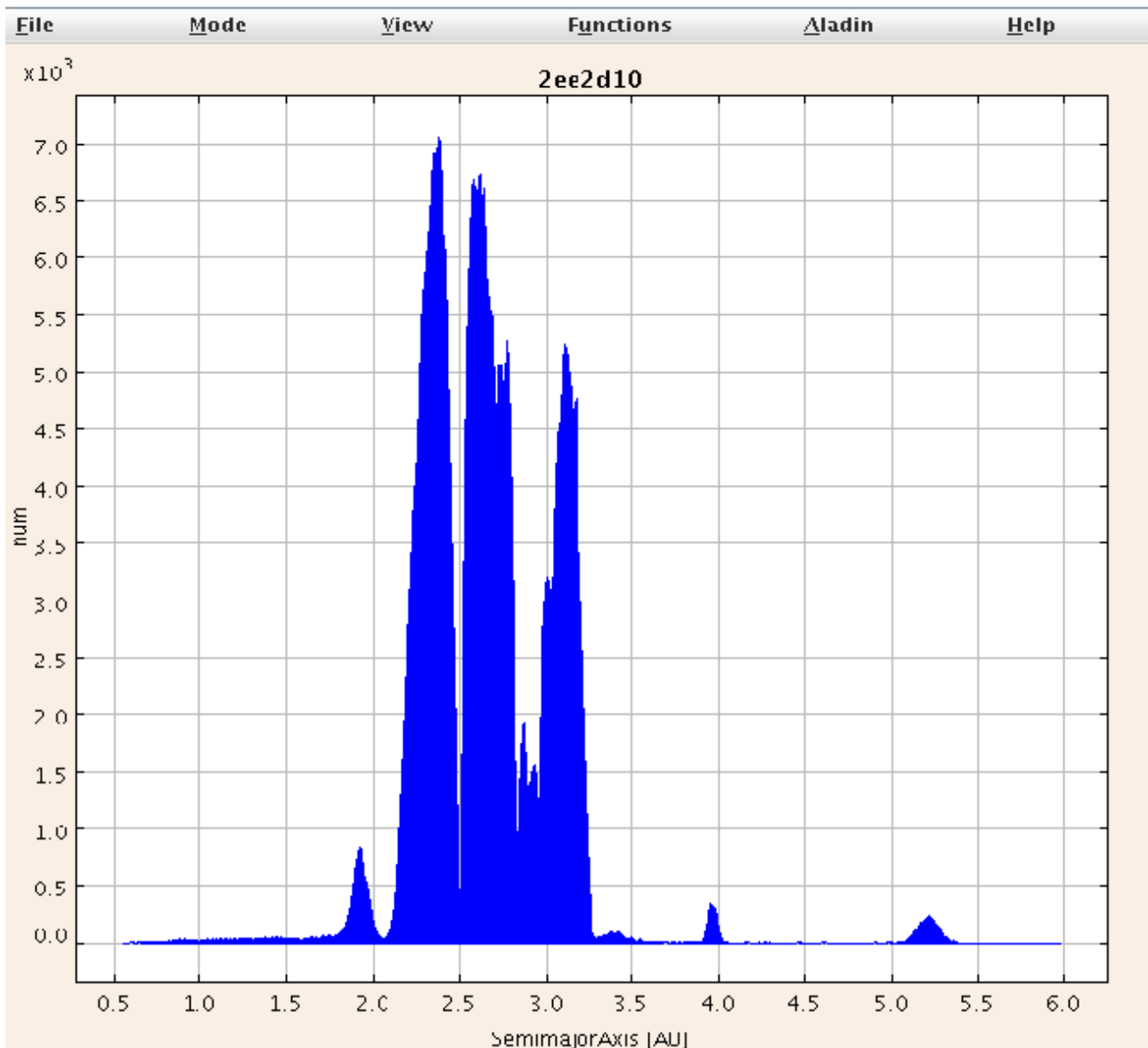


Die Asteroiden



Asteroiden im Sonnensystem

Unser Sonnensystem besteht nicht nur aus Planeten alleine. Es ist auch voll von Asteroiden. Diese Asteroiden sind die Überbleibsel aus der Zeit der Planetenentstehung.

Ursprünglich gab es um die Sonne nur eine große Scheibe aus Gas und Staub. Diese Teilchen haben sich dann langsam zu immer größeren Objekten verbunden – am Ende dieser Kette standen die Planeten.

Aber nicht alle Bausteine konnten auch verwendet werden. In den äußeren Bereichen des Sonnensystems haben sich keine großen Planeten gebildet und auch im inneren Sonnensystem hat z.B. der gravitative Einfluss des riesigen Planeten Jupiter dazu geführt, dass in seiner Nähe kein weiterer Planet entstand.

Die übrigen gebliebenen „Planetenbausteine“ nennen wir heute Asteroiden.

Der erste Asteroid wurde 1801 entdeckt und damals hielt man ihn noch für einen echten Planeten. „Ceres“, wie er genannt wurde, bewegte sich zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter. Erst als mal in den Jahren danach in diesem Bereich noch viele weitere solcher „Planeten“ fand, erkannte man, dass es sich hier um andere Objekte handeln muss, die dann später „Asteroiden“ oder „Planetoiden“ genannt wurden.

Heute kennen wir hunderttausende Asteroiden zwischen Mars und Jupiter – sie bilden den sogenannten „Asteroidengürtel“.

Aber auch an anderen Orten im Sonnensystem hat man große Ansammlungen von Asteroiden gefunden. 1992 entdeckte man außerhalb der Neptunbahn einen Asteroiden. Er war das erste Objekt des „Kuipergürtels“ - ein Asteroidengürtel im äußeren Sonnensystem der noch viel ausgedehnter ist als der Gürtel zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter.

Die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Planeten und Asteroiden haben außerdem dafür gesorgt, dass sich auch in allen übrigen Bereichen des Sonnensystems Asteroiden befinden.

Sämtliche Daten über Asteroiden werden vom *Minor Planet Center (MPC)* der *Internationalen Astronomischen Union (IAU)* verwaltet (<http://www.cfa.harvard.edu/iau/mpc.html>).

Dort werden alle Beobachtungen archiviert und analysiert; die Bahnen der Asteroiden berechnet und für die wissenschaftliche Gemeinde veröffentlicht. Die IAU entscheidet auch über die Benennung der neuentdeckten Himmelskörper.

Die Datenbank des MPC ist auch über das Virtuelle Observatorium zugänglich und es ist damit möglich, die grundlegenden Eigenschaften der Asteroiden kennenzulernen.

Die Datenbank des MPC

Die komplette MPC-Datenbank ist über das deutsche virtuelle Observatorium (GAVO) abrufbar:

<http://dc.zah.uni-heidelberg.de/mpc/q/pla/form>

Über das dortige Formular lässt sich die komplette Datenbank anhand der gängigsten Parameter durchsuchen. Dazu gehören alle sechs Bahnelemente: also die Größen, die Form und Lage der Bahn des Asteroiden um die Sonne definieren.

Ein Himmelskörper bewegt sich ja im Allgemeinen in einer elliptischen Bahn. Die **große Halbachse a** gibt dabei an, wie groß diese Ellipse ist bzw. wie weit sich der Asteroid im Durchschnitt von der Sonne entfernt befindet. Die große Halbachse wird in astronomischen Einheiten (AE bzw. auf englisch AU) angegeben und ein Wert von eins entspricht hier der mittleren Entfernung zwischen Erde und Sonne.

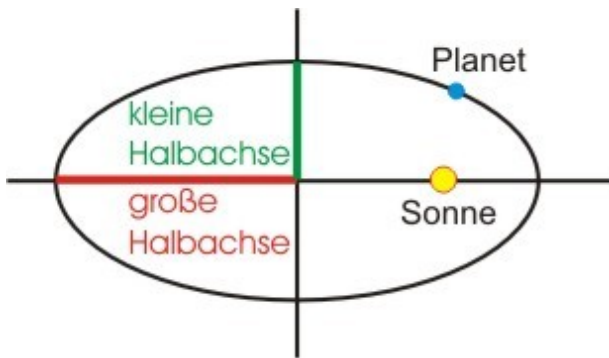


Abbildung 1: Große Halbachse

Wie stark die Bahnellipse von einem Kreis abweicht, wird durch die **Exzentrizität e** definiert. Sie ist eine Zahl zwischen 0 und 1 (0 bedeutet kreisförmig).

Große Halbachse und Exzentrizität definieren also die Form und Größe der Bahn. Um eindeutig angeben zu können, wie die Bahn im Raum orientiert ist, braucht man nun noch drei Winkel:

Die **Inklination (i)** der Bahn. Die Inklination bzw. Bahnneigung gibt an, wie stark die Bahnellipse gegenüber der *Ekliptik* geneigt ist. Die Ekliptik ist die Referenzebene im Sonnensystem und entspricht der (mittleren) Bahnebene der Erde. Eine Bahn mit z.B. einer Inklination von $i=5^\circ$ ist um 5° gegenüber der Erdbahn geneigt.

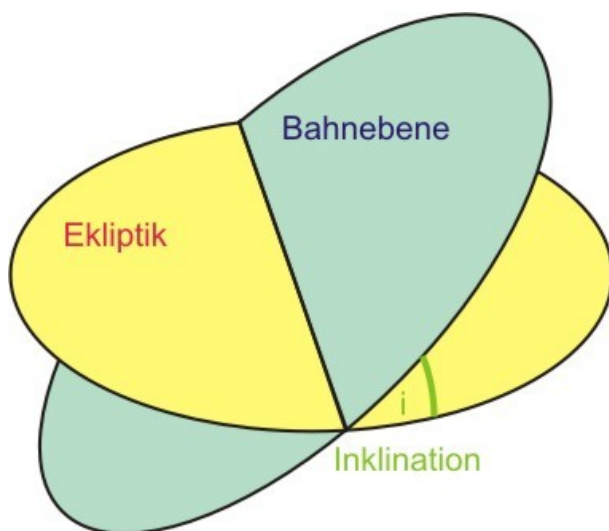


Abbildung 2: Inklination

Die **Länge des aufsteigenden Knotens (Ω)**. Der Punkt, an dem die Bahn eines Himmelskörpers die Ekliptik von Norden nach Süden durchstößt, nennt man *absteigender Knoten* (ϖ). Der Punkt, an

dem die Bahn die Ekliptik von Süden nach Norden durchstößt, nennt man *aufsteigender Knoten* (ϖ)¹. Der Winkel zwischen der Verbindungslinie *Sonne-Aufsteigender Knoten* und der Verbindungslinie *Sonne-Frühlingspunkt* ist die *Länge des aufsteigenden Knotens*. Der Frühlingspunkt (γ) ist ein fixer "Nullpunkt" der als Bezugspunkt für astronomische Koordinaten dient. Es ist jener Punkt am Himmel, an dem die Sonne genau am astronomischen Frühlingsanfang steht).

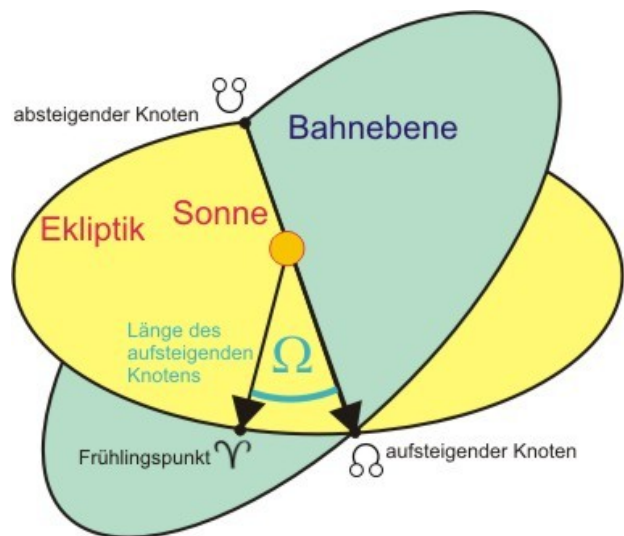


Abbildung 3: Länge des aufsteigenden Knotens

Das **Argument des Perihels (ω)**. Das Argument des Perihels ist der Winkel zwischen der Verbindungslinie *Sonne-Perihel* (der sonnennächste Punkt auf der Bahn) und der Verbindungslinie *Sonne-aufsteigender Knoten*.

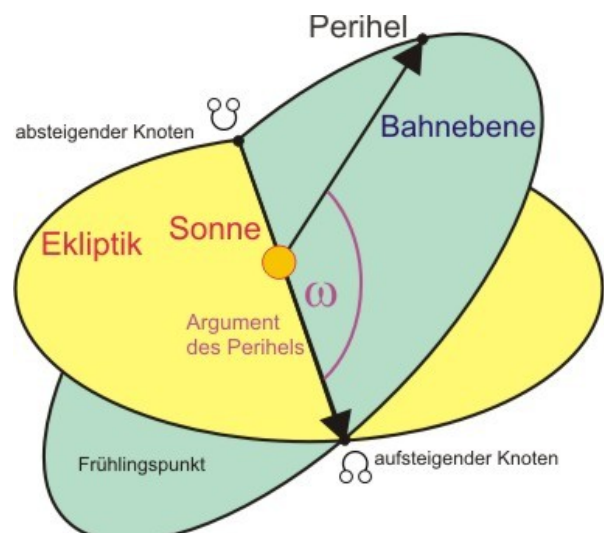


Abbildung 4: Argument des Perihels

Diese drei Winkel (i , Ω , ω) definieren die Lage der Ellipse im Raum. Die Bahnellipse des Himmelskörpers ist nun also durch große Halbachse, Exzentrizität, Inklination, Länge des aufsteigenden Knotens und Argument des Perihels eindeutig definiert. Es fehlt jetzt aber noch ein weiterer Parameter um die *Position des Himmelskörpers* auf dieser Bahn festzulegen.

Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten; die häufigste ist die **mittlere Anomalie (M)**. Zur Definition der mittleren Anomalie geht man von einem "mittlerem Objekt" aus, das die gleiche Umlaufzeit hat wie der echte Himmelskörper und auch zur gleichen Zeit das Perihel durchläuft. Dieses mittlere Objekt bewegt sich allerdings mit konstanter (Winkel)Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn (mit einem Radius, der gleich der großen Halbachse des echten Objekts ist) um die Sonne. Der Winkel zwischen der Verbindungslinie *Kreismittelpunkt-mittleres Objekt* und der Verbindungslinie *Kreismittelpunkt-Perihel* ist die mittlere Anomalie.

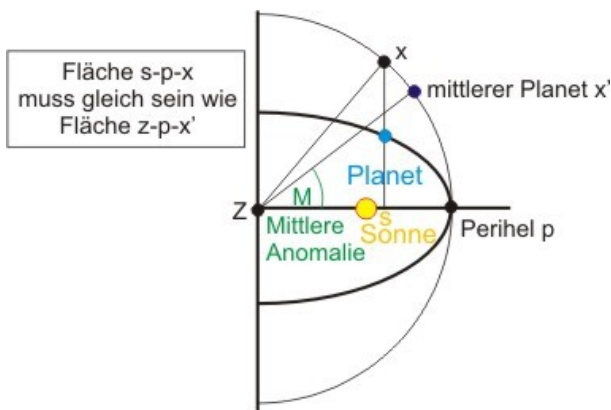


Abbildung 5: Mittlere Anomalie

Die Datenbank des MPC lässt sich nach all diesen Parametern durchsuchen; zusätzlich kann man noch nach der *Epoche* – das ist der Zeitpunkt für den die Daten bestimmt wurden – der *Helligkeit H* des Objekts suchen.

Die Verteilung der Asteroiden im Sonnensystem

Mit den Daten aus der MPC-Datenbank lassen sich nun leicht einige grundlegende Eigenschaften der Asteroiden zeigen – zum Beispiel die Frage nach ihrem Aufenthaltsort: Wo befinden sich die Asteroiden im Sonnensystem?

Die meisten kennen den „Asteroidengürtel“ zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter. Dort wurde 1801 tatsächlich der erste Asteroid („Ceres“) entdeckt und dort haben wir bis heute insgesamt auch die meisten Asteroiden gefunden.

Aber auch anderswo gibt es Asteroiden! Das lässt sich leicht überprüfen. Der Mars hat einen mittleren Abstand von der Sonne von 1.52 AU; der Jupiter ist 5.2 AU entfernt. Dazwischen befindet sich der Asteroidengürtel. Wir können nun in der Datenbank des MPC zum Beispiel nach Asteroiden suchen, die einen mittleren Abstand von der Sonne zwischen 6 und 7 AU haben und damit außerhalb des Asteroidengürtels liegen würden. Gibt es solche Asteroiden?

Um das herauszufinden, müssen wir nur eine entsprechende Suche in der Datenbank starten. Dazu geben wir im Formular im Feld für die große Halbachse a

6 .. 7

ein (die Leerzeichen vor und nach den beiden Punkten nicht vergessen!). Damit werden alle Objekte aus der Datenbank ausgewählt, die entsprechende Werte für a haben. Ein Klick auf den Link rechts des Eingabefeldes zeigt übrigens genau an, welche Eingabe- bzw. Abfragemöglichkeiten für diesen Parameter existieren:



Abbildung 6: Link zur Hilfe

Am Ende des Formulars wählen wir das Format der Ausgabe („Output Format“) - für diese erste Abfrage ist „HTML“ am geeignetsten. Dadurch werden die Ergebnisse direkt im Browser als Tabelle angezeigt. Im Feld „Sort by“ lässt sich angeben, nach welchem Parameter der Output sortiert werden soll (wir können dieses Feld vorerst frei lassen) und im Feld „Limit to“ kann eine Obergrenze für die Anzahl der gefundenen Daten spezifiziert werden (hier kann der Wert „100“ belassen werden).

Ein Klick auf „Go“ startet die Anfrage. Nach kurzer Suche erhalten wir die Ergebnisse:

Minor Planet Center - Asteroid Orbital Parameters

Parameters: a: 6 .. 7

Result: Matched: 10

Designation	H [mag]	G	Epoch	M [deg]	w [deg]	W [deg]	i [deg]
37117	13.2	0.15	K096I	169.277	180.095	248.605	13.7859
E5627	11.1	0.15	K096I	10.0591	344.811	94.875	18.6956
K04RE1W	14.4	0.15	K096I	102.785	157.11	164.272	7.67171
K05C16R	14.0	0.15	K096I	105.375	313.267	140.132	9.38849
K05V00D	14.2	0.15	K096I	68.0015	178.272	173.037	172.912
K05W03Y	13.5	0.15	K096I	28.8802	309.222	190.233	29.4105
K07D50P	14.6	0.15	K096I	35.7633	153.446	36.7728	3.06425
K07H45U	15.8	0.15	K096I	34.7416	45.4958	197.800	5.8942
K09B80L	16.3	0.15	K096I	14.4312	8.09372	93.7242	9.02906
K09D02P	14.0	0.15	K093A	15.3702	126.428	0.79999	26.9995

Abbildung 7: Datenbankabfrage

Es wurden 10 Asteroiden mit einem mittleren Abstand zur Sonne zwischen 6 und 7 astronomischen Einheiten gefunden.

Es gibt also auch Asteroiden außerhalb des

Asteroidengürtels. Am besten sieht man das, wenn man sich die Verteilung der Objekte ansieht – also ein Diagramm erstellt, in dem angezeigt wird, wieviele Objekte sich in einem bestimmten Bereich des Sonnensystems befinden.

Dazu könnte man sich zum Beispiel alle Datenbankeinträge in einer Tabelle anzeigen lassen und diese dann mit einem externen Program weiterverarbeiten um so ein Histogramm der Asteroidenverteilung zu erstellen.

Das Virtuelle Observatorium bietet aber auch eine Möglichkeit, direkt über den Browser komplexe Datenbankabfragen durchzuführen und so ein Histogramm zu erzeugen.

Dazu wird die „Astronomical Data Query Language“ (ADQL) verwendet; eine Abart der bekannteren Datenbanksprache SQL. Um eine Abfrage in ADQL zu erstellen, rufen wir das entsprechende Formular im VO auf:

http://dc.zah.uni-heidelberg.de/__system__/adql/query/form

Hier können wir nun ADQL-Befehle eingeben. Die Syntax ist relativ simpel (eine genaue Beschreibung gibt es hier: <http://www.ivoa.net/Documents/latest/ADQL.html>). Um die Suche von vorhin (wieviele Asteroiden haben eine große Halbachse zwischen 6 und 7 AE?) in ADQL zu wiederholen, gibt man folgende Abfrage ein:

```
select SemimajorAxis from mpc.mpcorb
where SemimajorAxis>=6. and
SemimajorAxis<=7
```

Der Befehl ist mehr oder weniger selbsterklärend: *select X from Y* wählt einen bestimmten Parameter X (in unserem Fall die große Halbachse „SemimajorAxis“) aus der Datenbank Y (die hier „mpc.mpcorb“ heißt)¹.

¹ Die internen Namen aller Parameter in der Datenbank kann man hier nachlesen: http://dc.zah.uni-heidelberg.de/__system__/dc_tables/show/tableinfo/mpc.mpcorb

Da *select X from Y* ALLE Einträge der Datenbank zurückliefern würde, können wir die Abfrage mit *where SemimajorAxis>=6. and SemimajorAxis<=7* noch weiter einschränken und nur die großen Halbachsen mit Werten zwischen 6 und 7 anzeigen lassen. Das Ergebnis der Abfrage sind die selben 10 Asteroiden wie vorhin:

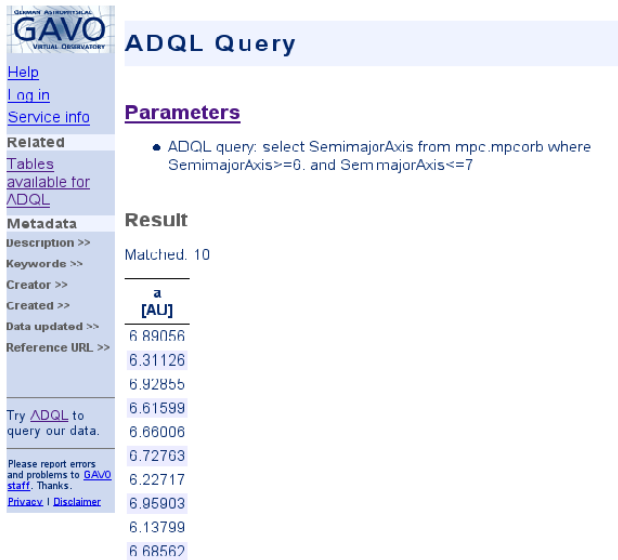


Abbildung 8: ADQL-Abfrage

Um nun aus den Daten in der Datenbank ein Histogramm zu erstellen, müssen wir folgendermaßen vorgehen. Zuerst werden die Werte für die große Halbachse auf zwei Nachkommastellen gerundet. Statt *select SemimajorAxis* wird also *select round(SemimajorAxis,2)* verwendet. Danach werden gleiche Werte für die große Halbachse gruppiert und gezählt, wieviele Objekte jeweils in eine Gruppe fallen. Der komplette Befehl für diese ADQL-Abfrage lautet nun:

```
select count(*) as num, ii from
(select round(SemimajorAxis,2) as ii from
mpc.mpcorb where SemimajorAxis>=0
and SemimajorAxis<=50)
as q group by ii
order by ii
```

Als Grenzen für die großen Halbachsen wurde hier der Bereich zwischen 0 und 50 Astronomischen Einheiten gewählt – also der komplette Bereich des Sonnensystems in dem sich Planeten befinden – er reicht bis zur Bahn des Neptuns bei 30 AU – und

zusätzlich der äußere Rand des Sonnensystems bis hin zu 50 AU.

Die Abfrage liefert eine lange Liste an Zahlen:

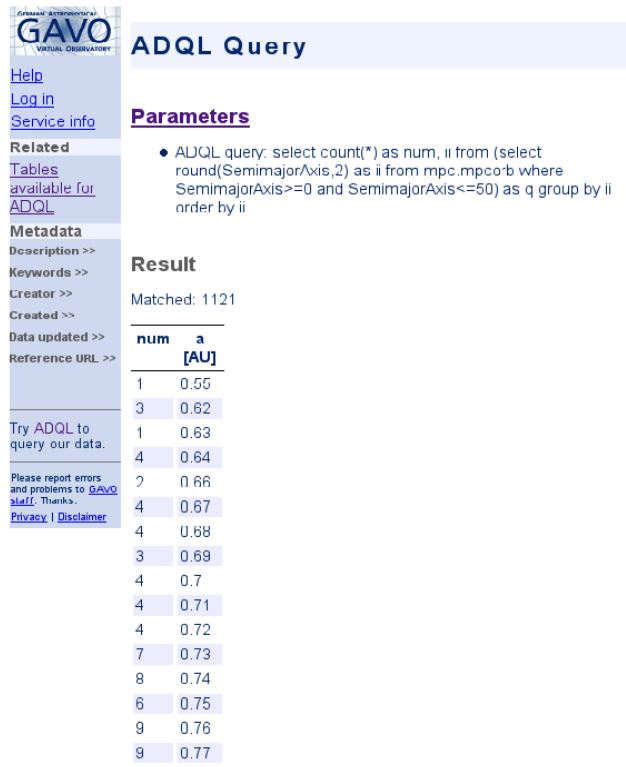


Abbildung 9: ADQL-Abfrage

Viel anschaulicher ist es natürlich, die Daten gleich grafisch darzustellen. Dazu wählt man als „Output Format“ den Punkt „VOPlot“.

Nach dem Absenden der Abfrage werden die Daten nun grafisch dargestellt:

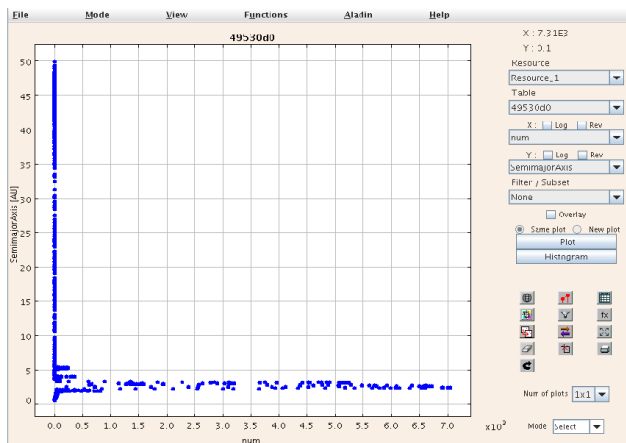



Abbildung 10: Grafische Darstellung der Daten in VOPlot

Allerdings ist die Darstellung noch etwas unpraktisch. Um eine bessere Darstellung zu erhalten, werden zuerst x und y Achse vertauscht. Im rechten Bereich des VOPlot-Programms kann man im Feld „X“ und „Y“ die entsprechende Anpassung durchführen. Bei „X“ sollte „SemimajorAxis“ stehen, bei „Y“ „num“. Mit einem Klick auf „Plot“ wird das Diagramm neu gezeichnet.

Mit der Schaltfläche „Plot Format“:  kann die Grafik weiter bearbeitet werden. Für die Darstellung als Histogramm wählt man am besten den Punkt „Impulses“ aus, und, im Bereich „Advanced“ den „Marker Style“ „pixels“:

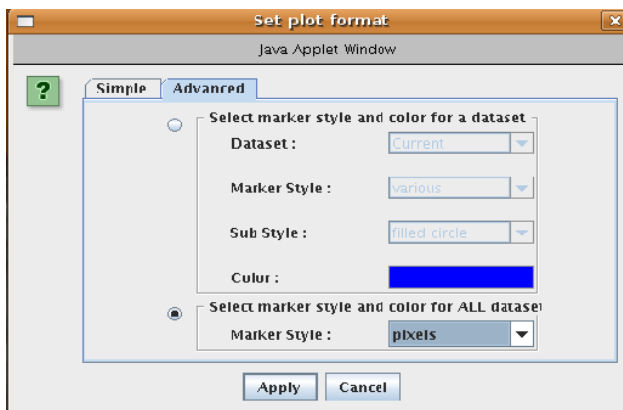
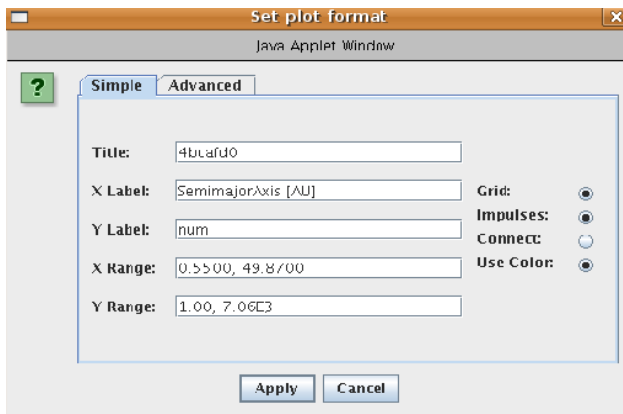


Abbildung 11: Formatieren der Daten

Ein Klick auf „Apply“ führt die Änderung durch:

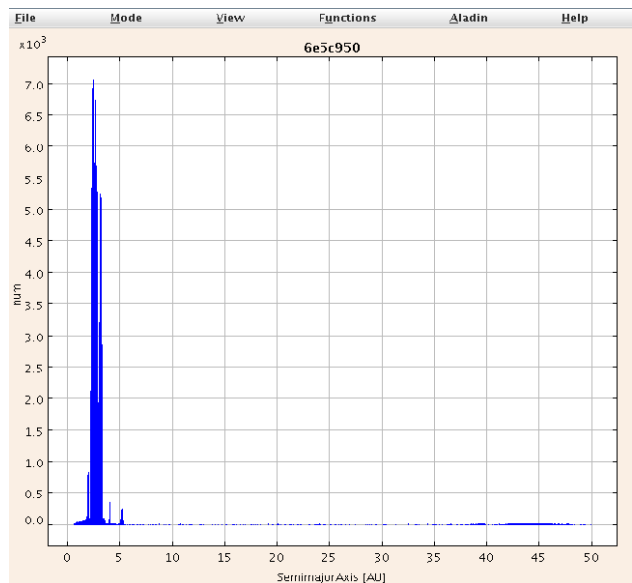


Abbildung 12: Bearbeitetes Histogramm

Man erkennt nun eine deutliche Anhäufung der Asteroiden zwischen 0 und 5 Astronomischen Einheiten – dort befindet sich der Hauptgürtel der Asteroiden.

Aber auch im äußeren Bereich des Sonnensystems, zwischen etwa 38 und 48 AE findet man eine kleine Anhäufung.

Die verschiedenen Asteroidengürtel im Sonnensystem

Um den Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter genauer zu untersuchen, erstellen wir am besten ein neues Histogramm, nur das diesmal nur Halbachsen zwischen 0.5 und 6 Astronomischen Einheiten betrachten. Wir bekommen folgendes Bild:

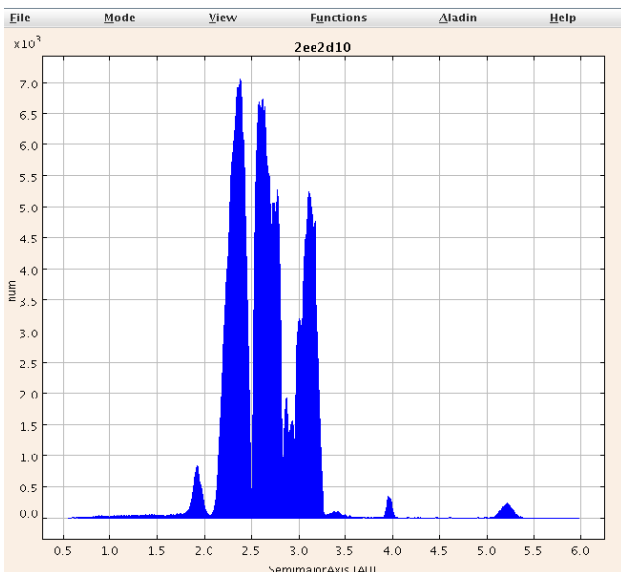


Abbildung 13: Der Asteroidengürtel

Hier erkennt man deutlich, dass die Asteroiden im Gürtel zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter nicht gleichmäßig verteilt sind. Man findet Lücken – zum Beispiel bei ~ 2.1 AE und ~ 2.5 AE oder Anhäufungen – zum Beispiel bei 1.9 oder 2.4 AE. Die Lücken nennt man „Kirkwood-Lücken“ und sie werden von Jupiter verursacht.

Sie zeigen die Positionen der sg. „Mean-motion Resonanzen“ an. Das sind Bereiche, wo die mittlere Umlaufzeit eines Asteroiden in einem ganzzahligen Verhältnis zur mittleren Umlaufzeit des Jupiters stehen. In periodischen Abständen stehen Jupiter und Asteroid also wieder in der selben relativen Position. Im Laufe der Zeit können sich so die gravitativen Kräfte verstärken und den Asteroiden aus der Resonanz auf eine neue Bahn werfen. Dort, wo sich die Resonanz befindet, entsteht

eine Lücke.

Aufgabe: Benutze das dritte Keplersche Gesetz um aus den Positionen der Lücken die entsprechenden Resonanzen auszurechnen. In welchem Verhältnis stehen die Umlaufzeiten von Objekten in der Lücke zu der des Jupiter? Gibt es auch bei den Anhäufungen eine Resonanz? Warum findet man genau dort, wo sich Jupiter befindet (bei 5.2 AE) eine Anhäufung an Asteroiden?

Wir haben vorhin schon festgestellt, dass es auch im äußeren Sonnensystem einen Asteroidengürtel gibt. Das erste Objekt dort wurde 1992 entdeckt und man nennt diese Gürtel „Kuipergürtel“. Er ist viel größer und enthält viel mehr Asteroiden als der Gürtel zwischen Mars und Jupiter – auch wenn wir bis jetzt erst relativ wenige entdeckt haben.

Um die Verteilung der Asteroiden zu betrachten, erstellen wir wieder ein Histogramm, diesmal für alle Objekte zwischen 37 und 50 AE.

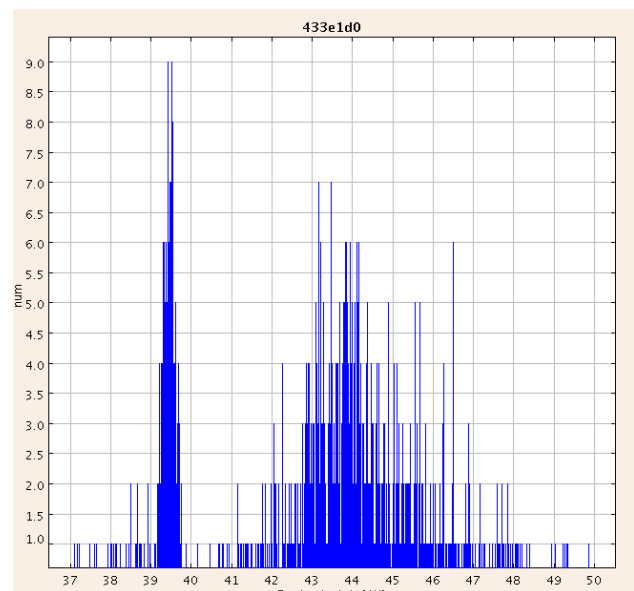


Abbildung 14: Der Kuipergürtel

Man erkennt eine deutliche Anhäufung bei 39.5 AE. Auch hier handelt es sich wieder um eine Resonanz (diesmal schützt die Resonanz vor destruktiven gravitativen Kräften) – eine 2:3 Resonanz mit dem Planeten Neptun. Zu den Objekte dieser Gruppe gehört auch der ehemalige Planet Pluto – man nennt diese Asteroiden daher

auch Plutinos.

Weiter draußen zwischen 40 und 50 AE befinden sich dann die eigentlichen, „klassischen“ Kuiperbeltobjekte.

Weitere Untersuchungen

Gibt es neben dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter und dem Kuipergürtel noch weitere große Ansammlungen von Asteroiden?

Was sind NEAs und Zentauren?

Wie sieht die Verteilung der anderen Bahnelemente – z.B. Exzentrizität und Inklination – aus? Gibt es Unterschiede zwischen den einzelnen Asteroidenpopulationen?