

# Опыт поиска экзопланет в рамках любительской астрономии

Иван Терентьев

Петрозаводск, 2024

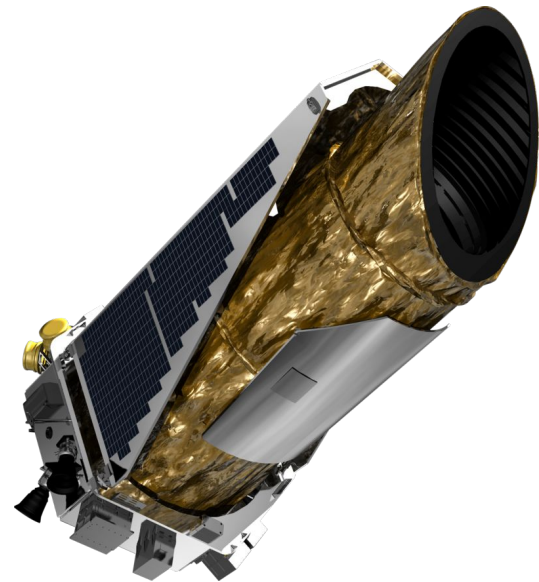
# Телескоп Кеплер

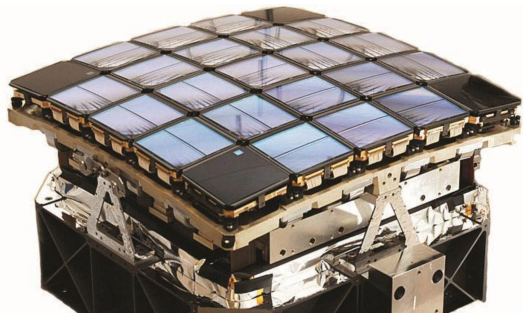
«Кеплер» — космическая обсерватория НАСА, орбитальный телескоп со сверхчувствительным фотометром, специально предназначенный для поиска экзопланет (планет вне Солнечной системы — у других звёзд), подобных Земле. Это первый космический аппарат, созданный с такой целью.

Он назван в честь Иоганна Кеплера, открывшего законы движения планет.

Запущен **6 марта 2009 года**

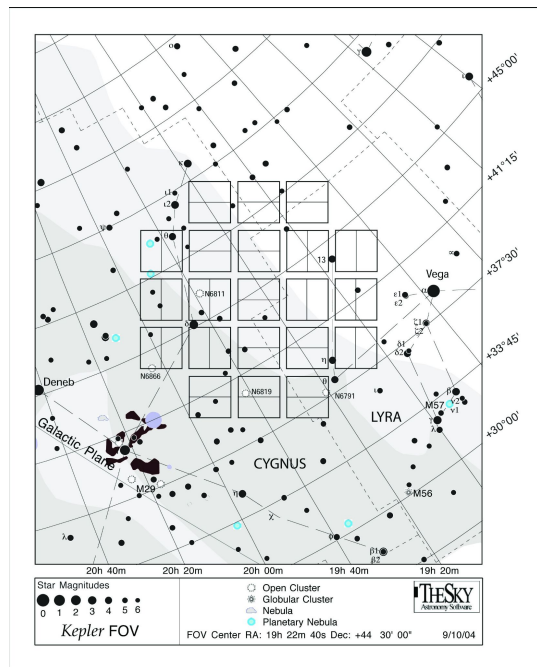
Основная программа была рассчитана на **3,5 года**



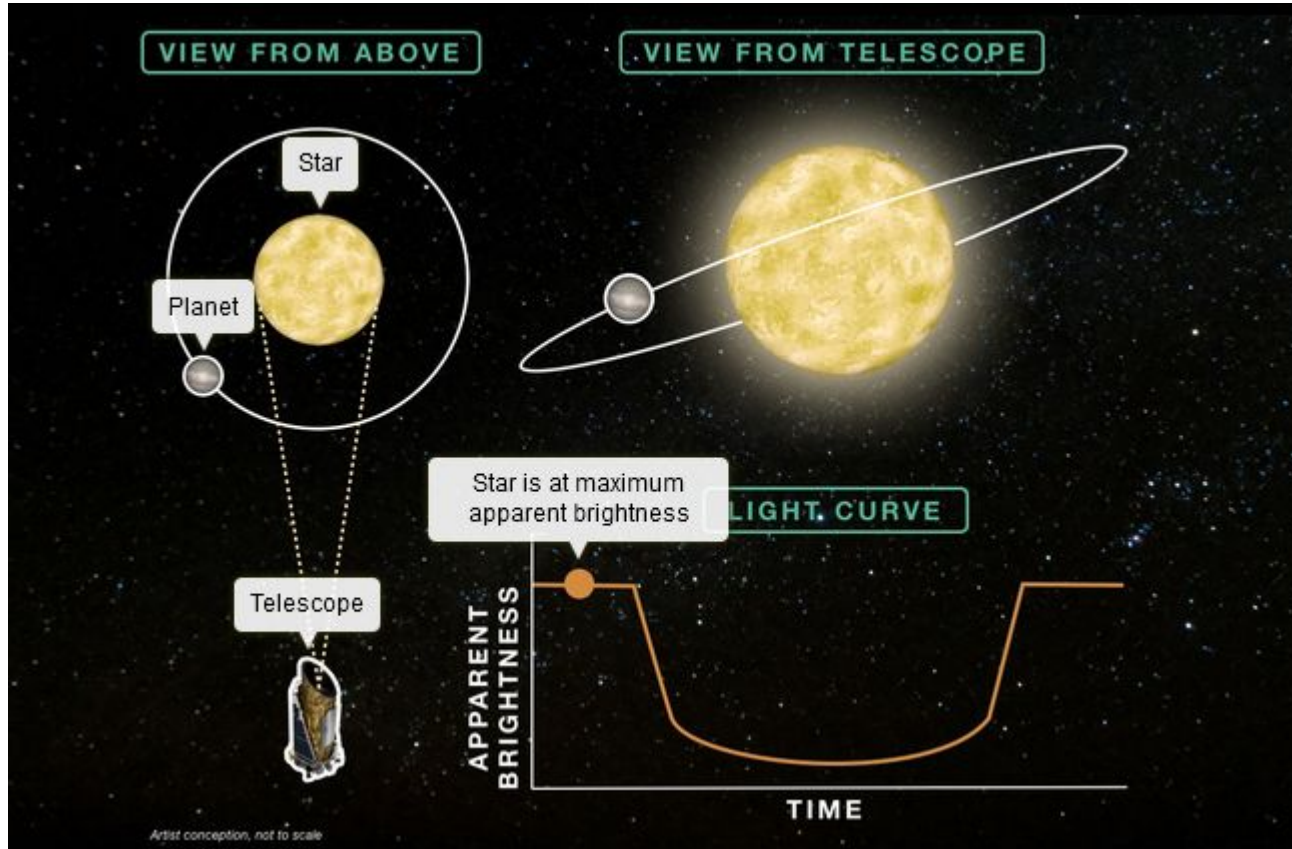


# Миссия Кеплер

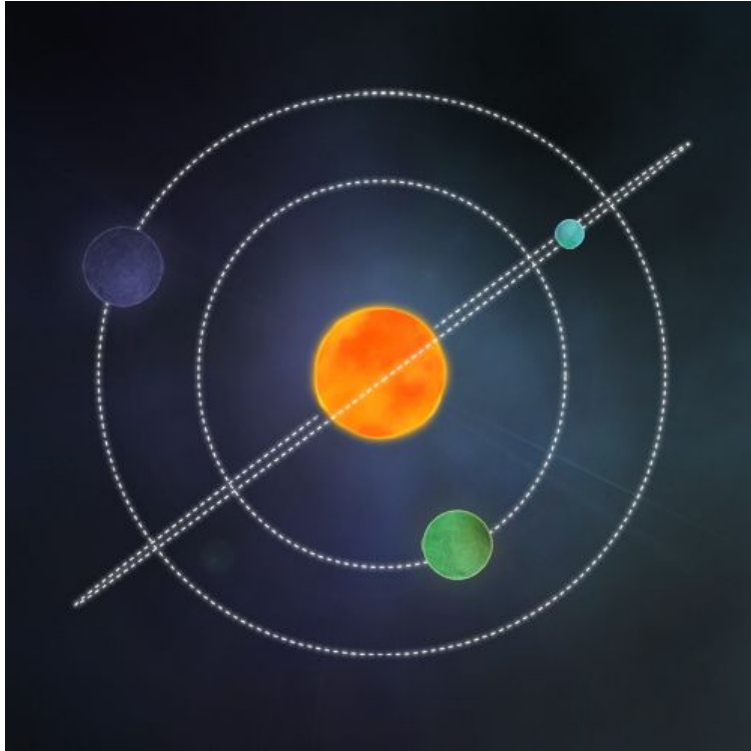
42 ПЗС-матриц с общим разрешением  
в 95 мегапикселей для проведения исследований  
В поле зрения ~150 000 звезд



# Примеры транзитов



# Проект Planet Hunters



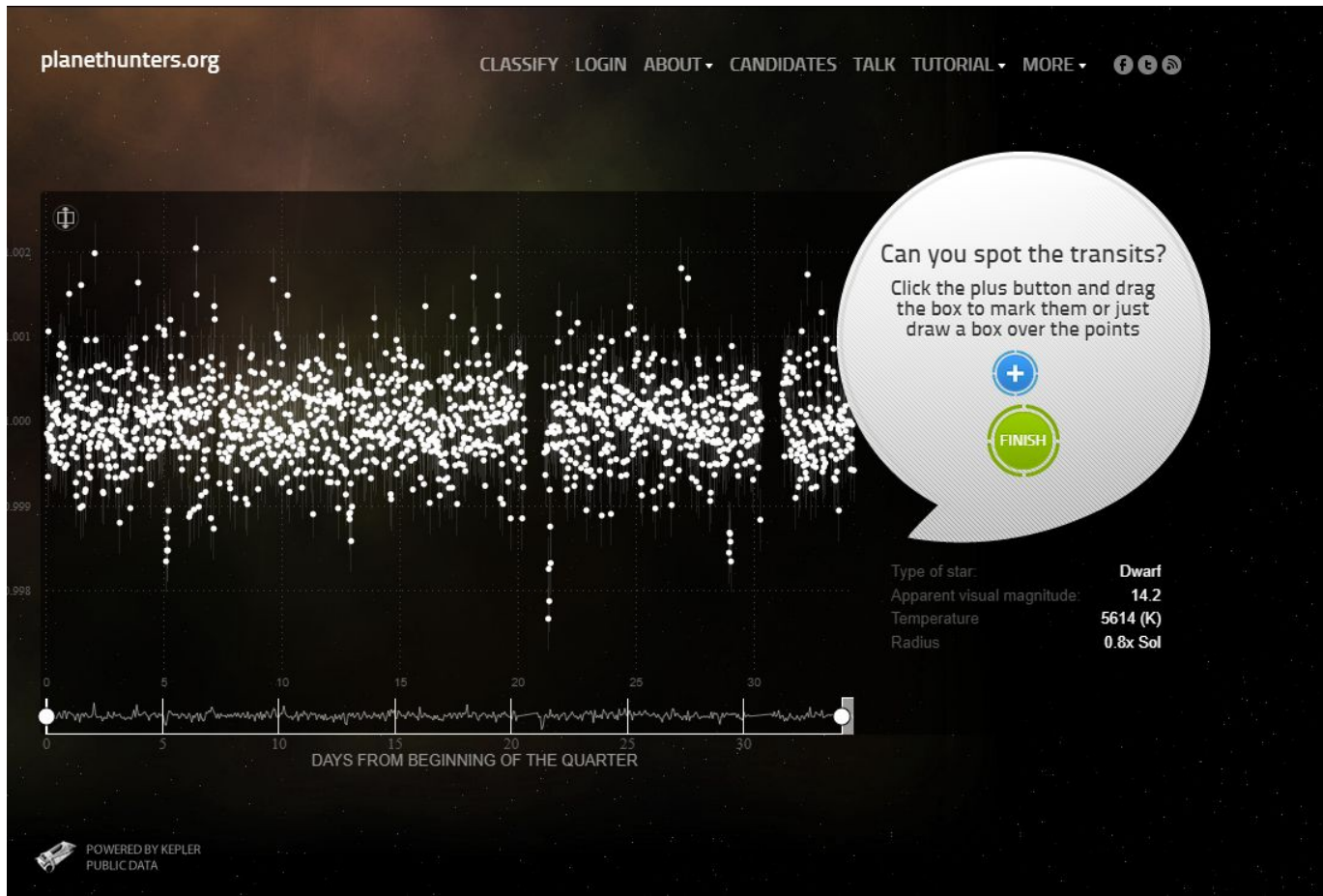
Запущен 16 декабря 2010 года

**Цель:** поиск экзопланет с привлечением волонтеров, методом визуального осмотра кривой блеска

**Руководитель проекта:** Дебра Фишер - профессор астрономии в Йельском университете

Спустя ~полгода после того как первые данные с телескопа стали для широкой публики

# Основной интерфейс



# Форум проекта

Planet Hunters is part of the ZOO NIVERSE ...just like MOON ZOO

## Planet Hunters Talk

- Home
- Boards
- Account 0
  - Profile
  - Messages
  - Log Out
- Return to Planet Hunters

Browse  
Search  
Tutorial

Help  
Science  
Chat

Recent | **Trending**

### RECENT OBJECTS

733370579

0 collections  
0 mentions

### RECENT COLLECTIONS

S0007j2

1 object

### FEATURED

# Chat

Welcome to Planet Hunters

### INTERESTING OBJECTS




S0007j1

1 object

## RECENT DISCUSSIONS

Updated  Including posts by

Object: [APH10097329](#)

 1 user  1 comment  1 new comment



[last post about 3 hours ago by pfruti](#)

Object: [APH10106653](#)

 2 users  6 comments  6 new comments

[last post about 3 hours ago by arralen](#)


Object: [APH10036453](#)

 2 users  2 comments  2 new comments

[last post about 3 hours ago by Revelation](#)

Chat: [Welcome to Planet Hunters](#)

[started by Kevin](#)

 81 users  122 comments  1 new comment

[last post about 3 hours ago by mtcvmepp](#)

Object: [APH10132659](#)

 1 user  2 comments  2 new comments

[last post about 3 hours ago by salgado](#)

Object: [APH10124959](#)

 1 user  2 comments  2 new comments




[last post about 3 hours ago by salgado](#)

Object: [APH10016027](#)

 2 users  4 comments  4 new comments

[last post about 3 hours ago by arralen](#)

Object: [APH10147949](#)

 1 user  2 comments  2 new comments

[last post about 3 hours ago by salgado](#)

[← Newer](#)

Page 8 of 69

[Older →](#)



# Волонтеры - главная причина успеха проекта

Деятельность включала:

- **Мониторинг форума** на наличие потенциально интересных объектов
- **Коллекционирование различных объектов:** кандидатов в экзопланеты, создание каталога неизвестных ( на тот момент) двойных затменных звезд, кратных звездных систем, переменных звезд (GDOR, RR lyr)
- **Базовая фильтрация** кандидатов в экзопланеты
- **Активная помощь** научной команде стоящей за проектом и работа с другими учеными

# Волонтеры



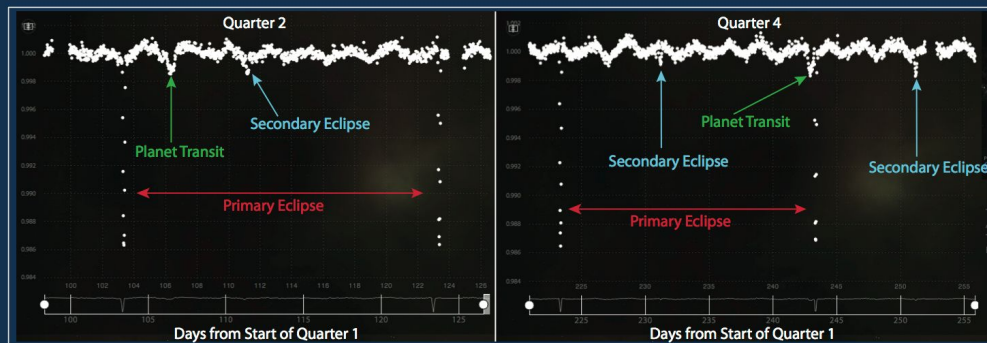
Киан Ин Йек

Томас Джейкобсон

Дэрил Лакурс

# Kepler-64b aka PH1b

## Transits spotted in *Kepler* light curve of eclipsing binary KIC 4862625



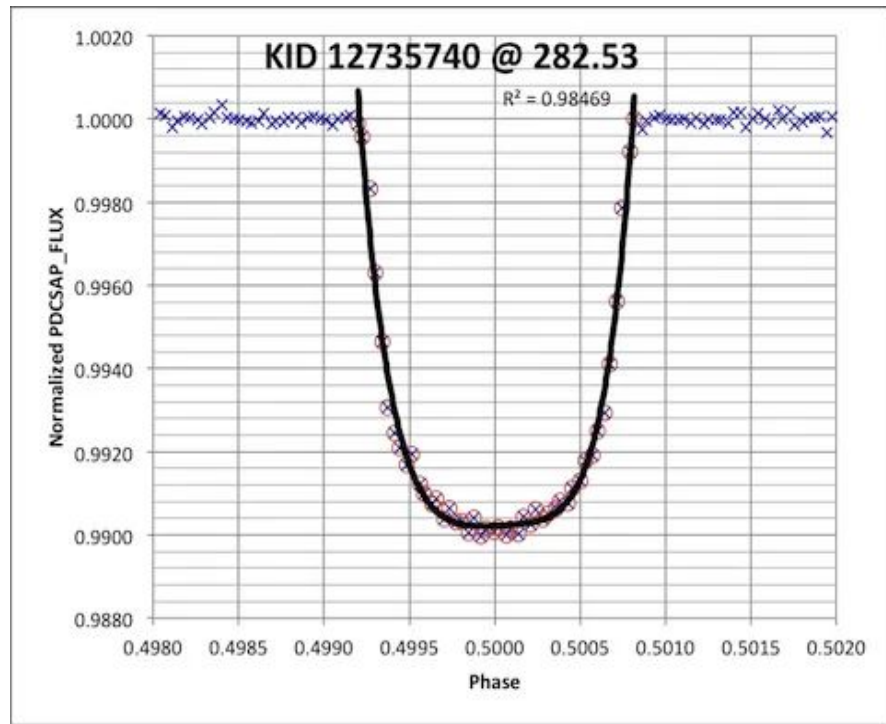
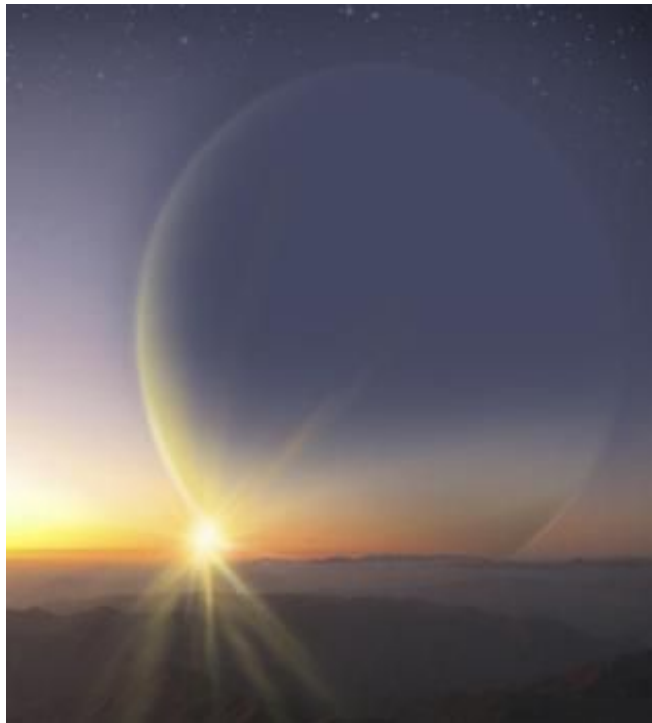
Robert Gagliano



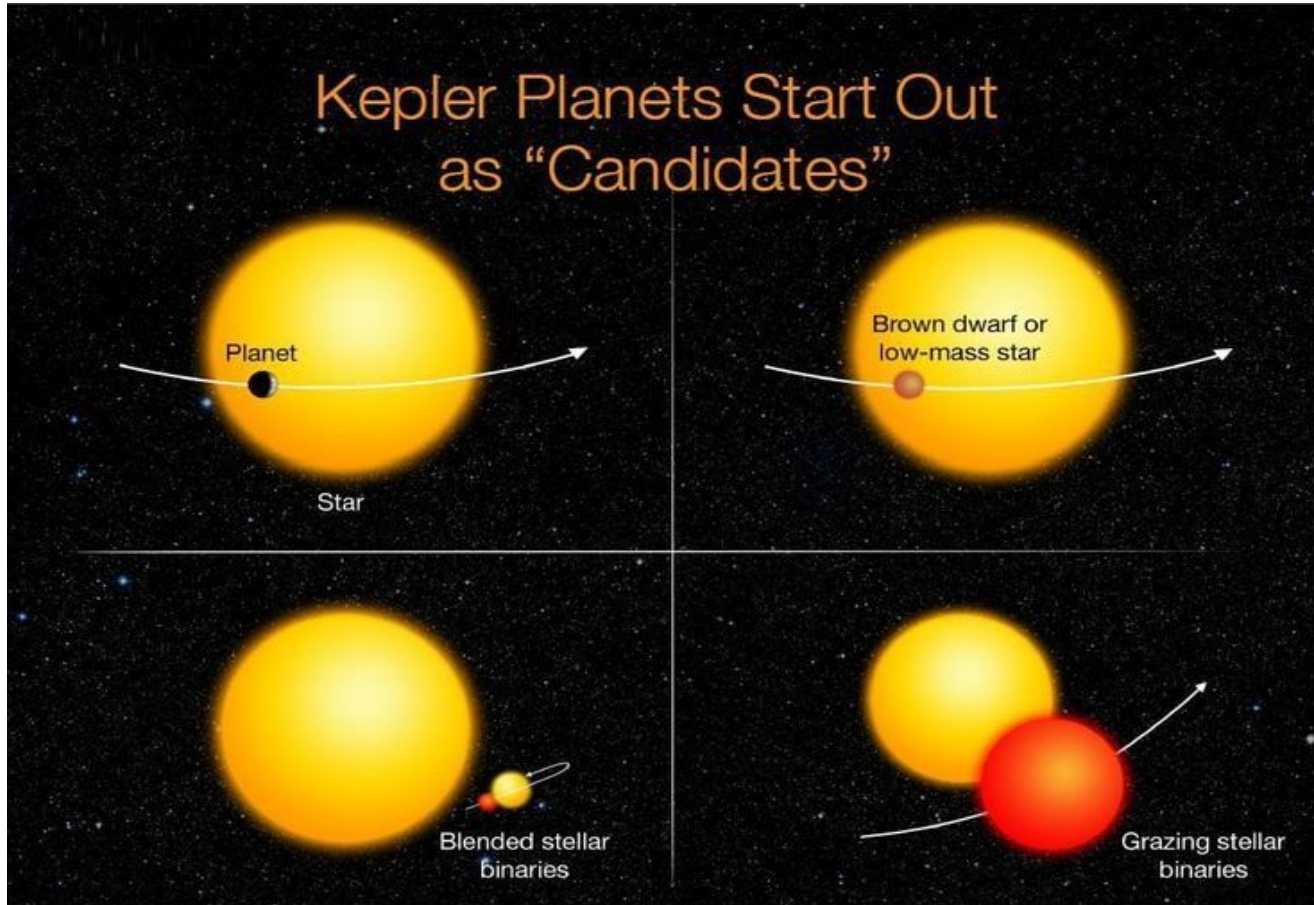
Kian Jek



# PH - 2b



# Главный вопрос: природа транзитного сигнала



# Размер объекта

---

For the light curve of a planetary transit,

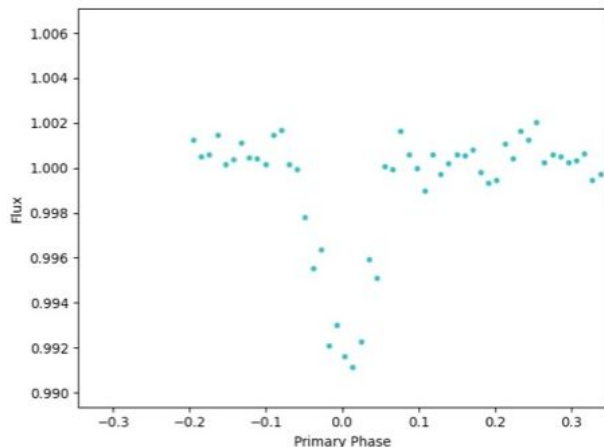
$$\left( \frac{\text{Radius of planet}}{\text{Radius of star}} \right)^2 = \text{Transit depth (in decimals)}$$

Given a light curve,

1. We assume it is caused by a planetary transit.
2. Check the radius of the star in the subject metadata ('i' icon), this is  $R_s$ .
3. Find the depth of the dip, which is the transit depth.
4. Find  $\frac{R_p}{R_s}$  by square-rooting transit depth.
5. Find  $R_p$  with  $\frac{R_p}{R_s} \times R_s$ .
6. Exoplanets should not be larger than  $\sim 0.3$  Solar radius, thus conclude if it is possibly a planet

# Пример

Example:



1. Assume it is caused by a planetary transit,
2. From metadata,  $R_s = 1.49 \text{ Solar radius}$
3.  $\text{Transit depth} = 1.000 - 0.992 = 0.008$
4.  $\frac{R_p}{R_s} = \sqrt{0.008} = 0.08944$
5.  $R_p = 0.08944 \times 1.49 = 0.133 \text{ Solar radius}$
6. Conclude: possible transit.

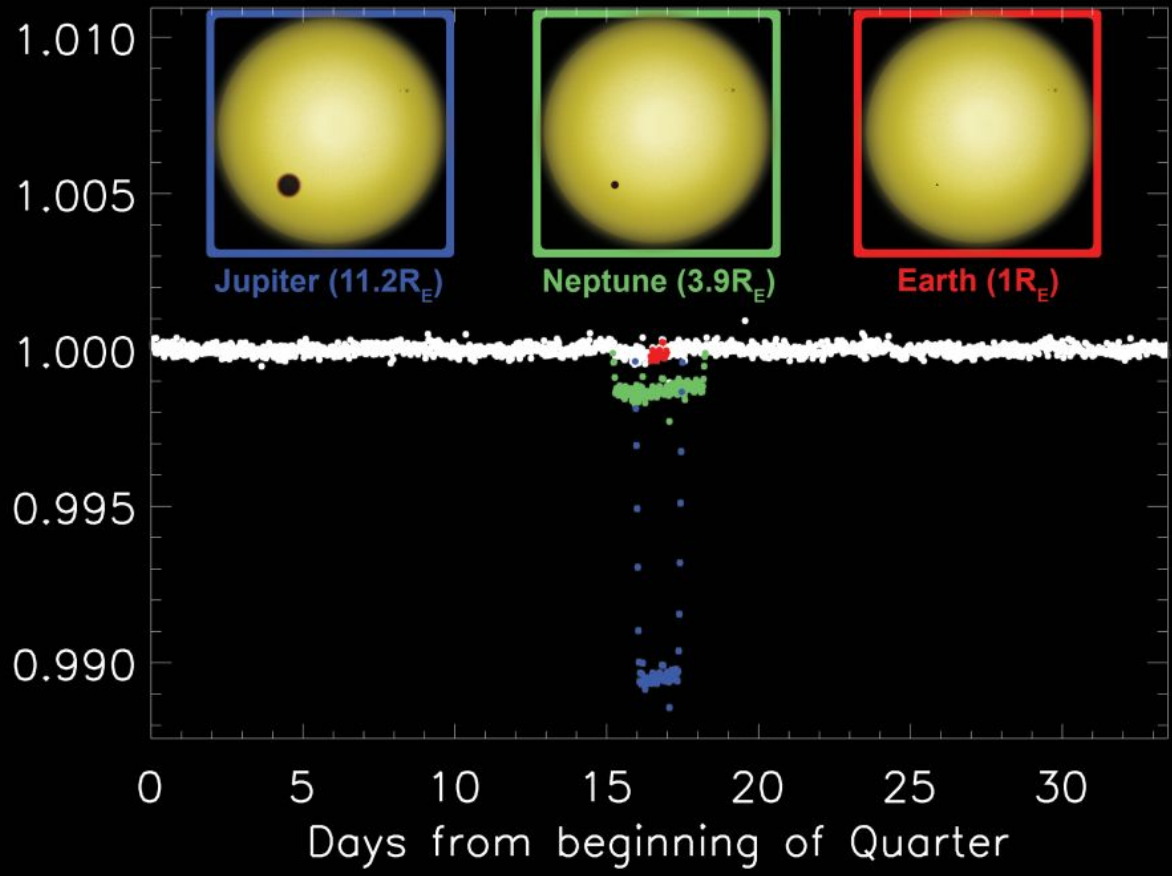
Other units:

$R_p \text{ in Jupiter Radius} = R_p \text{ in Solar Radius} \times 9.73$

$R_p \text{ in Earth Radius} = R_p \text{ in Solar Radius} \times 109$

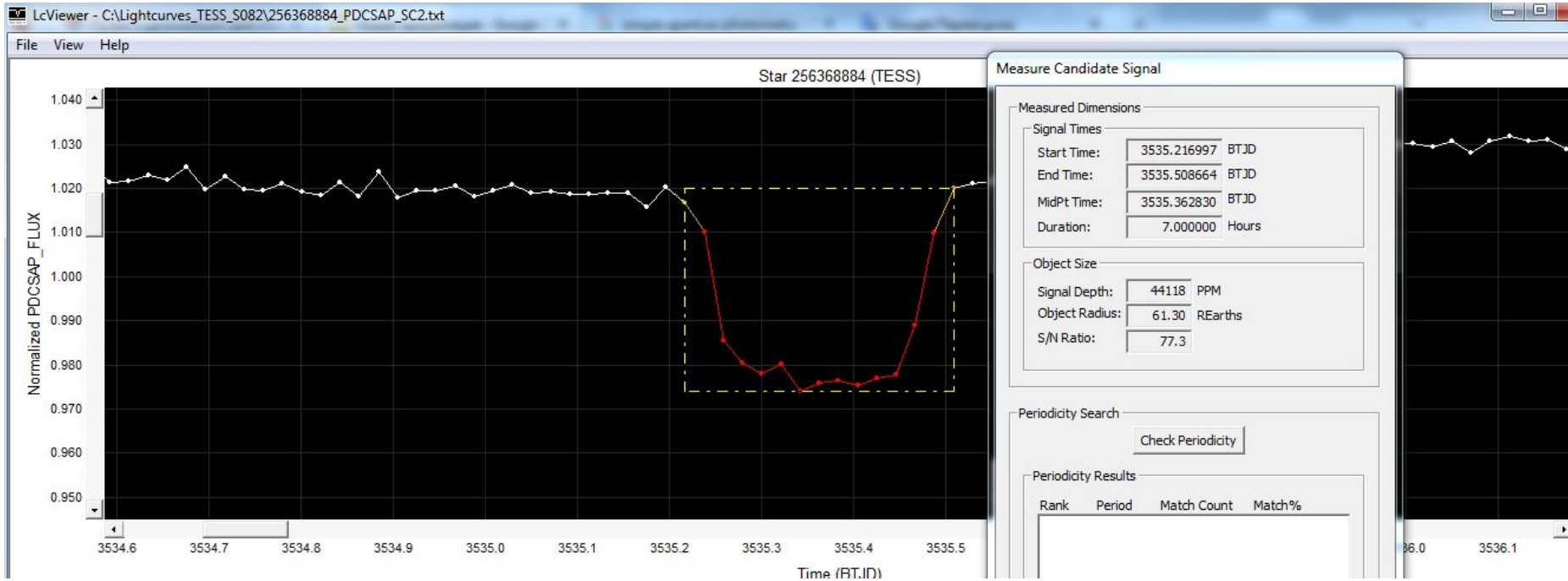
---

This serves as a guide to picking out the possible candidates for those interested. Note: 1. This assumes ideal conditions. In reality the transit depth may be affected by other astrophysical contaminations etc which may affect the calculation for the radius of the planet. 2. This check is not conclusive, the dip may still be caused by other reasons.

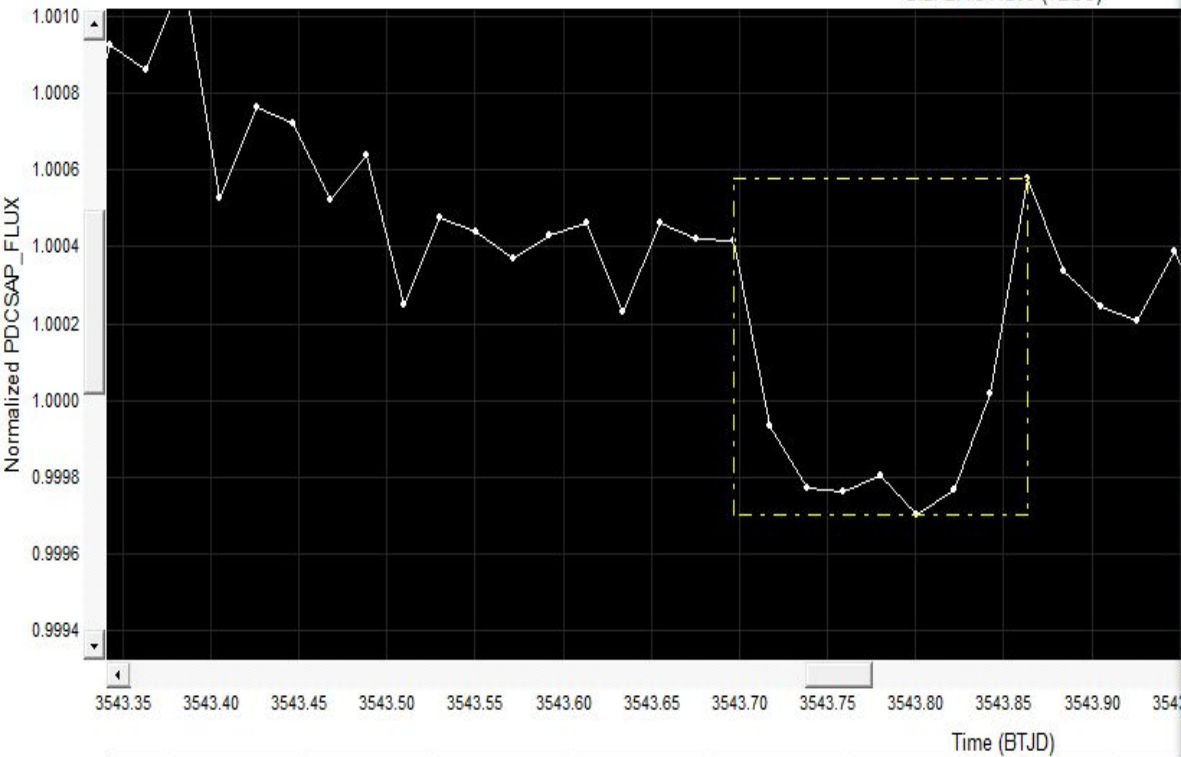




# В реальности...



Star 277511298 (TESS)



Measure Candidate Signal

Measured Dimensions

Signal Times

Start Time:	3543.696654	BTJD
End Time:	3543.863320	BTJD
MidPt Time:	3543.779987	BTJD
Duration:	4.000000	Hours

Object Size

Signal Depth:	816	PPM
Object Radius:	326.23	REarths
S/N Ratio:	16.2	

Periodicity Search

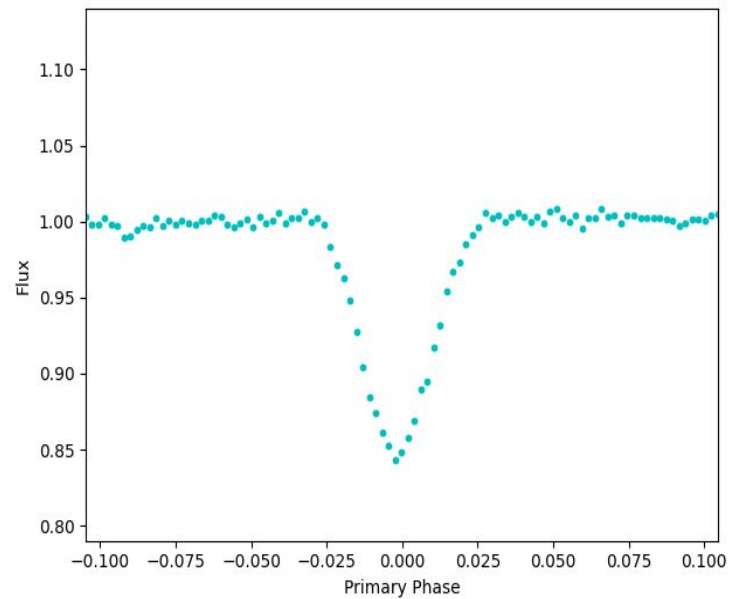
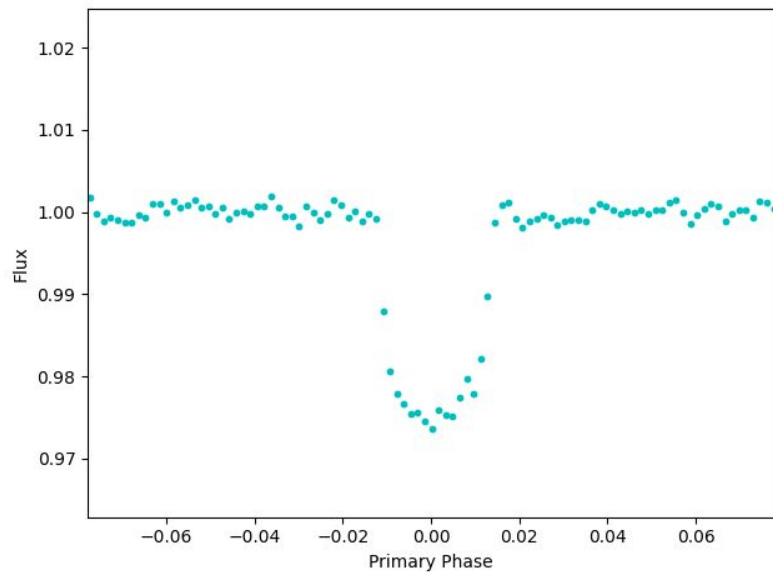
Periodicity Results

Rank	Period	Match Count	Match%

Stellar Properties

Star ID:	277511298
Mag:	8.5
Temp:	3343 K
Radius:	104.775 Sols
Mass:	N/A Sols
Distance:	1478.52 Parsecs
RA:	310.974248 Degrees
Dec:	57.499699 Degrees
Metallicity:	N/A

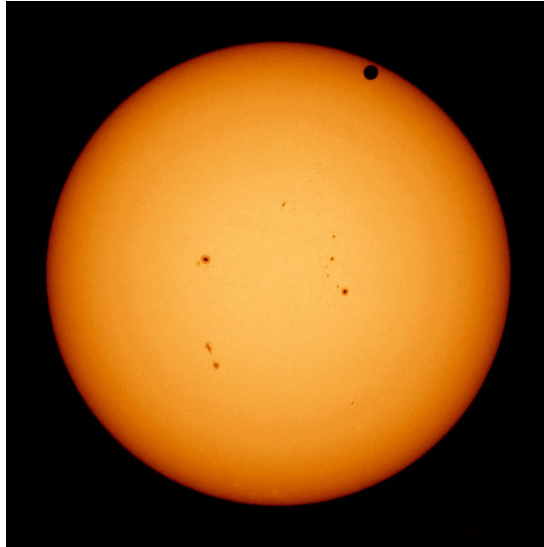
# U-образный транзит vs V-образный транзит



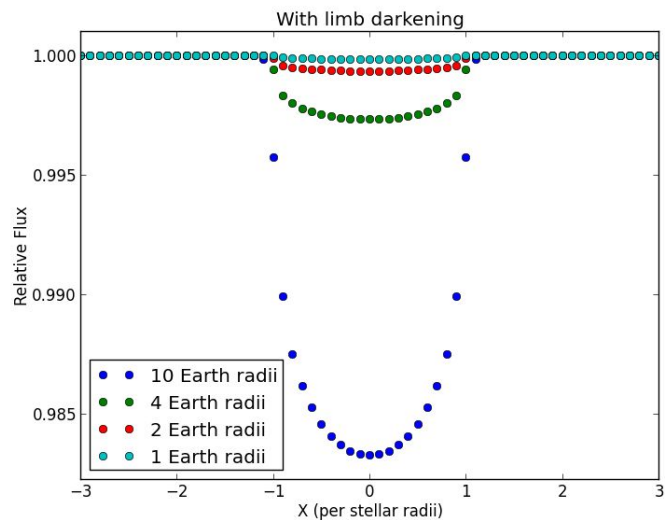
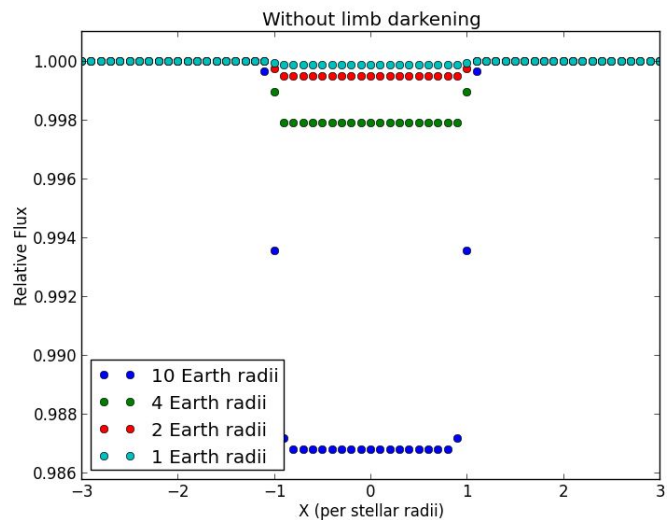
# Факторы влияющие на форму транзита

# Потемнение диска к краю

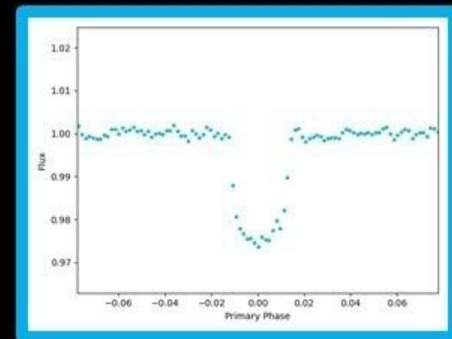
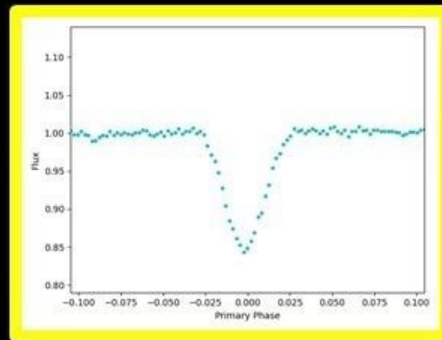
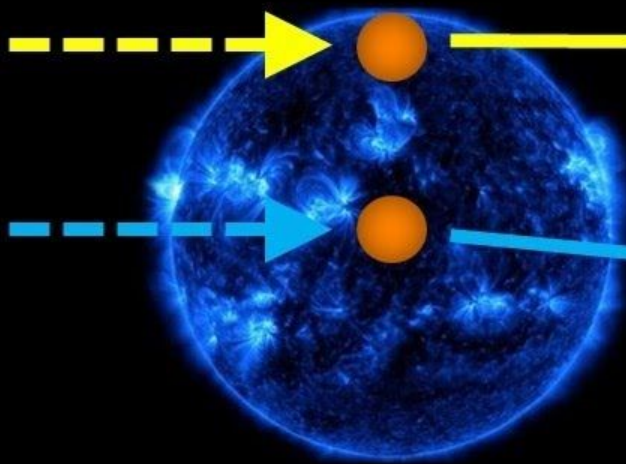
Оптический эффект при наблюдении звёзд, включая Солнце, при котором центральная часть диска звезды кажется ярче, чем край или лимб диска.



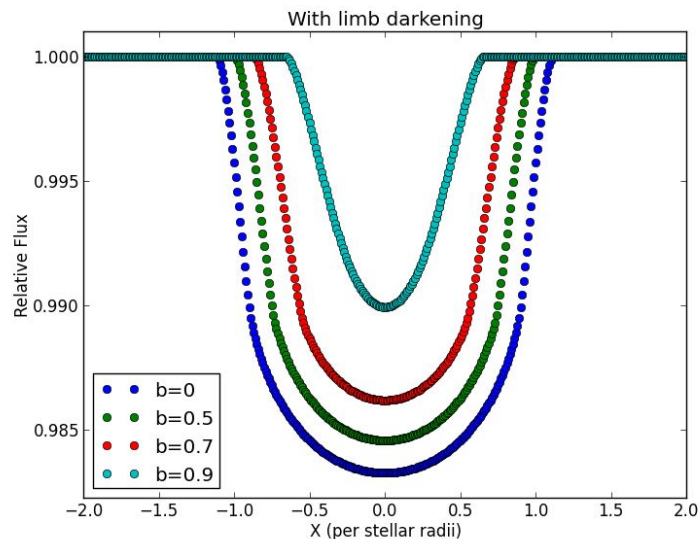
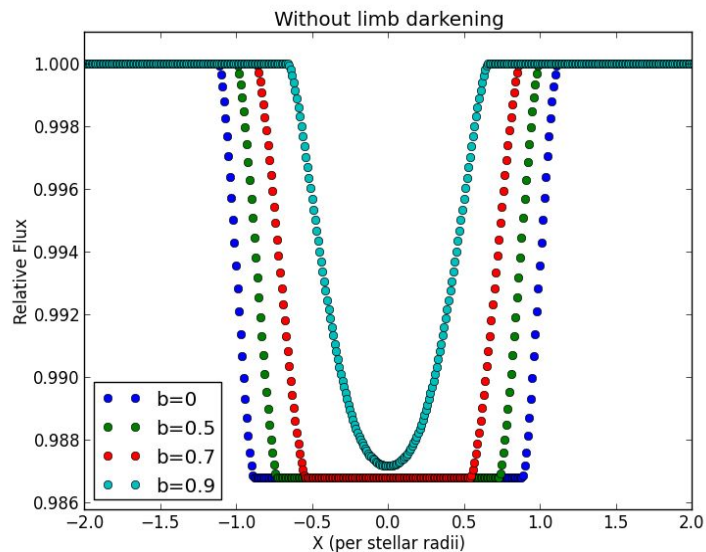
# Влияние затемнения к краю на транзит



# IMPACT PARAMETER: INCLINATION OF A TRANSITING EXOPLANET

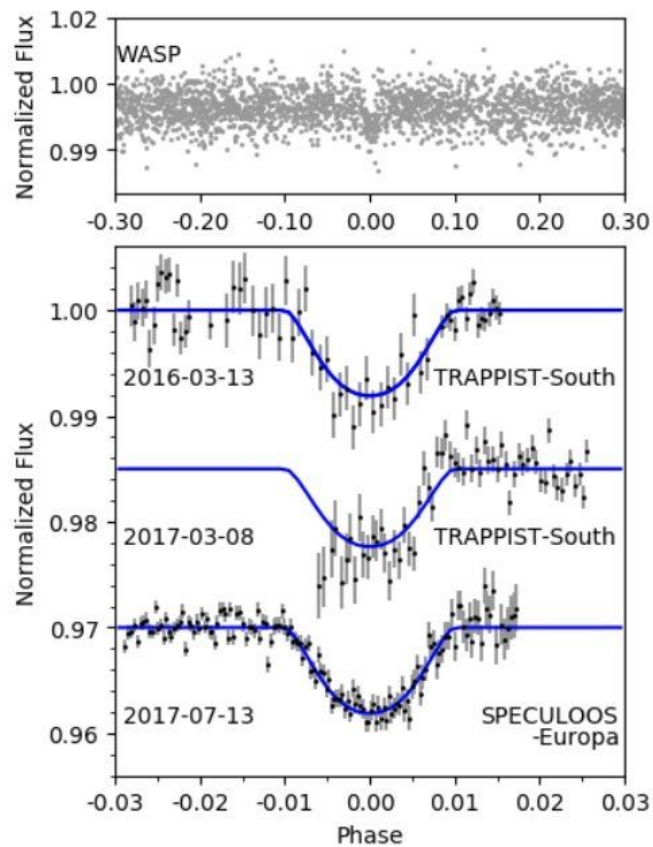


# Влияние расстояния от центра звезды



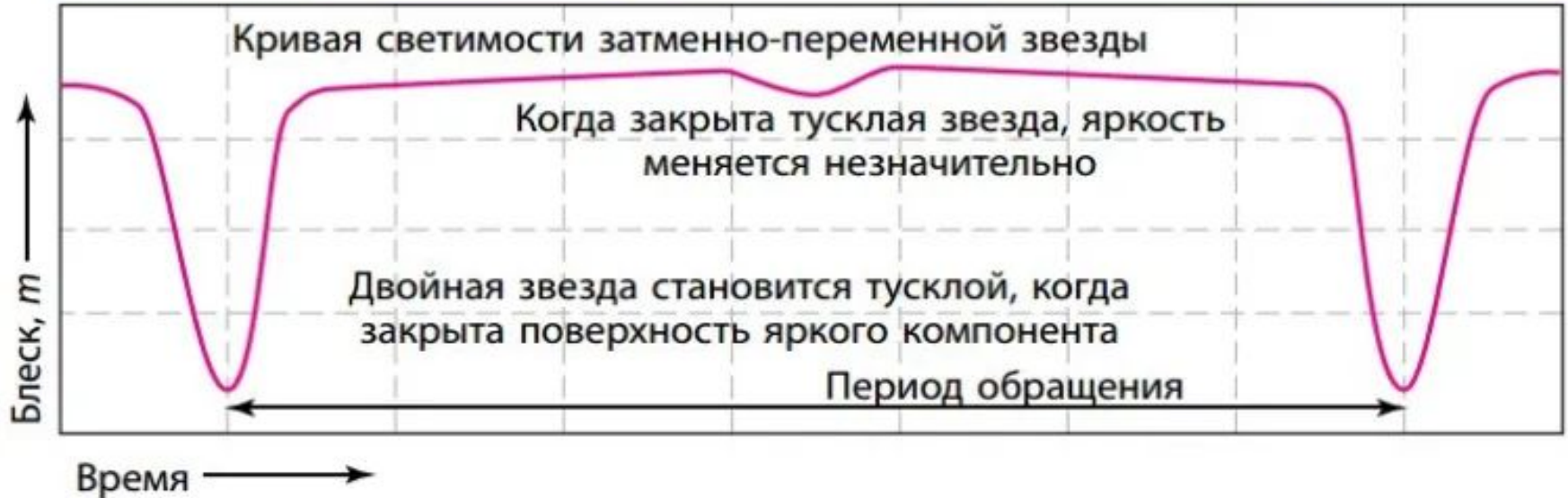


# WASP-174b планета с V-образным транзитом

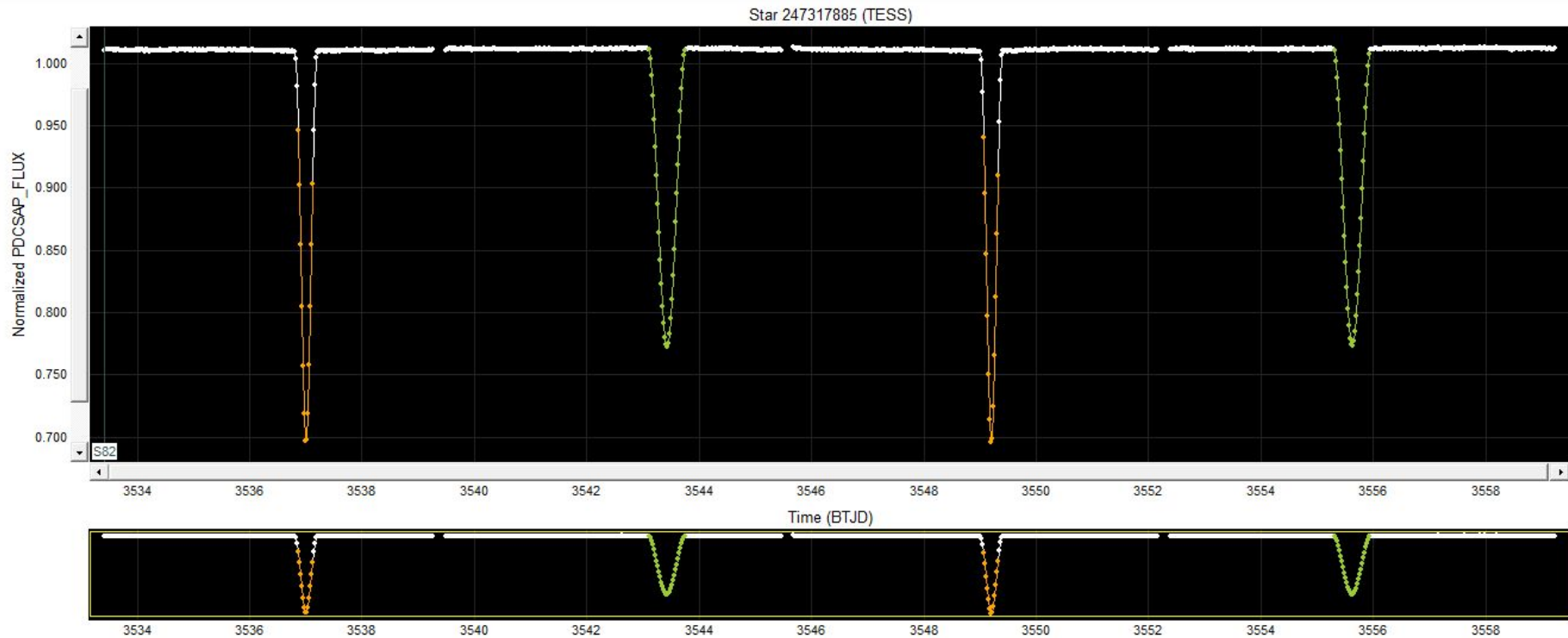


# Двойные затменные звезды

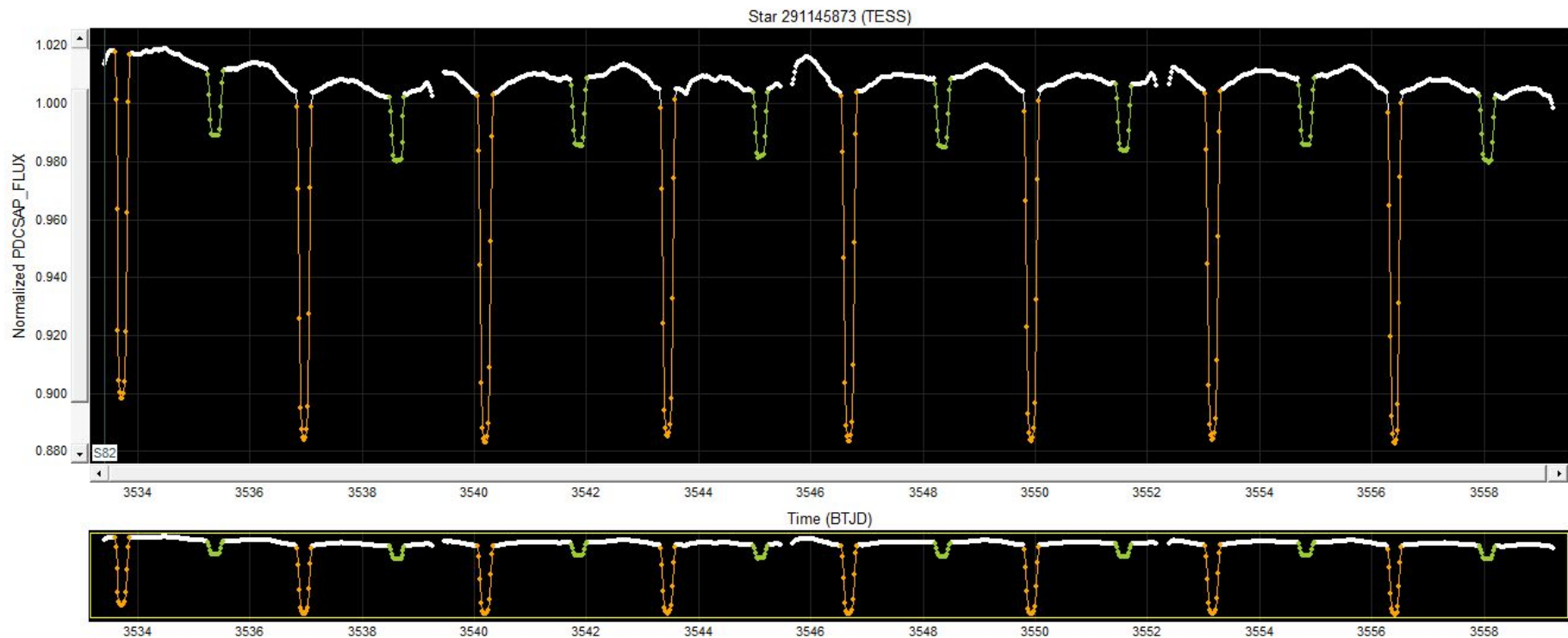
# Двойные затменные звезды



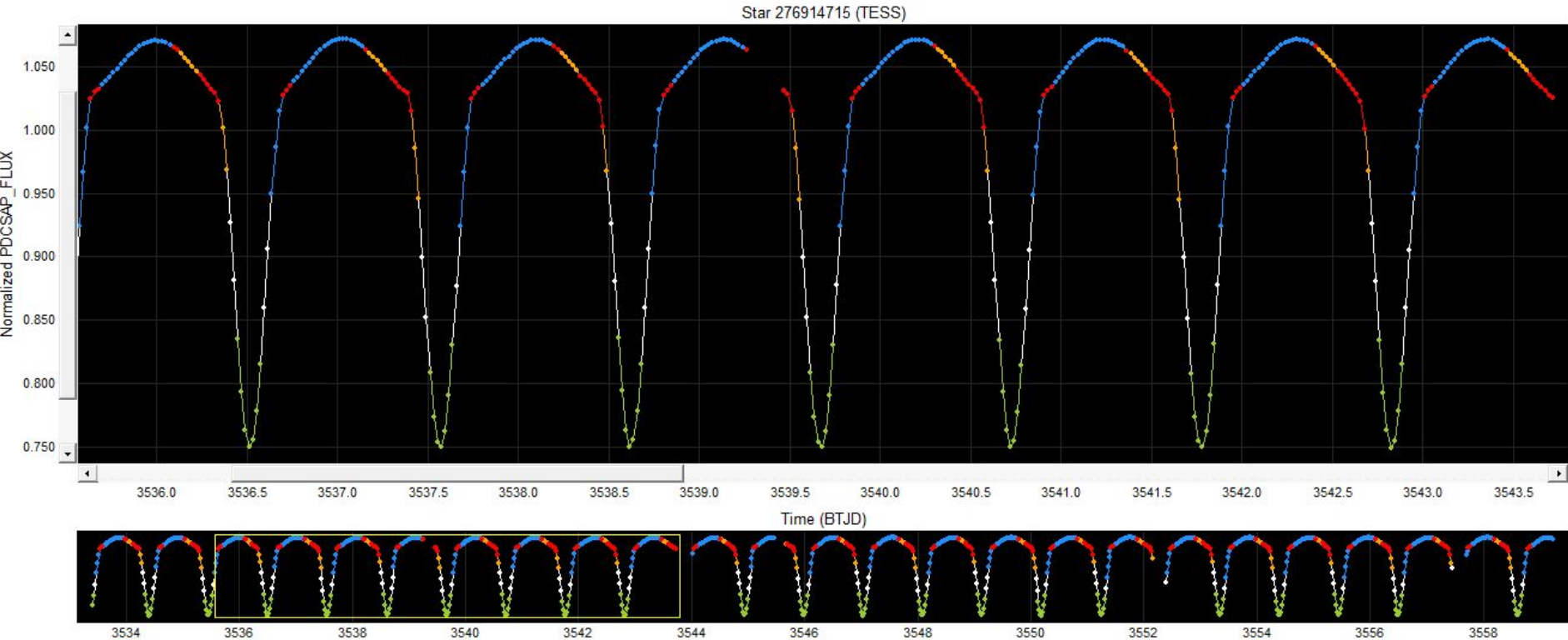
# Реальный пример с TESS звезда TIC 247317885



# Реальный пример с TESS звезда TIC 291145873

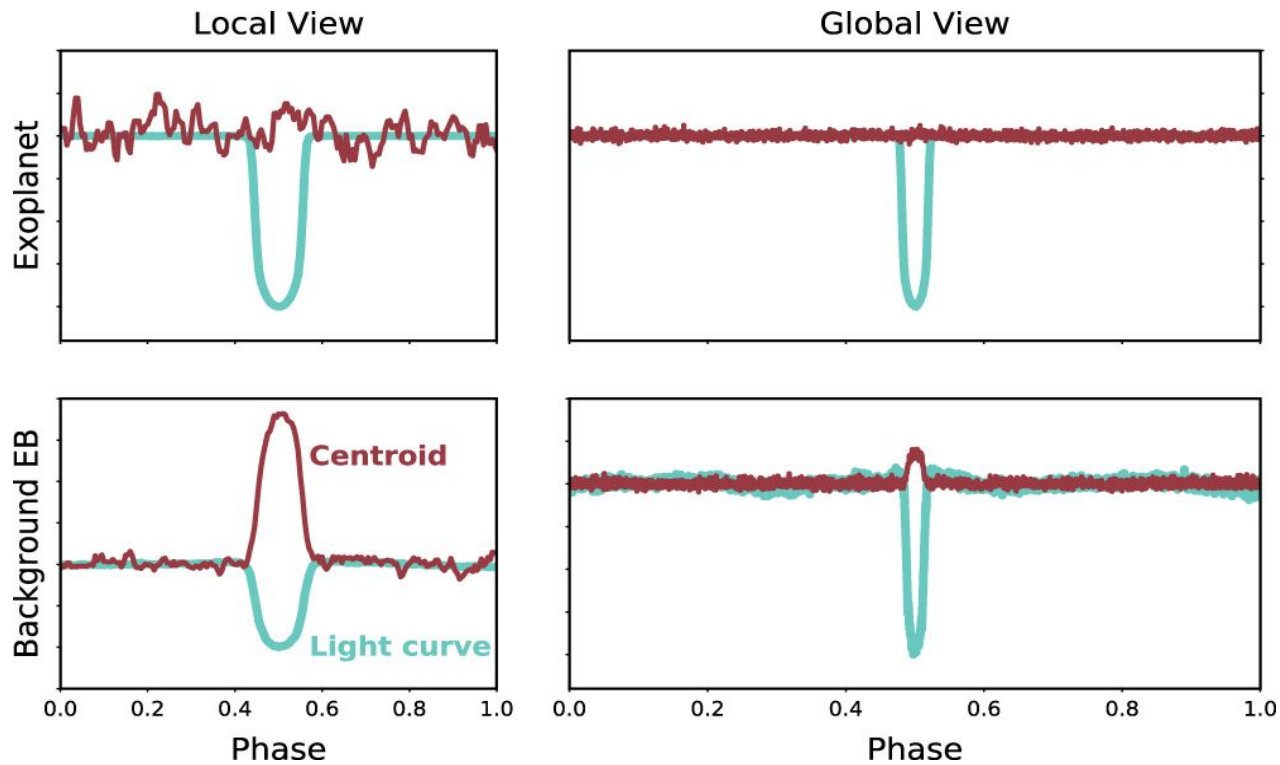


# Реальный пример с TESS звезда TIC 276914715

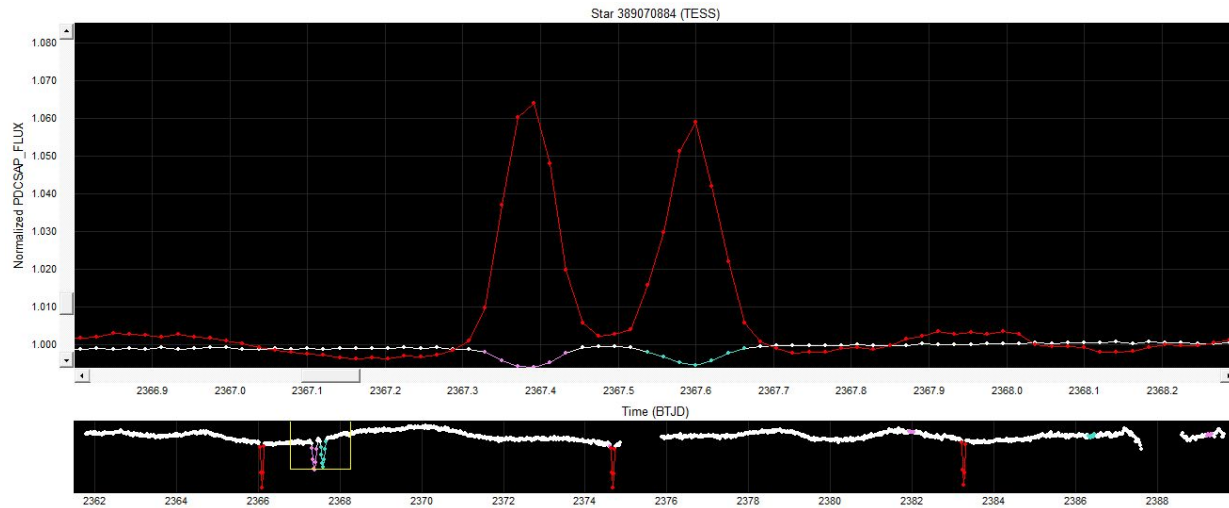
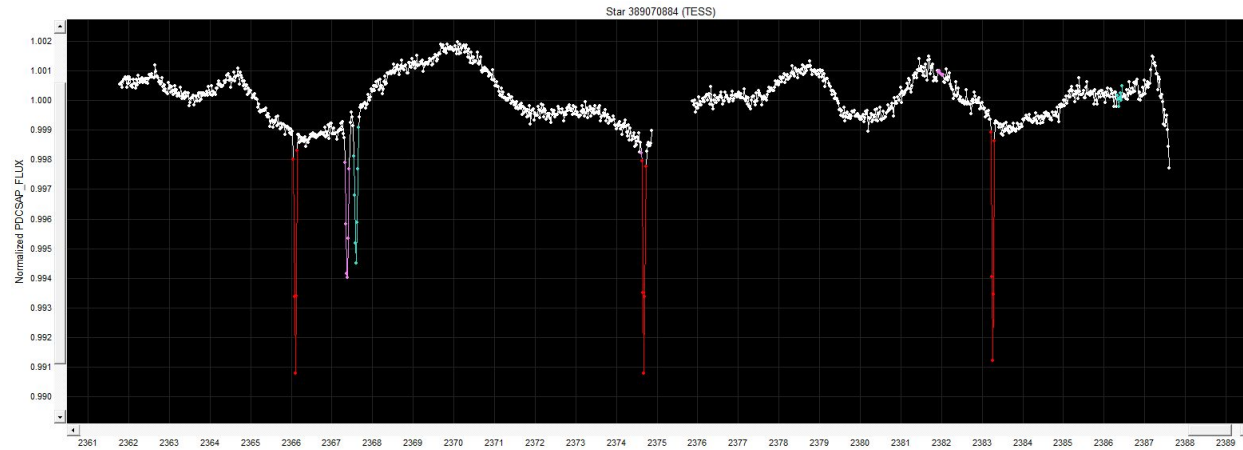


Является ли транзит следствием влиянием  
другой звезды на фотометрию?

# Проверка центроидов

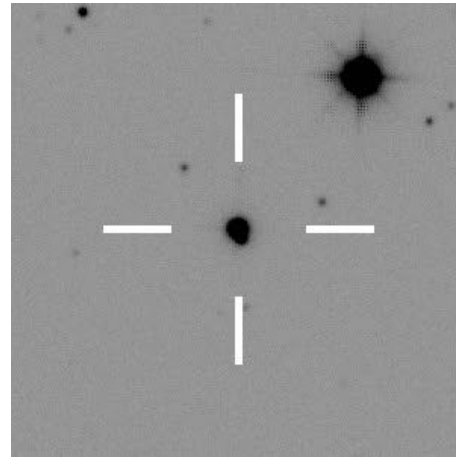
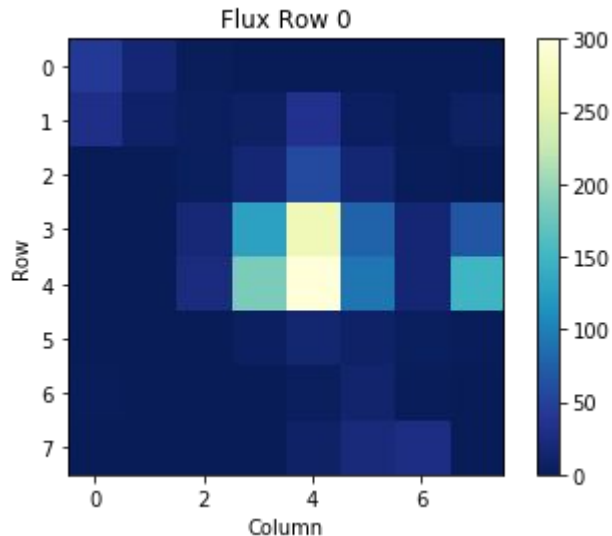






# Поиск снимков более высокого разрешения

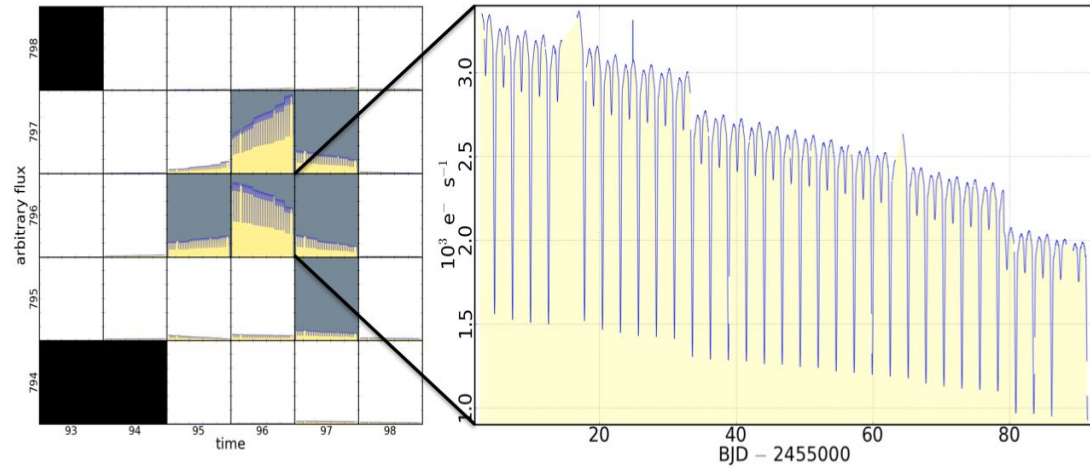
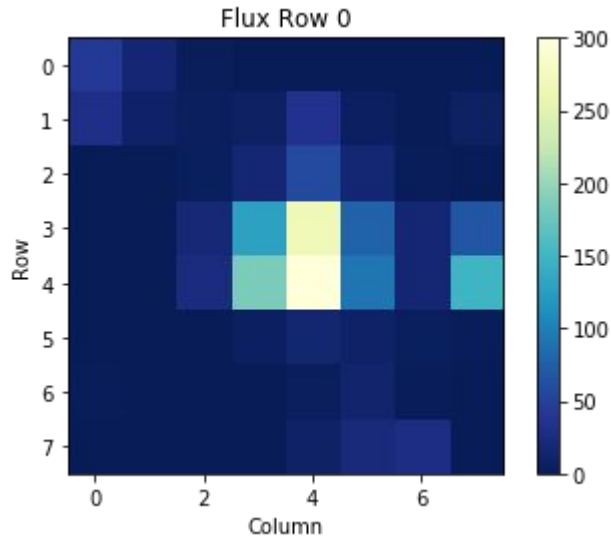
- 1) DSS ( Digital Sky Survey )
- 2) SDSS ( Sloan Digital Sky Survey )
- 3) UKIRT ( The United Kingdom Infra-Red Telescope )
- 4) Pan-starrs



# Анализ TPF файла

TPF - Target Pixel File ( Целевой файл пикселей )

Построение кривой блеска для каждого пикселя из маски



# Артефакты постобработки

# Артефакты постобработки

Фотометрия идет в двух вариантах PDCSAP и SAP

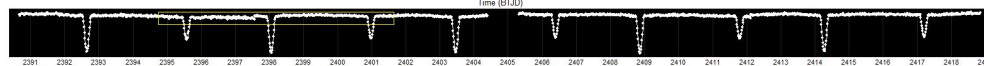
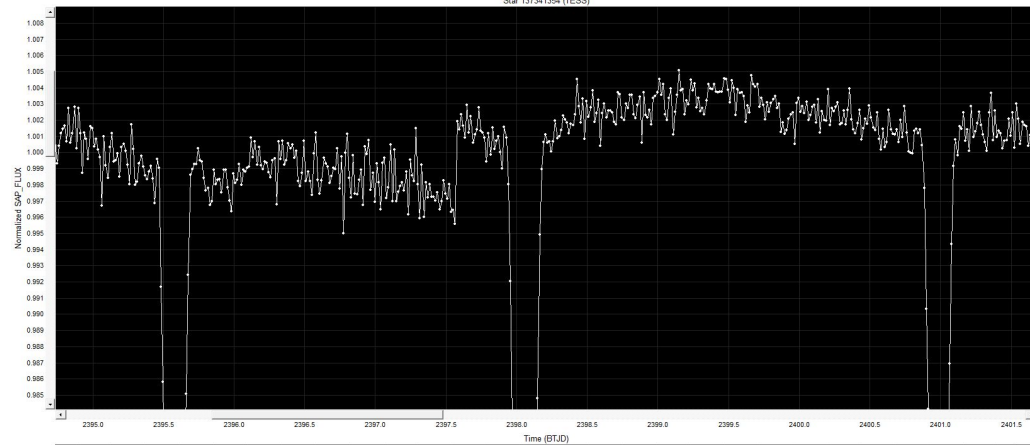
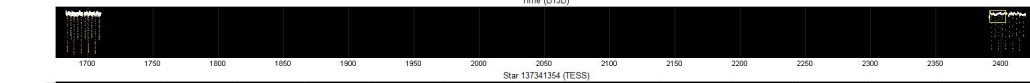
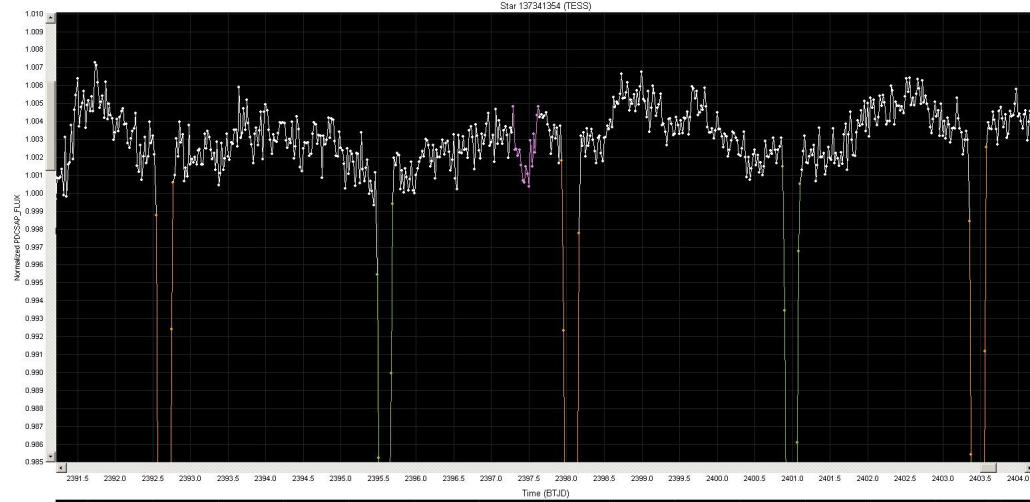
SAP - Simple aperture photometry

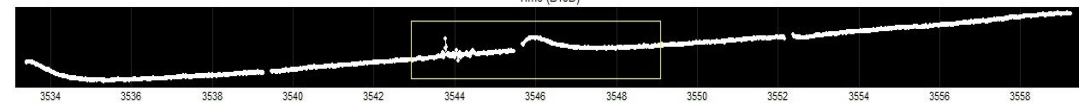
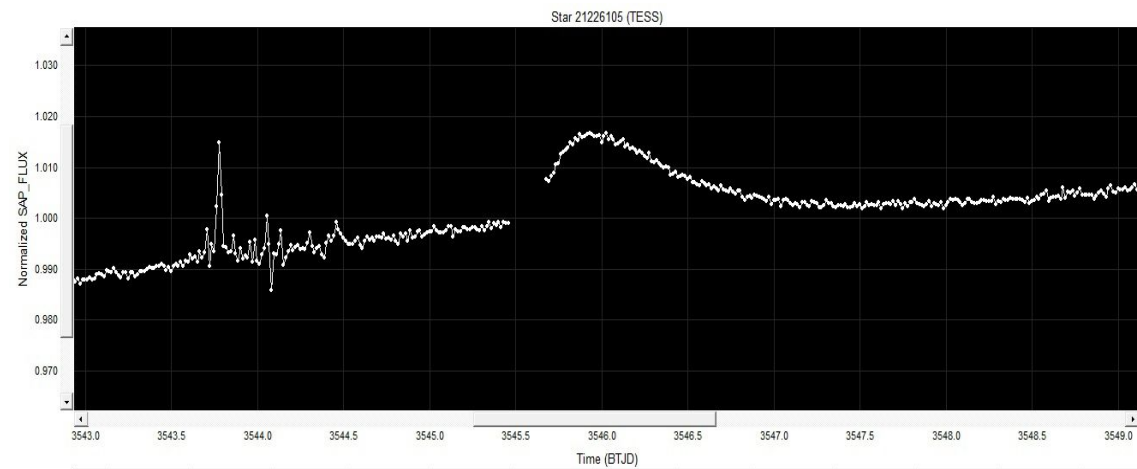
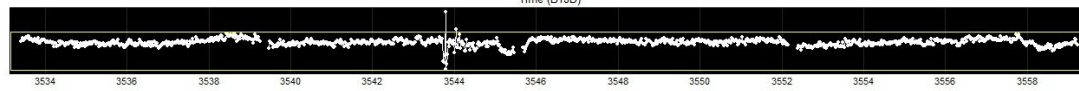
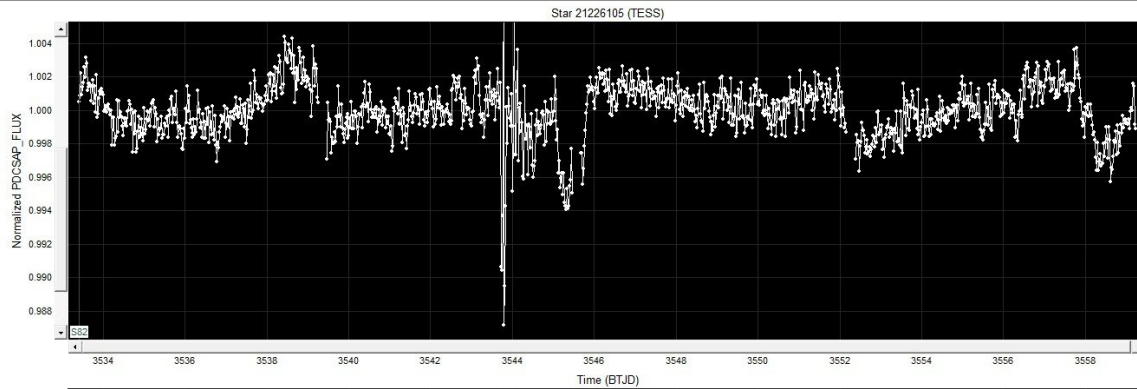
PDCSAP - Presearch data conditioning SAP

Цель PDCSAP подготовка кривой к поиску транзитных сигналов путем избавления кривой от шума и ее выравнивания

Методы проверки

- Проверка SAP flux чтобы убедиться в реальности транзитного сигнала

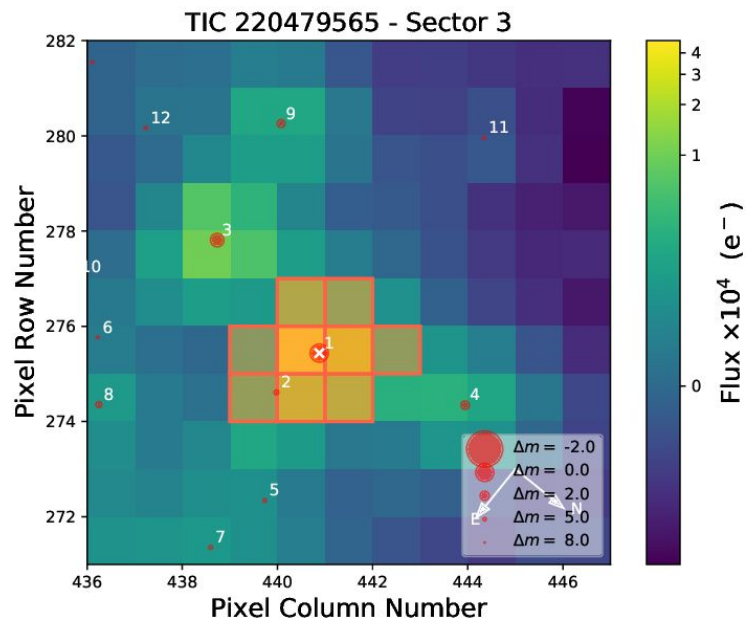




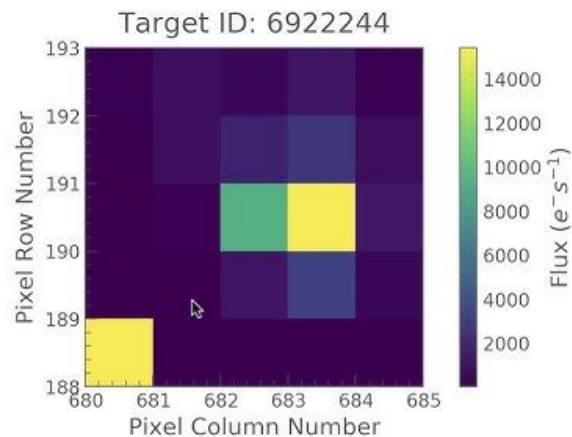
**Влияние малых планет ( и просто планет )  
Солнечной системы на фотометрию  
(стало фактором для миссии K2 и TESS )**



## Увеличение количество пикселей



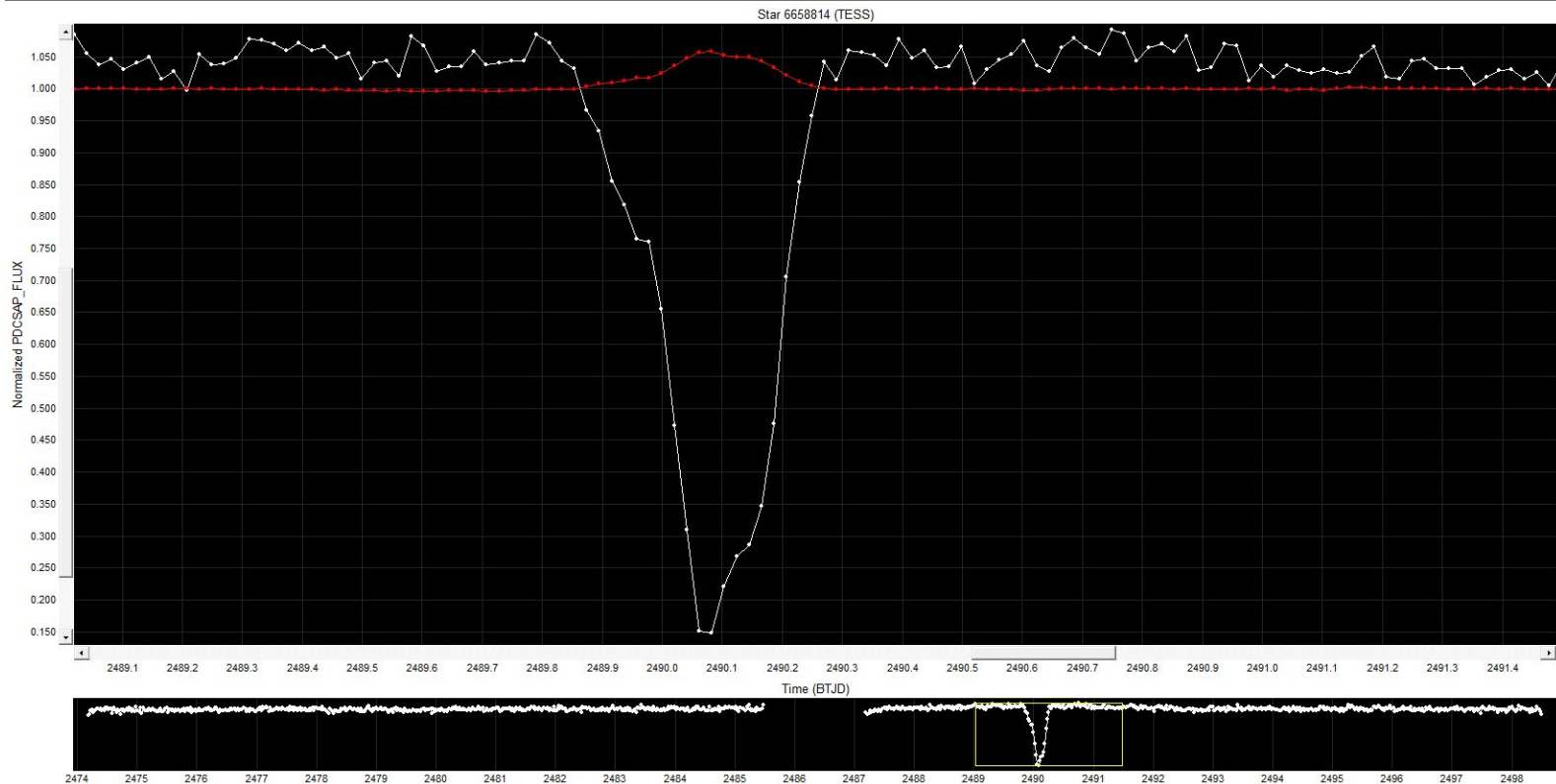
```
tpf.plot(frame=0);
```



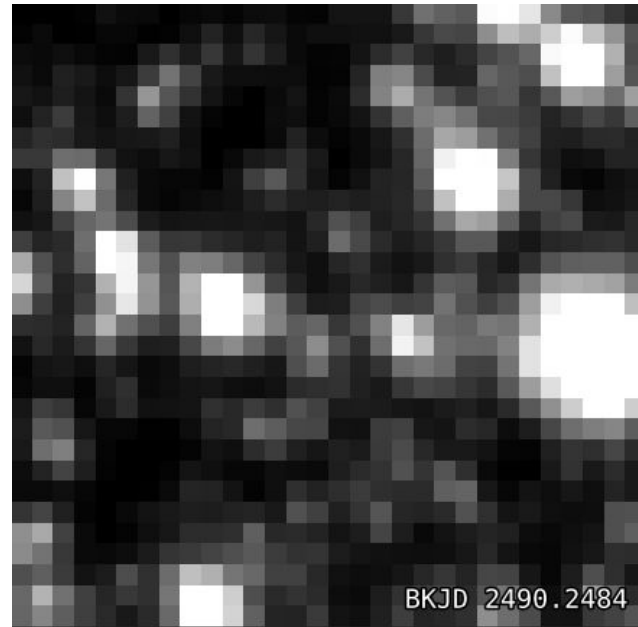
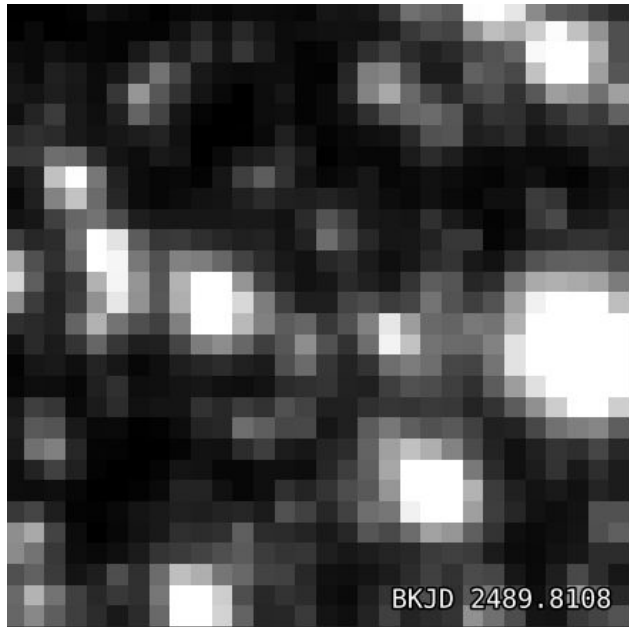
The values shown in this image are also directly accessible as an array:

```
In [ ]: tpf.flux[0]
```

# Кривая блеска звезды TIC 6658814



# Анимация TRF файла звезды TIC 6658814



# **Миссия K2 и перезапуск проекта Planet Hunters**

# Износ оборудования

9 января 2010 года вышли из строя 2 из 42 фоточувствительных модулей фотометра. Поле обзора «Кеплера», начиная с этого момента, уменьшилось примерно на пять процентов

16 июля 2012 года произошла поломка одного из четырёх двигателей-маховиков гиростабилизированной платформы

12 мая 2013 года произошла поломка двигателя-маховика № 4 гиростабилизированной платформы по неизвестной причине. Ориентировка аппарата стала нестабильной и для вращения Кеплера планировалась использовать двигатели ориентации, топлива для которых, как рассчитывают в NASA, хватит ещё на несколько месяцев



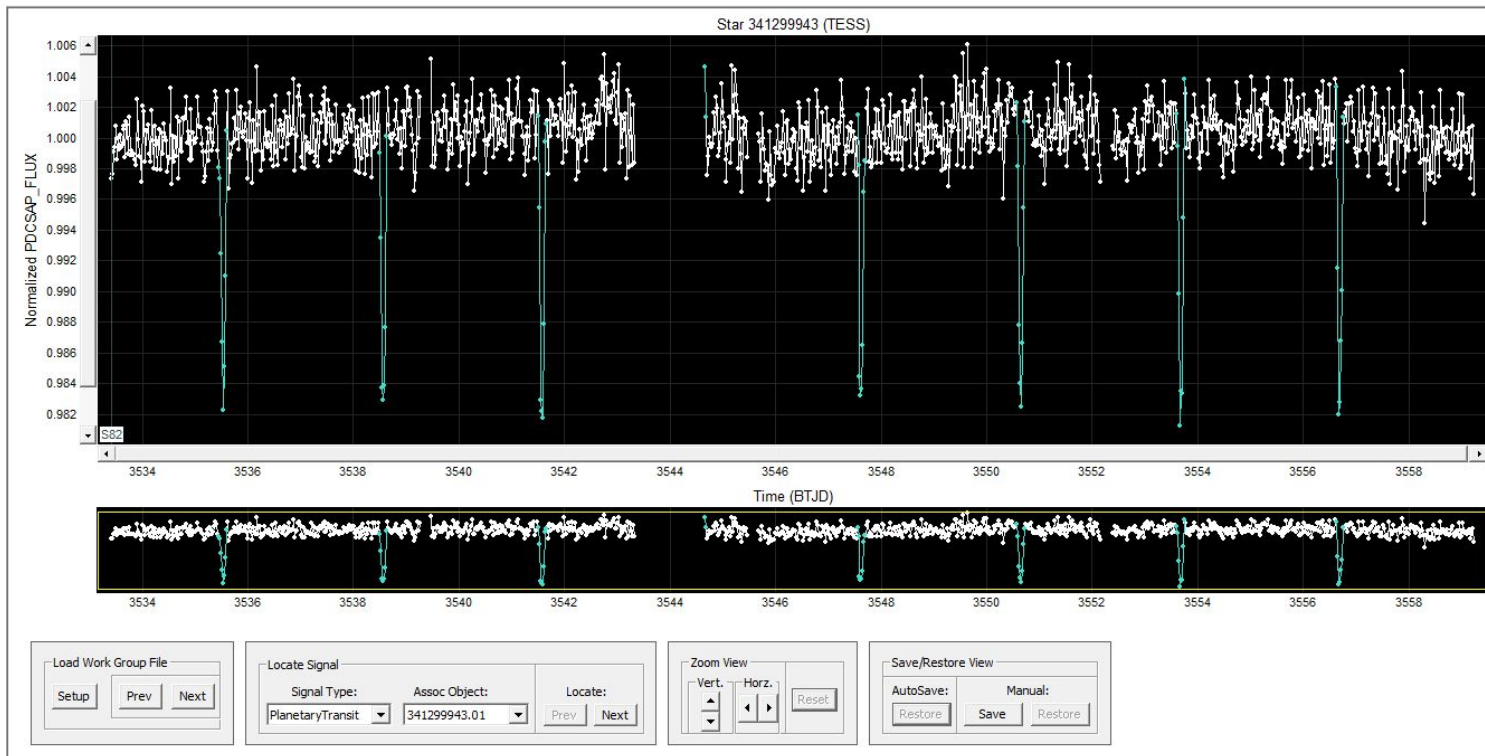
# Planet Hunters 2.0



# LC Tools

Автор Allan R. Schmitt

Начало разработки 2011 год





# Visual Survey Group

## The team



Saul A. Rappaport  
MIT  
[ORCID](#)



Andrew M. Vanderburg  
MIT  
[ORCID](#)



Martti H. Kristiansen  
Brorfeide Observatory  
[ORCID](#)



Thomas L. Jacobs  
Citizen Scientist  
[ORCID](#)



Hans Martin Schwengeler  
Citizen Scientist  
[ORCID](#)



Robert Gagliano  
Citizen Scientist  
[ORCID](#)



Ivan A. Terentev  
Citizen Scientist  
[ORCID](#)



Daryll M. LaCourse  
Citizen Scientist  
[ORCID](#)



Mark R. Ormondo  
Citizen Scientist  
[ORCID](#)



Brian P. Powell  
NASA GSFC  
[ORCID](#)



Veselin B. Kostov  
NASA GSFC  
[ORCID](#)

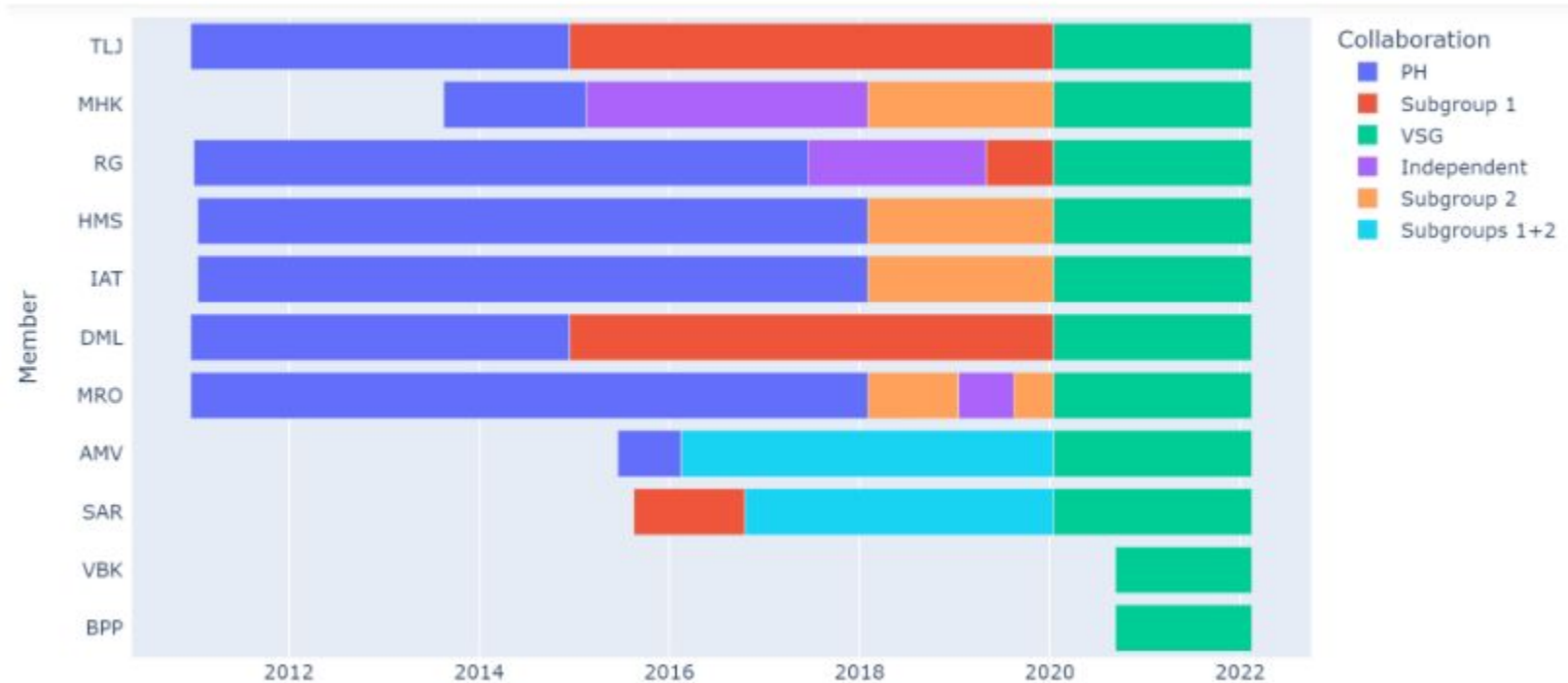
USA

Russia

Switzerland

Denmark

# Хронология VSG



**Спасибо за внимание!**