

Welchen Einfluss haben Sternkataloge auf die Massenbestimmung von Kleinplaneten ?

VdS Kleinplanetentagung
Heppenheim, 18-19 Juni 2011

Mike Kretlow (Hamburg)
mike@sky-lab.net

Einleitung

Obwohl Surveys wie PanSTARRS umfassende Astrometrie mit ~ 0.1 arcs erwarten lassen, gibt es astrometrisch-dynamische Anwendungen, die auf hochgenaue Astrometrie aus dem bereits vorliegenden Beobachtungsmaterial des MPCs und / oder über längere (historische) Zeiträume angewiesen sind:

- Massenbestimmung von Asteroiden
- Ableitung des Quadrupolmoments der Sonne J2
- Yarkovsky Effekt / Analysen
- PHAs (Impakt Wahrscheinlichkeiten)
- Sternbedeckungen
- ...

Über die Jahre und Jahrzehnte wurden die Positionen nicht nur mit unterschiedlichsten Beobachtungsmethoden gewonnen sondern auch mit unterschiedlichsten Katalogen reduziert !

Eigene Motivation

Ständige Erweiterung des eigenen n-body Programms.

- Bislang bereits Korrekturen FK4 \Leftrightarrow FK5 \Leftrightarrow ICRF/HCRS berücksichtigt (zB pre-CCD Ära)
- Chesley, Baer, Monet: Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations. Icarus 210 (2010)
 - Gründliche Untersuchung der Thematik
 - Ableitung von lokalen Katalogkorrekturen (USNO-A/B, UCAC2) vs. 2MASS *

(*) 2MASS: 500 Mio. Objekte, 70-80mas bzgl. ICRS

Bezugssysteme

- Sternkataloge beziehen sich (im Idealfall) auf ein (fundamentales) Bezugssystem, welches einem Inertialsystem möglichst nahe kommen soll.
- Früher Realisierung durch optische Fundamentalkataloge (FK3, FK4, FK5), an welche Sekundärkataloge (AGK3, SAO, PPM) „angeschlossen“ wurden.

Heutiges Bezugssystem

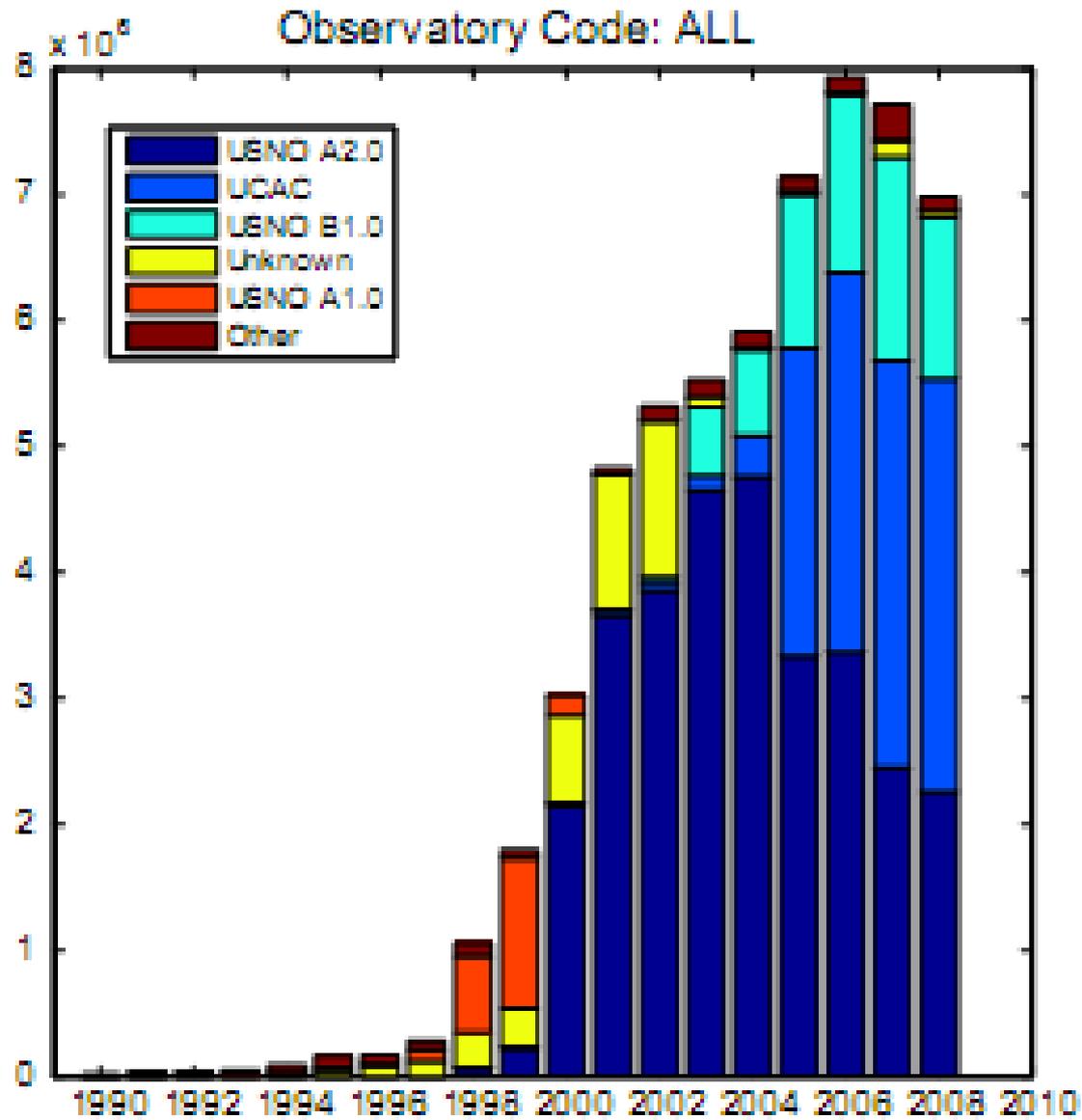
- ICRS: Definition von Daten, Konstanten, Algorithmen usw.
- ICRF: Materialisierung des ICRS, Katalog mit Positionen von 608 Radioquellen, davon definieren 212 die ICRS Achsen
- Im optischen ist ICRS durch Hipparcos Sterne festgelegt (HCRS). Aus HIP-Daten und vielen alten erdgebundenen (Fundamental)-Katalogen => Eigenbewegungen => Tycho-2
- JPL-Ephemeriden (zB DE405/LE405) beschreibt die Bewegung der Planeten bzgl. des SoSys-Baryzentrum und den ICRS-Achsen.

Problematik

Bahnverbesserung und Parameterbestimmung innerhalb eines numerischen Modells welches recht gut im ICRS etabliert ist mit astrometrischen Positionen die neben vielen anderen Fehlerquellen auch noch inhomogen hinsichtlich des Bezugssystems ist (verschiedene Kataloge).

(Beliebte) Sternkataloge in der CCD Astrometrie

- USNO A1.0 (1996): Ca. $\frac{1}{2}$ Mia. Sterne bis $V \sim 20$ mag, $p_e \sim 0.25$ arcs, keine EB, GSC Bezugssystem
- USNO A2.0 (1998): Update des A1.0, Übergang zum ICRS (HCRS) Bezugssystem
- USNO B1.0 (2003): Ca. 1 Mia. Sterne bis $V \sim 21$, $p_e \sim 0.20$ arcs, EB (aber nicht absolut innerhalb des ICRS)
- UCAC2 (2004): Ca. 50 Mio. Sterne $-90 \dots +40$, $p_e \sim 20$ mas ($R=10-14$)...70 mas bei $R \sim 16$ mag, EB im ICRS



Weitere (bessere!?) Kataloge

- PPMXL (2010): Kombination von USNO B1.0 und 2MASS Infrarot-Katalog => > 900 Mio. Sterne bis $V=20$ full-sky mit 80...120 mas Genauigkeit (2MASS data) bzw. 150...300mas, **inkl. EB im ICRS**
- UCAC3 (2010): 100 Mio. Sterne full-sky, $pe \sim 20\text{mas}$ (10-14mag) ... 100mas (16mag).
Aber: ist UCAC3 konsistent in seinem EB-System ?
- CMC-14 (2005): 100 Mio. Sterne -30...+50, $pe \sim 50\text{mas}$ (13mag) ... 100mas (16mag). Keine EB.

Sternbedeckungen

Catalog	Reports total	Reports (O+)	O+ / O (total)
3UCAC	295	7	2%
2UCAC	976	144	15%
TYC	4189	774	18%
HIP	1695	420	25%
GSC	114	6	5%
PPM	540	31	6%
TAC	200	9	5%

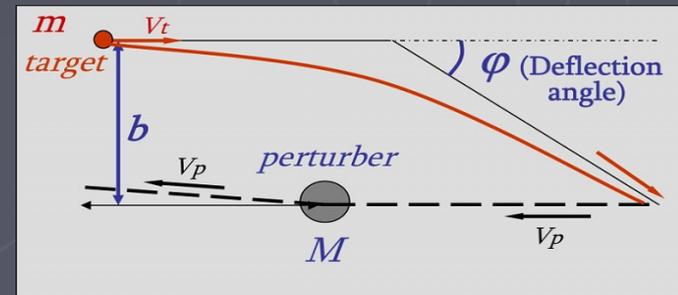
Quelle: Asteroidal Occultation Reports Database (sky-lab.net/occrep)

Frage: Hat UCAC3 ein EB-Problem nördlich -20deg Deklination ? (siehe Roeser 2010)

Massenbestimmung

▶ Gravitational asteroid-asteroid interaction:

- culmulative effects (resonances)
- deflection events (single / multiple)
(close and/or slow encounters)



- ▶ Analysis of planetary motion (e.g. perturbations on Mars)
- ▶ Orbital motion of asteroidal satellites / binary systems: observations by spacecrafts, HST, or ground based (AO)
- ▶ Gravitational asteroid-spacecraft interaction
- ▶ Ground based radar observations (binary systems, asteroidal satellites)
Problem: $1/r^{**4}$ drop of reflected signal

Least-squares fit to the observations

Correction ΔM to the mass of the (massive) perturber is computed along with the corrections $\Delta E = (E_1, \dots, E_6)$ of the six initial values (or osculating elements) of the „test“ (= deflected) asteroid.

These corrections are the solution of a system of linear equations:

$$P \Delta E + Q \Delta M = R \quad (1)$$

P: matrix of partials $\partial C_i / \partial E_k$ (Coordinates $C = RA, DE$)

Q: matrix of partials $\partial C_i / \partial M$

R: matrix of residuals (O-C) in RA, DE
for $i=1, \dots, N$ observations and $k=1, \dots, 6$ elements / initial values

Usually solved by the method of least-squares (LSQ Fit)

This differential orbit correction is performed by an so called N-body program:

1. Integration of the test asteroid taking into account the perturbations by:
 - ▶ the major planets
 - ▶ if applicable further perturbing asteroids
 - ▶ the perturbing (massive) asteroid which mass should be improved
 - ▶ other forces like relativistic effects etc.
1. Computing the residuals for the observations
2. Solving the equations of conditions (1)
3. Applying the corrections (ΔE , ΔM)
4. (Re)weighting / rejecting observations
5. Next iteration of computation until stable result is achieved

Difficulties

- ▶ Ceres contains $\sim 1/3$ of the mass of the main belt, but this is only $\sim 1\%$ of the mass of our moon
- ▶ As the involved masses are very small, the gravitational interactions are usually rather weak
- ▶ Numerical issues (convergence, bad conditioned equation systems, correlations, underestimated errors)
 - **Careful review / preprocessing of observations**
 - Careful rejection of observations (requires some experience and/or suitable rejecting algorithms)

Masse von (9) Metis

Störung auf (29818) 1999 CM117 (in 2005.2)

Katalogfilter	Masse	Dichte [g/cm**3]
Keiner	(12 +- 4) E-12	9.2 +- 1.9
A2.0, UCAC2	(5 +- 2) E-12	3.8 +- 0.8
A2.0,B1.0,UCAC2	(6 +- 2) E-12	4.7 +- 1.0

J. Baer (2008): (5.7 +- 1.4) E-12 4.12 +- 1.33

Dimensionen: (222 x 182 x 130) km

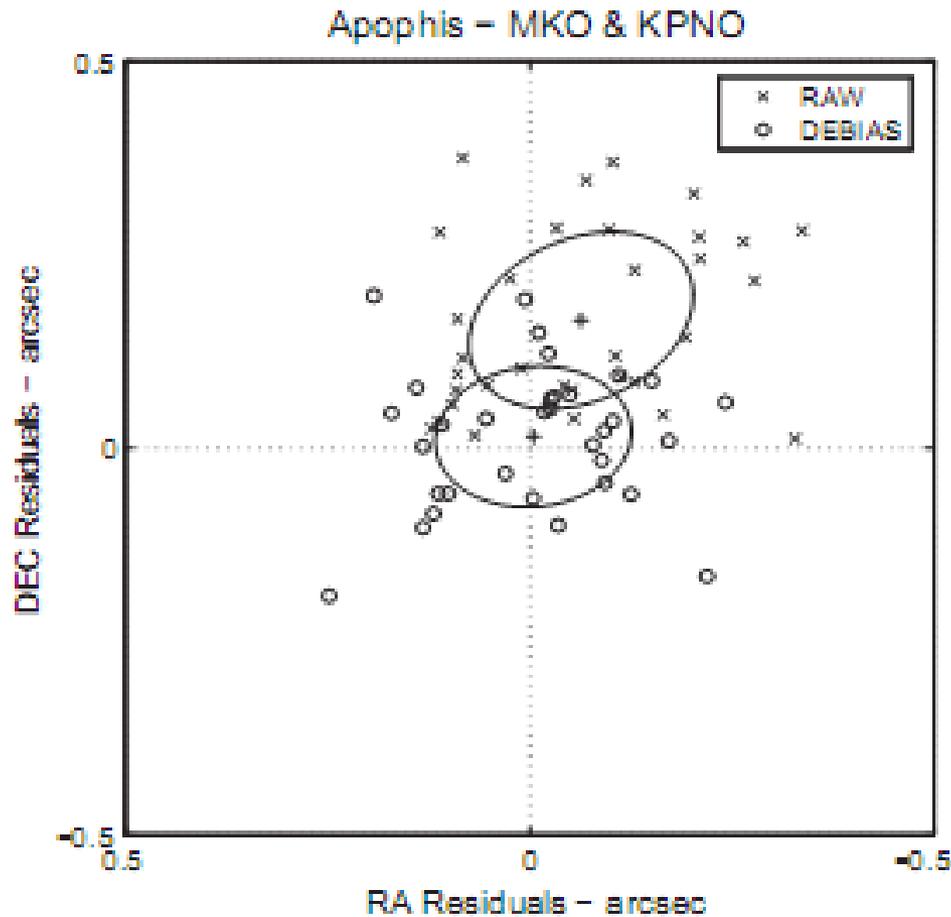
S-Klasse: 2.71 g/cm**3 (Krasinsky, Icarus 2002)

**Beachte: reine Selektion, es wurden keine Katalogkorrekturen
angebracht !**

Aussicht: Massenbestimmung

- ▶ GAIA (Start 2013?) wird $\sim 300\,000$ Asteroiden (hauptsächlich MB) bis $V \sim 20$ mit sub-mas bis mas Genauigkeit beobachten. Aber nicht als „Primärziel“ und regelmässig.
- ▶ In der ca. 5J Missionszeit werden ~ 100 potentielle Annäherungen für eine Massenbestimmung sein.
- ▶ GAIA wird auch die Grösse von ~ 1000 SolSys Objekten direkt messen.

(99942) Apophis: IP April 2036



- Raw : $2.2 \text{ E } -5$
- Debiased: $4.5 \text{ E } -6$

Fig. 18. For 99942 Apophis orbital fits, effect of debiasing on postfit residuals for Mauna Kea (568) and Kitt Peak (895) astrometry. One sigma covariance ellipses for the respective data sets are shown.

Zusammenfassung

- Neben Instrumentenfehlern/-ungenauigkeiten stellen die Unterschiede in den verwendeten Sternkatalogen eine weitere systematische Fehlerquelle dar.
- Debiasing der Beobachtungen hat i.a. einen begünstigenden Einfluss auf den Verlauf und das Ergebnis von astrometrisch-dynamischen Anwendungen
- PPMXL ist USNO B1.0 und vmtl. auch UCAC3 vorzuziehen

Pflichtenheft

- Implementierung von lokalen Katalogkorrekturen (USNO,UCAC etc. vs. 2MASS) nach Chesley et al.
- Implementierung lokaler Katalogkorrekturen (PPMXL vs. UCAC3) nach Röser et al.
- Konsolidierung mit bereits vorhandenen Korrekturalgorithmen (global und lokal) für FK4,FK5,ICRF etc.