

ПРОЕКТ KASPAR: ИТОГИ ПЕРВОГО СЕЗОНА НАБЛЮДЕНИЙ ПАР АСТЕРОИДОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ

Крушинский В.В.,
Гламазда Д.В.,
Кайзер Г.Т.,
Кузнецов Э.Д.,
Попов А.А.,
Сафронова В.С.,
Шагабудинов А.А.,
Вибе Ю.З.

Уральский
федеральный
университет

Происхождение астероидов на близких орбитах

В работе [1] обосновывается предположение, что пары астероидов, движущиеся по близким орбитам, могут иметь общее происхождение.

- Столкновения астероидов
- Разрушение астероидов вследствие быстрого осевого вращения (YORP)
- Распад двойных или кратных систем астероидов (BYORP)
- Сближение орбит астероидов за счет вековых возмущений больших полуосей орбит под действием эффекта Ярковского
- ...

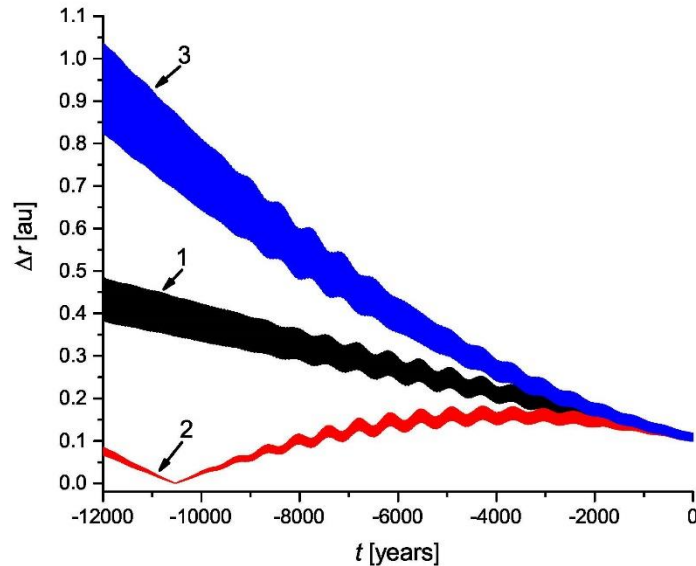


Без Ивана Осиповича ну никак не обойтись!

Поиск пар астероидов и численное моделирование динамической эволюции

- Asteroids Dynamic Site – AstDyS
105 пар астероидов с $\rho_2 < 0.002 \text{ (a.e.)}^{1/2}$ ($\rho_2^2 < 600 \text{ км}$)
- Orbit9 из OrbFit Software Package, <http://adams.dm.unipi.it/orbfit/>
Интегрирование в прошлое
Интервал – 20 000 лет
Орбиты из AstDyS – начальные условия для интегрирования
Совместное интегрирование 8 больших планет и карликовой планеты Плутон
Скорость векового дрейфа большой полуоси за счет эффекта Ярковского

Расстояние Δr между астероидами (63440) 2001 MD30 и (331933) 2004 TV14

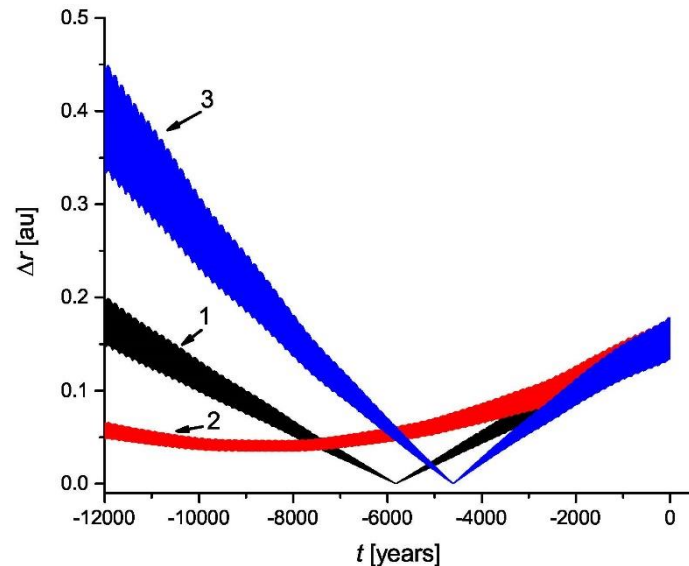


1) Без учета эффекта Ярковского

2) $\left(\frac{da}{dt}\right)_{63440} = 10^{-3}$ а.е./млн лет
 $\left(\frac{da}{dt}\right)_{331933} = -10^{-3}$ а.е./млн лет
 $\Delta r = 1477$ км, $\Delta v = 0.074$ м/с,
 $t = -10527.8$ лет

3) $\left(\frac{da}{dt}\right)_{63440} = -10^{-3}$ а.е./млн лет
 $\left(\frac{da}{dt}\right)_{331933} = 10^{-3}$ а.е./млн лет

Расстояние Δr между астероидами (355258) 2007 LY4 и (404118) 2013 AF40



1) Без учета эффекта Ярковского

$\Delta r = 2161$ км, $\Delta v = 0.040$ м/с,
 $t = -5824.8$ лет

2) $\left(\frac{da}{dt}\right)_{355258} = 10^{-3}$ а.е./млн лет
 $\left(\frac{da}{dt}\right)_{404118} = -10^{-4}$ а.е./млн лет

3) $\left(\frac{da}{dt}\right)_{355258} = -10^{-4}$ а.е./млн лет
 $\left(\frac{da}{dt}\right)_{404118} = 10^{-3}$ а.е./млн лет
 $\Delta r = 3273$ км, $\Delta v = 0.062$ м/с,
 $t = -4606.4$ лет

Неоднозначность результатов моделирования

- Для исследования динамической эволюции пар астероидов на близких орбитах необходимы как позиционные, так и фотометрические наблюдения, чтобы на их основе получать параметры, необходимые для учета эффекта Ярковского.
- Для исследования происхождения пар астероидов на близких орбитах необходимы фотометрические наблюдения, чтобы на их основе определить частоту и направление вращения, ориентацию оси вращения, необходимые для учета YORP.
- Дополнительную информацию о возможной генетической связи астероидов пары могут дать спектральные наблюдения (e.g., Duddy et al., MNRAS, 2013).
- В динамическую модель для астероидов главного пояса необходимо также включить карликовую планету Церера и массивные астероиды (Веста, Паллада, ...) (Zizka et al. A&A. 2016).

KASPAR (Kourovka Asteroid Pairs Research)

- Астрометрические и фотометрические наблюдения пар астероидов на близких орбитах. Определение:
 - Улучшенных орбит,
 - Периодов осевого вращения,
 - Направления осевого вращения [2,3,4],
 - Направления оси вращения [2,3,4],
 - Величины дрейфа большой полуоси.
- В перспективе – широкополосная фотометрия астероидов (телескоп «Ли́ра-Б» на российском сегменте МКС) для таксонометрии астероидов.
- Численное моделирование динамической эволюции пар астероидов на близких орбитах с учетом параметров, описывающих влияние эффекта Ярковского, полученных из наблюдений.

2. Oszkiewicz, D., et. al. Astronomy & Astrophysics, Volume 599, id.A107, 15 pp.

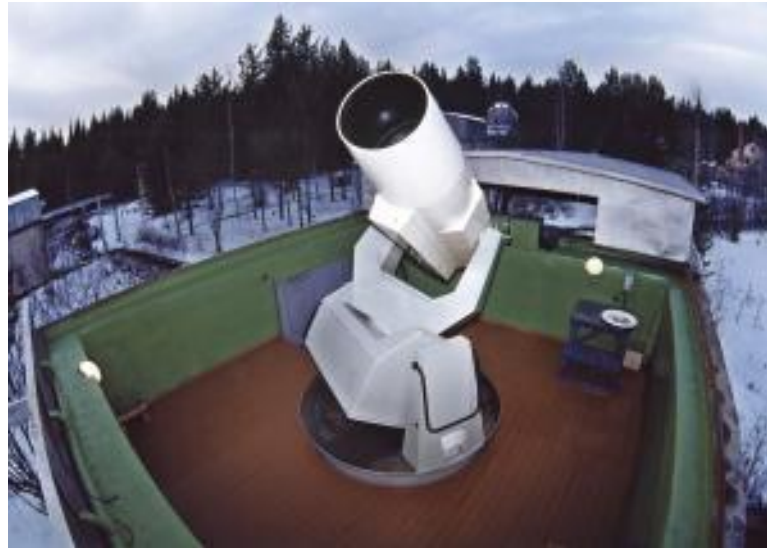
3. Kaasalainen, M., & Torppa, J. 2001, Icarus, 153, 24

4. Kaasalainen, M., Torppa, J., & Muinonen, K. 2001, Icarus, 153, 37

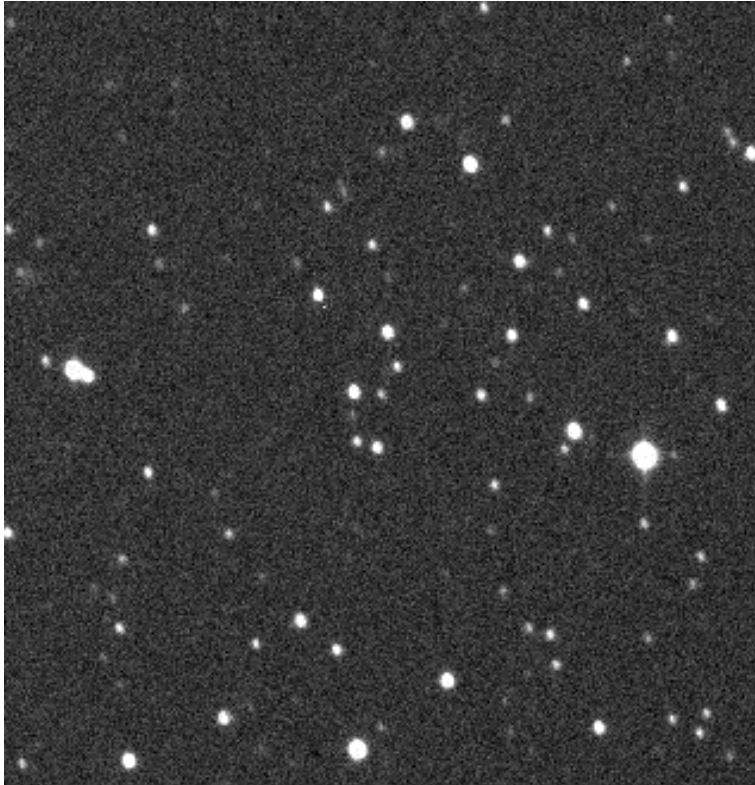
Инструменты проекта



SBG: 400/800мм, $1^\circ \times 0.65^\circ$, $1.75''/\text{pix}$, UBVR
MASTER: 400/1000мм, $2^\circ \times 2^\circ$, $1.85''/\text{pix}$, BVRI, two channel
RoboPhot (2019+): 600/4200, $0.3^\circ \times 0.3^\circ$, gri, three channel



ἄστεροειδής — «подобный звезде»



- Астероиды не стоят на месте. Необходимо найти астероид на каждом кадре.
- Ансамбль звезд сравнения так же постоянно меняется, не получится один раз выбрать десяток хороших звезд и использовать их на всех кадрах.
- Ну и иногда астероиды проходят вблизи звезд.

Поиск и отождествление объекта на кадре

OBJNAME = '1981_JE ' / NAME OF OBJECTS
EXPTIME = 180.000000 / Exposure time in seconds
DATE-OBS = '2017-12-16T19:19:01.830' / Date at the beginning of exposure



Quick Links

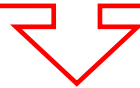
- Documentation
- Web Interface
- Telnet Method
- E-mail Method
- System News

HORIZONS System

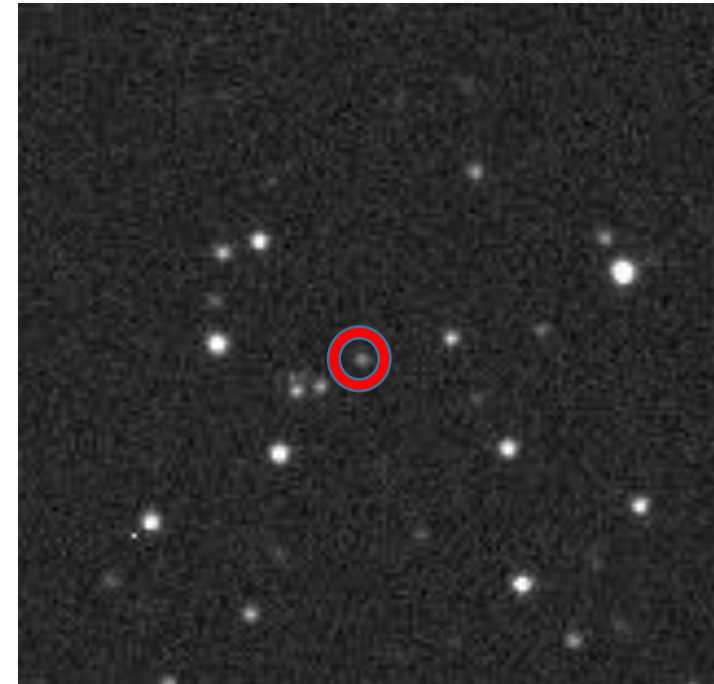
The JPL HORIZONS on-line solar system data and ephemeris computation service provides access to key solar system data and flexible production of highly accurate ephemerides for solar system objects (751396 asteroids, 3502 comets, 178 planetary satellites, 8 planets, the Sun, L1, L2, select spacecraft, and system barycenters). HORIZONS is provided by the Solar System Dynamics Group of the Jet Propulsion Laboratory.

The HORIZONS system can be accessed using any of the following methods:

- [telnet](#) (instructions)
- [email](#) (instructions)
- [web-interface](#) (see note below)



WCS(RA,DEC) => X,Y



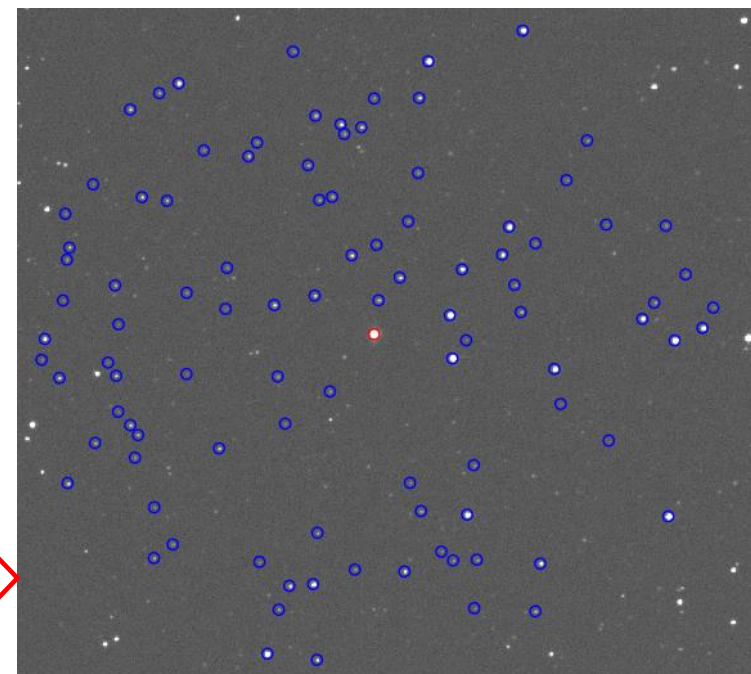
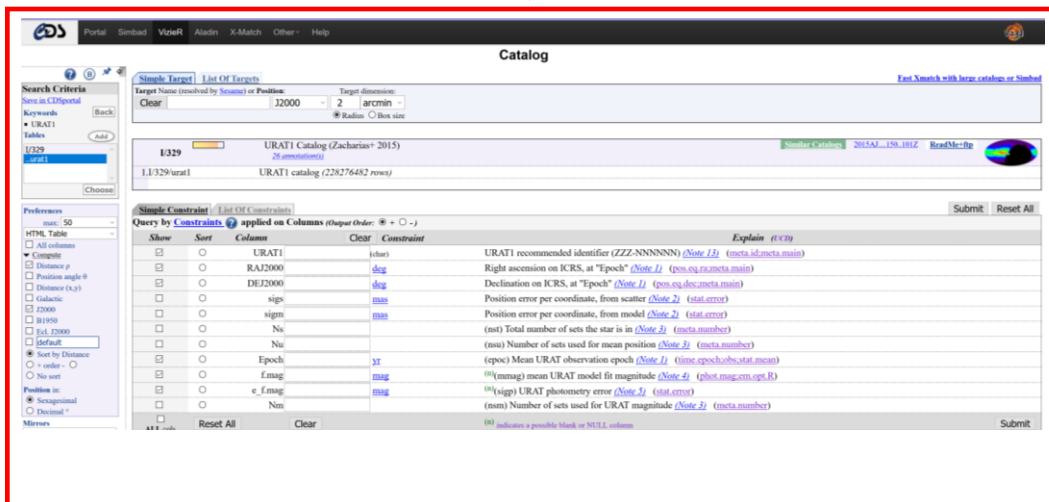
Опорный каталог

CRVAL1 = 75.8312838135 / RA of reference point
CRVAL2 = 21.5422538424 / DEC of reference point
CRPIX1 = 2050 / X reference pixel
CRPIX2 = 2050 / Y reference pixel
CD1_1 = -0.000514526250139 / Transformation matrix
CD1_2 = 9.470603752E-06 / no comment
CD2_1 = 9.470603752E-06 / no comment
CD2_2 = 0.000514526250139 / no comment

Для фотометрии используем APASS (BVgri),
точнее URAT1 в который он включен.
Его же используем для астрометрии.
Переход от SDSS gri к RI.

GAIA можно использовать для
астрометрии, но не для фотометрии.

Pan-STARRS идеален, но только grizy.



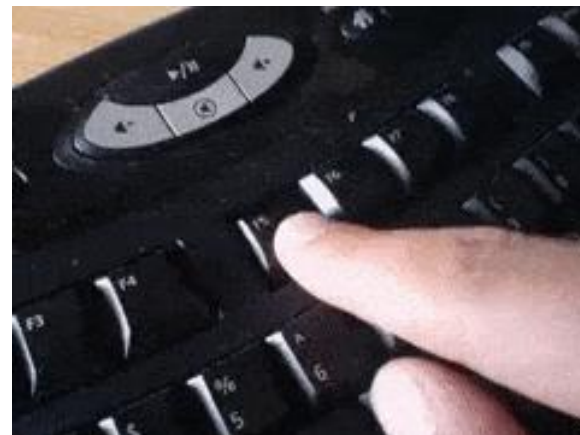
RAJ2000, DEJ2000, pmRA, pmDE
Bmag, e_Bmag, Vmag, e_Vmag, gmag, e_gmag, rmag, e_rmag,
imag, e_imag
WCS(RA,DEC) => X,Y

AM:

Автоматическая калибровка и предварительная астрометрия кадров

Входной параметр – имя папки с сырыми данными.

- 1) Создание резервной копии данных.
- 2) Сортировка кадров по типу: объекты, темновые кадры и плоские поля.
- 3) Подготовка калибровочных кадров: superdark, superflat. Сохранение в банк калибровок.
- 4) Выбор оптимального набора калибровочных кадров для каждого кадра с объектом, калибровка.
- 5) Astrometry.net
- 6) Обрезка кадров, архивация.



В итоге имеем набор калиброванных кадров с WCS-шапкой, позволяющей связать экваториальные и X-Y координаты.

Время обработки ~20-30 секунд на кадр 4Kx4K.

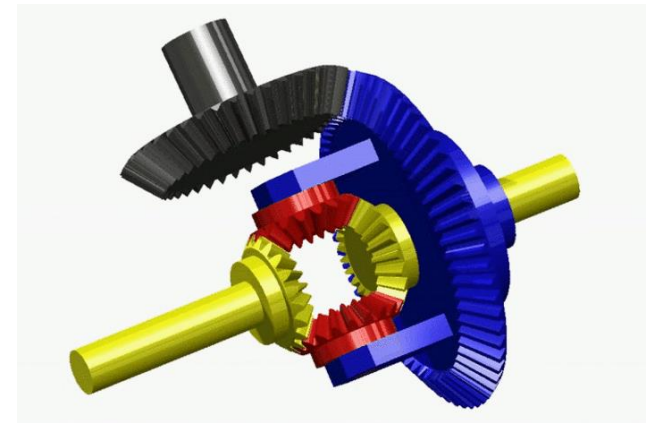
:PM

Фотометрия и точная астрометрия

Входные параметры – имя папки кадрами, грубая оценка FWHM звезд.

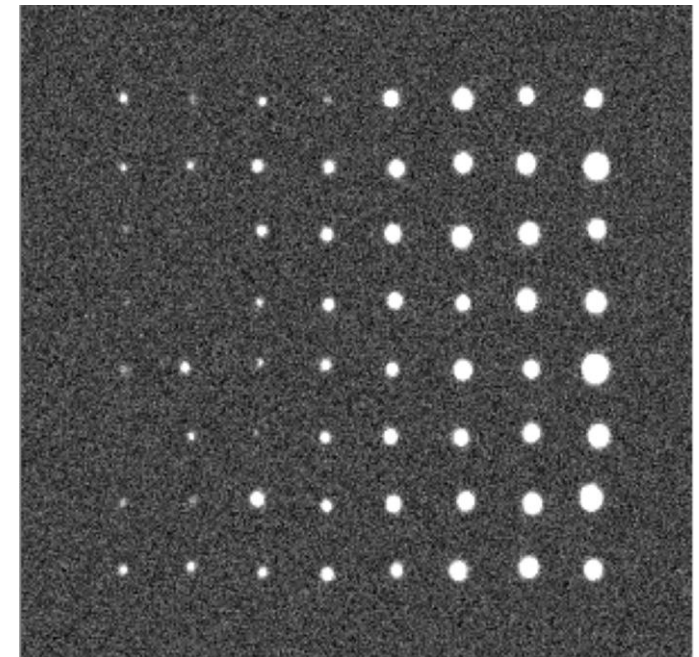
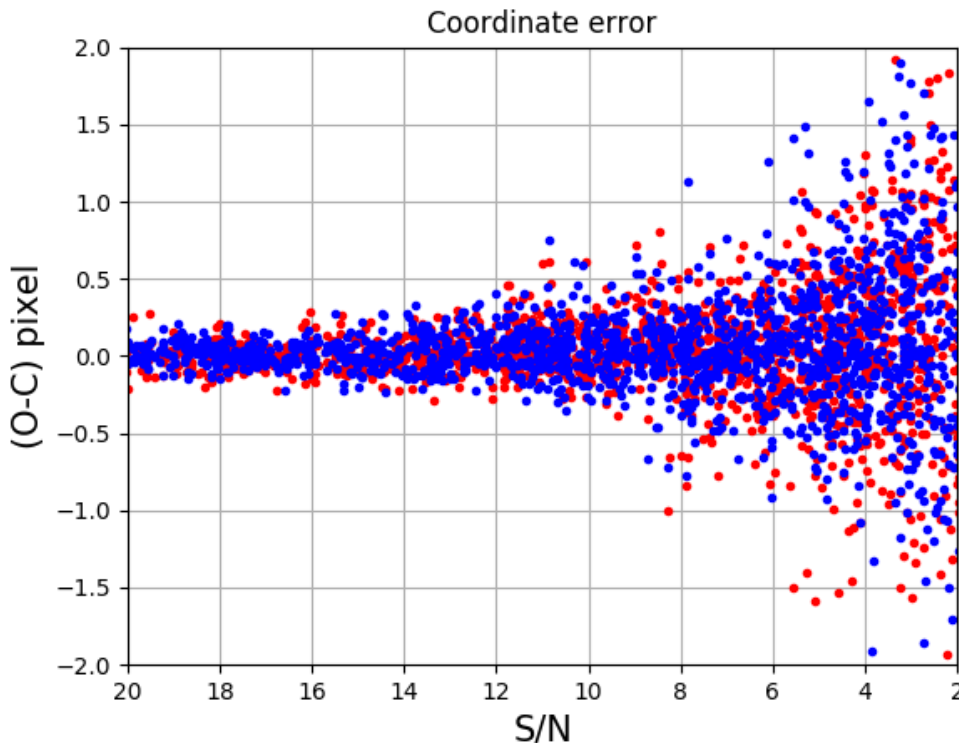
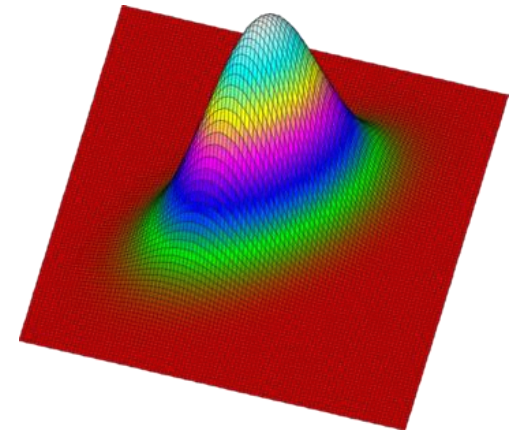
- 1) Запрос в NASA Horizons, вычисление X-Y астероида.
- 2) Запрос в Vizier, получение опорного каталога.
- 3) Определение ближайшей к объекту звезды из каталога (полезно при дальнейшем анализе).
- 4) Определение аналитической PSF по звездам с высоким С/Ш.
- 5) Измерение положений и блеска опорных звезд.
- 6) Поиск астрометрического решения (XY -> RaDec)
- 7) Измерение положения и блеска объекта.
- 8) Вычисление экваториальных координат и приведение блеска объекта к каталогу.
- 9) Детрендинг (опционно).
- 10) Сохранение результатов.

Время обработки ~ 5-30 секунд.



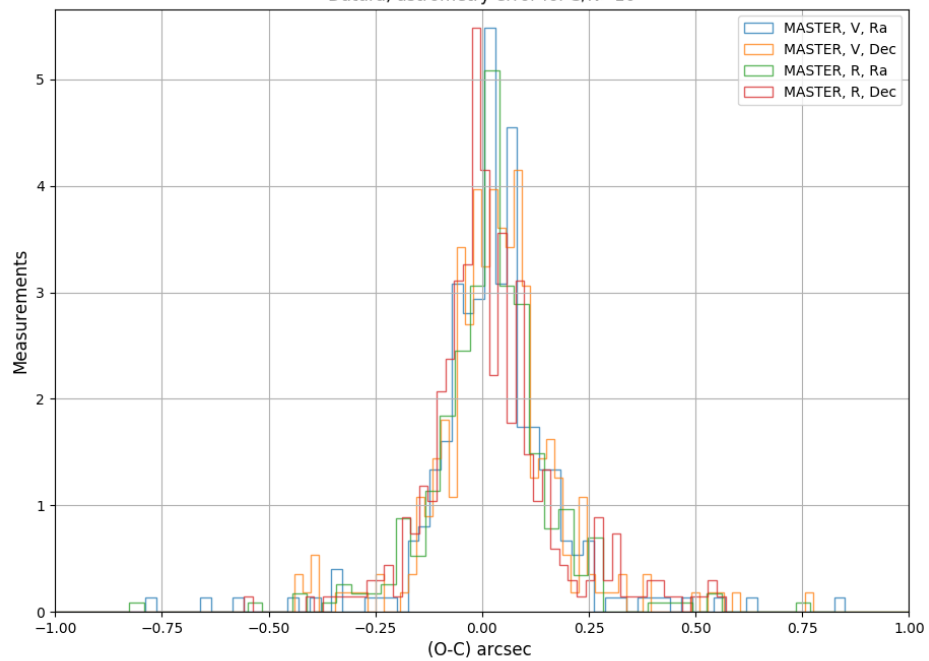
Почти как экзопланеты

- 1) Для аналитического описания PSF использована эллиптическая функция Моффата.
- 2) При измерении положений используется PSF, определенная по звездам с высоким С/Ш.
- 3) Для астрометрии и относительной фотометрии используется локальный ансамбль опорных звезд ($R \sim 15'$).
- 4) Возможность фотометрии с оптимальной для каждого кадра апертурой.
- 5) Робастный алгоритм оценки локального фона неба.

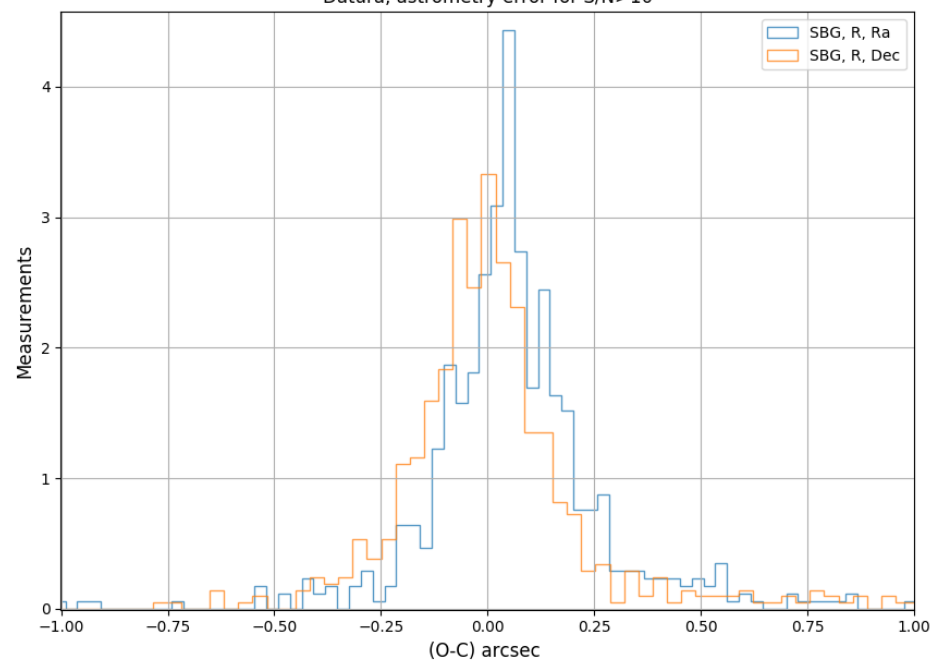


$\sigma < 0.1 \text{ pix.}$ для $S/N > 15$

Datura, astrometry error for S/N>10

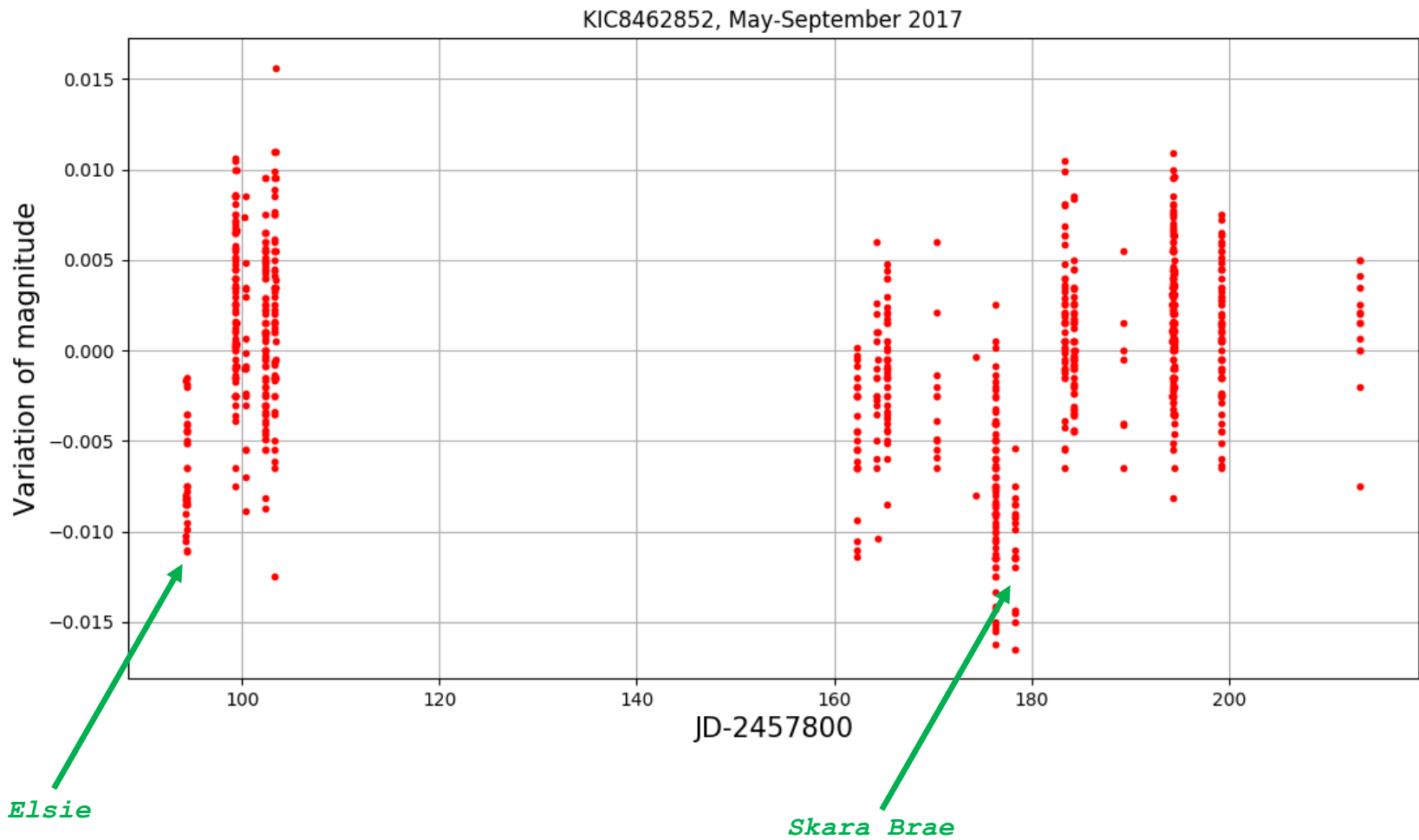


Datura, astrometry error for S/N>10



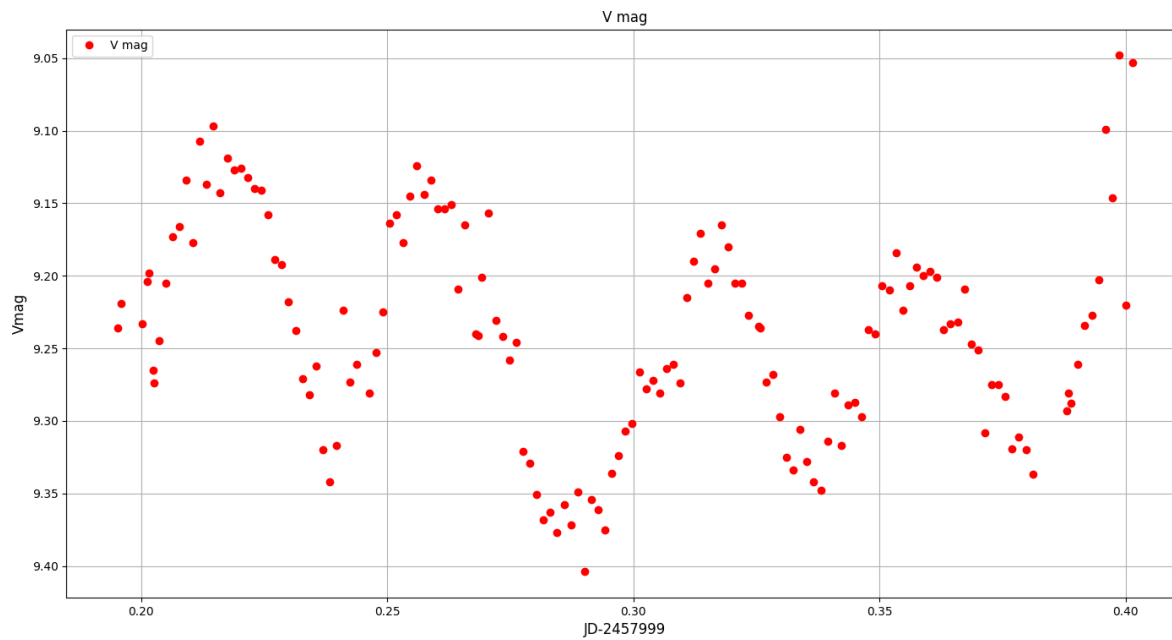
Тестирование качества фотометрии

Фотометрия объекта KIC8462852 (звезда Табби)*
 $\sigma \sim 0.0016\text{--}0.003 \text{ mag}$



* Tabetha S. Boyajian, et. al. The First Post-Kepler Brightness Dips of KIC 8462852. The Astrophysical Journal Letters, Volume 853, Issue 1, article id. L8, 14 pp. (2018).

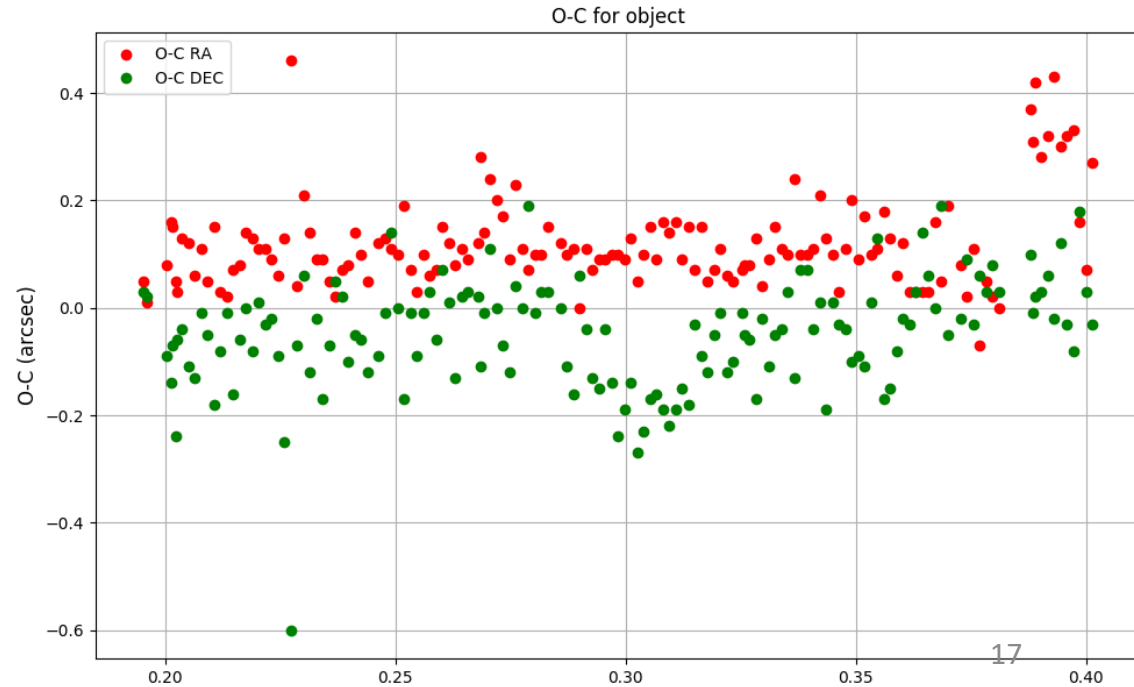
Первый астероид.



3122 Florence.



Это не наша картинка!

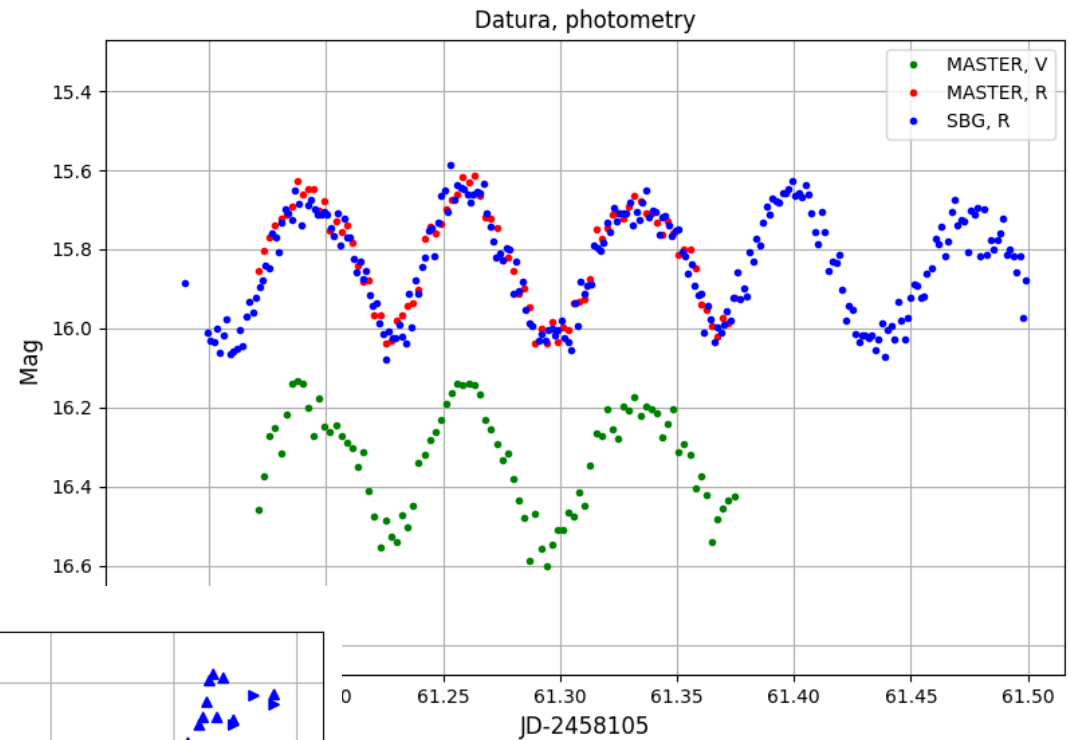
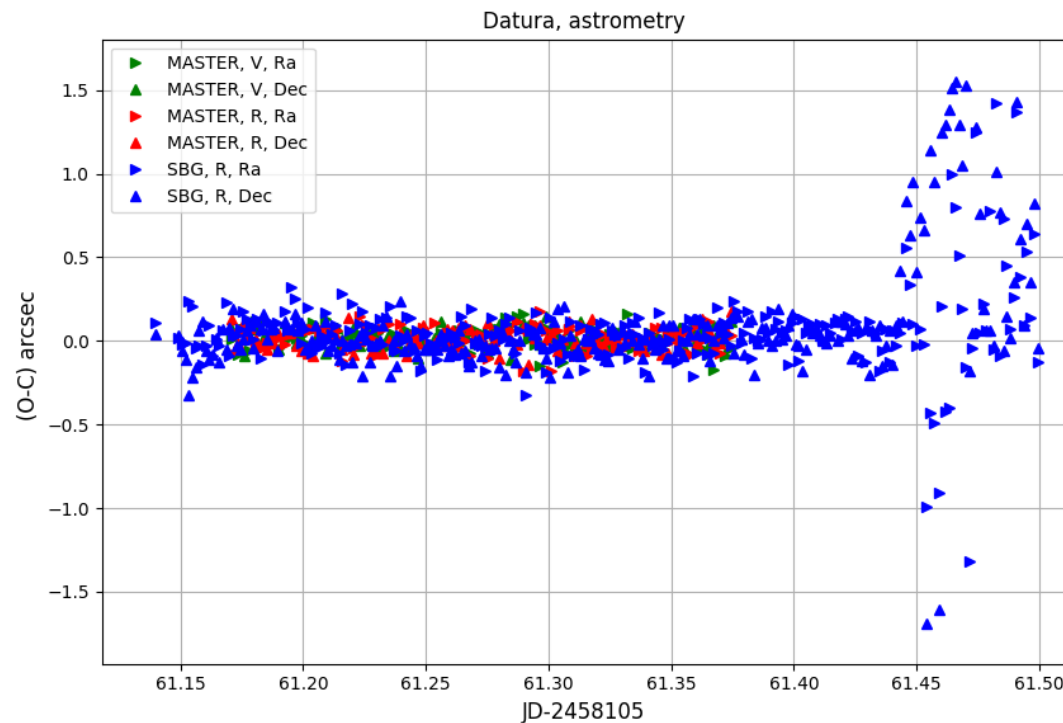


Результаты проекта в 2017-2018 гг

Астероиды:

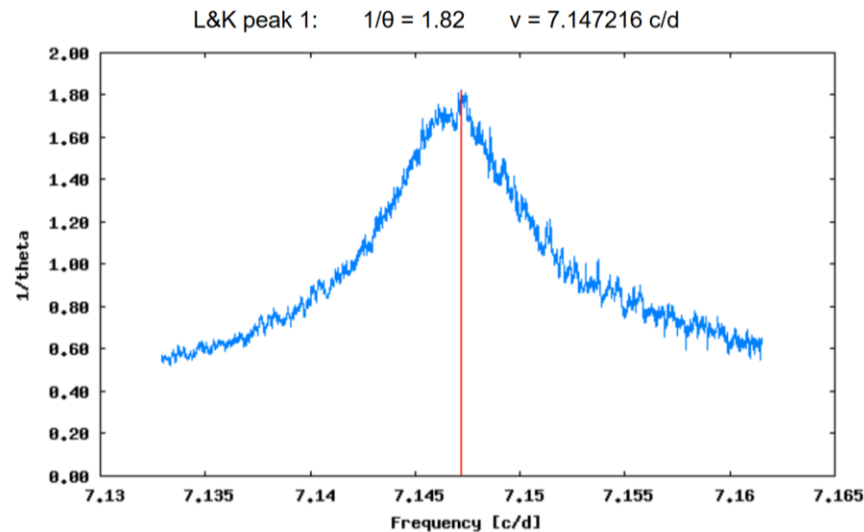
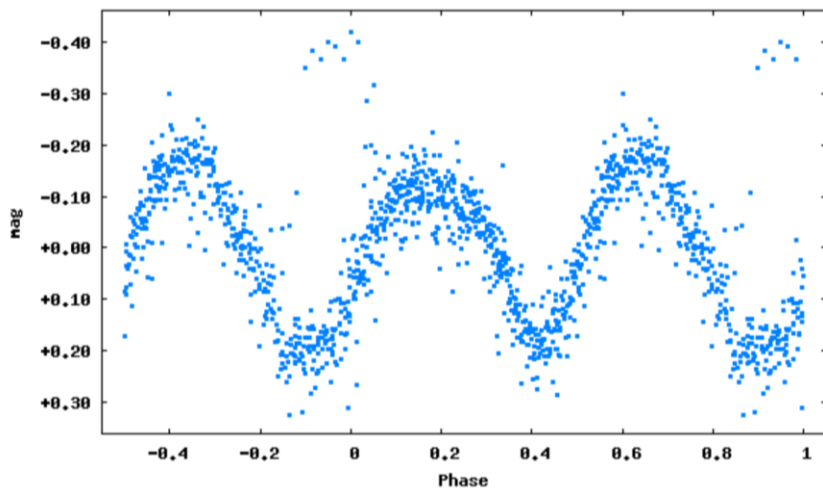
- (28816) Kimneville
- (1270) Datura
- (85834) 1998 XM74
- (6070) Rheinland,
- (8008) 1988 TQ4
- (56048) 1998 XV39
- (34081) 2000 PH1

Всего около 1500 измерений.



Определение периода вращения

$$JD_{\max} = 2458168.12809 + 0.1399146 \times E$$



Name	Synodic period [hour]	Error [hour]	Reference	Siderial period [hour]	Reference
(1270) Datura	3.3579	0.0007	KASPAR (after opposition)	3.358100	(Vokrouhlicky et al. A&A. 2009) Prograde rotation is preferred solution
(85834) 1998 XM74	2.8562	0.0074	KASPAR (after opposition)	2.857 ± 0.0003	(Waszczak et al. AJ. 2015)

Проблемы

Все плохо для $C/\text{Ш} < 10$, это соответствует объектам $\sim 17^m$ для Master и SBG.

- Использование RoboPhot для фотометрии
- Синтетический трекинг
- Использование общедоступных данных
- Сотрудничество с другими обсерваториями

Кадровый голод.

- Надежда на студентов и аспирантов