

# Asteroiden



Markus Demleitner, Lucas Ethington, Sonja Gabriel, Florian Freistetter,  
Chuanming Mao

9. November 2022

## Zusammenfassung

In diesem Tutorial werden Sie etwas über Asteroiden lernen, ein sehr interessantes und aktuelles Thema in unserer Erforschung des Sonnensystems und der Planetenbildung. Sie werden etwas über ihre Bahneigenschaften erfahren, indem Sie eine Datenbank abfragen. Fortgeschrittene Computerkenntnisse werden empfohlen, da das Tutorial die (geführte) Abfrage von elektronischen Online-Datenbanken und die Verwendung von Histogrammen erfordert.

## 1 Asteroiden im Sonnensystem

Planeten sind nicht die einzigen Dinge, die unsere Sonne umkreisen. Neben den Planeten gibt es viele Asteroiden – Überbleibsel aus der Zeit der Planetenentstehung.

Unsere Sonne war ursprünglich von einer großen Scheibe aus Staub und Gas umgeben. Nach und nach kollidierten die Teilchen in dieser Scheibe miteinander, begannen immer größere Objekte zu formen und bildeten schließlich die Planeten, die wir heute kennen. Allerdings wurde nicht das gesamte Material zur der Entstehung von Planeten verwendet.

In den äußersten Regionen des Sonnensystems bildeten sich keine großen Planeten, und Jupiter stoppte die weitere Planetenbildung im inneren Sonnensystem mit seinem enormen Gravitationseinfluss.

Im Jahr 1801 beobachtete der Astronom Giuseppe Piazzi ein sich bewegendes sternähnliches Objekt. Zunächst glaubte man, einen neuen Planeten zwischen Mars und Jupiter gefunden zu haben. Als jedoch immer mehr Objekte in dieser Region des Weltraums gefunden wurden, wurde klar, dass die Astronomen es mit einer anderen Klasse von Himmelskörpern zu tun hatten, die später als „Planetoiden“ oder „Asteroiden“ betitelt wurde. Heute haben wir Hunderttausende von Asteroiden zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter entdeckt, die den so genannten Hauptgürtel bilden.

Der Hauptgürtel ist jedoch nicht der einzige Ort, an dem Asteroiden zu finden sind. Im Jahr 1992 wurde ein Asteroid mit einer Umlaufbahn außerhalb der des Neptun entdeckt. Er war das erste Objekt des „Kuiperergürtels“, einer (zumindest vom Volumen her) viel größeren Ansammlung von Asteroiden als der Hauptgürtel.

Aufgrund der dynamischen Wechselwirkungen zwischen Planeten und Asteroiden wurden mehrere Asteroiden aus ihren jeweiligen Gürteln gestreut. Infolgedessen können Asteroiden fast überall im Sonnensystem entdeckt werden.

Alle Daten über Asteroiden werden verwaltet von dem Minor Planet Center<sup>1</sup> (MPC) der Internationalen Astronomischen Union (IAU). Diese Vereinigung von Astronom:innen archiviert und analysiert alle Beobachtungen von Asteroiden und nutzt die Daten zur Berechnung derer Orbits und publiziert sie für die wissenschaftliche Gemeinschaft. Die IAU entscheidet auch, wie die Asteroiden benannt werden.

Auf die große MPC-Datenbank kann über das Virtuelle Observatorium zugegriffen werden, eine internationales Netzwerk von Daten-Diensten, die größtenteils öffentlich zugänglich sind. Das ermöglicht, mehr über die grundlegenden Eigenschaften von Asteroiden zu erfahren.

## 2 Die MPC Datenbank

Die komplette MPC-Datenbank kann mit verschiedenen Techniken im Heidelberger Datenzentrum des Deutschen Virtuellen Observatoriums (GAVO) abgefragt werden.

Zunächst kann man mit dem Webformular <http://dc.zah.uni-heidelberg>.

---

<sup>1</sup><https://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>

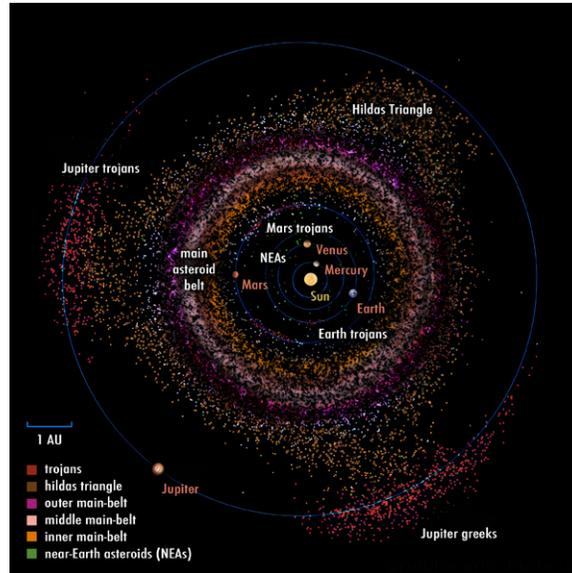


Abbildung 1: Grafik Draufsicht der Verteilung von Asteroiden im inneren Sonnensystems von Pablo Carlos Budassi / CC-BY-SA-4.0

[de/mpc/q/pla/form](#) von einem Webbrowser aus die Datenbank mit den gebräuchlichsten Parametern durchsuchen. Dazu gehören die Bahnelemente, die Größen zur Beschreibung der Position und die Form der Asteroidenbahn.

Werfen wir zunächst einen Blick darauf, welche Bahnelemente die MPC-Planetoiden-Datenbank verwendet.

Die **große Halbachse** oder auch **Hauptachse** ist definiert als die Hälfte des längsten Durchmessers einer elliptischen Umlaufbahn. Mit anderen Worten gibt sie eine Schätzung der Größe des Orbits; siehe Abbildung 2 für eine Veranschaulichung. Die zur Messung der großen Halbachse verwendete Einheit ist die Astronomische Einheit  $\text{AU}^2$ , die früher als große Halbachse der Erdumlaufbahn definiert war. Obwohl im Jahr 2012 die IAU beschloss, ihr einen festen Wert zu geben<sup>3</sup>, ist es immer noch richtig, an den „ungefähren Radius der Erdumlaufbahn“ zu denken, wenn man AU liest.

Die gemessene **Exzentrizität**  $e$  der ist definiert als die Abweichung von einem Kreis und hat einen Wert zwischen 0 und 1, wobei 0 den Kreis beschreibt und die Umlaufbahn gestreckter wird, je näher man an die 1 kommt. Eine Umlaufbahn mit einem Wert größer oder gleich 1 bedeutet, dass der Asteroid

<sup>2</sup>engl.: Astronomical Unit

<sup>3</sup>Die Erdumlaufbahn wackelt im Laufe der Zeit leicht, was auch für ihre Hauptachse gilt. Vor 2012 konnte sich somit der AU-Wert ändern, was für eine Einheit nicht sinnvoll ist.

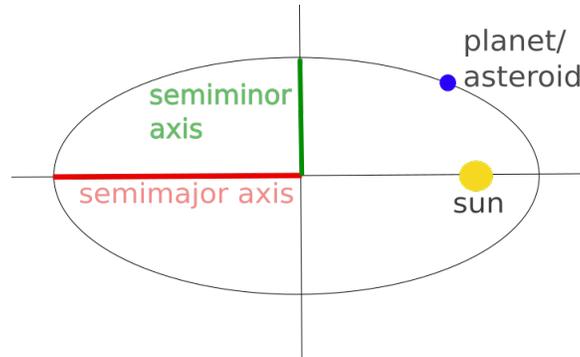


Abbildung 2: Große Halbachse („semimajor axis“) und kleine Halbachse („semiminor axis“)

das Sonnensystem verlässt, weshalb Sie in der Datenbank nichts dergleichen finden werden.

Große Halbachse und Exzentrizität geben Auskunft über Größe und Form des Orbits. Wir wissen jedoch noch nichts über die Lage und Ausrichtung des Orbits. Um diese zu bestimmen, werden drei Winkel benötigt.

Der erste Winkel ist die **Inklination**  $i$ . Er beschreibt die relative Neigung der Bahnebene gegenüber der Ekliptikebene. Die Ekliptik ist die Bezugsebene, die wir in unserem Sonnensystem verwenden, und sie entspricht der durchschnittlichen Bahnebene der Erde. Sie ist in Abbildung 3 skizziert.

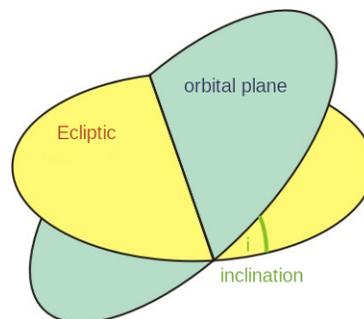


Abbildung 3: Inklination: der Winkel zwischen der Ekliptik und der Bahnebene („orbital plane“)

Der **Länge des aufsteigenden Knotens**  $\Omega$  ist der zweite Winkel (siehe Abbildung 4). Der Punkt, an dem der Orbit die Ebene der Erdumlaufbahn

(die Ekliptik) von Norden nach Süden durchläuft, wird als absteigender Knoten bezeichnet. Der Wert der Länge des aufsteigenden Knotens ist der Winkel zwischen den Linien, die die Sonne mit dem Frühlingspunkt und dem aufsteigenden Knoten verbindet. Dieser Frühlingspunkt ist technisch gesehen der Schnittpunkt zwischen dem Himmelsäquator und der Ekliptik; in der Praxis ist es das, worauf sich die Astronomen als das Äquivalent zu Greenwich am Himmel einigten, also der Punkt, von dem aus die Längengrade gezählt werden.

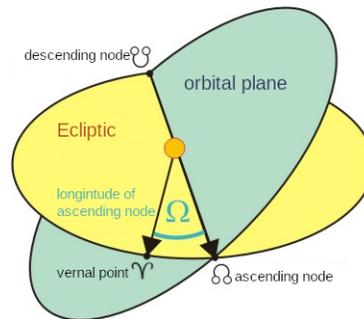


Abbildung 4: Länge des aufsteigenden Knotens („longitude of the ascending node“); descending und ascending node sind auf Deutsch absteigender und aufsteigender Knoten, vernal point der Frühlingspunkt.

Das **Argument des Perihels**  $\omega$  ist der dritte Winkel (siehe Abbildung 5). Er ist definiert als der Winkel zwischen den Linien, die die Sonne verbinden einerseits mit dem Perihel (d. h. dem Punkt auf der Umlaufbahn, der der Sonne am nächsten liegt) und andererseits dem aufsteigenden Knoten.

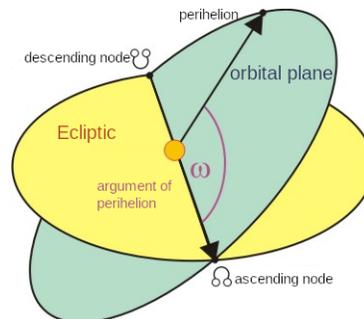


Abbildung 5: Argument des Perihels

Mit diesen drei Winkeln ( $i$ ,  $\Omega$ ,  $\omega$ ) ist es möglich, die Position einer Orbitalellipse im Raum eindeutig zu definieren. Wir wissen nun, wie der Orbit eines

Asteroids aussieht, was großartig ist, aber wir wissen immer noch nicht, wo sich dieser Asteroid tatsächlich befindet.

Um dies zu bestimmen, gibt es verschiedene Methoden. Die am häufigsten verwendete ist die mittlere Anomalie. Die mittlere Anomalie wird mit Hilfe des „mittleren Objekts“ definiert. Das mittlere Objekt ist ein gedachtes Objekt mit der gleichen Umlaufzeit wie der Asteroid, das zum gleichen Zeitpunkt das Perihel passiert. Es ist so definiert, dass es eine kreisförmige Umlaufbahn hat, die zu einer konstanten Geschwindigkeit auf seiner gesamten Umlaufbahn führt.

Der Winkel zwischen dem aktuellen Standort des „mittleren Objekts“ und dem Perihel die mittlere Anomalie genannt. Einfacher gesagt: Es ist ein einfach handhabbares Maß für den Ort des Objekts (das auf seiner Ellipsenbahn nach Kepler am Perihel schneller läuft als das mittlere Objekt und in Sonnenferne langsamer).

Die MPC-Datenbank kann anhand all dieser Werte durchsucht werden. Weiterhin ist es auch möglich, die Datenbank nach der Epoche (dem Zeitpunkt, an dem diese Werte zum ersten Mal gemessen wurden) und der absoluten Helligkeit<sup>4</sup>  $H$  des Objekts zu durchsuchen.

### 3 Asteroiden im Webbrowser erkunden

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind die Asteroiden nicht zufällig im Sonnensystem verteilt. Die erste Frage, der wir nachgehen wollen, lautet also: Wo befinden sich alle Asteroiden in unserem Sonnensystem? Im Hauptgürtel zwischen Mars und Jupiter sind sehr viele Objekte bekannt. Um nicht gleich mit großen Datenmengen hantieren zu müssen, sehen wir erst einmal woanders hin (siehe in Abbildung 1 eine Skizze des Sonnensystems). Die Hauptachse des Mars beträgt 1,52 AU, die des Jupiters beträgt 5,2 AU. Schauen wir uns also außerhalb von Jupiters Orbit um, weit weg vom Asteroidengürtel, mit einer Hauptachse zwischen 6 und 7 AU.

- ▷ 1 *Laden von Daten aus der Datenbank* – Öffnen Sie dazu die MPC-Datenbank von GAVO in einem Webbrowser: <https://dc.g-vo.org/mpc/q/pla/form>. Dort können Sie Bedingungen eingeben, um nur die Objekte auszuwählen, an denen Sie interessiert sind. Verschiedene Felder wie *Name*, *semimajor axis*<sup>5</sup>, oder *eccentricity*<sup>6</sup> können eingeschränkt werden. Die kleinen Links, die mit „?“ beginnen, erklären die Syntax, die Sie hier für die Beschränkungen verwenden können; wir wollen „Werte zwischen  $x$  und  $y$ “, was hier mit zwei Punkten geschrieben wird.

<sup>4</sup>Das ist die Helligkeit, die der Asteroid hätte, wenn er 1 AU von der Sonne entfernt wäre und dann von der Sonne aus betrachtet würde. Da die meisten Asteroiden nicht so nahe an die Sonne herankommen und niemand von dort aus messen kann, ist dies ein zwangsläufiger Wert, der aus Beobachtungen unter anderen Umständen abgeleitet wird.

<sup>5</sup>engl. für große Halbachse

<sup>6</sup>engl. Exzentrizität

1. Geben Sie im Feld *Semimaj. ax.* 6 . . 7 (für „große Halbachse zwischen 6 und 7 AU) ein – die Leerzeichen sind wichtig!
2. Drücken Sie die Taste **Go**, um die Suche zu starten

Daraufhin zeigt der Browser eine Tabelle mit allen bekannten Asteroiden, die eine große Halbachse zwischen 6 und 7 AU besitzen. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Tutorials gibt es 75 Asteroiden in diesem Bereich.

Übrigens finden Sie unten auf der Seite auch ein Sortierfeld, mit dem Sie die Ergebnisse sortieren können, und ein Limit-Feld, das die maximale Anzahl der zurückgegebenen Datensätze angibt, falls es viele Übereinstimmungen gibt. Standardmäßig sind das 100, aber die Zahl kann auf bis zu 250.000 erhöht werden. Wenn Sie jedoch ihren Browser so viele Ergebniszeilen verarbeiten lassen, kann dieser sehr langsam werden und/oder versagen. Wir werden später sehen, wie man mit Ergebnismengen dieser Größe (die Sie wahrscheinlich gar nicht erst herunterladen wollen) umgeht. Die folgenden Abfragen sind so gewählt, dass die Anzahl der Treffer unter 10.000 bleibt, was auf modernen Plattformen die Browser nicht überfordern sollte.

- ▷ **2** *Die Eigenschaften von Asteroiden mit ungefähr 6.5 AU verstehen* – Es ist schwer, viel zu sehen, wenn man wenn man auf diese 75 Tabellenzeilen starrt. Um einen Einblick in das zu erhalten, was Sie abgerufen haben, erstellen Sie ein Histogramm. Um das zu tun, könnten Sie die Ergebnisse z.B. im CSV-Format herunterladen (siehe „Ausgabeformat“) und eine externe Anwendung verwenden – oder Sie können die Option **Quick Plot** verwenden, die die Website anbietet.

Nachdem Sie auf **Quick Plot** geklickt haben, wird ein Grafik angezeigt. Mit den Dropdown-Menüs am unteren Rand der Grafik können Sie einstellen, was Sie angezeigt haben möchten. Wir wollen zum Beispiel sehen, wie die Inklinationen, Exzentrizitäten und großen Halbachsen der Asteroiden verteilt sind:

1. Klicken Sie auf **Quick Plot**
2. Wählen Sie im linken Dropdown-Menü eine der Größen (z.B. **Semimaj. ax.** für große Halbachs)
3. Wählen Sie im rechten Dropdown-Menü **Histogram**

Aus den Histogrammen lassen sich interessante Schlussfolgerungen ziehen. Die meisten der Asteroiden zwischen 6 und 7 AU haben eine eher nicht kreisförmige Orbits (d.h. die Exzentrizität  $e$  ist ein gutes Stück von 0 entfernt). In der Verteilung der großen Halbachsen zwischen 6 und 7 AU kann man nicht viel Struktur erkennen. Vielleicht gibt es eine Beule bei 6,25 AU, aber das könnte auch Rauschen sein. Ein Blick auf das Histogramm der Inklinationen zeigt eine ordentliche Konzentration um die Ekliptik ( $i = 0$ ). Es gibt aber auch eine ganze Reihe Objekte, deren Bahnen weit oberhalb und unterhalb der Ekliptik verlaufen (zum

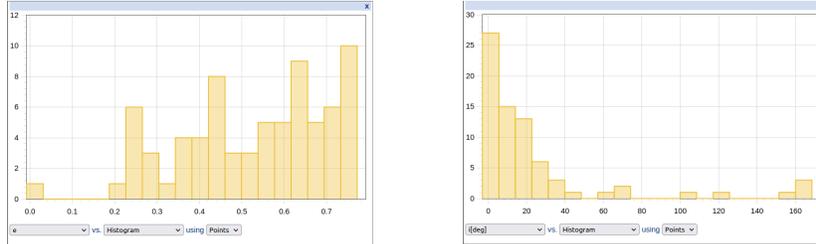


Abbildung 6: Histogramm der Exzentrizitäten (*links*) und Inklinationen (*rechts*) von Asteroiden mit einer großen Halbachse zwischen 6 und 7 AU.

Vergleich: Merkur, der Planet mit der größten Inklination, hat  $i = 7^\circ$ , einige umkreisen die Sonne sogar gegen den Rotationssinn des Planeten ( $i > 90^\circ$ ).

- ▷ **3** *Vergleich mit Hauptgürtel-Asteroiden* – Wie sieht das nun im Hauptgürtels aus? Bei Einschränkung auf große Halbachsen zwischen 3,9 und 4,1 AU kommen noch handhabbare Ergebnisse heraus. Das Verfahren ist dasselbe wie zuvor beschrieben, mit dem Unterschied, dass man die Grenze auf bis zu 10.000 Objekte erhöhen muss. Wenn Ihr Browser wirklich nicht mit so vielen Einträgen umgehen kann, versuchen Sie es mit einer niedrigeren Grenze – aber seien Sie sich bewusst, dass dies Ihre Ergebnisse unkontrollierbar verzerrt.

Wenn Sie nun wieder das Hilfsmittel **Quick Plot** verwenden und sich die verschiedenen Verteilungen anschauen, kann man deutlich einen Unterschied zu den Asteroiden innerhalb von 6 bis 7 AU erkennen. Die meisten Asteroiden des Hauptgürtels haben eine eher kreisförmige Umlaufbahn, und in unserer kleinen Stichprobe von ihnen gibt es eine klare Dichtespitze um 3,97 AU. Betrachtet man ihre Bahnneigungen, so stellt sich heraus, dass die meisten von ihnen auch viel näher an der Ekliptik liegen als die weiter entfernten Objekte. Beachten Sie auch, dass es viel mehr Asteroiden (derzeit fast 6.000 Objekte) in einem sehr viel kleineren Bereich der großen Halbachsen gibt als bei Asteroiden innerhalb von 6 bis 7 AU.

All diese Unterschiede sind hauptsächlich auf den überwältigenden Einfluss von Jupiter zurückzuführen, der Objekte auf ungewöhnlichen Bahnen vertreibt und Bahnen freiräumt, die die Objekte in Resonanz mit Jupiter bringen (d.h. sehr ähnliche Konstellationen alle paar Umdrehungen, deren Auswirkungen sich summieren).

Es wäre schön, ein Gefühl dafür zu bekommen, wie die Asteroiden im gesamten Sonnensystem verteilt sind. Betrachten Sie also alle Asteroiden innerhalb planetarischer Bahnen, sagen wir mit einer Hauptachse kleiner als 50 AU. Geben Sie dazu einfach  $< 50$  in das Suchfeld *Semimaj. ax.* ein.

Wenn Sie die gleiche Suche wie zuvor durchführen, werden Sie gewarnt, dass die Ergebnisse abgeschnitten wurden – Sie haben die Treffergrenze überschritten.

Nicht einmal die Höchstgrenze von 250 000 würde alle Treffer liefern - und der Versuch, dies zu tun, würde wahrscheinlich Ihren Browser lahmlegen.

Wir haben einen Punkt erreicht, an dem man nicht mehr alle Daten für eine lokale Analyse herunterladen sollte. Es braucht ein spezialisiertes Werkzeug als einen Webbrowser.

## 4 Nutzung von TOCAT, TAP und ADQL für servergestützte („Cloud“) Analyse

Ein solch spezialisierteres Werkzeug ist TOPCAT. Es erlaubt Manipulationen von auch großen Tabellen, kann allerlei Plots erzeugen, und es hat Schnittstellen zu zahlreichen Diensten im Virtual Observatory. Insbesondere erlaubt TOPCAT, mit der Abfragesprache ADQL (Astronomical Data Query Language) und dem Table Access Protocol TAP Datenbankabfragen auf Servern in aller Welt auszuführen.

TOPCAT kann kostenlos heruntergeladen werden<sup>7</sup>.

- ▷ 1 *Finde den Dienst, der die MPC-Tabelle enthält* – Mit TOPCAT können Sie auf die Asteroiden-Daten, die wir eben im Browser untersucht haben, mit den folgenden Schritten zugreifen:

1. Öffnen Sie TOPCAT, gehen Sie zum Menü **VO**
2. Wählen Sie dort **Table Access Protocol (TAP) Query** (ein neues Fenster öffnet sich)
3. Im Suchfeld **Keywords** tippen Sie `minor planet`
4. Wählen Sie aus der Liste der passenden TAP-Server **“GAVO DC TAP“** und doppelklicken Sie darauf
5. Im Suchfeld **Find** tippen Sie `mpc`; Sie können dann die Tabelle `mpc.mpcorb` auswählen und etwa im **Columns**-Reiter ansehen, welche Spalten die Tabelle hat

- ▷ 2 *Eine erste Abfrage starten* – Nun können Sie ADQL-Anfragen in das Textfeld am unteren Rand eingeben, um die Asteroidendaten zu analysieren. Die Spalten der `mpcorb`-Tabelle finden Sie im Bereich **Columns**; hier finden Sie Beschreibungen zu allen Größen, die Sie in Abfragen verwenden können.

Beginnen wir mit einem kleinen Beispiel, um zu lernen, wie man ADQL zum Auswählen und Analysieren von Astroiden-Daten verwendet. Wählen Sie am unteren Rand des Fensters die **Examples** → **Basic** → **Full table**. Dies füllt das Textfeld mit einer trivialen Beispielabfrage,

<sup>7</sup><http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/#install>

```
SELECT TOP 1000 * FROM mpc.mpcorb
```

In diesem einfachen Fall können Sie ADQL quasi lesen wie Englisch (wo \* als „alle Spalten“ zu deuten ist).

Wenn Sie auf die Schaltfläche **Run Query** klicken, erscheint eine neue Tabelle in der Liste der Tabellen im Hauptfenster von TOPCAT.

- ▷ **3** *Plotten eines Histogramms in TOPCAT* – im Hauptfenster klicken Sie auf das Histogramm-Symbol (oder **Graphics** → **Histogram Plot**), um ein Histogramm zu erzeugen. Wählen Sie im sich daraufhin öffnenden Fenster die Spalte **semimaj\_ax**, um die Verteilung der Asteroiden für ihre Orbitgrößen darzustellen. Es gibt zwar keine Garantie dafür, welche 1000 Datensätze die Datenbank mit der obigen ADQL-Befehl auswählt, es ist jedoch ziemlich sicher, dass das meiste, was Sie sehen, zwischen 1 und 5 AU liegen wird – einfach weil dort fast alle Asteroiden ihre Bahnen haben.
- ▷ **4** *Erhöhung der Anzahl der analysierten Asteroiden durch Aggregation auf der Serverseite* – Da wir an der Verteilung der großen Halbachse aller Asteroiden in diesem Bereich interessiert sind, nicht nur an einer mehr oder weniger zufälligen Stichprobe von 1000, *könnten wir* den gesamten Katalog herunterladen und die Übung wiederholen – anders als ein Webbrowser käme TOPCAT damit sogar zurecht. Es ist jedoch viel effizienter, das Histogramm *auf der Serverseite* zu erstellen und dann nur das Histogramm herunterzuladen. Dies ist mit dem ADQL-Konstrukt **GROUP BY** möglich:

```
SELECT ROUND(semimaj_ax*10)/10 AS bin, COUNT(*) AS n
FROM mpc.mpcorb
WHERE semimaj_ax BETWEEN 1 AND 5
GROUP BY bin
ORDER BY bin
```

In diesen paar Zeilen steckt eine Menge drin – wie gesagt, in ADQL kann man kleine Programme schreiben. Einige Beobachtungen:

- Wir wählen die Daten der großen Halbachsen aller Asteroiden in der MPC-Datenbank mit `SELECT semimaj_ax FROM mpc.mpcorb`.
- Mit `... AS bin` fügen wir eine neue, berechnete Tabellenspalte **bin** hinzu, die für alle Asteroiden innerhalb eines Bereichs von großen Halbachsen den gleichen Wert haben soll. In diesem Beispiel schreiben wir `ROUND(parameter*10)/10`, was bedeutet, dass diese Bereiche ein Zehntel einer AU breit sind (d.h. „von 4,45 bis 4,55“ - all diese Werte werden auf 4,5 abgebildet). Verwenden Sie eine größere Zahl als 10, um kleinere Bins und damit eine höhere Auflösung zu erhalten.
- Die „Aggregatfunktion“ (will sagen: das ist eine Funktion, die mehrere Zeilen zu einem Wert „aggregiert“) `count(*)` berechnet die die Anzahl

der Einträge für jede Gruppe. Wir speichern dies in einer berechneten Spalte namens `n`.

- `where semimaj_ax between 1 and 5` definiert das zu berücksichtigende Intervall. Da die Hauptarbeit auf der Datenbankseite erledigt wird, könnten wir auch die gesamte Tabelle betrachten. Wenn wir uns jedoch auf den Hauptgürtel beschränken, lässt sich das Ergebnis viel einfacher darstellen.
- Der Ausdruck `GROUP BY bin` erstellt das Histogramm: Er trennt das gesamte Ergebnis in Untergruppen mit identischem `bin` und gibt nur eine Zeile pro solcher Gruppe zurück. Diesen Trick zu begreifen, ist normalerweise der schwierigste Teil; ein genauer Blick auf das Ergebnis der Abfrage hilft dabei vielleicht ein wenig.
- `order by bin` schließlich sorgt dafür, dass die kleinsten Bins zuerst kommen. Das macht die Ergebnistabelle ein bisschen lesbarer.

Wenn Sie den obigen ADQL-Code verwenden und **Run Query** drücken, erhalten Sie eine neue Tabelle, die Sie nun im Hauptfenster von TOPCAT sehen können.

- ▷ **5** *Plotten der soeben abgerufenen Histogrammtabelle* – Da wir dieses Mal bereits aggregierte Werte abgerufen haben (und nicht die vollständige Tabelle wie zuvor), müssen Sie einige zusätzliche Konfigurationen im Histogramm-Plot durchführen. Klicken Sie also erneut auf den Histogramm-Button im Hauptfenster von TOPCAT. Die Spalte `bin` sollte bereits ausgewählt sein. Diesmal müssen Sie jedoch auch **Weight** auf die Anzahl der Elemente in der Bin, `n`, setzen. Das Histogramm zeigt dann die Verteilung aller Asteroiden zwischen 1 und 5 AU. Vergleichen Sie die Größen der Tabelle vom ersten Versuch war und der jetzt heruntergeladenen Tabelle; letztere ist *viel* kleiner und spiegelt im Gegensatz zur ersten doch die gesamte Tabelle wider und nicht nur eine zufällige Teilmenge von 1.000 Asteroiden – möglich ist das, weil wir einen großen Teil unserer Analyse auf die Serverseite verlegt haben.
- ▷ **6** *Plotten Sie die Dichte im gesamten Sonnensystem* – Um die Sache noch weiter voranzutreiben, können wir auch die Verteilung der Asteroiden über das gesamte Sonnensystem betrachten, indem wir die große Halbachse von 0 auf 50 einschränken (oder vielleicht die gesamte WHERE-Klausel weglassen). Dies sollte in etwa Abbildung 7 ergeben.

Um weitere Erkenntnisse zu gewinnen, probieren Sie verschiedene Bin-Größen aus (hierzu gibt es einen Schieberegler im **Bins** Reiter). Außerdem ist in dieser Darstellung viel Dynamik vorhanden (das Verhältnis zwischen dem kleinsten und dem größten Wert ist groß): Die Dichte zwischen 1 und 5 AU ist so groß, dass die kleinen Dichten im Wesentlichen unsichtbar sind. In einer solchen Situation ist es in der Regel eine gute Idee, den *Logarithmus* des Wertes darzustellen. Das geht entweder, indem man die Werte „per Hand“ logarithmiert, oder man

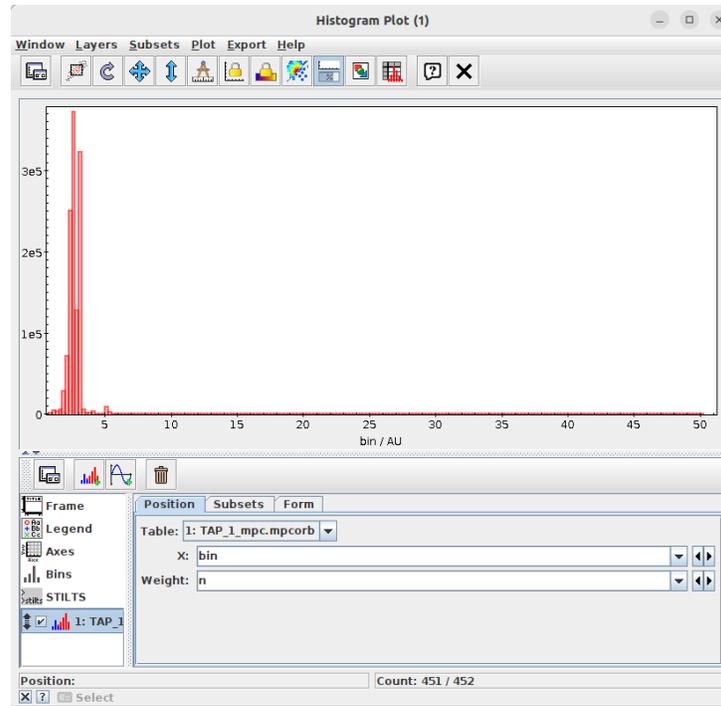


Abbildung 7: Histogramm der Asteroidenverteilung im Sonnensystem

verwendet einfach logarithmische Achsen. Mit TOPCAT können Sie letzteres tun: Gehen Sie zum Reiter **Axes** und wählen Sie **Y Log**. So können Sie die hohe Konzentration im Hauptgürtel und gleichzeitig die Feinstruktur weiter innen und außen betrachten.

## 5 Verschiedene Asteroidengürtel

- ▷ **7 Hauptgürtel und Resonanzen** – Das Histogramm in Abbildung 7 gibt uns eine allgemeine Vorstellung davon, wie die Asteroiden verteilt sind. Die Details sind jedoch aufgrund des massiven Maßstabs kaum sichtbar. Um den Hauptgürtel zwischen Mars und Jupiter näher zu untersuchen, gehen Sie zurück zum Plot zwischen ein und fünf AU (oder erzeugen Sie eines zwischen 0,5 und 6 AU).

Das Ergebnis sollte in etwa aussehen wie in Abbildung 8. Es ist offensichtlich, dass die Asteroiden sehr ungleichmäßig verteilt sind. Einige Gruppen von Orbits sind viel stärker bevölkert als andere. Zum Beispiel gibt es nicht viele Asteroiden um 2,1 oder 2,5 AU, zwischen 1,9 und 2,4 findet man sehr viel mehr.

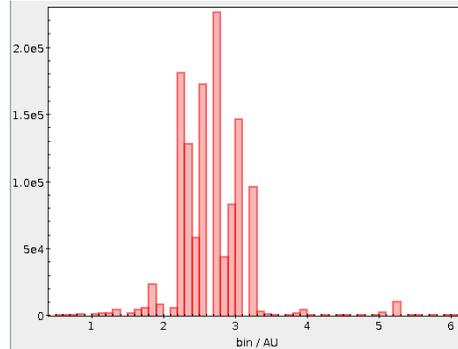


Abbildung 8: Asteroidenverteilung im Hauptgürtel

Diese Lücken im Gürtel werden als Kirkwoodlücken bezeichnet. Wie bereits erwähnt, werden sie (vor allem) vom Jupiter verursacht und befinden sich dort, wo alle paar Umdrehungen der Asteroid und Jupiter die gleiche relative Position haben. Auf diese Weise addieren sich moderate Gravitationsstörungen und bringen den Asteroiden auf eine andere Umlaufbahn. An seiner Stelle bleibt dann eine Lücke.

Die Resonanz kann mit Hilfe des dritten Keplerschen Gesetzes berechnet werden:

$$p^2 = a^3 \quad \text{oder} \quad \frac{p^2}{a^3} = \text{const}, \quad (1)$$

wobei  $p$  die Umlaufperiode und  $a$  die große Halbachse ist. Aufgrund dieser Proportionalität brauchen wir die Umlaufperiode der Objekte nicht zu kennen, um die die mittlere Resonanz zu berechnen.

Da das Bestimmen der genauen großen Halbachse für diese Resonanzen mit dem uns vorliegenden Histogramm schwierig ist, ist es einfacher, die die große Halbachse aus den Resonanzen zu berechnen; das obige Kriterium bedeutet, dass sich der Asteroid und Jupiter alle paar Jahre (d.h. alle Umdrehungen) treffen. Mit anderen Worten, ihre Umlaufperioden sind wie  $n : m$  für zwei kleine ganze Zahlen  $n$  und  $m$ , wie z.B., 4:1, 3:1, 5:2, 7:3 und 2:1. Mit diesem Wissen können wir  $p^2 = a^3$  nehmen und für  $p$  lösen, was  $p = \sqrt{a^3}$  ergibt. Um herauszufinden, wo die großen Halbachsen mit Resonanz liegen, teilt man die Umlaufperioden der beiden Körper, wobei die größere Bahnperiode in den Zähler eingeht. Daraus ergibt sich  $n/m = \sqrt{a_J^3/a_A^3}$ . Da wir nach der großen Halbachse des Asteroiden suchen, lösen wir nach  $a_A^3$  und kommen schließlich auf

$$\sqrt[3]{(n/m)^2 \cdot a_J^3} = a_A.$$

Wenn wir die großen Halbachsen für die oben genannten Resonanzen berechnen, finden wir 1,3, 1,73, 2,08, 2,23 und 2,6. Finden Sie diese Werte auch in

Ihrem Histogramm?

Falls Sie neugierig sind: Gibt es Resonanzen an den Positionen der Peaks (siehe Abbildung 8)? Und können Sie herausfinden, was es mit dem Peak bei der 1:1-Resonanz auf sich hat?

## 6 Der Kuipergürtel

Wir haben oben schon erwähnt, dass es am äußeren Rand des Sonnensystems einen weiteren Asteroiden-Gürtel gibt: Den Kuiper-Gürtel. Er ist viel größer als der Hauptgürtel (rund zwanzig Mal breiter und 100 Mal größer) – aber wir haben bisher nur einen sehr kleinen Teil seiner Asteroiden entdeckt.

Der Kuipergürtel erstreckt sich ungefähr von der Neptunbahn bei  $\sim 30$  AU bis hinaus zu etwa 40 AU. Die meisten Asteroiden dort draußen bestehen vor allem aus Eis und gefrorenen Gasen wie Methan oder Ammoniak. Das wahrscheinlich massereichste und gewiss berühmteste Objekt des Kuipergürtels ist der Zwergplanet Pluto, der aus historischen Gründen in der MPC-Datenbank fehlt.

Um einen genaueren Blick auf die Verteilung der Asteroiden dort draußen zu werfen, passen Sie unsere Abfrage oben auf den Bereich von 37 bis 50 AU an. Das Resultat:

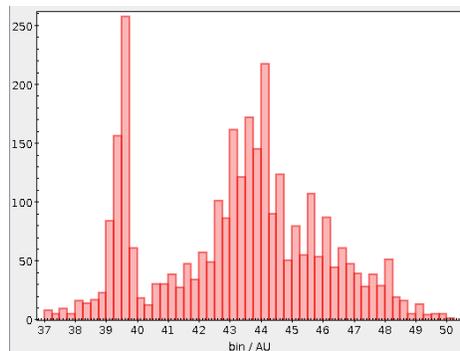


Abbildung 9: Asteroidenverteilung im Kuipergürtel

Auch hier sehen wir ein Muster von Spitzen und Tälern, diesmal aufgrund von Resonanzen mit Neptun.

Eine deutliche Spitze ist bei 39,5 AU zu finden, einer Gruppe, die Pluto enthält, weshalb dieser Gruppe der Name „Plutinos“ gegeben wurde. Noch weiter entfernt, zwischen 40 und 50 AU, befindet sich, wenn man so will, der Haupt-Kuipergürtel.

Untersuchen Sie die anderen Parameter, die Sie kennengelernt haben: Exzentrizitäten und Inklinationen. Gehen Sie von unserem obigen ADQL-Code zur

Erstellung von Histogrammen aus und passen Sie die Spalten, die zu durchsuchenden Bereiche, sowie die Bin-Größen an. Das Histogramm der Inklinationen sollte beispielsweise aussehen wie in [Abbildung 10](#).

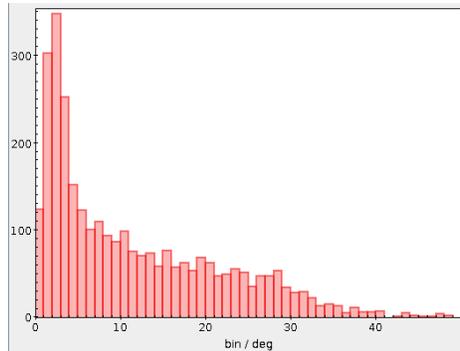


Abbildung 10: Inklinationen der Asteroiden des Kuipergürtels

Versuchen Sie schließlich, [Abbildung 11](#) zu reproduzieren, die die Dichten der Asteroiden im Kuipergürtel mit Inklinationen von mehr und weniger als 5 Grad darstellt.

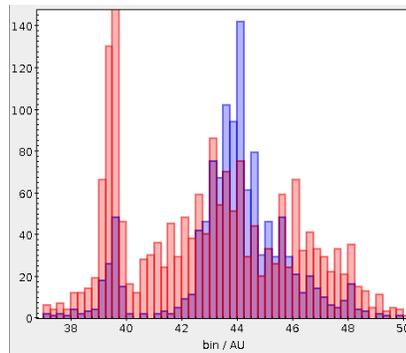


Abbildung 11: Histogramm von Kuipergürtelasteroiden über die große Halbachse, wobei zwischen Inklinationen  $< 5$  in *blau* und  $> 5$  Grad in *rot* unterschieden wird.

Eine Möglichkeit, dies zu erhalten kann man erreichen, wenn man folgende Abfrage ein Mal unverändert und ein Mal mit umgedrehter Bedingung an `inclination` ausführt:

```
SELECT round(semimaj_ax*10)/10 AS bin, COUNT(*) AS n
FROM mpc.mpcorb
```

```
WHERE (semimaj_ax BETWEEN 25 AND 50) AND (inclination<5)
GROUP BY bin
```

Führen Sie dann einen zweiten Durchlauf mit `Inclination>5` durch; dadurch erhalten Sie zwei Tabellen, die Sie nun zu einer Darstellung kombinieren müssen. Öffnen Sie das Histogramm wie gewohnt für den ersten Datensatz. Doch dieses Mal klicken Sie direkt unterhalb des Histogramms auf das zweite Symbol von links (kleines Histogramm mit einem grünen „+“), um ein weiteres Histogramm zu Ihrer Darstellung hinzuzufügen, welches in der unteren linken Ecke mit der Beschreibung `<no table>` auftaucht. Wenn Sie darauf klicken, können Sie die zusätzlichen Daten, die angezeigt werden sollen, über das Dropdown-Menü unter **Table** auswählen. Wählen Sie Ihren zweiten Datensatz und wählen Sie auf der Registerkarte **Subsets** eine andere Farbe dafür aus.

Wir beobachten, dass die „Plutinos“ im Schnitt eine höhere Inklination als die Asteroiden im klassischen Kuipergürtel haben, was darauf schließen lässt, dass es sich um zwei verschiedene Gruppen von Objekten handelt, die aus ziemlich unterschiedlichen Prozessen entstanden sind. Und damit sind wir bei recht aktuellen Forschungsthemen...

Find me on VO Text Treasures <http://dc.g-vo.org/VOTT>



This document is in the public domain.