

# Нобелевские премии по физике – 2019

(внесолнечные планеты, космология)

П.А. Тараканов

Санкт-Петербургский государственный университет,  
математико-механический факультет, кафедра астрофизики

28 октября 2019 г.

# Нобелевская премия по физике – 2019

- За теоретические исследования в физической космологии:  
**Филлип Джеймс Эдвин (Джим) Пиблс**
- За открытие экзопланеты на орбите солнцеподобной звезды:
  - Мишель Густав Эдуард Майор
  - Дидье Патрик Кело

# Методы обнаружения экзопланет

## Возможные варианты:

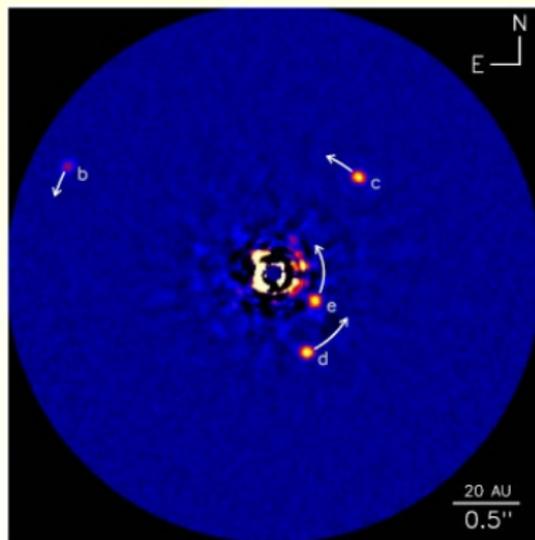
- Прямые наблюдения
- Метод лучевых скоростей
- Астрометрический метод
- Доплеровское изменение частоты пульсаций
- Транзиты (прохождения)
- Вариация времени и частоты транзитов
- Гравитационное микролинзирование

## Прямые наблюдения

$$m_{\text{з}}(r) = 21^m + 5^m \lg r$$

(расстояние  $r$  в парсеках,  $1 \text{ пк} \approx 3.26$  светового года)

HST:  $m_{\text{пред}} \approx 31^m \implies r \sim 10^2 \text{ пк}$



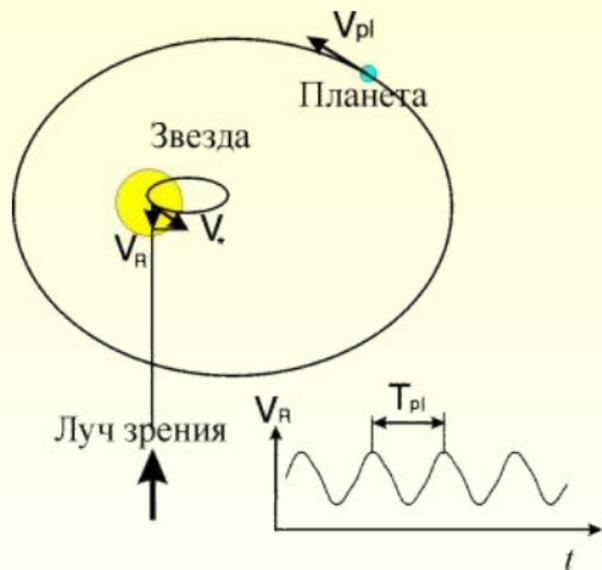
HR 8799 ( $r \approx 40 \text{ пк}$ )

**2008** нашли 3 планеты

**2010** получен спектр планеты c

(AU — астрономическая единица,  
1 a.e. = 150 млн. км)

## Метод лучевых скоростей

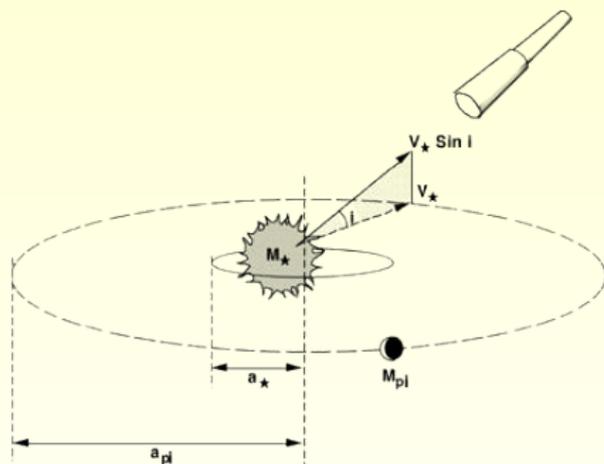


$$v_r = \sqrt{\frac{G}{M_* + M_{pl}} \frac{M'}{a_{pl}}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{pl}}t + \varphi\right)$$

$$A = \sqrt{\frac{G}{M_* + M_{pl}} \frac{M'}{a_{pl}}}$$

$$A = M' \sqrt{\frac{2\pi G}{T_{pl}(M_* + M_{pl})^2}}$$

## Метод лучевых скоростей



$$M' = M_{pl} \sin i$$

Способы избавиться: транзиты, кратные системы

# Метод лучевых скоростей

## Неприятность №1

- Отношение масс Юпитера и Солнца  $M_J/M_\odot \approx 10^{-3}$ .
- Орбитальная скорость Юпитера  $v_J \approx 13$  км/с.
- Следовательно, искать нужно  $v_r \approx 13$  метров в секунду.

# Метод лучевых скоростей

## Неприятность №1

- Отношение масс Юпитера и Солнца  $M_J/M_\odot \approx 10^{-3}$ .
- Орбитальная скорость Юпитера  $v_J \approx 13$  км/с.
- Следовательно, искать нужно  $v_r \approx 13$  метров в секунду.

## Неприятность №2

- Звезды вращаются вокруг собственной оси.
- Линейная скорость точек на экваторе Солнца — 2 км/с.

# Метод лучевых скоростей

## Неприятность №1

- Отношение масс Юпитера и Солнца  $M_J/M_\odot \approx 10^{-3}$ .
- Орбитальная скорость Юпитера  $v_J \approx 13$  км/с.
- Следовательно, искать нужно  $v_r \approx 13$  метров в секунду.

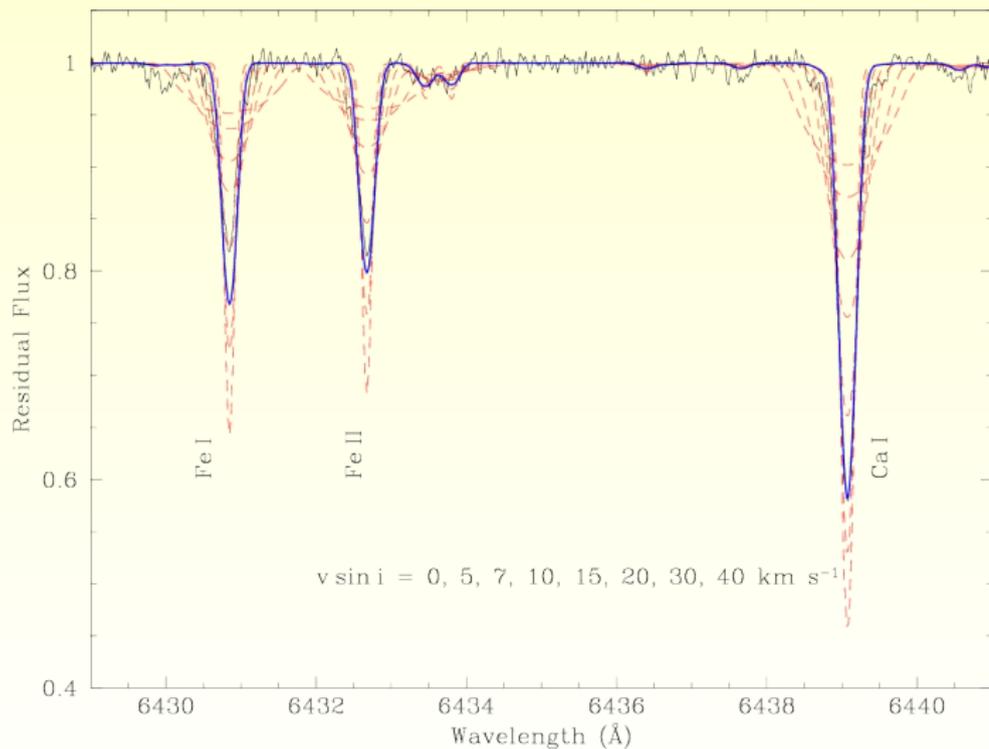
## Неприятность №2

- Звезды вращаются вокруг собственной оси.
- Линейная скорость точек на экваторе Солнца — 2 км/с.

## Неприятность №3

- В оптическом диапазоне  $v_r \sim 10$  м/с соответствует  $\Delta\lambda \sim 10^{-4}$  Å.

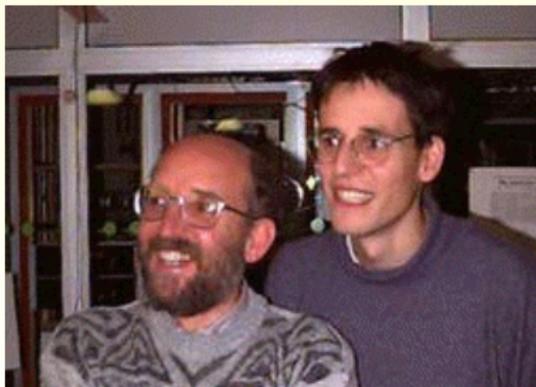
## Вращение звезд



# Метод лучевых скоростей — первый результат

1995 Мишель Майор, Дидье Кело, Observatoire de Haute-Provence

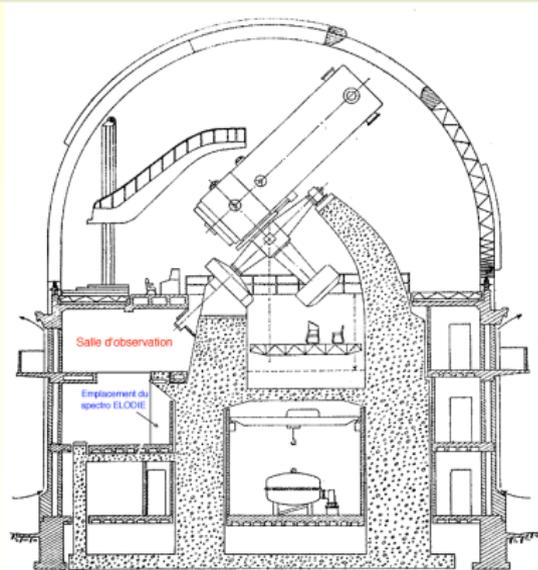
- Достигнутая точность около 3 м/с.
- Обнаружена планета у звезды 51 Пегаса (51 Peg): горячий «Юпитер» с периодом 4.23 суток (земных).



# Метод лучевых скоростей — первый результат

1995 Мишель Майор, Дидье Кело, Observatoire de Haute-Provence

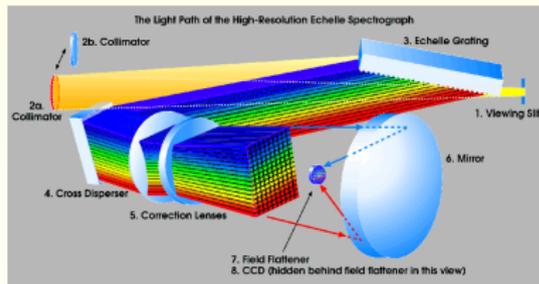
- Достигнутая точность около 3 м/с.
- Обнаружена планета у звезды 51 Пегаса (51 Peg): горячий «Юпитер» с периодом 4.23 суток (земных).



# Метод лучевых скоростей — первый результат

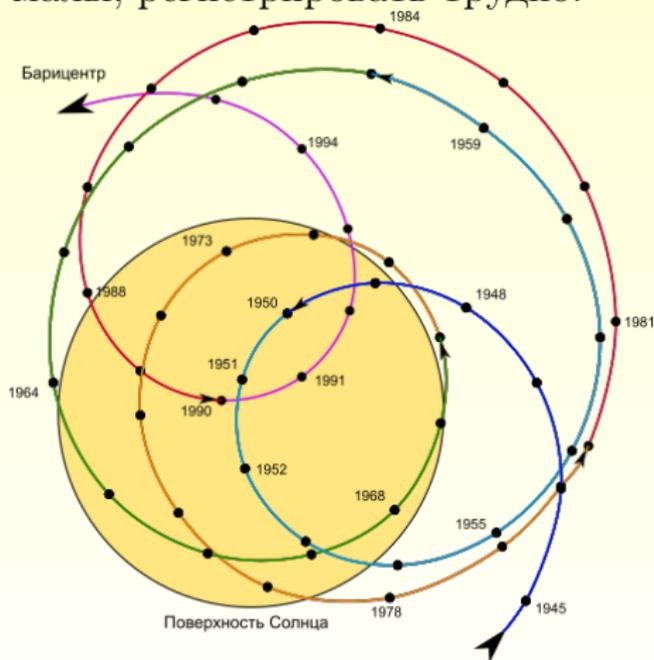
1995 Мишель Майор, Дидье Кело, Observatoire de Haute-Provence

- Достигнутая точность около 3 м/с.
- Обнаружена планета у звезды 51 Пегаса (51 Peg): горячий «Юпитер» с периодом 4.23 суток (земных).



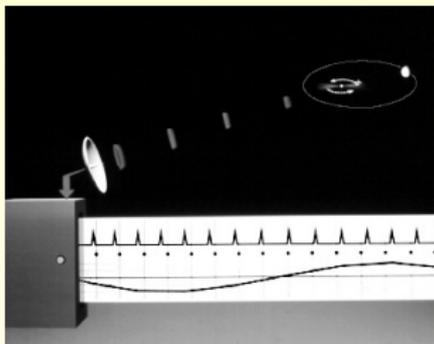
# Астрометрический метод

Смещения очень малы, регистрировать трудно:



Угловой диаметр диска Солнца при наблюдении от ближайшей звезды ( $\alpha$  Cen) меньше  $0''.01$ .

# Доплеровское изменение частоты пульсаций



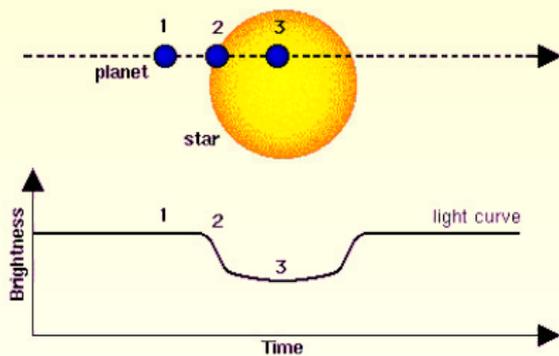
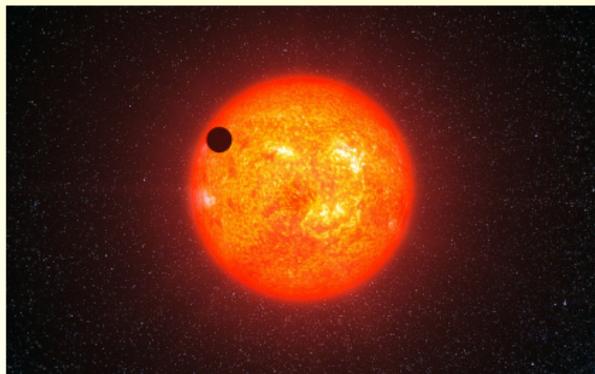
$$\frac{v_r}{c} = \frac{\Delta P}{P}$$

$$A = M' \sqrt{\frac{2\pi G}{T_{\text{pl}}(M_* + M_{\text{pl}})^2}}$$

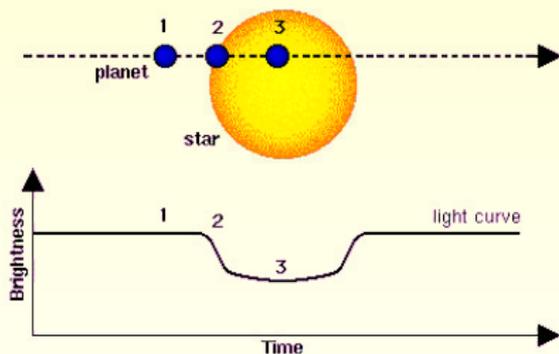
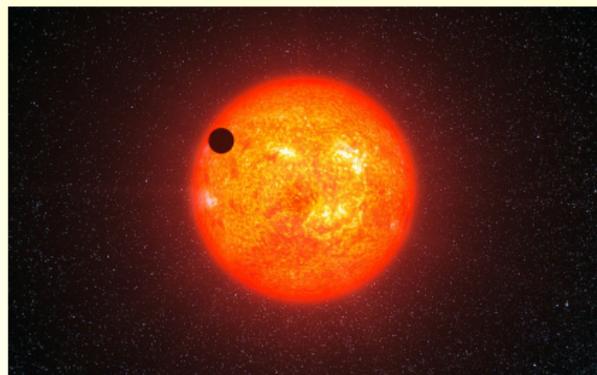
**1992** наблюдения пульсара PSR 1257+12,  
Александр Вольщан, Аресибо



# Транзиты (прохождения)

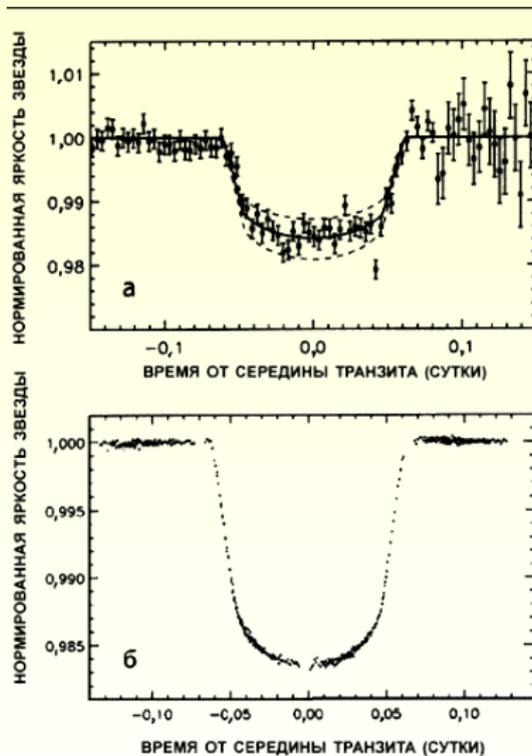


## Транзиты (прохождения)



Для пары Солнце–Юпитер вероятность 0.0006, период 12 лет

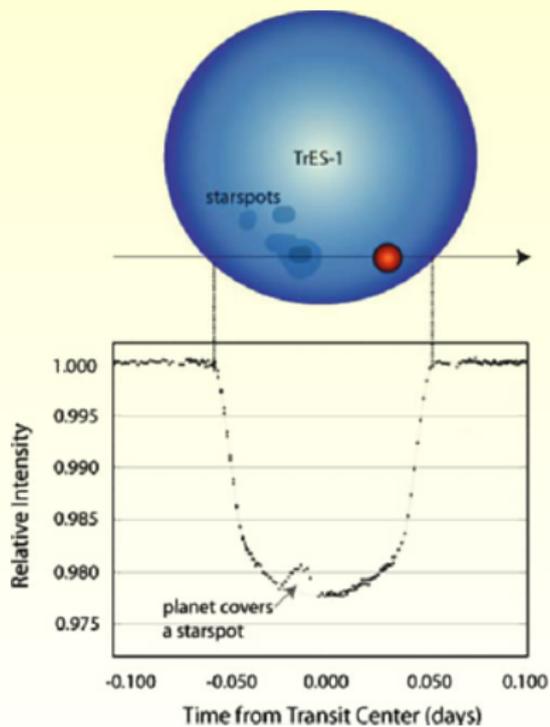
## Транзиты (прохождения)



1999

Первое открытие — HD 209458b

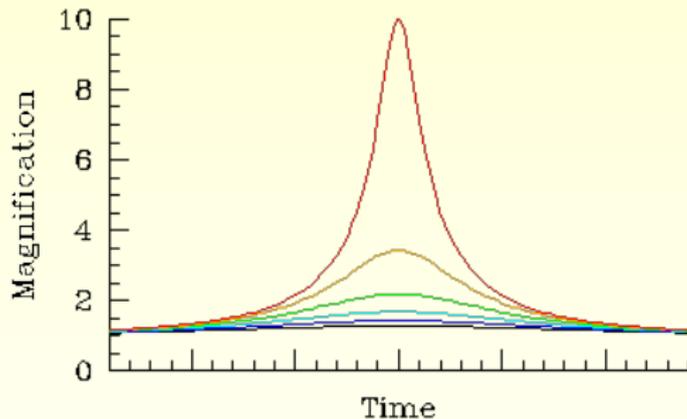
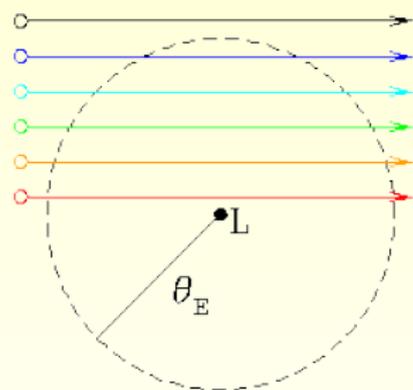
## Транзиты (прохождения)



# Гравитационное микролинзирование

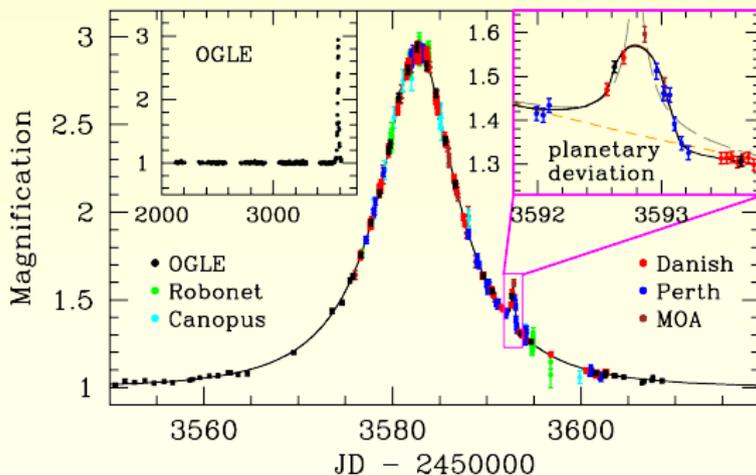


## Гравитационное микролинзирование



OGLE (The Optical Gravitational Lensing Experiment,  
Las Campanas Observatory, Chile)

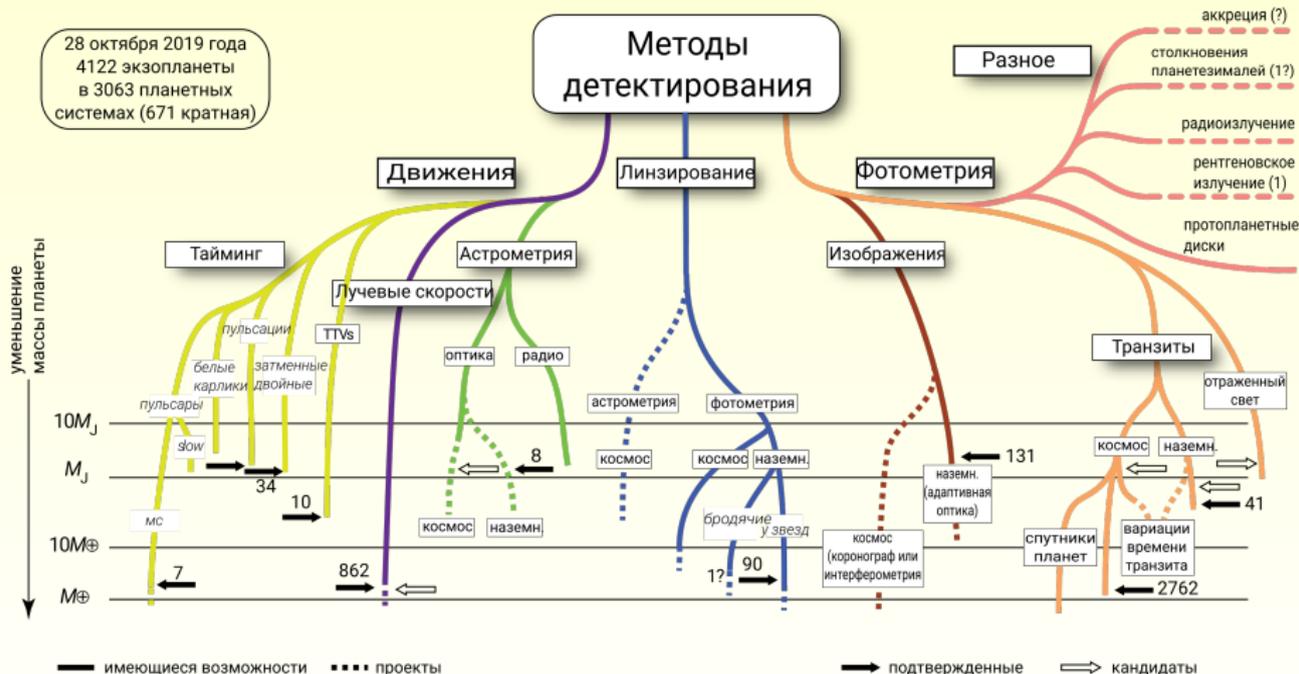
## Гравитационное микролинзирование



2005 Событие OGLE-2005-BLG-390

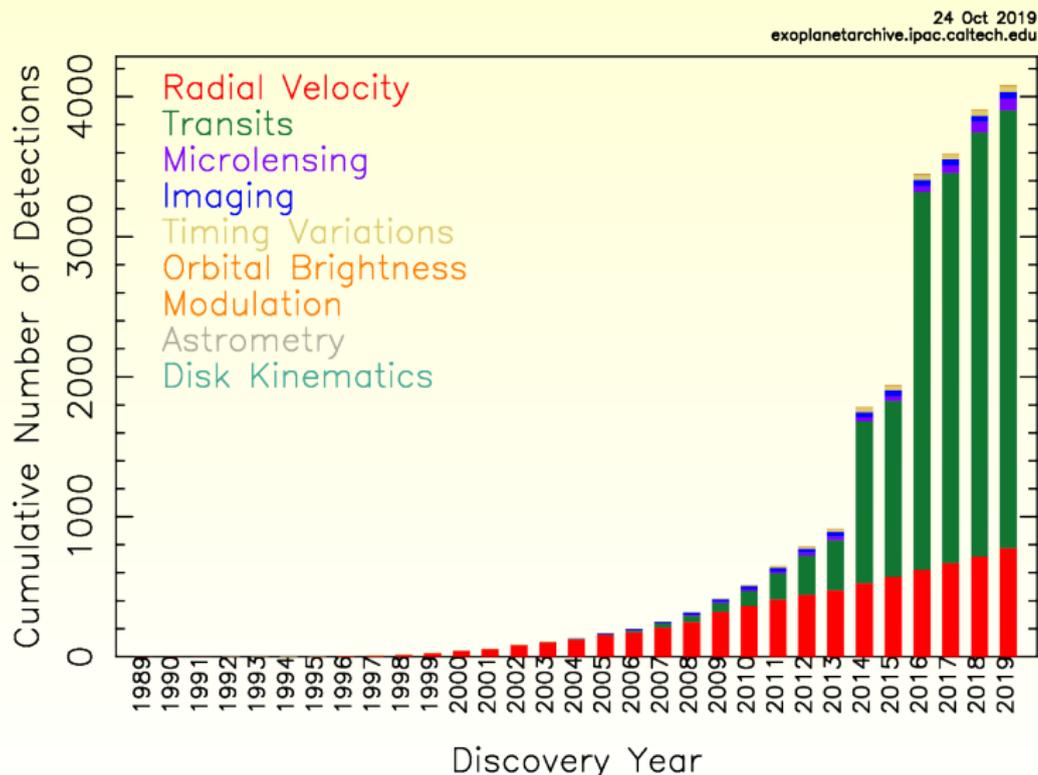
5.5 масс Земли

# Методы обнаружения экзопланет — результаты

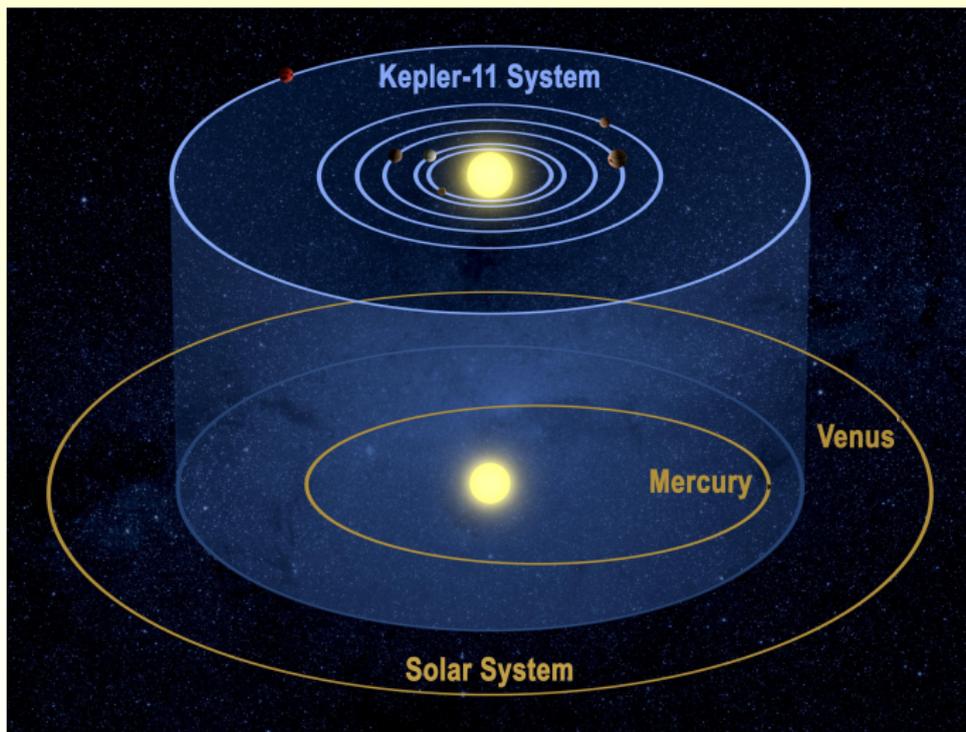


# Методы обнаружения экзопланет — результаты

## Cumulative Detections Per Year

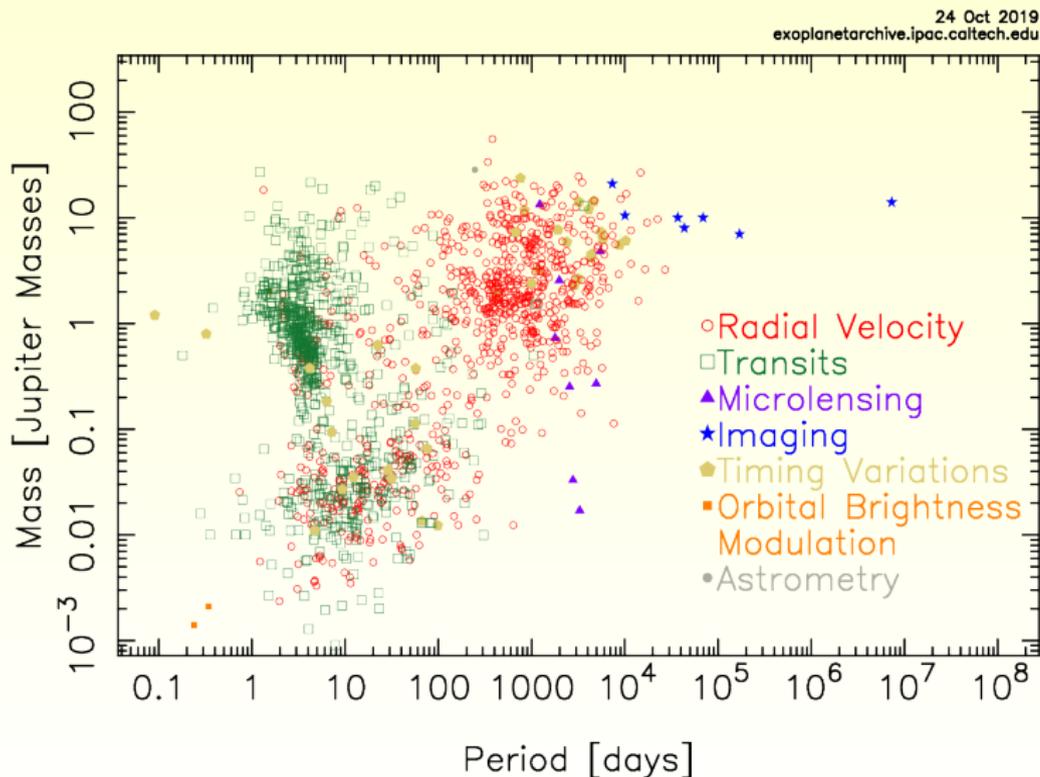


## Методы обнаружения экзопланет — результаты

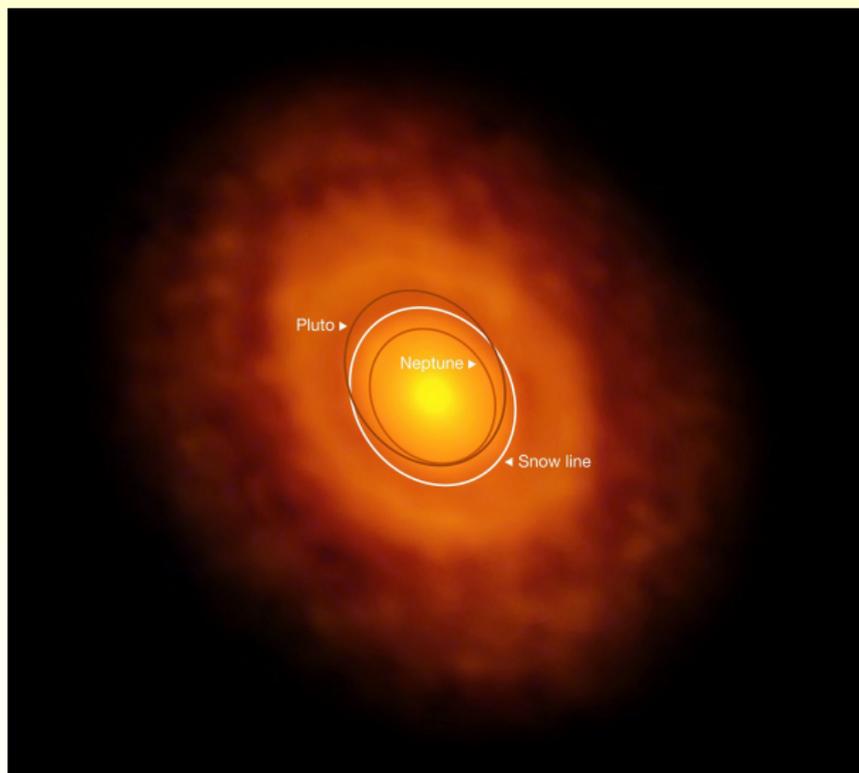


## Методы обнаружения экзопланет — результаты

## Mass – Period Distribution



## Происхождение планетных систем



V833 Ori

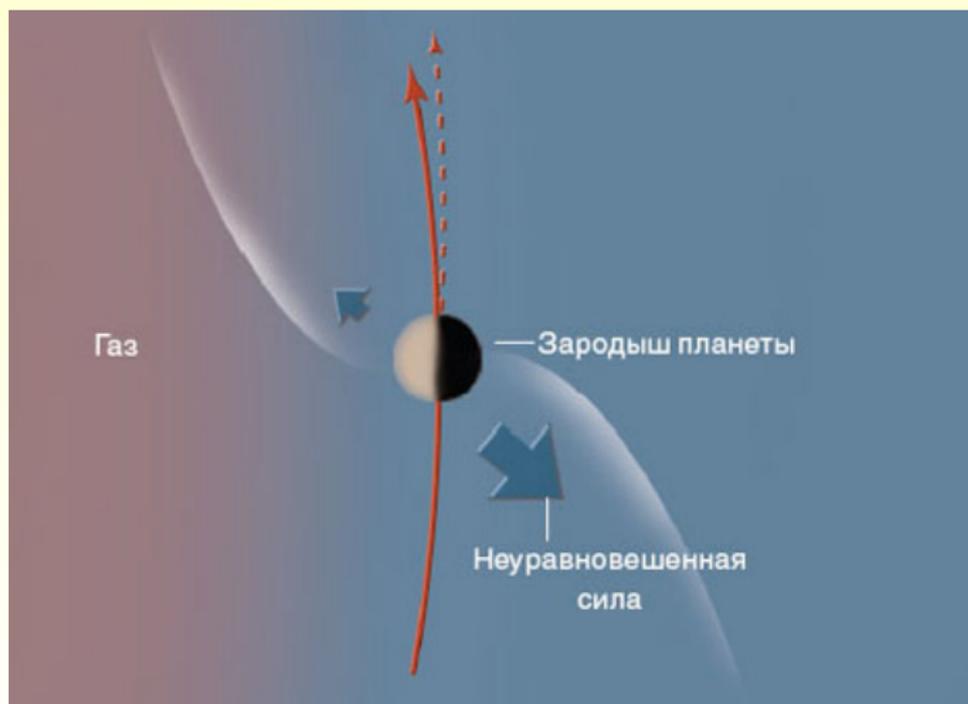
П.А. Тараканов

Нобелевские премии – 2019

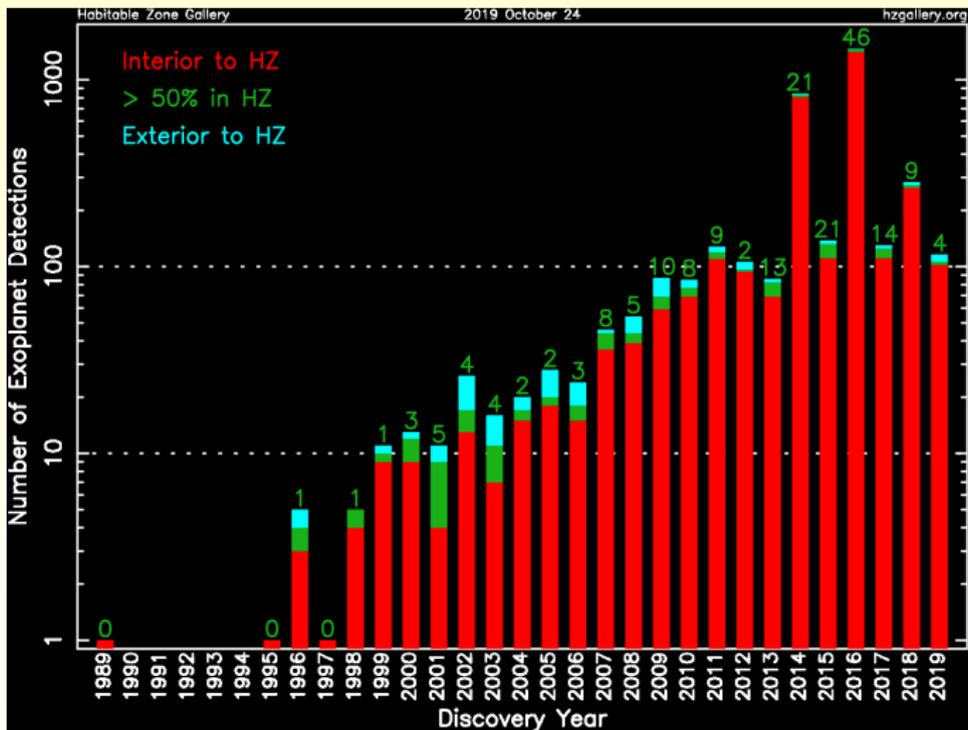
28 октября 2019 г.

22 / 39

## Происхождение планетных систем



## Поиски жизни

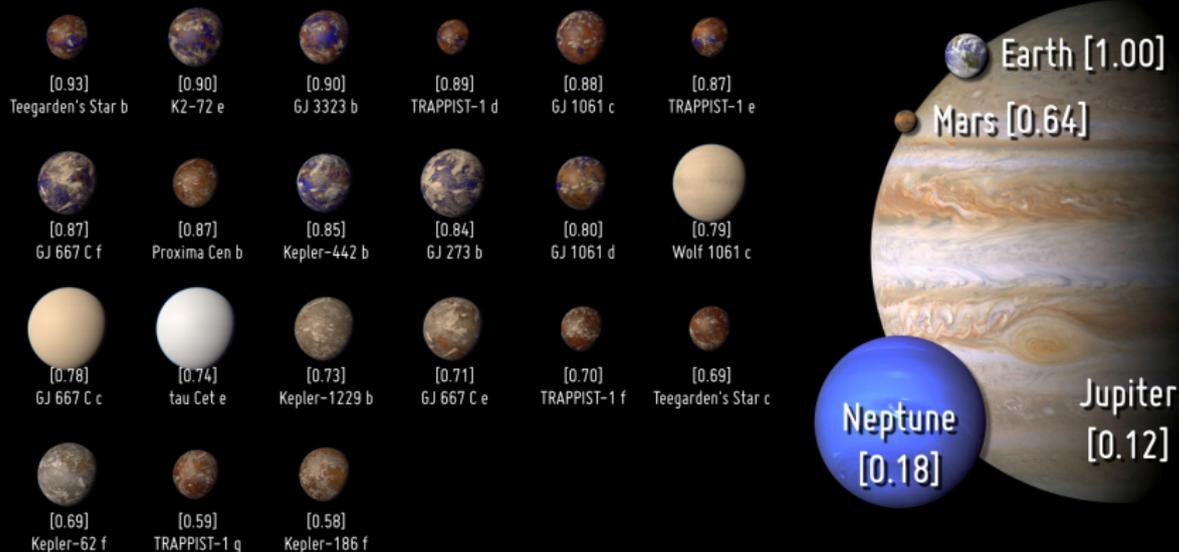




## Кандидаты в обитаемые планеты

## Potentially Habitable Exoplanets

Ranked by the Earth Similarity Index (ESI)



Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. ESI measures similarity to Earth size and insolation.

CREDIT: PHL @ UPR Arcicibo (ph.lupr.edu) Sep 4, 2019

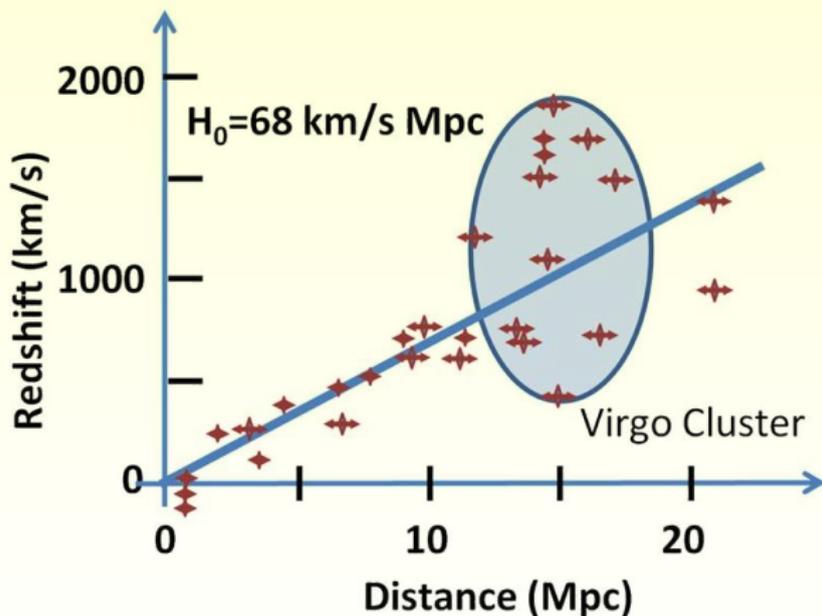
# Закон Хаббла

1929 После создания ОТО и появления модели Фридмана открыт закон Хаббла



# Закон Хаббла

1929 После создания ОТО и появления модели Фридмана открыт закон Хаббла



# Модель «горячей Вселенной»

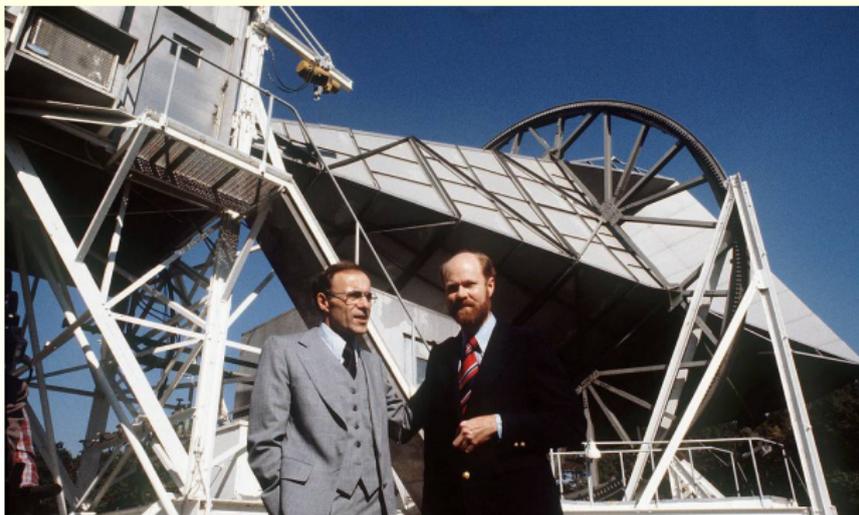
**1948** Работа Г.А.Гамова о «горячей Вселенной», предсказание существования реликтового излучения и базовая теория нуклеосинтеза.

**1950** Оценка температуры реликтового фона как  $\sim 10^0 \div 10^1$  К.



# Реликтовое излучение

- 1941 Оценка Э. Мак-Келларом температуры возбуждения межзвездных молекул циана по данным наблюдений дзеты Змееносца.
- 1955 Наблюдение Т.А. Шмаоновым фонового излучения с яркостной температурой  $\approx 4$  К.
- 1964 А. Пензиас и Р. Уилсон открывают реликтовое излучение.



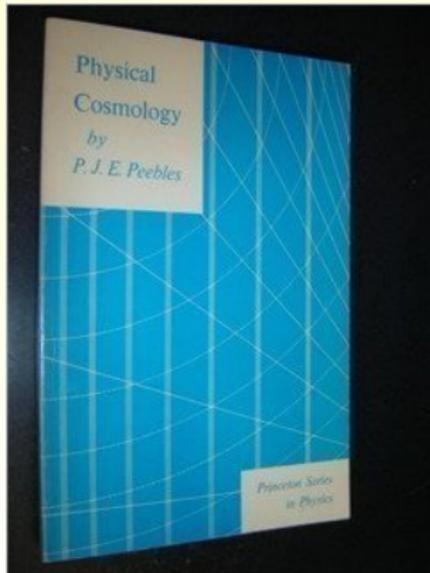
# Реликтовое излучение

- 1964 Работа А.Г. Дорошкевича и И.Д. Новикова — оценка потока для реликтового излучения.
- 1964 Работа Ф. Хойла и Р.Дж. Тейлора — независимая оценка потока.
- 1965 Работа Р. Дикке, **Дж. Пиблса**, П. Ролла и Д. Уилкинсона — интерпретация наблюдений.



# Физическая космология

- 1968 Оценка массы объектов, возникающих в ранней Вселенной.
- 1971 Выходит книга Дж. Пиблса «Физическая космология».
- 1982 Первая версия модели  $\Lambda$ CDM (пока без  $\Lambda$ ).
- 1984 Первая оценка вклада  $\Lambda$ -члена.



# Предсказания и объяснения модели

- Формирование структур в ранней Вселенной и параметры этих структур.

# Предсказания и объяснения модели

- Формирование структур в ранней Вселенной и параметры этих структур.
- Связь структур с анизотропией реликтового излучения.

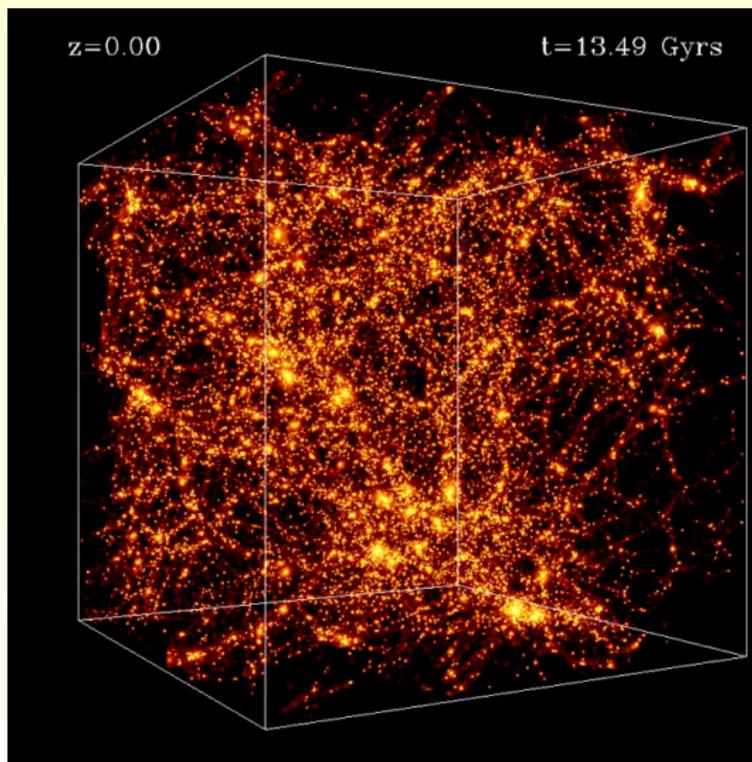
# Предсказания и объяснения модели

- Формирование структур в ранней Вселенной и параметры этих структур.
- Связь структур с анизотропией реликтового излучения.
- Скрытая масса.

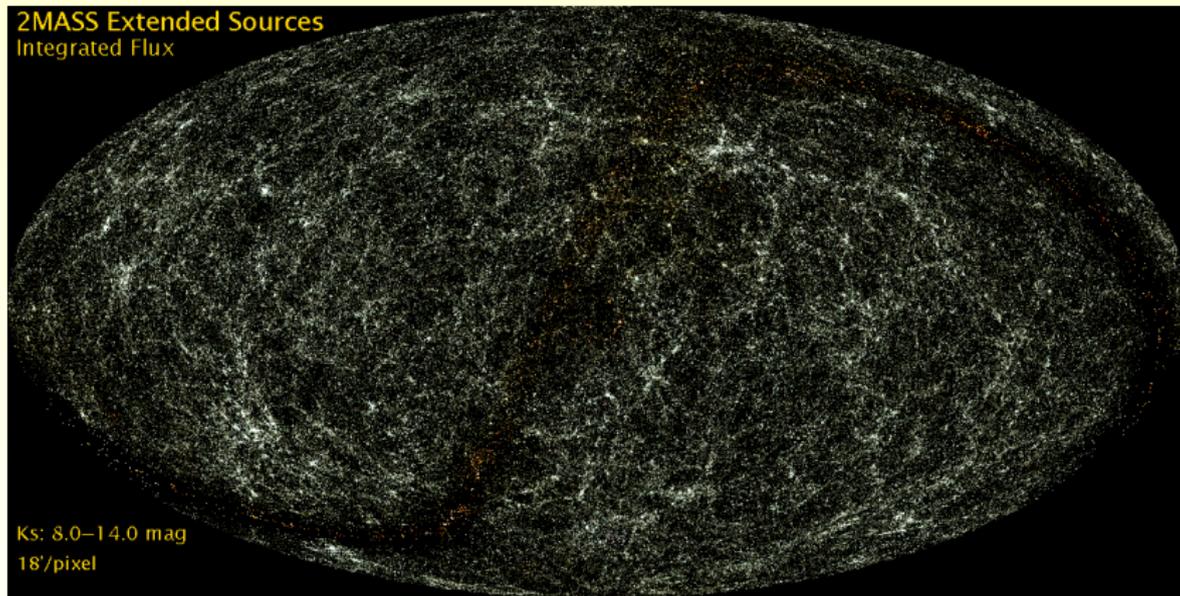
# Предсказания и объяснения модели

- Формирование структур в ранней Вселенной и параметры этих структур.
- Связь структур с анизотропией реликтового излучения.
- Скрытая масса.
- Инфляция.

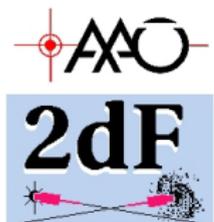
## Модель крупномасштабной структуры



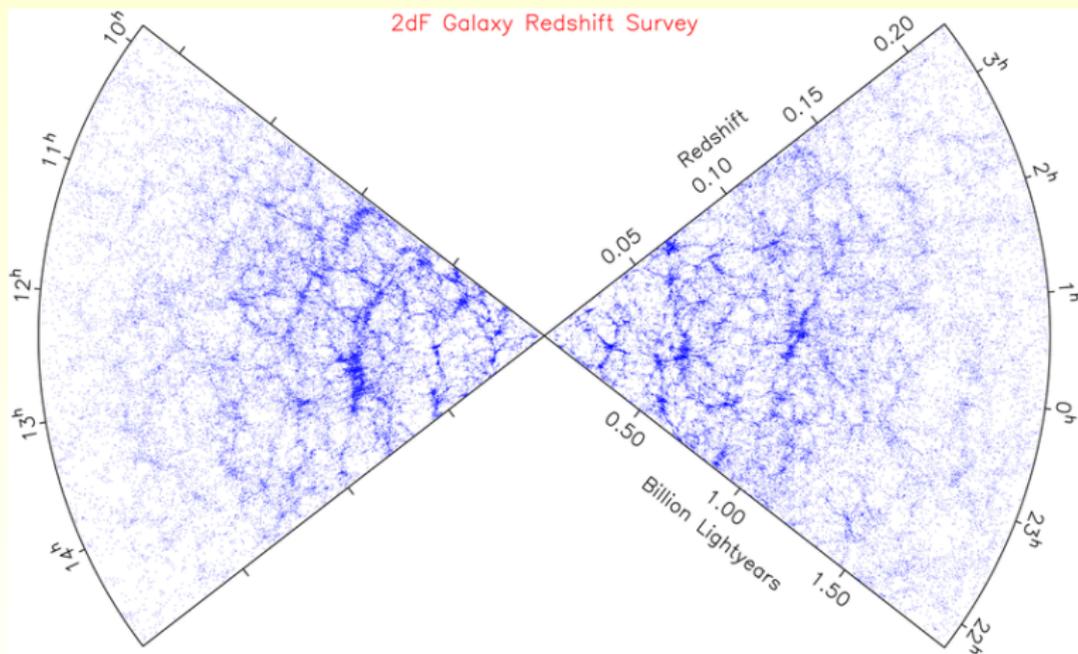
## Реальные данные



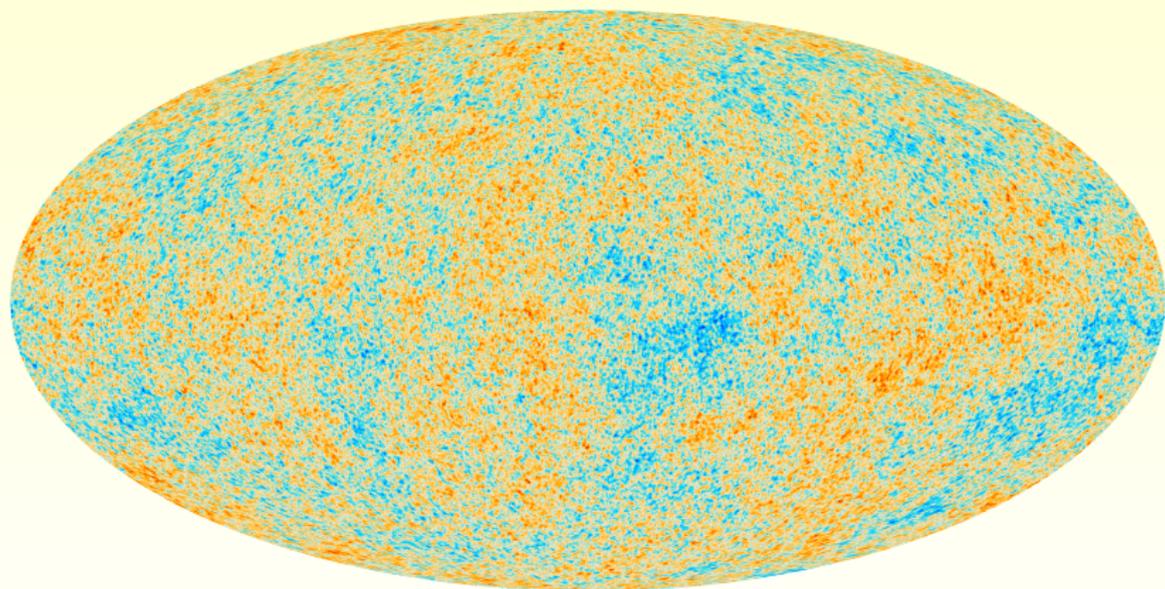
## z-машины



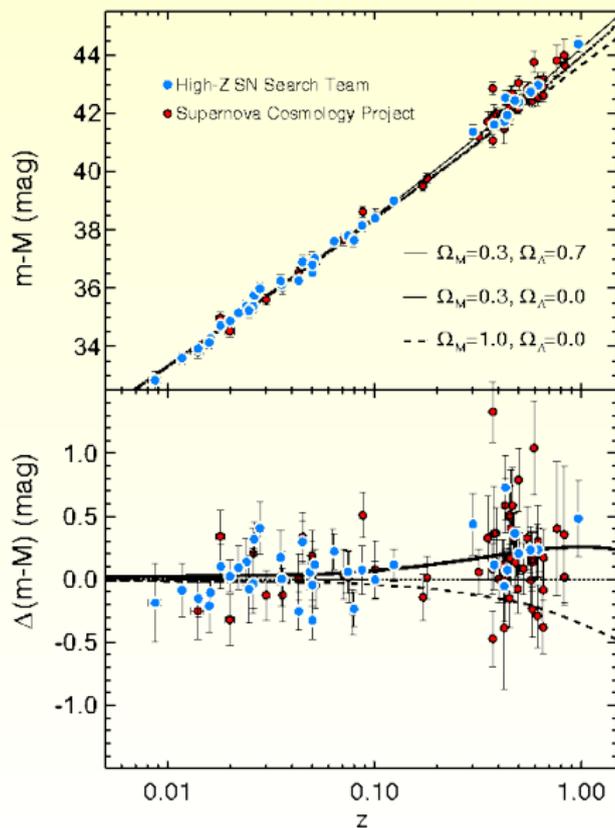
## Данные по расстояниям



# Анизотропия реликтового фона



# $\Lambda$ -член



*Спасибо за внимание!*