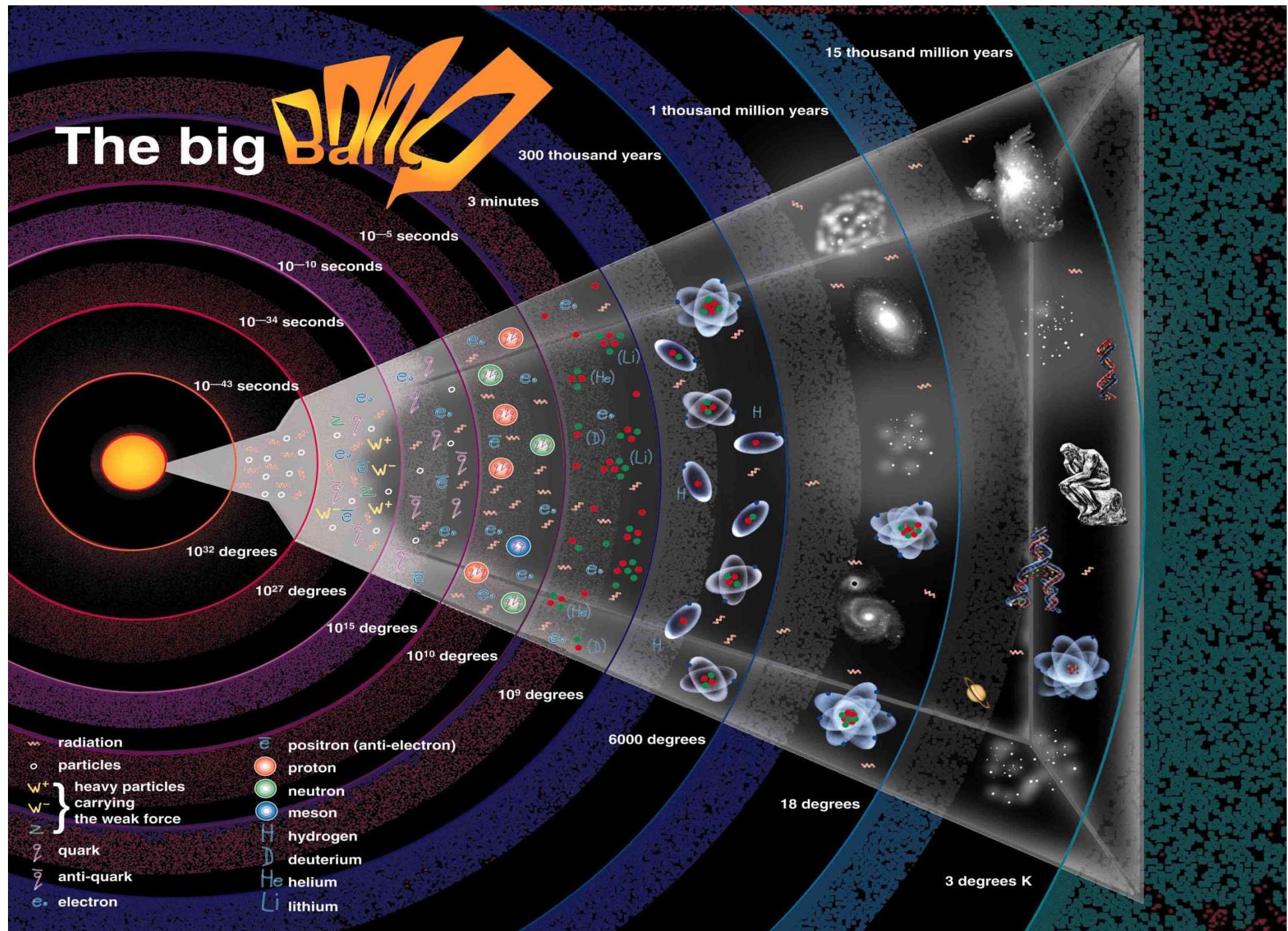


Лауреаты Нобелевской премии по физике 2019 г. Слева направо: Джеймс Пиблз (James Peebles), Мишель Майор (Michel Mayor) и Дидье Кело (Didier Queloz)

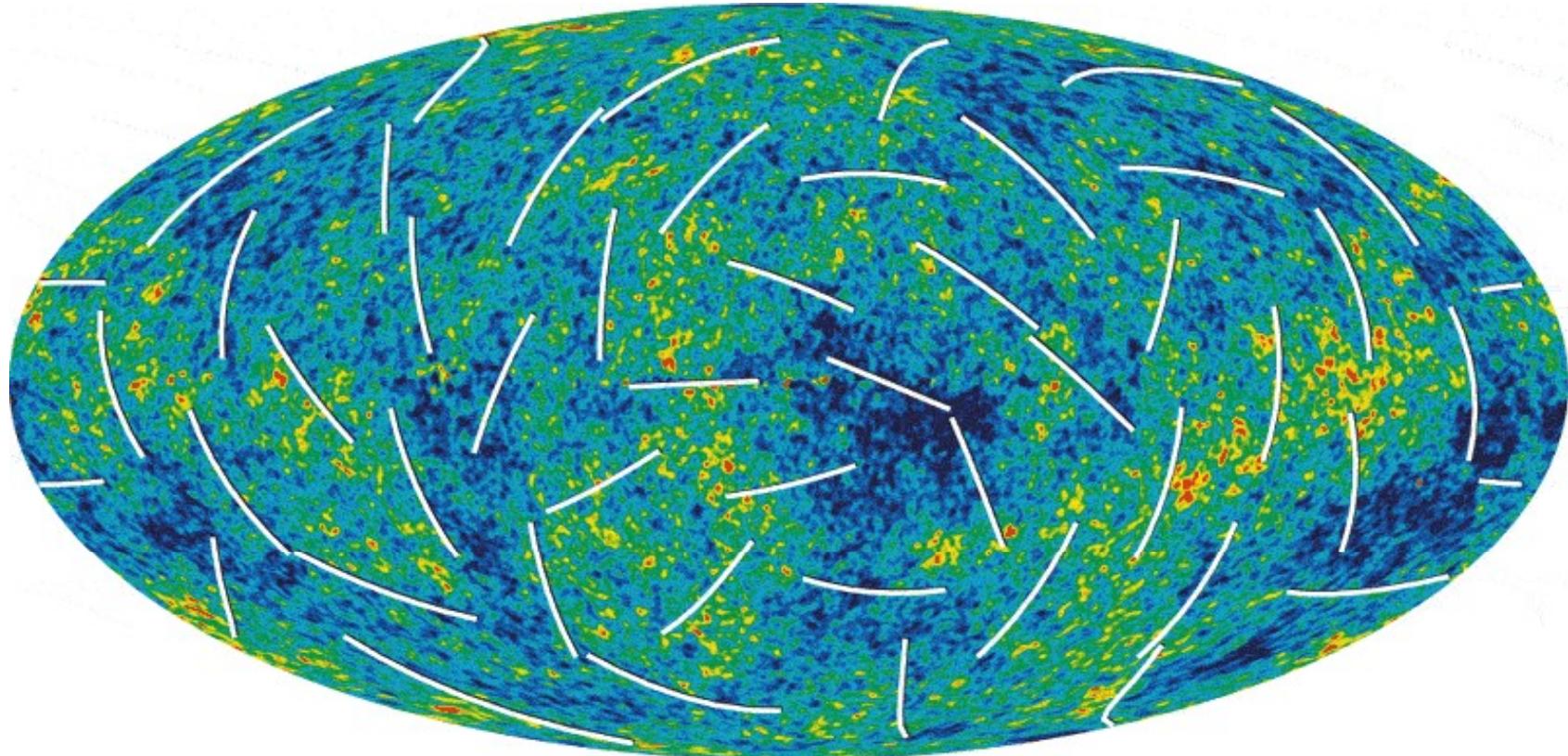
«За вклад в наше понимание эволюции Вселенной и места Земли в космосе». Пиблзу — «за теоретические открытия в физической космологии», Майору и Кело — «за открытие экзопланеты, обращающейся вокруг звезды солнечного типа».



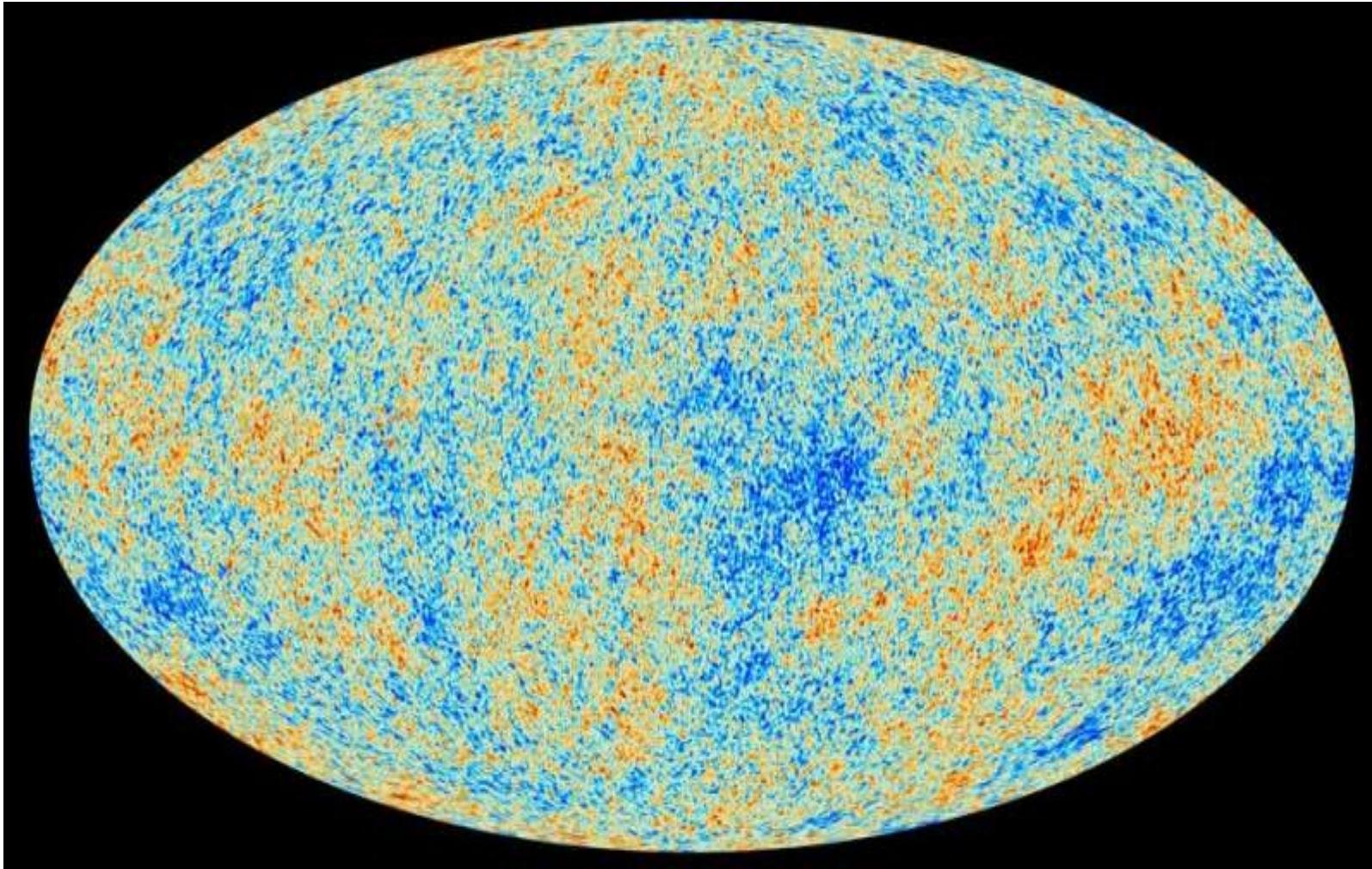
Краткая история Вселенной

- $\sim 10^{-43}$ с – начало классического расширения Вселенной
- ~ 100 с -- первичный нуклеосинтез: ядра H, D, T, изотопов He, Li и Be
- ~ 300 – 400 тыс. лет – эпоха рекомбинации (отделение излучения от вещества). Формирование реликтового излучения.
- ~ 300 млн лет – образование первых звезд. Первые взрывы сверхновых, обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами.
- ~ 1 - 13 млрд. лет -- Газ \rightarrow Звезды \rightarrow Газ \rightarrow Звезды ... Галактики и скопления галактик.

Карта реликтового радиоизлучения и его поляризации



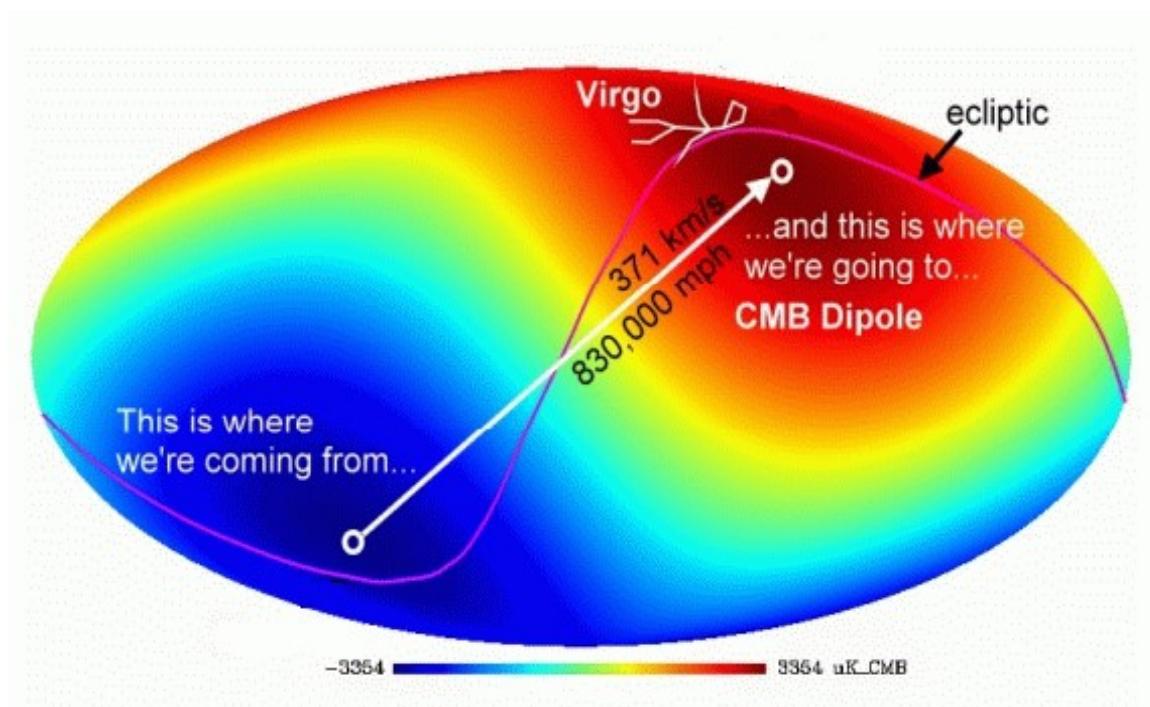
NASA's Wilkinson Microwave Anisotropy Probe WMAP has produced a new, more detailed picture of the infant universe. Colors indicate "warmer" (red) and "cooler" (blue) spots. The white bars show the "polarization" direction of the oldest light. This new information helps to pinpoint when the first stars formed and provides new evidence for the inflationary scenario of the big bang.



[космическую обсерваторию Планк](#) подтвердила, что наша Вселенная по большей части состоит из необычной и загадочной [тёмной энергии](#), и даже основная часть оставшейся материи тоже [тёмная](#). Плюс к этому, эксперимент Планк [впечатляюще точно установил](#) возраст Вселенной — около 13.8 миллиарда лет, чуть старше, чем дают [оценки](#) по различным средним параметрам, включая данные [спутника NASA WMAP](#) — а также измерил [температуру расширения Вселенной](#) — 67.3 (+/- 1.2) километров в секунду на мегапарсек, что чуть медленнее предыдущих оценок. Происхождение [некоторых особенностей](#) этой [карты, приведённой выше](#), остаётся неизвестным: например, почему вариации температуры на одном полушарии кажутся более сильными, чем на другом.

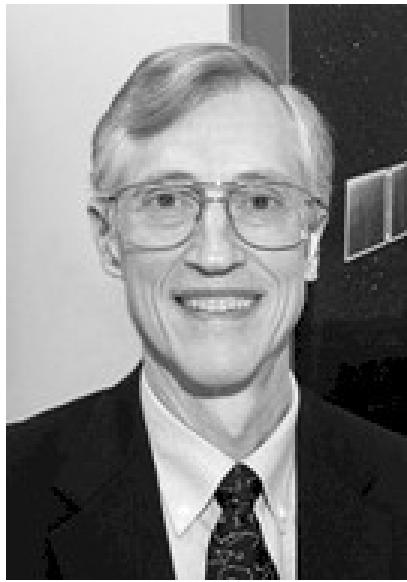
Диполь микроволнового фона: полёт сквозь Вселенную

*Распределение реликтового излучения как
абсолютная система координат*



$$dT = 3.365 \pm 0.027 \text{ mK}$$

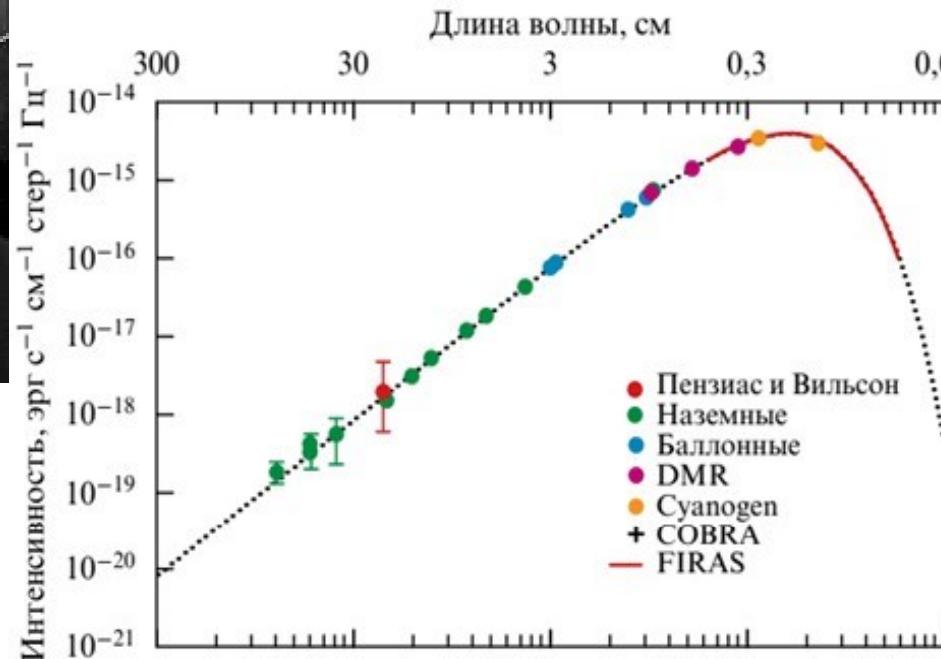
$$(l, b) = (264.4 \pm 0.3 \text{ deg}, 48.4 \pm 0.5 \text{ deg})$$



Дж. Мазер
(р. 1946)

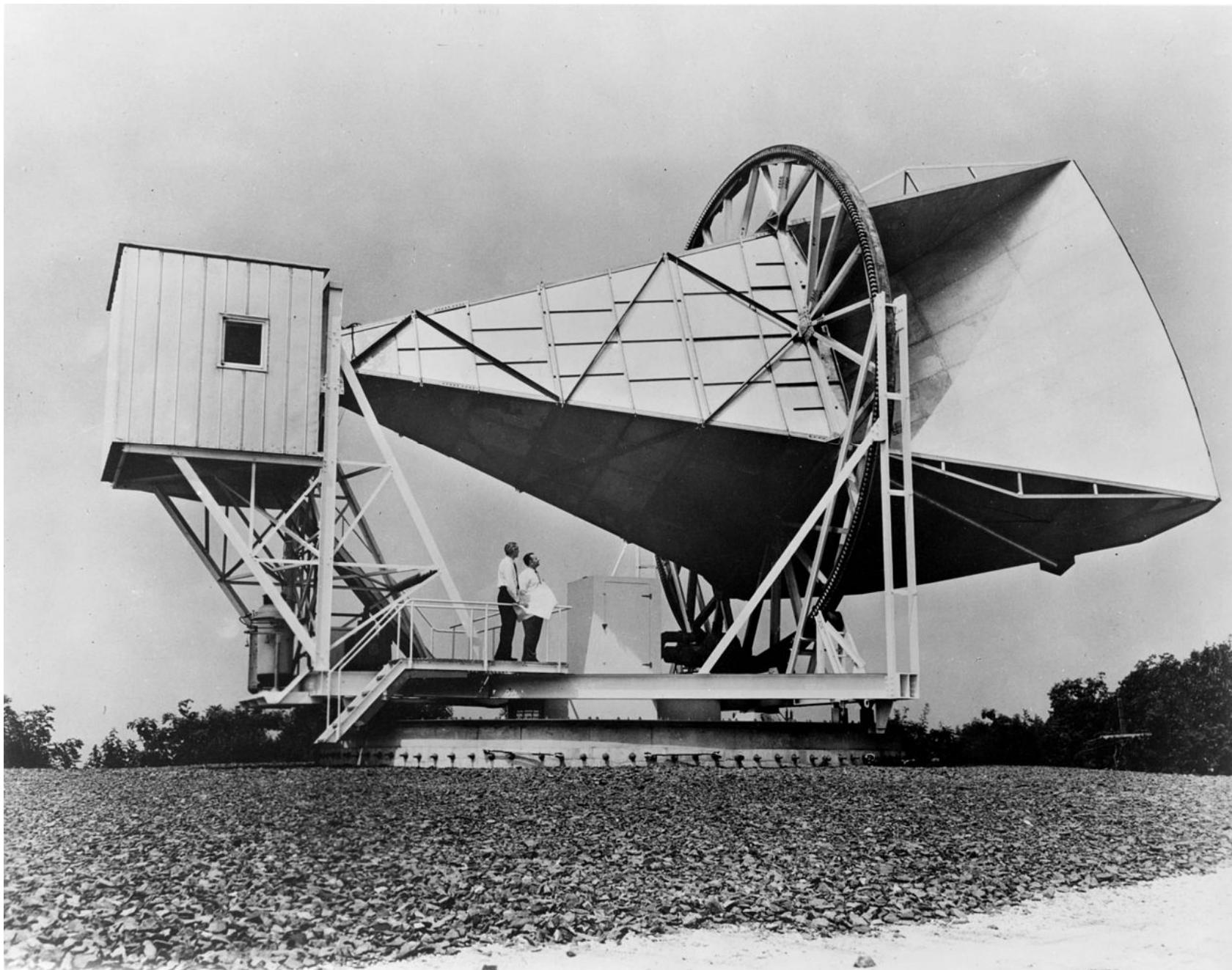


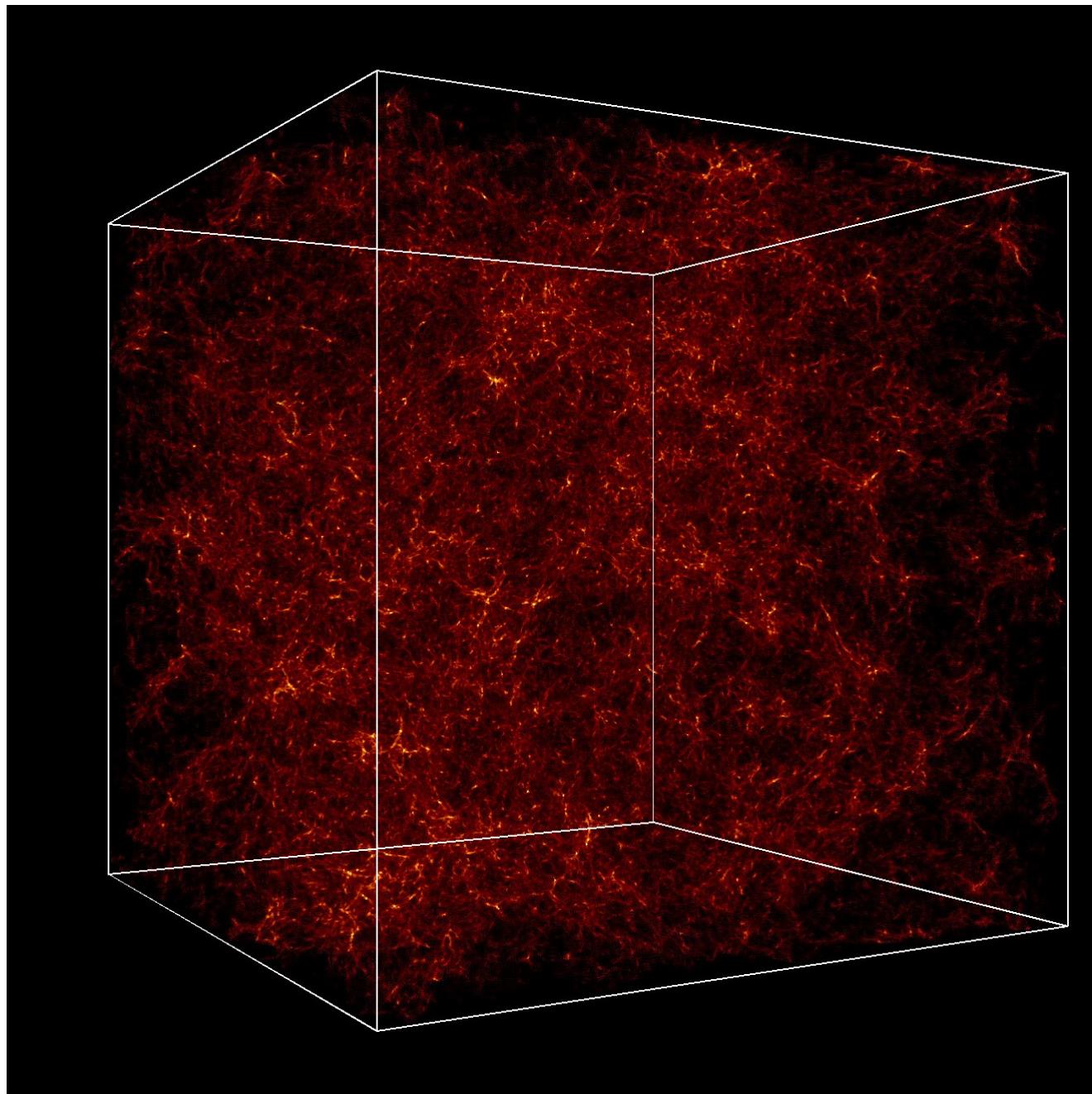
Дж. Смут
(р. 1945)

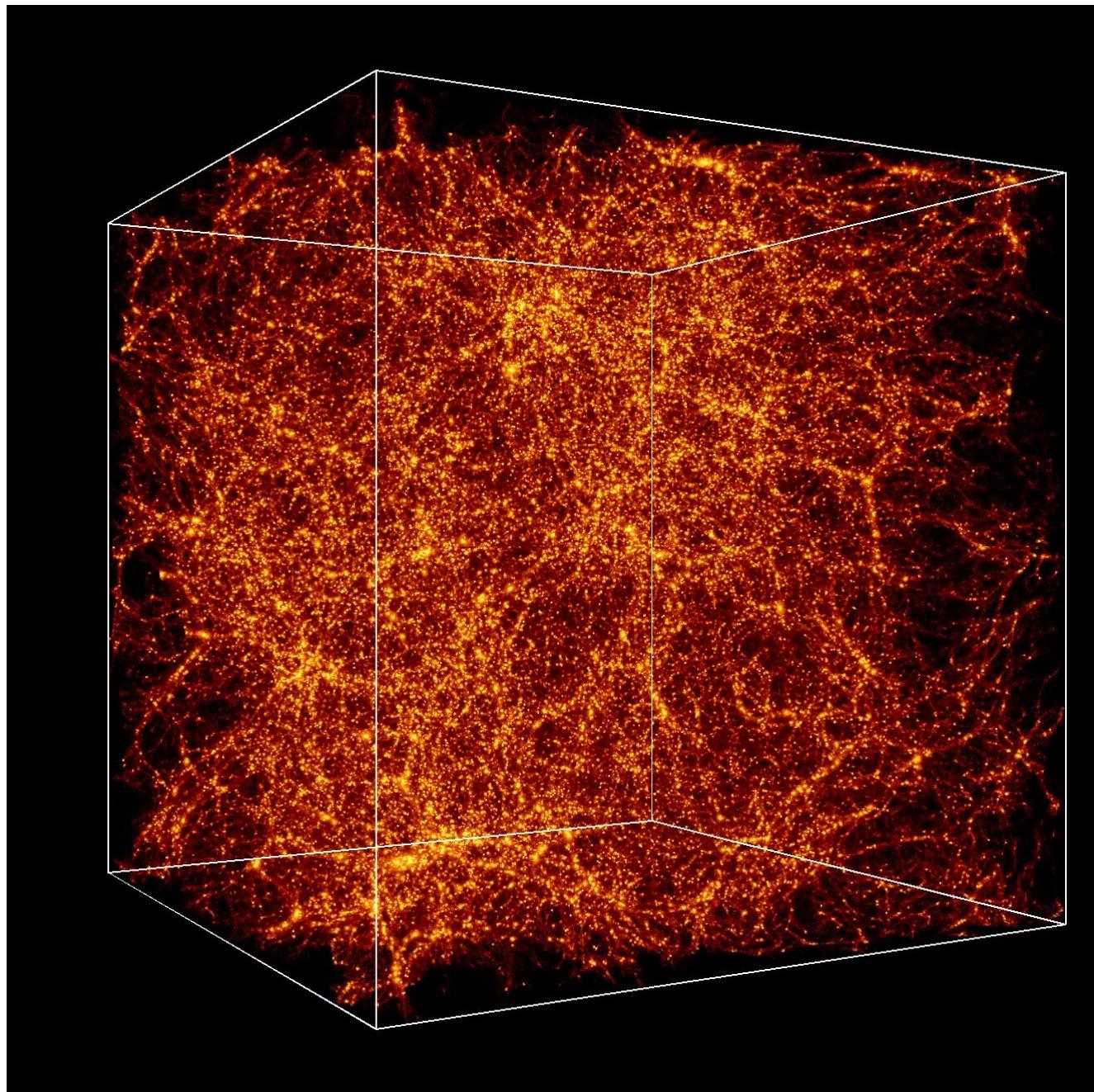


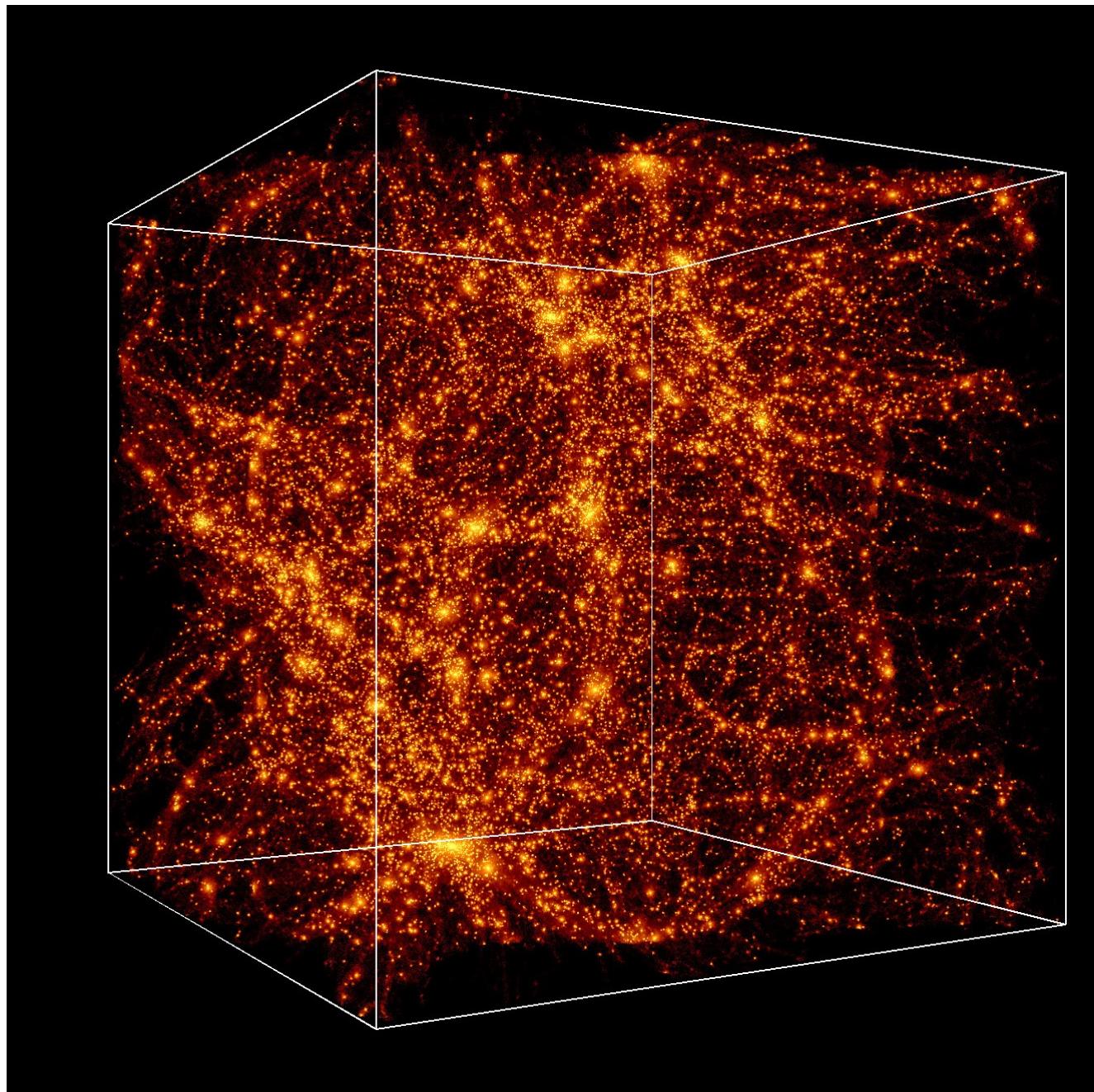
В 2006 г. Джону Мазеру и Джорджу Смуту была присуждена Нобелевская премия по физике за открытие ими чернотельной формы спектра и анизотропии космического микроволнового фонового излучения. Эти результаты были получены на основе измерений, выполненных с помощью спутника COBE, запущенного NASA в 1988 г. Результаты Дж. Мазера и Дж. Смута явились подтверждением происхождения Вселенной в результате Большого взрыва. Крайне малое различие в температуре космического фонового излучения $\Delta T/T \sim 10^{-4}$ является свидетельством механизма образования галактик и звезд.

Антенна, с помощью которой Пензиас и Уилсон открыли реликтовое излучение, 1964 г.









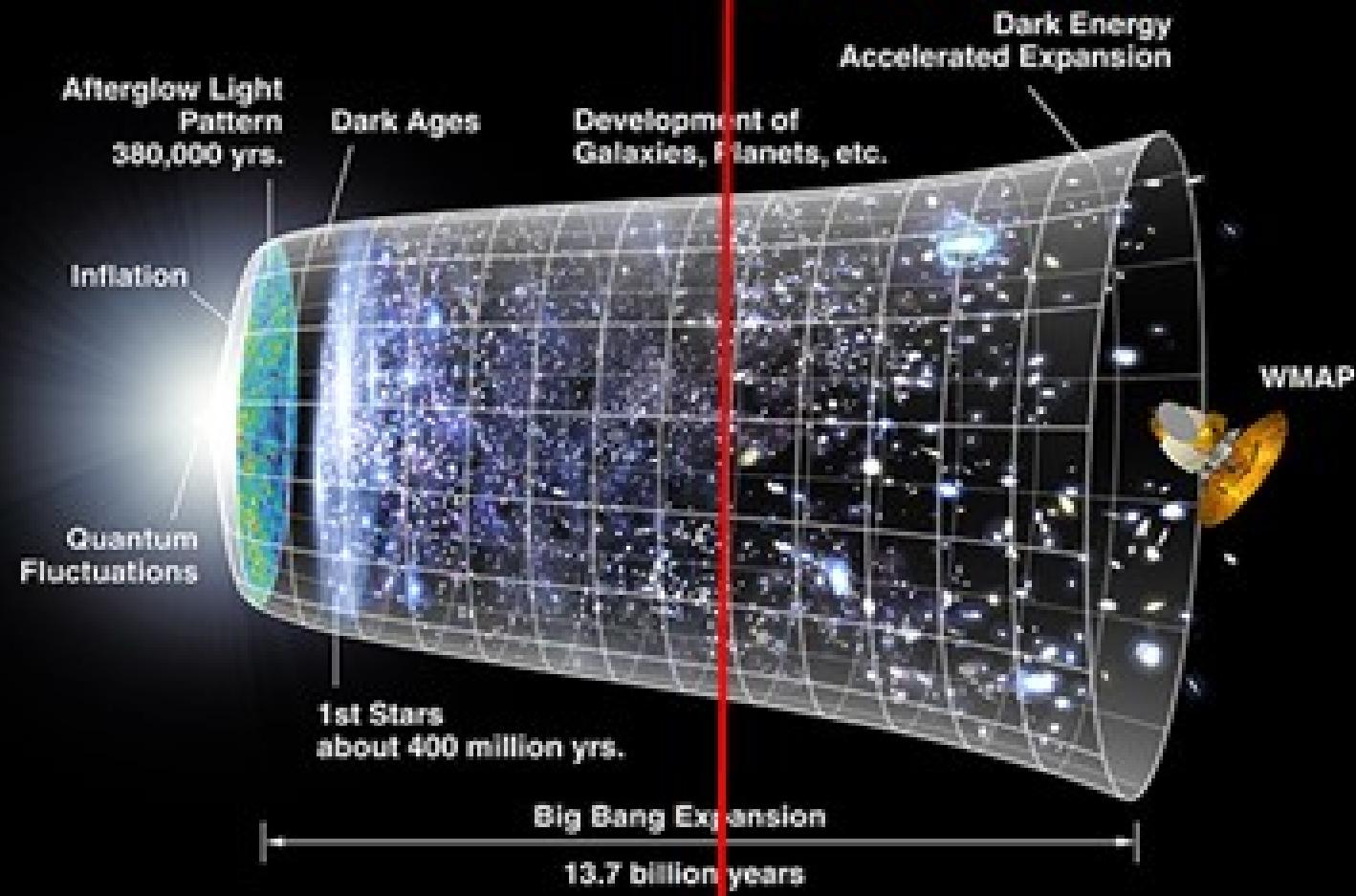


Эдвин Хаббл



Жорж Леметр

Первые массивные скопления



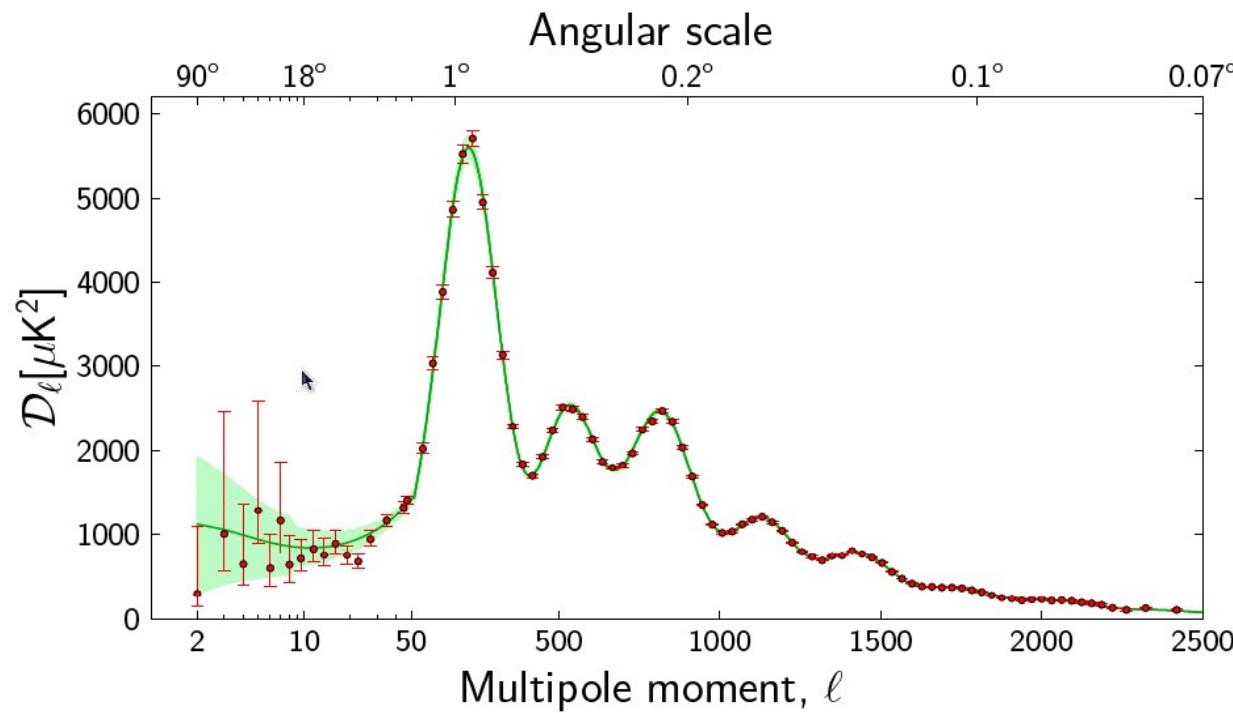
(~100 000 массивных скоплений в наблюдаемой Вселенной)

Простые тесты с СМВ

(CMB — Cosmic Microwave Background = РИ)

- 1) *Существует ли СМВ ?* Да
[сотни экспериментов с 1964г.]
- 2) *Чернотельно ли реликтовое излучение ?* Да
[COBE, Far InfraRed Absolutte Spectrophotomer]
- 3) *Есть ли неоднородности в распределении СМВ ?* Да
[COBE, Differential Microwave Radiometer]
- 4) *Каков их спектр мощности ?* Да
[объясняется только в рамках космологии $LCDM$]
- 5) *Растет ли температура РИ с красным смещением ?* Да
[пропорционально $(1+z)$]

Угловой спектр мощности РИ.



Сколько энергии попадает в пятна разного размера ?

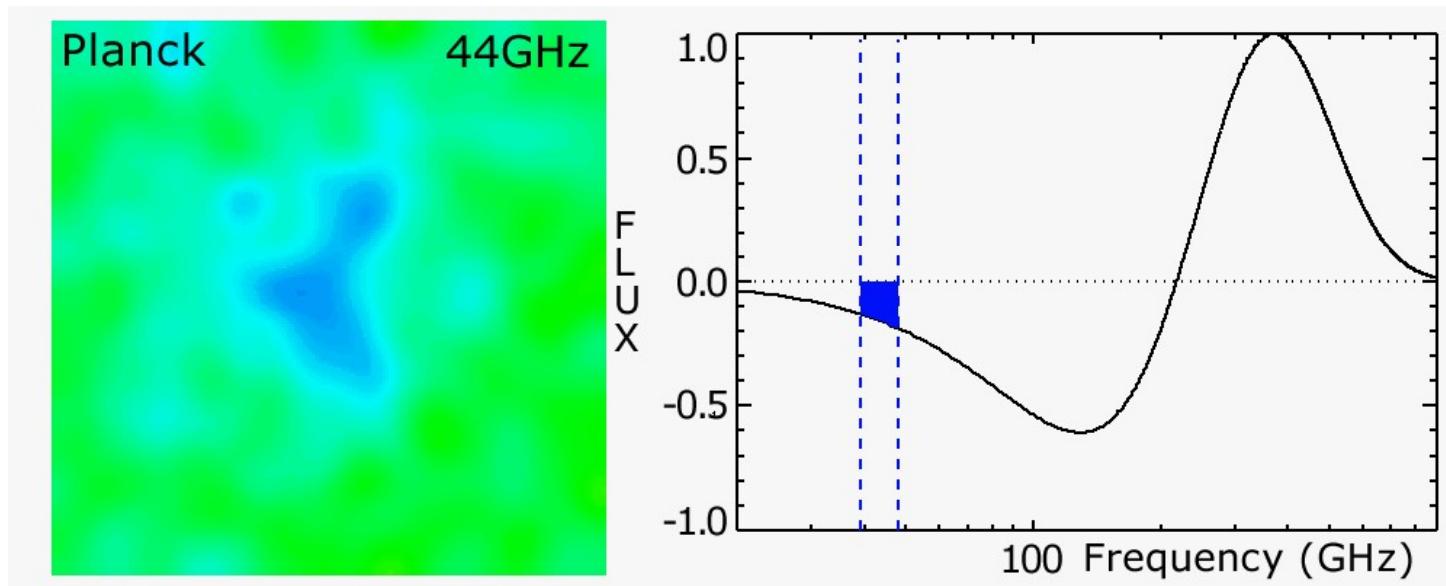
Реликтовое излучение: о чём речь?

Что отпечатывается в СМВ?

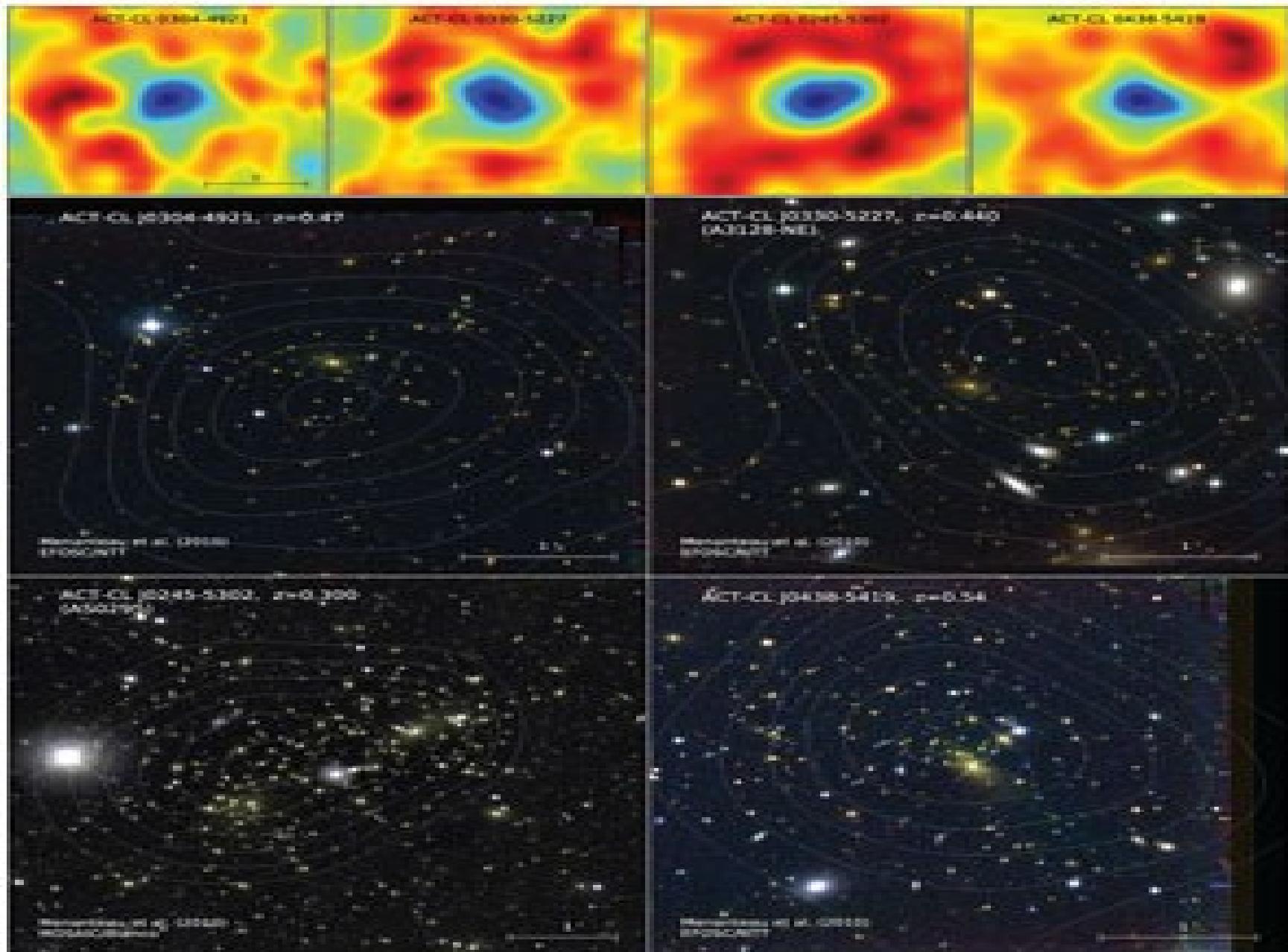
- 1) Первичные неоднородности вещества
(скалярная мода возмущений)
- 2) Скорость их роста в зависимости от размера
- 3) Их распределение в пространстве
- 4) Тензорная мода возмущений
(первичные грав. волны — В-мода поляризации)
- 5) Первичный хим. состав ($H \sim 75\%$, $He \sim 25\% + \dots$)

- 6) Эпоха реионизации от УФ света первых звезд
(изменение прозрачности среды и Е — мода поляризации)
- 7) Эффект Сакса-Вольфа (изменение частоты фотонов в меняющемся грав. потенциале формирующихся скоплений галактик и растущих вийдов)
- 8) Эффект Сюняева-Зельдovichа (обратный эффект Комптона на горячих электронах скоплений)

SZ-Эффект

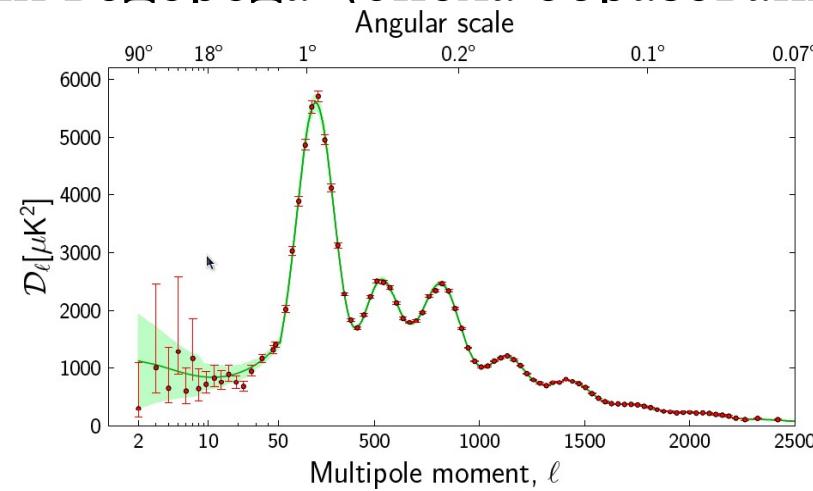
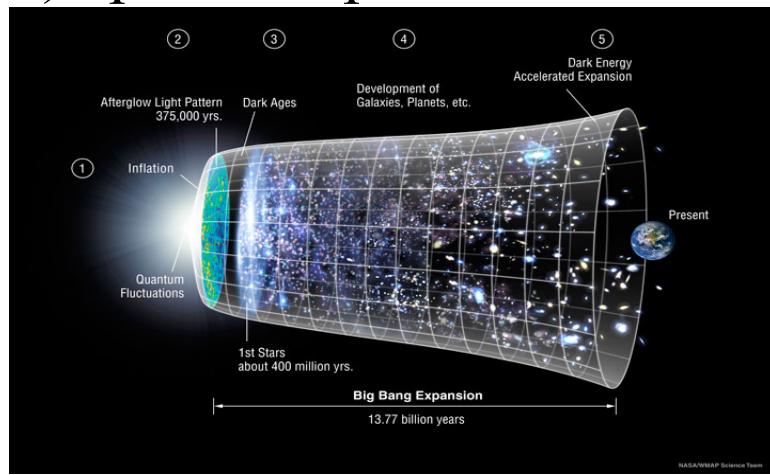


Тени в реликте от скопления галактик



6 основных космологических параметров:

- 1) плотность видимой (барионной) материи $\phi_b = 0.049$
- 2) плотность темной (холодной) материи $\phi_{\text{CDM}} = 0.259$
- 3) плотность темной энергии $\phi_{\odot} = 0.6911 +/- 0.0062$
- 4) амплитуда первичных флюктуаций $\ln(10^{10} A_s) = 3.064 +/- 0.023$
- 5) наклон спектра первичных флюктуаций $n_s = 0.9677 +/- 0.040$
- 6) время вторичной ионизации водорода (эпоха образования



Возраст $T_0 = 13.799 +/- 0.921$ млрд. лет, кривизна $\phi_K = 0.0008 +/- 0.0040$,

Существование реликтового излучения в 1948 году предсказали Альфер и Херман, но в их основополагающей работе не был раскрыт механизм его возникновения — то есть, отделение излучения от вещества, вызванное рекомбинацией. Этот процесс был впервые описан в 1968 году Пиблсом (Рекомбинация первичной плазмы, *Astrophysical Journal*, 1968) и независимо от него советскими физиками Я. Б. Зельдовичем, В. Г. Куртом и Р. А. Сюняевым в 1967 году (Рекомбинация водорода в горячей модели Вселенной, *Письма в ЖЭТФ*, 1969).

В 1971 году Пиблс опубликовал очень влиятельную монографию *Physical Cosmology*, которая стала учебником для двух поколений студентов и аспирантов. В следующем десятилетии Пиблз стал одним из главных создателей космологической модели плоской Вселенной, содержащей обычное вещество и холодную темную материю (CDM cosmological mode). Она сыграла немалую роль в развитии космологии вплоть до открытия ускоренного расширения Вселенной в самом конце прошлого века, когда ей на смену пришла модель с космологическим членом (Lambda-CDM cosmological mode). Пиблз внес большой вклад в анализ угловых спектров температуры реликтового излучения, которые предписываются этой моделью, и сравнение теоретических прогнозов с наблюдениями.

Открытие экзопланеты на орбите солнцеподобной звезды — горячий юпитер, вращающийся вокруг желтого карлика Гельветиоса в созвездии Пегаса

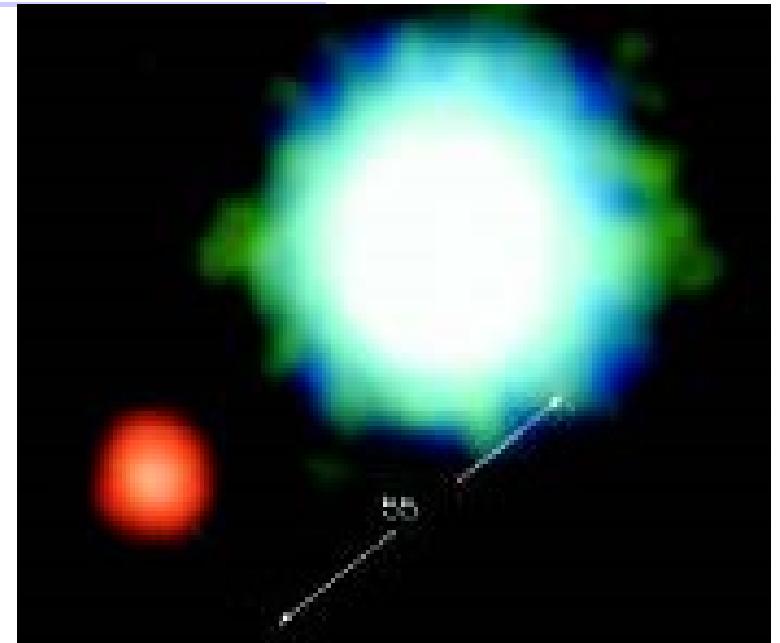
В 1995 году Кело вместе с Майором проводил на спектрографе ELODIE измерения, которые позволили обнаружить планету, вошедшую в историю астрономии. Было найдено изменение скорости звезды на 59 м/с (с точностью ~20%) за 4,2 дня (период обращения планеты).

Экзопланеты

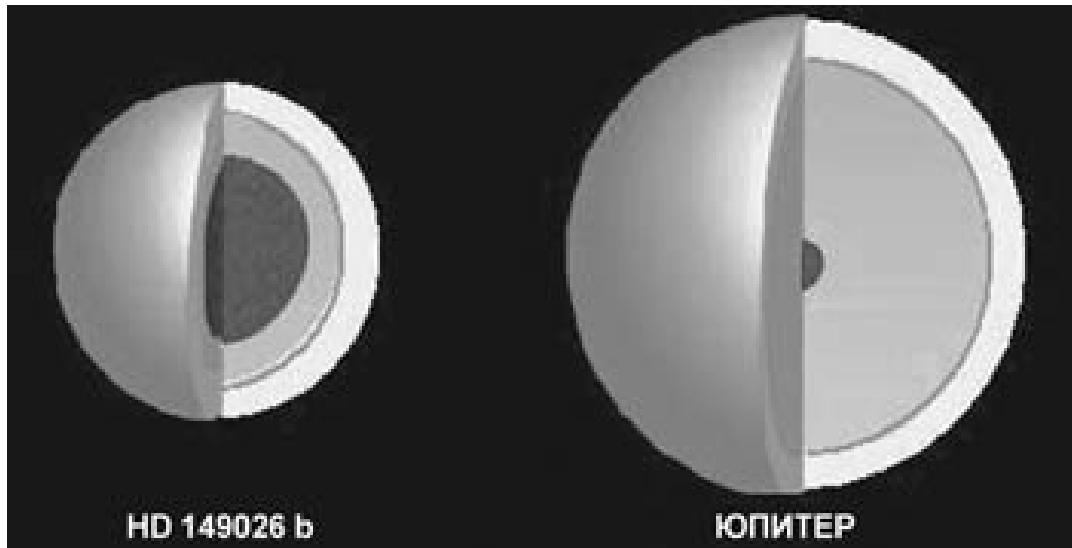
Сейчас известно более 4000 экзопланет
в более чем 3000 [планетных системах](#).



Звезда с
экзопла-
нетами

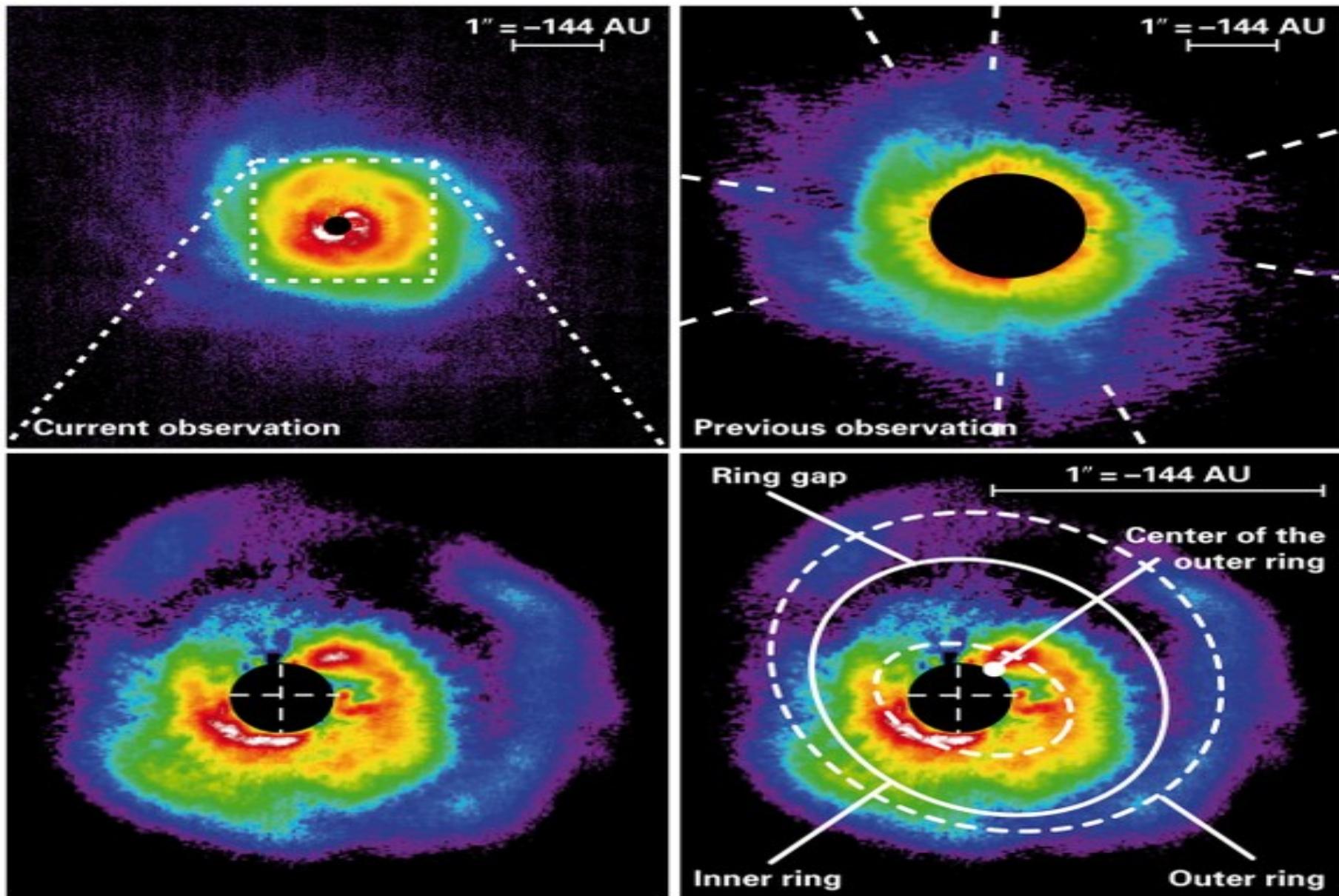


Вид из космоса
на звезду с
экзопланетой



Строение экзопланеты

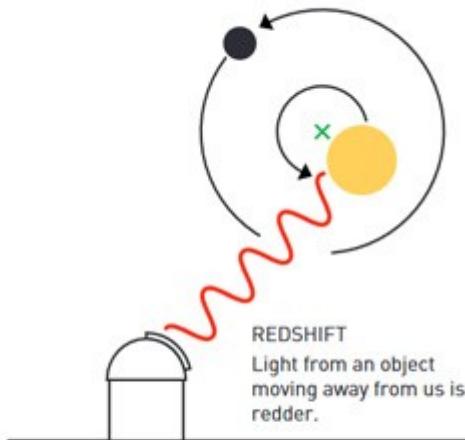
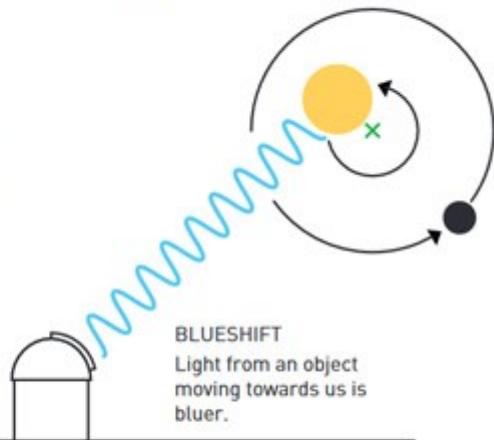
Протопланетная система LkCa15



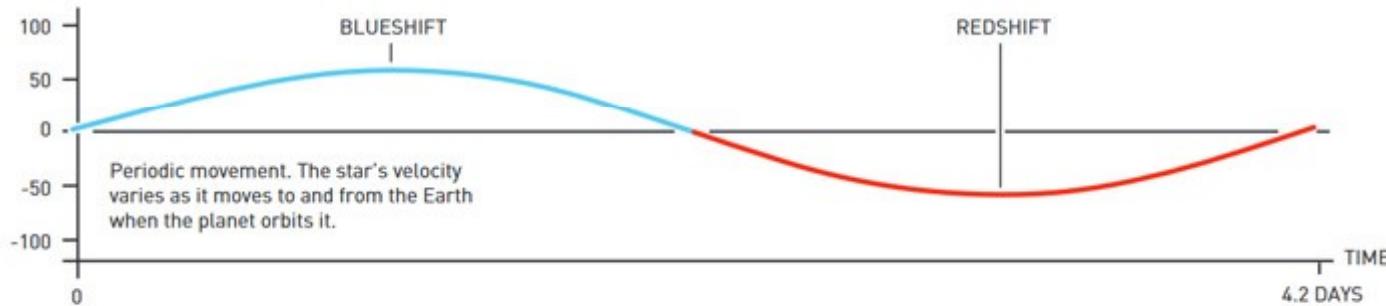
FINDING PLANETS USING THE RADIAL VELOCITY METHOD

The star moves as it is affected by the gravity of its planet. Seen from the Earth, the star wobbles backwards and forwards in the line of sight. The speed of this movement, its radial velocity, can be determined using the Doppler effect, because the light from a moving object changes colour.

STAR ● EXOPLANET ✕ CENTRE OF MASS



THE STAR'S VELOCITY
TOWARDS THE EARTH (M/S)



©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

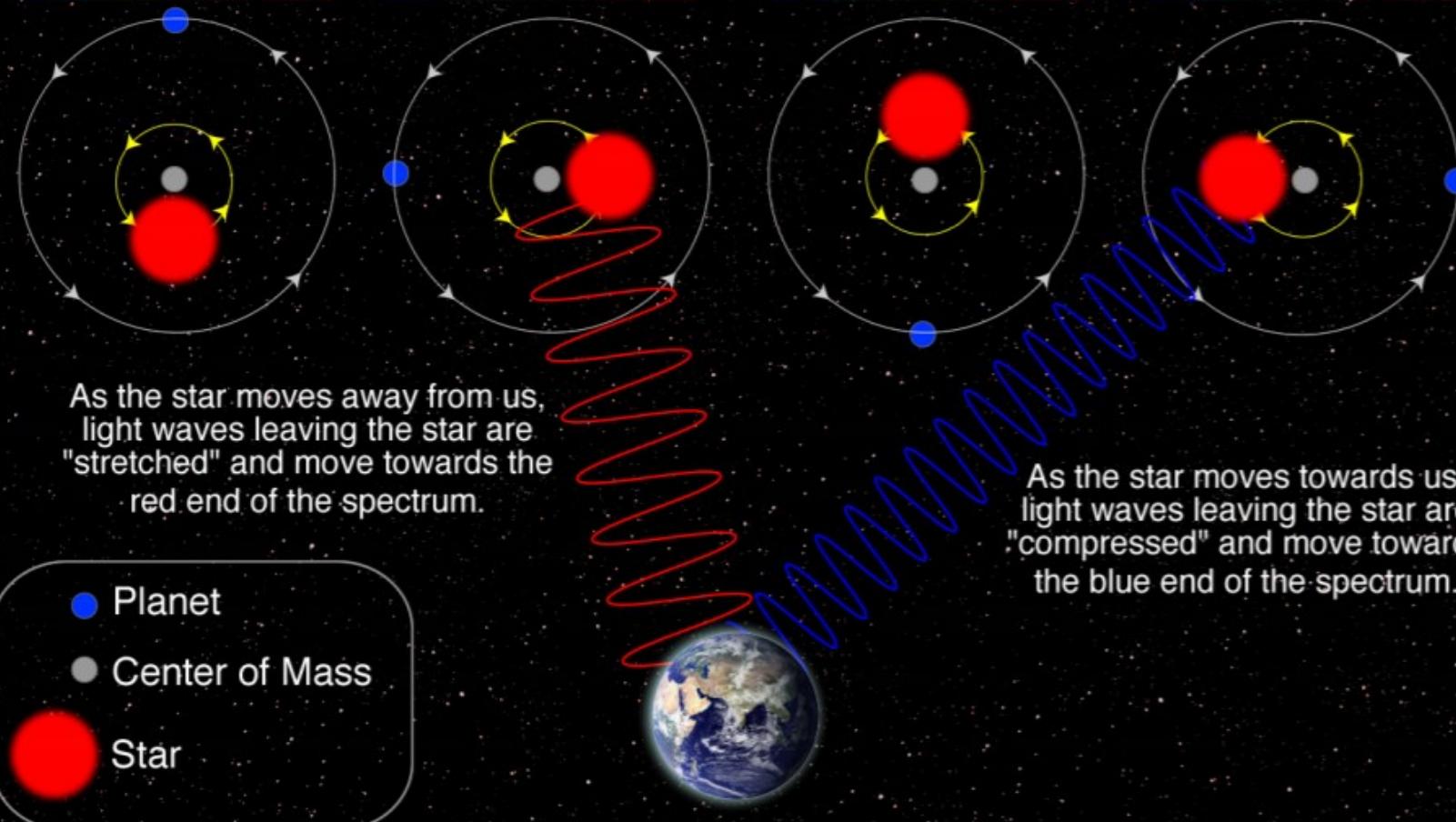
Среди многочисленных охотников за экзопланетами вырвались вперед три миниколлектива. Один составили Кэмпбелл и Уолкер, второй — американцы [Джеффри Марси](#) и Пол Батлер (химик, но с астрономическими устремлениями), и третий — Мэйор и Кело. Канадцы вполне могли добиться успеха первыми, поскольку больше других сделали для разработки приборов, позволяющих заметить звездные качели. Однако им не повезло — в 1994 году они опять сделали заявку на возможное открытие экзопланеты, но их выводы не подтвердились. Американцам удача улыбнулась тоже никак не желала. В том же 1994 году Марси сообщил, что они отмониторили треть списка отобранных звезд, но положительных результатов так и не получили.

Radial Velocity Method

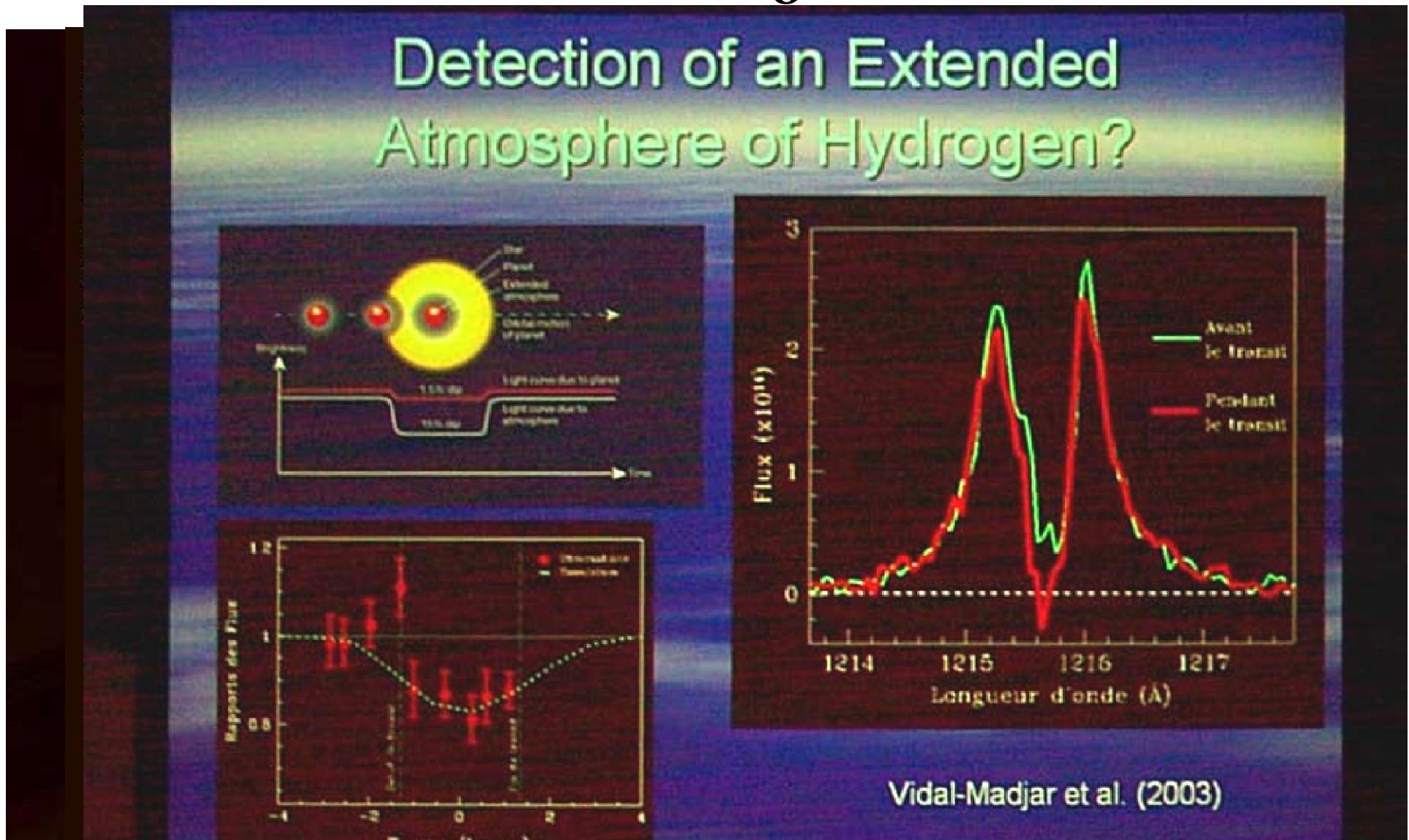
The star and planet orbit their common center of mass.

Spectral lines move towards the red as the star travels away from us.

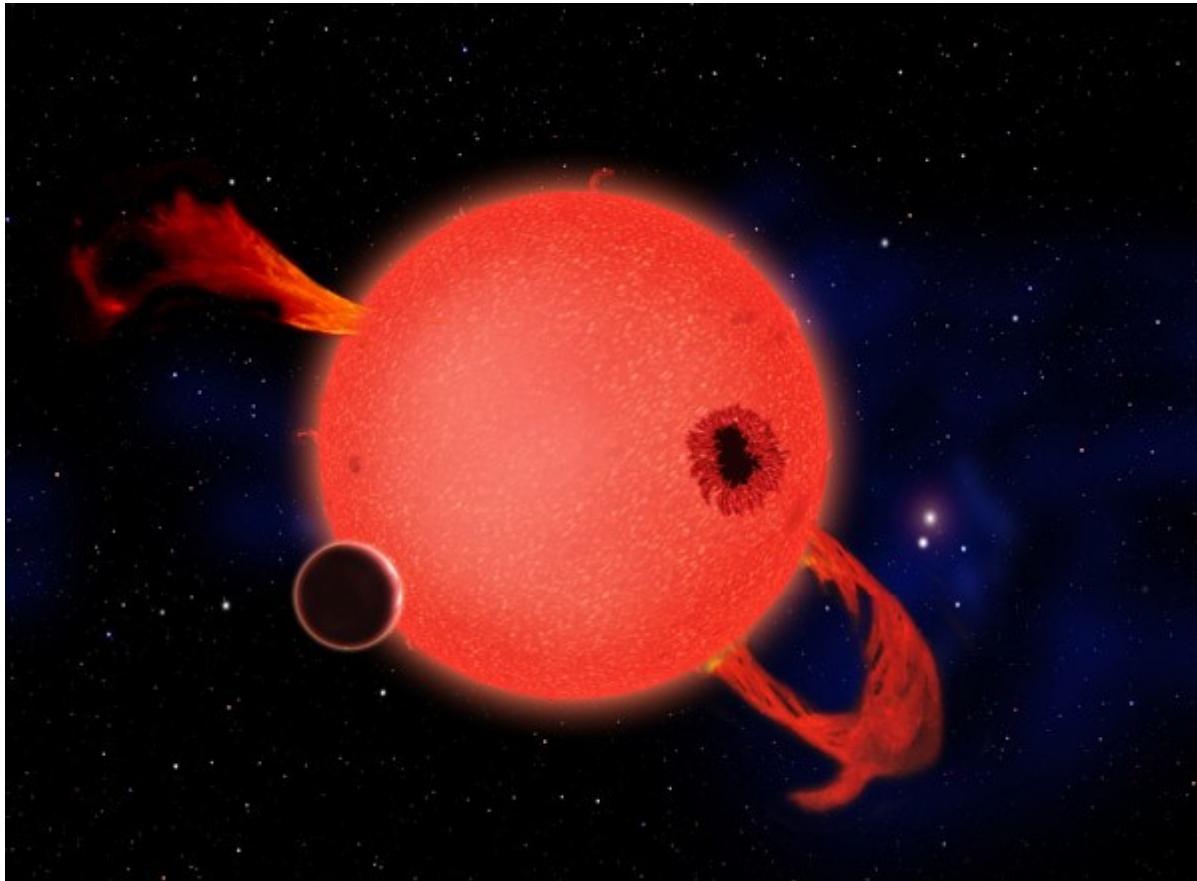
Spectral lines move towards the blue as the star travels towards us.



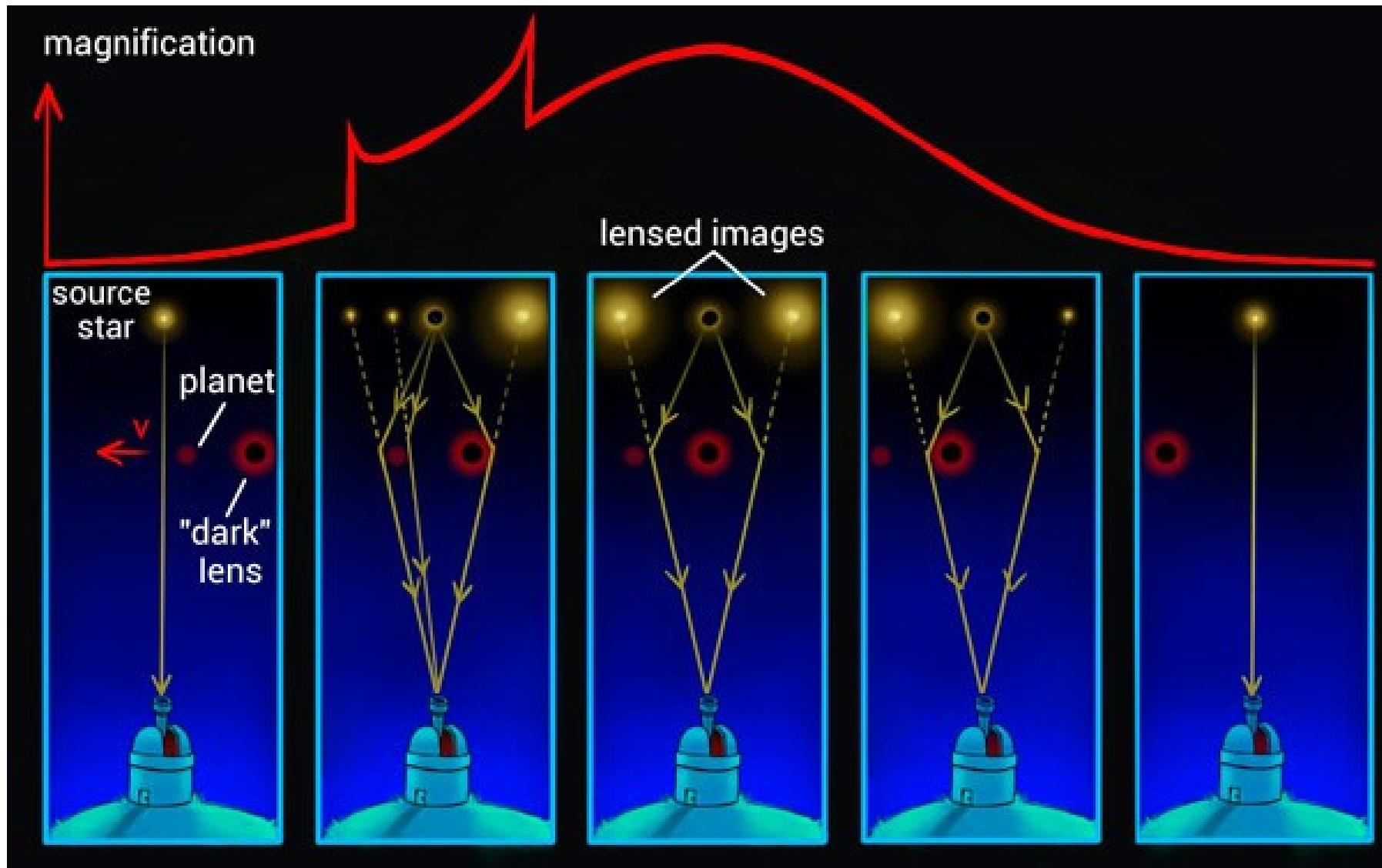
Транзиты – мощный инструмент



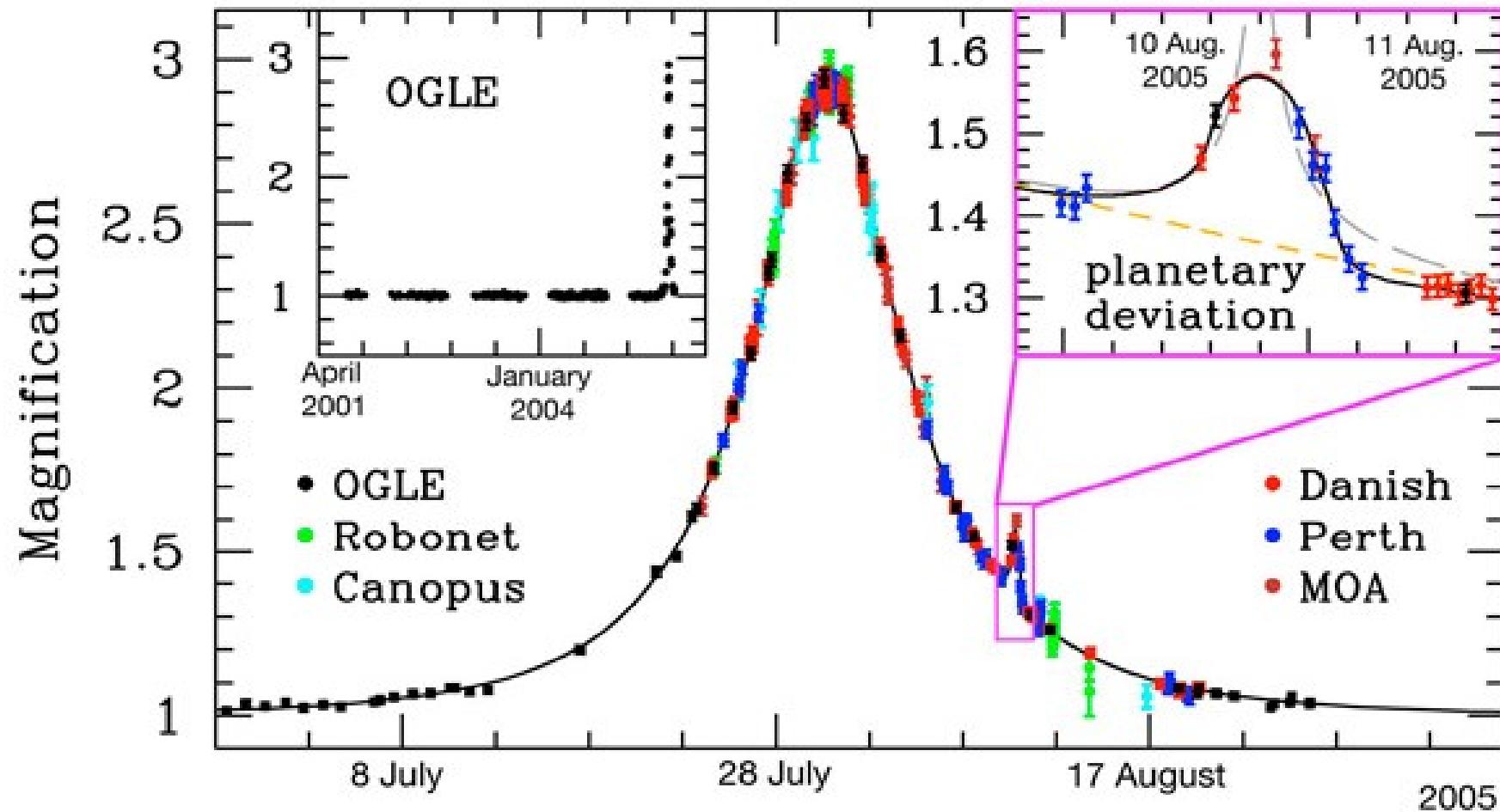
Экзопланета, увиденная в гравитационную линзу



Сейчас счет открытым экзопланетам идет на тысячи, причём подавляющее большинство из них были обнаружены методом транзитов или методом радиальных скоростей. Недавно две группы астрономов, ищущие экзопланеты на телескопах в Новой Зеландии и Чили, выпустили статью, в которой описали открытие новой планеты пока еще довольно экзотическим методом гравитационного микролинзирования. Эта планета имеет массу порядка Сатурна и обращается вокруг красного карлика, находящегося от нас на расстоянии 6,43 килопарсека.

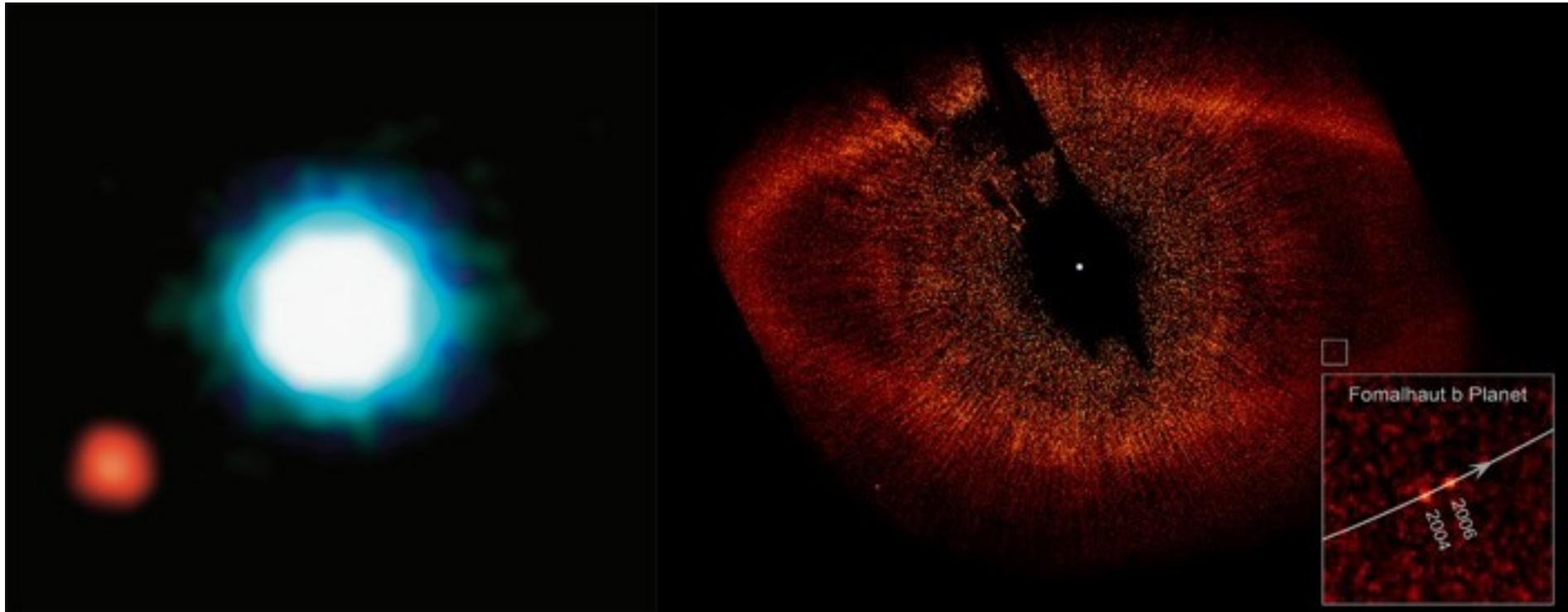


Схематическое изображение события микролинзирования и изменения кривой блеска. Свет фоновой звезды усиливается, когда она оказывается на одной оси с близлежащей звездой. Если рядом со второй звездой есть планета, то образуется дополнительный пик на кривой блеска.



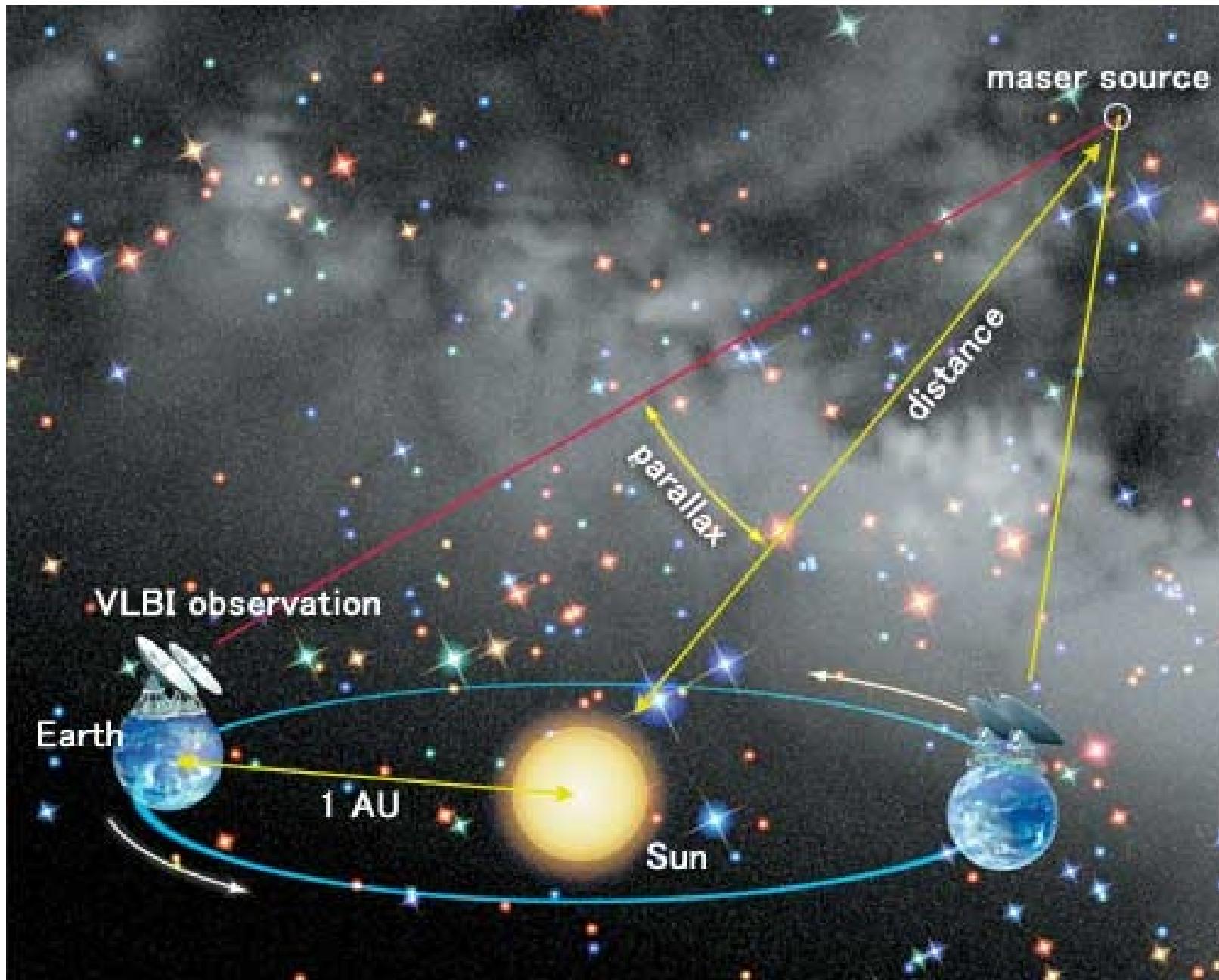
Обнаружение экзопланеты OGLE-2005-BLG-390 методом микролинзирования.

Основной пик, пришедшийся на 30 июля, — это усиление света фоновой звезды более близкой звездой, а вот маленький пик в районе 10 августа (он увеличен и вынесен в *отдельную рамку*) — это и есть усиление яркости фоновой звезды за счёт искривления пространства планетой. Данные получены тремя разными телескопами, показаны наблюдения в течение двух месяцев.



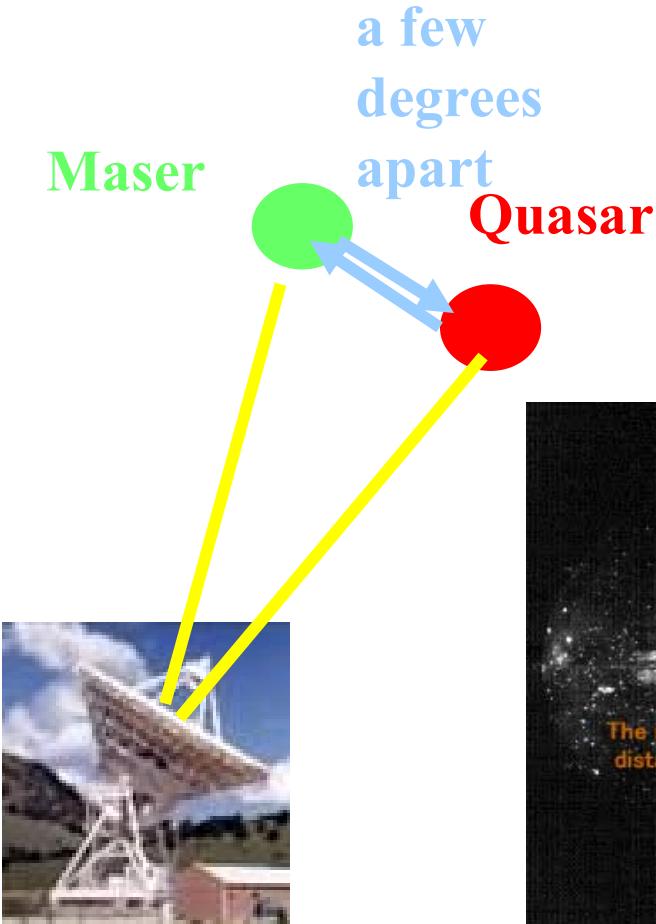
Слева: коричневый карлик 2М 2107 и его планета-компаньон 2M1207b; снимок сделан в ИК-диапазоне на телескопе [VLT](#) в 2004 году. Это первая экзопланета, которую удалось «сфотографировать» непосредственно. Справа: [протопланетный диск](#), окружающий звезду [Фомальгаут](#). Во врезке показано смещение планеты [Дагон](#) за два года.

Космические мазеры и триангуляция нашей Галактики



With fast-switching phase referencing position uncertainties of $\approx 10 \mu\text{arcsecond}$ can be reached

Phase referencing:



- VLBA: Switch every 15 second between maser and quasar. 50% duty cycle
- VERA: Have one beam each directed to maser and quasar

