneten wie **Jupiter** gibt es keine direkten genauen Altersbestimmungen. Aber insgesamt passen alle Beobachtungen zusammen und können sehr gut mit der gemeinsamen Entstehung von Sonne und Planeten vor 4,6 Milliarden Jahren erklärt werden.

In diesem Modell kann man die Sonne gut verstehen, die ja im Wesentlichen aus den 'Urstoffen' des Weltalls, Wasserstoff und Helium besteht. Das Helium ist kurz nach dem Urknall durch Fusionsprozesse – ähnlich wie sie heute noch in den Sternen stattfinden – erzeugt worden. Aber die Planeten bestehen ja zumeist aus viel schwereren Elementen, bis hin zu Uran und Blei. Nach heutigem Verständnis sind die meisten davon in Supernovaexplosionen früherer Sternenerationen in der Milchstraße herausgeschleudert worden und haben sich dann im Kosmos verteilt. Zur Erinnerung: Unser Sonnensystem ist ja erst 9 Milliarden Jahre nach dem Urknall entstanden, es gab also genug Zeit für die Entwicklung und das spektakuläre Ende von Sternen noch vor der Geburt unseres Planetensystems. In diesem Sinne bestehen die Erde und wir Menschen aus 'Sternenstaub'. Und die Asteroiden auch.

Zu klären bleiben noch zwei Fragen: Warum ist aus der ursprünglichen Wolke eigentlich eine Scheibenstruktur entstanden? Und wieso dreht sich das Ganze? Diese beiden Phänomene gehören zusammen: Die Drehung wird in der Physik durch den Drehimpuls  $L$  quantifiziert. Der gesamte Drehimpuls eines physikalischen Systems ändert sich nicht mit der Zeit. Der heute beobachtete Gesamtdrehimpuls des Sonnensystems impliziert also, dass auch schon die Sonnennebel-Wolke rotiert hat. Deren Drehgeschwindigkeit, die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_W$  war vergleichsweise niedrig, wie folgende Überlegung zeigt: Die Wolke war wohl einige 1000 Astronomische Einheiten groß [52]. Nehmen wir an, der Radius betrug  $r_W = 1000$  AE. Der Sonnennebel ist bei der Verdichtung stark geschrumpft, die Größenordnung des heutigen Sonnensystems ist

---

Ersetzt man etwa die Sonne durch ein schwarzes Loch der gleichen Masse, ändert sich gar nichts, die vom Planeten 'gespürten' Gravitationskräfte sind die gleichen.

$r_{SS} = 5 \text{ AE}$ . Für den Drehimpuls  $L$  eines punktförmigen Objektes der Masse  $m$ , etwa eines Planeten im Sonnensystem, gilt

$$L = m \cdot \omega \cdot r^2 \quad (14.3)$$

mit Abstand  $r$  vom Rotationszentrum und Winkelgeschwindigkeit<sup>2</sup>  $\omega$ . Verringert sich also  $r$ , wird wegen der Drehimpulserhaltung die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  entsprechend größer, das ist der beim Eiskunstlauf zu bewundernde berühmte Pirouetteneffekt. Die Winkelgeschwindigkeit der Wolke war also viel kleiner als die der heutigen Planeten auf ihrer **Bahn** um die Sonne. Unsere einfache Rechnung besagt, dass sich der Sonnennebel etwa

$$(r_W/r_{SS})^2 = 200^2 = 40000 \quad (14.4)$$

mal langsamer gedreht hat als ein Planet wie **Jupiter** bei seiner Bewegung um die Sonne. Jupiter benötigt für einen Umlauf 12 Jahre, also rotierte der Sonnennebel alle 500 000 Jahre einmal um sich selbst. Eine so kleine Rotationsbewegung ist für eine galaktische Gaswolke durchaus plausibel. Auch die Milchstraße rotiert ja langsam um ihren Schwerpunkt.

Durch die Drehung wird eine Richtung im Raum ausgezeichnet, die der Rotationsachse entspricht. In der Ebene senkrecht dazu, im Sonnensystem ist das die Ekliptik, stabilisiert die Fliehkraft das rotierende System: Die Gravitationskraft zieht zwar die Gasteilchen der Wolke zum Zentrum der Wolke, wo später die Sonne entsteht, aber diese Kraft wird durch die nach außen wirkende Fliehkraft ausgeglichen. Dies ist anders für die Bewegungen parallel zur Rotationsachse, hier gibt es 'kein Halten'. Das bedeutet, dass Materie der Wolke, die sich in Schichten oberhalb oder unterhalb der zentralen Ebene, der Ekliptik, um die Sonne bewegte, von der Materie in der Ekliptik angezogen wurde.

So hat sich im Laufe von vielen Jahren aus der großen dreidimensionalen Wolke eine kleine rotierende Scheibe herausgebildet. Diese nennt man protoplanetare Scheibe und stellt sie sich so vor, wie Abbildung 14.2 zeigt. Man erkennt schon die Ursonne und einige Planeten, die aus lokalen Verdichtungen gebildet wurden. Natürlich entstanden diese Himmelskörper nicht an einem Tag. In der protoplanetaren Scheibe wurden nach und nach größere Strukturen geformt, zunächst 'Planetesimale', die insbesondere aus Staubteilchen gebildet werden, die durch die Gravitation und elektromagnetische Kräfte zusammengehalten werden. Schließlich fangen diese Planetesimale weitere Materie aus ihrer Umgebung ein und/oder verschmelzen sich mit ihresgleichen, so dass letztlich ein Planet wie Mars entsteht.

---

<sup>2</sup>Die Winkelgeschwindigkeit bei einer Kreisbahn gibt den pro Zeit durchlaufenen Bahnwinkel an. Für die Erdbewegung um die Sonne, die ja ein Jahr dauert, ist  $\omega = 360^\circ/\text{Jahr} \approx$



Abbildung 14.2: **Künstlerische Darstellung** der protoplanetaren Scheibe, aus der das Sonnensystem geformt wurde [108].

Durch die starke Konzentration von Wasserstoff- und Heliumgas im Zentrum hat sich dieses so stark erhitzt, dass im Inneren der Sonne bei Temperaturen von mehreren Millionen Grad Celsius die schon erwähnten Fusionsprozesse einsetzen konnten.

Die Gasplaneten wie **Jupiter** und **Saturn** haben nicht genug Masse, um derartig hohe Zentraltemperaturen zu erreichen. Für die kleinen Gesteinsplaneten wie **Merkur** und Erde gilt dies erst recht. Deshalb sind alle Planeten vergleichsweise kühl.

Eine uralte Frage ist die nach den Bahnradien – genauer: den **großen Halbachsen** – der Planeten, deren Größen und nach den chemischen Zusammensetzungen. Ist unser Sonnensystem zwangsläufig so entstanden, dass die Gasplaneten weiter außen ihre Bahnen ziehen? Und warum gibt es eigentlich nicht 100 Planeten? Wieso gibt es eine recht große Lücke zwischen Mars und Jupiter? Manche Aspekte kann man durch die gegenseitige gravitative Beeinflussung der Planeten erklären, so auch die letzte Frage, auf die wir im

nächsten Unterkapitel zurückkommen.

Um unser Planetensystem und dessen Evolution genauer zu verstehen, werden heute komplexe Simulationsrechnungen durchgeführt. Dieses hochaktuelle Forschungsgebiet ist sehr spannend; zum Beispiel hat man herausgefunden, dass die Planeten im Laufe der Zeit ihre Bahnen teilweise deutlich verändert haben [177], aber dieses Thema sprengt die Grenzen dieses Buches. Weitere Einsichten gewinnt man durch Beobachtung von anderen Sonnensystemen, also von Sternen und deren Planeten, den **Exoplaneten**, siehe auch Kapitel 21.

## 14.2 Die Geschichte der Asteroiden

Ja, auch die Asteroiden sind vor 4,6 Milliarden entstanden, zusammen mit ihren größeren 'Brüdern und Schwestern', den Planeten. Dafür spricht die Altersbestimmung von Meteoriten, wie im vorhergehenden Abschnitt ausgeführt wurde. Und auch die Bahnen sind ähnlich wie die der Planeten: Die meisten Asteroiden reisen wie diese im Gegenuhrzeigersinn um die Sonne (von 'oben' = Norden gesehen). Zwar sind die Bahnneigungen etwas breiter verteilt, wie in Unterkapitel 4.6 gezeigt wird. Aber dennoch konzentrieren sich die Orbits auf die Ekliptiknähe. Die größeren Inklinationen kann man durch frühere gravitative Wechselwirkungen mit den Planeten erklären. Dabei wird der massearme Himmelskörper (Asteroid) viel stärker abgelenkt als der viel schwerere Partner (Planet). Auch die chemische Zusammensetzung der Kleinplaneten – bekannt insbesondere durch Analyse von Meteoriten – ist ähnlich der von Steinplaneten wie **Merkur** und Erde.

Warum bestehen Asteroiden aus festen Materialien und nicht aus Gas? Um ein Gas mit Hilfe der Schwerkraft festzuhalten, muss letztere groß und/oder die Temperatur klein sein. Die erste Bedingung können nur sehr massereiche Objekte erfüllen – die bezeichnen wir als Planeten und heißen **Jupiter** oder **Neptun**. . . Tiefe Temperaturen herrschen in großen Abständen von der Sonne, jenseits der Neptunbahn. Dann können Himmelskörper (auch) aus Gas im flüssigen oder gefrorenen Zustand bestehen – das sind die **Kometen**. . .

Die genaue Verteilung der **großen Halbachsen**, Massen, Formen und anderer Eigenschaften können Modelle von der Entstehung unseres Planetensystems für Asteroiden genauso wenig vorhersagen wie für **Planeten**. Aber da es Millionen von Kleinplaneten gibt, und nur acht Planeten, kann man Gesetzmäßigkeiten bei den Asteroiden auf empirisch-statistischer Basis viel besser erkennen, siehe Kapitel 4. Ferner kann man, bei bekannten **Planetenorbits** und -massen, den Schwerkrafteinfluss von Sonne und Planeten auf die ver-

gleichsweise kleinen Asteroiden relativ leicht berechnen, da die Rückwirkung auf die Planeten in der Regel vernachlässigt werden kann.

So versteht man die in Abschnitt 4.6 vorgestellten Resonanzphänomene sehr gut. Sie führen dazu, dass gewisse Zahlenwerte für die große Halbachse praktisch nicht vorkommen. Auch das Problem des 'fehlenden' Planeten zwischen Mars und Jupiter, das die Gemüter seit Spekulationen von Johannes Kepler Ende des 16. Jahrhunderts und der Aufstellung der **Titius-Bode-Reihe** im Jahr 1770 bewegt hat, lässt sich heute zuverlässig erklären: Ein möglicher kleinerer Planet wird durch die **Gezeitenkräfte** von **Jupiter** im Laufe der Zeit zerstört oder von vornherein am Entstehen gehindert. Stattdessen ist ein 'Donut' aus vielen kleinen, sich unabhängig voneinander um die Sonne bewegendem Brocken 'erlaubt' – das ist der **Asteroidengürtel**! Es ist aber durchaus möglich, dass zunächst ein paar größere Asteroiden entstanden, von denen im Lauf der Zeit die meisten zerstört wurden, und heute als viele kleine Planetoiden um die Sonne herumfliegen. Die heute beobachteten Klassen bzw. Gruppen von Asteroiden wie die **Hungaria-Gruppe** (siehe Kapitel 5) sind vielleicht jeweils die Überreste eines vor langer Zeit durch Gezeitenkräfte oder eine Kollision zertrümmerten 'Mutter-Asteroiden'.

**Gezeitenkräfte** sind Gravitationskräfte, die auf einen ausgedehnten Körper einwirken - wobei es auf die Differenz der Kräfte ankommt, die an verschiedenen Stellen angreifen, wie Abbildung 14.3 illustriert. Auf der Erde kommen die Flutberge der Meere dadurch zustande, dass die Gravitationskraft zwischen Mond und Erdmittelpunkt kleiner ist als die zwischen dem Erdtrabanten zugewandten Meerwasser und dem Erdmond – stark vereinfacht formuliert. Die

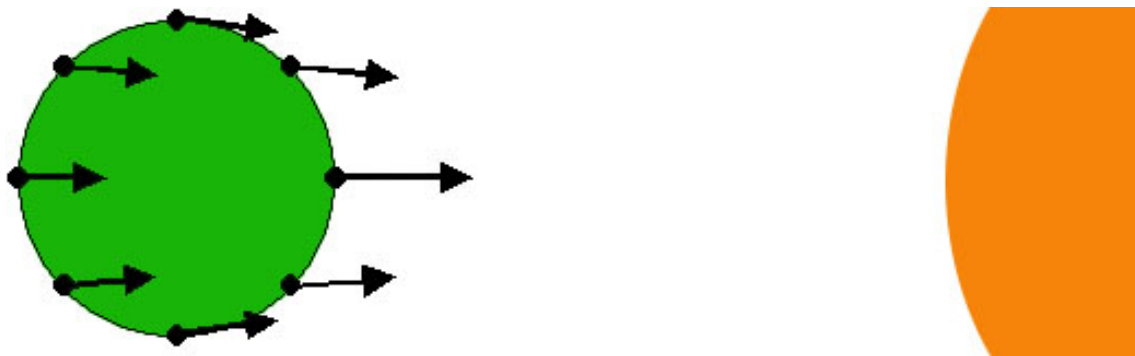


Abbildung 14.3: Gezeitenkräfte auf hypothetischen Planeten **Phaeton** (links), aufgrund der Gravitationswirkung durch Jupiter (rechts). Die Skizze ist nicht maßstabgetreu.

Differenz dieser Kräfte kann so groß werden, dass ein Himmelskörper gewissermaßen zerreißt: Der hypothetische Planet zwischen Jupiter und **Mars**,



**Phaeton** genannt, möge die Größe der Erde haben und eine kreisförmige Bahn mit Radius  $a = 2,8 \text{ AE}$  durchlaufen. Dann kann man die Gezeitenkräfte ausrechnen - sie sind winzig und können einen einmal entstandenen Gesteinsplaneten nicht zerstören. Aber diese Gezeitenkräfte sind groß genug, wenn sie über kosmische Zeitskalen einwirken, das Entstehen eines Planeten zwischen Mars und Jupiter zu verhindern. Nehmen wir an, es gibt zunächst Planetesimale, die auf Bahnen mit  $a \approx 2,8 \text{ AE}$  kreisen. Der Einfluss des kleineren Mars auf diese Planetenbausteine ist nicht sehr groß, aber die Schwerkraft des 3000-mal massiveren Jupiter ist entscheidend für das Schicksal dieser Asteroidenvorläufer. Es bilden sich insbesondere Bahnresonanzen, das bedeutet, dass einige Planetesimale schneller umlaufen als benachbarte Brocken, die sich nur wenig in der **großen Halbachse**  $a$  unterscheiden. Damit wird verhindert, dass sie gravitativ zusammenkleben. Nur in engen Korridoren in  $a$  kommt es zur Akkretion, und so ist letztlich der Asteroidengürtel entstanden – so die heutigen Vorstellungen.

Bei der Materiekonzentration, die zu Planeten und Asteroiden führt, spielen zwei Kräfte eine Rolle: einmal die zwischen allen Massen wirkende anziehende Gravitationskraft. Aber auch elektromagnetische Kräfte sind wichtig. Letztere nutzen die positiven und negativen Ladungen in der Materie, auch wenn diese nach außen hin insgesamt elektrisch neutral ist. Sowohl zwischen geladenen Ionen als auch neutralen Molekülen, in denen sich Ladungen verschieben können, treten elektrische Anziehungskräfte auf. Diese sorgen dafür, dass es zu chemischen Bindungen kommt und die Gegenstände des Alltagslebens nicht in ihre atomaren Bestandteile zerfallen. Staubkörner werden durch elektrische Kräfte zusammengehalten, die Gravitation ist in der Regel zu schwach, die Bestandteile zusammenzuhalten – Lichteinstrahlung, Wärmebewegung und Kollisionen mit anderen Staubpartikeln würden eine nur gravitative Bindung mit der Zeit zerstören.

Viele Staubpartikel können sich aber durch die Schwerkraft aneinander binden, so dass sie als größeres Objekt – mit entsprechend stärkerer Gravitationskraft – überleben können. Werden diese Strukturen immer größer, und durchlaufen sie auch noch Phasen hoher Temperatur, können sie schließlich zu elektrostatisch zusammengehaltenen großen Felsen werden. Diese können im Prinzip verschiedene Formen annehmen - solange sie nicht zu groß und damit massereich werden. Denn dann sorgen die entsprechend angewachsenen Gravitationskräfte dafür, dass das Objekt abgerundet wird, also zumindest näherungsweise Kugelform annimmt. In diesem Zustand ist die gesamte potentielle Energie, die mit den Anziehungskräften verbunden ist, ein Minimum, und damit der von der Natur angestrebte Wert. Diese Tatsache nutzt man bei der Definition von **'Planet'** – er muss in etwa kugelrund sein, siehe Kapitel 1. Größere Asteroiden erfüllen dieses Kriterium auch, insbesondere die Zwerg-

planeten wie (1) Ceres und (134340) Pluto. Aber die meisten Asteroiden sind eher 'kartoffelförmig' asymmetrisch und unvorhersehbar geformt.

Bis heute sind die Akkretionsprozesse bei der Entstehung unseres Planetensystems nicht im Detail verstanden, insbesondere nicht das Wechselspiel von Gravitation und elektrischen Kräften. Auch ist bei vielen Kleinplaneten nicht klar, welche der beiden Kräfte die dominierende Rolle beim Zusammenhalt spielt. So wurden viele Asteroidenforscher in den letzten Jahren überrascht, als vermeintliche große Felsbrocken wie (101955) Bennu beim Landen einer Sonde zumindest eine Oberfläche aus losem Staub und Geröll offenbarten. Man spricht von einem 'rubble pile' oder 'Geröllhaufen'. Auch kleine gemessene Werte der Massendichte implizieren viele Hohlräume zwischen den einzelnen Bröckchen. Der Gesteinsplanet (253) Mathilde gehört in diese Kategorie. Das Rubble Pile-Modell kann auch erklären, dass keine sehr schnellen Eigenrotationen zu beobachten sind, größere Asteroiden benötigen immer mindestens 2 Stunden für eine Umdrehung um sich selbst. Siehe dazu auch Kapitel 6. 'Schnellläufer' würden sich durch die Fliehkraft selbst zerstören - es sei denn sie bestehen aus einem monolithischen großen Felsen und nicht aus einem 'Schutthaufen'. Das 'Lockermaterial' an der Asteroidenoberfläche nennt man auch 'Regolith' (griechisch: Decke + Stein). Bei dessen Formung spielten auch 'Witterungsprozesse' wie Meteoriteneinschläge und die Milliarden von Jahren einwirkende Sonneneinstrahlung eine Rolle. Abbildung 14.4 zeigt die Oberfläche von (101955) Bennu, von dem die Sonde OSIRIS-REx Material absaugt. Die am 24.9.2023 auf der Erde abgelieferte Probe zeigt Abbildung 15.2 auf Seite 167 im Kapitel 15.



Abbildung 14.4: Saugarm der Raumsonde **OSIRIS-REx** auf der Oberfläche des Asteroiden **(101955) Bennu** [113].



## Kapitel 15

### Woraus bestehen Asteroiden?

Auf den Punkt gebracht: Asteroiden bestehen in der Regel aus Gesteinsmaterial und/oder Metall. Diese Substanzen sind vorwiegend aus relativ schweren Elementen wie Silizium, Sauerstoff oder Nickel aufgebaut, die *nicht* kurz nach dem **Urknall** entstanden sind. Diese Asteroidenmaterialien sind wahrscheinlich durch die gleichen **Supernova-Explosionen** geschaffen worden, die auch die auf der Erde und in unserem Körper vorhandenen Elemente erzeugt haben. Mehr dazu findet man in Kapitel 14.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal von **Kometen** ist das Vorhandensein von (Wasser-)Eis. Aber diese Klassifizierung ist nicht eindeutig, es gibt 'Zwitterwesen', die gleichzeitig Asteroiden- und Kometencharakter zeigen; diese werden in Kapitel 5 vorgestellt.

Und es gibt Ausnahmen. So ist der Zwergplanet **(1) Ceres** ein 'Einzelgänger', der sich in verschiedener Weise von anderen 'typischen' Asteroiden unterscheidet. Ceres ist kein Komet, denn er hat weder eine ausgeprägte Koma noch einen Schweif, wohl aber eine sehr dünne Atmosphäre, die unter anderem Wasserdampf enthält. Und er besitzt wohl flüssiges Wasser in Form eines Ozeans unter der Gesteinsoberfläche. Dafür sprechen die hellen Flecken auf der Oberfläche, die in Abbildung 1.2 im Kapitel 1 auf Seite 3 zu sehen sind. Es handelt sich um Salzablagerungen<sup>1</sup>, die gut zu erkennen sind. Die heutige wissenschaftliche Erklärung für deren Entstehung lautet [204]: Die Ablagerungen sind vor einigen Millionen Jahren durch Kryovulkanismus aus einem unter-'irdischen' salzigen Ozean entstanden. Bei dieser Form des Vulkanismus wird flüssiges salzhaltiges Wasser 'ausgespuckt', das dann an der kalten Oberfläche gefriert. Kryovulkanismus beobachtet man auch auf den Planetenmonden Europa und Titan. Bei diesen ist die treibende Energiequelle wohl auf **Gezeitenkräfte** – erzeugt von **Jupiter** bzw. **Saturn** – zurückzuführen. Bei Ceres

---

<sup>1</sup>Nicht primär Kochsalz = Natriumchlorid, sondern eher Natriumkarbonat und andere Salze



und (134340) Pluto ist bisher nicht klar, woher diese Energie kommt, denn auf diese beiden Zwergplaneten wirken nur geringe Gezeitenkräfte, da sie weit entfernt von den großen Planeten ihre Bahnen ziehen.

Weitere Besonderheiten von (1) Ceres sind:

- Er ist der bei weitem größte und offenbar nicht zerstörte Asteroid im **Hauptgürtel**. Warum hat er bis heute überlebt?
- Dieser Zwergplanet ist *nicht* 'Vater' einer Asteroidenfamilie - auch seine **Bahn** ist also untypisch.

Deshalb wird spekuliert, dass Ceres ursprünglich ein Zentaur war, der erst nach den 'wilden' destruktiven Jahren des Asteroidengürtels in diesen inneren Bereich des Sonnensystems gelenkt wurde, und daher nicht bei einer Kollision zerschmettert wurde.

Im Folgenden konzentrieren wir uns auf die 'durchschnittlichen', eher unauffälligen und nicht sehr großen Asteroiden. Woraus bestehen diese also? Man muss hier natürlich zwischen den Materialien an der Oberfläche und dem Aufbau des Asteroidenkerns unterscheiden. Erstere kann man durch Beobachtung von der Erde aus, aber insbesondere durch Raumsonden untersuchen. Einige haben ja sogar Proben zur Erde gebracht, siehe Kapitel 13. Ferner kann man Meteoriten chemisch analysieren und ihre Struktur unter dem Mikroskop untersuchen. Abbildung 15.1 zeigt die 'Widmanstätten-Struktur' des Eisen-Nickel-Meteoriten Hraschina. Man erhält diese Bilder bei einer spezifischen Behandlung durch Anschleifen, Polieren und Ätzen mit Salpetersäure. Diese charakteristischen Strukturen entstehen (nur!) bei sehr langsamem Abkühlen der Metalle, wie in Asteroidenkernen. Entdeckt wurden sie zu Beginn des 19. Jahrhunderts von **Alois von Beckh-Widmanstätten**. Sie bilden ein wichtiges Erkennungsmerkmal von Metall-Meteoriten, da irdisches Eisen dieses Muster nicht zeigt.

Was Asteroiden 'im Innersten zusammenhält' kann dagegen nur durch Messungen der mittleren Massendichte und plausible Annahmen erschlossen werden. Aber das ist ja bei den Planeten – unsere Heimat eingeschlossen – ähnlich. Das einfachste Modell, das man sich von einem bestimmten Asteroiden macht – basierend auf allen verfügbaren Messdaten – postuliert in der Regel, dass Kern und äußerste Schicht aus den gleichen Materialien bestehen.

Planetoiden sind zu klein, um im Zentrum Metall zu verflüssigen, dafür ist der Druck nicht hoch genug. Das unterscheidet sie also von der Erde. Möglicherweise war aber ein Eisen-Nickel-Asteroid in seiner Geburtsphase flüssig, und wurde später von einer Gesteinsschicht eingehüllt, so dass heute ein Kleinplanet resultiert, der einen festen Metallkern besitzt, aber an der Oberfläche steiniges Geröll aufweist.

Weil der physikalische und chemische Aufbau von Asteroiden nicht leicht zu



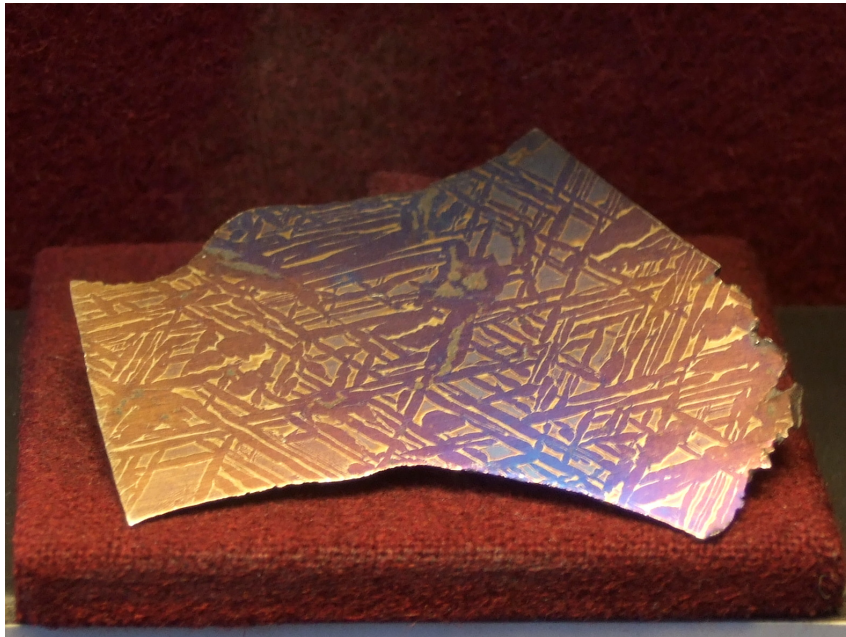


Abbildung 15.1: Widmannstätten-Struktur des Eisenmeteoriten Hraschina, der im 18. Jahrhundert in Kroatien aufschlug [84].

verstehen ist, musste man in den letzten Jahren die bis dato etablierten Vorstellungen revidieren: Die meisten genauer untersuchten Kleinplaneten sind keine monolithischen Felsbrocken, sondern 'Geröllhaufen', die nur durch die Gravitation zusammengehalten werden. Das Foto 14.4 auf Seite 161 der Oberfläche des Asteroiden (101955) Benu zeigt diese Struktur sehr deutlich. Ich zitiere einen Wikipedia-Artikel [5]: 'The physical composition of asteroids is varied and in most cases poorly understood.' Ja, diesem Satz ist nichts hinzuzufügen; die Interpretation sollte lauten: Einiges haben wir verstanden, vieles noch nicht, deshalb ist die weitere Asteroidenforschung so wichtig.

Der Versuch, die Asteroiden ihrer chemischen Zusammensetzung nach in 'Schubladen' einzusortieren, scheitert leider auch. Es gibt ungleich mehr Ausnahmen als 'normale' Fälle. Idealisierte Prototypen sind der feste Eisen-Nickel-Brocken (M-Typ) und der Gesteins-Asteroid (S-Typ). Diesen entsprechen die höchsten ( $5 \text{ g/cm}^3$ ) und niedrigsten ( $1 \text{ g/cm}^3$ ) Massendichten. Die kleinsten Werte entsprechen Geröllhaufen. Dazwischen gibt es noch die kohlenstoffreichen Asteroiden (C-Typ). Die Typ-Klassifizierung wird in Kapitel 5 erklärt.

Warum Eisen und Nickel? Eisen ist eines der stabilsten Elemente überhaupt, es hat die höchste auf die Zahl der Nukleonen (26 Protonen plus 30 Neutronen für Fe-56) normierte Kernbindungsenergie. Das bedeutet, dass man Eisenkerne nur durch Energiezufuhr los werden kann: Sie können nicht radioaktiv

zerfallen und man kann sie nicht ohne Energieaufwand zu schwereren Kernen verschmelzen. Daher gibt es viel Eisen im Universum: Einmal produziert, zum Beispiel in Supernova-Explosionen, bleibt es uns für immer erhalten. Für das im Periodensystem der Elemente ganz in der Nähe von Eisen anzutreffende Material Nickel gilt ähnliches: Das häufig vorkommende Isotop Ni-58 (28 Protonen plus 30 Neutronen) ist fast genau so aufgebaut wie Eisen und hat ebenfalls eine sehr hohe normierte Kernbindungsenergie. Entsprechend stabil ist es. Deshalb ist es nicht überraschend, dass sowohl auf der Erde als auch auf Asteroiden Legierungen der beiden Metalle Eisen und Nickel sehr häufig anzutreffen sind.

Und Gestein? Das ist kein präzise definierter Begriff, auch wenn wir natürlich alle zu wissen glauben, was Steine sind! Sowohl die physikalische Struktur wie auch die chemische Zusammensetzung können variieren. Charakteristisch ist, dass anorganische Mineralien dominieren, insbesondere das Element Silizium spielt eine große Rolle. Natürlich tritt es nicht in Reinform auf, sondern meist als Bestandteil von Silikaten, das sind Verbindungen mit Sauerstoff. Siliziumdioxid kennen wir als Hauptbestandteil von Sand. Die Erdkruste besteht zu einem Viertel aus Silizium (und wäre damit ein sehr großer S-Typ-Asteroid), das wird nur noch getoppt vom Sauerstoff mit einem Gewichtsanteil von 46%.

Die am 24.9.2023 von der Raumsonde **OSIRIS-REx** auf der Erde abgelieferte Materialprobe des Asteroiden **(101955) Bennu** zeigt Abbildung 15.2. Die Analyse des lockeren Gesteinsmaterials ist im vollen Gange, Spuren von Wasser und Kohlenstoff wurden schon gefunden.

Woher kommt dieses Gesteinsmaterial? Silizium und Sauerstoff werden auch bei Sternexplosionen oder starken Strahlungsausbrüchen von Sternen erzeugt. In Supernova-Explosionen vom Typ Kern-Kollaps gibt es unter anderem die Entwicklungsphasen 'Sauerstoffbrennen' und 'Siliziumbrennen'. Dabei werden leichtere Elemente zu den jeweils schwereren relativ stabilen Isotopen von Sauerstoff O mit der Ordnungszahl 8 bzw. Silizium Si mit 14 Protonen verschmolzen. Bei der Fusion von  $O + O \rightarrow Si$  wird nicht der gesamte Sauerstoffvorrat des sterbenden Sterns verbraucht, es ist genug für 'uns' und die Asteroiden übrig geblieben. Diese beiden Grundstoffe Sauerstoff und Silizium waren daher auch in 'unserer' protoplanetaren Scheibe vorhanden. Sie verbinden sich leicht miteinander und formen so  $SiO_2$  und kompliziertere Moleküle. Diese Hypothese der Entstehungsgeschichte belegen Studien, die Silikatkristalle in einer Staubscheibe um einen jungen Stern nachgewiesen haben [131].

Bleiben noch die kohlenstoffhaltigen Asteroiden. Auch das Element C ist in Supernova-Explosionen erzeugt und ausgeworfen worden. Es kommt auf der Erdkruste nicht so häufig vor wie Si und O, stark angereichert ist Kohlenstoff

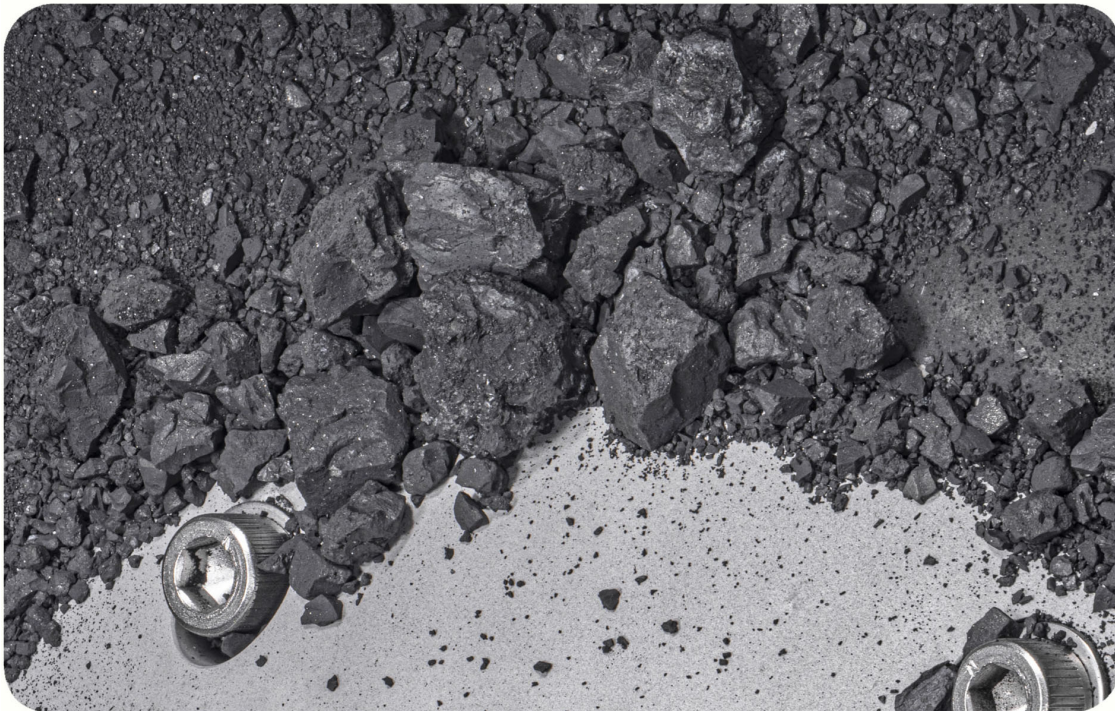


Abbildung 15.2: Materialprobe des Asteroiden (101955) Bennu [181], die von der Raumsonde OSIRIS-REx zur Erde transportiert wurde. Der Bildausschnitt ist etwa 10 cm breit.

aber natürlich in Lebewesen. Asteroiden vom C-Typ sind dagegen oft anzutreffen, drei Viertel aller bekannten Kleinplaneten werden so klassifiziert. Allerdings bedeutet dies nicht, dass diese Planetoiden überwiegend aus Kohlenstoff bestehen. Vielmehr sind es eher Stein-Asteroiden, die zumindest an der Oberfläche einen C-Anteil der Größenordnung Prozent besitzen. Das ist eher wenig, der Kohlenstoff bestimmt aber maßgeblich die Reflexionsspektren und damit den Asteroiden-Typ im Tholen-Schema, das ausführlicher im Kapitel 5 vorgestellt wird. Die kohlenstoffhaltigen Asteroiden sind also den Steinmeteoriten vom Typ S recht ähnlich.

Soweit die idealisierte Sicht der Dinge. Die Realität ist ungleich komplexer: Erstens gibt es jede erdenkliche Mischform – mal mehr Eisen-Nickel, mal weniger, mal solche Mineralien, mal andere. Zweitens findet man nicht nur die ‘klassischen’ oben genannten Elemente, Moleküle und Mineralien, sondern viele weitere. Wie schon erwähnt, enthält (1) Ceres Wasser, aber offenbar gibt es Eis auch auf dem kleineren Planetoiden (24) Themis und weiteren. Und auch organische Verbindungen wurden entdeckt – mehr dazu in Kapitel 17.

Interessant ist auch die Frage, welche Materialien auf oder in Asteroiden häu-

figer vorkommen als auf der Erde. Ein wichtiges Beispiel ist das Metall Iridium, das auf der Erde seltener ist als Gold. Genauer: In der Erdkruste findet man nur (noch) wenig von diesem Element, da es ähnlich wie Eisen oder Nickel wegen seiner hohen Massendichte von  $22,6 \text{ g/cm}^3$  bei der Entstehung unseres damals noch weitgehend flüssigen Heimatplaneten ins Erdzentrum abgesunken ist. Zumindest die kleineren Asteroiden wurden nie flüssig, und sie haben auch kein starkes Gravitationsfeld, so dass eine Dichte-basierte Trennung der Materialien praktisch nicht stattfand. Iridium ist daher auf Asteroiden in höherer Konzentration anzutreffen als in den obersten Erdschichten. Eine hohe Iridiumkonzentration in bestimmten Erdschichten ist daher ein Indikator für einen Asteroideneinschlag – insbesondere für den 'Dino-Killer', der in Kapitel 19 diskutiert wird.

Ich finde es beeindruckend, wie vielfältig sich die Asteroidenwelt präsentiert – trotz scheinbar fast gleicher Anfangsbedingungen, die vor knapp 5 Milliarden Jahren in der protoplanetaren Scheibe anzutreffen waren.



## Kapitel 16

### Wie verändern sich Asteroiden mit der Zeit?

Im Gegensatz zu den **Planeten** und großen Monden in unserem Sonnensystem, die mit verschiedenen - teils spektakulären - atmosphärischen Phänomenen und zum Teil mit deutlichen geologischen Aktivitäten auf sich aufmerksam machen, geht es auf den Oberflächen der Asteroiden geruhsamer zu. Eine Ausnahme bilden die großen Vertreter, insbesondere die **Zwergplaneten**: Sowohl (1) **Ceres** als auch (134340) **Pluto** zeigen klare Indizien für Vulkanismus.

Auch mit '**Schweifsternen**' können die kleineren Asteroiden nicht konkurrieren: Mit den **Kometenkernen** passiert auch lange praktisch nichts, solange sie im **Kuiper-Gürtel** oder in der **Oortschen Wolke**, jenseits der **Planeten**, ihre **Bahnen** ziehen. Geraten sie aber in Sonnennähe und werden aufgeheizt, werden feste Stoffe wie Eis flüssig oder gasförmig. Es entstehen Koma sowie Schweif aus Ionen und Staubteilchen. Wie wir heute wissen, können auch Asteroiden ausgasen, aber nur im bescheidenen Rahmen - andernfalls würde man sie ja als Kometen klassifiziert haben.

#### 16.1 Berührungen und mehr

Ausnahmen im ruhigen Leben von Asteroiden bilden natürlich Kollisionen mit anderen Himmelskörpern. Diese sind zwar selten, aber über das Alter des Sonnensystems von 4 Milliarden Jahren summiert sind es doch viele Einschläge, die ein Asteroid aushalten muss. Dies erkennt man an der Vielzahl von Kratern auf Asteroiden, ähnlich wie auf **Merkur** oder Mond. Stöße zwischen zwei Asteroiden sind noch nicht direkt beobachtet worden. Sehr wohl aber Einschläge auf dem Mond, siehe Kapitel 10.3 und 19.7.

Indirekte Evidenz für eine letztlich fatale Kollision zwischen zwei Asteroiden liefert die Geschichte des Zwitters **P/2016 G1** [67]. Dieses 200-400 m große

Objekt wurde zunächst als Komet klassifiziert, wegen seines Koma-ähnlichen diffusen Auftretens. Später erkannte man, dass es sich um Auswurf von Asteroidenmaterial in Form von Geröll handelte, hervorgerufen durch einen Impakt eines viel kleineren Asteroiden, mit einer Aufprall-Geschwindigkeit von 5000 m/s. Man konnte diese Kollision sogar datieren, es war der 6.3.2016. Der Einschlag war so heftig, dass der Asteroid völlig zerstört wurde und im Jahr 2017 'von der Bildfläche verschwunden' war. Deshalb hat er nicht mal einen für Asteroiden angemessenen Namen erhalten.

Können zwei Asteroiden beim Zusammentreffen auch aneinander kleben bleiben? Das scheint beim heutigen Asteroiden (25143) *Itokawa* tatsächlich zu beobachten zu sein. Abbildung 16.1 zeigt seine Hantelform. Man konnte nachweisen<sup>1</sup>, dass die beiden Hantel-Enden unterschiedliche Dichten aufweisen [36], siehe Abbildung 16.1 unten. Das legt die Schlussfolgerung nahe, dass dieser Planetoid *Itokawa* vor langer Zeit beim Zusammenprall zweier kleinerer Asteroiden entstanden ist. Ein weiteres schönes Beispiel für einen 'contact binary' ist der in Abbildung 13.1 auf Seite 141 gezeigte Asteroid (486958) *Arrokoth*.

## 16.2 Bahnänderungen

Kommen sich ein Asteroid und ein deutlich massiveres Objekt nah, beeinflusst das den Kleinplaneten auch ohne direkte Berührung: Seine *Flugbahn* wird verändert. Wie in Unterkapitel 19.6 zu lesen ist, wird zum Beispiel (99942) *Apothis* im Jahr 2029 im Gravitationsfeld der Erde deutlich abgelenkt werden, bei seinem Vorbeiflug in sehr kleinem Abstand. Solche Bahnänderungen können zu qualitativ ganz neuen Trajektorien führen. So spekuliert man, dass es sich bei einigen der Planetenmonde um vor langer Zeit eingefangene Asteroiden handelt.

Besonders anfällig für Änderungen der Bahnelemente sind Kleinplaneten mit sehr langgestreckten Bahnen; diese fliegen häufiger mal in der Nähe von *Planeten* vorbei. Während dies den letzteren nicht viel ausmacht – wegen der viel größeren Massen, führt dies zu mehr oder weniger deutlichen Änderungen des Asteroidenorbits. So hat sich der *Perihelabstand* des Kleinplaneten (172678) 2003 *YM<sub>137</sub>*, der sich mit einer *Exzentrizität* von etwa 0,7 durch das Sonnensystem bewegt, in den letzten 12 Jahren um etwa 10% verringert [76]. Auf seinem Weg kommt er Erde, *Mars* und *Jupiter* recht nah.

Auch solche kleinen Himmelskörper, die eine *Bahnresonanz* mit *Jupiter* aufweisen, können Änderungen ihrer Bahnelemente auf kurzen Zeitskalen erle-

<sup>1</sup>mit Hilfe des weiter unten beschriebenen *YORP-Effekts*.



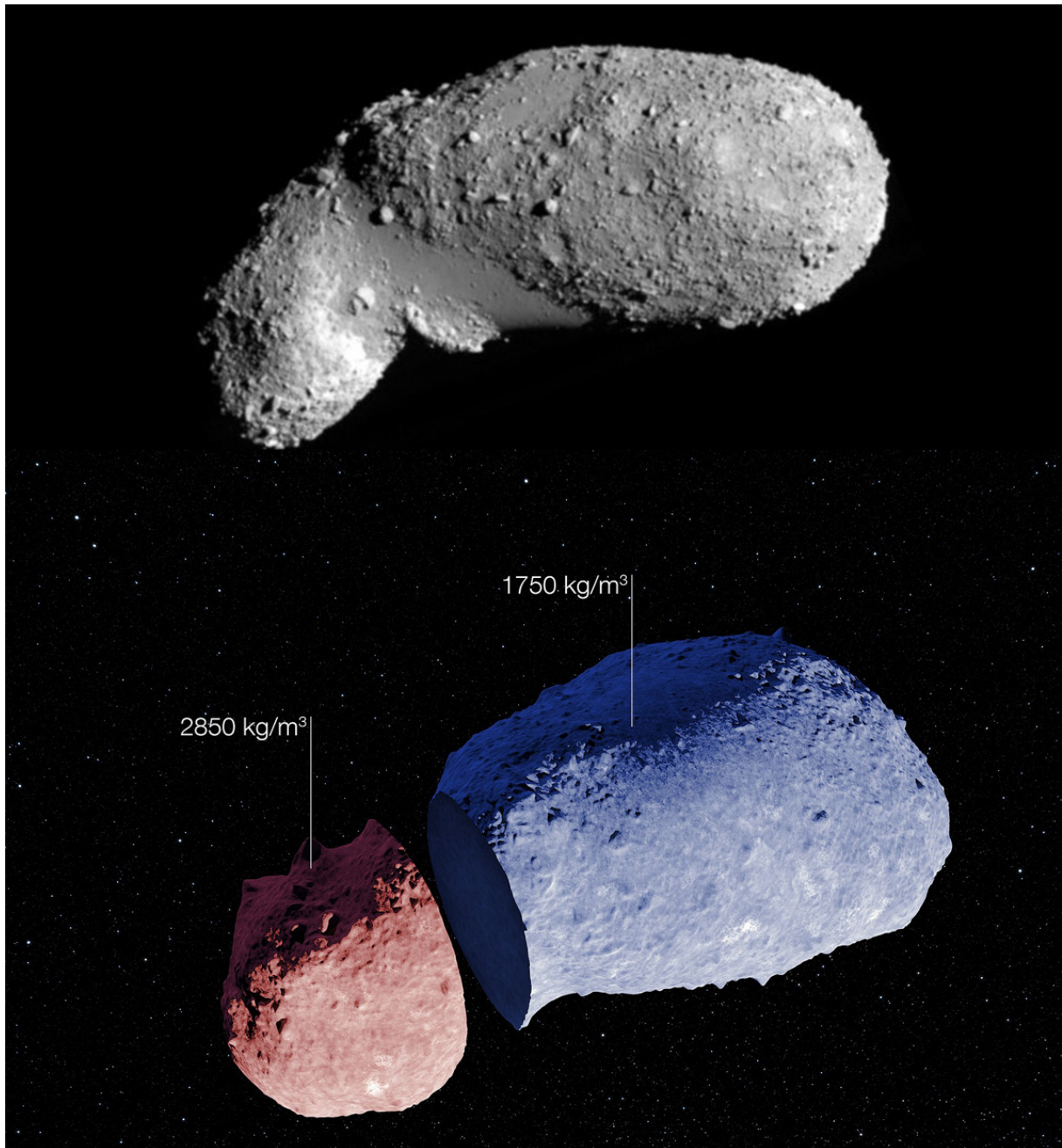


Abbildung 16.1: Der Asteroid (25143) *Itokawa*. Oben ist eine Aufnahme der Raumsonde *Hayabusa* gezeigt [85]. Die Form erinnert an eine Hantel. Die maximale Ausdehnung beträgt 330 m. Unten ist schematisch dargestellt, wie sich *Itokawa* aus zwei Teilen, die unterschiedliche Massendichten besitzen, zusammensetzen lässt [101].

ben. Ein Beispiel ist der schon im Jahr 1888 entdeckte und sehr gut vermessene Asteroid (279) Thule, dessen Bahn eine 3:4-Resonanz mit Jupiter bildet. Laut den Daten des MPC hat sich die Exzentrizität zwischen November 2011 und November 2023 von 0,009 auf 0,044 vergrößert. Das sieht nicht dramatisch aus, ist aber doch bemerkenswert für einen Zeitraum von nur 12 Jahren.

Ein weiteres Beispiel für Bahnänderungen durch enge Begegnungen mit großen Planeten liefert der Zentaur (2060) Chiron, der schon in Kapitel 5 vorgestellt wurde. Abbildung 16.2 zeigt seine exzentrische Bahn, auf der er periodisch Saturn und Uranus einen Besuch abstattet. Man kann rekonstruieren, dass

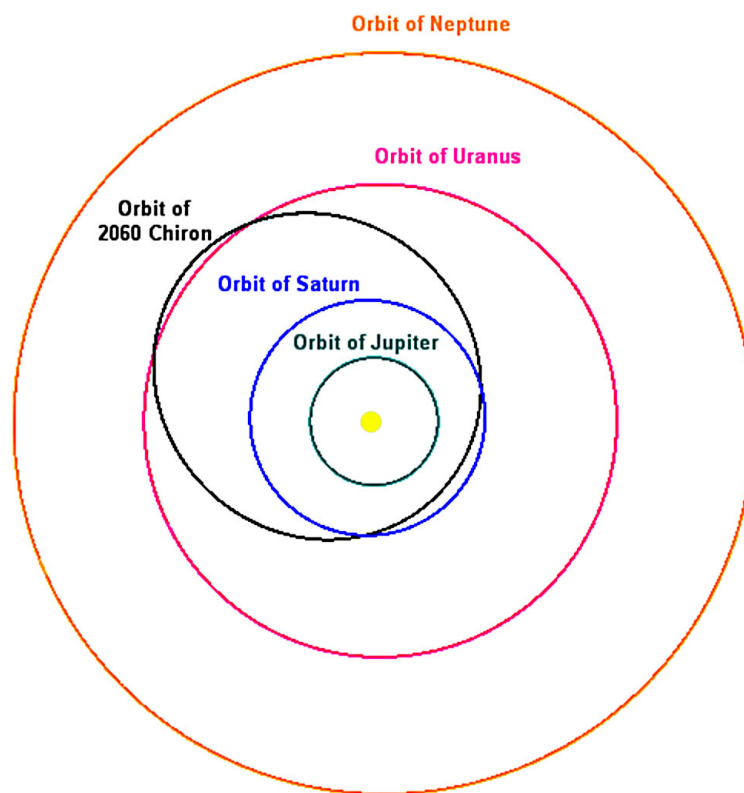


Abbildung 16.2: Bahn des Asteroiden-Kometen-Zwitters (2060) Chiron [83].

er Saturn im Jahr 720 recht nahekam; dadurch wurde seine große Halbachse um etwa 6% reduziert [72, 195].

## 16.3 Selbstzerstörung

Von **Kometen** wissen wir, dass Gezeitenkräfte sie auseinanderreißen können, wenn sie **Planeten** zu nahekommen. Wie das funktioniert, wird in Kapitel 14.2 erklärt. Das konnte im Jahr 1994 im Fall der Annäherung des Kometen **Shoemaker-Levy-9** an **Jupiter** von der Erde aus beobachtet werden: Der Komet zerbrach in mehr als 20 Fragmente, die dann auf den Planeten stürzten. Asteroiden kann natürlich auch ein solches Schicksal ereilen.

Auch ohne Interaktion mit einem zweiten Himmelskörper kann sich ein Asteroid gewissermaßen selbst zerstören. Ein wenig Unterstützung braucht er dabei aber schon – in Form von Sonnenlicht, wie die nachfolgende Geschichte eines größeren Planetoiden zeigt: Im Januar 2014 hat das Hubble Space Telescope ein bemerkenswertes Phänomen aufgezeichnet: Der Asteroid **P/2013 R<sub>3</sub>** ist auseinandergebrochen [66]! Abbildung 16.3 zeigt eine Sequenz von Fotos, die das Zerbrechen des ursprünglich 800 m großen Asteroiden in mehrere Einzelbrocken dokumentieren. Schon das erste Bild zeigt acht Fragmente (A1-A4, B1-B2, C1-C2). Im vierten Foto, das etwa 85 Tage später aufgenommen wurde, haben sich diese deutlich voneinander entfernt, und es sind auch weitere sichtbar (A5-A7).

Als Grund für diese Katastrophe werden Zentrifugalkräfte vermutet: Der Asteroid ist so schnell um seinen Schwerpunkt rotiert, dass die zusammenhaltenden Kräfte, Gravitation und elektrische Kräfte, nicht mehr ausgereicht haben. Aber warum ist es dazu gerade im Jahr 2013 gekommen, warum nicht viel früher? Und wieso konnte ein solcher Himmelskörper überhaupt entstehen? Offenbar hat die Drehbewegung mit der Zeit zugenommen.

Als Grund dafür wird der **YORP-Effekt** vermutet. Dieses Akronym steht für die Namen der Astronomen **Yarkovsky**, **O'Keefe**, **Radzievskii** und **Paddack**. Diese haben erkannt, dass ein asymmetrischer Körper das einfallende Sonnenlicht *nicht* in alle Richtungen gleich stark reflektiert, so dass ein Netto-Drehmoment entsteht, das die Rotationsgeschwindigkeit ändern kann. Dies wird in Abbildung 16.4 illustriert. Das Licht der Sonne ist gelb eingezeichnet. Die solaren Photonen üben eine kleine Kraft auf den Himmelskörper aus, man spricht vom Strahlungsdruck. Diese schieben den Asteroiden etwas von der Sonne weg, beeinflussen also seine Bahn geringfügig, lassen ihn aber nicht rotieren – wenn er kugelförmige Gestalt besitzt und mit einer gleichmäßigen Oberfläche ausgestattet ist.

Das ist hier aber nicht der Fall. Die roten Pfeile (A,B) in Abbildung 16.4 symbolisieren das von den 'Ohren' des Asteroiden abgestrahlte Licht - es handelt sich um direkte Reflexion von Sonnenlicht oder thermische Abstrahlung des aufgewärmten Körpers. Hier weisen die roten Pfeile in unterschiedliche Richtungen,



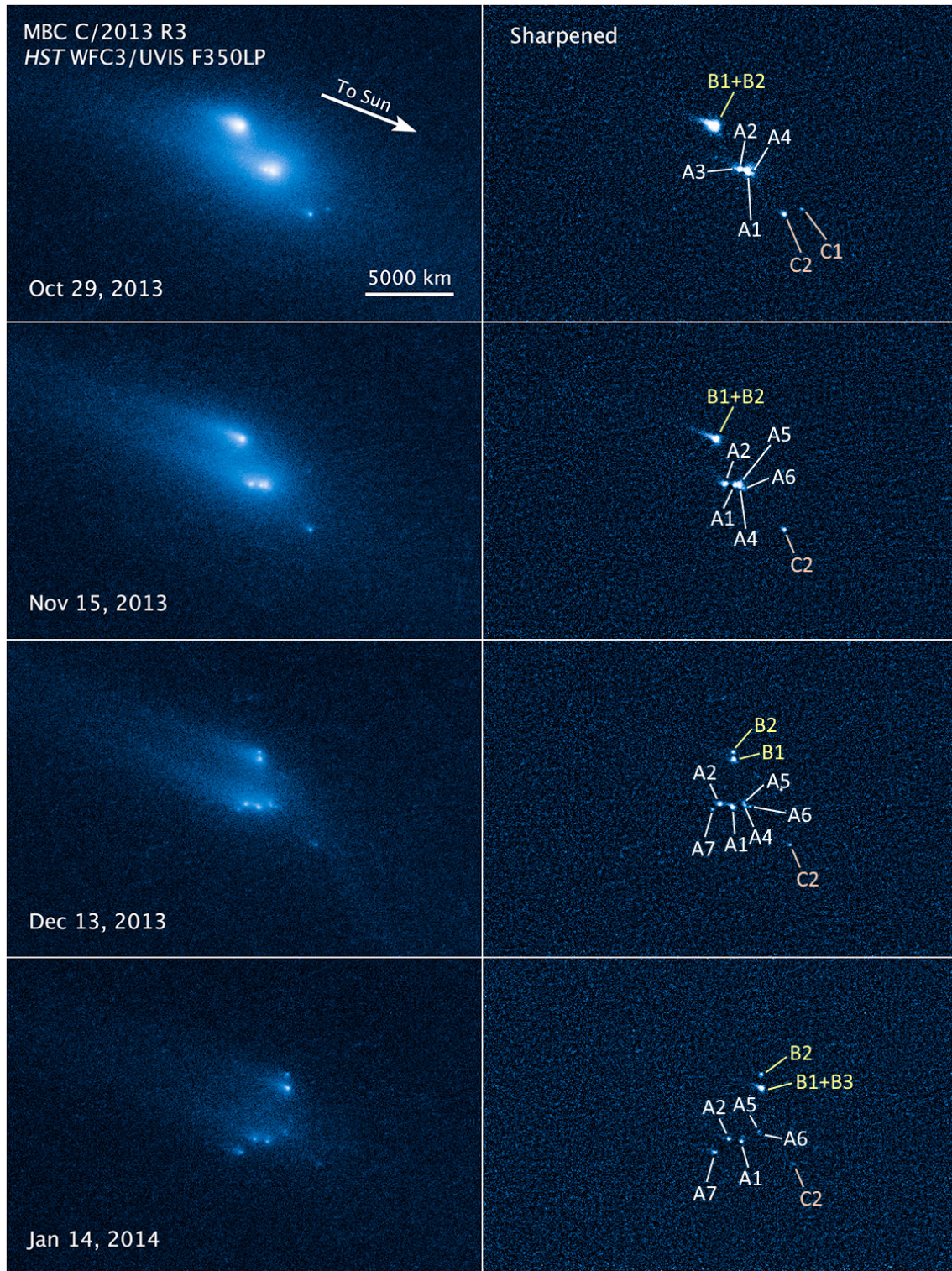


Abbildung 16.3: Desintegration des Asteroiden-Kometen-Zwitters  $P/2013 R_3$ , aufgenommen mit dem **Hubble Space Telescope** [91].

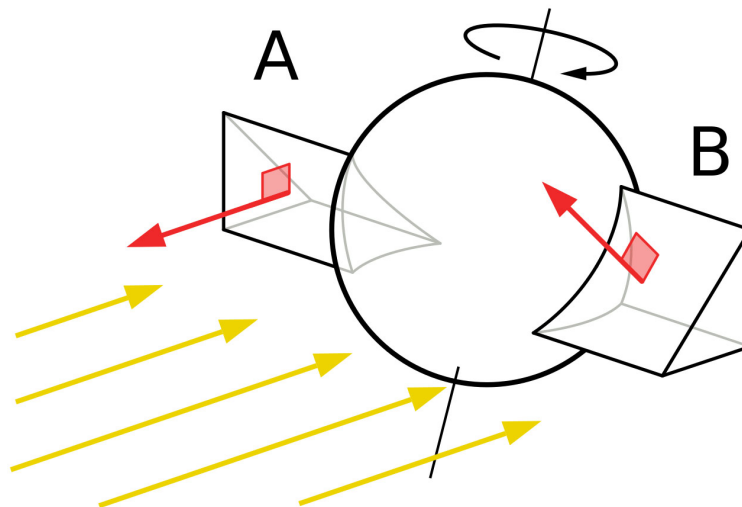


Abbildung 16.4: **YORP-Effekt**, der langfristig die Rotation eines Asteroiden um eine Achse durch seinen Schwerpunkt beeinflussen kann [109]. Erläuterungen siehe Text.

so dass die mit den Rückstoßkräften A und B verbundenen Drehmomente sich nicht kompensieren. So kann die Rotation des Asteroiden langfristig verlangsamt werden oder aber zunehmen. Ab welcher Umdrehungsgeschwindigkeit es kritisch wird, zeigt eine kleine Rechnung in Kapitel 6.

Die Bezeichnung **P/2013 R<sub>3</sub>** deutet übrigens auf einen **Kometen** hin, tatsächlich ist es ein **'aktiver' Asteroid**: er erscheint wegen seines kleinen Schweifs wie ein Komet, besitzt aber eine für Asteroiden typische Umlaufbahn - er bewegt sich im **Hauptgürtel**.

Ein weiteres Beispiel für einen durch den YORP-Effekt stark beeinflussten Asteroiden ist **(6478) Gault**. Dieser 'lebt' noch, aber durch die Abgabe von Staubteilchen sind zwei prominente Schweife entstanden, die Abbildung 16.5 zeigt. Möglicherweise fanden zu verschiedenen Zeiten Bewegungen auf der Oberfläche statt, die durch die hohe und zunehmende Rotationsgeschwindigkeit ausgelöst wurden. So sind separate Schweife entstanden. Gault ist im wahrsten Sinne des Wortes ein **aktiver Asteroid**.



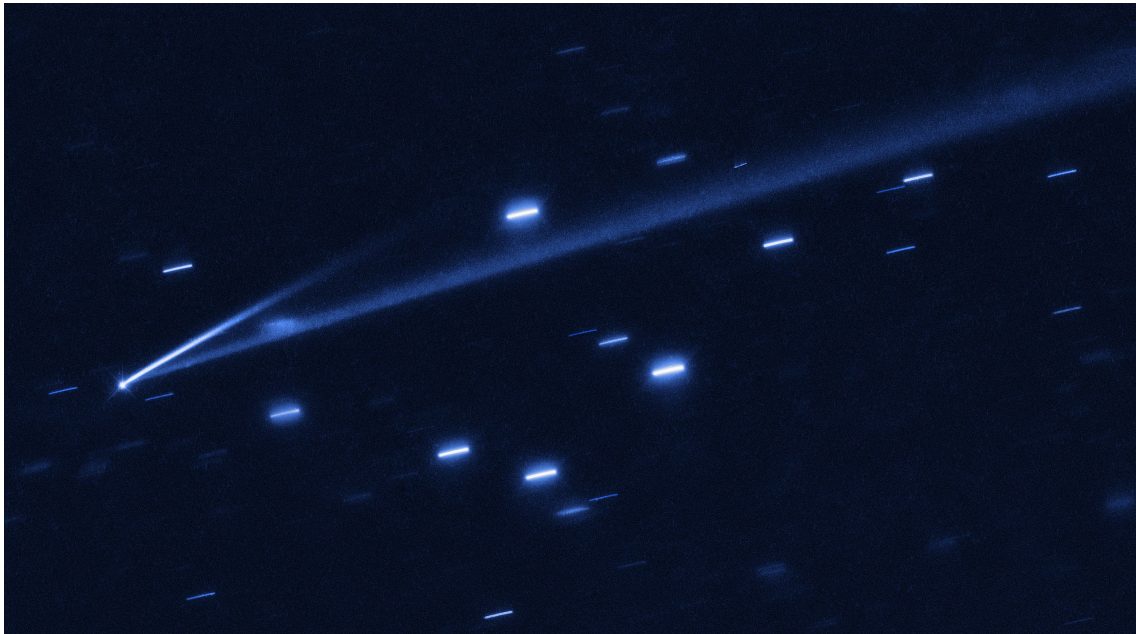


Abbildung 16.5: Schweife des Asteroiden (6478) Gault, aufgenommen mit dem **Hubble Space Telescope** [97]. Der längere Schweif ist fast eine Million km lang. Die Sterne im Hintergrund sind durch die Langzeitbelichtung, bei der auf den Asteroiden nachgeführt wurde, als Strichspuren abgebildet.

## 16.4 Erosion

Schließlich gibt es noch die dauerhaft auf die Oberfläche einwirkende Strahlung aus dem Weltraum, von Sonnenlicht über Korpuskelstrahlung unseres Sterns bis zur kosmischen Strahlung aus der Ferne des Alls. Auch Mikrometeoriten treffen regelmäßig auf. Dadurch wird das Asteroiden-Material physikalisch und chemisch verändert, insbesondere dunkelt die Oberfläche mit der Zeit ab. Man spricht von 'Weltraumverwitterung'. Auch thermischer Stress trägt dazu bei, denn die Kleinplaneten werden ja aufgrund ihrer Rotation periodisch auf ihrer temporären 'Sonnenseite' erwärmt und dann wieder abgekühlt (Tag-Nacht-Rhythmus). Auch entlang des Umlaufes um die Sonne ändern sich die Temperaturen, insbesondere bei stark exzentrischen **Bahnen** und/oder wenn die Rotationsachse nicht senkrecht auf der Bahnebene steht (Jahreszeiten).



## Kapitel 17

### Kann es Leben auf Asteroiden geben?

Zunächst muss natürlich geklärt werden, was wir unter 'Leben' überhaupt verstehen wollen. Es gibt keineswegs eine allgemein akzeptierte Definition, aber zwei unstrittige Charakteristika sind:

- Stoffwechsel, also Austausch von Energie und Materie mit der Umgebung
- Reproduktion

Wir wollen hier nicht in diese Diskussion einsteigen. Auf jeden Fall sollten wir Menschen unsere Phantasie nicht unnötig beschränken und – wie ja auch in vielen Science-Fiction-Werken herausgestellt wird – darauf vorbereitet sein, dass andere Lebensformen sich von unserer radikal unterscheiden können. Der in vielerlei Hinsicht dem Menschen sehr ähnliche **Filmheld 'E.T.'** gibt also für die Variationsbreite der möglichen Lebensformen kein gutes Beispiel ab. . .

Die Frage nach der Herkunft des **irdischen Lebens** ist sehr alt, insbesondere wird schon seit Jahrhunderten darüber spekuliert, dass es durch 'Lebenskeime' von außerhalb eingeschleppt wurde. Das ist die 'Panspermie-Theorie'. Als Transportmittel könnten **Kometen** oder Asteroiden fungiert haben, die in der Frühzeit des Sonnensystems mit der Erde kollidiert sind. Bei den 'Keimen' könnte es sich um Bakterien oder komplexe organische Moleküle gehandelt haben. Im Eis von Kometen könnten diese lange konserviert werden. Wie diese Lebenskeime vor Milliarden von Jahren außerhalb der Erde entstanden sind, bleibt aber unbeantwortet. Die Panspermie-Theorie ist weiterhin nur eine Spekulation.

## 17.1 Suche nach Leben auf Asteroiden

In jedem Fall ist die Suche nach interessanten organischen Molekülen auf **Kometen**, Asteroiden und in Meteoritenmaterial sehr spannend. Selbst wenn die genannten Himmelskörper seinerzeit nicht die Erde 'besamt' haben, können wir von ihnen viel über die Entstehung solcher Bausteine des Lebens im frühen Sonnensystem lernen, und damit auch über die Entwicklung des Lebens auf unserem Planeten, also über unsere eigene Herkunft.

Schon in Meteoriten wurden alle fünf Nukleinbasen entdeckt, die man als Bausteine der Nukleinsäuren RNA (Ribonukleinsäure) und DNA (Desoxyribonukleinsäure) benötigt. Letztere sind Riesenmoleküle, die die menschliche Erbinformation tragen (DNA) bzw. diese genetischen Daten transportieren und in sich in Zellen bildende Proteinmoleküle übersetzen (RNA). Unter anderem im australischen **Murchison-Meteoriten** wurden die beiden Nukleinbasen Thymin und Cytosin gefunden [150], die anderen drei, Adenin, Uracil und Guanin, waren auch schon früher in anderen Meteoriten entdeckt wurden. Abbildung 17.1 zeigt die chemischen Formeln für die aus Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N) bestehenden Cytosin- und Uracil-Moleküle. Bei der Analyse von Meteoritenmaterial besteht allerdings die Ge-

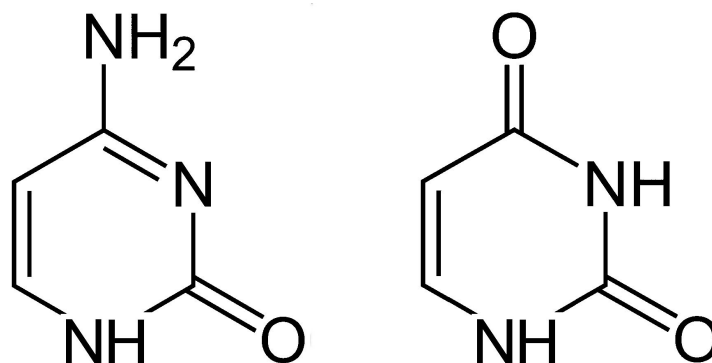


Abbildung 17.1: Zwei der fünf Nukleinbasen, Cytosin (links) und Uracil (rechts).

fahr, dass dieses durch irdische Moleküle kontaminiert worden ist.

Mit großer Spannung wurde daher die Materialprobe erwartet, die die **Hayabusa2-Sonde** vom Asteroiden (162173) **Ryugu** aufgenommen hat. Hier gibt es praktisch keine Möglichkeiten der Verunreinigung. Im Dezember 2020 wurde das Asteroidenmaterial, einige Gramm, auf der Erde abgeliefert, siehe auch Kapitel 13, und anschließend analysiert. Es wurden Uracil, mehrere Aminosäuren und Vitamin B3 gefunden; die letzteren organischen Moleküle sind

wie die Nukleinbasen aus den Elementen Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoff zusammengesetzt. Sie übernehmen wichtige Funktionen im menschlichen Körper; die Aminosäuren spielen eine entscheidende Rolle beim Aufbau der Muskeln. Im September 2023 hat die NASA-Sonde **OSIRIS-REx**, die im Kapitel 13 kurz beschrieben wird, Material vom Asteroiden **(101955) Bennu** auf die Erde abgeworfen. Sogar die Tagesschau berichtete im Oktober 2023 über erste Analyseergebnisse [61] der 250 g schweren Geröllprobe: Es wurden die für (irdisches) Leben wichtigen Substanzen Wasser und Kohlenstoff gefunden und somit die Erwartungen bestätigt.

Was kann man aus diesen Funden lernen? Leben auf Asteroiden hat man damit natürlich noch nicht entdeckt. Aber die Entstehung der Bausteine von organischem Leben in unserem Sonnensystem ist offenbar ein ganz natürliches Phänomen, und daher ist es nicht überraschend, dass auch auf der Erde diese Moleküle anzutreffen sind – ohne die Panspermie-Theorie bemühen zu müssen.

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Suche nach außerirdischem Leben auch wieder den anderen Himmelskörpern in unserem eigenen Sonnensystem zugewandt, nachdem lange Zeit ausgeschlossen worden war, dass es auf anderen **Planeten** wegen der dort lebensfeindlichen Umwelt organisches Leben geben könnte. Das Interesse richtet sich insbesondere auf die Monde von **Jupiter** und **Saturn**. So wird spekuliert, dass auf Europa unter-‘irdische’ Ozeane Leben beherbergen könnten. Dieser Mond ist – ebenso wie die anderen Galileischen Jupitermonde Kallisto, Europa und Io – wegen des großen Abstandes von der Sonne an der Oberfläche sehr kalt. Aber Wärme kann im Inneren auf verschiedene Weise erzeugt werden, oder ist noch als Restwärme aus der Entstehungszeit der Monde vorhanden.

Eine Energiequelle ist unbedingt nötig, um jedweden ‘Lebensmotor’ anzutreiben und um die Umgebungstemperatur auf einem akzeptablen Niveau halten zu können. Eine wichtige Wärmequelle sind die schon in Kapitel 7 diskutierten Gezeitenkräfte, dank des benachbarten Riesenplaneten Jupiter. Diese Kräfte walken gewissermaßen die Materie im Inneren periodisch durch, dabei entsteht Reibung und Wärme. Auch Radioaktivität kann beitragen. Schließlich bewirkt die Gravitationskraft auch heute noch ein langsames Schrumpfen von sich abkühlenden Himmelskörpern, wodurch Wärme entsteht, aber dieser Effekt ist für Monde und Asteroiden vernachlässigbar.

Dass es sich bei diesen Monden nicht um inaktive (Eis-)Klumpen handelt, zeigt auch die bemerkenswerte vulkanische Tätigkeit, die man auf Io beobachtet hat. Bei den Saturnmonden ist Enceladus ein sehr guter Kandidat für die Heimat von Lebewesen. Dort hat man Wasser-Vulkane entdeckt, die Abbildung 17.2 zeigt. Diese könnten ohne innere Wärmequelle nicht funktionieren.

Leben könnte auf diesen Monden am Boden eines Ozeans aus flüssigem Was-

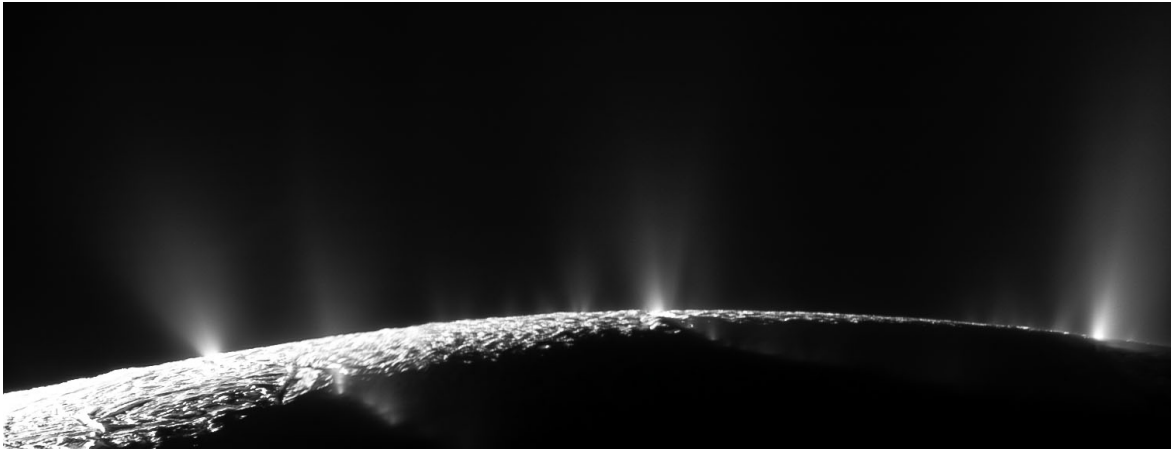


Abbildung 17.2: Wasserfontänen auf dem Saturnmond Enceladus, von der Raumsonde Cassini aus aufgenommen [95].

ser entstehen. Inspiriert werden diese Ideen durch die Ökosysteme, welche in irdischen Meeren in großer Tiefe durch hydrothermale Quellen angetrieben werden, und ganz ohne Sonnenlicht auskommen.

Die genannten Monde kommen als Lebenswelten in Frage, weil sie starke innere Wärmequellen besitzen. Diese Bedingung kann aber nur von vergleichsweise großen Himmelskörpern erfüllt werden, so wächst zum Beispiel die Gezeiten-Heizleistung proportional zur fünften Potenz des Durchmessers eines Mondes oder Asteroiden an. Gibt es Asteroiden, die in dieser Liga mitspielen können? Die vier großen Jupitermonde haben Durchmesser zwischen 3100 und 5300 km, der Eismond Enceladus bringt es auf 500 km. **Ceres** ist 950 km groß, siehe Abbildung 1.2. Ob die Gezeitenheizung stark genug ist, hängt allerdings auch vom Abstand zu Jupiter ab, der im Fall von Ceres deutlich größer ist als bei dessen Monden. Indessen kommt der Zwergplanet der Sonne viel näher, ist also an der Oberfläche weniger kalt. Auch auf Ceres hat man vulkanische Aktivitäten beobachtet, und es gibt dort viel Wasser, meist in fester Form, aber auch als Flüssigkeit in bestimmten Bereichen. Die **Dawn-Mission** hat von ihrer Umlaufbahn um Ceres aus mit spektroskopischen Methoden sogar einfache organische Moleküle identifiziert.

Zusammenfassend halten wir fest: Nein, auch Ceres zeigt bisher keine Anzeichen von Leben in Gegenwart oder Vergangenheit. Aber dieser Zwergplanet hat, wie einige der großen Monde unseres Sonnensystems, zumindest das Potential für die Entwicklung von Lebensformen. Selbst für den eiskalten Zwergplaneten Pluto wird spekuliert, dass Leben zumindest in ökologischen Nischen entstanden sein könnte.

## 17.2 Kolonisation von Asteroiden

In der Science-Fiction-Literatur wird natürlich auch über Menschen oder ähnliche Lebewesen spekuliert, die Asteroiden kolonisieren und/oder dort Bergbau betreiben, siehe Kapitel 22 und 20. Mit welchen Herausforderungen müssten von der Erde ausgesandte Astronauten rechnen, wenn sie sich auf einem Asteroiden niederlassen wollten? Ähnlich wie bei Mond und **Mars** sind natürlich bittere Kälte und enorme Temperaturschwankungen zu überstehen. Eine zum Atmen geeignete Lufthülle gibt es nirgendwo außerhalb unseres Heimatplaneten. Sauerstoff und Nahrung müssen also zunächst mitgeführt werden – und können später eventuell vor Ort erzeugt werden. Während die Marsatmosphäre immerhin spezielle Helikopterflüge ermöglicht – wie das autonome Mars-Fluggerät ‘Ingenuity’ im Jahr 2021 demonstriert hat – und Winde produziert, ist das auf Asteroiden genau so wenig zu erwarten wie auf dem Mond: Die Masse ist zu klein, um Gase wie Sauerstoff oder Stickstoff durch die Gravitation an den Himmelskörper zu binden.

Die schwache Schwerkraft auf dem Mond wurde ja durch die Apollo-Astronauten sehr schön durch ihre großen Hüpfen demonstriert. Das mag noch lustig erscheinen, aber auf Asteroiden, die ja viel weniger Masse haben als der Mond, wird das zu einem ernstem Problem: Wenn sich Astronauten auf der Oberfläche ein wenig zu fest abstoßen, riskieren sie, aus dem Schwerfeld des Asteroiden herauszufliegen, also auf Nimmerwiedersehen im Weltraum zu verschwinden. Die Asteroidenbewohner sind also mehr oder weniger ‘schwerelos’ – das ist gewöhnungsbedürftig, hat aber natürlich auch Vorteile, weil dann Bewegungen weniger anstrengend sind. Menschen haben das zwar noch nicht ausprobiert, aber der ‘Lander’ Philae, der mit der Raumsonde **Rosetta** im Jahr 2014 zum **Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko** transportiert wurde, hat es vorgemacht: Fast zwei Stunden dauerte einer seiner Sprünge. . .

Die folgende Grafik 17.3 quantisiert das Problem. Aufgetragen ist links die ‘Asteroidenbeschleunigung’  $a$  an der Oberfläche des Kleinplaneten, sie entspricht der ‘Erdbeschleunigung’ von  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , mit der Körper auf der Erde nach unten fallen. Die rechte Seite des Diagramms zeigt die Mindestgeschwindigkeit, mit der ein Körper von der Oberfläche wegfliegen muss (egal ob nach oben oder horizontal), um das Gravitationsfeld zu verlassen. Im Fall der Erde spricht man von der zweiten kosmischen Geschwindigkeit  $v_2$ , der Wert beträgt  $11.2 \text{ km/s} \approx 40000 \text{ km/h}$ . Für die Berechnung der Kurven in Abbildung 17.3 wurde eine konstante Massendichte aller Asteroiden von  $\rho = 3 \text{ g/cm}^3 = 3 \text{ kg/Liter}$  angenommen. Ein Hochleistungssportler auf der Erde erreicht eine Absprunggeschwindigkeit  $v$  von mehreren Metern pro Sekunde. Wenn sich Astronautinnen und Astronauten auf einem Asteroiden vorsichtig verhalten – zumal sie ja einen schwerfälligen Anzug tragen müssen – können

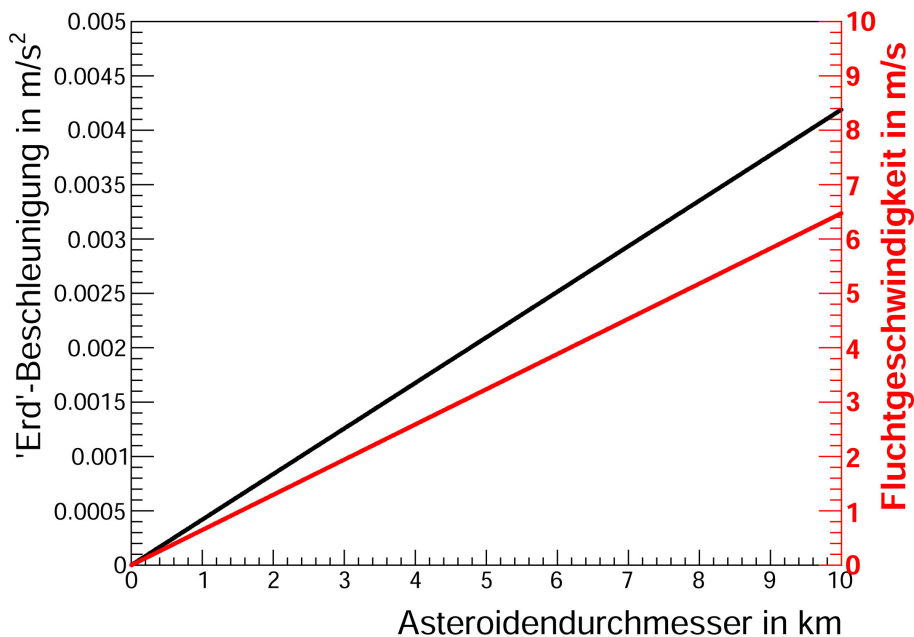


Abbildung 17.3: Links: Fallbeschleunigung  $a$  auf einem Asteroiden als Funktion des Durchmessers  $d$ . Rechts: (Mindest-)Fluchtgeschwindigkeit  $v_2$ , um das Schwerefeld eines Asteroiden zu verlassen.

sie die Grenze  $v < 1 \text{ m/s}$  wahrscheinlich einhalten. Der Vergleich dieses Wertes mit der in Abbildung 17.3 gezeigten Fluchtgeschwindigkeit  $v_2$  zeigt, dass der Asteroid mindestens einen Durchmesser von  $d = 1 \text{ km}$  haben muss, um seine Besiedler nicht bei nächster Gelegenheit zu verlieren. . .

Aber das ist nicht das einzige Problem, auch die Fliehkraft wirkt auf Lebewesen und Objekte. Dieses Thema wurde auch schon in Kapitel 6 angesprochen. Bei Geröll-Asteroiden ist die Rotationsgeschwindigkeit offenbar so klein, dass die Gravitationskraft immer die Zentrifugalkraft überwiegt – sonst wären ja die losen Teile der Oberfläche längst weggeflogen. Aber bei festen, sich schnell drehenden Eisen-Nickel-Asteroiden ist es denkbar, dass in deren Äquatorregion die Fliehkraft dominiert, und alles in den Kosmos expediert wird, das sich nicht irgendwie festhalten kann.



## Kapitel 18

### Können auch Asteroiden Monde haben?

Ja! In Kapitel 1 wurde schon in Abbildung 1.3 auf Seite 5 das sehr schöne Foto aus dem Jahr 1993 gezeigt, welches die **Galileo-Sonde** beim Vorbeiflug am Asteroiden **(243) Ida** aufgenommen hat. Das Bild zeigt rechts einen kleinen Begleiter, den Mond **(243) Isa I Dactyl**. Während Ida 30 km groß ist, bringt es Dactyl nur auf 1.4 km Durchmesser. Der mittlere Abstand zwischen den beiden Himmelskörpern ist mit etwa 100 km verhältnismäßig klein; man vergleiche mit dem Erde-Mond-System: Deren gegenseitige Distanz ist etwa 30-mal größer als der Erddurchmesser. Dactyl ist viel kleiner als Ida - deshalb ist klar, wer von den beiden Himmelskörpern der Mond ist. Das ist aber nicht immer so einfach: man hat mehrere Binärsysteme von Asteroiden gefunden, bei denen beide Partner eine ähnliche Größe besitzen und sich um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Man benutzt dann besser die allgemeine Bezeichnung 'Doppelasteroid'.

Dactyl war der erste Asteroidenmond, der (zufällig!) entdeckt wurde – wenn man mal den Pluto-Mond **Charon** ausklammert, der schon 1978 gefunden wurde und formal auch als Asteroidenmond bezeichnet werden darf. Inzwischen sind mehr als 500 Doppelasteroiden bekannt [17]. Der erste von der Erde aus entdeckte Asteroidenmond ist **Petit-Prince**, der um **(45) Eugenia** umläuft. Der Name des 1998 zum ersten Mal gesichteten Mondes erinnert an das bekannte **Buch** von **Antoine de Saint-Exupéry**. Im September 2022 wurde der Mond **Dimorphos**, der zu **(65803) Didymos** gehört, berühmt, siehe Bild 18.1. Die Sonde DART wurde gezielt auf diesem Mond zum Absturz gebracht, um zu erkunden, inwiefern sich Asteroiden von ihrer Bahn ablenken lassen, siehe Kapitel 13.

Viele Asteroidenmonde wurden mit Teleskopen entdeckt, von Raumsonden oder Satelliten aus, oder mit erdbasierten sehr großen hochauflösenden Instrumenten. Die meisten Entdeckungen beruhen allerdings auf genauen Bestimmungen der **Lichtkurve** von Asteroiden, siehe Kapitel 11. Dabei trägt man



Abbildung 18.1: Asteroid (65803) **Didymos** (links) mit ‘seinem’ Mond **Dimorphos**, im Jahr 2022 aufgenommen von der NASA-Raumsonde **DART** [179]. Didymos ist etwa 800 m groß, Dimorphos ist viermal kleiner.

die gemessene Helligkeit als Funktion der Zeit auf. Die beobachtete Lichtmenge variiert normalerweise periodisch, da Asteroiden um sich selbst rotieren, und meist asymmetrisch gebaut sind. Anomalien in dieser Regelmäßigkeit deuten auf einen engen Begleiter hin, dessen Helligkeit mitgemessen wird. Je nachdem, ob sich der Mond vor, neben oder hinter dem untersuchten Asteroiden befindet, bekommt man leichte Abweichungen von der ‘mondlosen’ Lichtkurve. So wurde zum Beispiel ein Mond des Asteroiden (3671) **Dionysus** entdeckt [137].

In einigen Fällen kamen große Radioteleskope zum Einsatz, die auch Radarstrahlen aussenden und dann die reflektierten schwachen Signale messen können. Insbesondere kann man die Strahlen auf Asteroiden richten. Derartige Messungen haben zum Beispiel gezeigt, dass (285263) **1998 QE<sub>2</sub>** einen Mond besitzt.

Eine weitere Möglichkeit, solche Monde aufzuspüren, besteht in der sehr genauen Vermessung der Position eines Asteroiden über viele Wochen: Falls er etwas ‘wackelt’, deutet das auf einen Begleiter hin: der gemeinsame Schwer-

punkt von Kleinplanet und Begleiter bewegt sich auf einer Ellipsenbahn um die Sonne, und Asteroid und Mond vollführen Ellipsenbahnen um diesen gemeinsamen Schwerpunkt.

Man geht davon aus, dass die beiden gravitativ aneinander gebundenen Partner in den meisten Fällen gleichzeitig entstanden sind und aus demselben Material bestehen. Manche Paare mögen auch Bruchstücke eines größeren Körpers darstellen, der auseinandergebrochen ist, zum Beispiel durch die Kollision mit einem anderen Himmelskörper.

Es sind auch schon Mehrfachsysteme entdeckt worden, so hat (130) Elektra drei Monde und der Zwergplanet Pluto hat mindestens fünf Monde. Abbildung 18.2 zeigt ein Foto des Elektra-Systems, auf dem auch die Bahnen der drei Begleiter angedeutet sind.

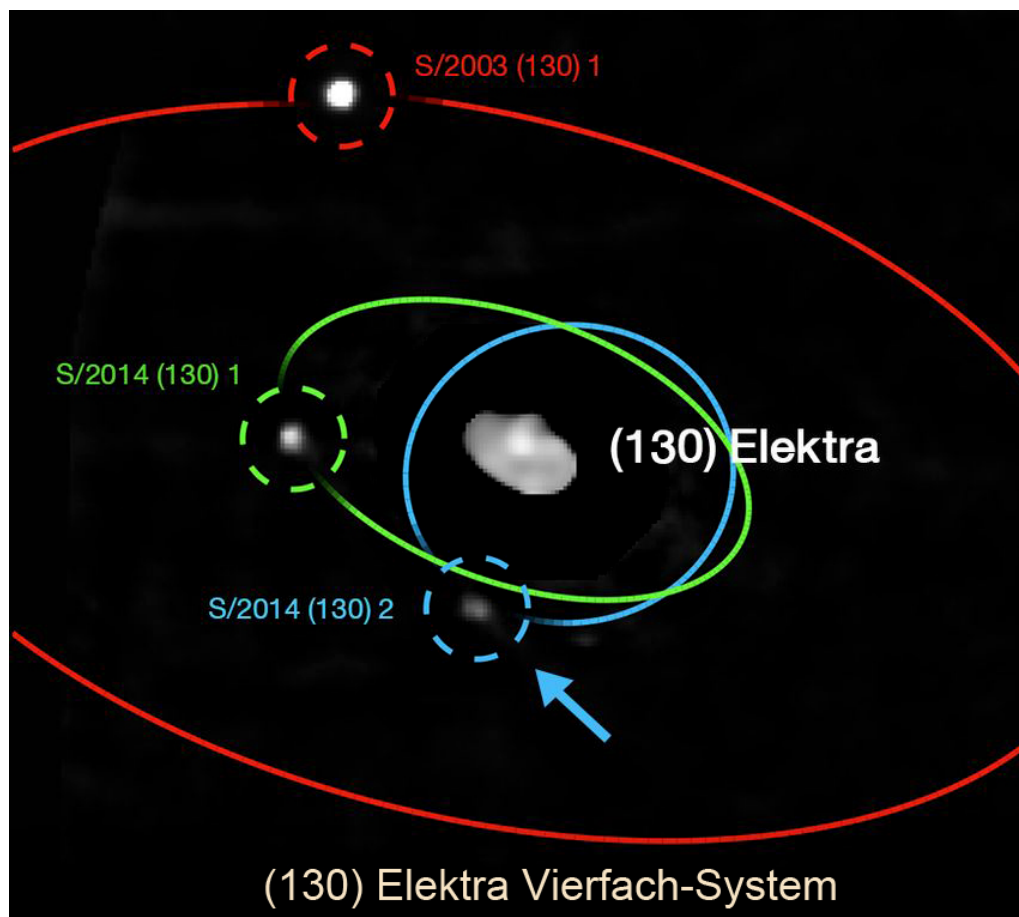


Abbildung 18.2: Asteroid (130) Elektra mit seinen Monden [117], adaptiert.



## Kapitel 19

### Können Asteroiden mit der Erde kollidieren?

Ja. Punkt. Das ist in der Vergangenheit mehrfach passiert; solch ein Einschlag - von einem **Kometen** oder Asteroiden - hat insbesondere zum Aussterben der Saurier geführt. Und es gibt keinen Grund, derartige Katastrophen für die Zukunft auszuschließen. Filme wie **'Armageddon'** oder **'Deep Impact'** instrumentalisieren die Angst der Menschen vor solchen Horrorszenarien. Auch wenn dabei dramatisiert wird und dazu auch physikalische Fehler in Kauf genommen oder gezielt eingesetzt werden, so ist die Gefahr einer Kollision zwischen Asteroid/Komet und Erde doch real. Im folgenden Abschnitt werden wir diese zu quantifizieren versuchen, also ihre Wirkung auf das Leben auf der Erde bewerten, und die Wahrscheinlichkeit für solche unerwünschten Begegnungen abschätzen.

Natürlich waren und sind von derartigen Kollisionen alle Himmelskörper des Sonnensystems betroffen, von unserem Zentralgestirn bis hin zu den Asteroiden selbst, die ja auch gegeneinanderstoßen können. Unser Erdmond und der ähnlich aussehende Planet **Merkur** sind voller Einschlagkrater, die von früheren Wechselwirkungen mit Asteroiden oder Kometen Zeugnis ablegen, siehe Abb. 19.1. Zwar hat nach der Entstehungsphase des Sonnensystems die Kollisionsrate abgenommen, aber auch heute noch beobachtet man Einschläge auf dem Mond - auf dessen dunkler Schattenseite machen sich diese durch Lichtblitze bemerkbar. Die größte von Menschen im Sonnensystem beobachtete Explosion war der spektakuläre Zusammenstoß des Kometen **Shoemaker-Levy-9** bzw. seiner Fragmente mit **Jupiter** im Jahr 1994.

Kleinere Himmelskörper, die auf die Erde fallen, hat man im Laufe der letzten Jahrhunderte immer wieder beobachtet, und als eiserne oder steinerne Meteoriten eingesammelt und analysiert.

Einige große Einschläge haben spektakuläre Krater auf der Erde hinterlassen, besonders eindrucksvoll präsentiert sich der 1.2 km durchmessende Meteor-



Abbildung 19.1: Mond mit seiner von Kratern übersäten Oberfläche.

Krater in Arizona, der in Abbildung 19.2 gezeigt ist. Er wird auch **Barringer-Krater** genannt, zu Ehren von **Daniel Barringer**, der diesen Anfang des 20. Jahrhunderts als Einschlagkrater identifiziert hat. Man hat rekonstruiert, dass der verursachende Eisenasteroid eine vergleichsweise kleine Größe von 50 m hatte. Dabei hat man gelernt, dass – verglichen mit dem Erddurchmesser von 12700 km – schon relativ kleine ‘Brocken’ mit Durchmessern von einigen zehn Metern zu erheblichen Schäden führen - nicht zuletzt wegen deren großer Auftreffgeschwindigkeit.

## 19.1 Geschwindigkeiten und Energien

Um das zu verstehen, müssen wir die kinetische Energie  $E$  eines Aufpralls abschätzen - diese hängt von Geschwindigkeit  $v$  und Masse  $m$  des Asteroiden





Abbildung 19.2: **Barringer-Krater** in Arizona [178]. Am oberen Rand erkennt man das Besucherzentrum.

ab. Die Aufprall-Energie  $E$  ist ein Maß für den auf der Erde entstehenden mechanischen Schaden.

Die Relativgeschwindigkeiten von Asteroiden und der Erde kann man mit folgenden Überlegungen abschätzen:

- (1) Wenn ein Körper aus großer Entfernung auf die Erde stürzt, so beträgt die Auftreffgeschwindigkeit (auf die Atmosphäre) mindestens  $11,2 \text{ km/s} \approx 40\,000 \text{ km/h}$ . Diese sogenannte '2. kosmische Geschwindigkeit' kann man mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes berechnen [60].
- (2) Falls ein Asteroid oder Komet auf dem direkten Weg zur Sonne die Erdbahn kreuzt, fliegt die Erde relativ zu ihm mit  $30 \text{ km/s}$  oder ungefähr  $100\,000 \text{ km/h}$ . Das ist die Geschwindigkeit unseres Planeten auf seiner Bahn um die Sonne.
- (3) Falls ein Asteroid auf einer erdnahen Bahn um die Sonne kreist, aber mit zur Erde entgegengesetztem Umlaufsinn, so führt dies bei einer Frontalkollision zu einer Aufprallgeschwindigkeit von gar  $60 \text{ km/s}$ , das sind mehr

als 200 000 km/h.

Die meisten Asteroiden bewegen sich aber im gleichen Umlaufsinn wie die Planeten - im Gegenuhrzeigersinn, von Norden aus gesehen - um unser Zentralgestirn. Daher ist das letzte Szenario (3) sehr unwahrscheinlich, und im Folgenden gehen wir von einer typischen Kollisionsgeschwindigkeit von  $v \approx 20 \text{ km/s} \approx 70\,000 \text{ km/h}$  aus.

Die kinetische Energie  $E$  bei einem Aufprall ist gegeben durch

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (19.1)$$

Die Geschwindigkeit geht also quadratisch ein, ein 60 km/s-Asteroid ist somit etwa 30-mal 'wirkungsvoller' als ein mit 11 km/s aufschlagender Brocken. Die Masse  $m$ , die mittlere Massendichte  $\rho$  und das Volumen  $V$  des Himmelskörpers stehen in folgendem Zusammenhang:

$$m = \rho \cdot V = \frac{\pi}{6} \cdot \rho \cdot d^3 \quad (19.2)$$

Im letzten Schritt haben wir der Einfachheit halber angenommen, dass der Asteroid Kugelform besitzt, mit einem Durchmesser  $d$ . Die Dichte  $\rho$  für Wasser kennen wir alle:  $1 \text{ kg/Liter} = 1 \text{ gcm}^3$ . Bei einem Asteroiden variiert  $\rho$  zwischen knapp  $1 \text{ kg/Liter}$  (lockeres Gestein, Eis) und  $10 \text{ kg/Liter}$  (Eisen, Nickel). In den meisten Fällen kennt man die Dichte aber gar nicht, da weder Masse noch Größe des Himmelskörpers bekannt sind. Für die folgenden Abschätzungen gehen wir von  $\rho \approx 3 \text{ kg/Liter}$  aus.

Der interessanteste Aspekt der Gleichung (19.2) ist das Anwachsen von Volumen und Masse mit der dritten Potenz der Größe  $d$ . Das bedeutet, dass (1) Ceres mit einem Durchmesser von gut 900 km mehr als 1000-mal ausgehnter ist als der 800 m große Asteroid (65803) Didymos<sup>1</sup>, aber das Volumen – und bei ähnlicher Dichte auch die Masse – ist sogar mehr als 1 Milliarde mal größer als das von Didymos! Deshalb wächst die Gefährlichkeit von Asteroiden auf Kollisionskurs dramatisch mit deren Durchmesser.

Zwei Beispiele sollen das weiter verdeutlichen:

1) Die rekonstruierten Daten des Barringer-Asteroiden [178][13] sind  $d \approx 46 \text{ m}$ ,  $v \approx 15 \text{ km/s}$ ,  $\rho \approx 5 \text{ kg/Liter}$ . Die entsprechende kinetische Energie ergibt sich daraus der Größenordnung nach zu

$$E_{\text{Barringer}} \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ J} \approx 7 \text{ Mt TNT} \quad (19.3)$$

<sup>1</sup>Ziel der DART-Mission, siehe Abschnitt 19.8

Der Wert ist einmal in der im internationalen Einheitensystem verwendeten Einheit Joule<sup>2</sup> angegeben, und zum anderen durch die äquivalente Menge an TNT-Sprengstoff<sup>3</sup>, hier 7 Megatonnen. Eine Tonne TNT = 4.6 Milliarden Joule. Zum Vergleich: die Hiroshima-Atombombe hatte eine Sprengkraft von 13 Kilotonnen TNT, das ist also fast ein Faktor 1000 weniger als beim Barringer-Einschlag vor etwa 50 000 Jahren.

2) Der Asteroid (99942) Apophis [9] hat viel Aufmerksamkeit in den Medien erregt, da er am 13. April des Jahres 2029 der Erde zumindest sehr nahekommen wird. Dieser Himmelskörper besitzt eine längliche Form und ist mit einer maximalen Ausdehnung von 450 m viel größer als der Barringer-Asteroid. Seine Masse wird zu  $6 \cdot 10^{10}$  kg geschätzt. Zum Vergleich: das Kreuzfahrtschiff 'Queen Elizabeth 2' ist knapp 300 m lang, also fast so groß wie der Asteroid, aber es ist mit  $5 \cdot 10^7$  kg relativ leicht – es ist ja weitgehend hohl und soll schwimmen! Während das Schiff eine Geschwindigkeit von immerhin knapp 20 m/s erreicht, würde der Asteroid aber mit 13 km/s auf die Erde prallen - falls er treffen sollte. Aus diesen Zahlen ergibt sich

$$E_{\text{Apophis}} \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ J} \approx 1000 \text{ Mt TNT} \quad (19.4)$$

Das wäre eine Katastrophe! Welche Konsequenzen für die Erde zu erwarten sind, diskutiert das spätere Unterkapitel 19.3.

## 19.2 Was bisher geschah

Jetzt wollen wir erst mal zusammentragen, was über vergangene spektakuläre Asteroideneinschläge auf der Erde bekannt ist. Bis zum Jahr 2007 konnten 170 Einschläge von Himmelskörpern mit der Erde *rekonstruiert* werden [188]. Die Gesamtzahl der Einschläge ist natürlich viel höher, es sind Tausende jährlich.

Im Allgemeinen sind die bei Meteoriten-Einschlägen auf der Erde entstandenen Krater und andere Spuren nicht so gut erhalten wie der in einer Wüstenregion entstandene gut erhaltene **Barringer-Krater**. Das liegt vor allem an der Erosion und auch an geologischen Verformungen der Erde. So kann man heute das '**Nördlinger Ries**' [58] in Süddeutschland, ein Becken mit mehr als 20 km Durchmesser, auf den Einschlag eines Meteoriten vor etwa 15 Millionen Jahren zurückführen. Man schätzt, dass dieser ungefähr 1.5 km groß war.

<sup>2</sup>Die Energie von 1 Joule benötigt man, um eine 100 g-Tafel Schokolade einen Meter anzuheben. Wenn man sie anschließend verspeist, führt man seinem Körper 2 Millionen Joule an Energie zu!

<sup>3</sup>Trinitrotoluol, eine chemische Verbindung aus H, C, N und O

Heute findet man dort fruchtbaren landwirtschaftlich genutzten Boden und auch einige Städte.

Das Ende der (Dino-)Saurier vor etwa 65 Millionen Jahren führt man heute auf das Auftreffen eines Kometen/Asteroiden auf die Erde zurück. Indizien dafür sind der Einschlagkrater **Chicxulub** [57] in Mexiko, der aus dieser Ära stammt sowie ungewöhnlich hohe Konzentrationen des seltenen Metalls Iridium in Erdschichten welche zu dem gleichen Zeitfenster passen. Der für diese Apokalypse verantwortliche Iridium-reiche Himmelskörper - ob Komet oder Asteroid kann man nicht sagen - hatte eine Größe von ungefähr 10 km. Die künstlerische Darstellung 22.3 in Kapitel 22 auf Seite 221 versucht, den Moment des Einschlages zu rekonstruieren. Natürlich muss der Himmelskörper nicht genau senkrecht auf die Erdoberfläche geprallt sein.

Einige Tierarten wie Krokodile und der Stör haben diese Kollision überlebt, und auch Pflanzen wie Palmfarne. Der Einschlag vor 65 Millionen Jahren hat möglicherweise den Erfolg der sich in der Folgezeit entwickelnden Säugetiere ermöglicht, da viele ihrer Konkurrenten, insbesondere Reptilien, ausstarben. Und so sind dann auch wir Menschen entstanden. . . Insofern war der Einschlag gegen Ende des Erdmittelalters ja vielleicht gar kein Unglück . . .

In dieser Aufzählung darf auch die **Tunguska-Katastrophe** [15] vom 30. Juni 1908 nicht fehlen. Der Namensgeber ist ein in der Nähe des Einschlags vorbeifließender Fluss in Sibirien; Abbildung 19.3 deutet die betroffene Region an. Man geht heute davon aus, dass ein aus Gestein bestehender Asteroid oder ein Komet von 50 – 60 m Durchmesser schon in der Atmosphäre explodierte und deshalb weder einen Krater noch Meteoritenfragmente hinterließ [15]. Nichtsdestotrotz war die Wucht verheerend, so wurden Bäume bis zu einer Distanz von 30 km entwurzelt und der Feuerschein noch in 500 km Entfernung wahrgenommen. Da diese Region extrem dünn besiedelt war, gab es wahrscheinlich nur relativ wenige menschliche Opfer zu beklagen. Die Kehrseite dieser Medaille ist, dass der Einschlag sehr schlecht dokumentiert ist, insbesondere gibt es keine Bilder, nur die von der Druckwelle umgeworfenen Wälder wurden im Nachhinein fotografisch festgehalten.

Um an die Tunguska-Katastrophe zu erinnern und allgemein auf die mit Asteroideneinschlägen verbundenen großen Gefahren hinzuweisen<sup>4</sup>, hat die Generalversammlung der Vereinten Nationen den 30. Juni (eines jeden Jahres) zum internationalen '**Asteroid Day**' erklärt [184].

Die Folgen des 'Feuerballs', der am 10. August 1972 im Westen Nordameri-

---

<sup>4</sup>. . . to observe each year at the international level the anniversary of the Tunguska impact over Siberia, Russian Federation, on 30 June 1908, and to raise public awareness about the asteroid impact hazard.'





Abbildung 19.3: Vom **Tunguska-Einschlag** betroffene Region. In der zentralen roten Zone wurden Wälder zerstört, der orangefarbene Kreis kennzeichnet das Areal in dem Tiere getötet wurden, und der Explosionslärm konnte in der blau eingefärbten Region wahrgenommen werden [12].

kas die Menschen erschreckte, waren weniger dramatisch, aber es gab viele Beobachtungen und auch filmische Aufzeichnungen. Dieser 'Bolide' trat über Utah streifend in die Erdatmosphäre ein, verließ sie aber wieder über Kanada. Man spricht von einem '**Earth grazer**'. Man geht heute von einem 3 – 14 m großen Brocken aus, der mit 15 km/s flach auf die Lufthülle der Erde auftraf. Abbildung 19.4 zeigt den '**1972 Great Daylight Fireball**' oberhalb des Teton-Gebirges und des Lake Jackson.

Schließlich soll an den spektakulären **Tscheljabinsk-Meteor** erinnert werden, der morgens am 15. Februar 2013 in der Nähe der russischen Stadt Tscheljabinsk die Atmosphäre aufleuchten ließ. Dieses Ereignis kennen sicher viele noch aus den Medienberichten - inzwischen ist ja fast jeder mit Smartphone-Kamera unterwegs, so dass es entsprechend viele Bilddokumente gibt. Die Leuchtspur am Himmel war in bis zu 100 km Entfernung sichtbar. Der Asteroid zerbrach mit lautem Knall in der Luft, durch die Druckwelle wurden mehr als 1000 Gebäude beschädigt, insbesondere zerbarsten Fensterscheiben. Dadurch gab es hunderte von meist leicht Verletzten, aber keine Todesfälle. Teile erreichten den Erdboden, ein Meteoritenbruchstück schlug in die Eisdecke eines zugefrorenen Sees ein. Man vermutet, dass ein **Apollo-Asteroid** (siehe Unterkapitel 19.6) die Erde traf. Dessen Geschwindigkeit, Größe und Masse konnte man zu  $v \approx 19 \text{ km/s}$ ,  $d \approx 18 \text{ m}$  und  $m \approx 12,5 \cdot 10^6 \text{ kg}$  rekonstruieren.



Abbildung 19.4: Vor der Kulisse des Lake Jackson und der Teton-Berge erkennt man am Taghimmel zwischen den Wolken den '1972 Great Daylight Fireball' auf dem Flug nach Norden [120]. Das Foto wurde von James M. Baker aufgenommen.

ren [10]. Mit Formel (19.1) folgt daraus die Abschätzung

$$E_{\text{Tscheljabinsk}} \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ J} \approx 0,5 \text{ Mt TNT} \quad (19.5)$$

Vor dem Einschlag war dieser Asteroid nicht bekannt. Das gilt auch für alle anderen bisher beobachteten spektakulären Impakte. Nur in wenigen Ausnahmen ist es gelungen, eine Asteroidenkollision mit der Erde vorauszurechnen. Ein Beispiel ist 2008 TC<sub>3</sub>, dessen Bahn so genau bekannt war, dass man den Eintritt in die Erdatmosphäre über der Nubischen Wüste im Sudan für den 7. Oktober 2008 richtig prognostizieren konnte. Die spektakuläre Explosion des Asteroiden in der Erdatmosphäre wurde sowohl vom Erdboden, von einem Flugzeug und von Satelliten aus beobachtet. Später wurden 600 Bruchstücke mit einer Gesamtmasse von 10.5 kg gefunden [27] - das ist nur ein Bruchteil der anfänglichen Masse die auf 80000 kg geschätzt wird.



## 19.3 Was passiert bei einem Einschlag?

Wir wollen hier nur *gefährliche* Begegnungen mit Asteroiden diskutieren. Die oben geschilderten historischen Ereignisse lassen erkennen, dass ab einem Durchmesser von  $d = 10$  m signifikante Schäden und Todesfälle auftreten können - lokal begrenzt. Wie schon diskutiert, kommt es auf die Einschlagenergie an, aber nicht nur darauf. Wichtig sind auch der Winkel, unter dem der Asteroid auf die Erdatmosphäre auftrifft und die chemische Zusammensetzung. Je flacher der Einfallswinkel, desto mehr bremsende Luft steht dem Asteroiden 'im Wege' und desto kleiner ist die Wahrscheinlichkeit, dass er den Erdboden erreicht statt vorher zu verglühen. Grob kann man zwischen Gesteinsasteroiden und Eisen-Nickel-Asteroiden unterscheiden, Näheres dazu findet man in Kapitel 15. Die Metallasteroiden schaffen es leichter, die Atmosphäre zu durchschlagen, während die Gesteinsasteroiden eher von der großen Reibungswärme so stark aufgeheizt werden, dass sie explosionsartig zerbrechen. Beispiele: Der den **Meteor-Krater** in Arizona verursachende Eisen-Nickel-Asteroid war mit 50 m Durchmesser verhältnismäßig klein, konnte aber offenbar ohne große Schäden den Boden erreichen und das gigantische Loch erzeugen. Der **Tunguska-Meteorit** hatte einen ähnlichen Durchmesser, hinterließ aber keinen großen Krater, weil er schon in der Lufthülle unseres Planeten explodierte. Deshalb war das wohl ein Gesteinsasteroid (oder ein Komet).

Asteroiden die uns gefährlich werden können, nennt man **PHAs** - Potentially Hazardous Asteroids oder auch **PHOs** - Potentially Hazardous Objects. Man rechnet hierzu Himmelskörper mit 140 m Durchmesser oder mehr [44]. Diese sind sehr viel energiereicher und führen bereits zu großen Katastrophen (siehe Gleichung (19.2)), die aber noch keine globalen Auswirkungen auf unseren Planeten haben. Auch Gesteinsbrocken dieser Größe durchschlagen die Atmosphäre und erzeugen Krater. Tabelle 19.1 beschreibt für verschiedene Asteroidendurchmesser die Auswirkungen eines Impakts in Stichworten. Ein Kleinplanet mit einem Durchmesser von einigen Kilometern kann also die Menschheit ausrotten. Von dieser Kategorie (Durchmesser mindestens 10 km) gibt es etwa 10000 Asteroiden . . .

## 19.4 Wie häufig sind Einschläge?

Die gute Nachricht lautet: Je größer der Asteroid, desto weniger davon gibt es im Sonnensystem. Entsprechend geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein großer Himmelskörper mit unserem Planeten kollidiert. In einer vielbeachteten

Asteroidendurchmesser	Wirkung
75 m	Gebiete der Größe von Paris werden zerstört.
160 m	Auch Gesteinsasteroiden erzeugen Krater.
700 m	Gebiete wie Stadtregion New York werden zerstört. Betroffene Flächen groß wie Niedersachsen.
1700 m	Tsunamis, regionale Klimaänderungen. Betroffene Flächen groß wie Frankreich.
7000 m	Staub bewirkt globale Klimaänderungen Betroffene Flächen groß wie Australien.
> 16000 m	Globale Klimakatastrophe, Massensterben. Bedrohung allen höher entwickelten irdischen Lebens.

Tabelle 19.1: Zu erwartende Auswirkungen von Asteroideneinschlägen [130, 154]

Veröffentlichung [124] wurde 1994 die Häufigkeit von Einschlägen als Funktion des Asteroidendurchmessers abgeschätzt. Abbildung 19.5 visualisiert die Resultate. Man liest ab, dass ein Asteroid wie der **Saurierkiller** (Chicxulub-Krater!) etwa alle 100 Millionen Jahre zuschlägt. Mit dem Barringer-Krater vergleichbare Schäden sind dagegen alle paar 1000 Jahre irgendwo auf der Erde zu erwarten. Asteroiden mit Durchmessern von 1 km oder mehr stoßen im Mittel alle 300 000 Jahre mit der Erde zusammen.

## 19.5 Wie hoch ist das Risikopotential eines großen Asteroideneinschlags?

Wie schon in den vorhergehenden Abschnitten gezeigt, ist das mit einem Asteroiden verbundene Gefährdungspotential im Wesentlichen durch zwei Parameter gegeben, einerseits die Größe des Asteroiden und die damit verbundene Kollisionsenergie  $E$  und andererseits die Kollisionswahrscheinlichkeit  $p$  mit der Erde.

Auch die Aufprallgeschwindigkeit und die chemische Zusammensetzung sind relevant, aber diese Parameter variieren nur in einem vergleichsweise engen Bereich und können in erster Näherung ignoriert werden.

Warum müssen wir hier überhaupt über Wahrscheinlichkeiten sprechen, es

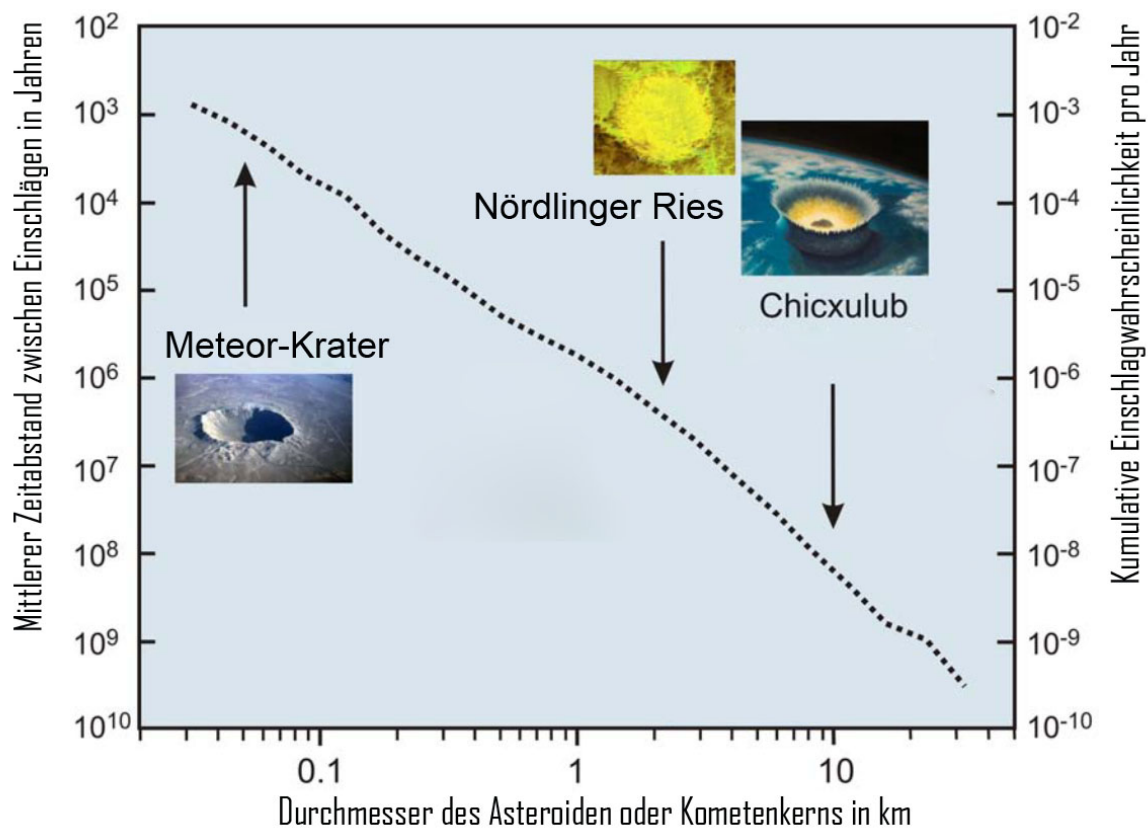


Abbildung 19.5: Wahrscheinlichkeit für das Einschlagen eines Asteroiden auf die Erde als Funktion der Größe [164, 169], adaptiert. Kredit: Christian Köberl. Die gestrichelte Linie zeigt auf der linken vertikalen Achse den mittleren Zeitabstand zwischen Einschlägen und rechts die die kumulative Einschlagwahrscheinlichkeit pro Jahr an.

gibt doch nur zwei Möglichkeiten, 'hit or miss', für die bekannten Asteroiden! Um zwischen diesen beiden Alternativen unterscheiden zu können, müssen aber die Parameter der **Asteroidenbahnen** sehr genau bekannt sein und bei der Vorhersage der Flugbahn auch Störeffekte durch den gravitativen Einfluss von Planeten und anderen Himmelskörpern berücksichtigt werden. Die entsprechenden Genauigkeiten sind aber begrenzt, deswegen kann man zwar recht zuverlässig berechnen, ob und wann ein Asteroid in Erdnähe gelangt, aber die Frage, ob er letztlich doch vorbeizieht oder nicht, bleibt zunächst offen. Mit weiteren Messungen der Asteroidenposition kann man die **Bahnelemente** immer genauer bestimmen, und ist dann eventuell in der Lage, eine Kollision auszuschließen oder sicher vorherzusagen.

Es muss noch einmal betont werden, dass wir hier nur statistische Aussagen machen können! Wie Abschnitt 19.3 erklärt hat, geht es bei der Erstellung der Schadensbilanz nicht nur um den direkten Einschlag, sondern auch um indirekte Konsequenzen wie einen Tsunami oder eine monatelange Abschirmung des Sonnenlichtes.

Die im Jahr 1995 vorgestellte 'Turiner Skala' [14] klassifiziert für bekannte (!) Asteroiden und Kometen deren Gefahren für uns Erdbewohner. Abbildung 19.6 zeigt, wie die 10 Risikoklassen mit Energie  $E$  und Wahrscheinlichkeit  $p$  zusammenhängen. Es werden nur die kommenden 100 Jahre berücksichtigt. Klasse null (weißer Bereich in der Abbildung) bedeutet: keine Kollision oder Einschlagenergie so gering, dass Asteroid durch Erdatmosphäre aufgehalten wird, somit keine Gefahr. In der höchsten Risiko-Klasse 10 haben wir es mit Asteroiden von Kilometer-Größe zu tun, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die Erde zu unseren Lebzeiten treffen werden. Die gute Nachricht: Als ich Anfang 2023 mit dem Schreiben dieses Kapitels begann waren **alle** Asteroiden in Kategorie null. Am 18. Februar wurde dann der circa 50 m große Asteroid **2023 DW**, der der Erde im Jahr 2026 bedrohlich nahekommen könnte, auf der Turiner Skala auf Stufe 1 gesetzt. Allerdings war die Bahn zu diesem Zeitpunkt noch sehr unsicher, denn 2023 DW war erst am 26. Februar 2023 entdeckt worden! Schon am 14. März 2023 wurde nach verbesserten Bestimmungen der **Bahnelemente** die Gefahr aber wieder auf Stufe 0 zurückgesetzt.

Wir haben also eine gute Chance unversehrt durch die nächsten Jahre zu kommen - es sei denn ein bisher unbekannter Asteroid oder Komet trifft die Erde. Das ist durchaus möglich, wie die in der Vergangenheit erlebten Kollisionen gezeigt haben.

Wie groß ist mein individuelles Risiko, direkt oder indirekt durch einen Asteroiden- oder Kometeneinschlag zu Tode zu kommen? In der bereits erwähnten Veröffentlichung [124] wurde 1994 diese Frage quantitativ zu beantworten versucht, und in Relation zu anderen Gefahren gesetzt. In der folgende Tabelle 19.2 sind einige dieser Ergebnisse zusammengetragen [154]. Diese Zahlen sind unter verschiedenen Annahmen entstanden und hängen sicher von Land und Zeit ab. Es geht hier nur um Größenordnungen. Häufigere 'natürliche' Todesursachen wie Krebserkrankung oder Herzinfarkt sind nicht aufgeführt. Wie man sieht, ist die Asteroiden-Gefahr klein, aber keineswegs vernachlässigbar. Während man aber zum Beispiel die Flugsicherheit immer verbessert, tut man bisher so gut wie nichts, was die Asteroidengefahr angeht - man betrachtet sie als unvermeidbare Schicksalsschläge. Inwiefern das gerechtfertigt ist, diskutiert Unterkapitel 19.8.

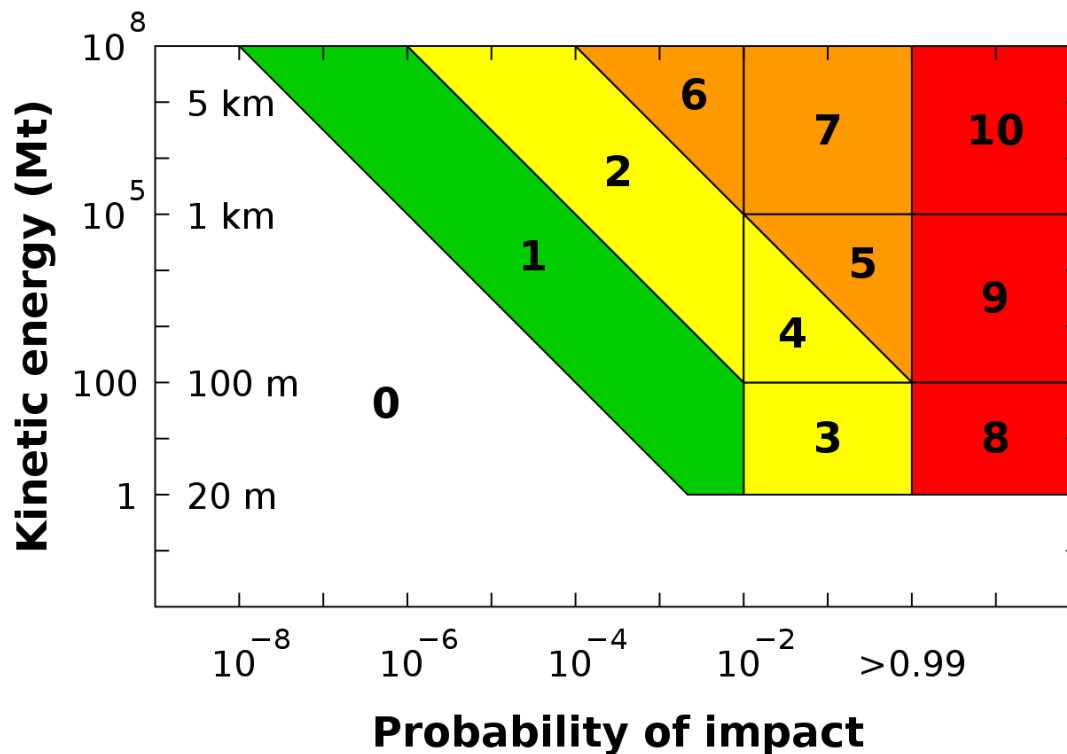


Abbildung 19.6: Die Turiner Skala zur Klassifizierung von Asteroiden und Kometen [11]. Die kinetische Energie wird in Megatonnen TNT gemessen.

Todesursache	Wahrscheinlichkeit
Unfall Straßenverkehr	1/100
Mord	1/300
Asteroid von etwa 600 m Durchmesser	1/3000
Flugzeugunglück	1/20000
Tornado	1/60000

Tabelle 19.2: Statistische Ursachen für 'unnatürliches' Ableben [124, 154] pro Menschenleben.

## 19.6 Welche zukünftigen Kollisionen werden heute vorhergesagt?

Im Folgenden konzentrieren wir uns auf Asteroiden - es gibt davon in unserer Nachbarschaft viel mehr als Kometen und daher werden wir wahrscheinlicher von einem Asteroiden getroffen werden. Auch berücksichtigen muss man, dass Kometen aus großer Ferne zu uns kommen, und erst dann von uns erfasst werden, wenn sie in **Saturn-** oder **Jupiternähe** kommen. Mit anderen Worten: wir können erst in einigen Jahren stattfindende Einschläge solcher Kometen auf die Erde heute noch gar nicht prognostizieren. Bei Asteroiden, deren Bahnen wir ja teilweise schon mehr als 200 Jahre lang vermessen, ist die Vorhersagekraft viel größer - jedenfalls für die bekannten Kleinplaneten.

Naturgemäß sind es die Kleineren unter ihnen, die man erst spät oder gar nicht vor einem Impakt erkennt, aber die sind dann auch nicht so gefährlich. Ein schönes Beispiel dafür stellt der bereits in Kapitel 5 vorgestellte kleine Asteroid **2023 BU** dar: Er wurde am 22. Januar 2023 kurz nach Mitternacht mitteleuropäischer Zeit entdeckt und raste schon 5 Tage später knapp an der Erde vorbei. Auf einer solchen Zeitskala sind menschliche Interventionen bisher nicht möglich. Da er nur 5-8 m groß war, hätte er nur lokale Zerstörungen anrichten können.

Deutlich gefährlicher war der Vorbeiflug des 30 m großen Asteroiden **2023 NT<sub>1</sub>** [69] der am 13.7.2023 die Erde in einer Entfernung von nur etwa 100000 km mit einer Geschwindigkeit von knapp 12 km/s passierte. Er war ganze 2 Tage vorher entdeckt worden - da er aus Sonnenrichtung kam, konnte er erst kurz vor der Beinahe-Kollision beobachtet werden.

Welche Typen von Asteroiden kommen überhaupt für eine Kollision mit unserem Planeten in Frage? Die **NEOs**, die Near-Earth Objects, die schon in Kapitel 5 eingeführt wurden.

Man unterscheidet zwischen den nachfolgend aufgelisteten Typen von NEOs. Abbildung 19.7 illustriert die Bahnen der vier **NEO-Typen**.

- **Amor-Asteroiden**. Diese haben ähnliche Bahnparameter wie **(1221) Amor**. Da ihre Periheldistanz  $P$ , also der minimale Abstand zur Sonne, den Wert 1,017 AE überschreitet und der Aphelabstand der Erde 1,017 AE beträgt, können sie nicht mit der Erde kollidieren - jedenfalls solange sie nicht durch andere Himmelskörper (einschließlich Erde) abgelenkt werden. Der maximale Perihelabstand der Aten-Asteroiden ist zu 1,3 AE festgelegt worden - sonst wären sie ja nicht erdnah.
- **Apollo-Typ**. Namensgeber und Repräsentant ist **(1862) Apollo**. Die **große**

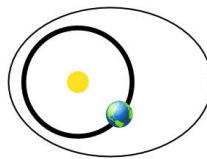


**Halbachse** dieser Bahnen ist  $a > 1 \text{ AE}$  und  $P < 1,017 \text{ AE}$ . Also können sie mit der Erde kollidieren.

- **Aten-Typ**. Hier ist **(2062) Aten** der Namenspatron. Auch diese sind potentiell gefährlich, denn  $a < 1,0 \text{ AE}$  bei einer Apheldistanz  $A > 0,983 \text{ AE}$ ; dieser Wert entspricht dem Perihelabstand der Erdbahn.
- **Atira-Typ**. Die Bahn dieser Asteroiden verläuft vollständig innerhalb der Erdbahn, also  $a < 1,0 \text{ AE}$  und  $A < 0,983 \text{ AE}$ . Prototyp ist **(163693) Atira**. Also keine Gefahr!

## Amors

Earth-approaching NEAs with orbits exterior to Earth's but interior to Mars' (named after asteroid (1221) Amor)



$$a > 1.0 \text{ AU} \\ 1.017 \text{ AU} < P < 1.3 \text{ AU}$$

## Apollos

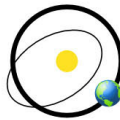
Earth-crossing NEAs with semi-major axes larger than Earth's (named after asteroid (1862) Apollo)



$$a > 1.0 \text{ AU} \\ P < 1.017 \text{ AU}$$

## Atens

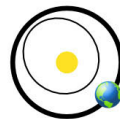
Earth-crossing NEAs with semi-major axes smaller than Earth's (named after asteroid (2062) Aten)



$$a < 1.0 \text{ AU} \\ A > 0.983 \text{ AU}$$

## Atiras

NEAs whose orbits are contained entirely within the orbit of the Earth (named after asteroid (163693) Atira)



$$a < 1.0 \text{ AU} \\ A < 0.983 \text{ AU}$$

( $P$  = perihelion distance,  $A$  = aphelion distance,  $a$  = semi-major axis)

Abbildung 19.7: Illustration der Asteroidenbahnen der vier Typen von NEOs [180]

Von allen drei erstgenannten Typen konnten bis heute Tausende vermessen und klassifiziert werden. **Atira-Asteroiden** sind dagegen relativ selten. Der größte NEO ist der **Amor-Asteroid (1036) Ganymed** mit einem Durchmesser von ungefähr 35 km [55]. Laut Tabelle 19.1 könnte er bei einer Kollision also menschliches Leben auf der Erde auslöschen - eine solche wird es aber nicht geben, denn Atira- und Amor-Asteroiden kreuzen die Erdbahn nicht.

**Apollo-** und **Aten-Asteroiden** sind dagegen ‘**Erdbahnkreuzer**’ und damit Kandidaten für **PHAs**. Im Zentrum des Interesses steht derzeit (99942) **Apophis**, der schon weiter oben im Abschnitt 19.1 angesprochen wurde. Es handelt sich um einen Kleinplaneten vom Aten-Typ. Eine Zeitlang sah es so aus, als könne er die Erde im Jahr 2029 treffen, und er wurde daher für einige Tage der Risikoklasse 4 der Turiner Skala zugeordnet. Heute (Ende 2023) ist sein Risiko 0 auf dieser Skala. Die derzeitigen Berechnungen zeigen, dass er die Erde um mehr als 30000 km ‘verfehlen’ wird [9]. Dabei wird also die Erde nicht beschädigt und auch ihre Bahn wird sich wegen der vergleichsweise kleinen Masse des Asteroiden nicht merklich ändern. Ganz anders sieht es für Apophis aus: Der Kleinplanet wird im Schwerfeld der Erde deutlich abgelenkt, um mehrere Winkelgrade. Er wechselt dann sogar von der **Aten-Klasse** in die **Apollo-Klasse** der erdnahen Asteroiden [9].

Die NASA veröffentlicht monatlich die neuesten statistischen Daten zu **NEAs (Near-Earth Asteroides)** [183]. Abbildung 19.8 zeigt den Stand der Dinge im Februar 2024. Auch enthalten sind Schätzungen, wie viele der größeren NEAs noch nicht gefunden wurden: In der Größenklasse 1 km und mehr wurden bisher 857 entdeckt, 50 weitere werden vermutet.

## 19.7 Sind auch winzige Meteoriten gefährlich?

Bevor wir die Frage nach dem Umgang mit drohenden Kollisionen von Asteroiden mit der Erde diskutieren werden, soll noch ein anderer Aspekt von **Meteoriten**-Einschlägen kurz angesprochen werden: Bisher haben wir nur die Gefahr eines großen Asteroideneinschlags mit der Erde betrachtet. Problematisch sind aber auch Kollisionen von winzigen Himmelskörpern, insbesondere **Meteoroiden**, mit Satelliten und Raumschiffen, zumal diese nicht von einer schützenden Lufthülle umgeben sind. Deshalb können auch winzige Brocken dort Löcher erzeugen und so ein Leck schlagen oder Teile der Elektronik ausschalten. Die Abbildung 19.9 aus dem Jahr 2002 zeigt Löcher in den Solarzellen des **Hubble Space Telescopes**, die von Einschlägen bzw. Durchschlägen winziger, nur einige Millimeter großer Meteoroiden zeugen.

Ende Dezember 2022 schlug das Kühlsystem der russischen Raumkapsel Sojus MS-22 leck, Ursache war wohl ein kleiner Meteoroid. Ursprüngliche Aufgabe dieses an der **internationalen Raumstation ISS** angedockten Raumtransporters war es, die drei dort arbeitenden Raumfahrer zur Erde zurückzuholen, was aber wegen der Beschädigung nicht mehr möglich war. Daher musste eine neue Raumkapsel, Sojus MS-23 von der Erde aus zur ISS geschickt werden, um die zwei Kosmonauten und einen Astronauten zu retten, was im Februar

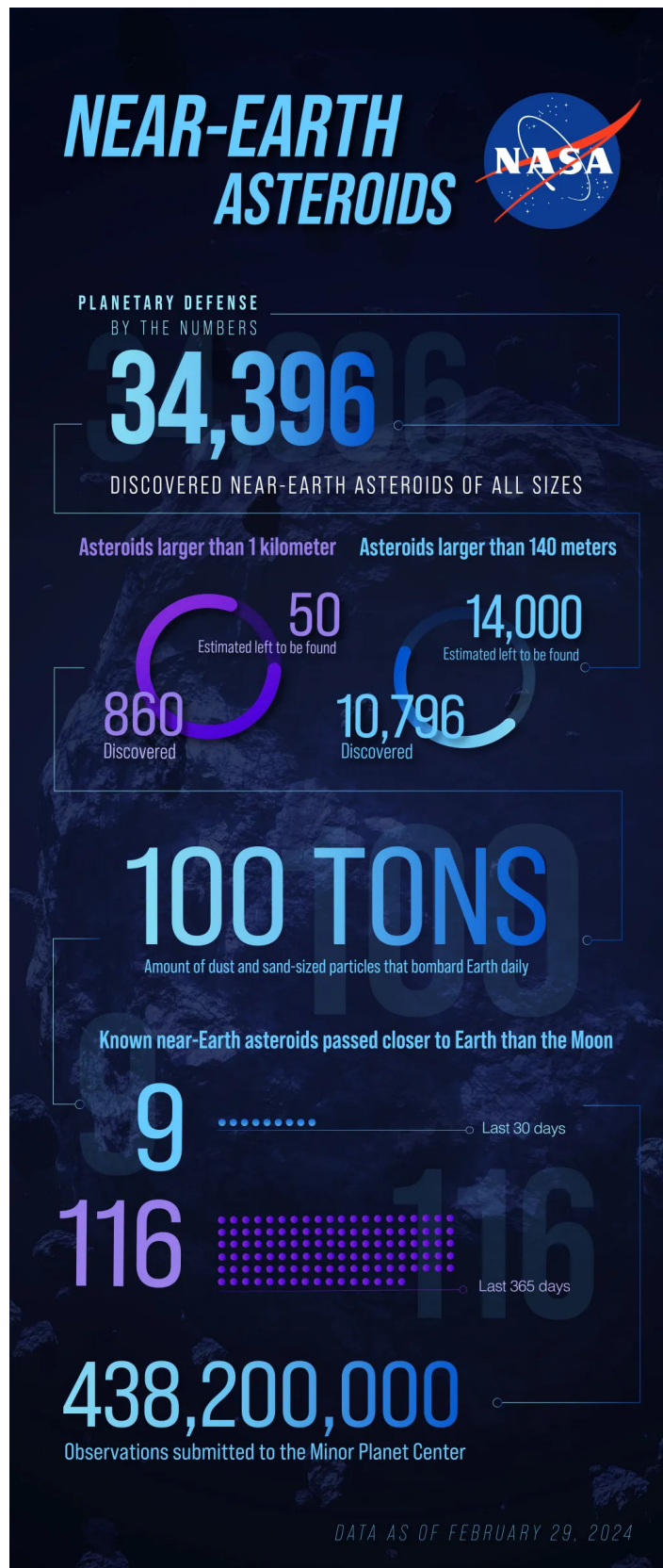


Abbildung 19.8: Daten zu NEAs, Stand 29. Februar 2024 [183]



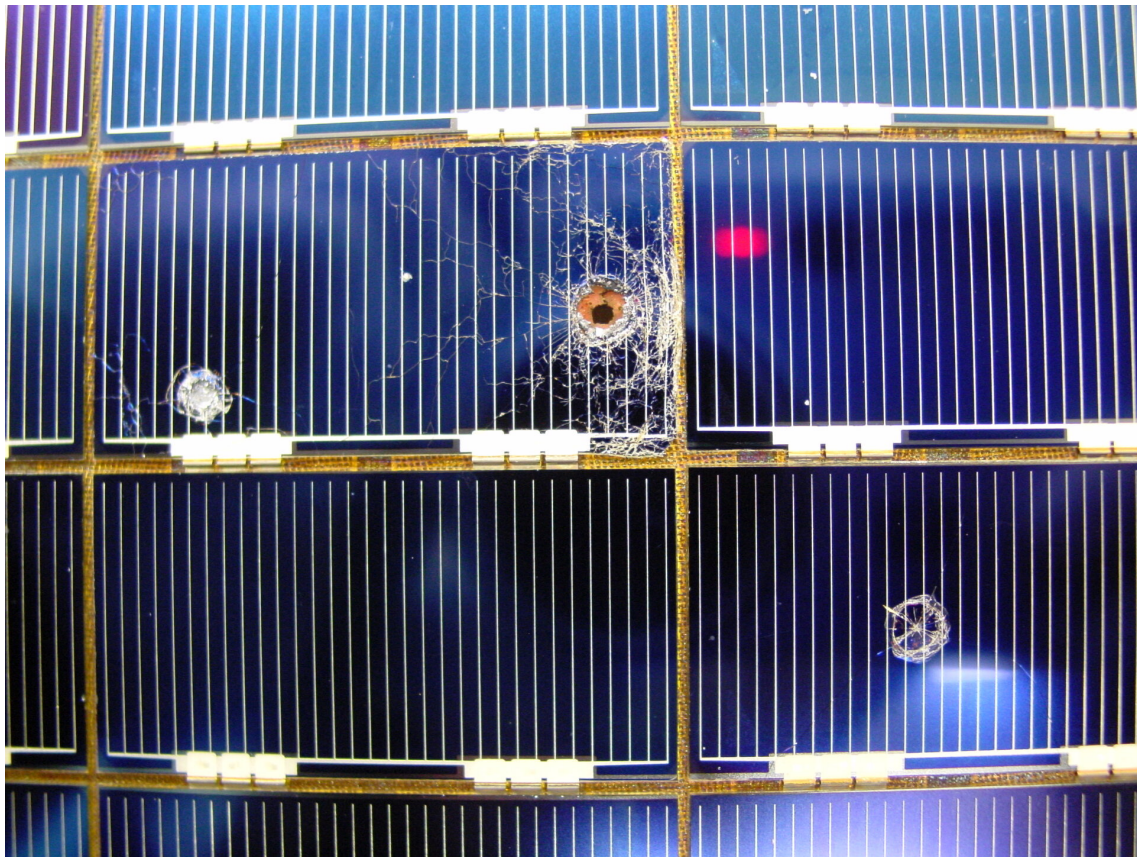


Abbildung 19.9: Solarpanel des **Hubble Space Telescopes** mit durch **Meteoriten** erzeugten Löchern [136]

2023 auch gelang. Leider tragen zu solchen Einschlägen nicht nur natürliche Meteoroiden bei, sondern auch Fragmente früherer Satelliten, die gesprengt wurden oder mit anderen kollidierten. Dieser Müll kann viele Jahre in erdnahen Umlaufbahnen verbleiben. Leider hat derartige Weltraumschrott in den letzten Jahren stark zugenommen. Solche kleinen Geschosse kann man natürlich nicht vorher erkennen, entsprechend ist es für einen Satelliten unmöglich, dieser Gefahr auszuweichen. Man kann allenfalls durch abschirmende Schichten - die aber bedeuten Gewicht und damit hohe Kosten beim Raketenstart - empfindliche Teile eines Raumschiffes bis zu einem gewissen Grad vor solchen Einschlägen schützen. Letztlich muss man dafür sorgen, dass insbesondere die elektronischen Systeme fehlertolerant und redundant ausgelegt werden, so dass ein einziges Loch nicht die gesamte Mission ruiniert. Natürlich besteht bei bemannten Raumsonden auch die Gefahr, Astronauten zu verletzen.

Diese kleinen Stückchen erinnern uns an die folgenden Fakten: Es gibt Me-

teoroiden und -Einschläge! Selbst winzige Teilchen sind gefährlich, aufgrund der hohen Geschwindigkeiten - und erst recht große Asteroiden!

Abschließend noch ein Bild zu einem Einschlag im Jahr 2013 auf der Nachtseite des Mondes – der *nicht* vorhergesagt wurde. Er von einem ‘nur’ etwa 40 kg schweren **Meteoroiden** erzeugt wurde [135]. Dieser hat die Erde nicht gefährdet, aber uns daran erinnert, dass diese Risiken nicht vernachlässigbar sind und keineswegs nur in der ‘Geschichte’ vorkommen. Abbildung 19.10 zeigt die Aufschlagstelle auf dem Mond, vor und nach dem Einschlag, auf Fotos die von der Raumsonde **Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)** aufgezeichnet wurden. Der Krater hat einen Durchmesser von etwa 12 m.

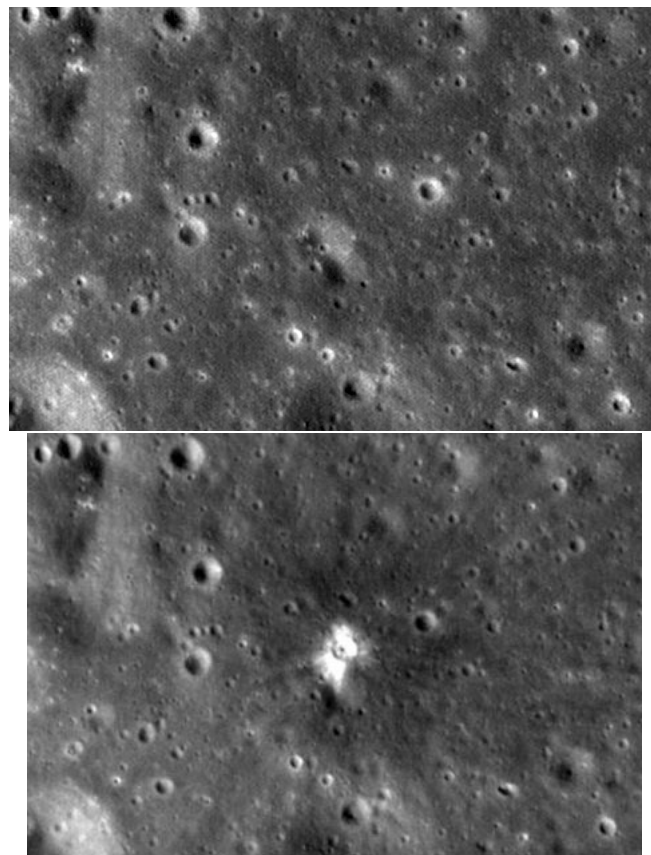


Abbildung 19.10: Kraterbildung auf dem Mond. Die beiden Bilder wurden vor (oben) und nach (unten) einem Asteroideneinschlag auf dem Mond aufgenommen [182].

## 19.8 Kann man Kollisionen mit Asteroiden verhindern?

Zurück zum Hauptthema: Wie kann man Kollisionen von Asteroiden großer Masse mit der Erde abwenden?

Natürlich gibt es auch andere Szenarien, die zwar nicht den Einschlag verhindern, aber vor den Konsequenzen zu schützen versuchen: Man könnte die lokale Bevölkerung evakuieren und kritische Infrastruktur von vorneherein unterirdisch anlegen. Ein wichtiger Aspekt bei einem vorhersagbaren Einschlag ist die Reaktion der Öffentlichkeit: Wird es eine Massenpanik geben? All das soll hier aber nicht weiter diskutiert werden.

Unsere Frage lautet: kann man einen Asteroiden von seiner **Bahn** so ablenken, dass diese Abweichung von der ursprünglichen Bahn in Erdnähe etwa  $d_{\text{Wunsch}} = 10000 \text{ km}$  ausmacht (man erinnere sich, die Erde hat einen Durchmesser von 12000 km). Dann würde ein eigentlich zentral mit der Erde kollidierender Himmelskörper knapp vorbeifliegen.

Dazu machen wir ein Gedankenexperiment: Der Asteroid habe einen Durchmesser von 1 km und somit eine Masse von etwa  $m_A = 1.6 \cdot 10^{12} \text{ kg}$  und fliege mit  $v_A = 20 \text{ km/s}$  auf die Erde zu. Wir schaffen es – so unsere Annahme, eine Rakete so rechtzeitig zu starten, dass diese mit dem Asteroiden in einer Entfernung von der Erde von  $E = 0.1 \text{ AE} = 15 \text{ Millionen km}$  zusammenstößt und ihn minimal aus der Bahn wirft. Für diese Anreise braucht die Rakete im günstigsten Fall ein paar Wochen.

Offenbar kann das nur funktionieren, wenn die Asteroidenbahn gut vermessen ist und frühzeitig als gefährlich erkannt wird. Bisher ist aber nur ein kleiner Teil der Asteroiden mit Durchmessern oberhalb von 100 m entdeckt worden. Deshalb gibt es spezielle Suchprogramme wie zum Beispiel LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth Object Search) oder LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research), um mit erdbasierten Teleskopen **NEOs** aufzuspüren. Allein LINEAR hat seit 1996 mehr als 2000 **Erdbahnkreuzer** entdeckt. Auch moderne Astrometrie-Satelliten wie **Gaia** können NEOs aufspüren.

Die Rakete möge senkrecht zur Bahn des Kleinplaneten auftreffen, mit einer Relativgeschwindigkeit  $v_R = 10 \text{ km/s}$ . Die Masse der Rakete betrage  $m_R = 50 \text{ Tonnen}$ , siehe Abbildung 19.11. Die letzteren beiden Werte werden von heutigen Projektilen noch nicht erreicht, aber wir planen ja für die Zukunft. Jetzt hilft der Impulssatz weiter: Wir gehen davon aus, dass der Impuls  $P_R$  der Rakete

$$P_R = m_R \cdot v_R = 5,0 \cdot 10^8 \text{ kg m/s} \quad (19.6)$$





Abbildung 19.11: Gedankenexperiment: Ablenkung eines Asteroiden durch aufschlagende Rakete. Nicht maßstabgerecht!

vollständig auf den Asteroiden übertragen wird, so dass dieser zusätzlich zu seinem Impuls

$$P_A^{\parallel} = m_A \cdot v_A \quad (19.7)$$

Richtung Erde eine transversale Impulskomponente erhält, senkrecht zur Verbindungslinie Asteroid-Erde:

$$P_A^{\perp} = P_R \quad (19.8)$$

Das bedeutet, dass seine Bahn um den kleinen Winkel

$$\alpha \approx \frac{P_A^{\perp}}{P_A^{\parallel}} \approx \frac{P_R}{P_A^{\parallel}} \quad (19.9)$$

abgelenkt wird. Nach Durchfliegen der Strecke  $E$  (und Erreichen von Erdnähe) ergibt sich daraus eine seitliche Ablenkung von

$$d = \alpha \cdot E \approx \frac{m_R}{m_A} \cdot \frac{v_R}{v_A} \cdot E \quad (19.10)$$

Mit den oben festgelegten Werten dieser Größen folgt

$$d_{\text{Ist}} = 250 \text{ m} \ll d_{\text{Wunsch}} \quad ! \quad (19.11)$$

Wir sind also trotz optimistischer Annahmen in unserem Gedankenexperiment grandios gescheitert! Es ist daher völlig illusorisch, im Jahre 2029 oder früher den Asteroiden (99942) Apophis mit einer gezielten Mission an der Erde vorbei zu lenken, auch wenn dessen Größe 'nur' etwa ein Drittel Kilometer beträgt.

In einem ersten Test hat man allerdings mit der DART-Sonde schon einen kleinen Erfolg verbuchen können: Man hat durch den Einschlag auf Dimorphos eine Impulsänderung von immerhin einigen  $10^6 \text{ kg m/s}$  erreicht, siehe

Kapitel 13.4. Ein Vergleich mit (19.6) zeigt aber, dass noch mehrere Größenordnungen bis zu einer realistischen Abwehr eines Asteroiden auf Kollisionskurs fehlen. Die **DART-Mission** hat von der Planung bis zur Kollision etwa 5 Jahre gedauert - für Raumfahrtprojekte ist das schnell, für eine Abwehr eines 'neuen' Asteroiden oder Kometen aber zu langsam.

Welche Alternativen zur Ablenkung durch einen Raketeneinschlag gibt es? Viele Ideen wurden vorgebracht, hier ein paar Beispiele:

- 'Pulverisierung' eines kleineren Asteroiden. Genauer: er könnte in viele kleine ungefährlichere Fragmente zerlegt werden. Dazu müssten mehrere sehr schnelle Projektile quasi gleichzeitig direkt auf den sich nähernden Eindringling geschossen werden [139]. Vorteil: Man muss nicht schon Monate oder Jahre vor der möglichen Kollision die Gefahr erkennen.
- Zerstörung durch eine Sprengung. Für einen mehrere hundert Meter großen Asteroiden wäre dazu eine Nuklearexplosion erforderlich. Diese Methode ist nicht unproblematisch, da die dabei entstehenden Trümmer dennoch oder gerade dann die Erde treffen könnten. Daher ist dies - wenn überhaupt technisch möglich - der letzte Strohalm nach dem man greifen würde.
- Ablenkung des Asteroiden durch Licht. Man könnte von der Erde oder Erdumlaufbahn aus einen Laserstrahl auf den Asteroiden richten, oder mit einem Spiegel Sonnenlicht dorthin umlenken. Auch Lichtteilchen transportieren Impuls, können also einen Asteroiden ablenken. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, auf dem Himmelskörper ein 'Sonnensegel' zu installieren, das Sonnenlicht so reflektiert, dass der entstehende Rückstoß den Asteroiden ablenkt. Durchrechnen ergibt auch hier ernüchternde Resultate. Vor einem Asteroiden vergleichbar mit **Apophis** wird man unseren Planeten so sicher nicht retten können.

Also: Im Moment müssen wir einen Asteroideneinschlag einfach hinnehmen. Natürlich sollte sich die Menschheit auf solche möglichen Katastrophen hinreichend vorbereiten, so wie auf Hochwasser oder Erdbeben. Schließlich ist die Forschung zur Asteroidenabwehr, die mit der DART-Mission ihren bisherigen Höhepunkt erreicht hat, zu intensivieren.

## Kapitel 20

### Kann man Asteroiden nutzen?

Die Idee ist nicht neu: Schon **Jules Verne** hat in seinem Roman **‘Die Jagd nach dem Meteor’** spekuliert, dass man einen Asteroiden gezielt auf die Erde stürzen lassen kann, um so dessen Rohstoffe zu nutzen. Im Buch besteht dieser aus Gold. Die Größe ist nicht genau angegeben, aber wir nehmen mal an, dass der Brocken vor dem Eintritt in die Atmosphäre mindestens einen Meter Durchmesser hatte, also unsere in Kapitel 1 getroffene Definition eines Asteroiden erfüllt. Die Funktionsweise der geheimnisvollen Apparatur – in einem schwärzlichen Kasten installiert, mit dem die Ablenkung der Bahn des Kleinplaneten im Roman gelingt, bleibt übrigens auch im übertragenen Sinn im Dunkeln. Ein paar weitere ‘Details’ in der Erzählung verlangen ebenfalls nach Aufklärung, eine Kostprobe: "Die Feuerkugel schwebt . . . vierhundert Kilometer über der Erde."

Bei dem 1908 veröffentlichten Werk handelt es sich natürlich um Science-Fiction – und das sind alle Vorschläge einer bergbaulichen Nutzung auch heute noch. Richtig ist, dass wertvolle Rohstoffe wie Edelmetalle (Gold, Titan etc.) und ‘Seltene Erden’ (Neodym, Lanthan, Yttrium . . .), die für verschiedene Schlüsseltechnologien benötigt werden, auf Asteroiden zu finden sind. Der Cartoon 20.1 symbolisiert diese Verlockungen. Natürlich wird man diese Rohstoffe nicht in Reinform finden wie bei Jules Verne. Man könnte Kleinplaneten mit Raumsonden anzapfen um die Rohmaterialien dann zur Erde zu transportieren, wie man das für winzige Mengen ja schon demonstriert hat, siehe Kapitel 13.

Aber Aufwand und Nutzen für eine großtechnische Lösung stehen in keinem vernünftigen Verhältnis. Ein kleines Zahlenspiel soll dies verdeutlichen: Das Weltraumunternehmen SpaceX berechnet knapp 100 Millionen US-Dollar<sup>1</sup> für den Start einer **‘Falcon Heavy’-Rakete**. Diese könnte eine Nutzlast von etwa 10

---

<sup>1</sup>Stand März 2023

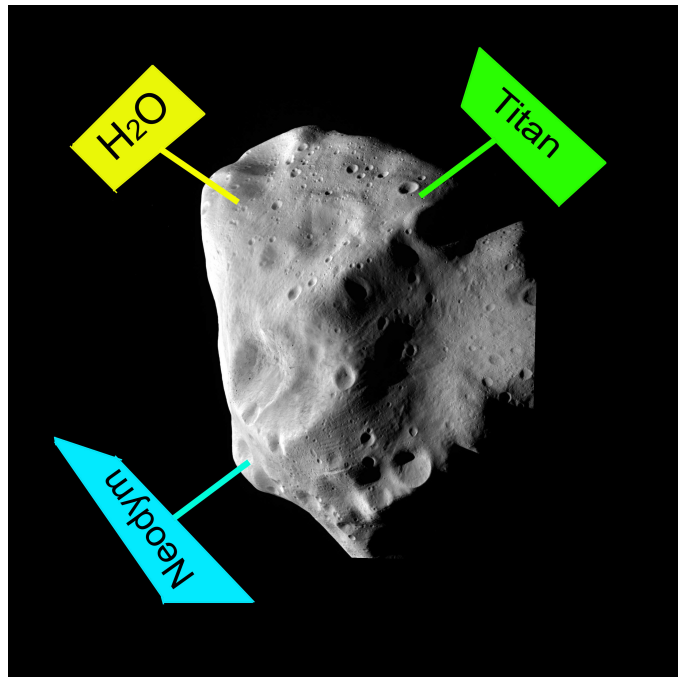


Abbildung 20.1: Asteroiden locken mit Rohstoffen und lebenswichtigen Substanzen. Originalfoto des Asteroiden (21) Lutetia, von Raumsonde Galileo aufgenommen [16].

Tonnen bis zu einem Asteroiden im Hauptgürtel transportieren. Nehmen wir einmal an, dass die Kosten für das Einfangen eines 10 t schweren Asteroiden mit nachfolgendem Transport zur Erde von der gleichen Größenordnung sind. Der aktuelle Goldpreis liegt bei 60000 Dollar pro Kilogramm<sup>1</sup>, eine Tonne ist also 60 Millionen Dollar teuer. Selbst wenn der Asteroid zu 10% aus Gold bestehen würde – zur Überraschung aller Experten – lohnt sich diese Mission also nicht.

Als Alternative bietet sich an, den Himmelskörper à la Jules Verne auf die Erde zu lenken. Wie in Kapitel 19 erläutert wird, ist aber auch das technisch sehr schwierig und ökonomisch nicht zu rechtfertigen.

In diesem Zusammenhang mag man auch an einen militärischen 'Nutzen' denken - also das gezielte Ablenken eines Asteroiden, um ihn in Feindesland auf der Erde auftreffen zu lassen. Aus den genannten Gründen müssen wir uns aber da auf absehbare Zeit keine Sorgen machen.

Zukünftige Raumfahrer und Raumfahrerinnen könnten Asteroiden anzapfen, um neben anderen Substanzen auch Wasser zu extrahieren. Wenn man dieses in Sauerstoff und Wasserstoff spaltet, gewinnt man das lebenswichtige Gas

zum Atmen und gleichzeitig Treibstoff. Großer Vorteil: Man muss diese Materialien nicht mit auf die Reise nehmen, sondern man kann diesen 'Proviand' unterwegs aufsammeln. Entsprechendes gilt für hypothetische Raumstationen, die auf Asteroiden installiert werden. Aber derartige Missionen sind in den kommenden Jahrzehnten nicht zu erwarten.





## Kapitel 21

### Gibt es Exoasteroiden?

Als **Exoplaneten** - kurz für extrasolare **Planeten** - bezeichnet man Planeten, welche andere Sterne umrunden, also nicht zu unserem Sonnensystem gehören. Diese Planeten sind wegen der großen Entfernungen und der viel heller leuchtenden 'Muttersterne' nur sehr schwer von der Erde aus nachzuweisen. Bisher<sup>1</sup> sind trotz dieser Herausforderungen 5640 Exoplaneten in unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, nachgewiesen worden [116]. Dabei stellt sich heraus, dass die meisten Sterne mindestens einen Planeten besitzen. Unser Sonnensystem stellt also in dieser Beziehung im Universum keine Ausnahme dar.

Sofort drängt sich die Frage auf, ob es entsprechend auch **Exomonde**, **Exokometen** und **Exoasteroiden** gibt. Aller Wahrscheinlichkeit nach ja! Exokometen hat man schon 1987 zum ersten Mal nachgewiesen [115] Durch ihre Schweife sind sie leichter aufzuspüren als Exoasteroiden. Direkt oder indirekt nachweisen konnte man letztere bis zum Jahr 2011 nicht. Inzwischen ist auch das gelungen, allerdings nur auf *indirekte* Weise: Der 150 Lichtjahre entfernte Stern 'GD 61' wurde von einem Asteroiden umrundet. Leider 'lebt' dieser nicht mehr, man hat nur die Trümmer gefunden, die jetzt eine ringförmige Scheibe um den Stern bilden [142]. Die Größe des ursprünglichen Asteroiden wird auf 110 Kilometer Durchmesser abgeschätzt. Ein *direkter* Nachweis eines Exoasteroiden steht weiterhin aus.

Das gilt allerdings nur für Asteroiden, die in 'ihrem' Planetensystem verblieben sind und nicht auf irgendeine Weise von ihrem Stern getrennt wurden und sich dann auf den Weg zu uns gemacht haben! Im Oktober 2017 wurde in *unserem* Sonnensystem ein asteroiden-ähnliches Objekt entdeckt, das als **interstellares Objekt** klassifiziert wurde. Es trägt heute den schönen Namen '**Oumuamua**' ('Bote', aus dem Hawaiischen), genauer "1I/'Oumuamua", wo-

---

<sup>1</sup>Stand 1.3.2024

bei '1I' bedeutet, dass es sich um das erste identifizierte interstellare Objekt handelt. Das Besondere an diesem Asteroiden ist seine hyperbolische **Flugbahn**. 'Oumuamua hat eine **Exzentrizität**, die deutlich größer ist als eins,

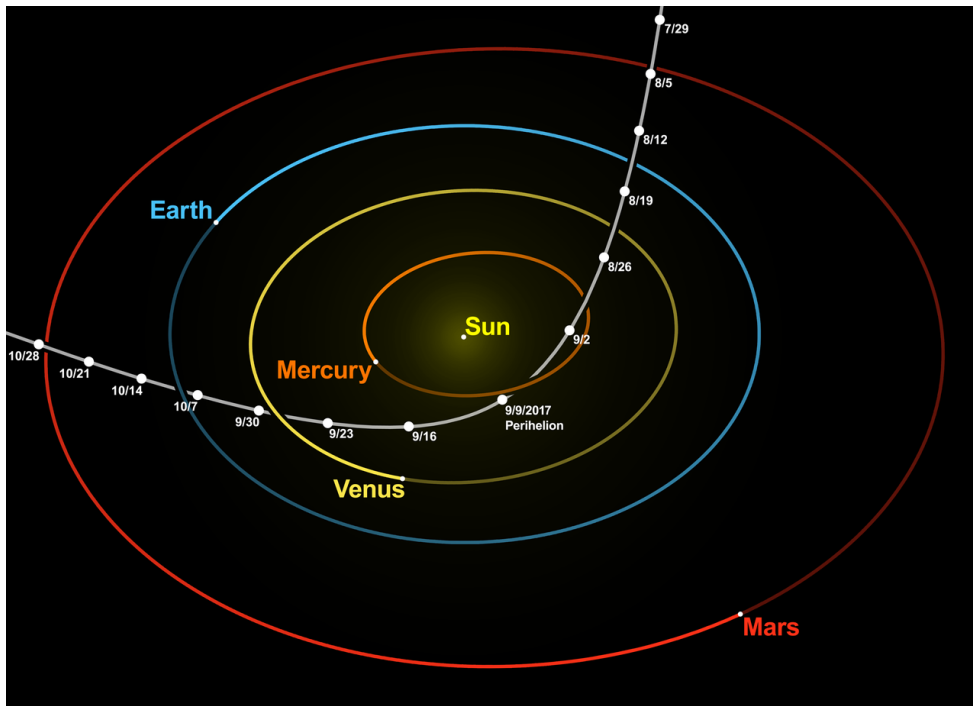


Abbildung 21.1: Flugbahn des interstellaren Asteroiden 1I/'Oumuamua [18]. Die Zahlen geben das Datum an, zum Beispiel 10/14 = 14. Oktober 2017.

$\epsilon = 1,20$ . Wie in Kapitel 4 erklärt, bedeutet dies, dass die Gravitationskraft unseres Zentralgestirns nicht ausreicht, diesen Himmelskörper 'festzuhalten' und auf eine **elliptische Umlaufbahn** zu zwingen. 'Oumuamua kommt also von außerhalb unseres Sonnensystems und wird es auch wieder verlassen. Anfang März 2023 betrug die Entfernung von der Sonne bereits 34 AE [33], das ist jenseits der Neptun-Bahn. Abb. 21.1 zeigt seine Bahn beim Durchflug durch den innersten Teil des Sonnensystems im Jahr 2017. Dieser **interstellare Asteroid** bewegt sich in einem großen **Neigungswinkel** relativ zur **Ekliptik**, also der Ebene, nahe der sich 'unsere' Planeten und die meisten Asteroiden bewegen. Auch die große **Bahnneigung** deutet darauf hin, dass 'Oumuamua *nicht* zusammen mit den Planeten und Asteroiden in der Frühzeit unseres Sonnensystems entstanden ist.

Mittlerweise wurde ein zweites interstellares Objekt gefunden, Es wurde von **Gennadiy Borisov**, einem 'Amateurastronomen' mit einem Teleskop mit 65 cm großer Öffnung, also wirklich professioneller Ausrüstung (!), im August

2019 entdeckt. Dieser **interstellare Asteroid** hat sogar eine Exzentrizität von 3,4. Er konnte in den nachfolgenden Monaten auch von Amateurastronomen mit bescheidenerer Ausrüstung fotografisch festgehalten werden, wie Abbildung 21.2 beweist.

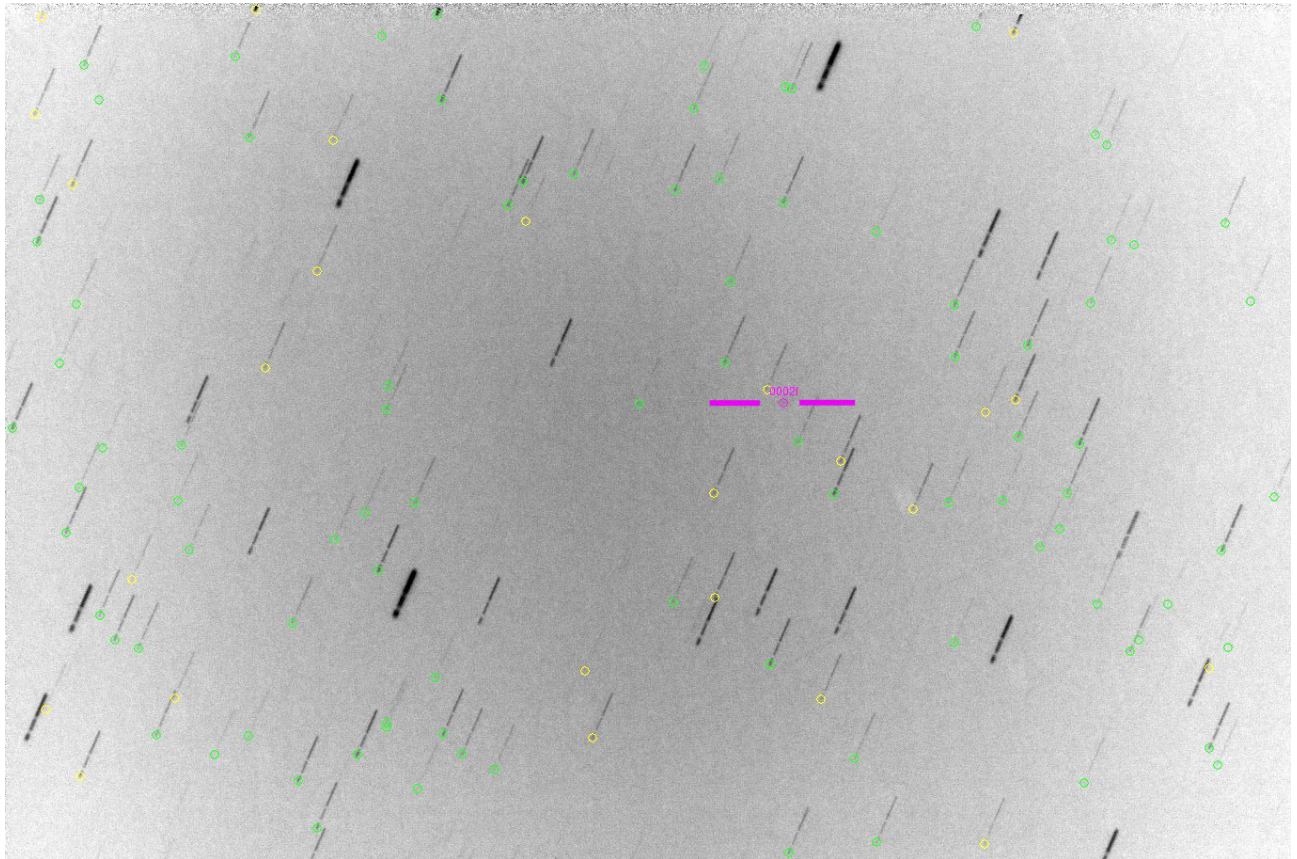


Abbildung 21.2: Der **interstellare Asteroid 2I/Borisov**, aufgenommen am 4.12.2019 von T. Hebbeker mit einem **Spiegelteleskop** mit einer Öffnung von 20 cm Durchmesser. Die Helligkeiten sind invertiert: Sterne sind dunkel, der Himmelshintergrund ist hell. Um dieses Bild zu bekommen, wurden 20 Einzelfotos mit dem Programm Astrometrica [190] so überlagert, dass der Asteroid immer an der gleichen Stelle steht, und die umgebenden Sterne sich relativ zu ihm bewegen, was zu den Strichspuren im Bild führt [190]. Die kleinen gelben und grünen Kreise markieren die Sternpositionen zu Beginn der Aufnahmeserie. Der zu diesem Zeitpunkt knapp 17 mag helle Borisov erscheint als Pünktchen rechts oberhalb der Bildmitte und ist lila markiert. Das Gesichtsfeld beträgt etwa 0.5 Grad in der Breite, die Gesamtaufnahmedauer etwa eine halbe Stunde.



## Kapitel 22

### Asteroiden und (Science-)Fiction?

Im letzten Kapitel dieses Buches schweifen wir etwas ab, von der Wissenschaft zur Fiktion. Während im Alltagsleben der Menschen auf diesem Planeten die Asteroiden derzeit keine große Rolle spielen, kommen sie in Science-Fiction-Romanen, in Filmen und Computerspielen häufig zum Zuge. Allein für (1) *Ceres* listet die Webseite 'Asteroid Ceres in fiction' [73] knapp 20 Literaturstellen auf.

Besonders beliebt sind natürlich hypothetische spektakuläre Asteroideneinschläge auf der Erde. Die erste Verfilmung eines Romans mit diesem Thema war in den 1950er Jahren ein großer Kinoerfolg: Der Katastrophenfilm 'Der jüngste Tag' ('*When Worlds Collide*', siehe Abb. 22.1) basiert auf dem 1932 erschienen gleichnamigen Buch von *Edwin Balmer* und *Philip G. Wylie*. Die bekannteren neueren Blockbuster wie '*Deep Impact*' haben wir schon in Kapitel 19 erwähnt.

Das Interesse des Science-Fiction-Genres an Asteroiden ist sicher auch darin begründet, dass diese Himmelskörper aus festem Material bestehen. So kann ein Raumschiff dort landen und die Reisenden können auf der Oberfläche herumlaufen – fast wie auf der Erde. So verbinden sich das Exotische und Neue einerseits mit dem Bekannten und Vertrauten andererseits.

Dass Asteroiden-Geschichten nicht immer mit Katastrophen und Gewalt einhergehen müssen, zeigt das 1943 veröffentlichte berühmte Büchlein '*Der kleine Prinz*' von *Antoine de Saint-Exupéry*. Der Prinz lebt in unserer Phantasie auf dem Asteroiden B612. Um dieses Märchen zu würdigen, wurde ein im Jahr 1993 gefundener Asteroid (46610) *Bésixdouze* genannt: Die dezimale Zahl 46610 wird im hexadezimalen Zahlensystem als B612 geschrieben, und der französische Name sagt es in Worten.

Auch andere Autoren sind durch die Benennung eines Asteroiden geehrt worden. Ein Beispiel stellt der Kleinplanet (15924) *Douglasadams* mit der frü-





Abbildung 22.1: Dieses Filmplakat warb 1951 für den Paramount-Film 'When Worlds Collide' [125]

heren vorläufigen Bezeichnung 2001 DA<sub>42</sub> dar. Letztere wurde nach den in Kapitel 2 vorgestellten strengen Regeln vergeben. In dem von Douglas Adams im Jahr 1979 veröffentlichten Roman 'Per Anhalter durch die Galaxis', der inzwischen Kult-Status genießt, kommt der Zahl 42 eine besondere Bedeutung zu. . .

Kann man einen Asteroiden als Raumstation nutzen? Und sogar ein an menschliche Bedürfnisse angepasstes Ökosystem schaffen? Im Prinzip ja, allerdings ist das kein leichtes Unterfangen, wie im 1988 erschienenen Buch 'Der Asteroid' von Levon S. Chatschaturjanc und Evgenij V. Chrunov geschildert wird. Abbildung 22.2 zeigt die Titelseite.

Auch der hypothetische Asteroid Phagofels wird von Menschen besiedelt: Um es sich dort gemütlich zu machen, haben sie ihn ausgehöhlt und in Rotation versetzt, um auf der Innenseite die irdische Schwerkraft zu simulieren – so phantasiert Iain M. Banks im Roman 'Exzession'.



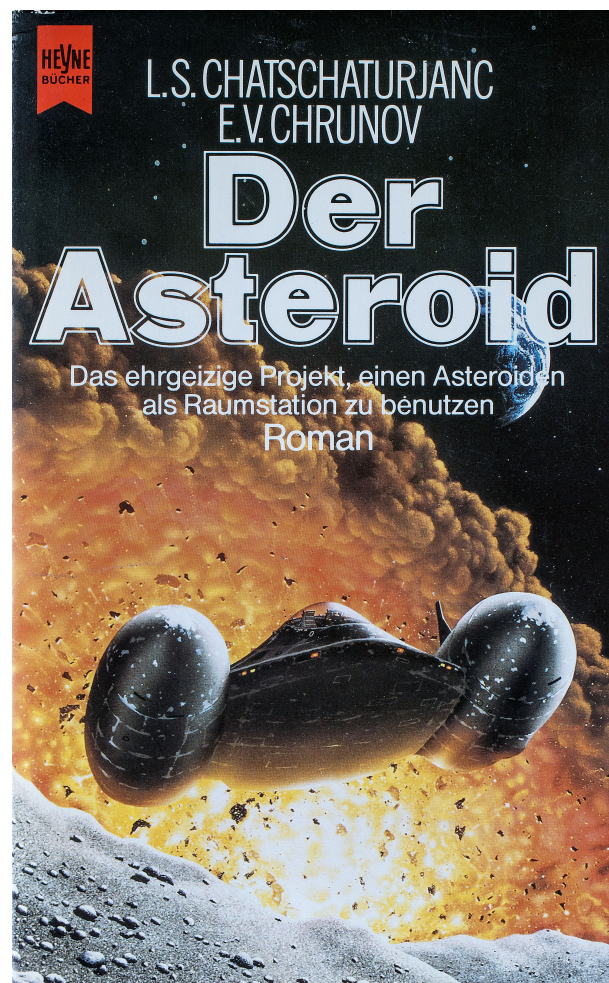


Abbildung 22.2: Science-Fiction-Roman ‘Der Asteroid’ von **Levon S. Chatschaturjanc** und **Evgenij V. Chrunov**, Heine-Verlag 1988

Oft dient ein Asteroid auch als Rohstoffquelle – siehe Kapitel 20. Dort haben wir schon **Jules Verne’s** Roman von 1908, ‘**Die Jagd nach dem Meteor**’ zusammengefasst. Im Jahr 1932 wurde diese Idee eines im Sonnensystem herumfliegenden ‘Goldklumpens’ von **Clifford D. Simak** in der Kurzgeschichte ‘**The Asteroid of Gold**’ aufgegriffen [104].

Schließlich sind nicht nur Zusammenstöße von Erde und Asteroid gefährlich, auch Raumschiffe sollten zu enge und heftige Kontakte vermeiden. Dies wird zum Beispiel in der Kurzgeschichte von **Isaac Asimov** ‘Gestrandet vor Vesta’ (**‘Marooned off Vesta’**) thematisiert. Hier geht es um die Gefahr, beim Durchfliegen des **Asteroidengürtels** nicht mehr rechtzeitig ausweichen zu können. . .

Gefahr lauert auch in Form eines riesigen Raumschiffs, das zunächst als

Asteroid, mit dem fiktiven Namen **Rama**, eingestuft wurde. Dieses hat **Arthur C. Clarke** 1972 in Form des Romans **'Rendezvous mit Rama'** ins Sonnensystem eingeschleust. Gewisse Spekulationen um das interstellare Objekt **II/'Oumuamua** – siehe Kapitel 21 – gehen in genau diese Richtung. Aber bisher bleibt es bei Fiktion.

Das gilt insbesondere für Schriften, in denen Asteroiden von exotischen Wesen besiedelt sind, wie im utopischen Buch **'Lesabéndio'** von **Paul Scheerbart** aus dem Jahr 1913, das fremde Lebewesen auf dem Asteroiden **(2) Pallas** beschreibt. Schon viel früher, im Jahr 1897, hat sich der berühmte russische Raketenpionier **Konstantin Eduardowitsch Ziolkowski**, der auch Science-Fiction-Romane schrieb, dieses Themas angenommen. In **'Dreams of Earth and Sky'** spekuliert er über Leben auf Asteroiden [126, 186]. Der Autor wurde durch **(1590) Tsiolkovskaja** geehrt, aber wohl hauptsächlich aufgrund der von ihm aufgestellten Raketengleichung.

Wenn Ihnen alle diese Fiktionen immer noch nicht weit genug gehen und Sie den Pfad der Wissenschaft endgültig verlassen wollen, dann gibt es ja auch noch die Astrologie! Auch die 'Sterndeuterinnen' und 'Sterndeuter' wissen die Asteroiden für ihre Zwecke einzusetzen [122]. . .

In der Überschrift dieses Kapitels ist das Wort Science in Klammern gesetzt. Denn auch in der 'Non-Science-Fiction'-Literatur kommen Asteroiden vor - direkt oder indirekt. So wird Sherlock Holmes' Widersacher Professor James Moriarty die Autorenschaft für ein wissenschaftliches Buch mit Titel 'The Dynamics of an Asteroid' zugeschrieben. Obwohl sonst überhaupt nichts vom Sherlock-Holmes-Autor **Arthur Conan Doyle** zu diesem Thema gesagt wird, ranken sich viele Spekulationen um den Inhalt dieses fiktiven Buches [45].

Es ist interessant zu sehen, wie einige der früheren Science-Fiction-Themen rund um Asteroiden inzwischen tatsächlich eine reale Entsprechung gefunden haben: Aus Fiktion wurde Science! In **'Marooned off Vesta'** ist ein havariertes bemanntes Raumschiff in einer Umlaufbahn um **(4) Vesta** gefangen. Heute wird der Asteroid **Ceres** von der (unbemannten) Raumsonde **Dawn** noch für viele Jahre umkreist werden, denn der Treibstoff ist aufgebraucht. Der Film **'Armageddon'** [188] aus dem Jahr 1998 erzählt, wie ein auf die Erde zurasender riesiger Asteroid gesprengt wird - die zwei Teile verfehlen die Erde und unser Planet entgeht knapp der Apokalypse. Und das alles in 18 Tagen! Wissenschaftlich wurde das Thema Kollision und deren Vermeidung konkret mit der **DART-Sonde** untersucht, mit der im Jahr 2022 der Asteroidenmond **Dimorphos** geringfügig von seiner Bahn abgelenkt wurde. Näheres dazu in Kapitel 19. Als **NEAR Shoemaker** im Jahr 2001 auf **(433) Eros** aufsetzte, war das die erste Landung einer von Menschen hergestellten Sonde auf einem Asteroiden. Aber die Autoren von Science-Fiction waren natürlich schneller und

hatten solche Begegnungen längst vorweggenommen. . .

Auch viele 'künstlerische Darstellungen' von Asteroiden-Szenen sind im Netz zu finden. Wie sich **Don Davis** einen Einschlag auf der Erde vorstellt, ist in Abbildung 22.3 zu sehen.



Abbildung 22.3: **Künstlerische Darstellung:** So könnte der Einschlag des Himmelskörpers ausgesehen haben, der vor 65 Millionen Jahren die Saurier ausgerottet hat. Bildautor: **Don Davis**/NASA [48]

Und auch Briefmarken werden mit Asteroiden verziert. Abbildung 22.4 zeigt als Beispiel eine Luxemburger Marke, die 2021 anlässlich des internationalen 'Asteroid Days' [184] herausgegeben wurde. Mit Hilfe einer rot-blauen-3D-Brille kann man (162173) Ryugu sogar dreidimensional bewundern.

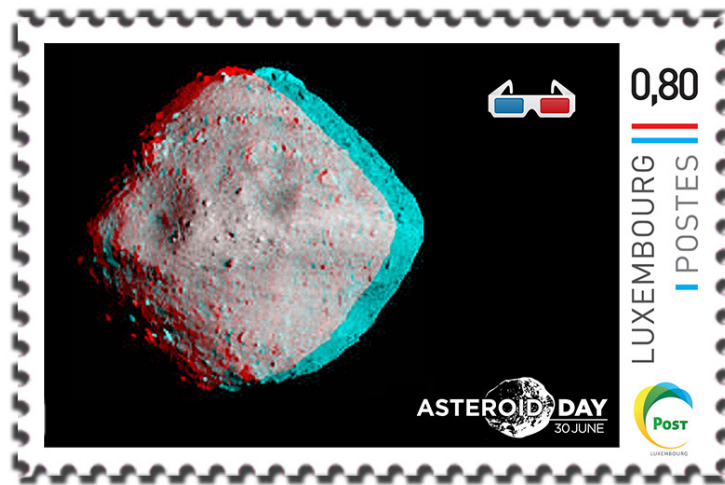


Abbildung 22.4: Briefmarke aus Luxemburg aus dem Jahr 2021 [174], die den jährlichen ‘Asteroid Day’ am 30. Juni mit einem Bild des Asteroiden (162173) Ryugu feiert. Mit einer Blau-Rot-Brille kann man ihn sogar dreidimensional sehen!

Schließlich sollen noch Beispiele für Kleinplaneten angeführt werden, die es in die Welt der Musik geschafft haben: Dem Asteroiden (4179) Toutatis hat die Komponistin Kaija Saariaho im Jahr 2005 ein Orchesterstück gewidmet. Im gleichen Jahr hat Mark-Anthony Turnage die Werke ‘Ceres’ und ‘Juno’ komponiert.

Mehr über Asteroiden in der Literatur, Computerspielen, Musik und Filmen findet man in dem Buch ‘Asteroids’ des Astronomen Clifford J. Cunningham [126]. Wen kann das jetzt noch überraschen: es gibt auch einen Planetoiden mit Namen (4276) Clifford.



## Dank

Die monatlichen Vorträge 'Neuigkeiten aus der Astronomie' von **Günther Bendt** in der Aachener Sternwarte [80] haben mich immer wieder auf spannende aktuelle wissenschaftliche Ergebnisse aufmerksam gemacht, auch zum Thema Asteroiden.

Bei meinen eigenen Beobachtungen von und Messungen an Asteroiden waren mir insbesondere die folgenden Programme eine große Hilfe: *Astrometrica* [190] (Astrometrische Analyse, Autor **Herbert Raab**), *Stellarium* [140] (Planetariumsprogramm, **Fabien Chéreau** et al.), und *Find\_orb* [119] (Orbit-Berechnung, **Bill Gray**).

Häufig genutzte Webseiten waren *Astrometry.net* [132] für das 'Plate solving', *The Sky Live* [110] für aktuelle Beobachtungsmöglichkeiten, *IAU Minor Planet Center* [76] für das Herunter- und Hochladen von Bahndaten, und vor allem das Online-Lexikon *Wikipedia* [89].

Die von mir verwendeten Bücher sind im Literaturverzeichnis aufgeführt und im Text an den entsprechenden Stellen zitiert.

Viele der im Buch gezeigten Abbildungen entstammen der Bilddatenbank *Wikimedia Commons* [88]. Ich danke allen Bildautoren für die Erlaubnis zur Verwendung ihrer Bilder in diesem Buch. Alle Fotos und Illustrationen ohne Referenz in der Bildunterschrift stammen vom Autor dieses Werks. Die Texte dieses Buches wurden *nicht* durch KI-Software generiert.

Frau Sabine Eicker danke ich für die sorgfältige Korrektur von Tippfehlern und sprachlichen Schwächen.





# Bildnachweise

Alle Fotos und Illustrationen ohne Referenz in der Bildunterschrift stammen vom Autor dieses Werks (Thomas Hebbeker).

Die anderen Abbildungen weisen in den Bildunterschriften mittels Referenz auf die genauen Quellenangaben im Literaturverzeichnis hin.

Lizenzhinweise zu Wikimedia Commons-Bildern:

- Bild 1.2 auf Seite 3:  
Justin Cowart, Ceres - RC3 - Haulani Crater (22381131691) (cropped), CC BY 2.0
- Bild 1.3 auf Seite 5: gemeinfrei
- Bild 2.2 auf Seite 13: gemeinfrei
- Bild 4.13 auf Seite 41:  
Socrates Linardos, Mars retrograde motion, CC BY-SA 4.0
- Bild 5.2 auf Seite 50:  
Praemonitus, Asteroid populations by orbital distance, CC BY-SA 4.0
- Bild 7.1 auf Seite 57: gemeinfrei
- Bild 8.3 auf Seite 66:  
ESO/LAM, Psyche asteroid eso, CC BY 4.0
- Bild 8.4 auf Seite 67: gemeinfrei
- Bild 9.1 auf Seite 70:  
Antonsusi, using an image of Lexicon, LargestTNOs-de, CC BY-SA 3.0
- Bild 11.1 auf Seite 89:  
S.Wetzel, HorSys, CC BY-SA 4.0
- Bild 11.4 auf Seite 93:  
Foreade, Light curve of (250) Bettina, CC BY-SA 4.0
- Bild 11.15 auf Seite 110:  
The original uploader was Degreen at German Wikipedia. Improved Baba66 (opt Perhelion) on request; En. translation Locusta Fr. translation Eric Bajart Nl. translation BoH, Sonne Strahlungsintensitaet, CC BY-SA 2.0 DE
- Bild 11.17 auf Seite 112:  
Cmglee, Comparison refraction diffraction spectra, CC BY-SA 3.0
- Bild 11.18 auf Seite 112: gemeinfrei

- Bild 12.5 auf Seite 129:  
KES47 / Original version from German Wikipedia. By user: WikiStefan. 28 Oct 2004, ParallaxV2, CC BY 3.0
- Bild 13.1 auf Seite 141: Gemeinfrei
- Bild 13.2 auf Seite 143: Gemeinfrei
- Bild 13.4 auf Seite 147: Gemeinfrei
- Bild 13.5 auf Seite 148: Gemeinfrei
- Bild 14.2 auf Seite 156: Gemeinfrei
- Bild 15.1 auf Seite 165:  
Aiwok, Hraschina meteorite, etched slice, Naturhistorisches Museum Wien, CC BY-SA 3.0
- Bild 16.1 auf Seite 171:  
ISAS/JAXA, Itokawa06 hayabusa, CC BY 4.0  
ESO. Acknowledgement: JAXA, Schematic view of asteroid (25143) Itokawa, CC BY 4.0
- Bild 16.2 auf Seite 172: Gemeinfrei
- Bild 16.3 auf Seite 174: Gemeinfrei
- Bild 16.4 auf Seite 175: Gemeinfrei
- Bild 16.5 auf Seite 176:  
NASA, ESA, K. Meech and J. Kleyna (University of Hawaii), O. Hainaut (European Southern Observatory), Heic1906a Asteroid 6478 Gault, CC BY-SA 4.0
- Bild 17.2 auf Seite 180:  
Kevin Gill from Los Angeles, CA, United States, Enceladus - November 21 2009 (49728085428), CC BY 2.0
- Bild 19.3 auf Seite 193:  
Denys (fr) ; historicaire, Tunguska-Map-fr, CC BY 3.0
- Bild 19.6 auf Seite 199:  
anonym, Torino scale, CC BY-SA 3.0
- Bild 20.1 auf Seite 210:  
ESA 2010 MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/DASP/IDA, Rosetta triumphs at asteroid Lutetia, Zusatzbeschriftung von Thomas Hebbeker, CC BY-SA 2.0
- Bild 21.1 auf Seite 214:  
nagualdesign; Tomruen, Oumuamua orbit at perihelion, CC BY-SA 4.0
- Bild 22.3 auf Seite 221: Gemeinfrei

## Literaturverzeichnis

- [1] 243 Ida — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/243\\_Ida](https://en.wikipedia.org/wiki/243_Ida), Abruf 2022-11-03.
- [2] Astronomical naming conventions — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Astronomical\\_naming\\_conventions#Minor\\_planets](https://en.wikipedia.org/wiki/Astronomical_naming_conventions#Minor_planets), Abruf 2022-11-06.
- [3] 433 Eros — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=433\\_Eros](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=433_Eros), Abruf 2022-11-07.
- [4] List of exceptional asteroids — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_exceptional\\_asteroids](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_exceptional_asteroids), Abruf 2022-11-08.
- [5] Asteroid — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid>, Abruf 2022-11-09.
- [6] File:Ceres - RC3 - Haulani Crater (22381131691) (cropped).jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Ceres\\_-\\_RC3\\_-\\_Haulani\\_Crater\\_\(22381131691\)\\_\\_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Ceres_-_RC3_-_Haulani_Crater_(22381131691)__(cropped).jpg), Abruf 2023-02-09.
- [7] VHS Volkssternwarte Aachen, Ehrung für Karl Heidlas. <https://sternwarte-aachen.de/berichte/ehrung-fuer-karl-heidlas>, Abruf 2023-02-09.
- [8] Polsequenz — Wikipedia, die freie Enzyklopädie. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polsequenz>, Abruf 2023-02-18.
- [9] 99942 Apophis — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=99942\\_Apophis](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=99942_Apophis), Abruf 2023-02-27.
- [10] Chelyabinsk meteor — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chelyabinsk\\_meteor](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chelyabinsk_meteor), Abruf 2023-02-27.
- [11] File:Torino scale.svg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Torino\\_scale.svg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Torino_scale.svg), Abruf 2023-02-27.

- [12] File:Tunguska-Map-fr.svg — Wikimedia Commons, the free media repository. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Tunguska-Map-fr.svg>, Abruf 2023-02-27.
- [13] Meteor Crater — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Meteor\\_Crater](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Meteor_Crater), Abruf 2023-02-27.
- [14] Torino scale — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Torino\\_scale](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Torino_scale), Abruf 2023-02-27.
- [15] Tunguska event — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Tunguska\\_event](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Tunguska_event), Abruf 2023-02-27.
- [16] File:Rosetta triumphs at asteroid Lutetia.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Rosetta\\_triumphs\\_at\\_asteroid\\_Lutetia.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Rosetta_triumphs_at_asteroid_Lutetia.jpg), Abruf 2023-02-28.
- [17] Liste der Monde von Asteroiden — Wikipedia, die freie Enzyklopädie. [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste\\_der\\_Monde\\_von\\_Asteroiden](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste_der_Monde_von_Asteroiden), Abruf 2023-03-01.
- [18] File:Oumuamua orbit at perihelion.png — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Oumuamua\\_orbit\\_at\\_perihelion.png](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Oumuamua_orbit_at_perihelion.png), Abruf 2023-03-02.
- [19] List of missions to minor planets — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List\\_of\\_missions\\_to\\_minor\\_planets](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_missions_to_minor_planets), Abruf 2023-03-10.
- [20] File:Dart-poster3.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Dart-poster3.jpg>, Abruf 2023-03-11.
- [21] 162173 Ryugu — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=162173\\_Ryugu](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=162173_Ryugu), Abruf 2023-03-13.
- [22] Double Asteroid Redirection Test — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Double\\_Asteroid\\_Redirection\\_Test](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Double_Asteroid_Redirection_Test), Abruf 2023-03-13.
- [23] File:Eros - PIA02923 (color).jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Eros\\_-\\_PIA02923\\_\(color\).jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Eros_-_PIA02923_(color).jpg), Abruf 2023-03-13.
- [24] File:Footprint of DART spacecraft over the spot where it impacted asteroid Dimorphos.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Footprint\\_of\\_DART\\_spacecraft\\_over\\_the\\_spot\\_where\\_it\\_impacted\\_asteroid\\_Dimorphos.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Footprint_of_DART_spacecraft_over_the_spot_where_it_impacted_asteroid_Dimorphos.jpg), Abruf 2023-03-13.

- [25] Hayabusa2 — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hayabusa2>, Abruf 2023-03-13.
- [26] NEAR Shoemaker — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=NEAR\\_Shoemaker](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=NEAR_Shoemaker), Abruf 2023-03-13.
- [27] 2008 TC3 — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2008\\_TC3](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2008_TC3), Abruf 2023-03-28.
- [28] 2023 DZ2 — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2023\\_DZ2](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2023_DZ2), Abruf 2023-03-31.
- [29] 16 Psyche — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=16\\_Psyche](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=16_Psyche), Abruf 2023-07-05.
- [30] 3200 Phaethon — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=3200\\_Phaethon](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=3200_Phaethon), Abruf 2023-07-05.
- [31] 69230 Hermes — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=69230\\_Hermes](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=69230_Hermes), Abruf 2023-07-05.
- [32] Kepler space telescope — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kepler\\_space\\_telescope](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kepler_space_telescope), Abruf 2023-07-05.
- [33] The Sky Live. <https://theskylive.com/planetarium?obj=oumuamua>, Abruf 2023-07-30.
- [34] 101955 Bennu — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=101955\\_Bennu](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=101955_Bennu), Abruf 2023-08-05.
- [35] 15 Eunomia — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=15\\_Eunomia](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=15_Eunomia), Abruf 2023-08-05.
- [36] 25143 Itokawa — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=25143\\_Itokawa](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=25143_Itokawa), Abruf 2023-08-05.
- [37] Asteroid — Wikipedia, die freie Enzyklopädie. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Asteroid>, Abruf 2023-08-05.
- [38] Asteroid spectral types — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Asteroid\\_spectral\\_types](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Asteroid_spectral_types), Abruf 2023-08-05.
- [39] Ceres (dwarf planet) — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ceres\\_\(dwarf\\_planet\)](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ceres_(dwarf_planet)), Abruf 2023-08-05.

- [40] Sloan Digital Sky Survey — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sloan\\_Digital\\_Sky\\_Survey](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sloan_Digital_Sky_Survey), Abruf 2023-08-05.
- [41] Spectro-Polarimetric High-Contrast Exoplanet Research — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Spectro-Polarimetric\\_High-Contrast\\_Exoplanet\\_Research](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Spectro-Polarimetric_High-Contrast_Exoplanet_Research), Abruf 2023-08-05.
- [42] Very Large Telescope — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Very\\_Large\\_Telescope](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Very_Large_Telescope), Abruf 2023-08-05.
- [43] List of observatory codes — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List\\_of\\_observatory\\_codes](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_observatory_codes), Abruf 2023-08-06.
- [44] Potentially hazardous object — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Potentially\\_hazardous\\_object](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Potentially_hazardous_object), Abruf 2023-08-06.
- [45] The Dynamics of an Asteroid — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The\\_Dynamics\\_of\\_an\\_Asteroid](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The_Dynamics_of_an_Asteroid), Abruf 2023-08-16.
- [46] Formation and evolution of the Solar System — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Formation\\_and\\_evolution\\_of\\_the\\_Solar\\_System](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Formation_and_evolution_of_the_Solar_System), Abruf 2023-09-09.
- [47] Gaia (Raumsonde) — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Gaia\\_\(Raumsonde\)](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Gaia_(Raumsonde)), Abruf 2023-09-09.
- [48] File:Coast Impact.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Coast\\_Impact.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Coast_Impact.jpg), Abruf 2023-09-15.
- [49] Roy A. Tucker — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Roy\\_A.\\_Tucker](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Roy_A._Tucker), Abruf 2023-09-15.
- [50] 225088 Gonggong — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=225088\\_Gonggong](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=225088_Gonggong), Abruf 2023-09-16.
- [51] File:Bezeichnung der Himmelskörper Encke 1850.png — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Bezeichnung\\_der\\_Himmelsk%C3%B6rper\\_Encke\\_1850.png](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Bezeichnung_der_Himmelsk%C3%B6rper_Encke_1850.png), Abruf 2023-09-16.



- [52] Formation and evolution of the Solar System — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Formation\\_and\\_evolution\\_of\\_the\\_Solar\\_System](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Formation_and_evolution_of_the_Solar_System), Abruf 2023-09-16.
- [53] Near-Infrared Spectrograph. [https://www.msss.com/small\\_bodies/near\\_new/nis.html](https://www.msss.com/small_bodies/near_new/nis.html), Abruf 2023-09-16.
- [54] Active Asteroids. <https://www.zooniverse.org/projects/orionnau/active-asteroids>, Abruf 2023-09-17.
- [55] 1036 Ganymed — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=1036\\_Ganymed](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=1036_Ganymed), Abruf 2023-09-23.
- [56] 594913 'Aylò'chaxnim — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=594913\\_%EA%9E%8CAyl%C3%B3%EA%9E%8Cchaxnim](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=594913_%EA%9E%8CAyl%C3%B3%EA%9E%8Cchaxnim), Abruf 2023-09-23.
- [57] Chicxulub crater — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chicxulub\\_crater](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chicxulub_crater), Abruf 2023-09-23.
- [58] Nördlinger Ries — Wikipedia, die freie Enzyklopädie. [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=N%C3%B6rdlinger\\_Ries](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=N%C3%B6rdlinger_Ries), Abruf 2023-09-23.
- [59] File:Ceres-Beobachtung von Piazzi.png — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Ceres-Beobachtung\\_von\\_Piazzi.png](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Ceres-Beobachtung_von_Piazzi.png), Abruf 2023-10-08.
- [60] Raumflugmechanik — Wikipedia, die freie Enzyklopädie. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Raumflugmechanik>, Abruf 2023-10-08.
- [61] Wasser und Kohlenstoff in Asteroidgestein gefunden. <https://www.tagesschau.de/wissen/forschung/asteroid-wasser-kohlenstoff-100.html>, Abruf 2023-10-11.
- [62] Unistellar — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Unistellar>, Abruf 2023-10-30.
- [63] Eris — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Eris\\_\(dwarf\\_planet\)](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Eris_(dwarf_planet)), Abruf 2023-11-11.
- [64] Haumea — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Haumea>, Abruf 2023-11-11.
- [65] Makemake — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Makemake>, Abruf 2023-11-11.

- [66] P/2013 R3 (Catalina-PanSTARRS) — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=P/2013\\_R3\\_\(Catalina%E2%80%93PanSTARRS\)](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=P/2013_R3_(Catalina%E2%80%93PanSTARRS)), Abruf 2023-11-12.
- [67] P/2016 G1 (PanSTARRS) — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/P/2016\\_G1\\_\(PanSTARRS\)](https://en.wikipedia.org/wiki/P/2016_G1_(PanSTARRS)), Abruf 2023-11-12.
- [68] 90377 Sedna — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=90377\\_Sedna](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=90377_Sedna), Abruf 2023-11-15.
- [69] 2023 NT — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2023\\_NT1](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2023_NT1), Abruf 2023-11-19.
- [70] Astronomical naming conventions — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Astronomical\\_naming\\_conventions](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Astronomical_naming_conventions), Abruf 2023-11-19.
- [71] Dwarf planet — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dwarf\\_planet](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dwarf_planet), Abruf 2023-11-19.
- [72] 2060 Chiron — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2060\\_Chiron](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2060_Chiron), Abruf 2023-11-25.
- [73] Asteroid Ceres in fiction. [https://en.everybodywiki.com/Asteroid\\_Ceres\\_in\\_fiction](https://en.everybodywiki.com/Asteroid_Ceres_in_fiction), Abruf 2024-01-01.
- [74] Catalina Sky Survey — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Catalina\\_Sky\\_Survey](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Catalina_Sky_Survey), Abruf 2024-01-01.
- [75] Jet Propulsion Laboratory JPL. <https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams/>, Abruf 2024-01-01.
- [76] Minor Planet Center. <https://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>, Abruf 2024-01-01.
- [77] Minor Planet Center Data Base. <https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB/MPCORB.DAT>, Abruf 2024-01-01.
- [78] SIMBAD Astronomical Database - CDS (Strasbourg). <https://simbad.unistra.fr/simbad/>, Abruf 2024-01-01.
- [79] Tiny Asteroid Buzzes by Earth – the Closest Flyby on Record. <https://www.nasa.gov/feature/jpl/tiny-asteroid-buzzes-by-earth-the-closest-flyby-on-record>, Abruf 2024-01-01.
- [80] VHS Volkssternwarte Aachen. <https://sternwarte-aachen.de/>, Abruf 2024-01-02.

- [81] A Guide to Minor Planet Photometry. <https://www.minorplanet.info/ObsGuides/Misc/photometryguide.htm>, Abruf 2024-01-03.
- [82] Bundesdeutsche Arbeitsgemeinschaft für Veränderliche Sterne BAV. <https://www.bav-astro.eu>, Abruf 2024-01-03.
- [83] File:Chiron orbit.PNG — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Chiron\\_orbit.PNG](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Chiron_orbit.PNG), Abruf 2024-01-03.
- [84] File:Hraschina meteorite, etched slice, Naturhistorisches Museum Wien.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Hraschina\\_meteorite,\\_etched\\_slice,\\_Naturhistorisches\\_Museum\\_Wien.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Hraschina_meteorite,_etched_slice,_Naturhistorisches_Museum_Wien.jpg), Abruf 2024-01-03.
- [85] File:Itokawa06 hayabusa.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Itokawa06\\_hayabusa.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Itokawa06_hayabusa.jpg), Abruf 2024-01-03.
- [86] File:UltimaThule CA06 color 20190516.png — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:UltimaThule\\_CA06\\_color\\_20190516.png](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:UltimaThule_CA06_color_20190516.png), Abruf 2024-01-03.
- [87] International Astronomical Search Collaboration (IASC). <http://iasc.cosmosearch.org/>, Abruf 2024-01-03.
- [88] Wikimedia Commons. [https://commons.wikimedia.org/wiki/Main\\_Page](https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page), Abruf 2024-01-03.
- [89] Wikipedia, the free encyclopedia, verschiedene Artikel. <https://en.wikipedia.org/>, Abruf 2024-01-03.
- [90] Datei:LargestTNOs-de.png — Wikimedia Commons, the free media repository. <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:LargestTNOs-de.png>, Abruf 2024-01-06.
- [91] File:14060-Asteroid-P2013R3-Disintegration-20140306\_annotated.png — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:14060-Asteroid-P2013R3-Disintegration-20140306\\_annotated.png](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:14060-Asteroid-P2013R3-Disintegration-20140306_annotated.png), Abruf 2024-01-06.
- [92] File:243 ida.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:243\\_ida.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:243_ida.jpg), Abruf 2024-01-06.
- [93] File:Asteroid populations by orbital distance.svg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Asteroid\\_populations\\_by\\_orbital\\_distance.svg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Asteroid_populations_by_orbital_distance.svg), Abruf 2024-01-06.

- [94] File:Comparison refraction diffraction spectra.svg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Comparison\\_refraction\\_diffraction\\_spectra.svg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Comparison_refraction_diffraction_spectra.svg), Abruf 2024-01-06.
- [95] File:Enceladus - November 21 2009 (49728085428).png — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Enceladus\\_-\\_November\\_21\\_2009\\_\(49728085428\).png](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Enceladus_-_November_21_2009_(49728085428).png), Abruf 2024-01-06.
- [96] File:Fraunhofer lines.svg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Fraunhofer\\_lines.svg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Fraunhofer_lines.svg), Abruf 2024-01-06.
- [97] File:Heic1906a Asteroid 6478 Gault.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Heic1906a\\_Asteroid\\_6478\\_Gault.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Heic1906a_Asteroid_6478_Gault.jpg), Abruf 2024-01-06.
- [98] File:ParallaxV2.svg — Wikimedia Commons, the free media repository. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:ParallaxV2.svg>, Abruf 2024-01-06.
- [99] File:Psyche asteroid eso.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Psyche\\_asteroid\\_eso.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Psyche_asteroid_eso.jpg), Abruf 2024-01-06.
- [100] File:PSYCHE (Asteroid).jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:PSYCHE\\_%28Asteroid%29.jpg](https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:PSYCHE_%28Asteroid%29.jpg), Abruf 2024-01-06.
- [101] File:Schematic view of asteroid (25143) Itokawa.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Schematic\\_view\\_of\\_asteroid\\_\(25143\)\\_Itokawa.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Schematic_view_of_asteroid_(25143)_Itokawa.jpg), Abruf 2024-01-06.
- [102] File:Sonne Strahlungsintensitaet.svg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Sonne\\_Strahlungsintensitaet.svg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Sonne_Strahlungsintensitaet.svg), Abruf 2024-01-06.
- [103] 65803 Didymos — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/65803\\_Didymos](https://en.wikipedia.org/wiki/65803_Didymos), Abruf 2024-01-07.
- [104] Asteroids in fiction — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Asteroids\\_in\\_fiction](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Asteroids_in_fiction), Abruf 2024-01-07.
- [105] Astronomische Koordinatensysteme — Wikipedia, die freie Enzyklopädie. [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Astronomische\\_Koordinatensysteme](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Astronomische_Koordinatensysteme), Abruf 2024-01-07.

- [106] File:File:HorSys.svg — Wikimedia Commons, the free media repository. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:HorSys.svg>, Abruf 2024-01-07.
- [107] File:Mars retrograde motion.png — Wikimedia Commons, the free media repository. "[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Mars\\_retrograde\\_motion.png](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Mars_retrograde_motion.png), Abruf 2024-01-07.
- [108] File:Protoplanetary disk.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Protoplanetary\\_disk.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Protoplanetary_disk.jpg), Abruf 2024-01-07.
- [109] File:YORP effect - wedged sphere.svg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:YORP\\_effect\\_-\\_wedged\\_sphere.svg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:YORP_effect_-_wedged_sphere.svg), Abruf 2024-01-07.
- [110] The Sky Live. <https://theskylive.com>, Abruf 2024-01-07.
- [111] Trans-Neptunian object — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Trans-Neptunian\\_object](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Trans-Neptunian_object), Abruf 2024-01-07.
- [112] File:Light curve of (250) Bettina.svg — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Light\\_curve\\_of\\_\(250\)\\_Bettina.svg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Light_curve_of_(250)_Bettina.svg), Abruf 2024-01-12.
- [113] File:OSIRIS-REX SamCam TAGSAM Event 2020-10-20 aftermath.gif — Wikimedia Commons, the free media repository. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OSIRIS-REX\\_SamCam\\_TAGSAM\\_Event\\_2020-10-20\\_aftermath.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OSIRIS-REX_SamCam_TAGSAM_Event_2020-10-20_aftermath.gif), Abruf 2024-02-18.
- [114] 4 Vesta — Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=4\\_Vesta](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=4_Vesta), Abruf 2024-03-10.
- [115] Exocomet — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Exocomet>, Abruf 2024-03-10.
- [116] Exoplanet — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Exoplanet>, Abruf 2024-03-10.
- [117] A. Berdeu. NARIT researcher discovered the first ever quadruple asteroid system. <https://www.narit.or.th/index.php/en-news/2137-narit-researcher-discovered-first-ever-quadruple-asteroid-system>, Abruf 2024-02-11.
- [118] A. Spitz. From Vermin to Destination: A Mission to an Asteroid. [https://astrosociety.org/file\\_download/inline/56d64aa9-1f82-4def-9520-02d0c3912e64](https://astrosociety.org/file_download/inline/56d64aa9-1f82-4def-9520-02d0c3912e64), Abruf 2024-01-01.

- [119] B. Gray. Find\_Orb: Orbit determination from observations. [https://www.projectpluto.com/find\\_orb.htm](https://www.projectpluto.com/find_orb.htm), Abruf 2023-09-16.
- [120] J. M. Baker. Astronomy picture of the day: Earthgrazer: The great daylight fireball of 1972. <https://apod.nasa.gov/apod/ap090302.html>, Abruf 2023-02-27.
- [121] Berliner Zeitung. Wertvoller als die Weltwirtschaft: Nasa reist zum Asteroiden „16 Psyche“. <https://www.berliner-zeitung.de/news/wertvoller-als-die-weltwirtschaft-nasa-reist-zum-asteroiden-16-psyche-li.282975>, 2022-11-02.
- [122] Bild der Frau. Die Macht der Asteroiden. <https://www.bildderfrau.de/horoskope/article238768855/Die-Macht-der-Asteroiden-Unsere-Reise-mit-Ceres-Pallas-Juno-und-Vesta.html>, Abruf 2023-08-05.
- [123] Bruce Gary. TRANSMISSION GRATING SA-100 AND CERES SPECTRUM. <http://brucegary.net/SA/>, 2023-11-01.
- [124] C. Chapman, D. Morrison. Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard. *Nature* 367, 33–40 (1994). doi:<https://doi.org/10.1038/367033a0>.
- [125] C. Thomas in Pattaya Mail. Classic Movies Remembered. <https://www.pattayamail.com/alltime/classic-movies-remembered-when-worlds-collide-1951-was-the-most-influential-asteroid-movie-ever-399739>, Abruf 2023-06-23.
- [126] C.J. Cunningham. *Asteroids*. Reaktion Books, London, 2021.
- [127] D. Dickinson. Amateur Astronomer Finds Kilometer-size Asteroid. <https://skyandtelescope.org/astronomy-news/amateur-astronomer-finds-kilometer-size-asteroid/>, Abruf 2023-09-16.
- [128] J. Li D. Jewitt and J. Agarwal. The Dust Tail of Asteroid (3200) Phaethon. *The Astrophysical Journal Letters*, 771 No 2, 2013. doi:<https://doi.org/10.1088/2041-8205/771/2/L36>.
- [129] D. Koschny, J. Drolshagen and N. Bobrinsky. Relevance of Asteroid Occultation Measurements to Determination of Characteristics of Near-Earth Objects. *Cosmic Research*, 2010, Vol. 48, No. 5 pp. 403–408. doi:<https://doi.org/10.1134/S0010952510050059>.
- [130] D. Morrison, C. Chapman, P. Slovic. *The Impact Hazard*. January 1994.
- [131] D. Vinkovic. Radiation-pressure mixing of large dust grains in protoplanetary disks. *Nature* 459, 227–229 (2009). doi:<https://doi.org/10.1038/nature08032>.



- [132] D. Lang et al. D.W. Hogg. Astrometry.net. <https://astrometry.net/>, Abruf 2024-01-07.
- [133] R. Dymock. *Asteroids and Dwarf Planets and How to Observe Them*. Springer, New York Dordrecht Heidelberg London, 2010.
- [134] J.W. Ekrutt. *Die Kleinen Planeten - Planetoiden und ihre Entdeckungsgeschichte*. Franckh'sche Verlagshandlung, W. Keller & Co, Kosmos Bibliothek, Stuttgart, 1977.
- [135] NASA Ernie Wright. March 17, 2013 lunar impact forms a new crater. <https://svs.gsfc.nasa.gov/4242/>, Abruf 2023-02-27.
- [136] ESA. Solar cells from Hubble Space Telescope. [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2009/05/ESA\\_built-solar\\_cells\\_retrieved\\_from\\_the\\_Hubble\\_Space\\_Telescope\\_in\\_2002](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2009/05/ESA_built-solar_cells_retrieved_from_the_Hubble_Space_Telescope_in_2002), Abruf 2024-01-03.
- [137] ESO. The strange lightcurve of asteroid (3671) Dionysus. <https://www.eso.org/public/germany/news/eso9718/>, 2023-10-07.
- [138] ESO. 42 asteroids imaged by ESO's VLT (annotated). <https://www.eso.org/public/images/eso2114a/>, 2024-02-18.
- [139] B.K. Baily et al. Asteroid 2023 NT1: A Cautionary Tale. <https://arxiv.org/abs/2310.13112>, 2023.
- [140] F. Chéreau et al. Stellarium. <https://stellarium.org/>, Abruf 2024-01-01.
- [141] Gy. M. Szabó et al. The heart of the swarm: K2 photometry and rotational characteristics of 56 Jovian Trojan asteroids. <https://arxiv.org/abs/1609.02760>, Abruf 2024-01-03.
- [142] J. Farihi et al. Possible Signs of Water and Differentiation in a Rocky Exoplanetary Body. *The Astrophysical Journal Letters*, 728 No 1, 2011. doi:<https://doi.org/10.1088/2041-8205/728/1/L8>.
- [143] J. Hanus et al. Volumes and bulk densities of forty asteroids from ADAM shape modeling. *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 601, A114, 2017. doi:<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629956>.
- [144] M. W. Buie et al. Size and Shape of (11351) Leucus from Five Occultations. *The Planetary Science Journal*, Vol 2 No 5, 2021. doi:<https://doi.org/10.3847/PSJ/ac1f9b>.
- [145] P. Vernazza et al. VLT/SPHERE imaging survey of the largest main-belt asteroids. *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 654, A56, 2021.
- [146] Q. Zhang et al. Sodium Brightening of (3200) Phaethon near Perihelion. *The Planetary Science Journal*, Vol 4 No 4, 2023. doi:<https://doi.org/10.3847/PSJ/acc866>.

- [147] R. Jaumann et al. The camera of the MASCOT asteroid lander on board Hayabusa-2. *Space Science Reviews*, 208, 07 2017. doi:10.1007/s11214-016-0263-2.
- [148] W. A. Dziembowski et al. Helioseismology and the solar age. <https://adsabs.harvard.edu/pdf/1999A%26A...343..990D>, 1999.
- [149] Y. Kawakatsu et al. Destiny mission overview. <https://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/sss13/paper/P2-132.pdf>, Abruf 2023-07-05.
- [150] Z. Martins et al. Extraterrestrial nucleobases in the Murchison meteorite. *Earth and Planetary Science Letters*, 270:130–136, 2008. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.026>.
- [151] NASA Solar System Exploration. NEAR Shoemaker. <https://solarsystem.nasa.gov/missions/near-shoemaker/in-depth/>, Abruf 2023-03-13.
- [152] E. Frappa. A website for Asteroidal Occultation Observers in Europe. <https://euraster.ericfrappa.com/results/2010/20100708-Roma-cbf.gif>, Abruf 2024-03-03.
- [153] E. Frappa. a website for Asteroidal Occultation Observers in Europe. <https://euraster.ericfrappa.com/>, Abruf 2024-03-07.
- [154] C. Gritzner. *Kometen und Asteroiden - Bedrohung aus dem All*. Aviatic-Verlag, Oberhaching, 1999.
- [155] J. Herrmann. *dtv-Atlas Astronomie*. Deutscher Taschenbuch Verlag, 2005.
- [156] H.G. Hertz. The Mass of Vesta. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1966IAUC.1983....3H/>, Abruf 2024-01-01.
- [157] J.L. Hilton. Asteroid Masses and Densities. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002aste.book..103H/>, Abruf 2024-01-01.
- [158] K. Hirayama. Groups of asteroids probably of common origin. *The Astronomical Journal*, 31:185–188, October 1918. doi:<https://doi.org/10.1086/104299>.
- [159] IOTA-ES. Asteroid (472) Roma bedeckt einen 2.7 mag hellen Stern delta Oph. [https://iota-es.de/roma2010/roma\\_ger.html](https://iota-es.de/roma2010/roma_ger.html), Abruf 2023-03-31.
- [160] IOTA/ES. News Feed – Occultation of Betelgeuse by (319) Leona. <https://call4obs.iota-es.de/news-feed-occultation-of-betelgeuse-by-319-leona>, Abruf 2023-12-15.
- [161] J. K. Beatty. Why do we call them 'Asteroids'? <https://skyandtelescope.org/astronomy-news/why-do-we-call-them-asteroids/>, Abruf 2022-11-09.

- [162] J. K. Beatty. Amateur Observers find an asteroid's moon. <https://skyandtelescope.org/astronomy-news/amateur-observers-discover-asteroid-moon/>, Abruf 2023-08-05.
- [163] J. K. Beatty. A Moon for Kuiper Belt's Makemake. <https://skyandtelescope.org/astronomy-news/a-moon-for-makemake/>, Abruf 2023-11-12.
- [164] S.P.S. Gulick et al. J. Morgan. Impact as a geologic process: Motivations to drill. *ResearchGate*, page 20, 05 2014.
- [165] John Sussenbach. Ceres. <https://skyandtelescope.org/online-gallery/ceres/>, Abruf 2023-10-22.
- [166] J.R. Hind. Occultation of the Planet Vesta by the Moon on Dec. 30, 1871. <https://adsabs.harvard.edu/full/1871MNRAS..32...65H>, 1871.
- [167] H.-U. Keller. *Kosmos-Himmelsjahr - 2023*. Franck Kosmos Verlag, 2022.
- [168] H.J. Klötzler. *Das Astro-Teleskop für Einsteiger*. Franck Kosmos Verlag, 2008.
- [169] Christian Köberl. *Katastrophen aus dem All - Impaktereignisse in der Erdgeschichte*. 2009.
- [170] Jet Propulsion Laboratory. NASA's Planetary Radar Captures Detailed View of Oblong Asteroid. <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-planetary-radar-captures-detailed-view-of-oblong-asteroid>, Abruf 2024-01-03.
- [171] Jet Propulsion Laboratory. Small-Body Database Query. [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_query.html](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html), Abruf 2024-01-07.
- [172] Lowell Observatory Library and Archives. Pluto discovery plates. <https://collectionslowellobservatory.omeka.net/items/show/1247>, Abruf 2024-01-08.
- [173] Paton Hawksley Educated Limited. Star Analyser 100. <https://www.patonhawksley.com/product-page/star-analyser>, Abruf 2023-10-30.
- [174] Post Luxemburg/NASA. Briefmarke 'Asteroid Day'. <https://asteroidday.org/updates/post-luxembourg-asteroid-day-2021-postcard-stamp/>, Abruf 2024-01-01.
- [175] M. Vargha and Z. Kolláth. The first century of the Konkoly Observatory. <https://konkoly.hu/staff/kollath/agf7.jpg>, 2023-10-07.
- [176] A. Mallama and J. L. Hilton. Computing Apparent Planetary Magnitudes for The Astronomical Almanac. <https://arxiv.org/abs/1808.01973>, 2018.
- [177] M. Moltenbrey. *Ausflug ins äußere Sonnensystem*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 2019. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59360-8>.

- [178] NASA. Meteor Crater, Arizona, USA. <https://solarsystem.nasa.gov/resources/2257/meteor-crater-arizona-usa/>, Abruf 2024-01-01.
- [179] NASA. NASA's DART Mission Hits Asteroid in First-Ever Planetary Defense Test. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-dart-mission-hits-asteroid-in-first-ever-planetary-defense-test>, Abruf 2024-01-01.
- [180] Center for Near Earth Object Studies NASA, JPL. Neo basics - neo groups. [https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo\\_groups.html](https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html), Abruf 2023-08-06.
- [181] OSIRIS-REx Mission NASA. NASA's OSIRIS-REx Achieves Sample Mass Milestone. <https://blogs.nasa.gov/osiris-rex/2023/10/20/nasas-osiris-rex-achieves-sample-mass-milestone/>, Abruf 2024-01-01.
- [182] Universe Today / NASA. <https://www.universetoday.com/wp-content/uploads/2016/10/Moon-crater-March-17animation-NASA.gif>, Abruf 2023-02-27.
- [183] NASA Science Editorial Team. Near-Earth Asteroids as of .... <https://science.nasa.gov/science-research/planetary-science/planetary-defense/near-earth-asteroids/>, Abruf 2024-01-04.
- [184] United Nations. International Asteroid Day - 30 June. <https://www.un.org/en/observances/asteroid-day>, Abruf 2024-01-01.
- [185] Observatorio ARVAL. Classic Satellites of the Solar System. <http://www.oarval.org/ClasSaten.htm>, Abruf 2024-01-01.
- [186] P. Klafkowski. Citizen of the Universe. Konstantin Tsiolkovsky's Cosmic Philosophy and Science Fiction. *Studia Rossica Gedanensia*, 4/2017, 335-360, Abruf 2023-08-16. doi:<https://doi.org/10.26881/srg.2017.4.21>.
- [187] D. Parrott. Tycho. <https://www.tycho-tracker.com/>, Abruf 2024-01-01.
- [188] N. Podbregar R. Blasius. *Armageddon - Der Einschlag*. Springer / ZDF, Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [189] R. Zimmermann. Daten, Grafiken und Fotos zum Sonnensystem. <https://www.sternwarte-kraichtal.de/sonnensystem.html>, 2023-09-09.
- [190] H. Raab. Astrometrica: Shareware for research grade CCD Astrometry. <http://www.astrometrica.at/default.html?/author.html>, Abruf 2024-01-03.
- [191] J. L. Remo. *Classifying and modeling NEO material properties and interactions*. University of Arizona Press, 1994. URL: <http://www.jstor.org/stable/j.ctv23khmpv.23>.
- [192] R.S. Dugan. Max Wolf. <https://adsabs.harvard.edu/full/1933PA.....41..239D>, 1933.

- [193] L.D. Schmadel. *Dictionary of Minor Planet Names, 5th edition*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [194] NASA SCIENCE. The Curious Tale of Asteroid Hermes. [https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/31oct\\_hermes](https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/31oct_hermes), Abruf 2023-07-05.
- [195] D.A.J. Seargent. *Weird Comets and Asteroids - The strange Little Worlds of the Sun's Family*. Springer, 2017.
- [196] C. Seligman. Hermes. <https://cseligman.com/text/asteroids/hermes.htm>, Abruf 2024-01-01.
- [197] G. Serio, A. Manara, and P. Sicoli. Impact as a geologic process: Motivations to drill. *Asteroids III*, 01 2002.
- [198] R. Stoyan. *Teleskop-1x1*. Occulum-Verlag, 2022.
- [199] T. Hebbeker. Asteroid Transits of the Sun. <https://zenodo.org/record/7305089>, 11/2022.
- [200] T. Hebbeker, J. Hattenbach. Der Asteroid (85275) und die astronomische Einheit. *VDS-Journal*, 02/2021.
- [201] Unistellar. What is Planetary Defense? <https://www.unistellar.com/citizen-science/planetary-defense/>, Abruf 2023-09-16.
- [202] University of Arizona, Lunar and Planetary Laboratory. Once Again the Catalina Sky Survey Discovers an Earth-Impacting Asteroid. <https://catalina.lpl.arizona.edu/news/once-again-catalina-sky-survey-discovers-earth-impacting-asteroid>, Abruf 2023-10-22.
- [203] University of Arizona, Lunar and Planetary Laboratory. Catalina Sky Survey. <https://catalina.lpl.arizona.edu/telescopes>, Abruf 2023-10-25.
- [204] W. Pluta. Zwergplanet Ceres hat einen unterirdischen Ozean. <https://www.golem.de/news/weltraumforschung-zwergplanet-ceres-hat-einen-unterirdischen-ozean-2008-150184.html>, Abruf 2024-01-01.
- [205] B. D. Warner. ALCDEF - Asteroid Lightcurve Photometry Database. <https://alcdef.org/>, Abruf 2024-01-03.

## Index

- 2020 QG (Asteroid), 34  
(22056) 2000 AU<sub>31</sub> (Asteroid), 117  
1937 UB (Asteroid), 63  
1972 Great Daylight Fireball, 191, 192  
1994 LY (Asteroid), 127–131  
1998 H<sub>49</sub> (Asteroid), 124  
1998 KY<sub>26</sub> (Asteroid), 140  
1I/'Oumuamua, interst. Asteroid, 6, 211, 218  
2000 AU<sub>31</sub> (Asteroid), 117  
2001 CC<sub>21</sub> (Asteroid), 140  
2001 DA<sub>42</sub> (Asteroid), 216  
2003 QQ<sub>47</sub> (Asteroid), 10  
2003 YM<sub>137</sub> (Asteroid), 168  
2003 YT<sub>1</sub> (Asteroid), 83  
2005 HC<sub>4</sub> (Asteroid), 34, 39  
2008 TC<sub>3</sub> (Asteroid), 192  
2010 LN<sub>135</sub> (Asteroid), 34  
2011 AG<sub>5</sub> (Asteroid), 101, 102  
2013 RQ<sub>95</sub> (Asteroid), 10  
2014 JO<sub>25</sub> (Asteroid), 79, 84  
2014 RC (Asteroid), 52, 53  
2020 QU<sub>6</sub> (Asteroid), 87  
2021 GV<sub>122</sub> (Asteroid), 10, 13  
2022 WJ<sub>1</sub> (Asteroid), 107  
2022 WJ<sub>1</sub>(Asteroid), 116  
2022 YG (Asteroid), 48  
2023 BU (Asteroid), 47, 198  
2023 DW (Asteroid), 196  
2023 DZ<sub>2</sub> (Asteroid), 100  
2023 NT<sub>1</sub> (Asteroid), 198  
2I/Borisov, interst. Asteroid, 213
- Achilles (Asteroid), 11  
Adams, Douglas, 216  
adaptive Optik, 104  
Albedo = Reflexionsvermögen, 48, 66, 93, 113
- Amaral, Leonardo, 87  
Amor (Asteroid), 198  
Amor-Asteroid, 142, 198, 199  
Annefrank (Asteroid), 138  
Aphel, 27, 33  
APL (Asteroid), 11, 139  
Apollo (Asteroid), 198  
Apollo-Asteroid, 62, 191, 198–200  
Apophis (Asteroid), 140, 148, 168, 189, 199, 205, 206  
Arecibo (Observatorium), 101, 102  
Arete (Asteroid), 106  
Argentina (Asteroid), 12  
Arrokoth (Asteroid), 139, 141, 168  
Asimov, Isaac, 217  
Asteroid 'Ayló'chaxnim, 34  
Asteroid (1) Ceres, 3, 7, 10, 11, 13, 15, 17, 20, 21, 29, 33, 40, 42, 45, 46, 56–58, 69, 71, 77, 80, 82, 88, 98, 106, 107, 132, 139, 157, 161, 162, 165, 167, 178, 188, 215, 218, 220  
Asteroid (10) Hygiea, 48  
Asteroid (100) Hekate, 82  
Asteroid (1000) Piazzia, 57, 115  
Asteroid (1002) Olbersia, 12  
Asteroid (101955) Bennu, 4, 107, 121, 137, 140, 158, 159, 163–165, 177  
Asteroid (10199) Chariklo, 47  
Asteroid (1036) Ganymed, 199  
Asteroid (10914) Tucker, 121  
Asteroid (11351) Leucus, 134, 135  
Asteroid (118) Peitho, 65  
Asteroid (1217) Maximiliana, 58  
Asteroid (1221) Amor, 198  
Asteroid (130) Elektra, 183  
Asteroid (132524) APL, 11, 139  
Asteroid (134340) Pluto, 6, 7, 10, 29, 38, 46, 58, 59, 69, 71–73, 82, 107, 139,



- 162, 167, 183  
 Asteroid (143649) 2003 QQ<sub>47</sub>, iii, 10  
 Asteroid (15) Eunomia, 49, 77, 78, 82, 103, 104, 107  
 Asteroid (152830) Dinkinesh, 140  
 Asteroid (153) Hilda, 35, 47  
 Asteroid (153814) 2001 WN<sub>5</sub>, 17  
 Asteroid (1590) Tsiolkovskaja, 218  
 Asteroid (15924) Douglasadams, 215, 216  
 Asteroid (159857) 2004 LJ<sub>1</sub>, 126, 127  
 Asteroid (16) Psyche, 50, 65–67, 140  
 Asteroid (162173) Ryugu, 79, 85, 140, 144, 145, 176, 219, 220  
 Asteroid (163693) Atira, 198  
 Asteroid (164121) 2003 YT<sub>1</sub>, 83  
 Asteroid (1776) Kuiper, 46  
 Asteroid (18) Melpomene, 17  
 Asteroid (1862) Apollo, 198  
 Asteroid (197) Arete, 106  
 Asteroid (1999) Hirayama, 45  
 Asteroid (2) Pallas, 17, 29, 47, 56, 58, 98, 218  
 Asteroid (20461) Dioretsa, 27  
 Asteroid (2060) Chiron, 13, 47, 170  
 Asteroid (2062) Aten, 198  
 Asteroid (21) Lutetia, 139, 208  
 Asteroid (22056) 2000 AU<sub>31</sub>, 117  
 Asteroid (225088) Gonggong, 71, 75, 121  
 Asteroid (2309) Mr. Spock, 11  
 Asteroid (24) Themis, 165  
 Asteroid (243) Ida, 5, 6, 94, 138, 181  
 Asteroid (250) Bettina, 92–94, 117  
 Asteroid (25143) Itokawa, 107, 139, 168, 169  
 Asteroid (253) Mathilde, 138, 142, 158  
 Asteroid (2685) Masursky, 138  
 Asteroid (279) Thule, 170  
 Asteroid (285263) 1998 QE<sub>2</sub>, 182  
 Asteroid (2867) Steins, 139  
 Asteroid (3) Juno, 17, 29, 56, 58, 98, 220  
 Asteroid (307) Nike, 137, 138  
 Asteroid (319) Leona, 98  
 Asteroid (3200) Phaethon, 56, 61–63  
 Asteroid (322) Brucia, 58  
 Asteroid (332706) Karlheidlas, 10–12  
 Asteroid (343158) Marsyas, 39  
 Asteroid (3671) Dionysus, 182  
 Asteroid (367943) Duende, 17  
 Asteroid (38) Leda, 10  
 Asteroid (385571) Otrera, 11  
 Asteroid (3912) Troja, 46  
 Asteroid (4) Vesta, 10, 16–19, 27, 29, 48, 50, 55, 56, 58, 80, 101, 106, 107, 139, 218  
 Asteroid (4179) Toutatis, 139, 220  
 Asteroid (4276) Clifford, 220  
 Asteroid (433) Eros, 17, 94, 113, 114, 128, 138, 142–144, 218  
 Asteroid (434) Hungaria, 35, 47  
 Asteroid (4356) Marathon, 82  
 Asteroid (45) Eugenia, 181  
 Asteroid (46) Hestia, 38  
 Asteroid (46610) Bésixdouze, 215  
 Asteroid (469) Argentina, 12  
 Asteroid (472) Roma, 94–97, 134  
 Asteroid (4769) Castalia, 102  
 Asteroid (486958) Arrokoth, 139, 141, 168  
 Asteroid (488453) 1994 XD, 123  
 Asteroid (5) Astraea, 58  
 Asteroid (50000) Quaoar, 75  
 Asteroid (500000) Quaoar, 71  
 Asteroid (5145) Pholus, 47  
 Asteroid (52) Europa, 10  
 Asteroid (52246) Donaldjohanson, 140  
 Asteroid (526) Jena, 12  
 Asteroid (543060) 2013 RQ<sub>95</sub>, 10  
 Asteroid (545) Pholus, 115  
 Asteroid (5535) Annefrank, 138  
 Asteroid (588) Achilles, 11  
 Asteroid (594913) 'Ayló'chaxnim, 34  
 Asteroid (6) Hebe, 17  
 Asteroid (617) Patroclus, 32, 140  
 Asteroid (624) Hektor, 32  
 Asteroid (646) Lipperta, 51  
 Asteroid (6478) Gault, 173, 174  
 Asteroid (65) Cybele, 47  
 Asteroid (65803) Didymos, 10, 140, 146, 181, 182, 188  
 Asteroid (65803) Didymos I, 146  
 Asteroid (69230) Hermes, 62, 64, 65

- Asteroid (7) Iris, 17  
 Asteroid (827) Wolfiana, 58  
 Asteroid (851) Zeissia, 11  
 Asteroid (85275) 1994 LY, 10, 127–131  
 Asteroid (9007) James Bond, 12  
 Asteroid (90377) Sedna, 71, 75  
 Asteroid (961) Gaspra, 138  
 Asteroid (98943), 140  
 Asteroid (9969) Braille, 138  
 Asteroid (999) Zachia, 57  
 Asteroid (99942) Apophis, 140, 148, 168, 189, 199, 205, 206  
 Asteroid II/'Oumuamua, 6, 211, 212, 218  
 Asteroid 2I/Borisov, 213  
 Asteroid Day, 190, 219, 220  
 Asteroid P/2016 G1, 167  
 Asteroid, aktiver, 47, 62, 173  
 Asteroid, interstellarer, 6, 212, 213  
 Asteroiden-Gruppe, 45, 47  
 Asteroiden-Marathon, 82  
 Asteroidenfamilie, 35  
 Asteroidengürtel, 1, 29, 36, 38–40, 65, 71, 82, 137, 156, 162, 173, 217  
 Astraea (Asteroid), 58  
 Astrofotografie, 58  
 Astroidengürtel, 46, 49, 50  
 Astrometrie, 91  
 Astronomical Unit (AU), 7  
 Astronomische Einheit (AE), 7, 27, 34, 99, 129  
 Aten (Asteroid), 198  
 Aten-Asteroid, 198–200  
 Atira (Asteroid), 198  
 Atira-Asteroid, 198, 199  
 Azimut (Winkelkoordinate), 88, 89  
 Bahn, 1, 2, 4, 7, 25, 27–30, 33, 36, 40, 45, 51, 55, 61, 72, 74, 75, 81, 92, 126, 129, 146, 149, 153, 155, 162, 167, 168, 170, 174, 195, 204, 212  
 Bahn, prograd, 27  
 Bahn, retrograd, 27, 40  
 Bahnelement, 26, 28, 37, 45, 75, 92, 127, 195, 196  
 Bahnelemente, 126  
 Bahnneigung, 27–29, 31, 35, 36, 212  
 Bahnparameter, 9  
 Bahnresonanz, 37, 38, 168  
 Baker, James M., 192  
 Balmer, Edwin, 215  
 Banks, Iain M., 216  
 Barringer, Daniel, 186  
 Barringer-Krater, 186–189, 193  
 Beckh-Widmanstätten, Alois von, 162  
 Bendt, Günther, 221  
 Bennu (Asteroid), 4, 107, 121, 137, 140, 158, 159, 163–165, 177  
 Bettina (Asteroid), 92–94, 117  
 Bode, Johann Elert, 55, 58  
 Bogensekunde, 21  
 Borisov, Gennadiy, 212  
 Braille (Asteroid), 138  
 Brucia (Asteroid), 58  
 Buch 'Asteroids ... and How to Observe Them', 120  
 Buch 'Asteroids', 58, 220  
 Buch 'Berliner Astronomisches Jahrbuch für 1853', 13  
 Buch 'Della scoperta del nuovo pianeta. . .', 58  
 Buch 'Der Asteroid', 216, 217  
 Buch 'Die Jagd nach dem Meteor', 207, 217  
 Buch 'Die Kleinen Planeten', 12  
 Buch 'Dreams of Earth and Sky', 218  
 Buch 'Exzession', 216  
 Buch 'Le Petit Prince', 181, 215  
 Buch 'Lesabéndio', 218  
 Buch 'Marooned off Vesta', 217, 218  
 Buch 'Per Anhalter durch die Galaxis', 216  
 Buch 'Rendezvous mit Rama', 218  
 Buch 'The Asteroid of Gold', 217  
 Buch 'Von dem neuen ... achten Hauptplaneten. . .', 58  
 Buch 'Weird Comets and Asteroids', 47  
 Burney, Charles Jr, 1  
 Bésixdouze (Asteroid), 215  
 C-Gruppe, 48  
 Cacciatore, Niccolò, 56  
 Cassini-Huygens (Raumsonde), 138  
 Castalia (Asteroid), 102

- Catalina Sky Survey (CSS), 115, 116  
 Ceres (Asteroid, Zwergplanet), 3, 6, 7, 10, 11, 13, 15, 17, 20, 21, 29, 33, 40, 42, 45, 46, 56–58, 69, 71, 77, 80, 82, 88, 98, 106, 107, 132, 139, 157, 161, 162, 165, 167, 178, 188, 215, 218, 220  
 Ch'ereau, Fabien, 221  
 Change'e-2 (Raumsonde), 139  
 Chariklo (Asteroid), 47  
 Charon (Pluto-Mond), 69, 107, 181  
 Chatschaturjanc, Levon S., 216, 217  
 Chicxulub-Krater, 190, 194  
 Chiron (Asteroid), 13, 47, 170  
 Chrunov, Evgenij V., 216, 217  
 Clarke, Arthur C., 218  
 Clifford (Asteroid), 220  
 Cunningham, Clifford J., 58, 220  
 Cybele (Asteroid), 47  
  
 Dactyl (Asteroidenmond), 5, 6, 138, 181  
 DART (Raumsonde), 140, 141, 146–148, 182, 188, 205, 218  
 Davis, Don, 219  
 Dawn (Raumsonde), 3, 58, 107, 139, 178, 218  
 de Gasparis, Annibale, 65  
 Deep Space 1 (Raumsonde), 138  
 Deklination (Winkelkoordinate), 89, 90, 125  
 DESTINY+ (Raumsonde), 62  
 Didymos (Asteroid), 10, 140, 146, 181, 182, 188  
 Dimorphos (Asteroidenmond), 11, 140, 146, 148, 181, 182, 205, 218  
 Dinkinesh (Asteroid), 140  
 Dionysus (Asteroid), 182  
 Dioretsa (Asteroid), 27  
 Donaldjohanson (Asteroid), 140  
 Doppelasteroid, 181  
 Douglasadams (Asteroid), 215, 216  
 Doyle, Arthur Conan, 218  
 Duende (Asteroid), 17  
 Dymock, Roger, 120  
 Dysnomia (Asteroidenmond), 75  
 Earth grazer, 191  
 Eigenrotation, 51  
 Ekliptik, 1, 27–30, 73, 150, 212  
 Ekrutt, Joachim, 12  
 Elektra (Asteroid), 183  
 Ellipse, 25–27, 40, 45, 212  
 Encke, Johann Franz, 13  
 Ephemeriden, 26, 127  
 Erdbahnkreuzer, 126, 199, 204  
 Erde, 4  
 Eris (Asteroid, Zwergplanet), 46, 70, 71, 73  
 Eros (Asteroid), 17, 94, 113, 114, 128, 138, 142–144, 218  
 Eugenia (Asteroid), 181  
 Eunomia (Asteroid), 49, 77, 78, 82, 103, 104, 107  
 Europa (Asteroid), 10  
 Exoasteroid, 211  
 Exokomet, 211  
 Exomond, 211  
 Exoplanet, 155, 211  
 Exzentrizität, 26–28, 33, 34, 39, 62, 75, 127, 168, 170, 212  
 Feldstecher, 1, 15–19, 21  
 Fernglas, 1, 15–19, 21  
 Film 'Armageddon', 185, 218  
 Film 'Deep Impact', 185, 215  
 Film 'E.T.', 175  
 Film 'When Worlds Collide', 215, 216  
 Fraunhofer, Joseph von, 111  
 Gaia (Weltraumteleskop), 123, 204  
 Galilei, Galileo, 55  
 Galileo (Raumsonde), 5, 138, 181, 208  
 Ganymed (Asteroid), 199  
 Gaspra (Asteroid), 138  
 Gault (Asteroid), 173, 174  
 Gauß, Carl Friedrich, 57  
 Gezeitenkraft, 156, 161  
 Goldstone-Observatorium, 101, 102  
 Gonggong (Asteroid), 71, 75, 121  
 Gray, Bill, 221  
 Griechen (Asteroiden-Gruppe), 31, 32  
 Größenklasse, 15, 18

- Halbachse, große, 27–30, 33, 35, 36, 38, 39, 45, 46, 62, 71, 75, 106, 127, 154, 155, 157, 170, 198  
 Harding, Karl Ludwig, 56  
 Hattenbach, Jan, 129  
 Haumea (Asteroid, Zwergplanet), 29, 46, 70–72  
 Hauptgürtel, 29, 36, 38–40, 46, 49, 50, 65, 71, 82, 137, 162, 173, 217  
 Hayabusa (Raumsonde), 107, 139, 143, 169  
 Hayabusa2 (Raumsonde), 140, 141, 144, 145, 176  
 Hebe (Asteroid), 17  
 Heidlas, Karl, 10–12  
 Hekate (Asteroid), 82  
 Hektor (Asteroid), 32  
 Helin, Eleanor, 10  
 Helligkeit, 15, 92  
 Hera (Raumsonde), 148  
 Hermes (Asteroid), 62, 64, 65  
 Herschel, William, 3, 55, 98  
 Hertz, Hans G., 106  
 Hestia (Asteroid), 38  
 Hestia-Lücke, 38  
 Hi'iaka (Asteroidenmond), 71  
 Hilda (Asteroid), 35, 47  
 Hilda-Gruppe, 47  
 Himmels-Polizey, 56  
 Hind, John Russel, 101  
 Hipparcos (Raumsonde), 87  
 Hirayama (Asteroid), 45  
 Hirayama, Kiyotsugu, 45  
 Horizontsystem (Koordinatensystem), 88, 89  
 Hubble Space Telescope, 141, 172, 174, 200, 202  
 Hungaria (Asteroid), 35, 47  
 Hungaria-Gruppe, 35, 47, 156  
 Hygiea (Asteroid), 48  
 Höhe (Winkelkoordinate), 88, 89  
 Ida (Asteroid), 5, 6, 94, 138, 181  
 Inklination, 27–29, 31, 35, 36, 47, 150, 212  
 Intern. Astron. Union (IAU), 3–6, 9  
 Intern. Astron. Union IAU, 71, 73  
 International Space Station (ISS), 99, 100, 200  
 Iris (Asteroid), 17  
 Itokawa (Asteroid), 107, 139, 168, 169  
 Jahn, Jost, 10  
 James Bond (Asteroid), 12  
 Jena (Asteroid), 12  
 Juno (Asteroid), 17, 29, 56, 58, 98, 220  
 Jupiter, 1, 2, 4, 13, 15, 17, 27, 30–32, 36, 38, 40, 46, 47, 55, 106, 137, 152–156, 161, 168, 171, 177, 197  
 Karlheidlas (Asteroid), 10–12  
 Kepler (Weltraumteleskop), 116, 117  
 Kepler, Johannes, 25, 33  
 Keplersche Gesetze, 25, 33, 36, 38  
 Kirkwood, Daniel, 36  
 Kirkwood-Lücke, 36, 38  
 Kleinplanet, 3  
 Komet, 4, 13, 82, 87, 121, 149, 155, 161, 167, 171, 173, 175, 176, 179, 185  
 Komet 1P/Halley, 6  
 Komet 67P/Tschurjumow-Gerassimenko, 179  
 Komet 95P/Chiron, 13  
 Komet Shoemaker-Levy-9, 171, 185  
 Kuiper (Asteroid), 46  
 Kuiper, Gerard Peter, 29, 46  
 Kuiper-Belt-Objekt (KBO), 46, 72, 141  
 Kuiper-Gürtel, 29, 38, 46, 74, 75, 167  
 Lagrange, Joseph-Louis, 31  
 Lagrange-Punkt, 31, 32, 88, 115  
 Leda (Asteroid), 10  
 Leona (Asteroid), 98  
 Leucus (Asteroid), 134, 135  
 Lichtgeschwindigkeit, 8, 34, 101  
 Lichtjahr, 8, 34  
 Lichtkurve, 51, 52, 79, 92, 130, 181  
 Lichtminute, 8  
 Liefke, Carolin, 10  
 Lipperta (Asteroid), 51  
 Lucy (Raumsonde), 135, 140  
 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) (Raumsonde), 203

- Lutetia (Asteroid), 139, 208
- Magnituden-Helligkeitsskala, 15, 18, 92, 93
- Makemake (Asteroid, Zwergplanet), 29, 46, 70–72, 74, 123
- Marathon (Asteroid), 82
- Mars, 1, 2, 4, 17, 39–41, 46, 47, 55, 62, 156, 168, 179
- Marsyas (Asteroid), 39
- Masursky (Asteroid), 138
- Mathilde (Asteroid), 138, 142, 158
- Maximiliana (Asteroid), 58
- Melpomene (Asteroid), 17
- Merkur, 1, 2, 4, 17, 34, 39, 62, 98, 154, 155, 167, 185
- Merkus, 27
- Messier, Charles, 55, 81
- Meteor, 4
- Meteorit, 5, 200, 202
- Meteoroid, 4, 5, 200, 202
- Minor Planet Center (MPC), 9, 71, 123, 126, 170
- Moltenbrey, Michael, 46, 75
- Montierung, 21, 22, 79
- Mr. Spock (Asteroid), 11
- Murchison-Meteorit, 176
- Namaka (Asteroidenmond), 71
- NEAR Shoemaker (Raumsonde), 113, 114, 138, 141–144, 218
- Near-Earth Asteroid (NEA), 46, 100, 200, 201
- Near-Earth Object (NEO), 46, 115, 198, 204
- Neptun, 1, 4, 34, 38, 46, 47, 73, 155
- New Horizons (Raumsonde), 139, 141
- Nike (Asteroid), 137, 138
- Nördlinger Ries, 189
- O’Keefe, John A., 171
- Olbers, Heinrich, 10, 12, 55, 56, 98
- Olbersia (Asteroid), 12
- Oort, Jan, 34
- Oort-Wolke, 75
- Oortsche Wolke, 34
- Oppositionsschleife, 40
- Orbit, 25, 27, 92, 212
- OSIRIS-APEX (Raumsonde), 140
- OSIRIS-REx (Raumsonde), 4, 107, 121, 137, 140, 158, 159, 164, 165, 177
- Otrera (Asteroid), 11
- P/2013 R<sub>3</sub> (Asteroid, Komet), 171–173
- Paddack, Stephen J., 171
- Pallas (Asteroid), 17, 29, 47, 56, 58, 98, 218
- Parallaxe, 18, 128, 129
- Patroclus (Asteroid), 32, 140
- Peitho (Asteroidenmond), 65
- Perihel, 26, 27, 33, 38, 168
- Perihelgeschwindigkeit, 38, 39
- Petit-Prince (Asteroidenmond), 181
- Phaethon (Asteroid), 56, 61–63
- Phaeton (hypothetischer Planet), 56, 156
- Phagofels (fiktiver Asteroid), 216
- Pholus (Asteroid), 47, 115
- Piazzi, Giuseppe, 3, 9, 10, 15, 56–58
- Piazza (Asteroid), 57, 115
- Pioneer-10 (Raumsonde), 137, 138
- Planet, 4, 13, 25, 27, 40, 43, 46, 47, 51, 55, 56, 58, 69, 73, 98, 106, 121, 155, 157, 167, 168, 171, 177, 188, 211
- Planeten, 32
- Planetoid, 3
- Plate solving, 91
- Plutino, 11, 38
- Pluto (Asteroid, Zwergplanet), 6, 7, 10, 29, 38, 46, 58, 59, 69, 71–73, 82, 107, 139, 157, 162, 167, 183
- Potentially Hazardous Asteroid (PHA), 62, 65, 193, 199
- Potentially Hazardous Object (PHO), 193
- Psyche (Asteroid), 50, 65–67, 140
- Psyche (Raumsonde), 65, 67, 140
- Quaroar (Asteroid), 71, 75
- Raab, Herbert, 221
- Radsijewski, Wladimir W., 171
- Rafrüti (Meteorit), 6

- Rakete 'Falcon Heavy', 207  
 Rama (fiktiver Asteroid), 218  
 Raumsonde, 137  
 Reinmuth, Karl, 63, 64  
 Rektaszension (Winkelkoordinate), 89, 90  
 Rektaszension (Winkelkoordinate), 90, 125  
 Roma (Asteroid), 94–97, 134  
 Rosetta (Raumsonde), 139, 179  
 Ryugu (Asteroid), 79, 85, 140, 144, 145, 176, 219, 220  
  
 S-Gruppe, 49  
 S/2015 (136472) 1 (Asteroidenmond), 72  
 Saariaho, Kaija, 220  
 Saint-Exupéry, Antoine de, 181, 215  
 Saturn, 1, 4, 17, 18, 154, 161, 170, 177, 197  
 Scheerbart, Paul, 218  
 Schroeter, Johann Hieronymus, 56  
 schwarzer Körper, 110  
 Schäfer, Kurt, 11  
 Seargent, A.J., 47  
 Sedna (Asteroid), 71, 75  
 Shoemaker, Eugene, 142  
 Simak, Clifford D., 217  
 Skiff, Brian, 64  
 Sloan Digital Sky Survey (SDSS), 122  
 Small Solar System Bodies (SSSB), 6  
 SOHO (Raumsonde), 62  
 Spektroskopie, 48, 108  
 Stardust (Raumsonde), 138  
 Steins (Asteroid), 139  
 STEREO (Raumsonde), 62, 63  
 Supernova, 161  
 Sussenbach, John, 77  
  
 Teleskop, 1, 21, 22, 55, 79, 81, 83, 115, 116, 132, 213  
 Themis (Asteroid), 165  
 Tholen, David J., 48  
 Tholen-Schema, 48, 113, 165  
 Thule (Asteroid), 170  
 Titius, Johann Daniel, 55  
 Titius-Bode-Reihe, 55, 156  
 Tombaugh, Clyde, 10, 58  
 Toutatis (Asteroid), 139, 220  
  
 Trans-Neptun-Objekt (TNO), 3, 11, 39, 46, 69, 70, 72, 74, 75  
 Troja (Asteroid), 46  
 Trojaner (Asteroiden-Gruppe), 31, 32, 35, 46  
 Tscheljabinsk-Meteor, 191  
 Tsiolkovskaja (Asteroid), 218  
 Tucker (Asteroid), 121  
 Tucker, Roy A., 121  
 Tunguska-Einschlag, 190, 191, 193  
 Turiner Skala, 195  
 Turnage, Mark-Anthony, 220  
  
 Umlaufperiode, 33, 38, 51, 53, 75, 106  
 Universal Time (UT), 12, 91, 125, 129  
 Uranus, 1, 4, 17, 55, 170  
 Urknall, 161  
  
 Venus, 1, 2, 4, 15–17, 34, 55, 62, 65, 98  
 Verne, Jules, 207, 208, 217  
 Very Large Telescope (VLT), 65, 66, 102–104  
 Vesta (Asteroid), 10, 16–19, 27, 29, 48, 50, 55, 56, 58, 80, 101, 106, 107, 139, 218  
 Vesta (Raumsonde), 107  
 Vestoid, 50  
 VLT = Very Large Telescope, 108  
  
 Winkelauflösung, 103  
 Wolf, Max, 10, 58, 121  
 Wolfiana (Asteroid), 58  
 Wylie, Philip G., 215  
  
 X-Gruppe, 50  
  
 Yarkowski, Iwan O., 171  
 YORP-Effekt, 168, 171, 173  
  
 Zach, Franz Xaver von, 56  
 Zach, Xavier von, 57  
 Zachia (Asteroid), 57  
 Zeissia (Asteroid), 11  
 Zentaur, 13, 47, 115, 170  
 Ziolkowski, Konstantin Eduardowitsch, 218  
 Zwergplanet, 3, 6, 29, 58, 69, 70, 73, 74, 107, 123, 167



- Zwergplanet (1) Ceres, 3, 7, 10, 11, 13,  
15, 17, 20, 21, 29, 33, 40, 42, 45,  
46, 56–58, 69, 71, 77, 80, 82, 88,  
98, 106, 107, 132, 139, 157, 161,  
162, 165, 167, 178, 188, 215, 218,  
220
- Zwergplanet (134340) Pluto, 6, 7, 10, 29,  
38, 46, 58, 59, 69, 71–73, 82, 107,  
139, 157, 162, 167, 183
- Zwergplanet (136108) Haumea, 29, 46, 70–  
72
- Zwergplanet (136199) Eris, 46, 70, 71, 73
- Zwergplanet (136472) Makemake, 29, 46,  
70–72, 74, 123
- Äquatorialsystem (Koordinatensystem), 89,  
90



