



Astrometrie 4.0

Über Fehlermodelle, Anwendungen und die Zukunft (amateur-)astrometrischer Messungen

Mike Kretlow

22. Kleinplanetentagung

VEGA Sternwarte Haus der Natur, Salzburg, 14.-16. Juni 2019

Motivation / Übersicht

Verschiedene (nicht strikte) Epochen der „Astrometrie“:

- (1) Visuell
- (2) Fotografisch, Anfänge der CCD, erste Surveys, Anwendungen
- (3) CCD++, HIP/TYC (1997), Kataloge+, Surveys+, Anwendungen+
- (4) Gaia (DR1: 09/2016), Surveys++, Anwendungen++

Astrometrie 1.0

Ära der visuellen Astrometrie (18xx -)

- Mikrometerbeobachtungen
- Meridianbeobachtungen (aber auch jüngere, z.B. Carlsberg Ende 1990er, 0.2-0.3" RMS bei Asteroiden).

CMC (7" Refraktor) bis Ende 2013 operativ.

Solche Beobachtungen können oft mit aktuellen Sternkatalogen neu reduziert werden (wenn Referenzstern angegeben in Originalpublikation), aber Genauigkeit der Zeit u.U. limitierend.

Astrometrie 2.x

- Ära der photographischen Beobachtungen (auch Surveys, PLS)
- AC, GC, FK, AGK1-3, SAO, PPM usw.

I.w. die Referenzsysteme 1850-1997

- CCD Ära beginnt (Astrometrica: 1990, 1993 CCD)
- Erste CCD Surveys
- Neue Sternkataloge. GSC, HIP und TYC, dann USNO etc.
- ICRF/S, HCRS löst FK5 ab (~1997)

Parallel dazu auch neue Konstanten, neue Theorien zur Präzession und Nutation etc.

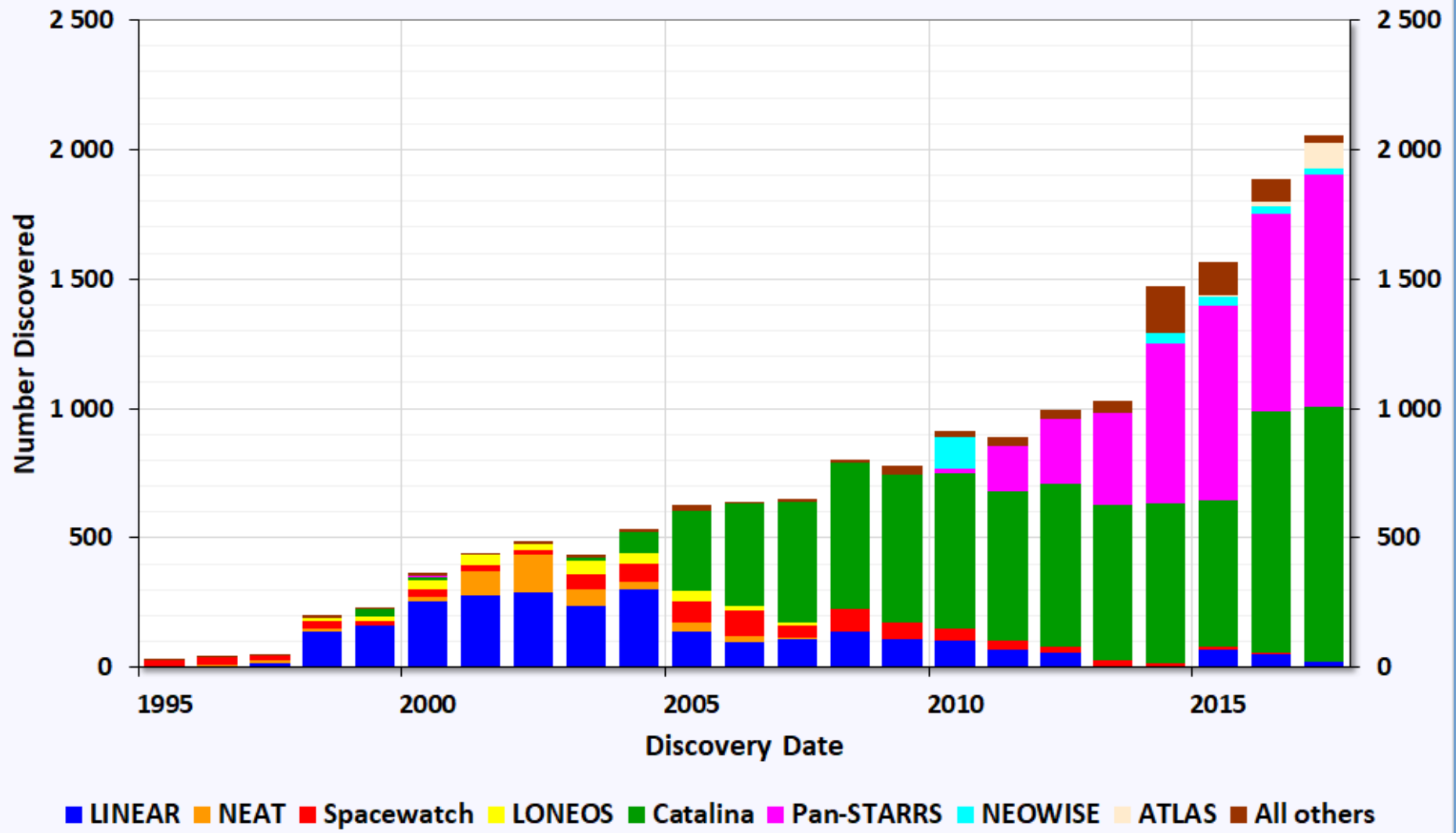
Astrometrie 3.x

- Größere und bessere Instrumente, Automatisierung, Remote, CCD usw.
- Neue Surveys liefern viele Daten (Entdeckungen): CSS, Pan-STARRS, etc.
- Weitere neue, weitreichende und genauere Sternkataloge (UCAC 2-4) => Bias zwischen Katalogen kann ermittelt werden

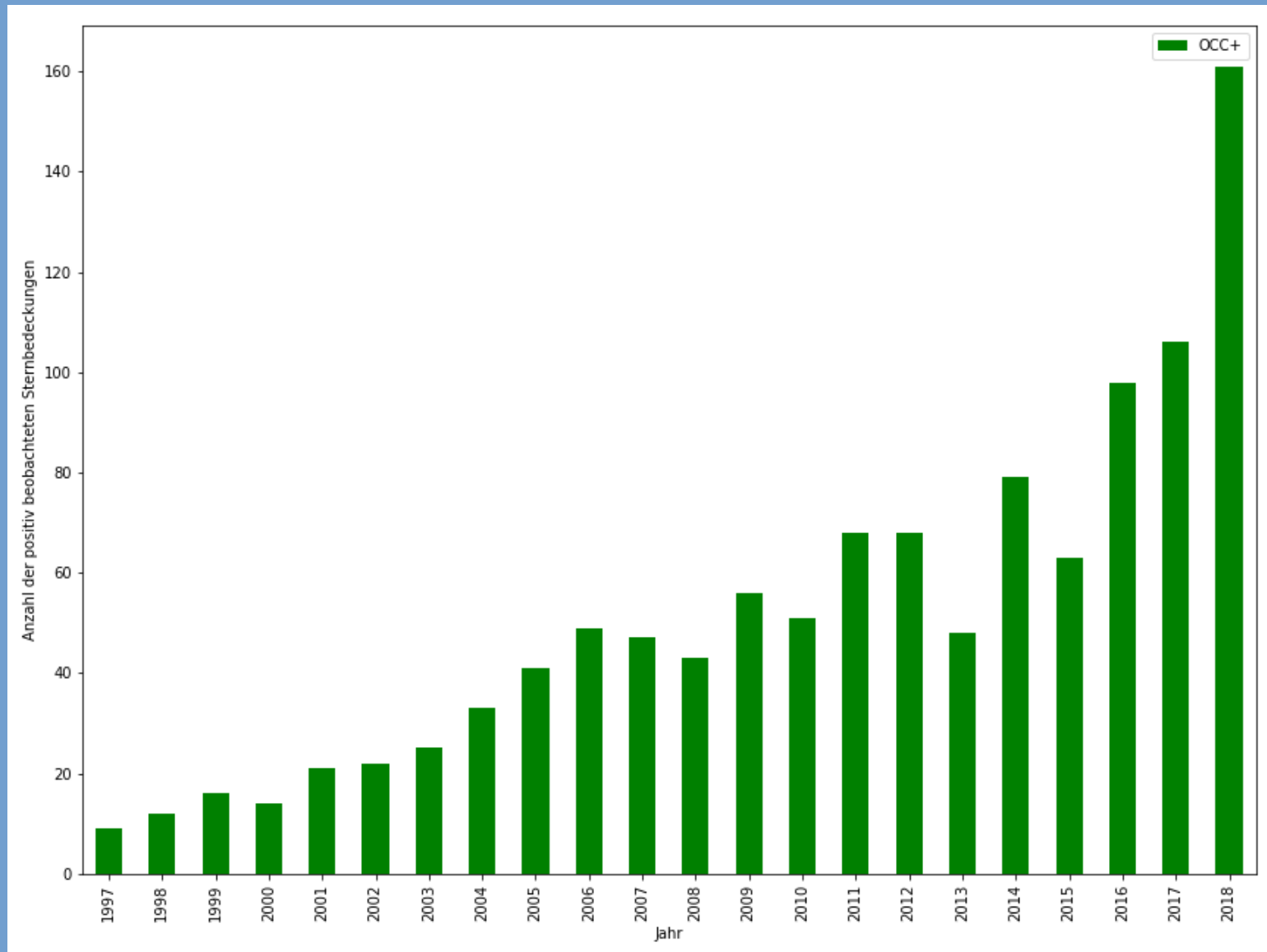
=> Quantität & Qualität, dynamische Effekte, Massen, bessere Vorhersage von Sternbedeckungen, Sternbedeckungs-Astrometrie

Near-Earth Asteroid Discoveries by Survey

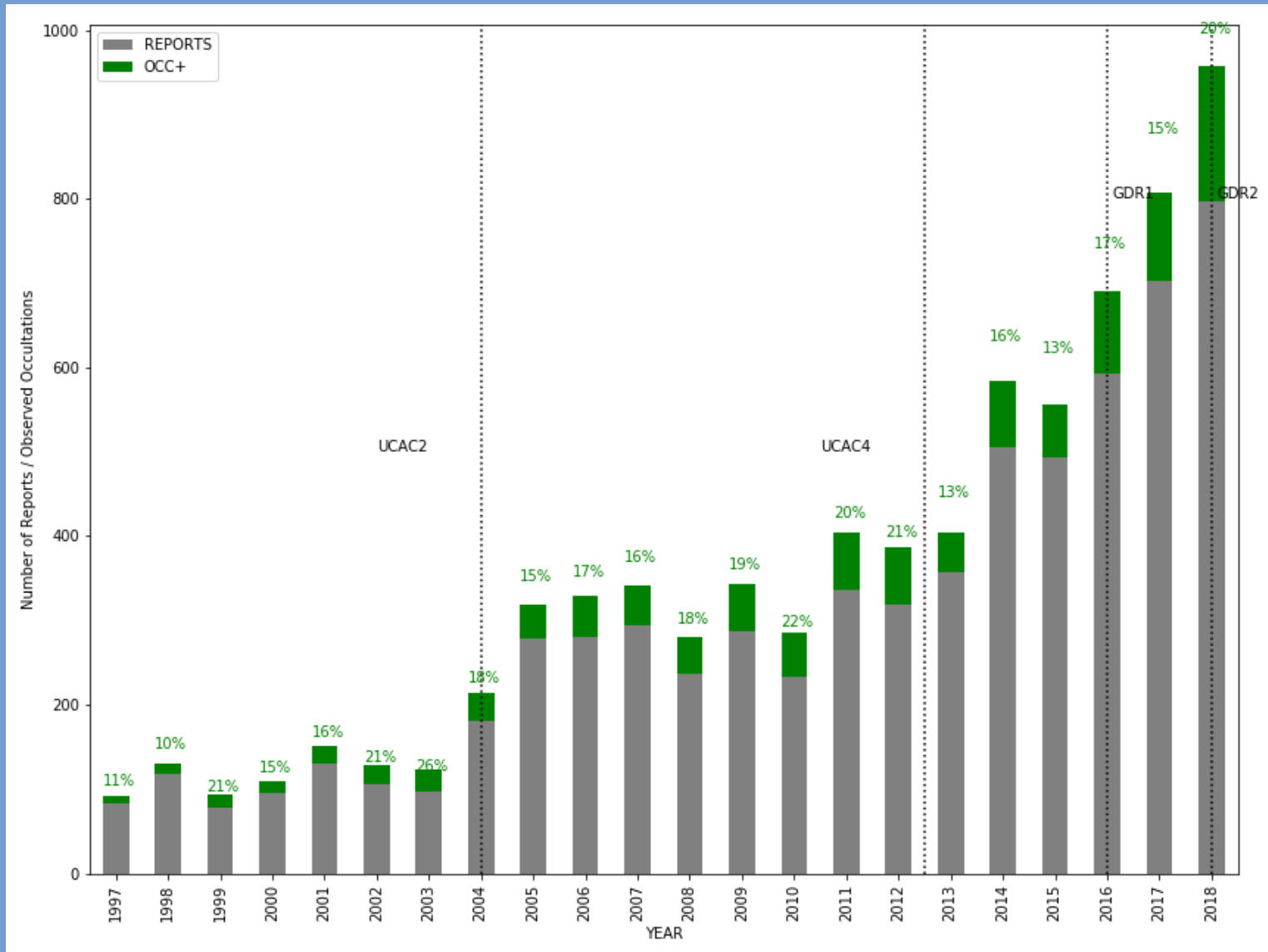
All NEAs



Sternbedeckungen durch Asteroiden (Europa)



Sternbedeckungen durch Asteroiden (Europa)



Astrometrie 4.x

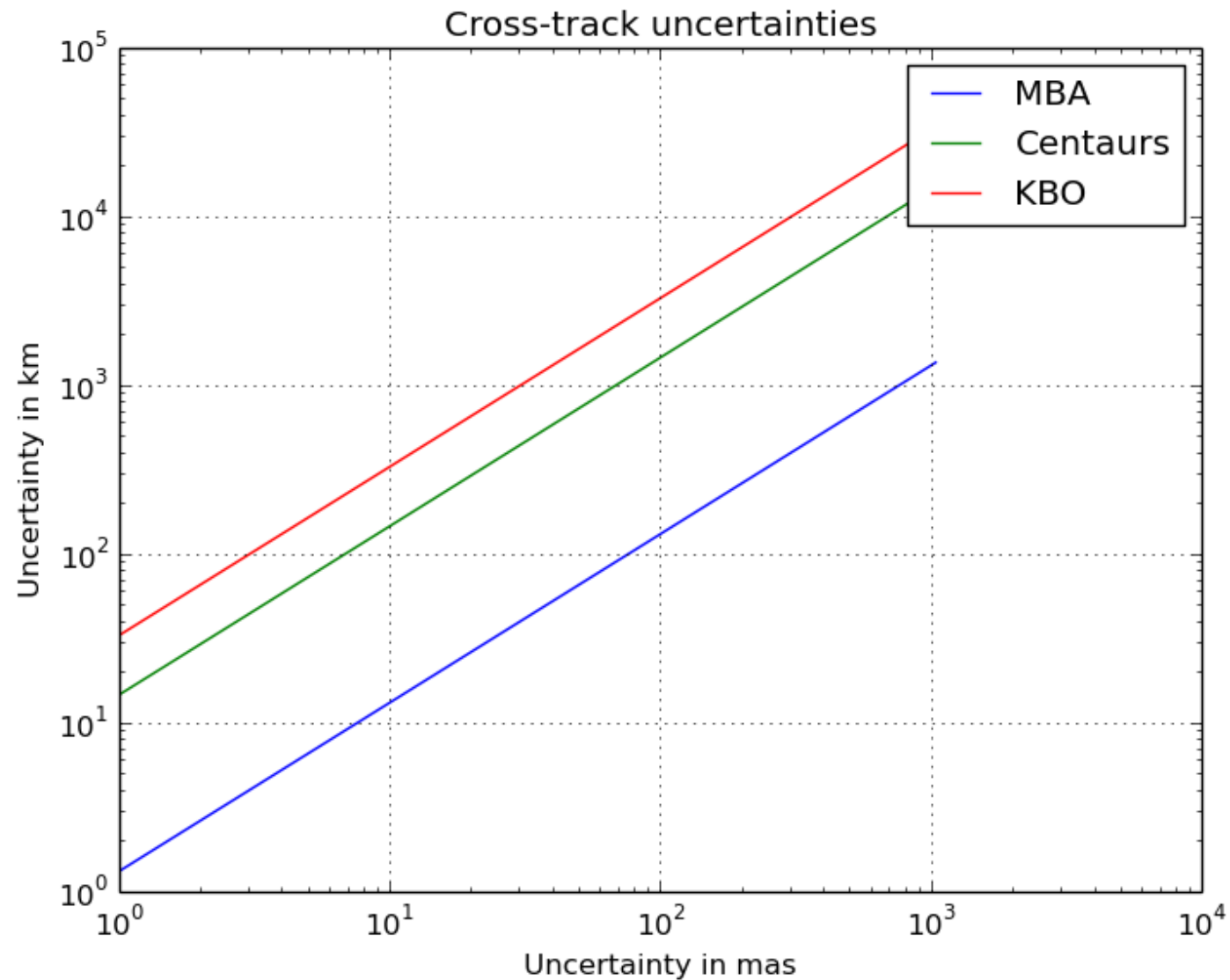
- Gaia Sternkatalog (DR2: 25.04.18).
1,7 Milliarden Sterne bis $G \sim 21$. $\sigma < 1 \text{ mas}$
- SSO Beobachtungen durch Gaia
- Large Synoptic Survey Telescope (LSST)
- Sternbedeckungs-Astrometrie

Anwendungen

1. Erfassung der Objekte und deren Bahnen
=> Synopsis, Statistik, Familien usw.
2. Jarkowski-Effekt, Massenbestimmung, etc.
3. Sternbedeckungen TNOs
4. Raumfahrt (Missionen)
5. NEOs: Impakt-Risiken etc.

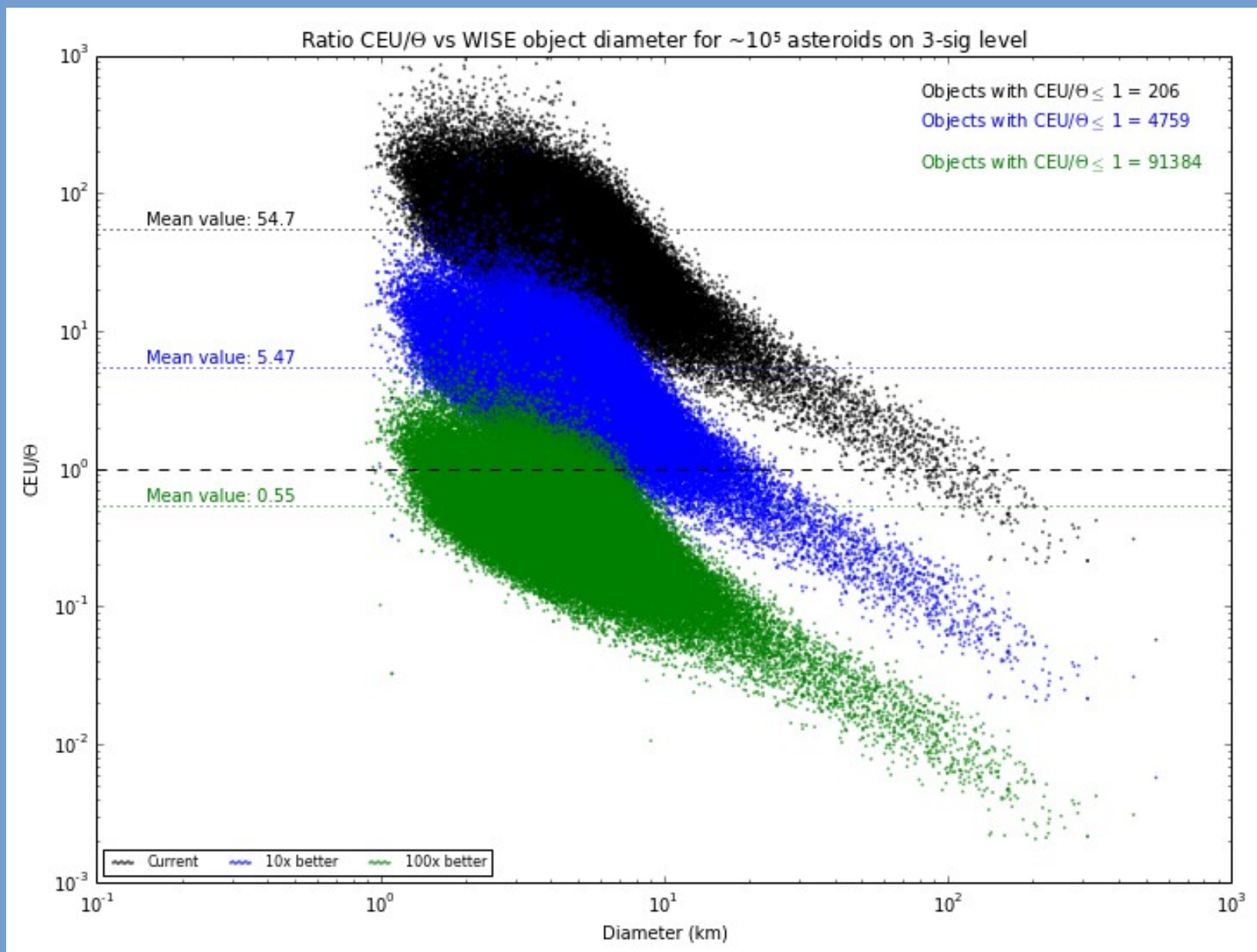
2-5 erfordern hohe Güte der Beobachtungen um
signifikante Ergebnisse zu liefern

Unsicherheit eines Schattenpfades einer Sternbedeckung auf der Erde

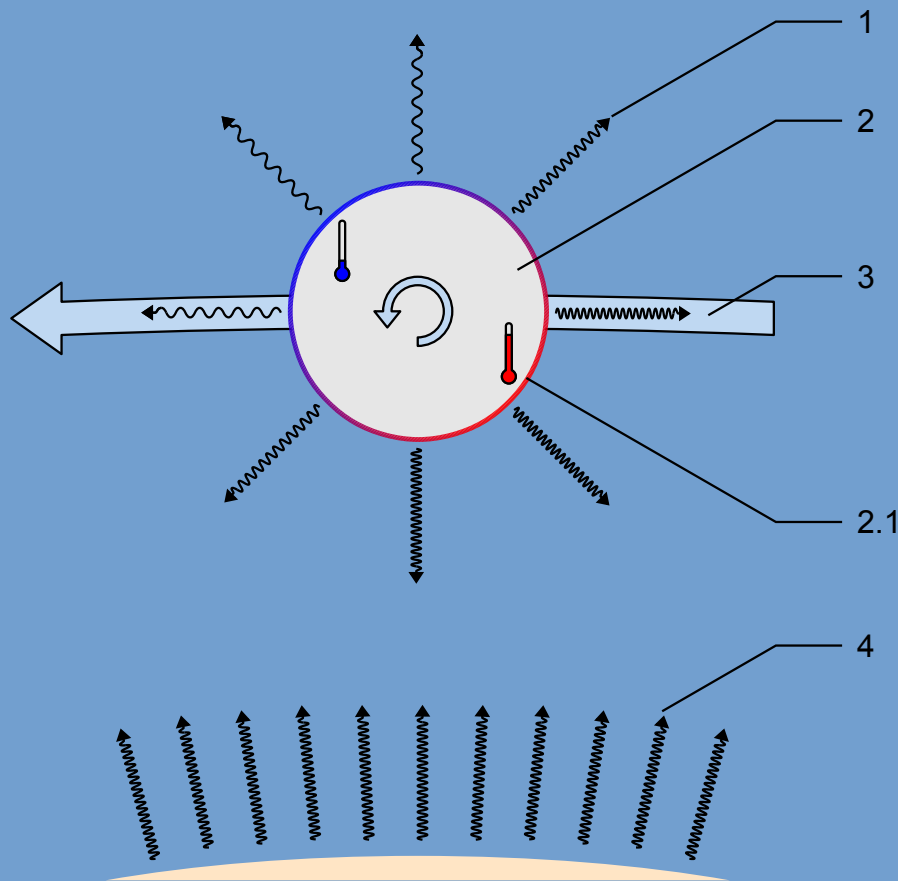


Typical positional uncertainties

- Typical uncertainty for current star positions:
 - UCAC4: < 100 mas
 - Gaia DR2: < 1 mas [< 0.04 mas ($G < 14$), ~ 0.1 mas ($G = 17$)]
- Typical ephemeris uncertainty for MBA's:
Anything from $\sim 30 \dots 500$ mas (dedicated updated orbit solutions typically < 50 mas)

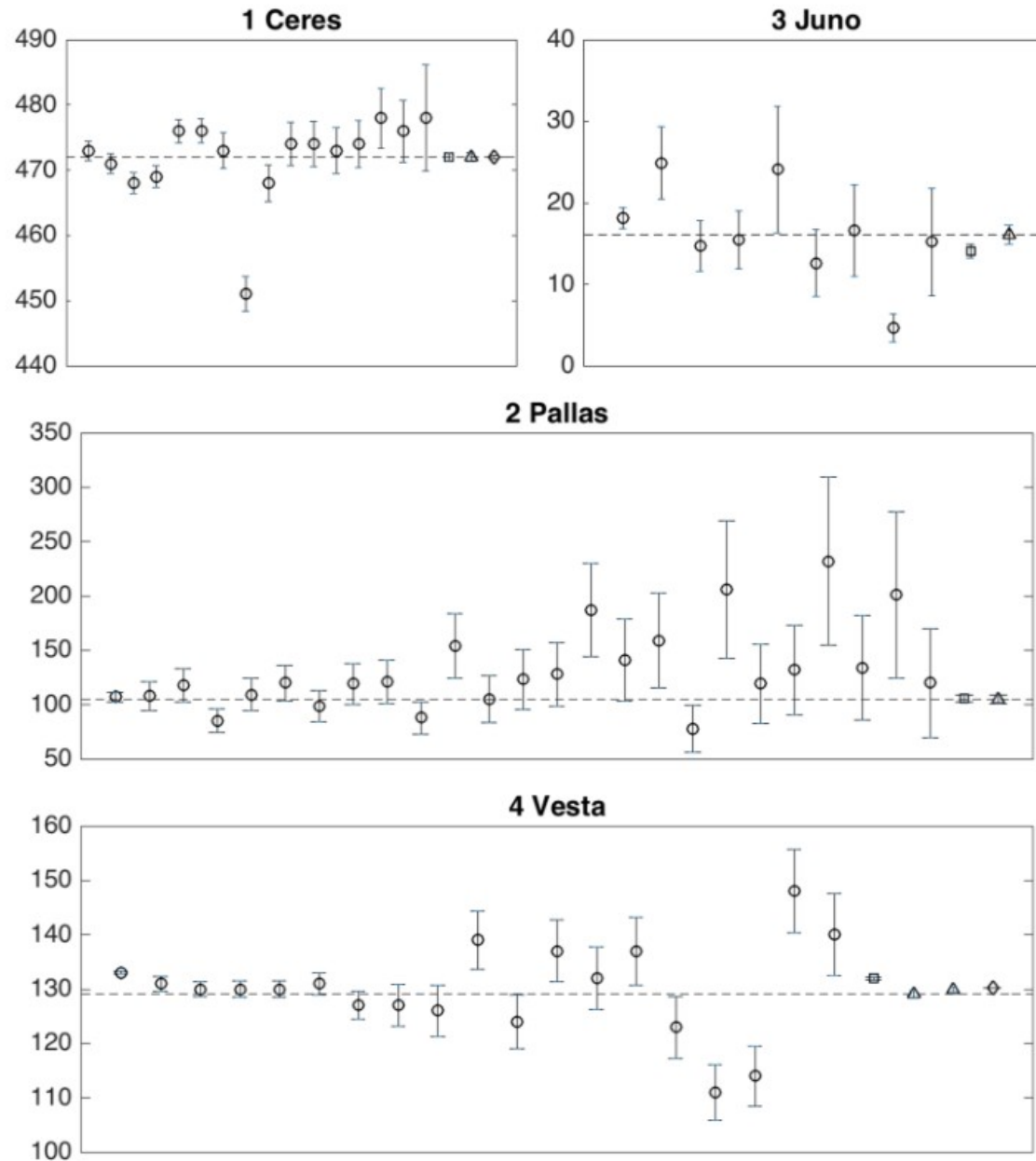


Jarkowski Effekt



- Asymmetrische thermische Abstrahlung
- Prograde Bewegung
=> a nimmt zu
- $da/dt \sim 10^{-4}$ AU/Myr
- Oftmals waren / sind noch weitere Radar-Beobachtungen notwendig
- Dynamische Evolution von kleinen Asteroiden und Meteoroiden

Massenbestimmung von Asteroiden



Hauptfehlerquellen

(a) Während der Messung: Beobachtungsfehler aller Art (zufällig, systematisch usw.)

(b) Während der Reduktion: Fehler innerhalb der Sternkataloge, Modellfehler etc.

- Zu (a): Erste Ansätze durch Carpino und Milani 2002: statistische Untersuchung der MPC-Beobachtungen auf „Sternwarten-Ebene“. Farnocchia et al. (2015).
- Zu (b) : Chesley et al. 2010 (Debiasing), später weitere Arbeiten dazu. Nun bietet sich Gaia als Referenz an.

Praxis der Bahnberechnungen

- Die astrometrischen Positionen sind im Sinne der Ausgleichsrechnung “vermittelnde” Beobachtungen, da die gesuchten Korrekturen (z.B. der Bahnelemente) Funktionen dieser Beobachtungen sind.
- Die Minimierung der Residuenquadratsumme (RMS^2) (Restfehler: Beobachtung – Rechnung, O-C) liefert die gesuchten Schätzparameter (Korrektur der Bahnelemente, aber auch andere Parameter wie Masse oder Jarkowski-Parameter).
- Methode der Kleinsten Quadrate; Least Squares Fit.

Gewichteter Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}.$$

Die Wahl der Gewichte $w_i = 1/\sigma_i^2$ minimiert die Varianz $\sigma_{\bar{x}}^2$ des gewichteten Mittels

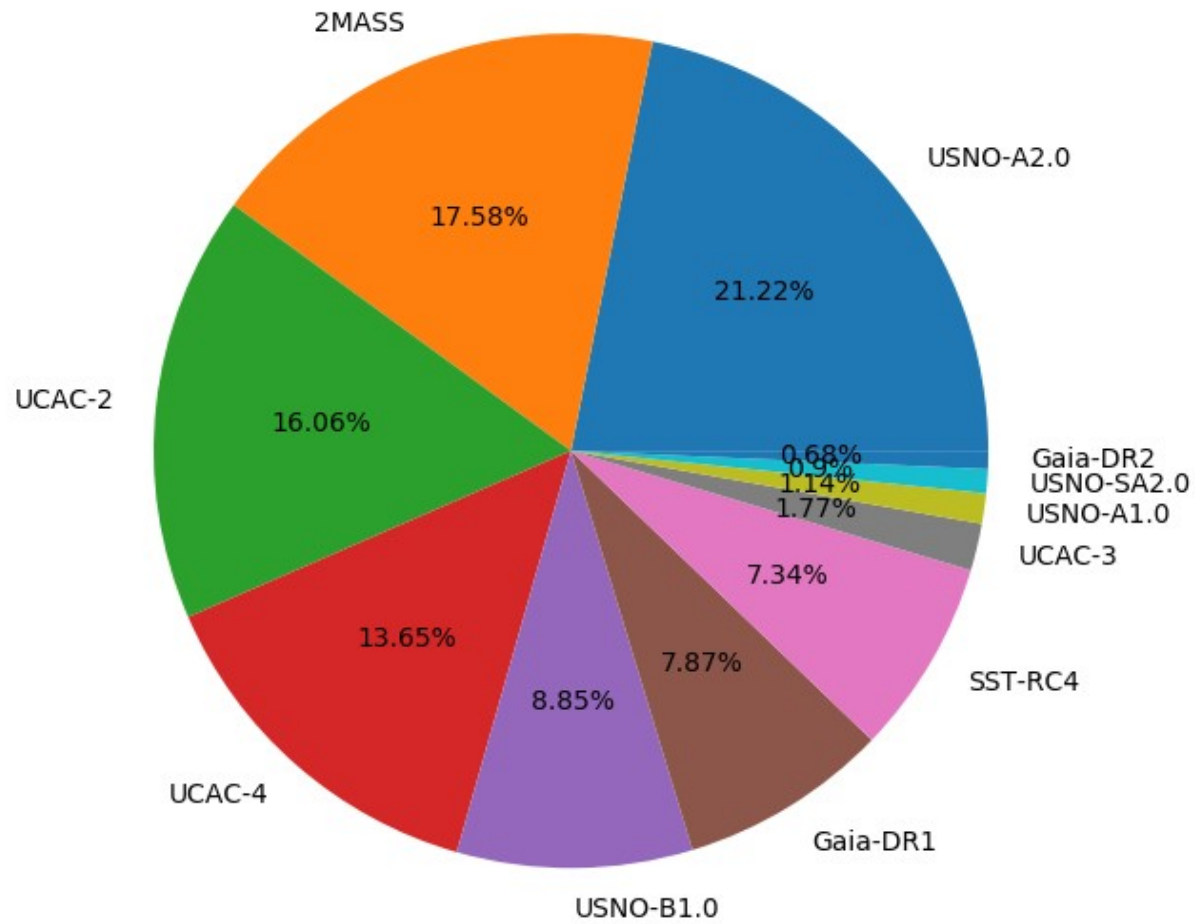
RMS (Root Mean Square) == Standardabweichung σ (da um 0)

Praxis der Bahnberechnungen

- Hauptproblem: Beobachtungen i.A. sehr inhomogen:
 - Wie gewichte ich die Beobachtungen ?
 - Wie finde und behandle ich Ausreißer (Zeit!)?
 - Systematische Fehler (Bias) ?
 - Automatisiert (im Programm) !
- Das alte Beobachtungsformat (80 Char) beinhaltet keine Fehlerangaben (σ , rms) für RA, DE und t !
- Spalte 72 = MPC-Sternkatalog-Code => Steuerung der Gewichtung und des Debiasing zusammen mit OBS-Code

Welche Kataloge dominieren die MPC Beobachtungen ?

Distribution of star catalogs used for astrometric reduction (MPC 03/2019)



Deswegen "Debiasing" wichtig

Systematische Katalog-Differenzen wrt 2MASS

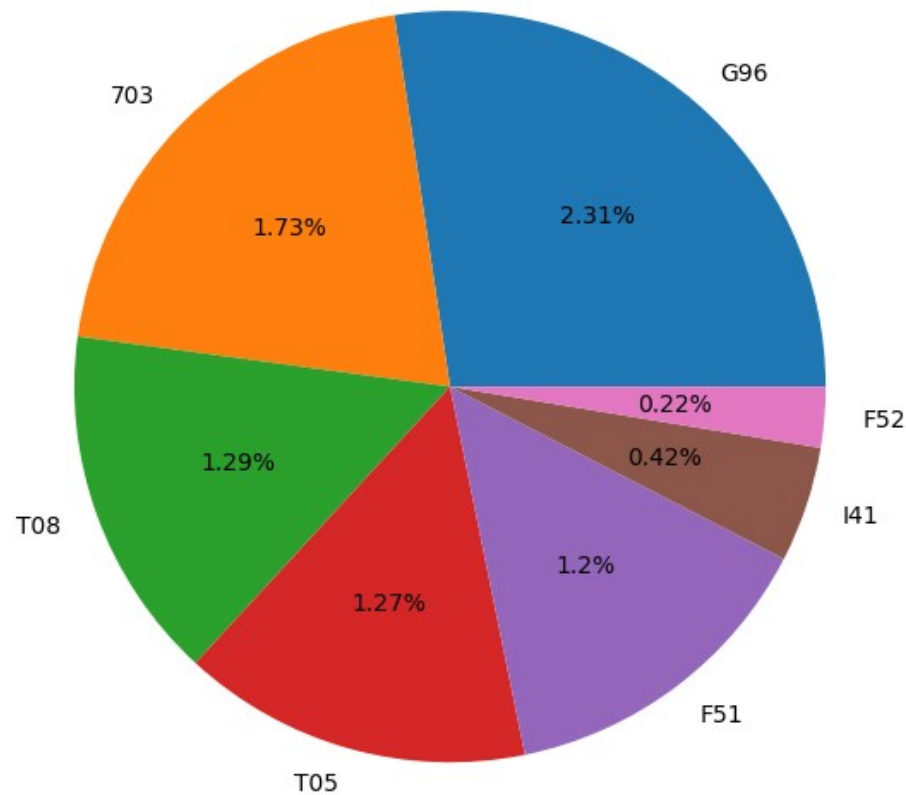
Catalog	$\overline{\Delta RA}_{2000}$ [arcsec]	$\overline{\Delta DEC}_{2000}$ [arcsec]	PM inc.	$\overline{\Delta \mu}_{RA}$ [mas/yr]	$\overline{\Delta \mu}_{DEC}$ [mas/yr]	Sky coverage
Tycho-2	0.02	0.02	Yes	0.7	0.7	100%
ACT	0.02	0.02	Yes	1.5	1.4	100%
2MASS	0.03	0.02	No	5.8	6.4	100%
USNO-A1.0	0.45	0.37	No	5.1	5.7	100%
USNO-SA1.0	0.45	0.37	No	5.0	5.5	100%
USNO-A2.0	0.21	0.24	No	5.1	5.7	100%
USNO-SA2.0	0.21	0.24	No	5.0	5.6	100%
USNO-B1.0	0.12	0.17	Yes	4.4	4.9	100%
UCAC-1	0.03	0.03	Yes	5.8	7.4	39%
UCAC-2	0.01	0.01	Yes	2.5	2.2	88%
UCAC-3	0.02	0.02	Yes	5.0	4.6	100%
UCAC-4	0.02	0.02	Yes	2.2	2.5	100%
GSC-1.1	0.47	0.38	No	6.8	6.6	100%
GSC-1.2	0.20	0.18	No	6.7	6.6	100%
GSC-ACT	0.15	0.13	No	6.7	6.6	100%
NOMAD	0.10	0.15	Yes	3.7	4.3	100%
PPM	0.23	0.24	Yes	4.1	4.2	100%
CMC-14	0.03	0.04	No	6.3	7.0	62%
SDSS-DR7	0.05	0.07	Yes	2.6	3.2	31%

Debiasing
astrometrischer
Beobachtungen

Bisherige Nutzung des Gaia Kataloges für die Reduktion astrometrischer Beobachtungen

Usage of Gaia for astrometric reduction (MPC 03/2019)

Total = 8.55 %



COD Name
703 Catalina Sky Survey (CSS)
G96 Mt. Lemmon Survey (MLS)
F51 Pan-STARRS 1, Haleakala
F52 Pan-STARRS 2, Haleakala
I41 Palomar Mountain (ZTF)
T05 ATLAS-HKO, Haleakala
T08 ATLAS-MLO, Mauna Loa

Re-Reduktion mit Gaia!? Nein => Debiasing !

Praxis der Bahnberechnungen

Früher:

- vieles manuell und aus Erfahrung, da meistens auch nur wenige 10 Beobachtungen in der Rechnung
- Starres 3-sigma Kriterium (teilweise iterativ)
=> Gefahr von Nachbareffekten

Heute:

- oftmals hunderte bis tausende Beobachtungen
- Debiasing (systematische Fehler), entsprechend des Kataloges
- Berücksichtigung der Anzahl der Beobachtungen einer Sternwarte in einer Nacht (clustering)
- $\chi^2 = O-C_{RA}^2/w_{RA}^2 + O-C_{DE}^2/w_{DE}^2$. Raus, wenn $\chi > 3$ oder 4
- Automatisch (und nach definierten „Regeln“) für viele Asteroiden, um post-fit RMS zu analysieren (Bias erkennen usw.)

NIMA (Desmars, Lucky Star)

The bias is given by:

- Astdys (MPC): bias = 300mas
- WFI:
 - ESO (809) bias = 75mas
 - OPD (874) bias = 150mas
 - PdM (586) bias = 150mas
 - CA (493) bias = 150mas
 - SN (J86) bias = 150mas
 - LH (I95) bias = 150mas
 - MLP (Z20) bias = 150mas
 - LLP (J13) bias = 150mas
 - other bias = 300mas
- UCAC/other
 - ESO (809) bias = 150mas
 - OPD (874) bias = 225mas
 - PdM (586) bias = 225mas
 - CA (493) bias = 225mas
 - SN (J86) bias = 225mas
 - LH (I95) bias = 225mas
 - MLP (Z20) bias = 225mas
 - LLP (J13) bias = 225mas
 - other bias = 300mas
- Fraser: bias = 300mas
- Occultation bias = 0mas
- Unknown: bias = 300mas

The sigma is given by:

- Astdys (MPC): weight given by Astdys
- ESO (809) sigma = bias
- OPD (874) sigma = bias
- PdM (586) sigma = bias
- CA (493) sigma = bias
- SN (J86) sigma = bias
- LH (I95) sigma = bias
- MLP (Z20) sigma = bias
- LLP (J13) sigma = bias
- Fraser: sigma = 300mas
- Unknown: sigma = 300mas
- Occultation sigma = 40mas/75mas

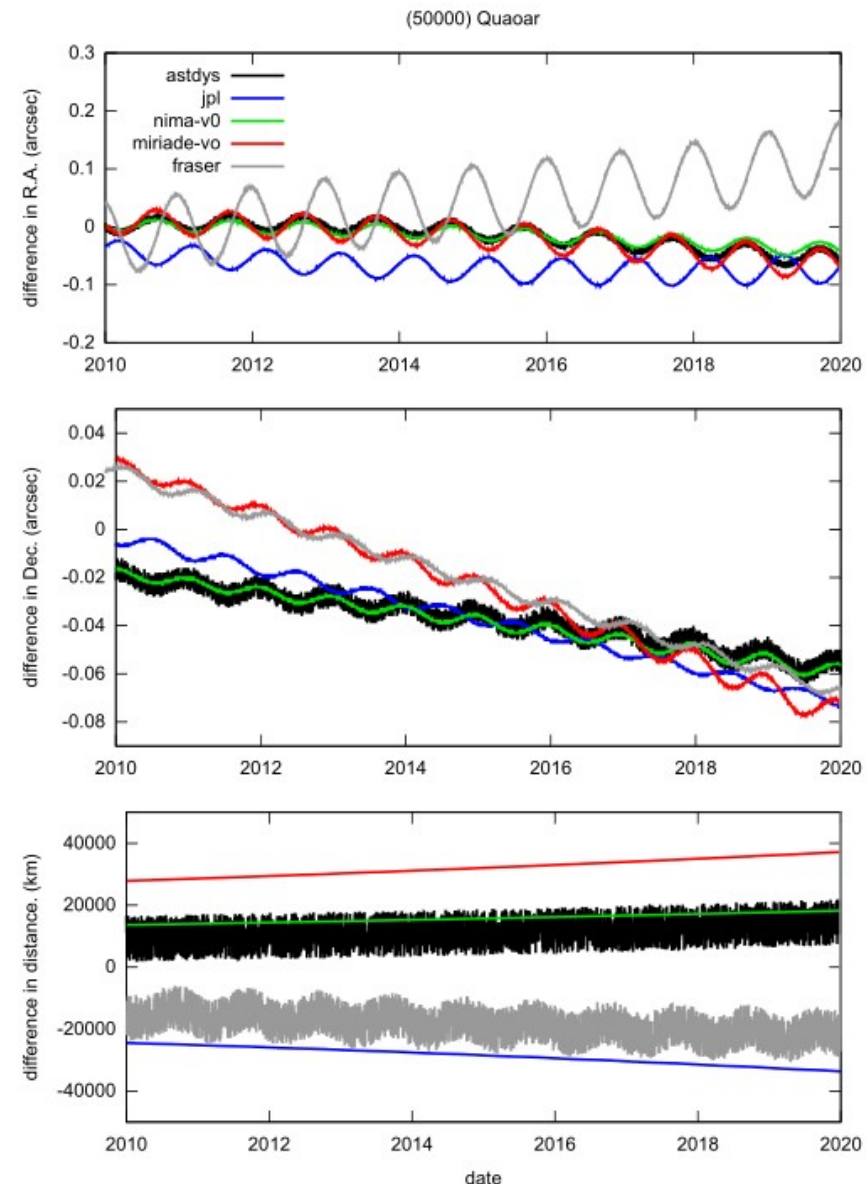


Fig.1. Difference in right ascension, weighted by $\cos \delta$, declination, and geocentric distance between NIMA and each ephemeris for (50 000) Quaoar.

Wichtungs-Regeln für MPC Beobachtungen

Table 6

Weighting rules by date for photographic, A and N-type observations (see Table 3).

Date	σ_{RA}	σ_{DEC}
<1890	3.0"	3.0"
1890–1950	2.0"	2.0"
>1950	1.5"	1.5"

Table 7

General weighting rules by type (see Table 3).

Type	σ_{RA}	σ_{DEC}	Type	σ_{RA}	σ_{DEC}
C, c, n, V, S	1.0"	1.0"	M	3"	3"
H	0.4"	0.4"	T	0.5"	0.5"
E	0.2"	0.2"	e	0.75"	0.75"

factor of 2 suggested by Chesley et al. (2010). The $\sqrt{N}$ better handles the cases with a large number of observations in a batch and avoids down-weighting batches with a lower number of observations. Moreover, this scale factor is applied to all types of observations thus mitigating possible correlations for, e.g., old photographic observations.

To validate the new weighting scheme we performed a test similar to that of Section 4.3. In this case we used the same debiasing

Table 8

Specific weighting rules by star catalog for observations with MPC type flag C, c, n, or V (see Table 3).

Catalog	σ_{RA}	σ_{DEC}	Catalog	σ_{RA}	σ_{DEC}
c, d	0.51"	0.40"	m	0.56"	0.57"
e, q, r, u	0.33"	0.30"	w	0.44"	0.36"
o, s	0.50"	0.41"	f, g	0.73"	0.64"
a, b	0.59"	0.51"	L, t	0.25"	0.25"
h, i, j, z	0.45"	0.44"			

Table 9

Station specific weighting rules by star catalog for observations with MPC type flag C, c, n, V, or S (see Table 3).

Station	Catalog	σ_{RA}	σ_{DEC}	Station	Catalog	σ_{RA}	σ_{DEC}
704	c, d	0.62"	0.60"	608	c, d	0.63"	0.77"
644	c, d	0.24"	0.28"	644	o, s	0.18"	0.17"
703	c, d	0.62"	0.57"	703	e, r	0.49"	0.46"
699	c, d	0.47"	0.39"	699	o, s	0.42"	0.41"
691	c, d	0.32"	0.34"	691	o, s	0.25"	0.28"
G96	e, r	0.25"	0.21"	E12	e, r	0.41"	0.43"
F51	L	0.15"	0.15"	H01	t, L	0.15"	0.15"
568	t	0.13"	0.13"	568	L	0.15"	0.15"
568	o, s	0.25"	0.25"	673	All	0.30"	0.30"
683	e, r	0.61"	0.78"	645	e	0.15"	0.15"
689	g	0.26"	0.32"	250	All	1.30"	1.30"
C51	All	1.00"	1.00"				

Farnocchia +3, 2015

MPC (1992) Format

für optische astrometrische Beobachtungen (80 Spalten/Char)

- Maximale Zeitauflösung ca 0.1s
- Maximale Auflösung 0.001s in RA und 0.01" in DE
- **Keine Fehlerangaben möglich** => Gewichtung !
- Keine Details zur Beobachtung in der Beobachtung selbst abgespeichert, außer Sp. 15 und 72 und Referenz.
 - Observer Details aus MPC etc.
 - chronologische Veränderungen unsicher oder gar nicht erfasst
 - SNR etc. trotzdem i.a. unbekannt

Das Format wird heutigen Anforderungen nicht mehr gerecht.

ADES Format

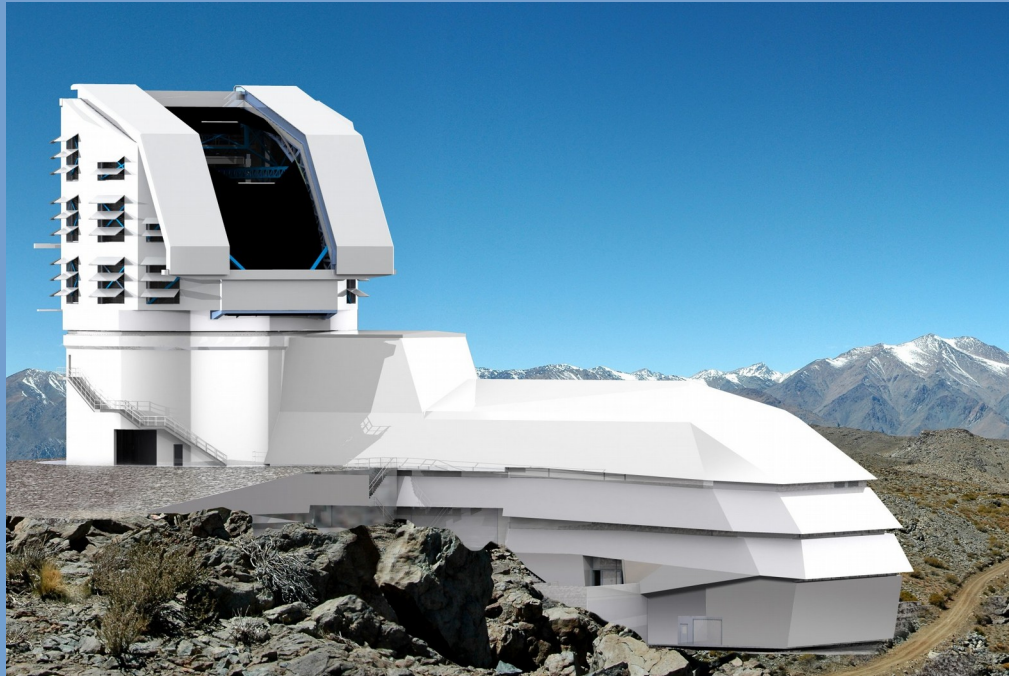
Astrometry Data Exchange Standard

- Wesentlich umfangreicher und flexibler
- Die Beobachtung enthält (sehr viele) Beobachtungsdetails, die für die Nutzung der Messungen wichtig sind / sein können.
- Angabe von Fehlern ($\text{rms}=\sigma$) in RA, DE, t
 $\Rightarrow w = 1/\sigma^2$
- Vortrag von Herbert Raab
- <https://minorplanetcenter.net/iau/info/ADES.html>

Zukunft (4.x)

- Auswirkungen des Gaia Sternkataloges und SSO Beobachtungen durch Gaia.
EDR3: Q3/2020, DR3: H2/2021
=> deutlich mehr SSOs als jetzt (~300000 statt ~14000) und über längeren Beobachtungszeitraum
- Beobachtungen durch Sternbedeckungen (ggf. + 3D-Modell) => Genauigkeit im km Bereich (!)
- **Large Synoptic Survey Telescope (LSST)**

Large Synoptic Survey Telescope

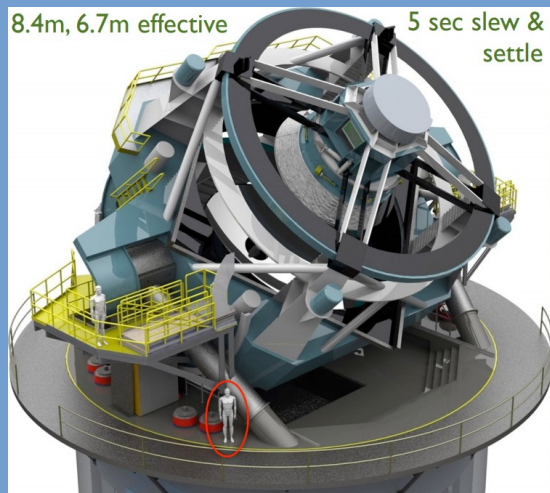


Ein optischer / NIR (ugrizy) Survey des halben Himmels bis $r \sim 27.5$, basierend auf ~ 800 Beobachtungen jedes Feldes innerhalb von 10 Jahren.

Der gesamte sichtbare Himmel 2x / Nacht und Wiederholung alle 3-4 Nächte.

8.4m Öffnung, 3.2-gigapixel, $0.2''/\text{px}$, 3.5° FOV
Cerro Pachon, Chile

First light: 2019 / 2020
Survey : ab 2022



Entdeckungs-Performance:

90% aller NEOs $> 140\text{m}$

MBAs bis hinunter wenige 100m

KBOs $< 100\text{-}200\text{km}$

Objekte wie Pluto in 300 AU Entfernung

~ 6 Mio. SSOs mehrere hundert Mal beobachtet (präzise Astrometrie und Multiband Photometrie) innerhalb von 10 Jahren.

Die Erfassung des Sonnensystem ist eines der vier Hauptthemen des LSST!

10-100x increase in sample size for every small body population in the Solar System

	Currently Known*	LSST Discoveries**	Median number of observations+	Observational arc length+
Near Earth Objects (NEOs)	14,500	100,000	(D>250m) 60	6.0 years
Main Belt Asteroids (MBAs)	650,000	5,500,000	(D>500m) 200	8.5 years
Jupiter Trojans	6000	280,000	(D>2km) 300	8.7 years
TransNeptunian Objects (TNOs) + Scattered Disk Objects (SDOS)	2000	40,000	(D>200km) 450	8.5 years

* As reported by the MPC ** Expected by end of survey +For the brightest objects (near 100% completeness)

Moving object processing is an integral part of LSST Data Management!

Nightly Alert Stream

- A stream of ~10 million time-domain events per night, detected and transmitted to event distribution networks within 60 seconds of observation.
- **A catalog of orbits for ~6 million bodies in the Solar System.**

Was bleibt „uns“ !?

- Veränderungen, aber auch neue Chancen durch Gaia, LSST !?
- Sternbedeckungen (Astrometrie !)
- Citizen Scientist (Daten nutzen, nicht liefern)
- Unberührt davon: Hobby, Spaß, ...
- -----
- Gaia DR2 (ASAP) zur Reduktion
- ADES (ASAP, Astrometrica ≥ 4.12)



Danke für die Aufmerksamkeit !