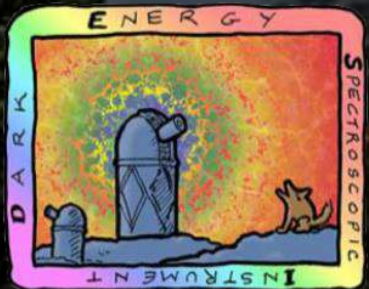


Recent results from DESI*

(Status of the Λ CDM)



*Dark Energy Survey Instrument

Сенсация!

The New York Times

A Tantalizing 'Hint' That Astronomers Got Dark Energy All Wrong

Scientists may have discovered a major flaw in their understanding of that mysterious cosmic force. That could be good news for the fate of the universe.

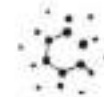
 / Sciences

DÉCRYPTAGE - La mesure de 6 millions de galaxies par un télescope d'un nouveau type dévoile une variation inattendue de l'accélération de l'expansion du cosmos depuis le big bang.

SCIENCES
ET
AVENIR

 UNIVERS

"L'énergie noire pourrait avoir évolué au fil du temps", selon Michael Levi, directeur de la collaboration DESI



Quanta magazine

Dark Energy May Be Weakening, Major Astrophysics Study Finds

A generation of physicists has referred to the dark energy that permeates the universe as "the cosmological constant." Now the largest map of the cosmos to date hints that this mysterious energy has been changing over billions of years.

Уравнение Фридмана

$$(1) \quad \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi}{3} G\rho + \frac{1}{3}\Lambda - \frac{\kappa c^2}{a^2}$$

уравнение Фридмана
(решение ОТО для изотропной и однородной Вселенной –
Космологический принцип)

$$(2) \quad \dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0$$

локальное уравнение непрерывности

$\kappa = -1$ гиперболическая (открытая) Вселенная

$\kappa = 0$ **плоская (евклидова) Вселенная**

$\kappa = +1$ сферическая (закрытая) Вселенная

ρ – плотность вещества

p – давление

$a(t)$ – масштабный фактор

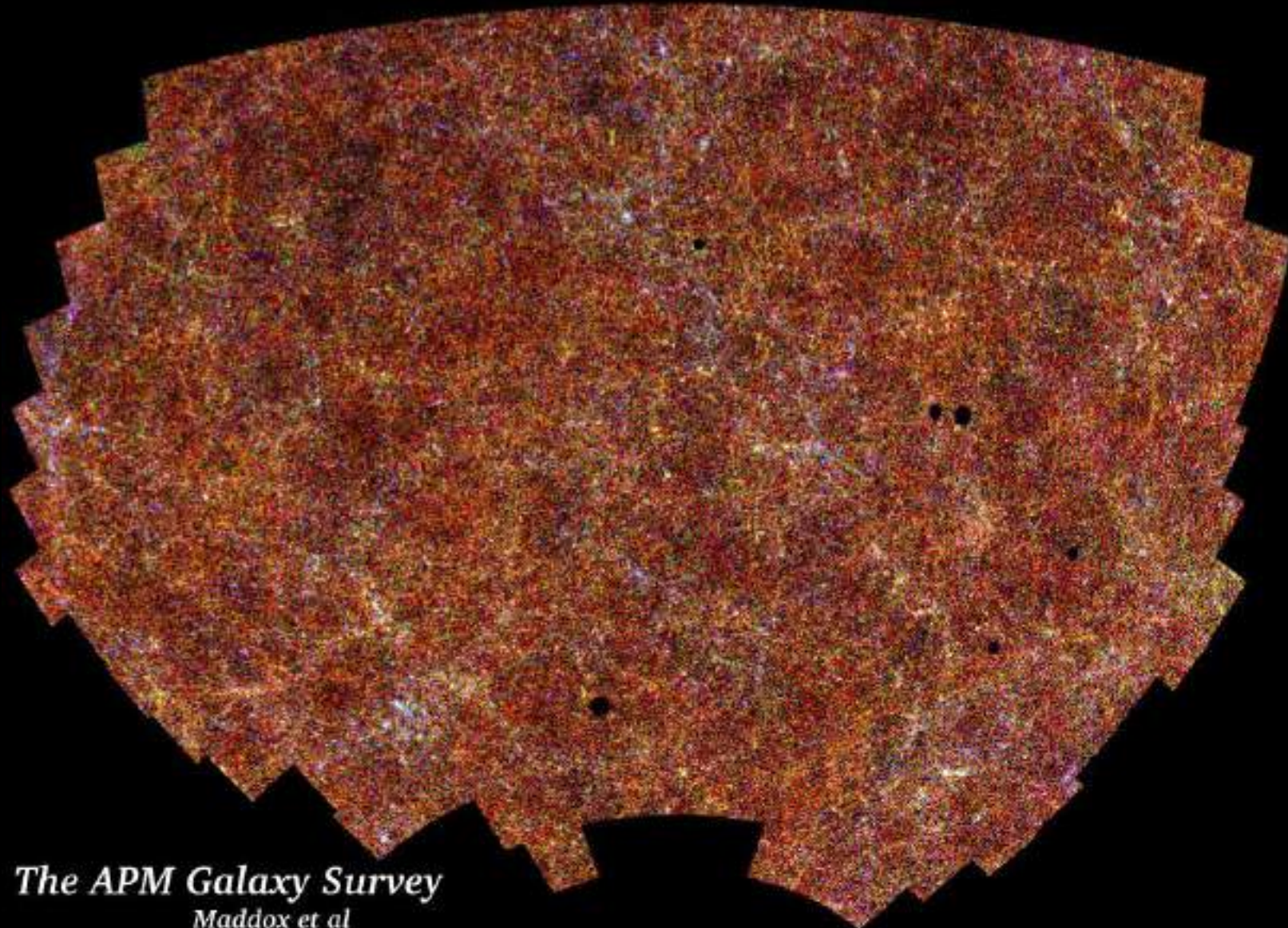
$$H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$$

– параметр Хаббла ($\dot{a} \equiv \frac{da}{dt}$);

Для решения полученных уравнений необходимо добавить **уравнение состояния вещества** (связь между плотностью энергии ρ и давлением p).

Космологический принцип

На ОЧЕНЬ БОЛЬШИХ расстояниях Вселенная является однородной и изотропной.



The APM Galaxy Survey
Maddox et al

Красное смещение

Для фотонов $ds = 0$, тогда можно показать, что:

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{рег}} - \lambda_{\text{исп}}}{\lambda_{\text{исп}}} = \frac{a(t_0)\lambda - a(t)\lambda}{a(t)\lambda} = \frac{a(t_0)}{a(t)} - 1$$

То есть космологическое покраснение фотонов отражает изменение масштабного фактора со временем:

$$\frac{a_0}{a} = 1 + z$$

Таким образом, в отличие от эффекта Доплера, фотон «чувствует» расширение Вселенной **в процессе распространения**, что сказывается на его физической длине волны.

Эволюция средней плотности

$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} (\rho + p) = 0$$

1) Нерелятивистская материя: $\omega = 0, p = 0$

$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho = 0$$
$$\rho_m = \rho_{m,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3 = \rho_{m,0} (1 + z)^3$$

2) Релятивистская материя (фотоны): $\omega = 1/3, p = \rho/3$

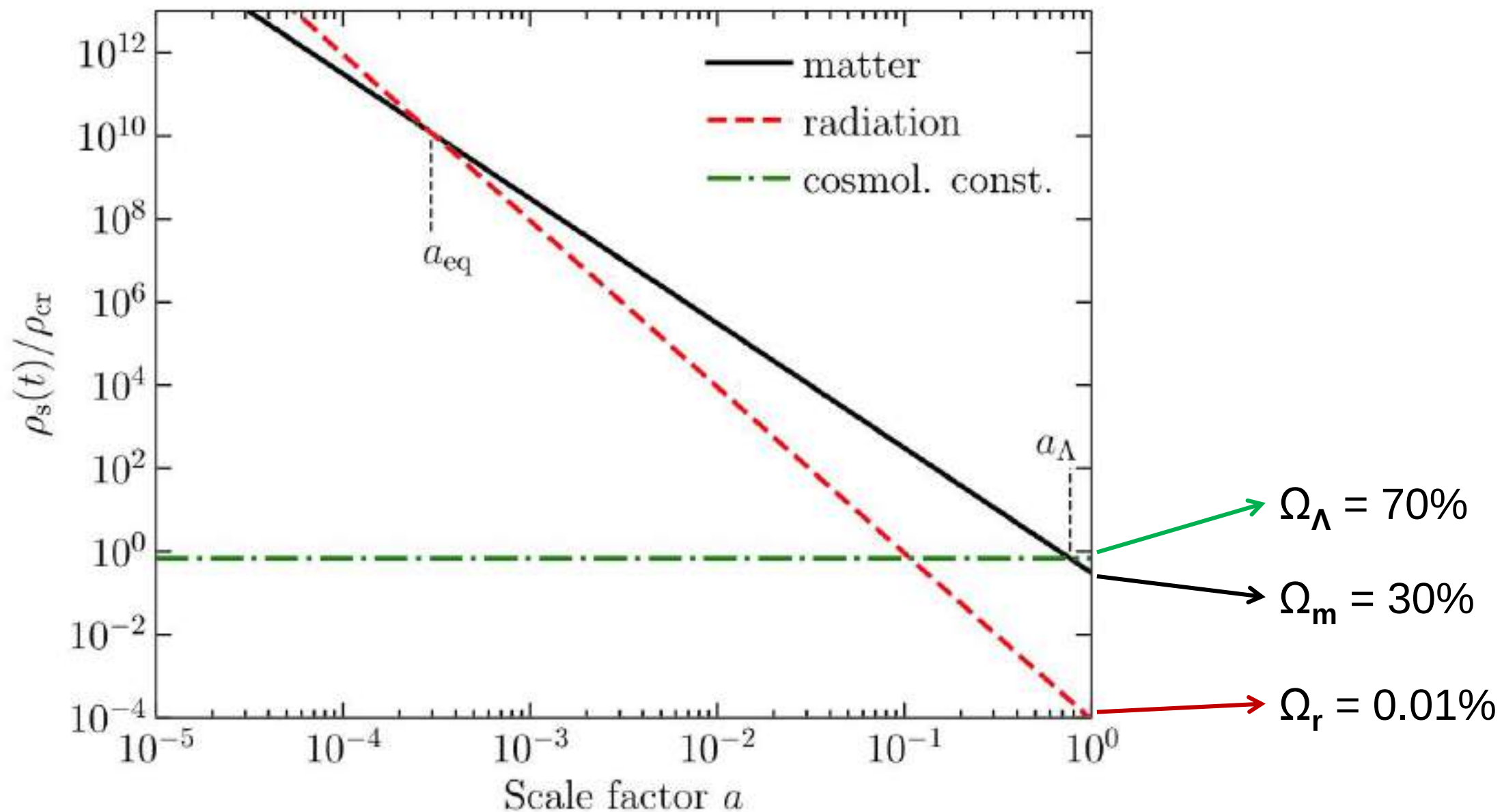
$$\dot{\rho} + 4 \frac{\dot{a}}{a} \rho = 0$$
$$\rho_r = \rho_{r,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^4 = \rho_{r,0} (1 + z)^4$$

3) Темная энергия: $\omega = -1, p = -\rho$

$$\dot{\rho} = 0$$
$$\rho_\Lambda = \text{const}$$

Зависимость от масштабного фактора у разных вкладов существенно различается. То есть на различных этапах эволюции (эпохах) разные вклады в энергию являются доминирующими и определяют характер расширения Вселенной!

Эволюция средней плотности



Уравнение Фридмана

$$\left[H^2 - \frac{8\pi}{3} G(\rho_m + \rho_r + \rho_\Lambda) \right] a^2 = -\kappa c^2$$

Введем критическое значение плотности, при которой левая часть уравнения равна нулю:

$$\rho_c \equiv \frac{3}{8\pi G} H^2 \quad \text{– критическая плотность энергии Вселенной –} \quad \rho_{c,0} \equiv \frac{3}{8\pi G} H_0^2 \simeq \frac{5.7 m_{\text{пр}}}{\text{м}^3}$$

Вклады различных компонент в полную плотность будем измерять в долях от критической плотности, то есть:

$$\Omega_j = \frac{\rho_j}{\rho_c} \qquad \sum_j \Omega_j = \Omega$$

тогда:

$$H^2 [1 - (\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda)] a^2 = -\kappa c^2$$

Эволюция параметра Хаббла

$$H(z) = H_0 \left[\Omega_{r,0} \left(\frac{1}{a} \right)^4 + \Omega_{m,0} \left(\frac{1}{a} \right)^3 + \Omega_{\Lambda} + (1 - \Omega_0) \left(\frac{1}{a} \right)^2 \right]^{1/2}$$

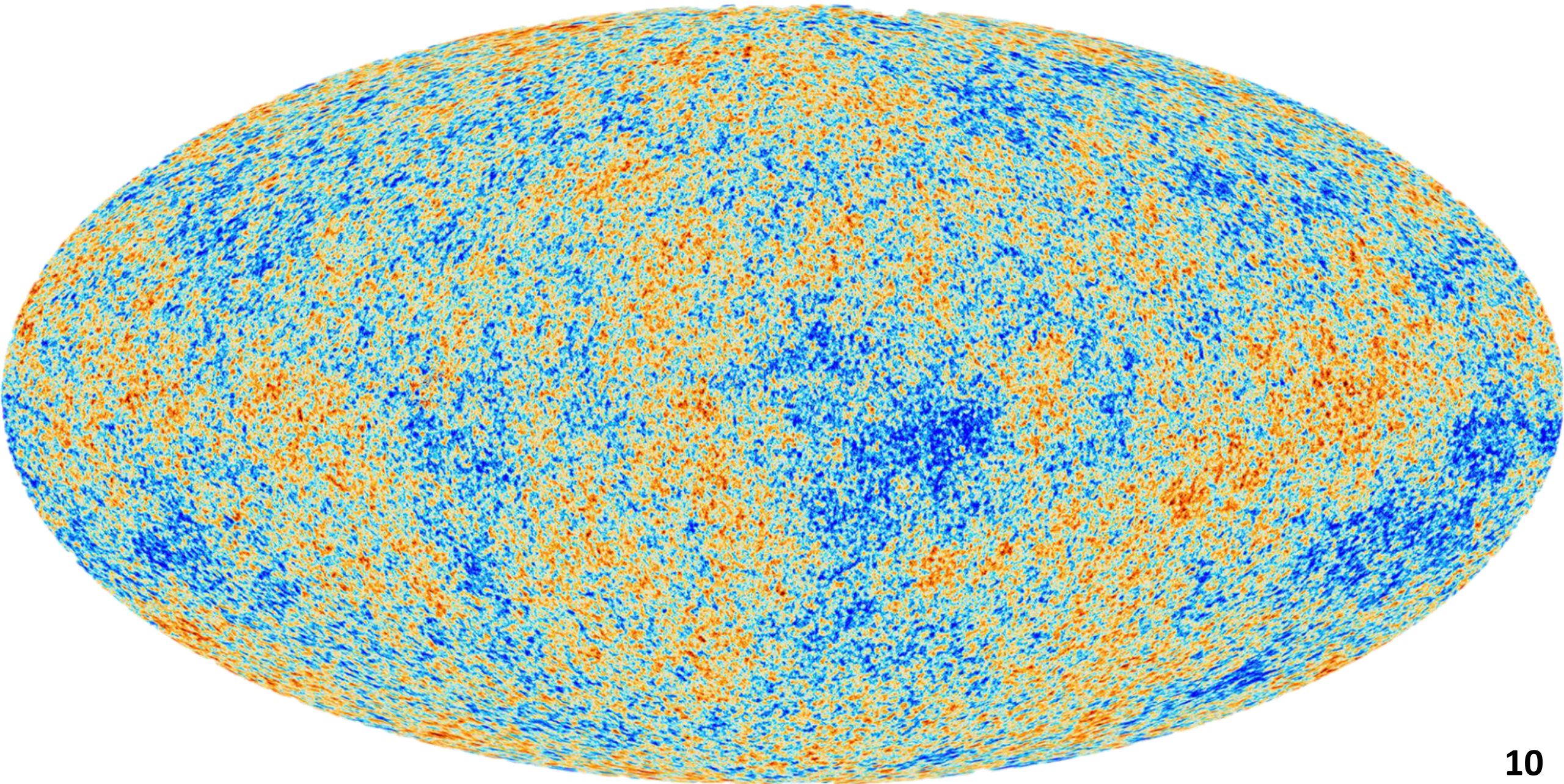
Величину $(1 - \Omega_0)$ часто обозначают Ω_{κ} – вклад кривизны пространства в плотность энергии. Как мы увидим, современные наблюдательные данные с высокой точностью согласуются с $\Omega_0 = 1$. В дальнейшем для простоты будем считать $\kappa = 0$ и $\Omega_{\kappa} = 0$ (плоская Вселенная).

$$H(z) = H_0 \left[\Omega_{r,0} \left(\frac{1}{a} \right)^4 + \Omega_{m,0} \left(\frac{1}{a} \right)^3 + \Omega_{\Lambda} \right]^{1/2}$$

$$H_0 = h \times \left(100 \frac{\text{М}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}} \right)$$

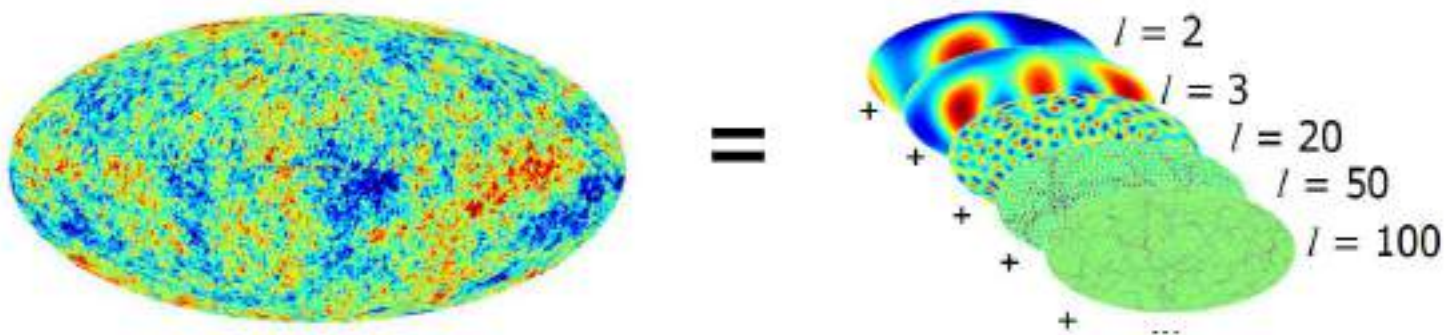
$$H(z) = 100 \left[h^2 \Omega_{r,0} \left(\frac{1}{a} \right)^4 + h^2 \Omega_{m,0} \left(\frac{1}{a} \right)^3 + h^2 \Omega_{\Lambda} \right]^{1/2}$$

CMB Map by Planck



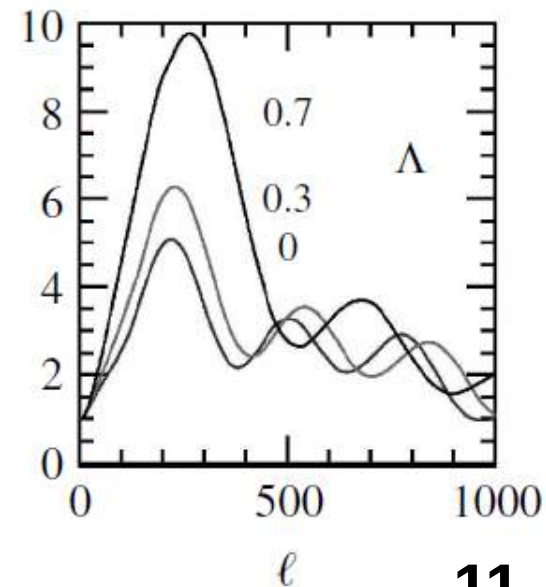
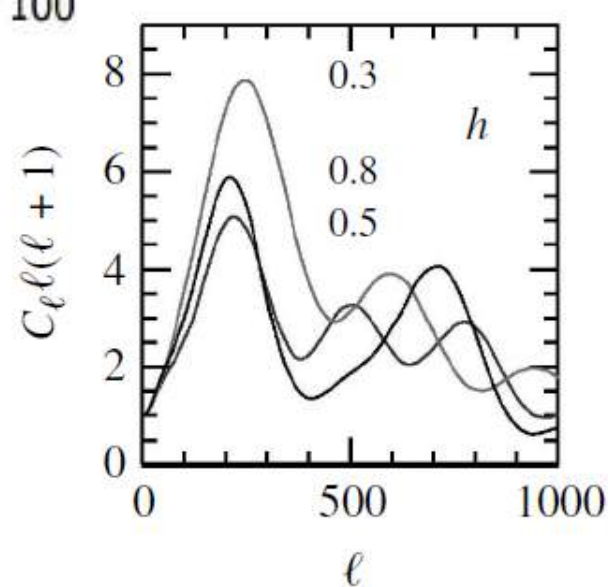
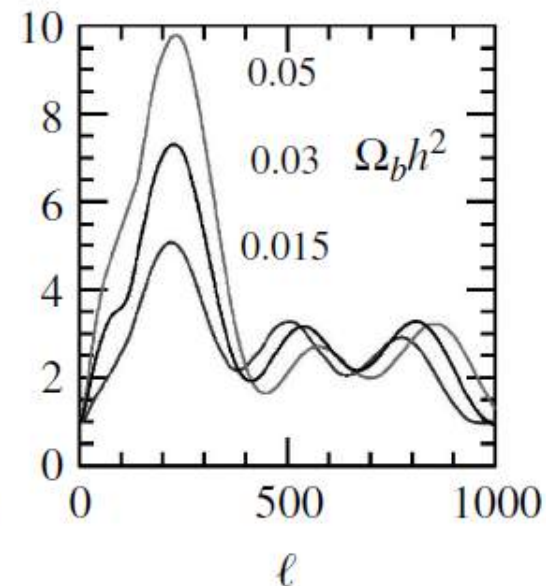
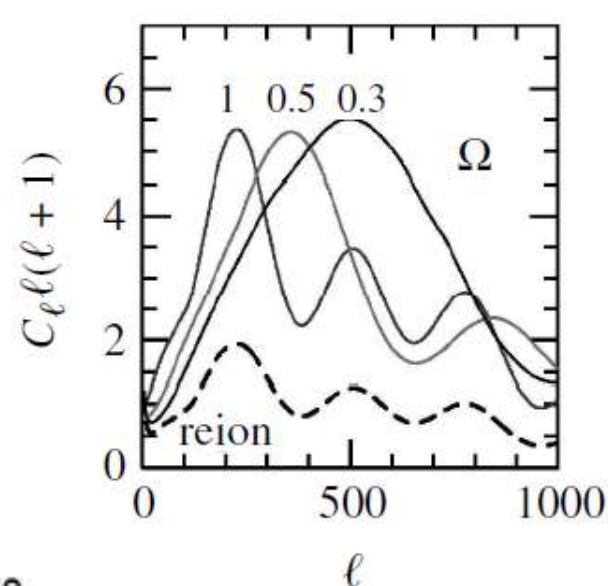
СМВ: спектр неоднородностей

Распределение флуктуаций температуры СМВ содержит огромный объем информации о структуре Вселенной на момент рекомбинации ~ 380 тыс. лет после Большого Взрыва ($z \simeq 1090$).



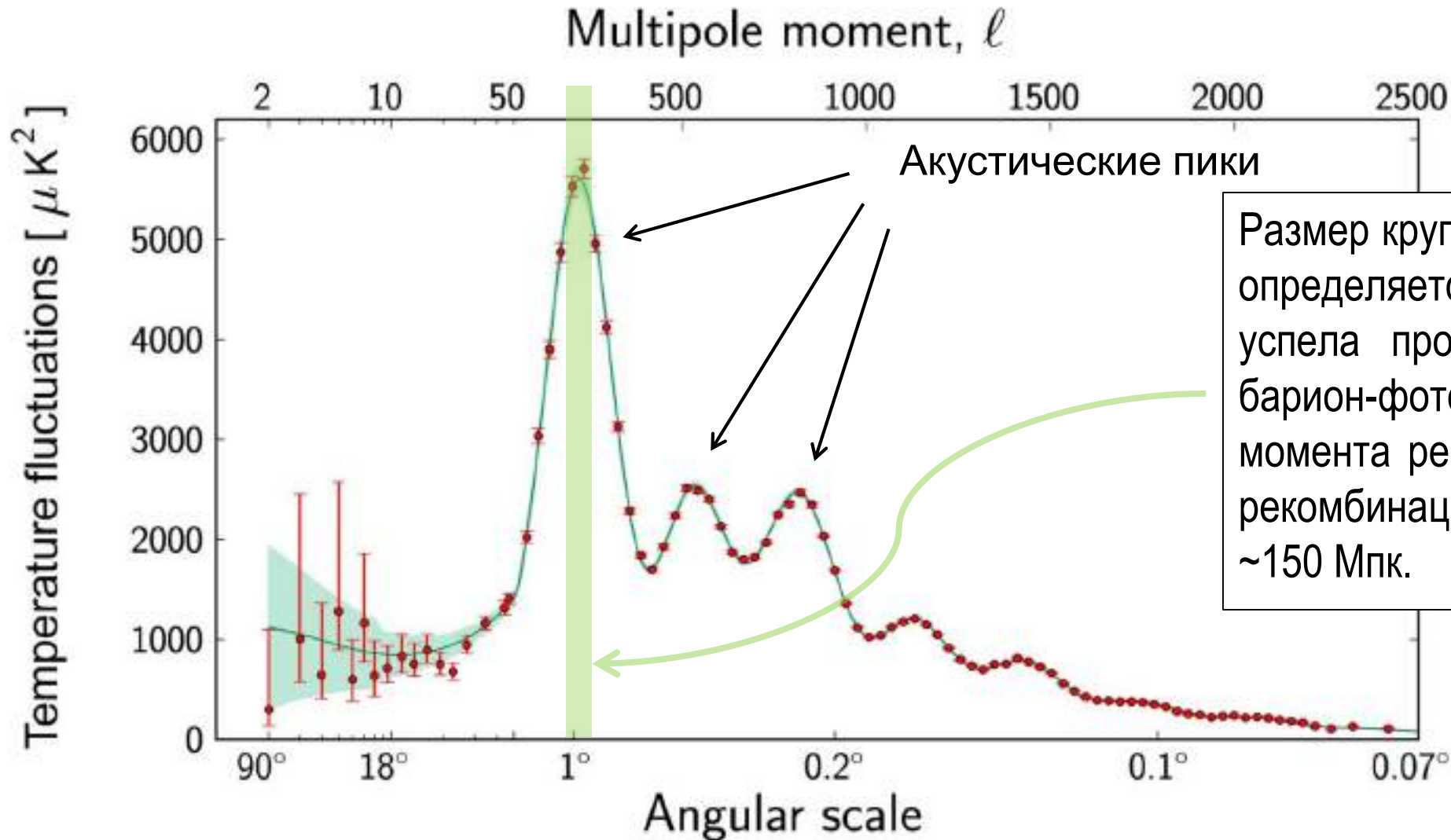
$$T(\hat{n}) = \sum_{\ell=0}^{\ell_{\max}} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\hat{n})$$

$$C_{\ell} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2$$



СМВ: спектр неоднородностей

Распределение флуктуаций температуры СМВ содержит огромный объем информации о структуре Вселенной на момент рекомбинации ~ 380 тыс. лет после Большого Взрыва ($z \simeq 1090$).



Размер крупномасштабных структур определяется расстоянием, которое успела пройти звуковая волна в барион-фотонной «жидкости» до момента рекомбинации. На момент рекомбинации ~ 140 кпк, сегодня ~ 150 Мпк.

Другие СМВ эксперименты: АСТ

- 6 m CMB telescope, observed 2007-2022 @ 5200 m altitude in the Atacama desert
- Best site for sky coverage, 2nd best weather (after Antarctica)
- DR6 = 2017-2022, 828 full days of CMB observations

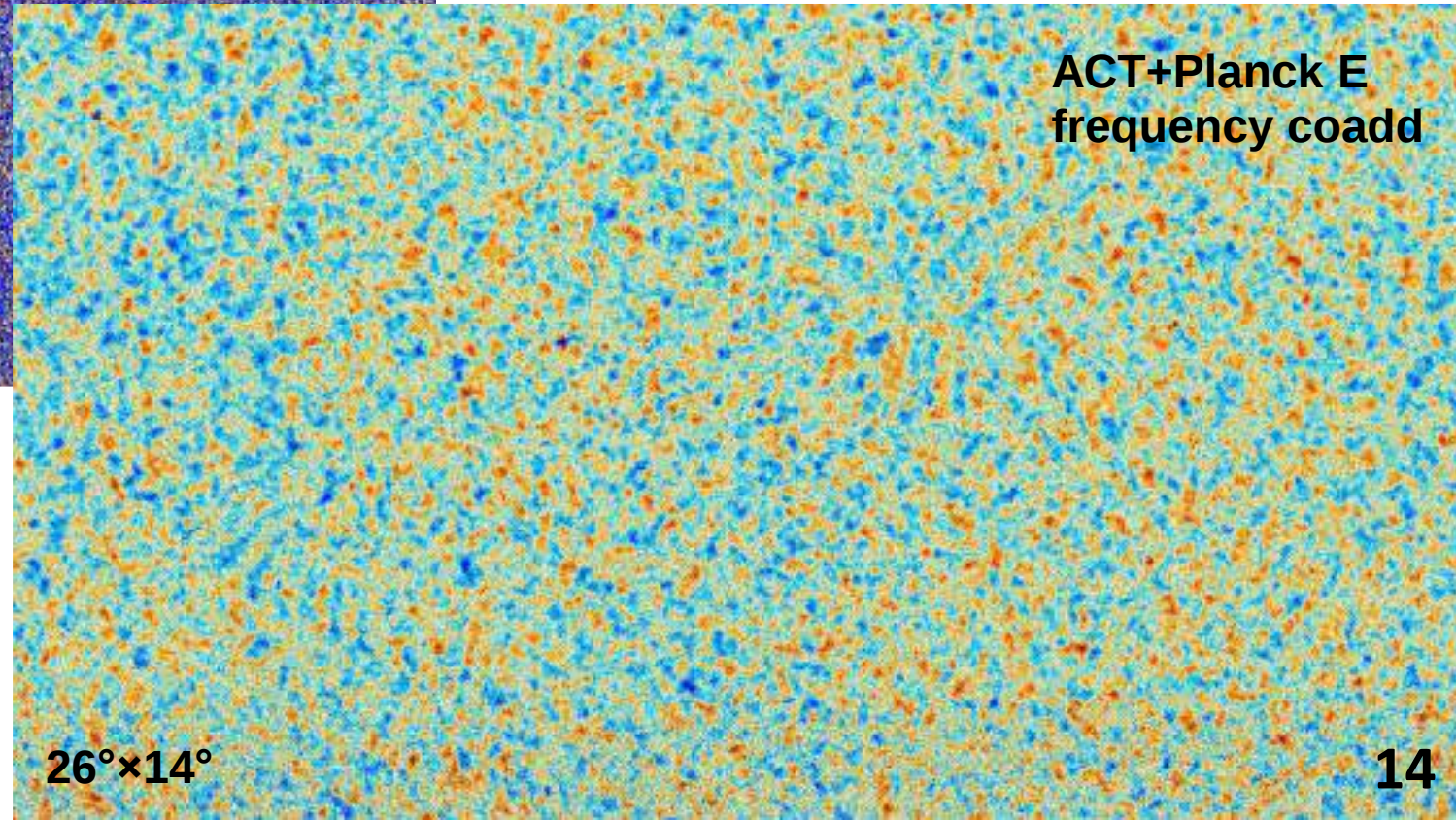
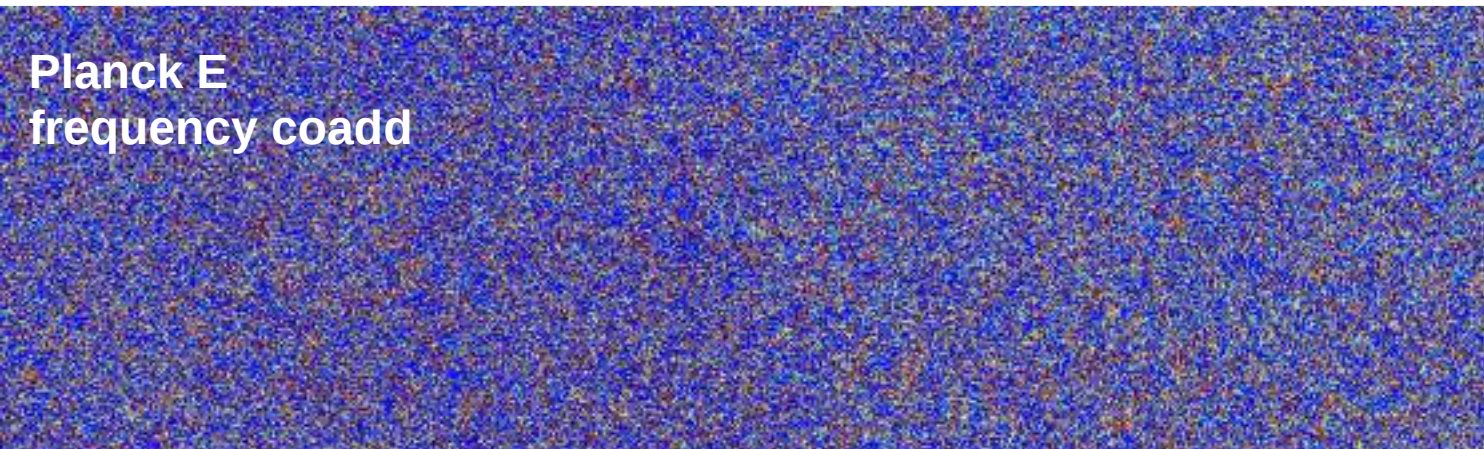


ALMA

POLARBEAR

Atacama Cosmology Telescope

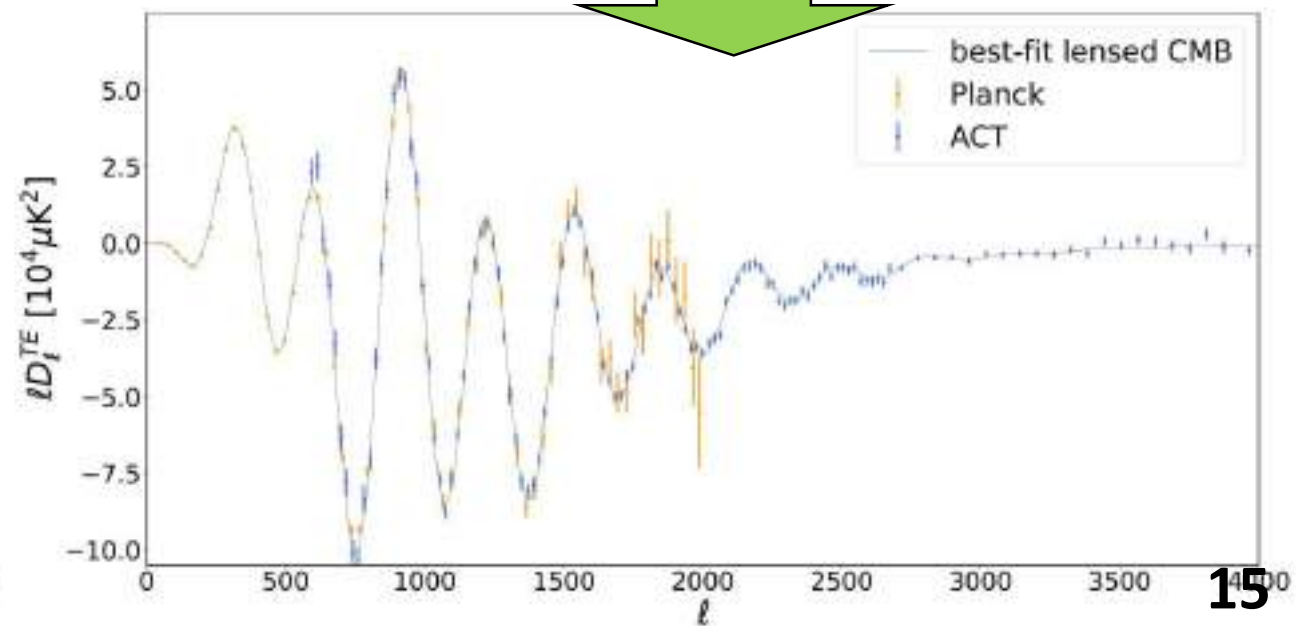
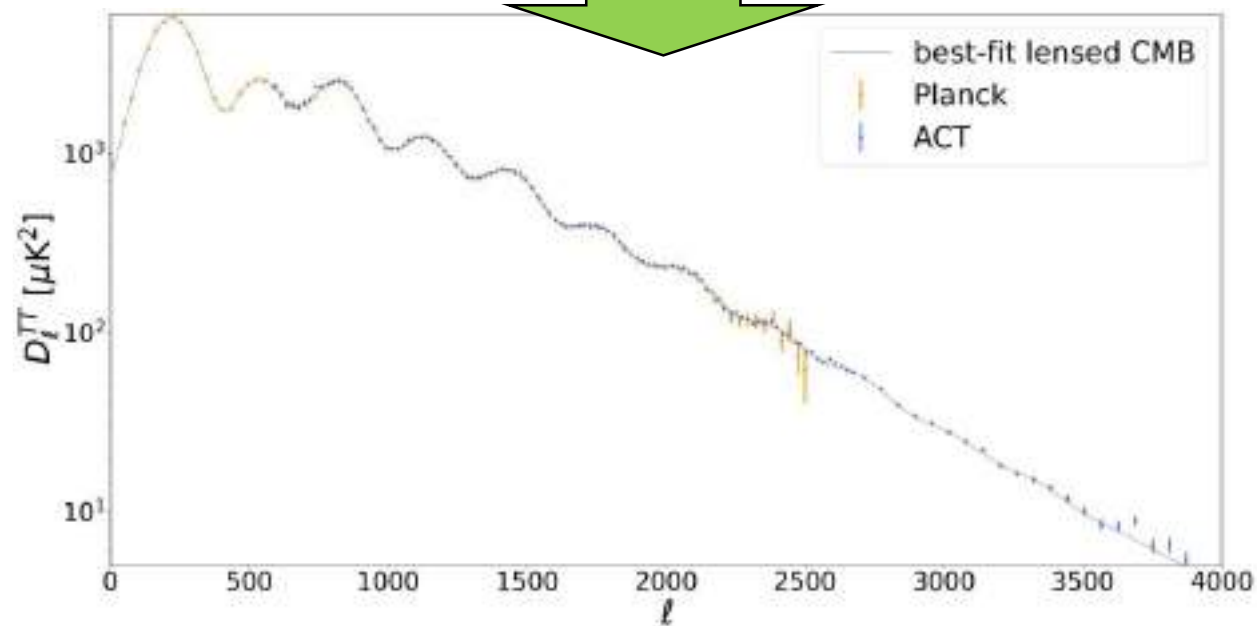
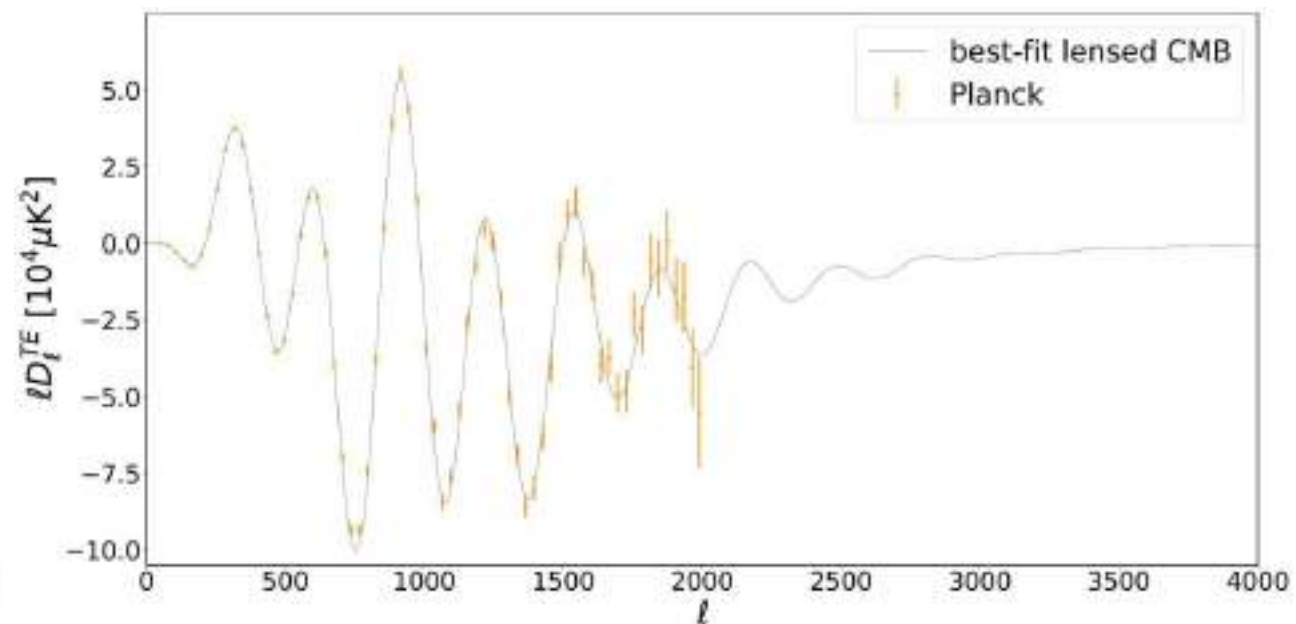
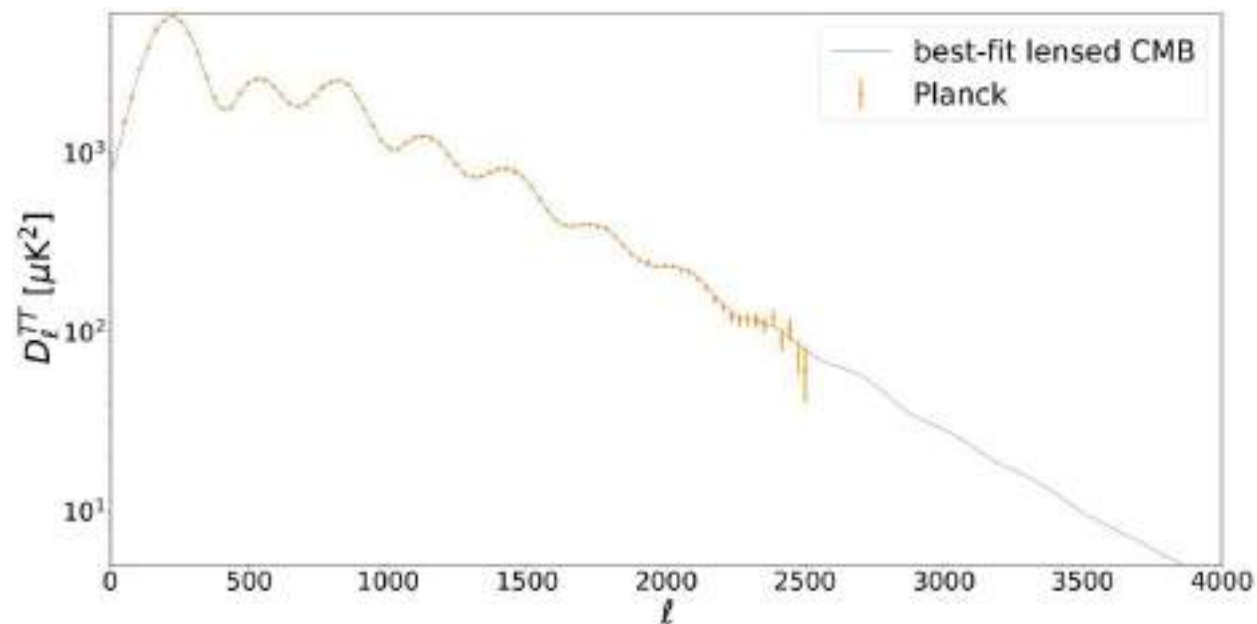
Другие СМВ эксперименты: АСТ



Существенно более высокое угловое разрешение чувствительность и телескопа АСТ позволяет измерить спектр флуктуаций СМВ до более высоких мультипольных моментов.

26°×14°

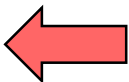
Другие СМВ эксперименты: АСТ



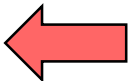
Vanilla Λ CDM

Parameter	Combined
$\Omega_b h^2$	0.02233 ± 0.00015
$\Omega_c h^2$	0.1198 ± 0.0012
$100\theta_{\text{MC}}$	1.04089 ± 0.00031
τ	0.0540 ± 0.0074
$\ln(10^{10} A_s)$	3.043 ± 0.014
n_s	0.9652 ± 0.0042
$\Omega_m h^2$	0.1428 ± 0.0011
H_0 [km s ⁻¹ Mpc ⁻¹] . . .	67.37 ± 0.54
Ω_m	0.3147 ± 0.0074
Age [Gyr]	13.801 ± 0.024
σ_8	0.8101 ± 0.0061
$S_8 \equiv \sigma_8 (\Omega_m/0.3)^{0.5}$. .	0.830 ± 0.013
z_{re}	7.64 ± 0.74
$100\theta_*$	1.04108 ± 0.00031
r_{drag} [Mpc]	147.18 ± 0.29

Λ CDM с высокой точностью описывает ВСЕ результаты СМВ (ранняя Вселенная $z \simeq 1090$). Используя эти параметры как «начальные», можно рассчитать всю дальнейшую эволюцию Вселенной и сравнить с **НЕЗАВИСИМЫМИ** измерениями для «поздней» Вселенной (малые значения $z \lesssim 2$).



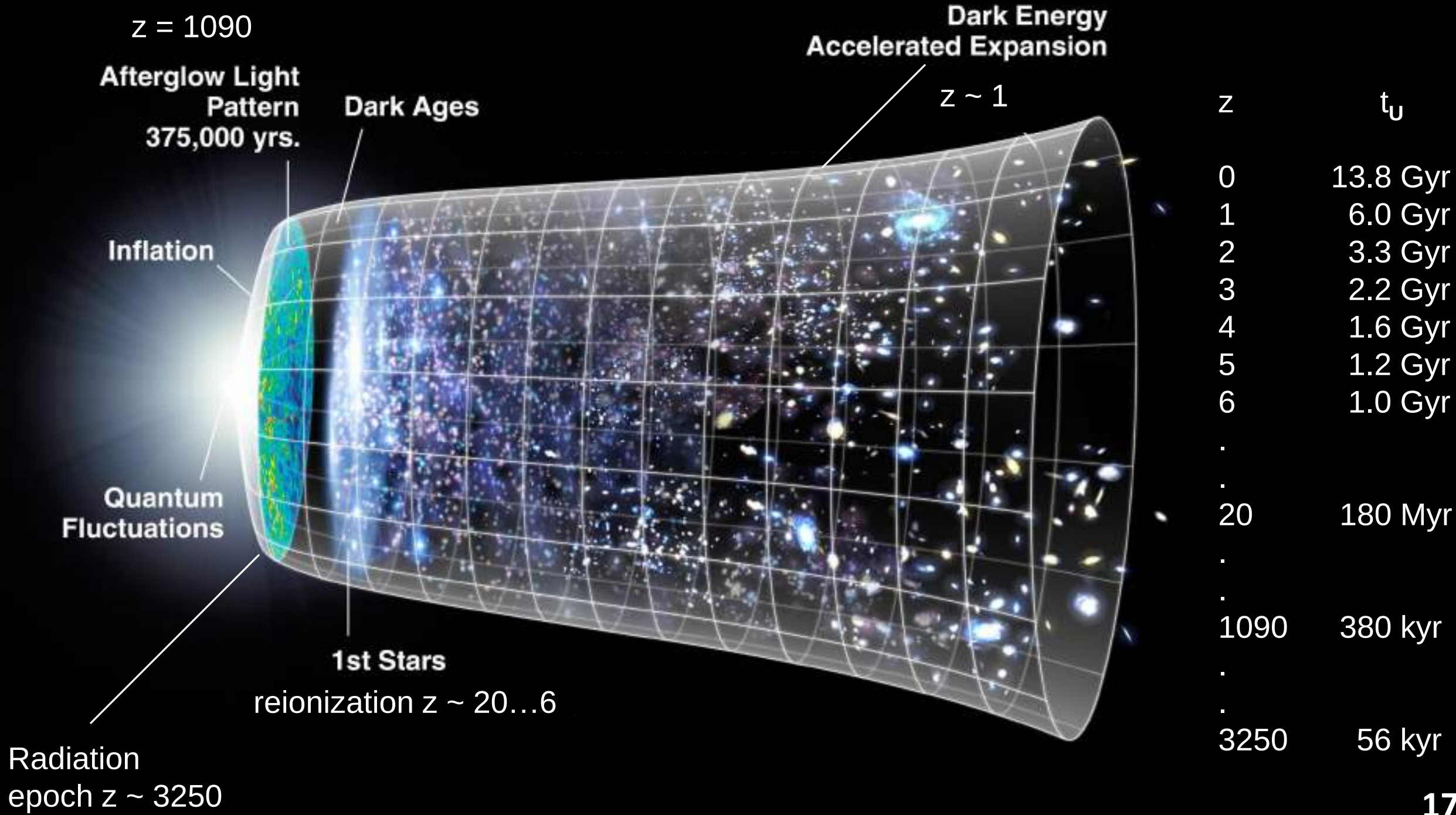
Параметр Хаббла



Кластеризация скоплений галактик



Главный пик в СМВ



Какое расстояние измеряется?

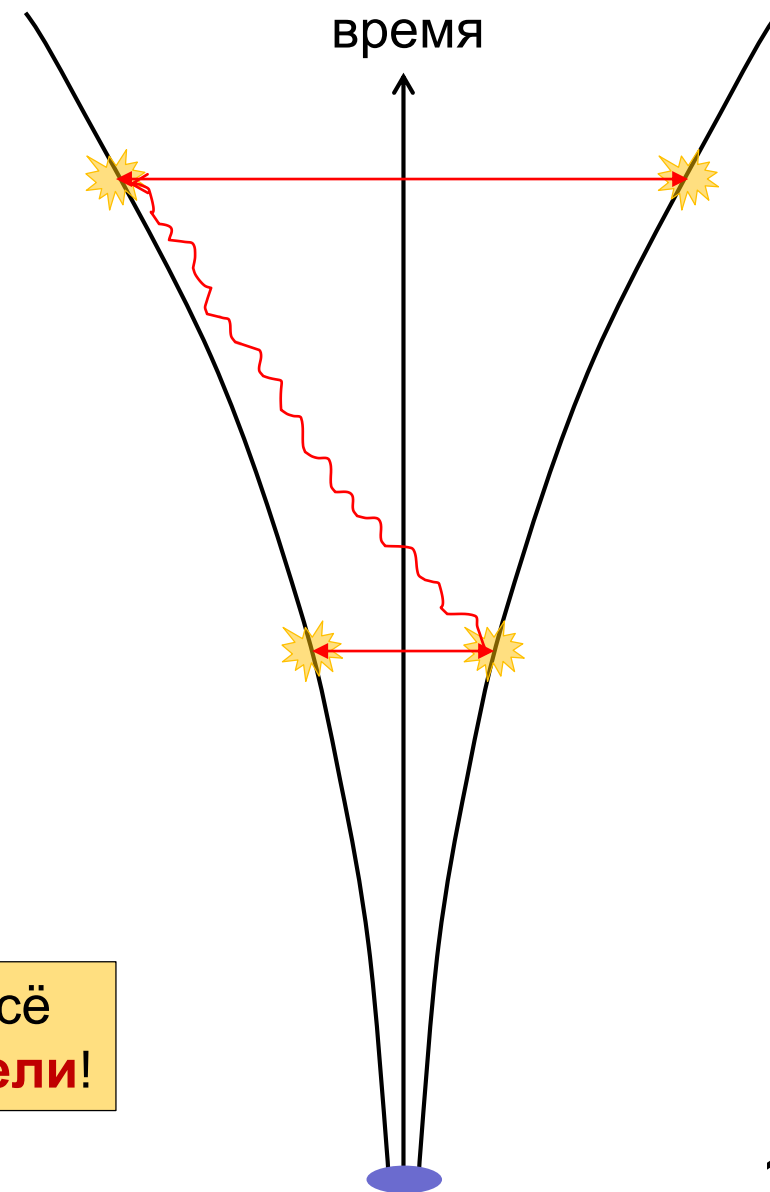
Расстояние между объектом и наблюдателем в момент испускания фотона объектом?

Расстояние (Время), пройденное фотоном от момента испускания до приема?

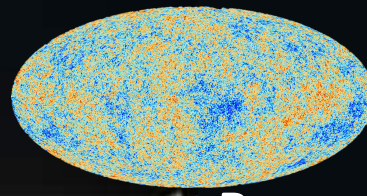
Расстояние между объектом и наблюдателем в момент приема фотона объектом?

Ни одно из этих расстояний НЕ может быть измерено непосредственно!

Измеряемой величиной является только красное смещение, всё остальное пересчитывается **на основе космологической модели!**

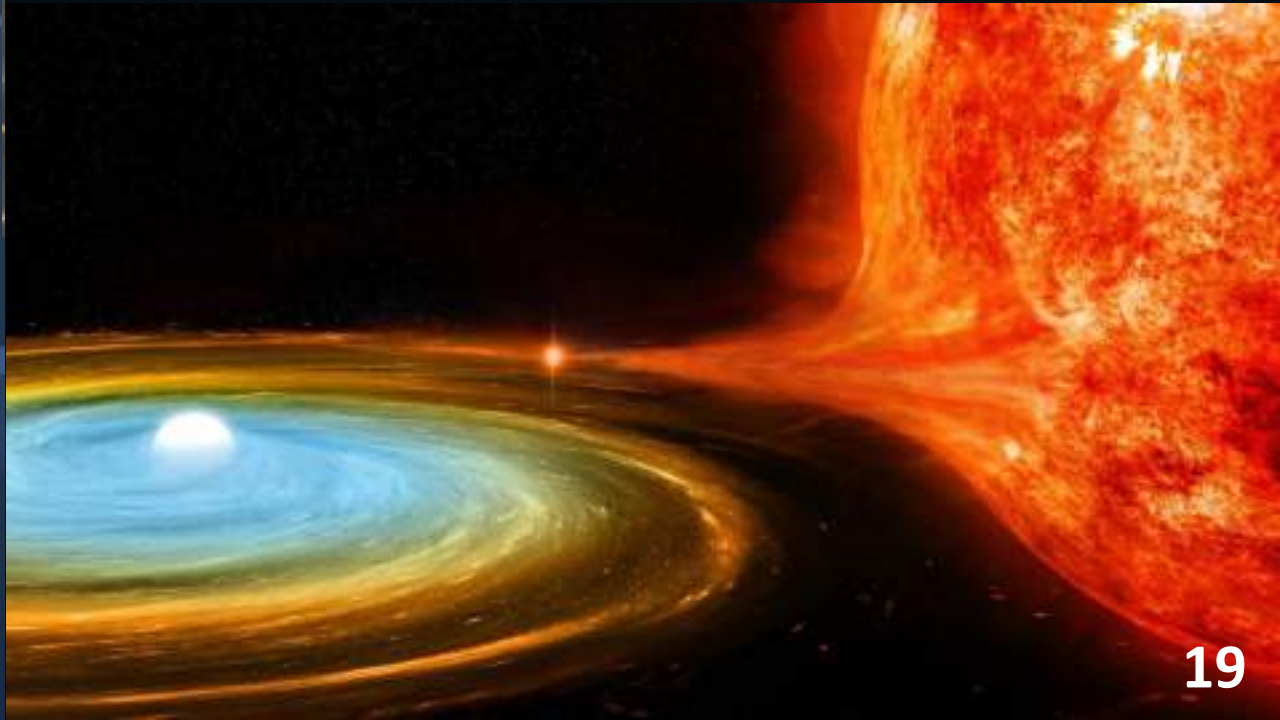


Стандартная свеча



В качестве «стандартных свечей» на космологических расстояниях используются вспышки сверхновых типа Ia.

Сверхновые типа Ia – термоядерный взрыв белого карлика в двойной системе. «Стандартный» механизм взрыва дает вспышки **примерно одинаковой мощности**.



Hubble Tension

С повышением точности измерений нарастает напряженность в значении (при $z=0$) параметра Хаббла H_0 , полученным по CMB, и по «локальным» измерениям (классическая «лестница расстояний»: цефеиды + SN Ia).

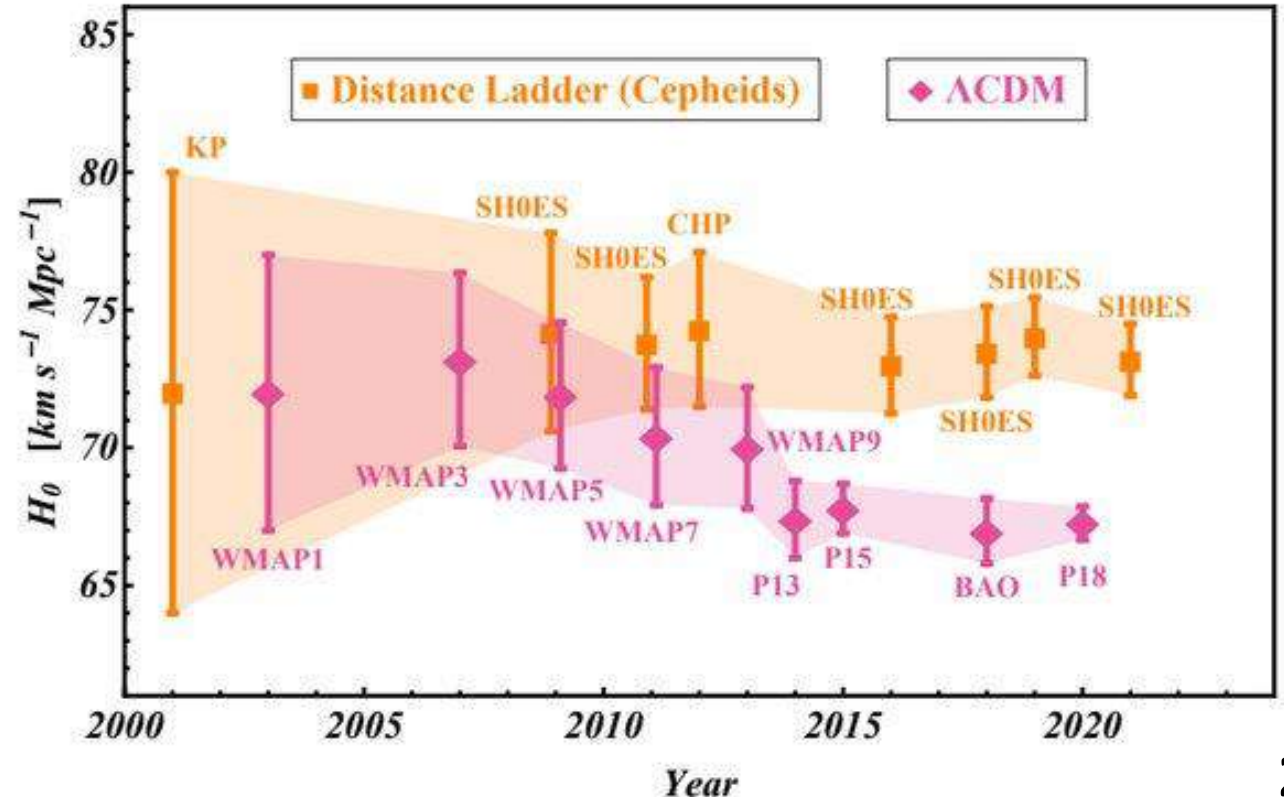
CMB

Distance Ladder

H_0 [$\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$]

Indirect

Direct



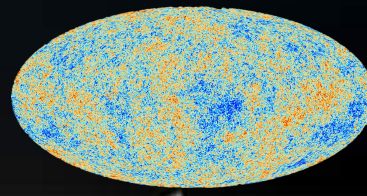
- CMB**

Late Universe

В комбинации с напряженностью Хаббла, эти нестыковки рассматриваются как результат возможной неполноты стандартной (минимальной) Λ CDM.



Стандартная свеча



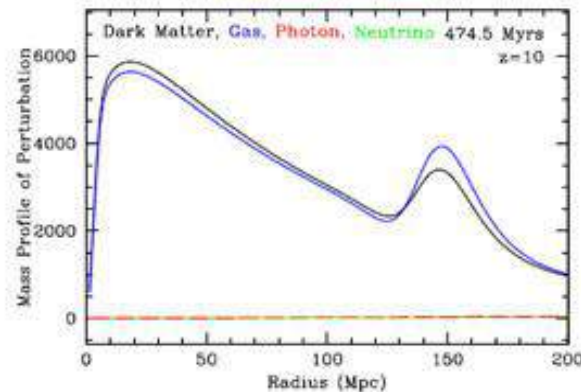
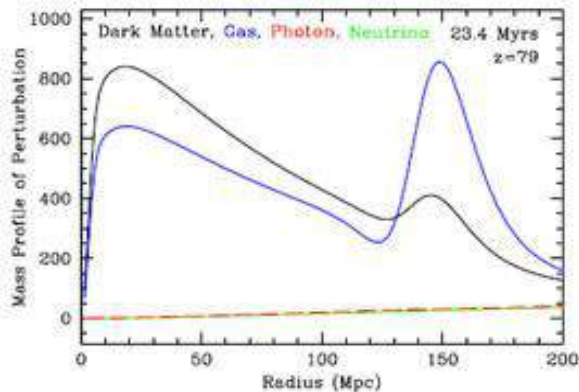
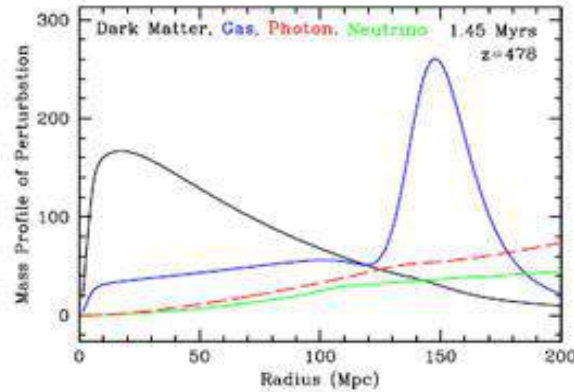
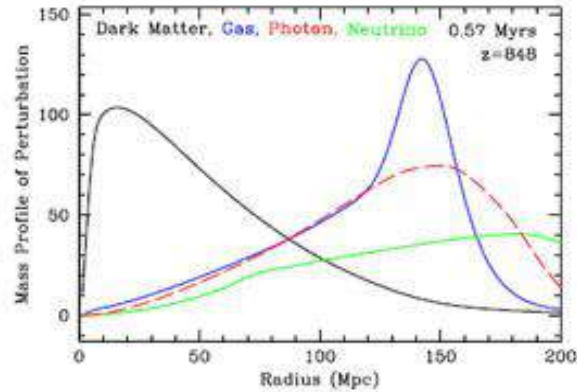
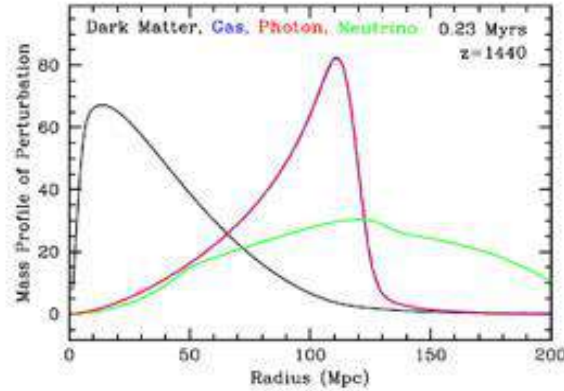
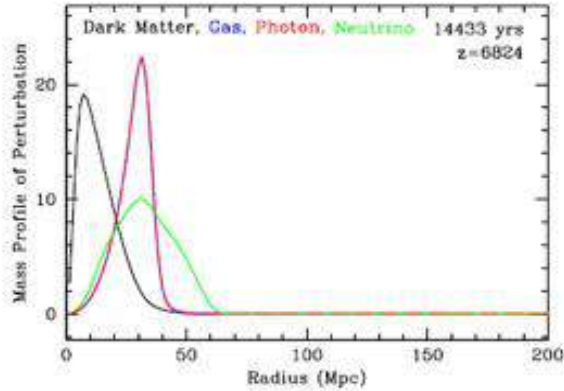
Стандартная линейка



Type-Ia Supernovae (SN Ia)
as standard candles

Baryon Acoustic Oscillations (BAO)
as standard ruler

ВАО как стандартная линейка

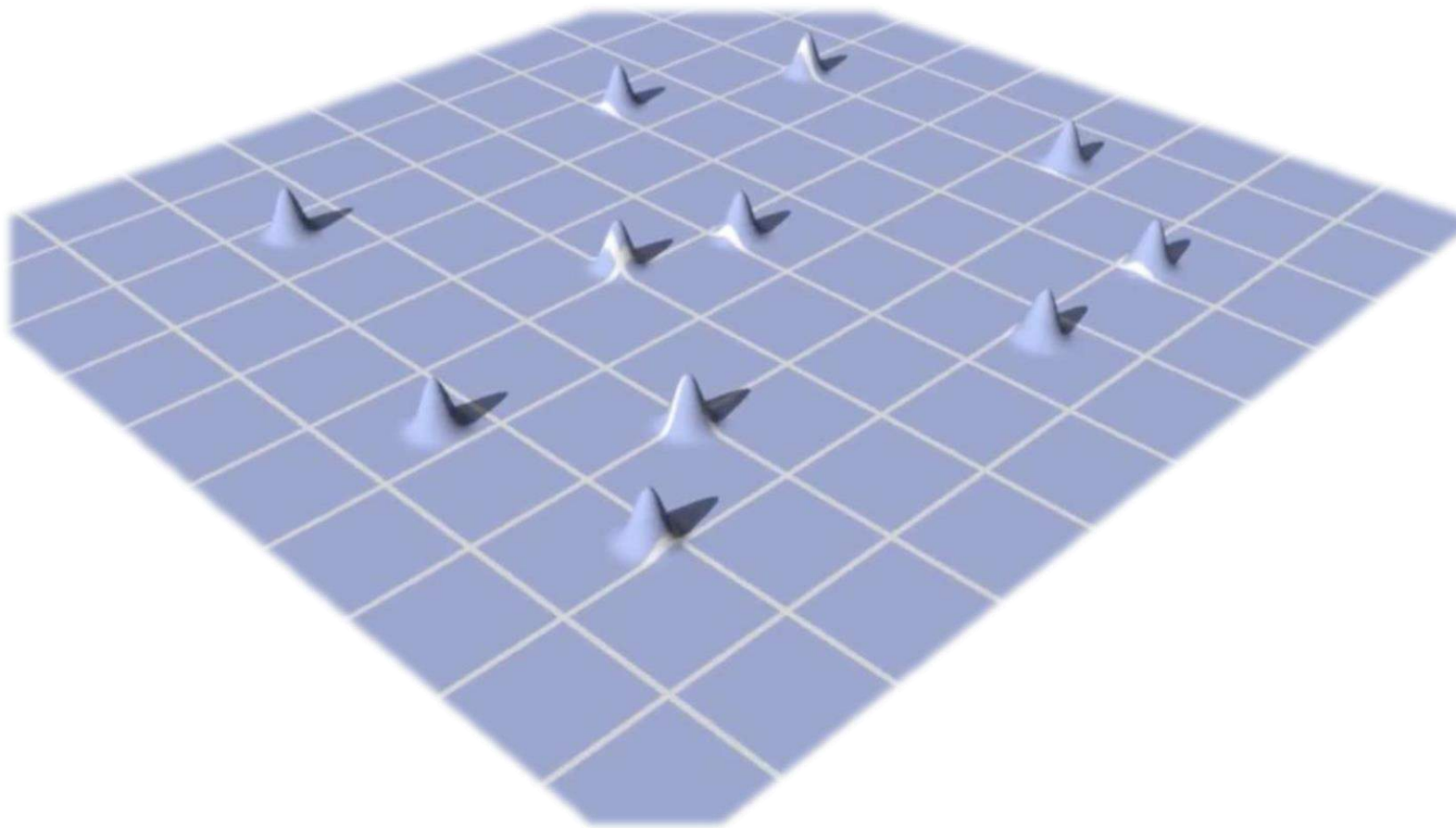


Дальнейшая эволюция ЭМ и барионной компоненты происходила независимо и достаточно точно просчитывается согласно стандартной космологической модели Λ CDM.

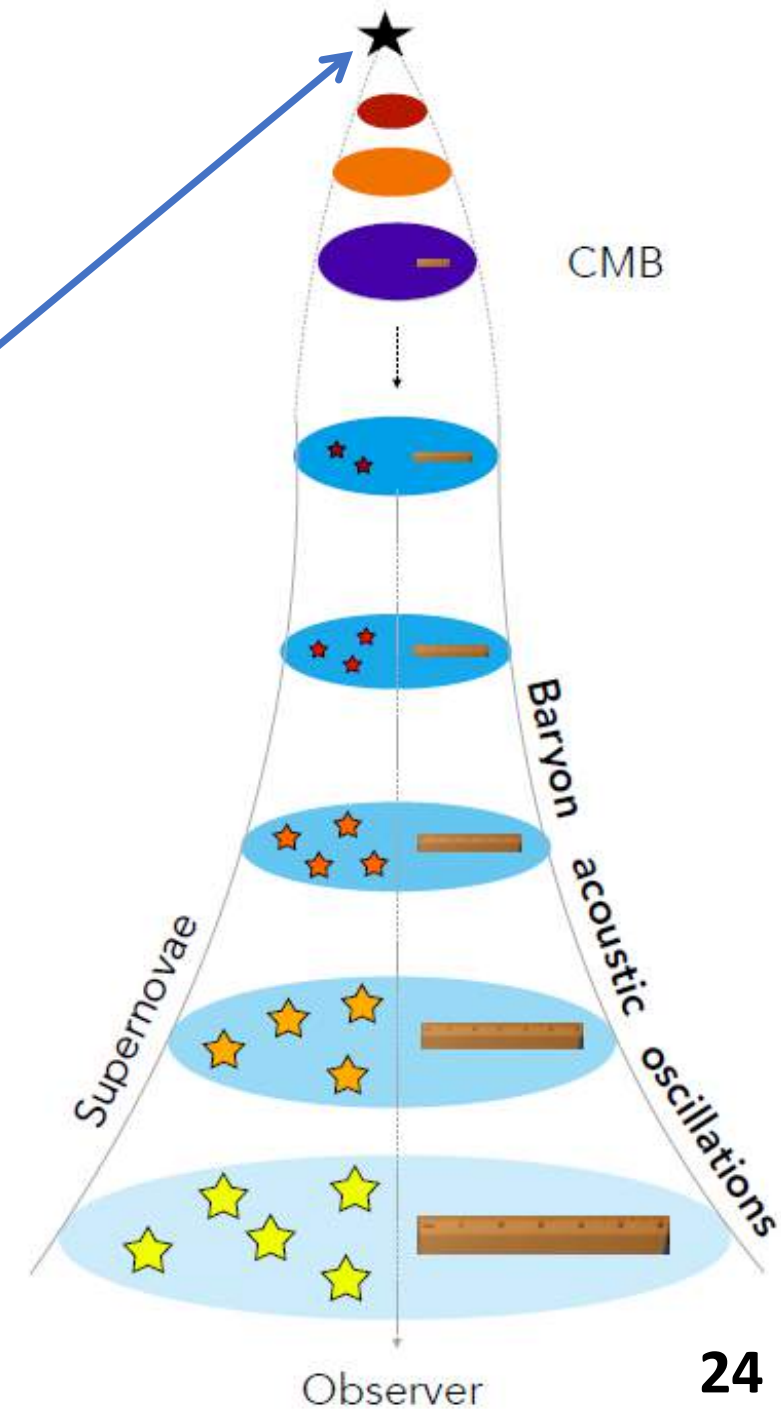
На масштабах $\gg$ стандартного отрезка (современное значение ~ 150 Мпк ≈ 500 св. М лет.) Вселенная должна быть однородна и изотропна – космологический принцип.

Этот характеристический масштаб должен сохраняться на всех этапах эволюции Вселенной (независимо от z) если **измеряется в сопутствующей системе.**

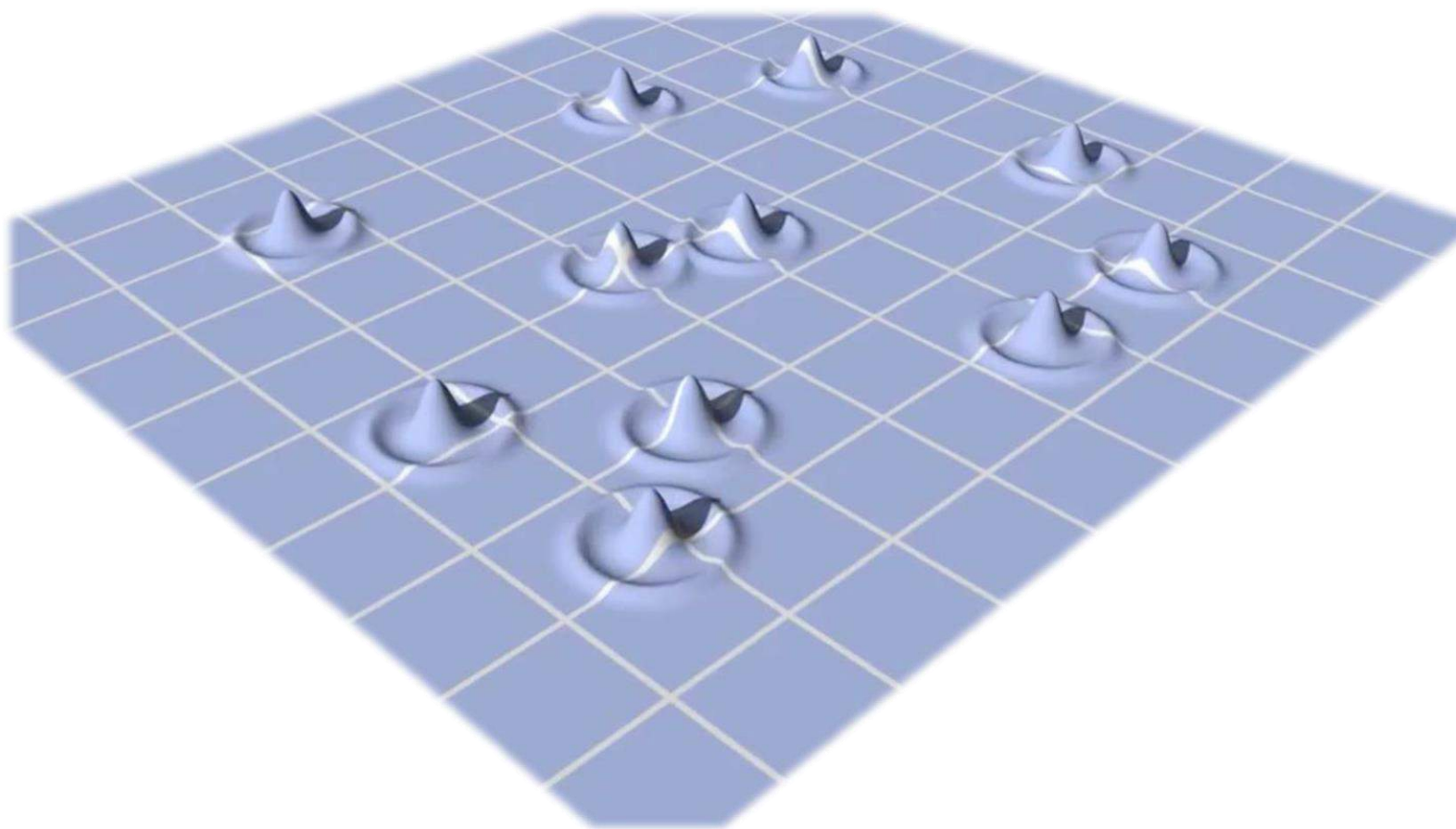
Baryon Acoustic Oscillations



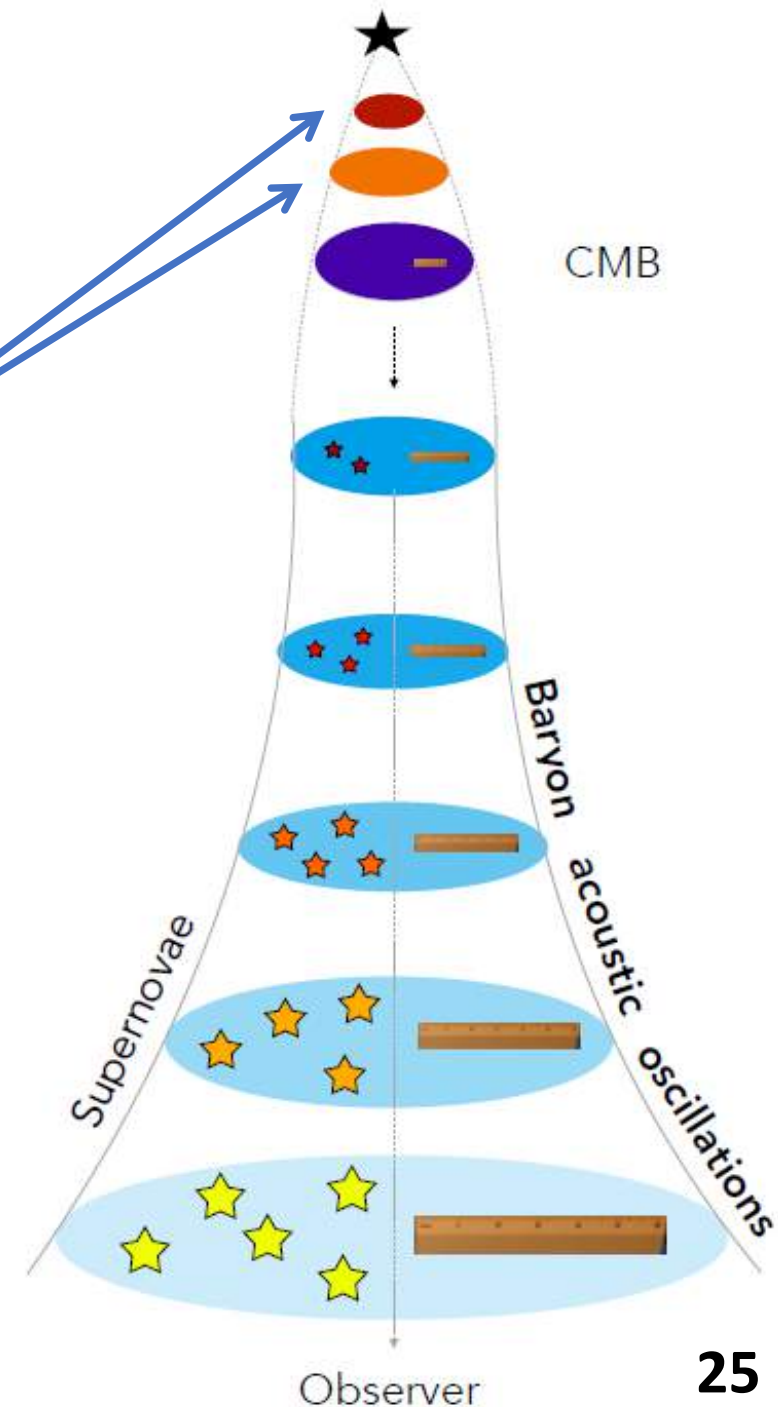
Начальные возмущения плотности (квантовые флуктуации) на стадии инфляции



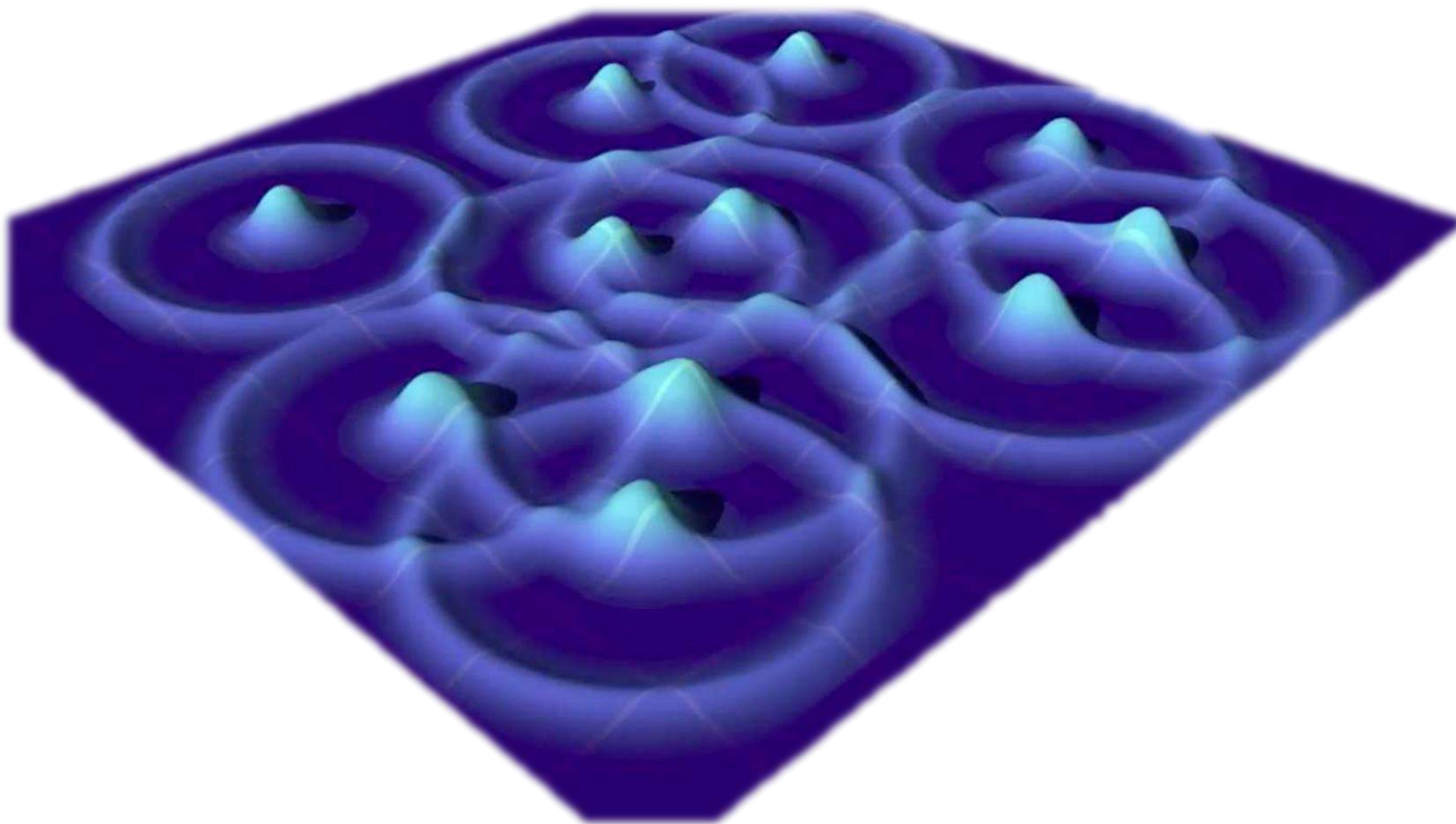
Baryon Acoustic Oscillations



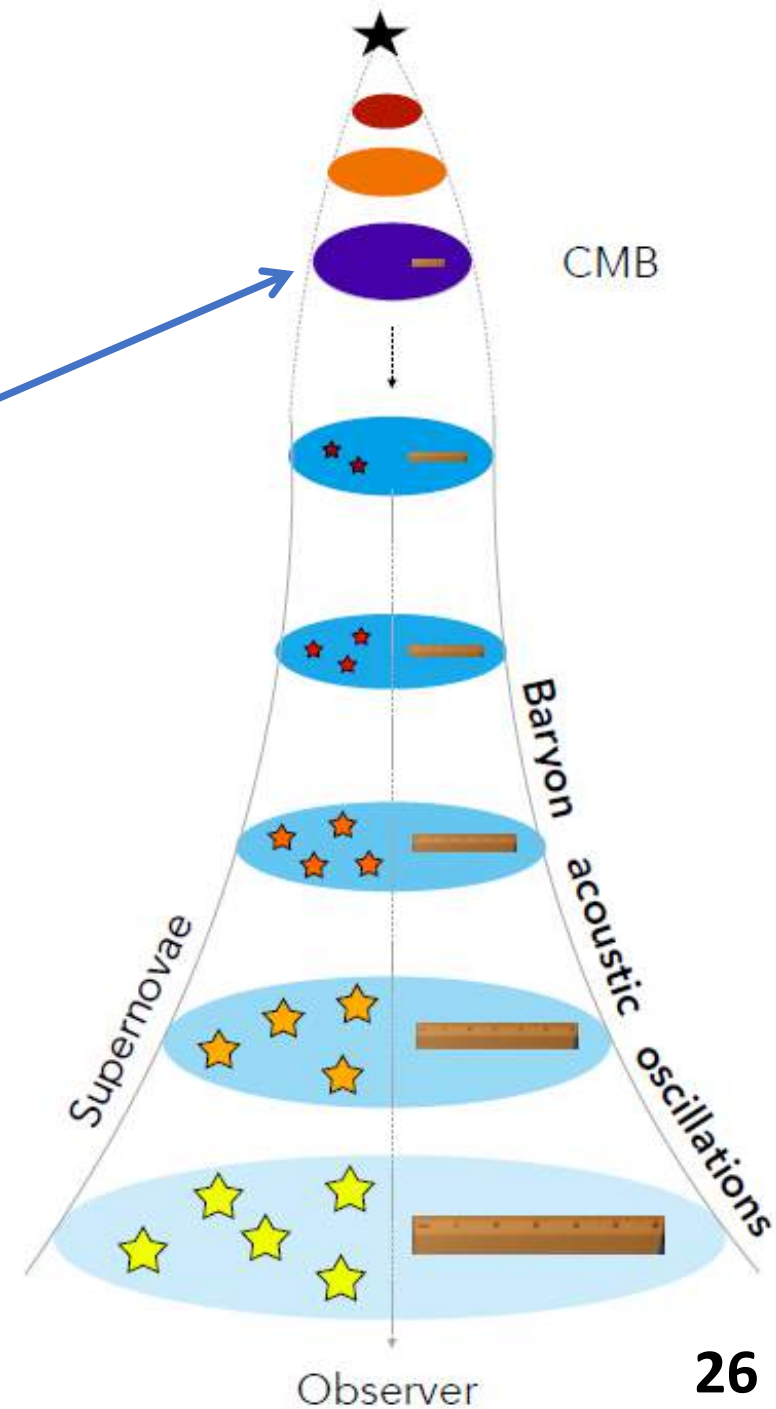
Распространение звуковых волн в эпоху термодинамического равновесия барионной материи и излучения



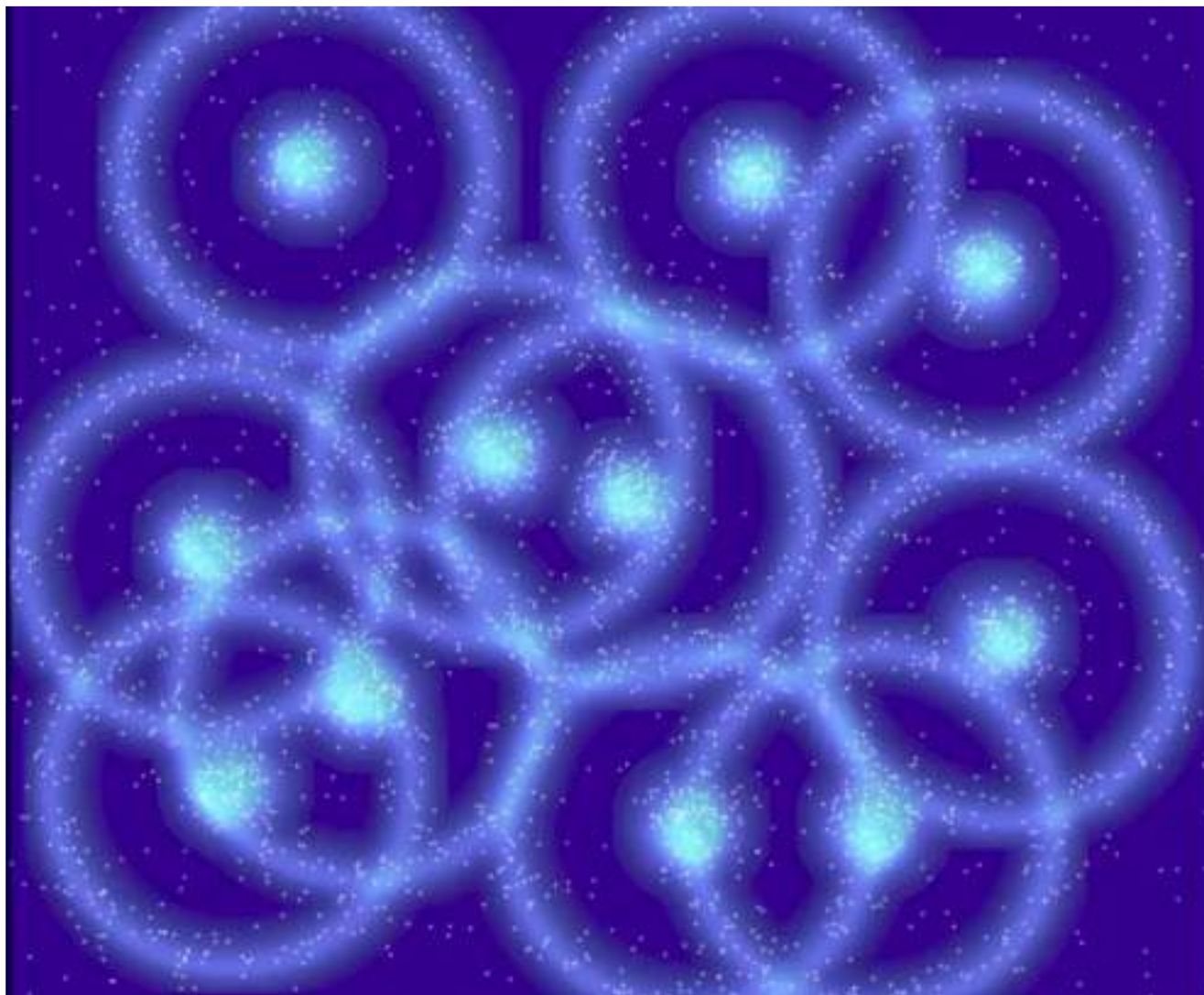
Baryon Acoustic Oscillations



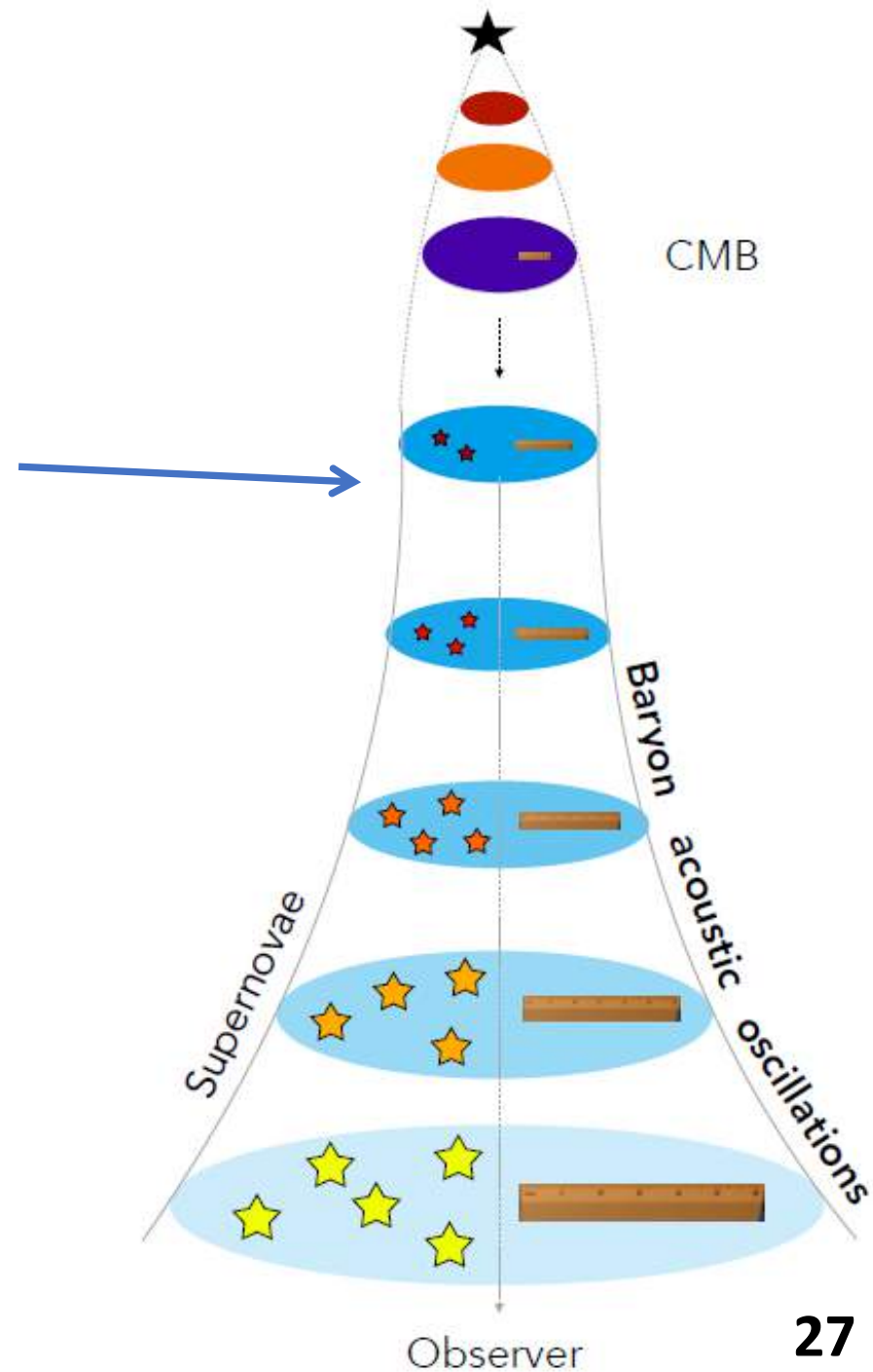
В момент рекомбинации излучение отделяется от материи. Распределение плотности (температуры) вмораживается в CMB.



Baryon Acoustic Oscillations



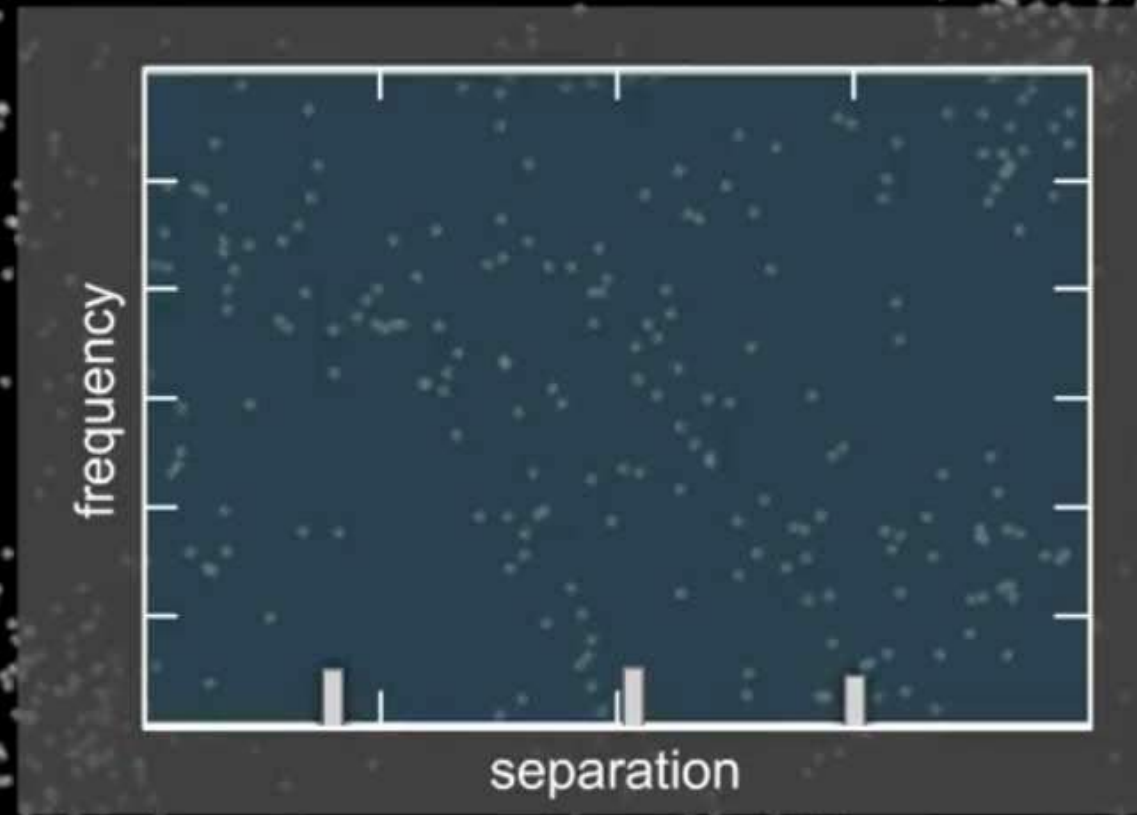
В областях повышенной плотности материи образуются галактики и скопления галактик



Baryon Acoustic Oscillations

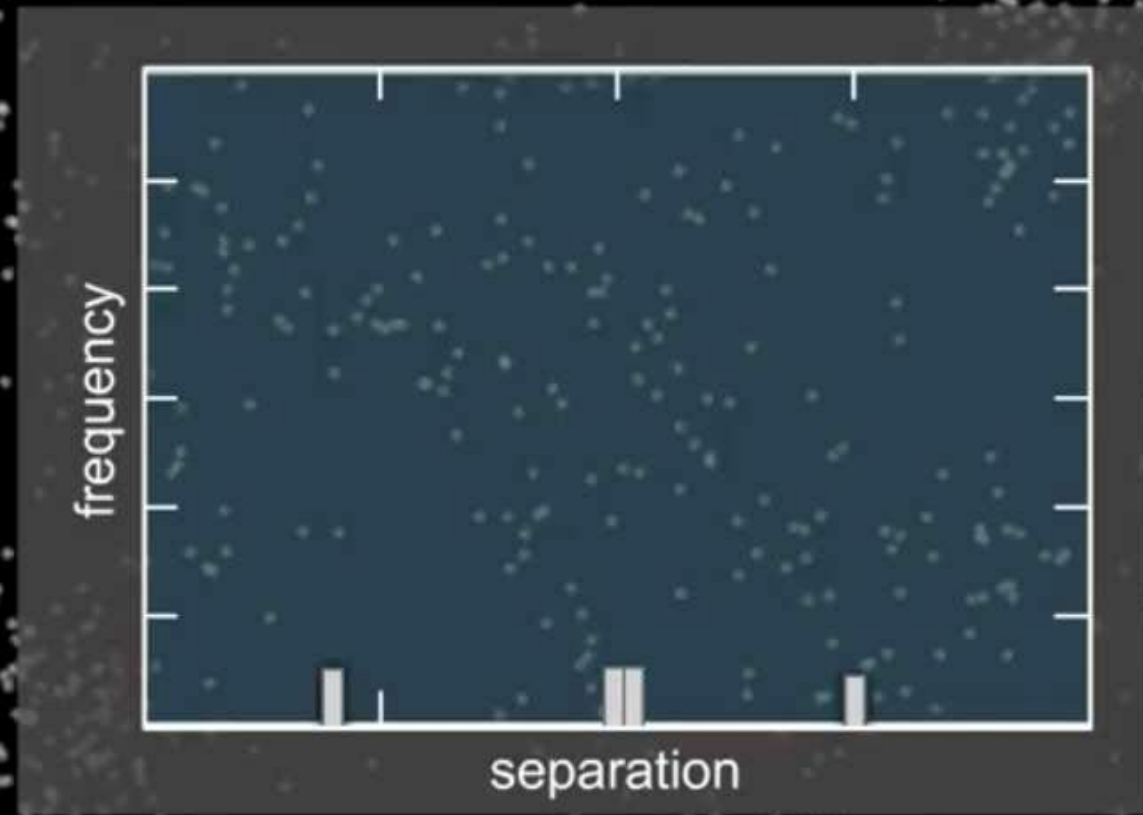


Baryon Acoustic Oscillations



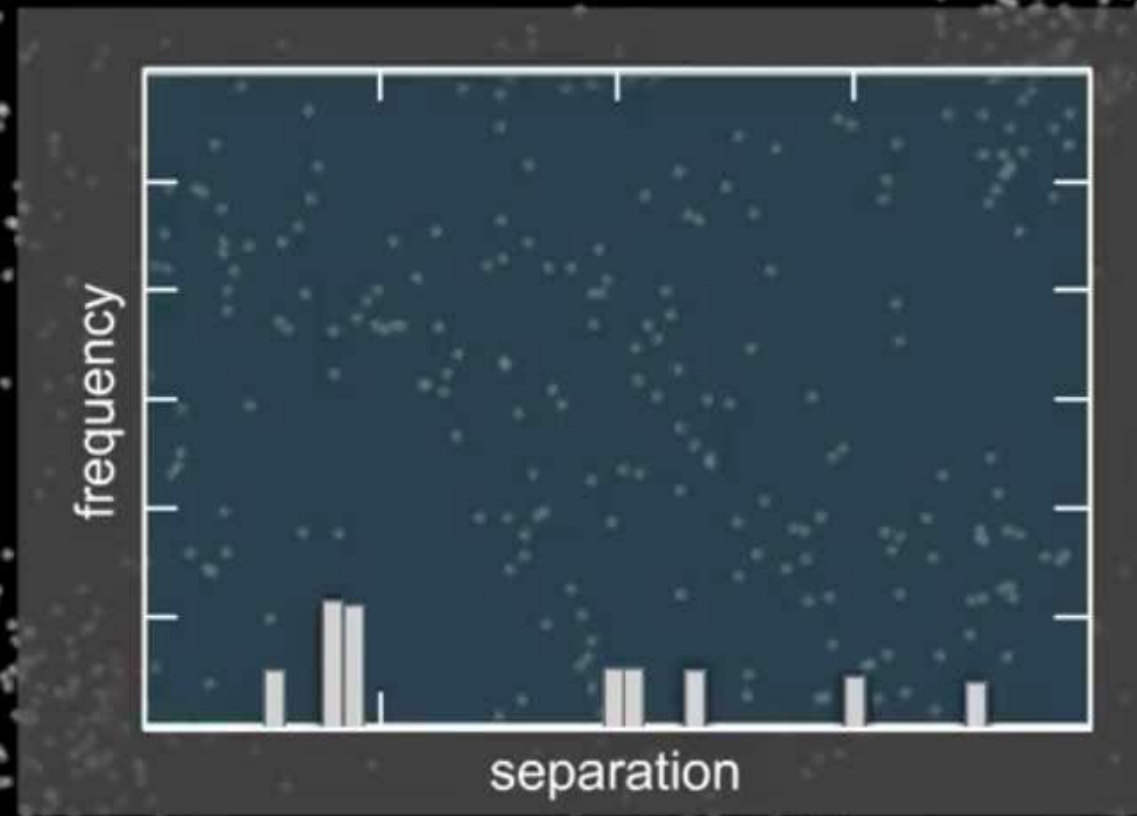
Distances between pairs of galaxies

Baryon Acoustic Oscillations



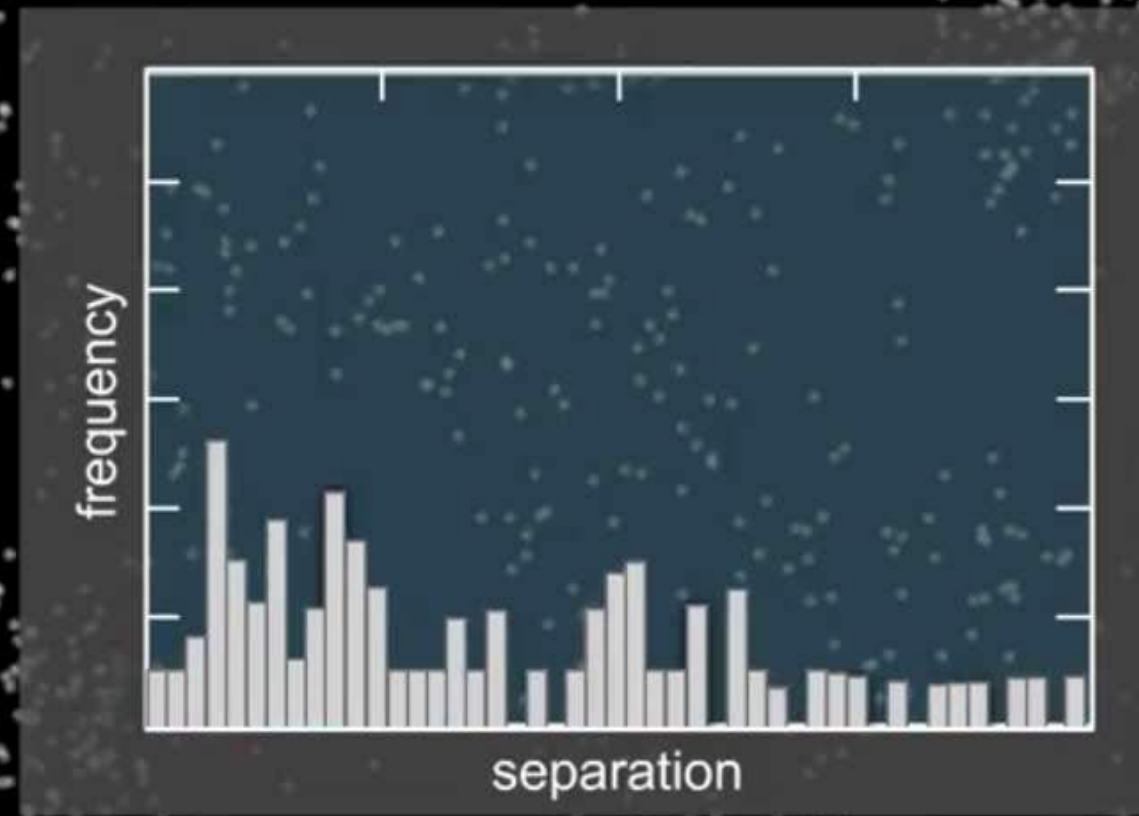
Distances between pairs of galaxies

Baryon Acoustic Oscillations



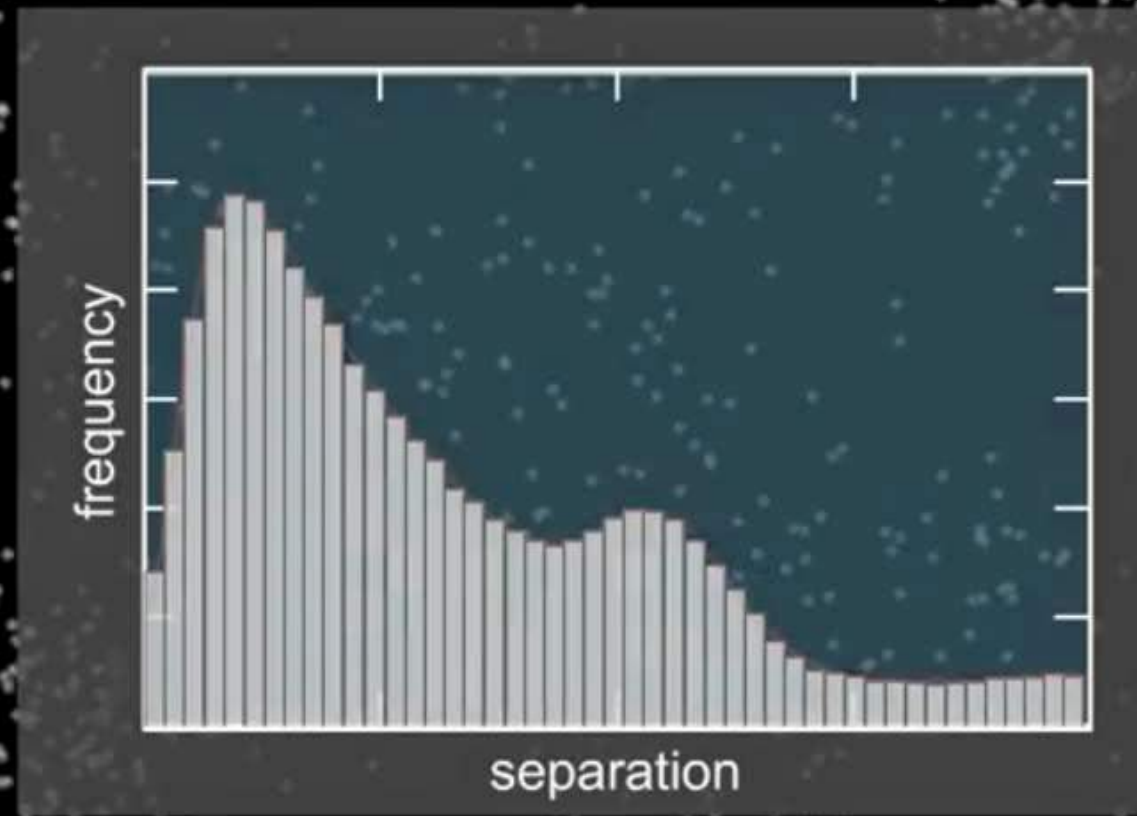
Distances between pairs of galaxies

Baryon Acoustic Oscillations



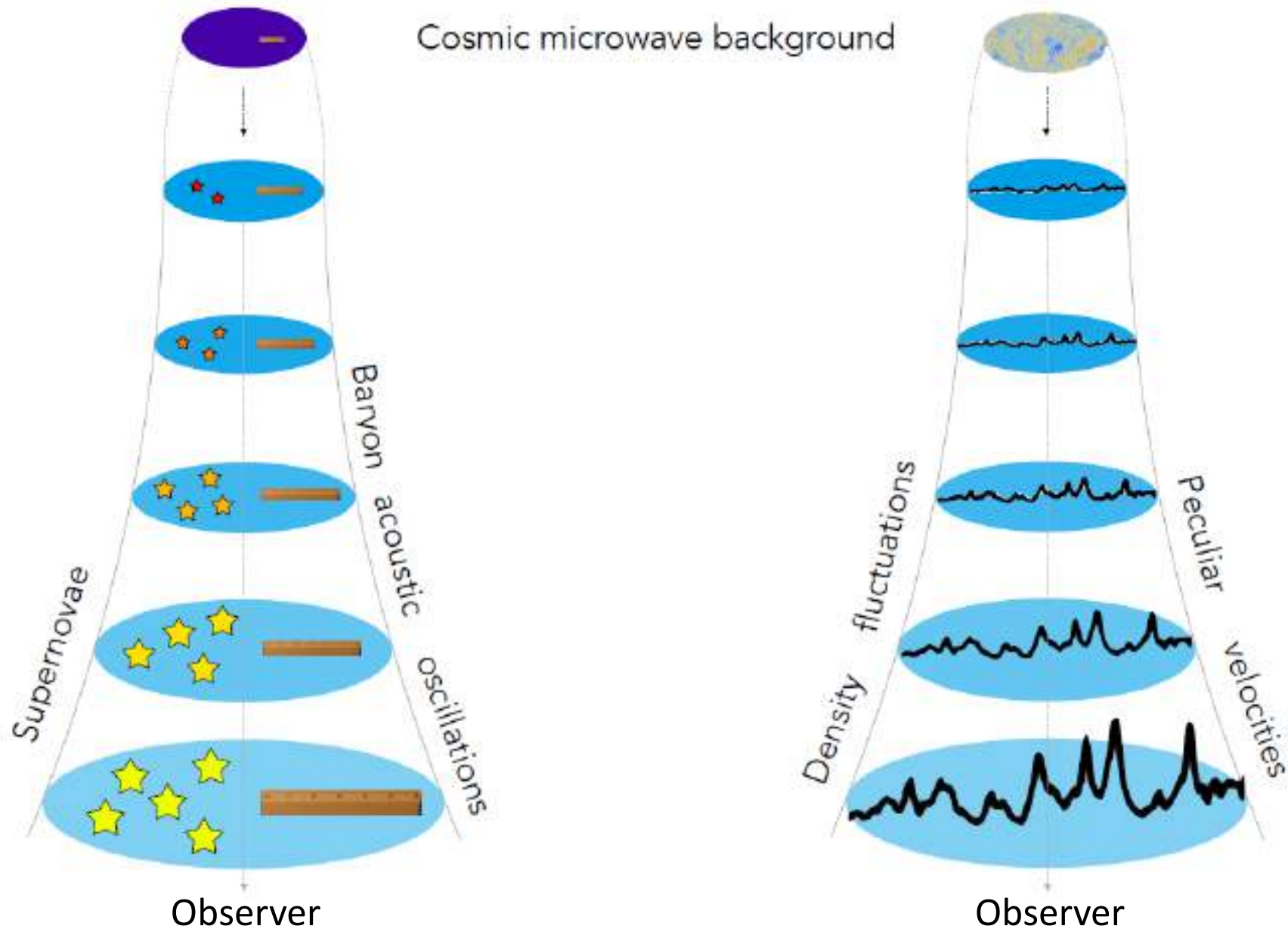
Distances between pairs of galaxies

Baryon Acoustic Oscillations

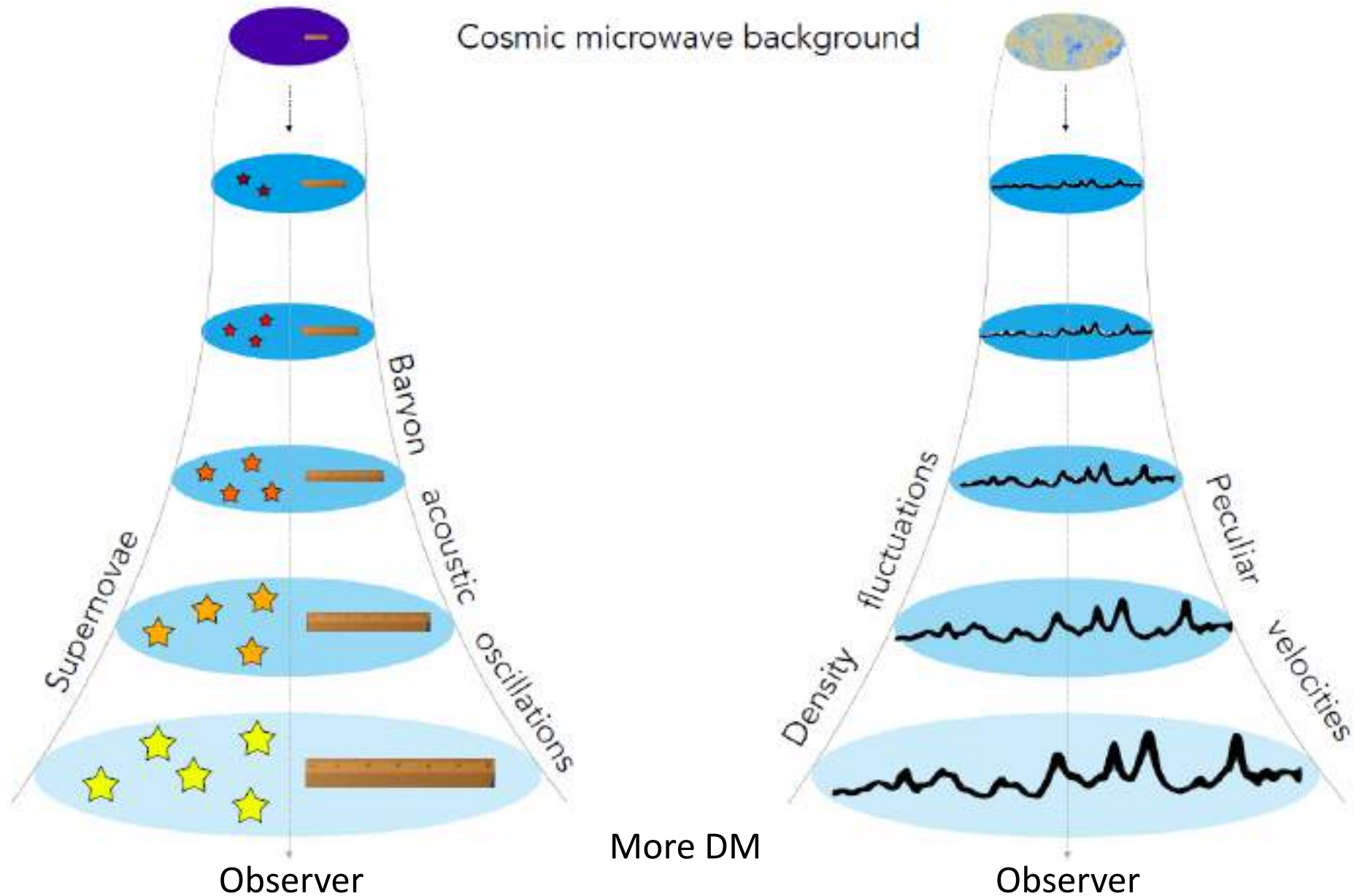


Distances between pairs of galaxies

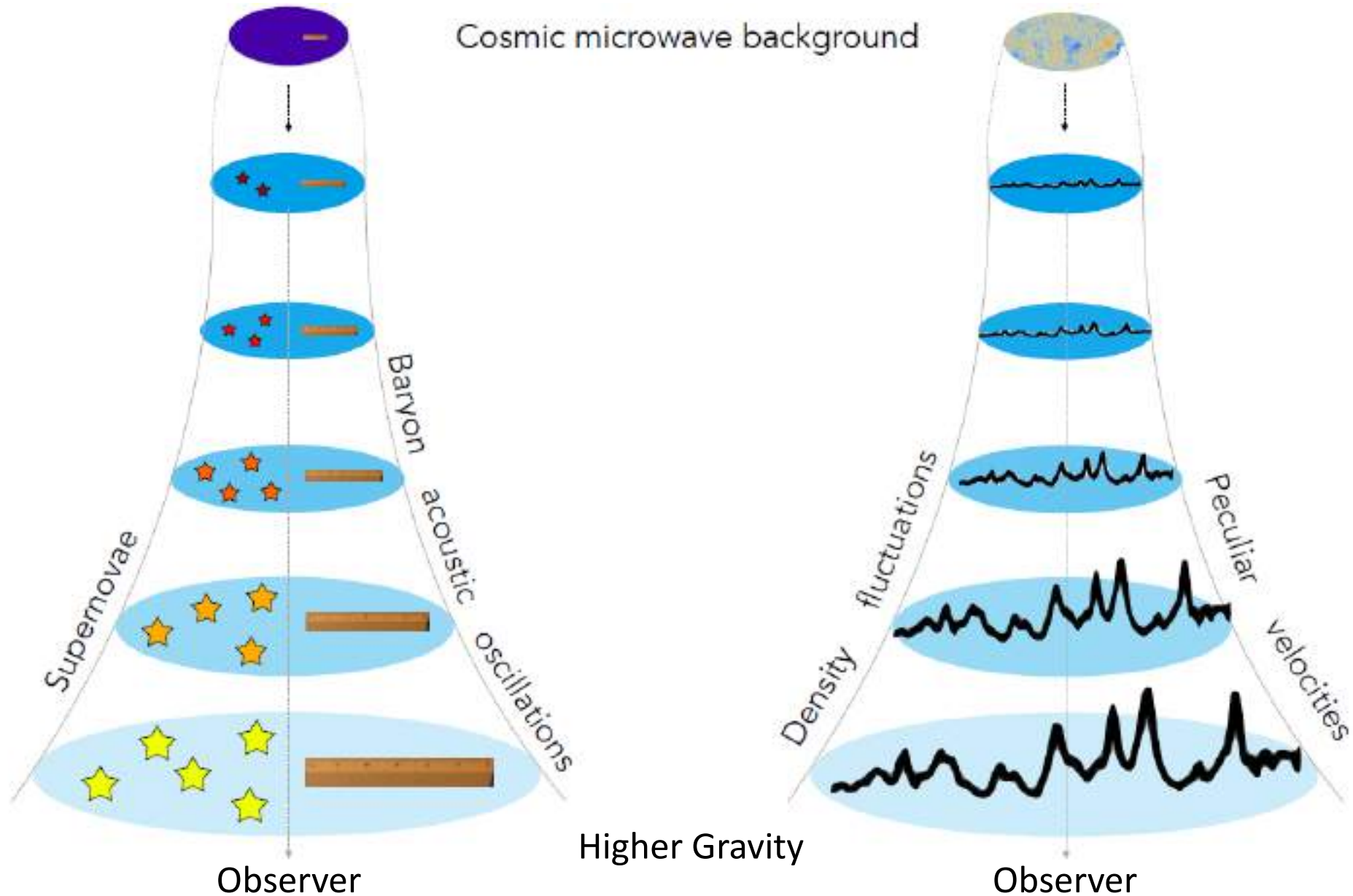
Проверка Λ CDM

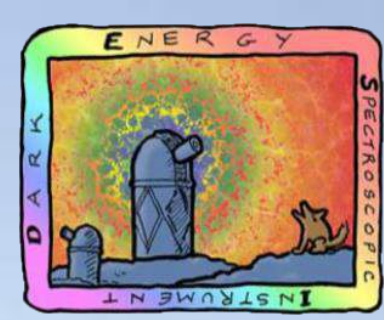


Проверка Λ CDM



Проверка Λ CDM



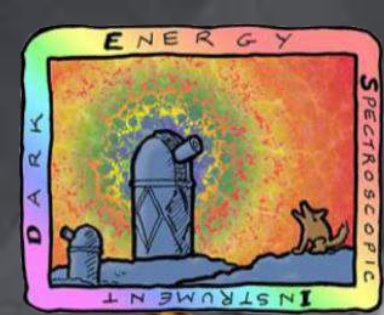


DESI: Telescope

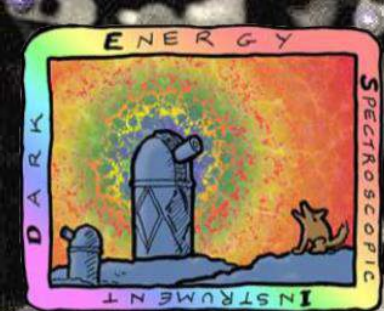
Mayall Telescope @ Kitt Peak, Arizona USA
4m hyperboloidal mirror



DESI: Telescope



DESI: Focal Plane



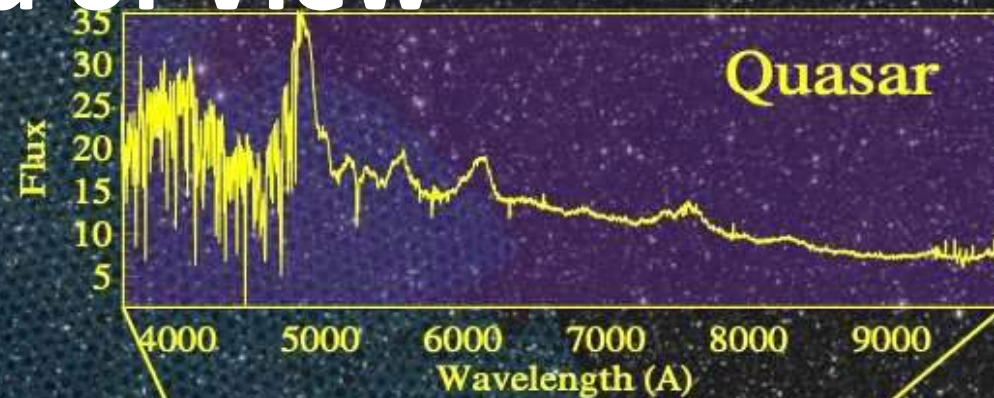
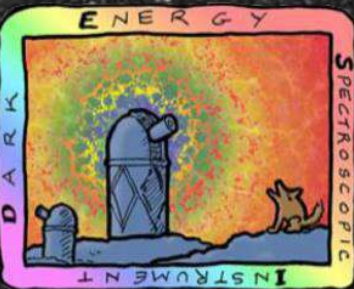
5000 robotic optical fibers

DESI: Focal Plane

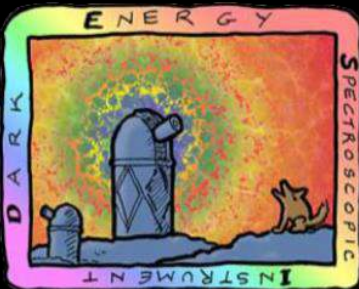


10 spectrographs with 3 cameras each

DESI: Field of View



DESI: Field of View



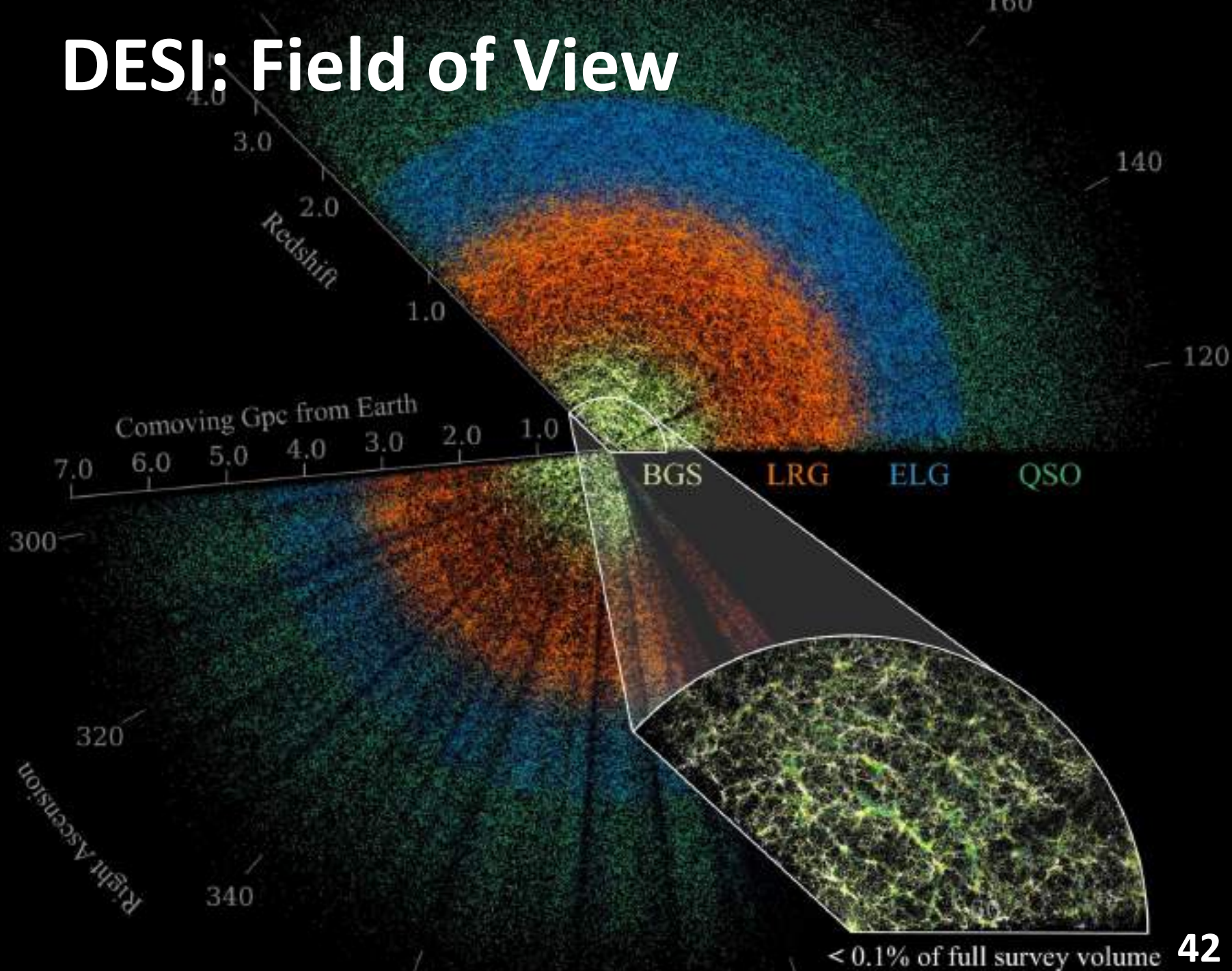
10 million Milky Way stars

13.5 million
Bright Galaxy Survey
 $0.0 < z < 0.4$

8 million
Luminous Red Galaxies
 $0.4 < z < 1.0$

16 million
Emission Line Galaxies
 $0.6 < z < 1.6$

3 million
Quasi Stellar Objects
Ly α forests: $2.1 < z < 4.5$
QSO tracers: $0.9 < z < 2.1$



Стандартная линейка

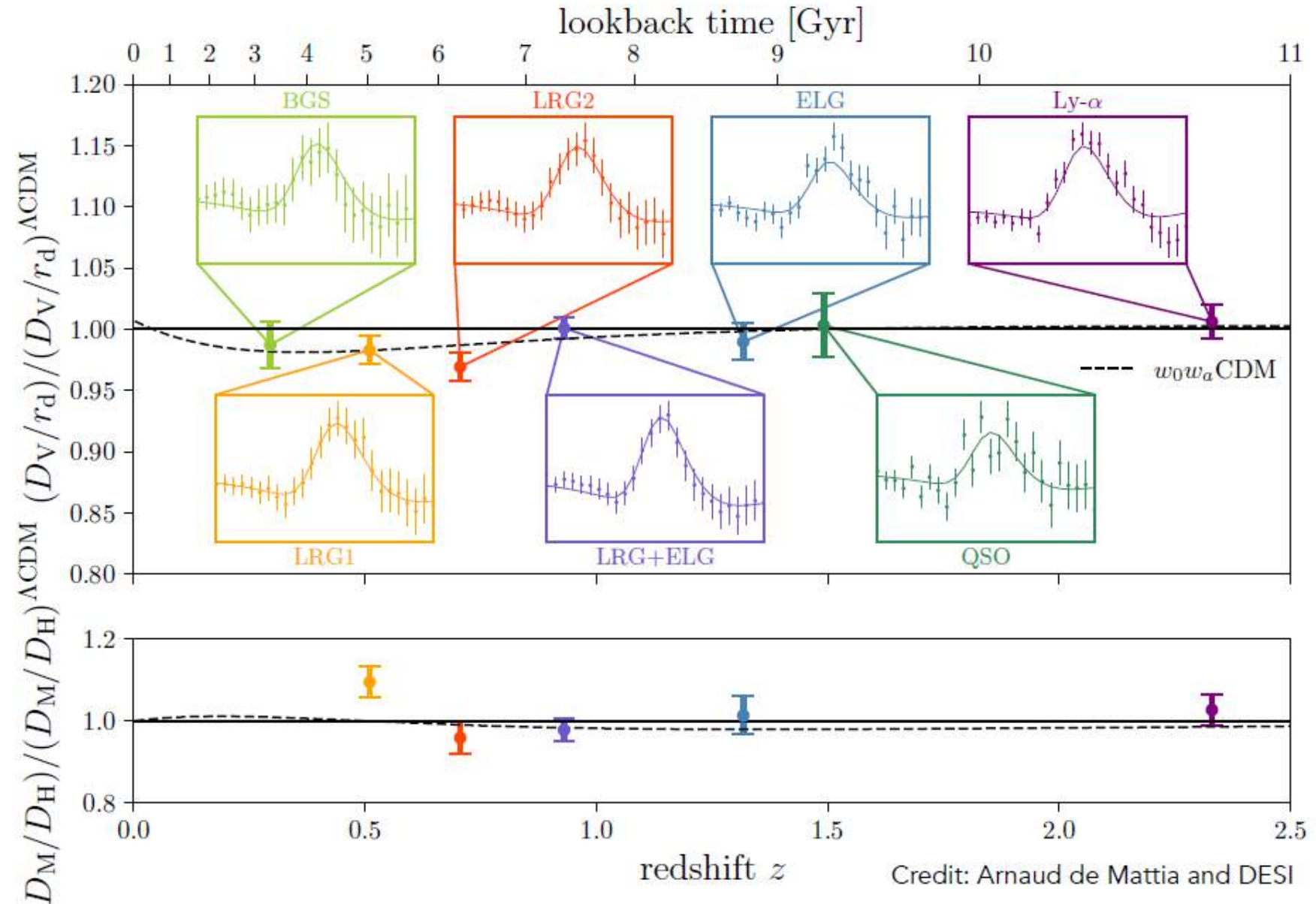
Isotropic BAO

$$\frac{D_V(z)}{r_{\text{drag}}}$$

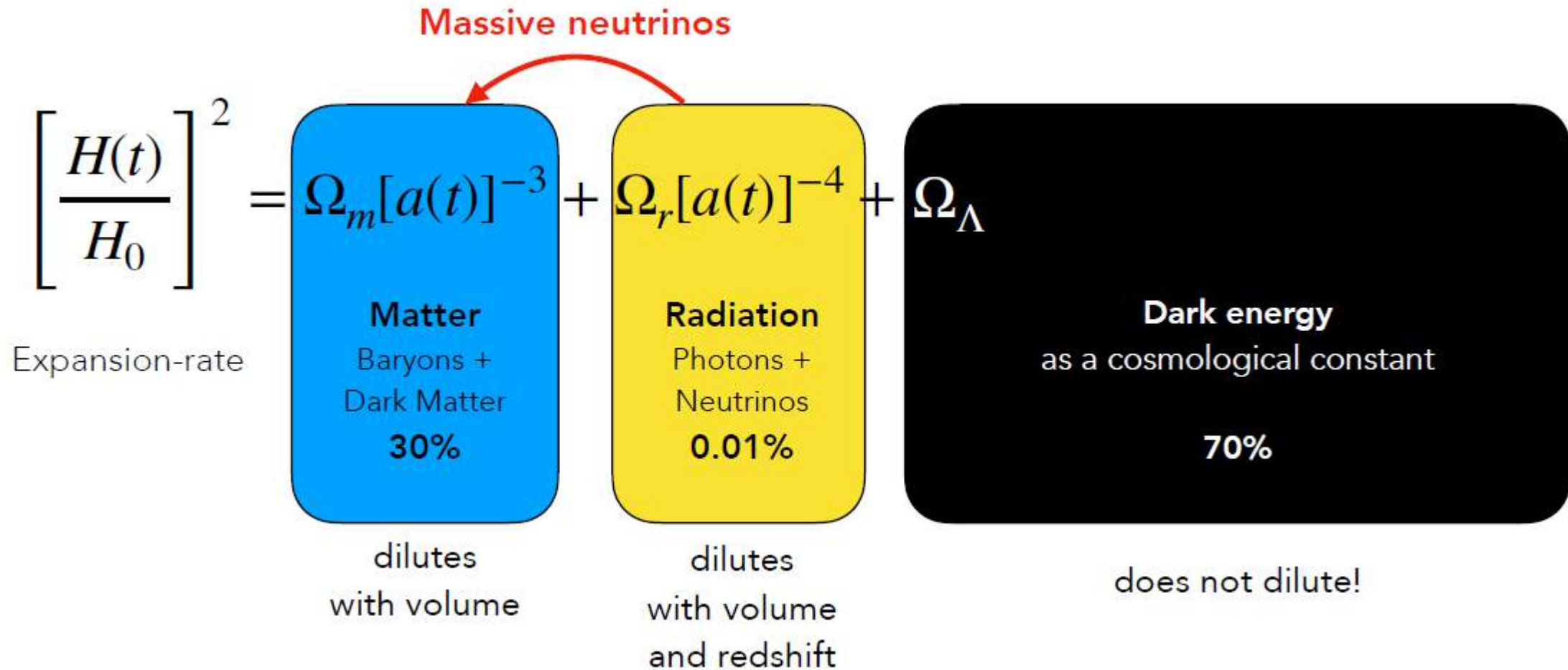


Anisotropic BAO

$$\frac{D_M(z)}{D_H(z)}$$



Расширения Λ CDM



Расширения Λ CDM

Evolving dark energy

$$w = w_0 + (1 - a)w_a$$

$$\left[\frac{H(t)}{H_0} \right]^2 = \Omega_m [a(t)]^{-3} + \Omega_r [a(t)]^{-4} + \Omega_\Lambda [a(t)]^{-3(1+w_0+w_a)} e^{3w_a[1-a(t)]}$$

Expansion-rate

Matter
Baryons +
Dark Matter
30%

dilutes
with volume

Radiation
Photons +
Neutrinos
0.01%

dilutes
with volume
and redshift

Evolving dark energy
(quintessence, phantom force)
70%

Two new parameters
 w_0, w_a

Massive neutrinos

Расширение Λ CDM: Результаты DESI

Cosmological constant Λ

$$w = -1$$

Evolving dark energy

$$w = w_0 + (1 - a)w_a$$

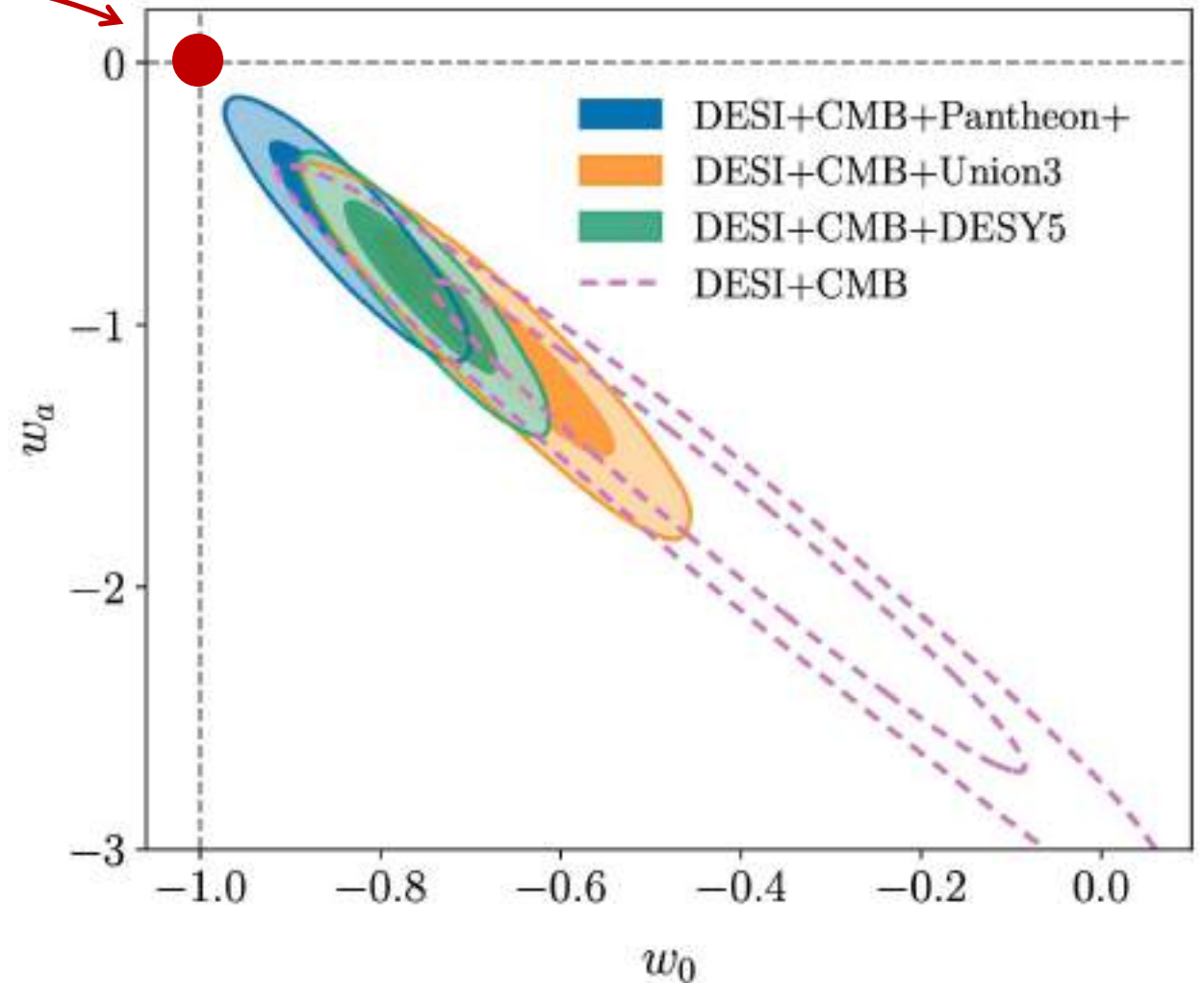
Tension with the cosmological constant:

$$\text{DESI} + \text{CMB} \Rightarrow 3.1\sigma$$

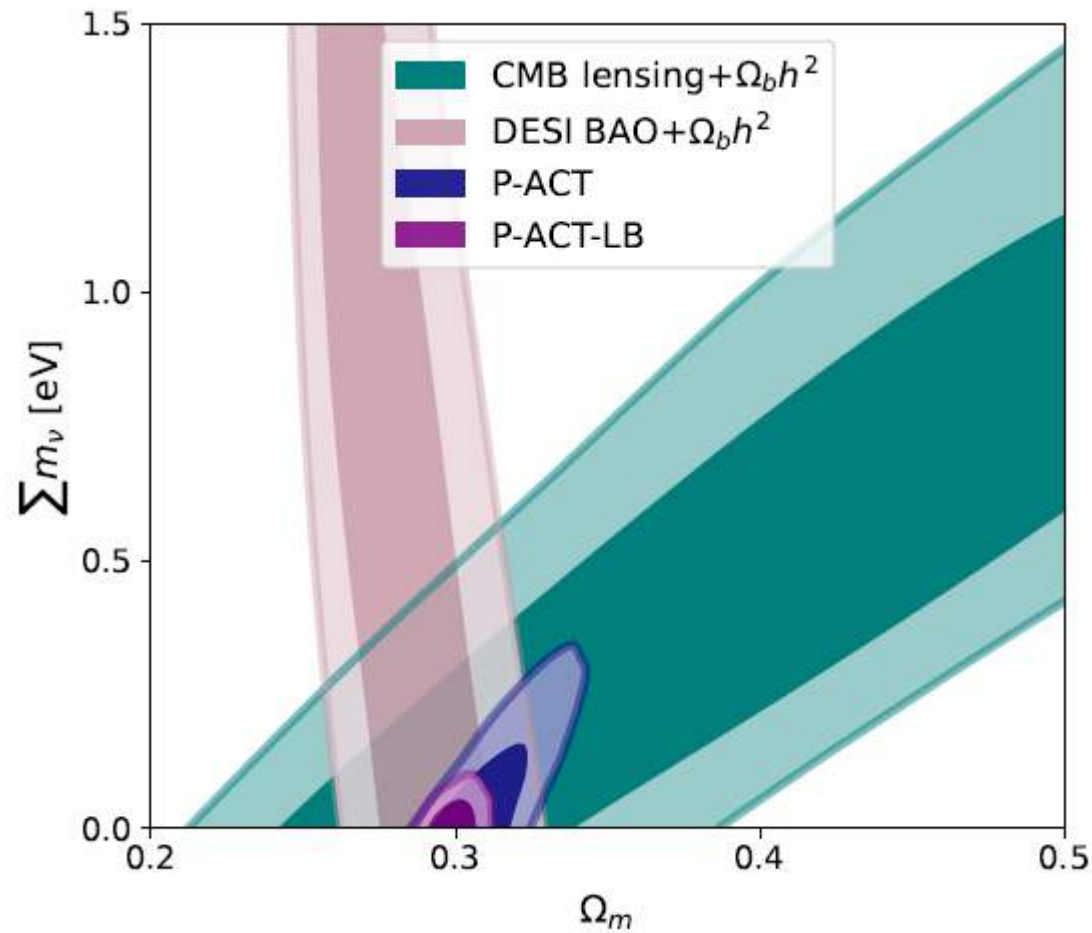
$$\text{DESI} + \text{CMB} + \text{SN}_{\text{Pantheon+}} \Rightarrow 2.8\sigma$$

$$\text{DESI} + \text{CMB} + \text{SN}_{\text{Union3}} \Rightarrow 3.8\sigma$$

$$\text{DESI} + \text{CMB} + \text{SN}_{\text{DES Y5}} \Rightarrow 4.2\sigma$$

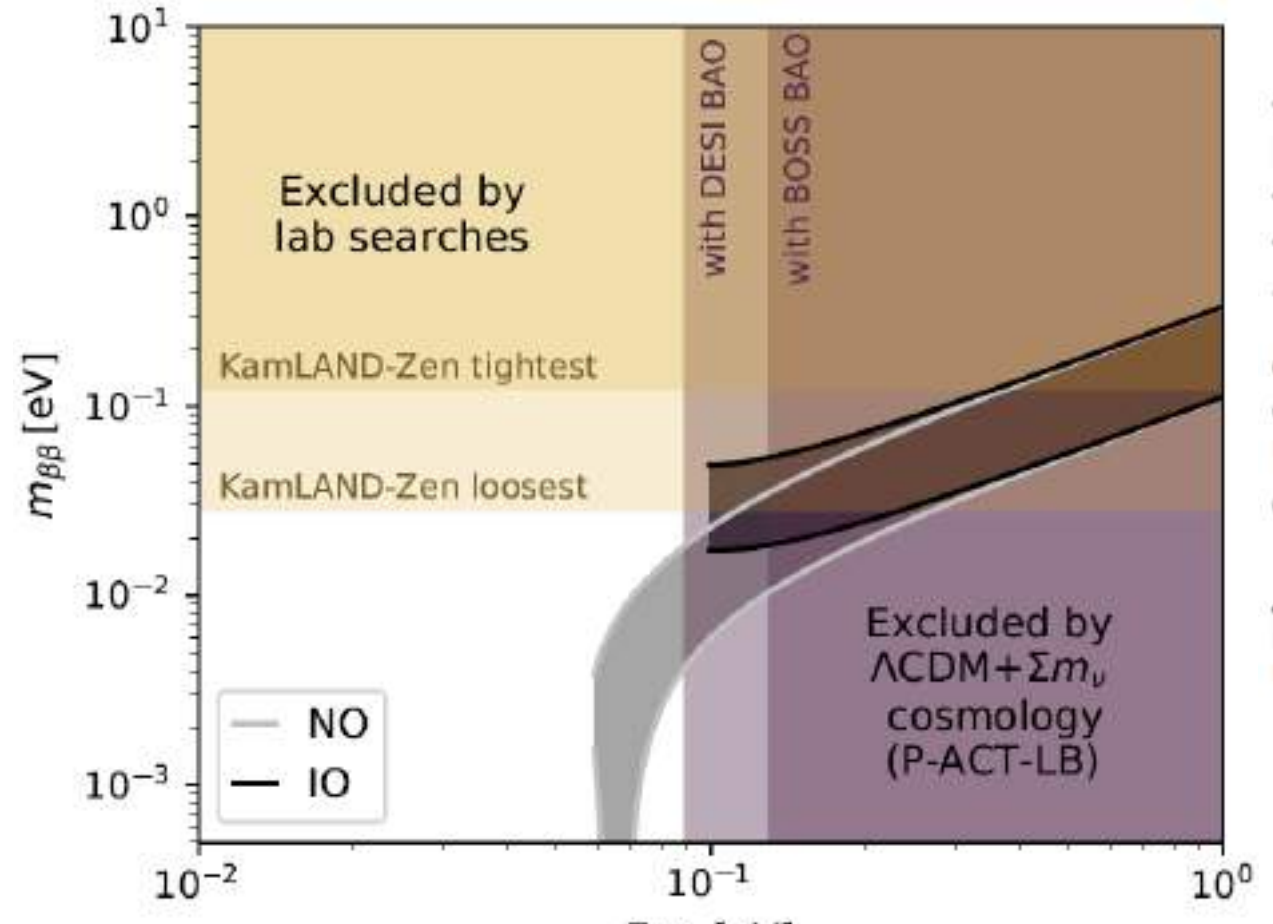


Ограничение на сумму масс нейтрино



Assuming Λ CDM :

$$\sum m_\nu < 0.089 \text{ eV} \quad (95\%, \text{P-ACT-LB})$$

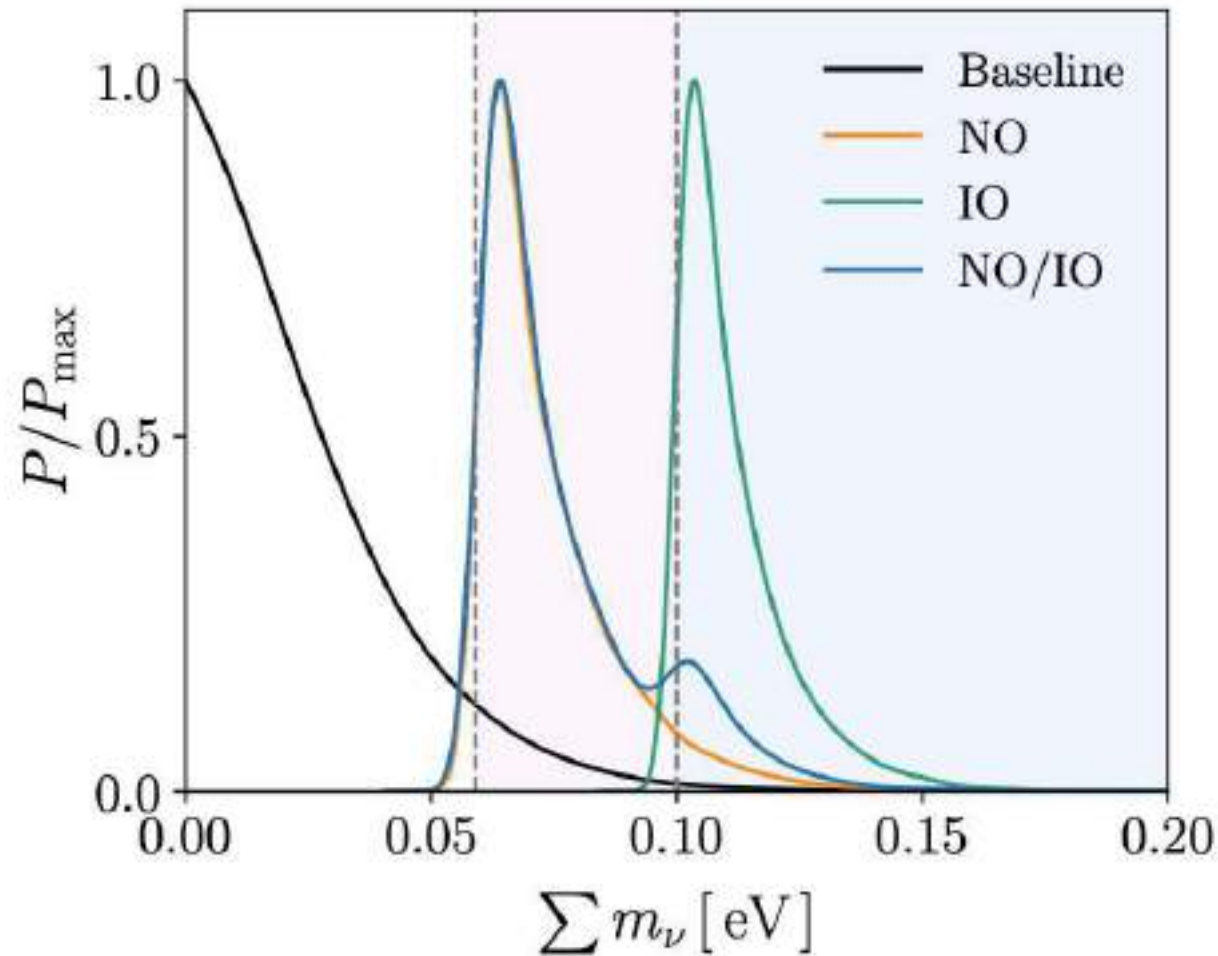


Assuming $w_0 w_a$ CDM : $\sum m_\nu < 0.163 \text{ eV}$

(95% CL) DESI + CMB + DES-SN5YR

Ограничение на сумму масс нейтрино

Using priors on Δm_{21}^2 and $|\Delta m_{31}^2|$

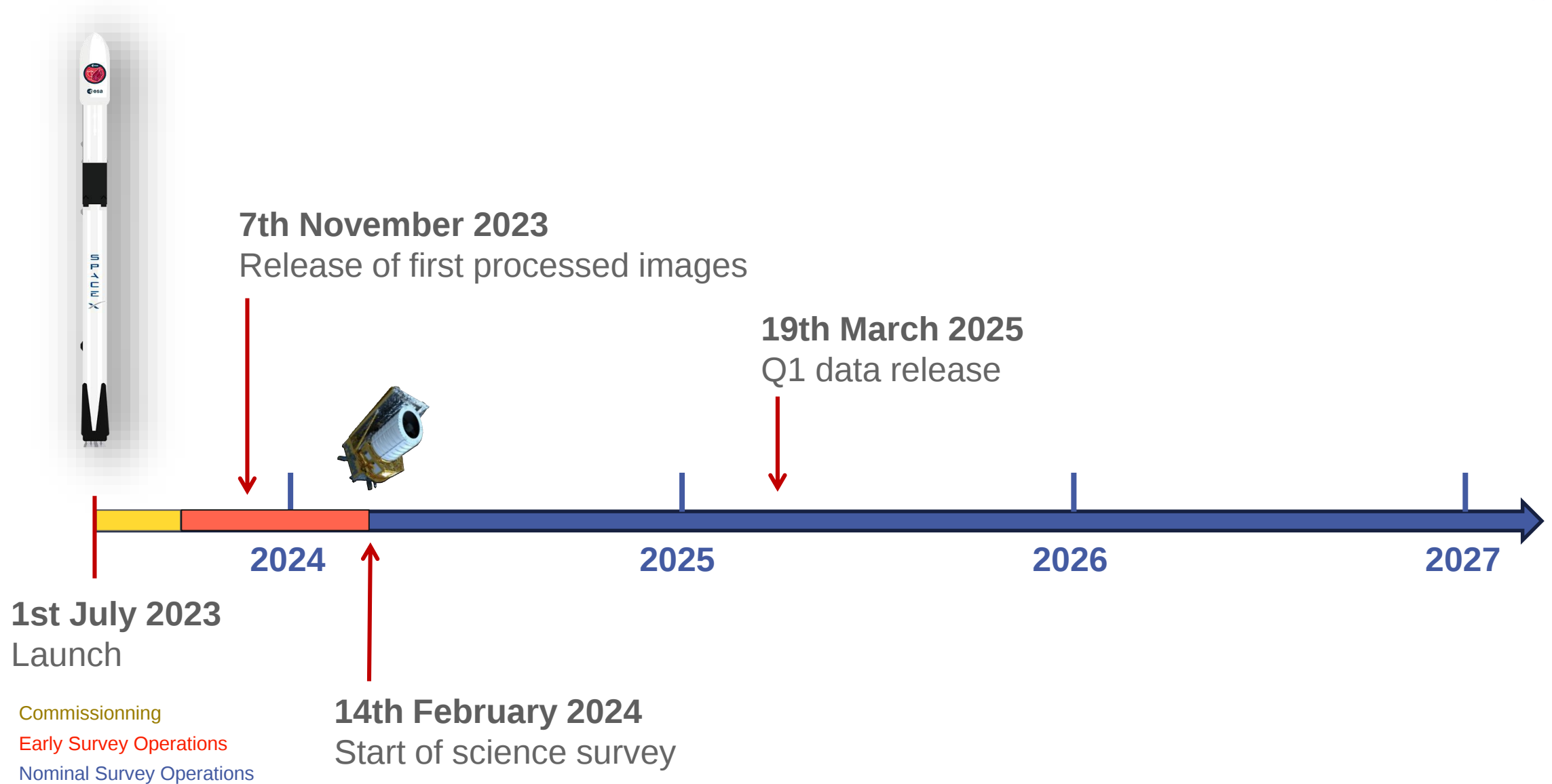


Mass of lightest neutrino

Assuming Λ CDM : $m_{\nu_e} < 0.023$ eV

(95% CL) DESI + CMB

Euclid timeline



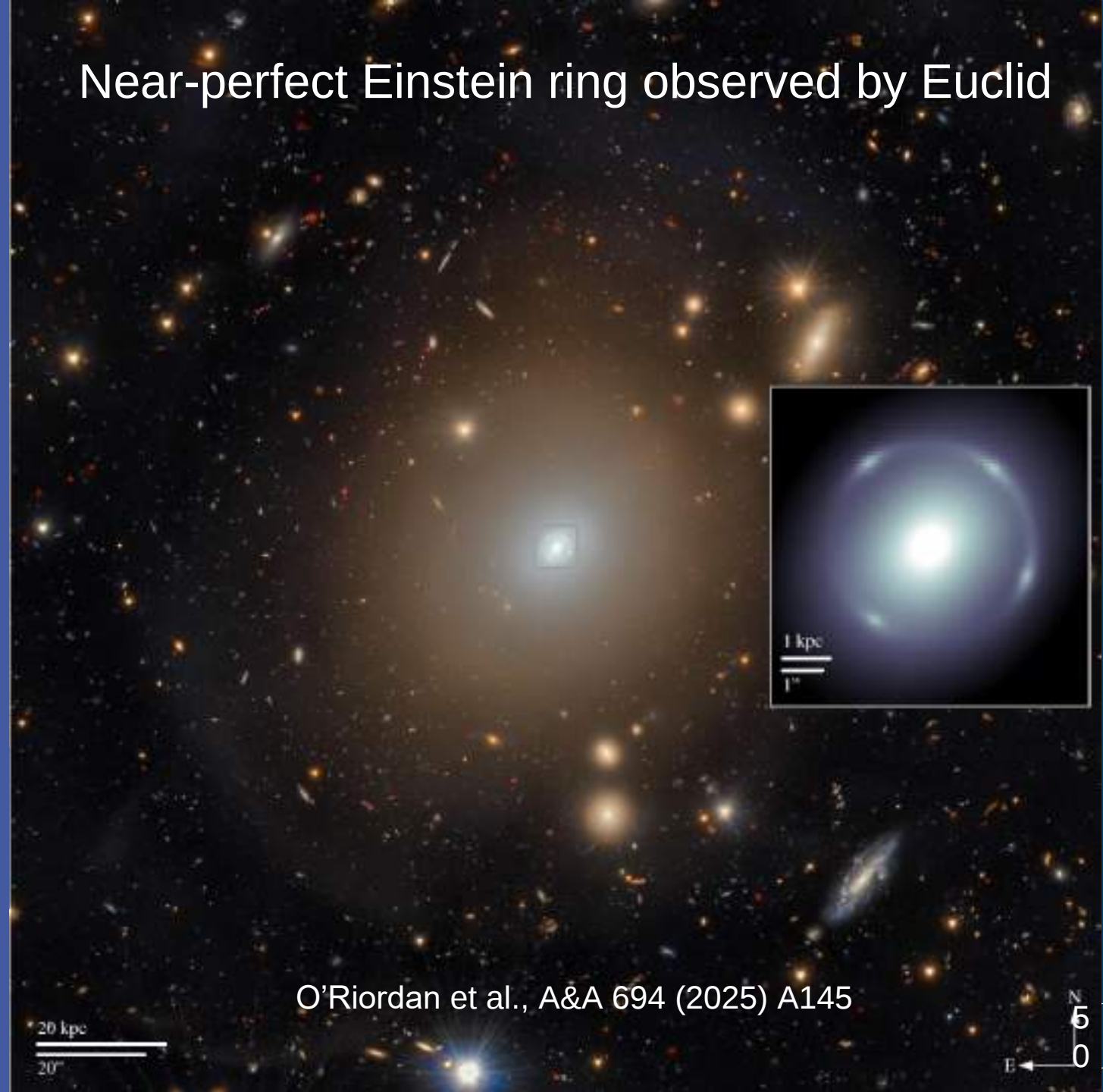
STRONG LENSING

Euclid's Einstein Ring around galaxy NGC 6505



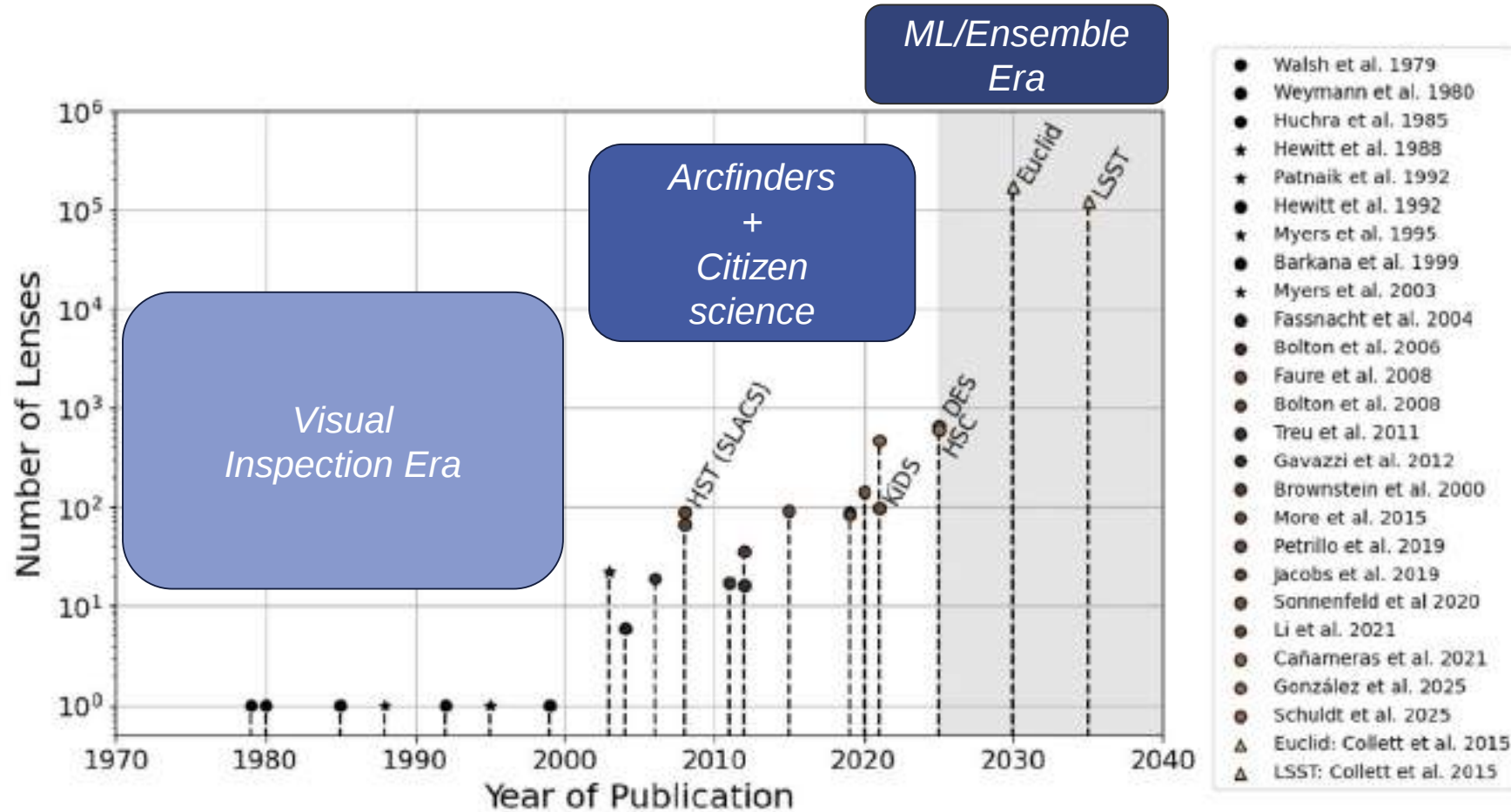
- Galaxy NGC 6506 has been known since the 1886, but this ring has never been observed!
- Lens at $z = 0.042$
- Source at $z = 0.406$

Near-perfect Einstein ring observed by Euclid



O'Riordan et al., A&A 694 (2025) A145

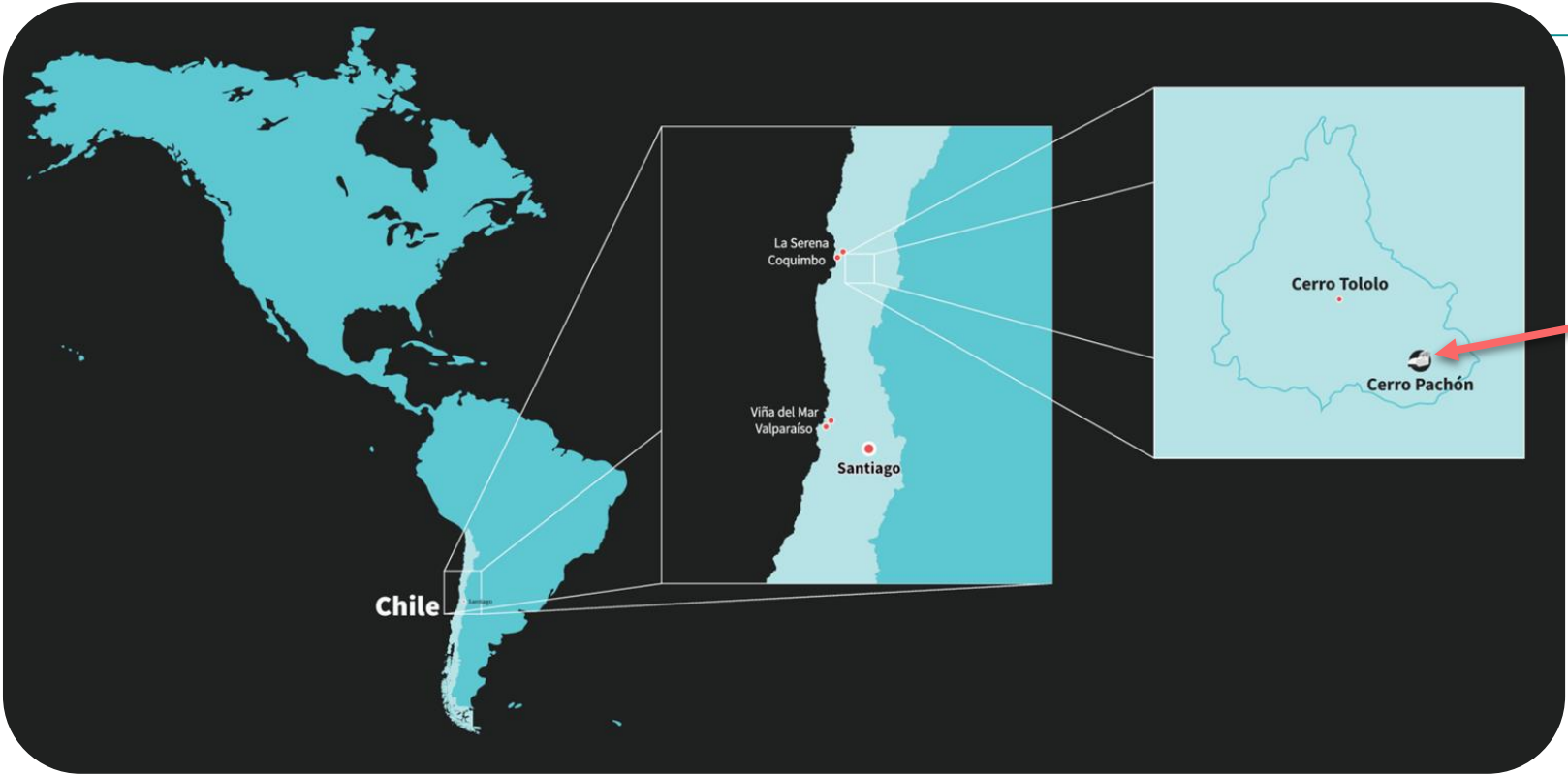
Euclid will revolutionise strong lensing studies



The challenges of lens finding:

1. Strong lenses are **rare** and **difficult** to find
2. Lens finders perform well, but aren't perfect: 'False positive problem'

LSST (Vera Rubin Observatory)



Located on **Cerro Pachón**, in the Coquimbo region of Chile

Jointly funded by the **U.S. National Science Foundation** and the **U.S. Department of Energy, Office of Science**



Mission: Capture the Cosmos

The greatest astronomical movie of all time

Wide Field of View

Largest digital camera ever built

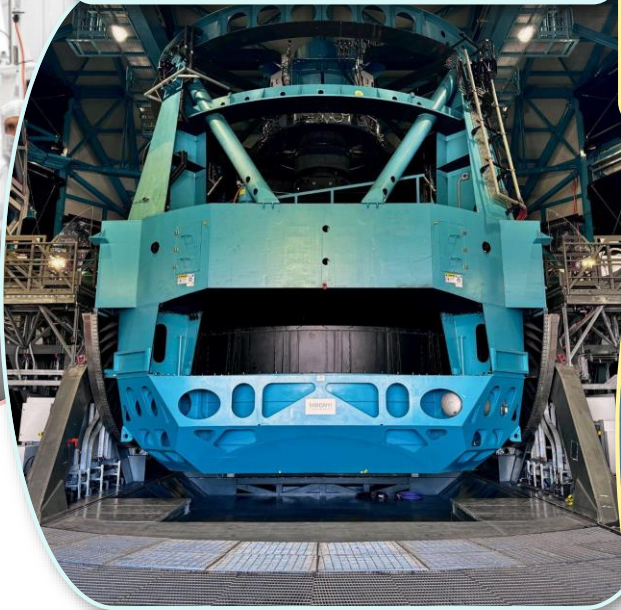


Repeatedly scan the southern sky every ~3 nights for 10 years



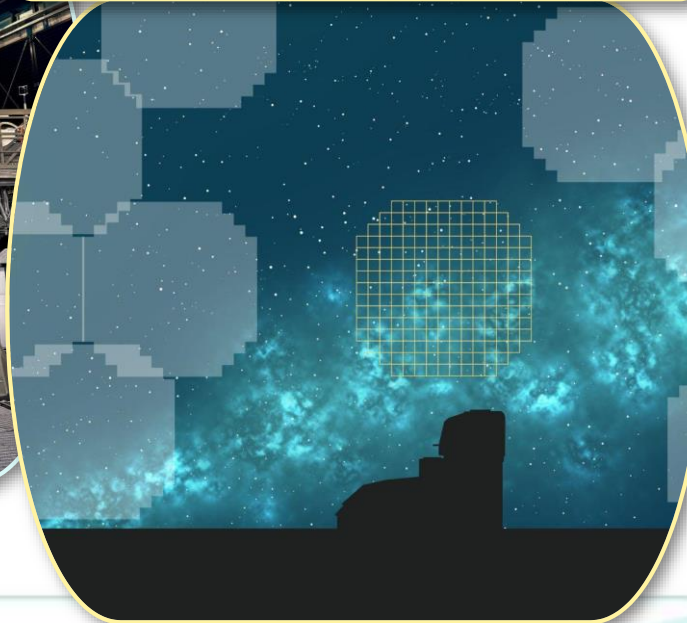
Speed

Novel three-mirror design

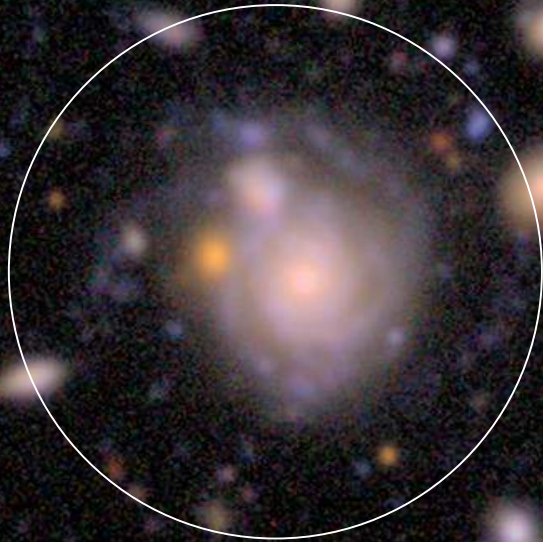


Ability to see faint objects

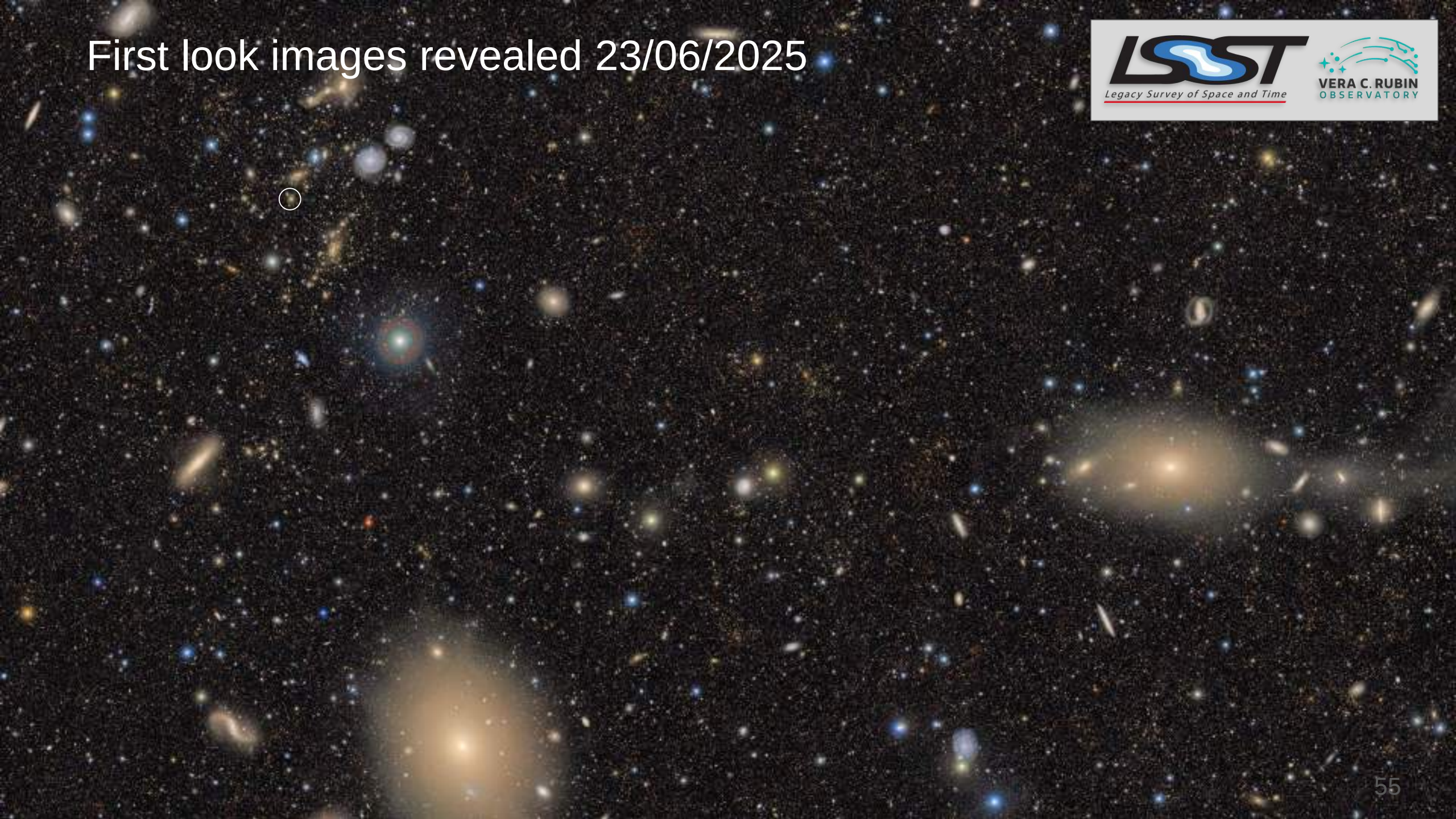
Across the entire Southern sky



First look images revealed 23/06/2025



First look images revealed 23/06/2025



Vera Rubin LSST Survey probes for Dark Energy

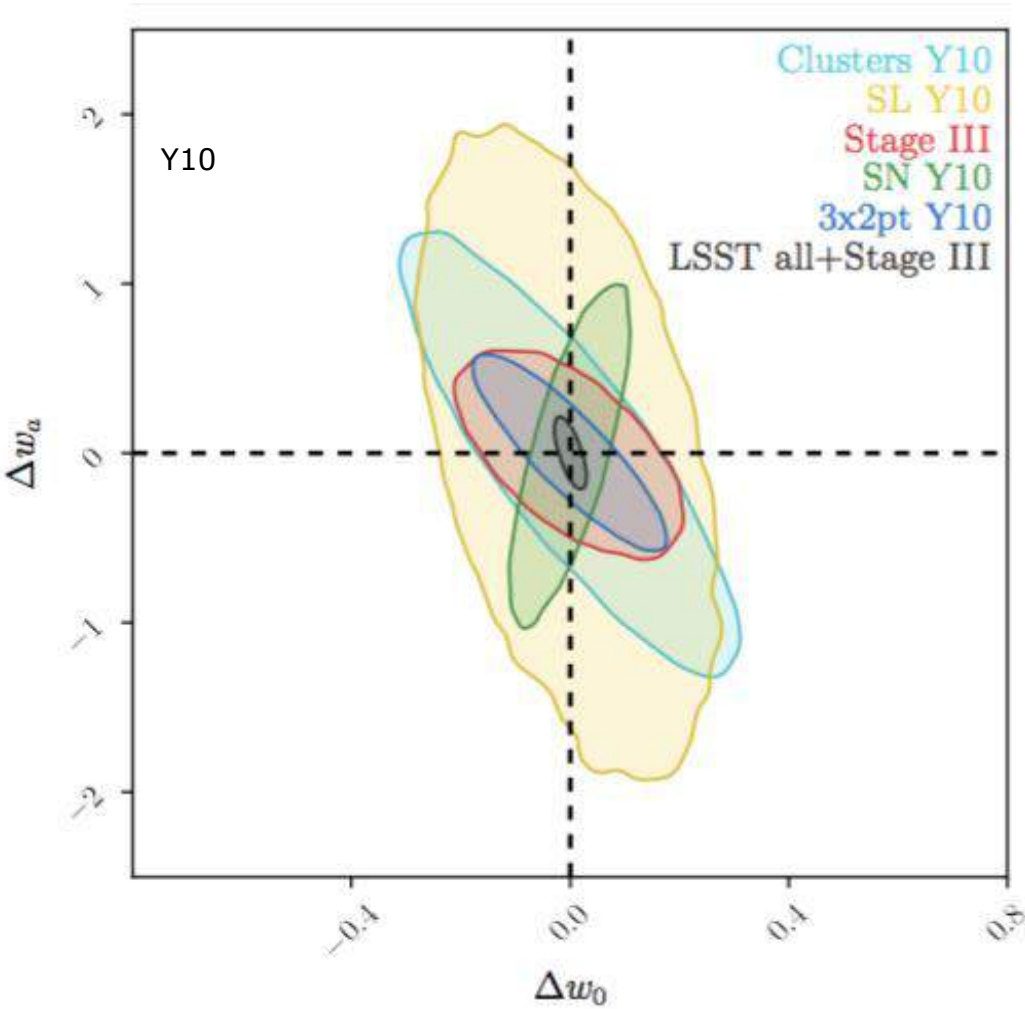


SRD Combined
Probe Forecast

За 10 лет наблюдений LSST позволит проверить эволюционные модели темной энергии с на порядок лучшей точностью!

From Cosmology Fit		
$\Delta w = w - w_{\text{true}}$	$\Delta \Omega_M = \Omega_M - \Omega_M^{\text{true}}$	χ^2/ν
-0.032 ± 0.046	-0.007 ± 0.013	11/8
-0.002 ± 0.026	0.001 ± 0.009	12/8

arXiv:2111.06858v1



$$w(a) = w_0 + (1 - a)w_a$$

Будущие эксперименты

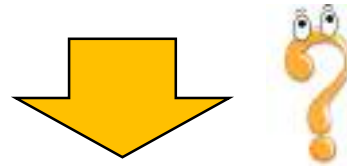
The Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME) will measure the size and shape of BAOs as a function of redshift. It will do this by mapping the distribution of matter through the 21 cm radio emission of intergalactic hydrogen. Such Hydrogen Intensity (HI) mapping is faster than using galaxy surveys which rely on observing individual galaxies and are complicated by the physics of galaxy evolution.



Заключение

Λ CDM, как и SM в ФЭЧ, с высокой точностью проверена огромным количеством независимых измерений, однако:

- есть некоторые нестыковки (напряженность Хаббла, параметр S_8)
- есть указания на возможную эволюцию темной энергии (то есть $T\dot{E} \neq \Lambda$)



Нужна модификация Λ CDM? Мы не до конца понимаем физику SN Ia?

Нет «хорошей» модификации Λ CDM, которая бы исправляла обе напряженности. Обзоры нового поколения (LSST, full DESI) в течение 5-10 лет позволят существенно (на порядки) увеличить статистику => повысить точность определения параметров Λ CDM в поздней Вселенной и их динамику.