

Нерешённые проблемы КОСМОЛОГИИ

Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Кафедра физики частиц и космологии
Физфак МГУ

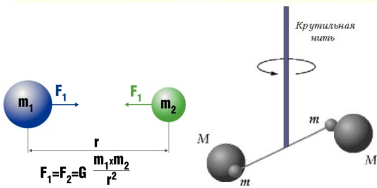
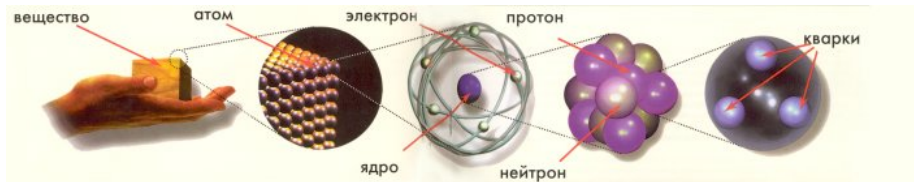
План

- 1 Мир элементарных частиц
- 2 Что нас беспокоит в космологии
 - Барийонная асимметрия Вселенной
 - Тёмная материя в современной Вселенной
 - Тёмная материя в ранней Вселенной
- 3 Новые данные – новые знания (?)

План

- 1 Мир элементарных частиц
- 2 Что нас беспокоит в космологии
 - Барионная асимметрия Вселенной
 - Тёмная материя в современной Вселенной
 - Тёмная материя в ранней Вселенной
- 3 Новые данные – новые знания (?)

Элементарные частицы и взаимодействия между ними



дальнеедействие

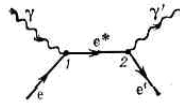


Рис. 2.

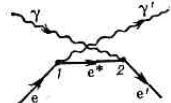
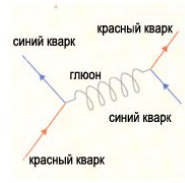


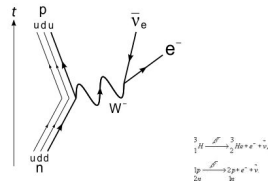
Рис. 3.



10^{-13} см

короткоедействие

10^{-16} см



Three Generations of Matter (Fermions) spin 1/2

три поколения частиц материи (фермионов)
неразличимы

электрическими,
слабыми или
сильными
"силами"

различаются
гравитационными
и юкавскими
"силами"

зачем нужны?
иерархичность

	I	II	III
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
name →	Left u Right up	Left c Right charm	Left t Right top
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$	104 MeV $-\frac{1}{3}$	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$
	Left d Right down	Left s Right strange	Left b Right bottom
Leptons	0 eV 0	0 eV 0	0 eV 0
	Left ν_e Right electron neutrino	Left ν_μ Right muon neutrino	Left ν_τ Right tau neutrino
	0.511 MeV -1	105.7 MeV -1	1.777 GeV -1
	Left e Right electron	Left μ Right muon	Left τ Right tau

0
0
g
gluon

0
0
 γ
photon

Bosons (Forces) spin 1

91.2 GeV
0
Z⁰
weak force

80.4 GeV
 ± 1
W[±]
weak force

>114 GeV
0
H
Higgs boson

spin 0

$m_p \approx 1 \text{ GeV}$

“Естественная” система единиц в физике частиц

$$\hbar = c = k_B = 1$$

измеряют в ГэВ: энергия E , масса M , температура T

$$m_p = 0.938 \text{ ГэВ}, \quad 1 \text{ К} = 8.6 \cdot 10^{-14} \text{ ГэВ}$$

измеряют в ГэВ⁻¹: время t , длина L

$$1 \text{ с} = 1.5 \times 10^{24} \text{ ГэВ}^{-1}, \quad 1 \text{ см} = 5.1 \times 10^{13} \text{ ГэВ}^{-1}$$

Стандартная модель: успехи и проблемы

Калибровочные поля (взаимодействия): γ , W^\pm , Z , g

Три поколения материи: $L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$, e_R ; $Q = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$, d_R , u_R

- Описывает

- ▶ все эксперименты с участием сильных и электрослабых взаимодействий

- Не описывает (явления)

- ▶ Нейтринные осцилляции
- ▶ Барионная асимметрия (Ω_B)
- ▶ Тёмная материя (Ω_{DM})
- ▶ Тёмная энергия (Ω_Λ)
- ▶ Почему Вселенная однородная и плоская
- ▶ Откуда взялись неоднородности

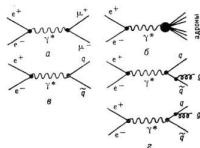
- Не объясняет (проблемы)

- ▶ Откуда и зачем так много параметров?
- ▶ CP-проблема в КХД
- ▶ Иерархия калибровочных масштабов
- ▶ Унитарность и чёрные дыры
- ▶ Квантовая гравитация

Проверки Стандартной модели

- распады частиц:
- рассеяния частиц:

$$\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu, Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



Фундаментальные частицы

масса	2.4 МэВ	1.27 ГэВ	173.2 ГэВ	0
заряд	2/3	2/3	2/3	0
спин	1/2	1/2	1/2	1
К	верхний	сcharm	top (truth)	γ фотон
В	181 МэВ	161 МэВ	4.1 ГэВ	0
А	-1/3	-1/3	-1/3	0
Р	1/2	1/2	1/2	1
К	down	strange	bottom (beauty)	g глюон
И	нижний	странный	прелестный	
Л	1.2 МэВ	0.17 МэВ	1.5 МэВ	91.2 ГэВ
Е	0	0	0	0
И	нейтрал	нейтрал	нейтрал	Z^0 z-бозон
Т	электрон	мюон	тау	
О	851 МэВ	105.7 МэВ	1.777 ГэВ	80.4 ГэВ
И	0	0	0	0
М	электрон	мюон	тау-лептон	W^\pm w-бозон

Б
О
З
О
Н
И

Три поколения фермионов

Проверки предсказаний СМ

Проверки предсказаний её мотивированных обобщений

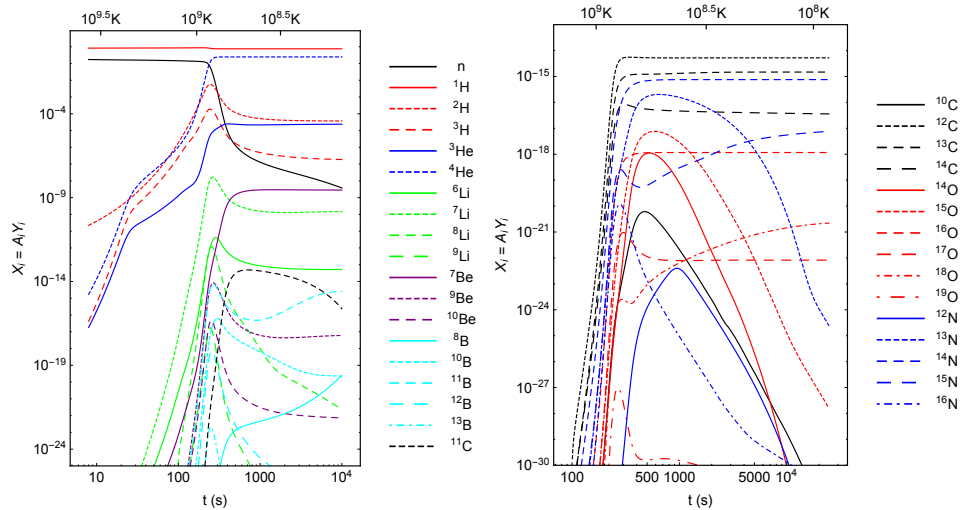
Регулярно обновляемая достоверная информация

<http://pdg.lbl.gov>

План

- 1 Мир элементарных частиц
- 2 Что нас беспокоит в космологии
 - Барионная асимметрия Вселенной
 - Тёмная материя в современной Вселенной
 - Тёмная материя в ранней Вселенной
- 3 Новые данные – новые знания (?)

Первичный нуклеосинтез



1801.08023



Барийонная асимметрия: отсутствие антивещества

Условия Сахарова успешного бариогенезиса

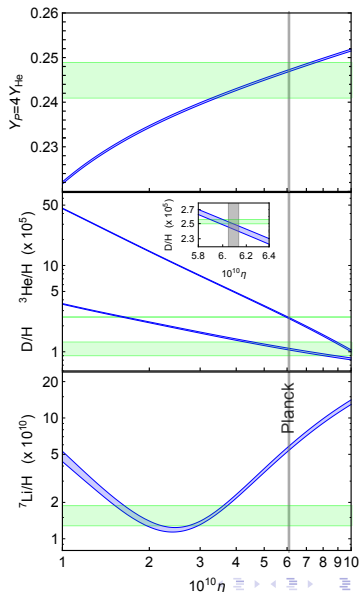
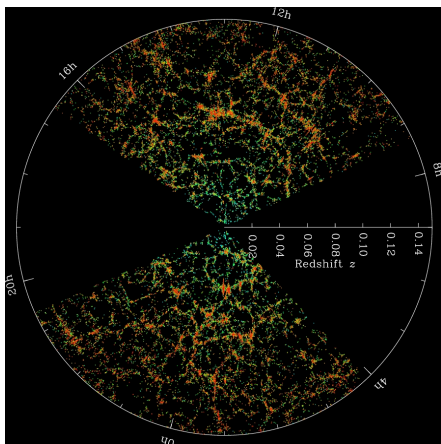
$n \rightarrow p e \bar{\nu}_e$

$$\eta \equiv n_B/n_\gamma$$

1801.08023

SDSS

- В (or L)-нарушение
- C- & CP-нарушения
- эти процессы **неравновесны**



Измерение скоростей объектов в галактиках

Эффект Доплера

$$\omega = \omega_0 \frac{1 + \frac{v_{\text{приёмник}}}{c_{\text{волн в среде}}}}{1 - \frac{v_{\text{источник}}}{c_{\text{волн в среде}}}}$$

Релятивистское обобщение

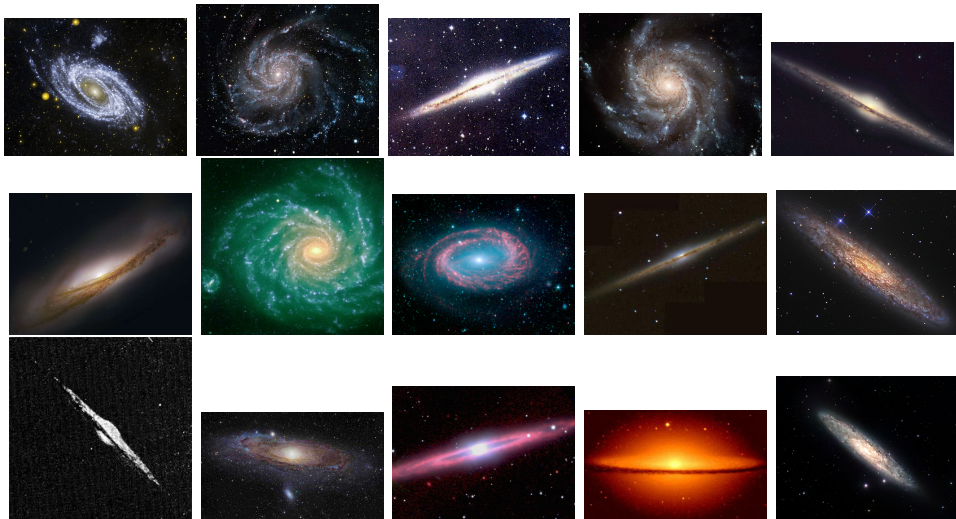
$$\omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}$$

θ — угол между направлением на источник и его скоростью \vec{v}

Позволяет найти скорость вращения вне зависимости от скорости центра вращения!



Звёзды и облака холодного газа в спиральных галактиках



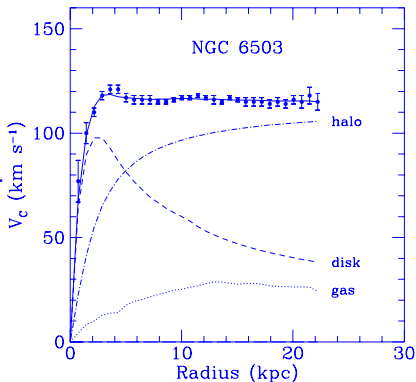
Тёмное гало галактик: пологие “кривые вращения”

$$v(R) = \sqrt{G \frac{M(R)}{R}}$$

$$M(R) = 4\pi \int_0^R \rho(r)r^2 dr$$

1 кpc = 10^3 парсек =

3.3 тыс. св. лет



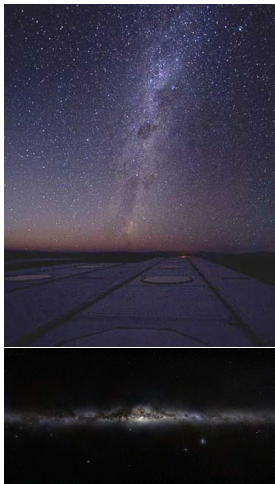
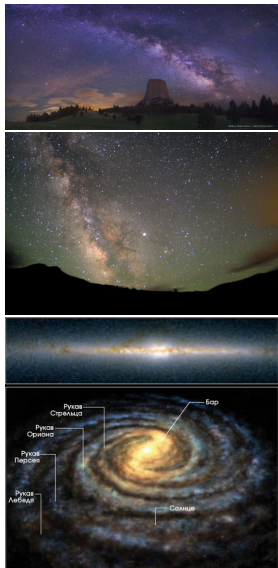
наблюдения:

$$v(R) \simeq \text{const}$$

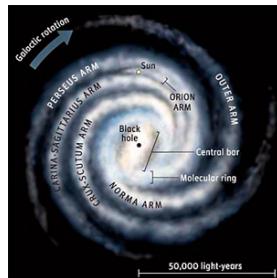
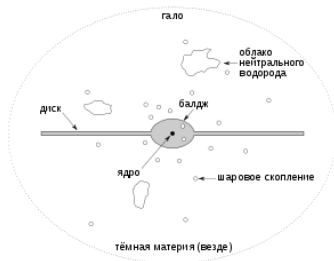
Видимая материя:

внутренние области $v(R) \propto \sqrt{R}$
 внешние (“пустые”) области $v(R) \propto 1/\sqrt{R}$

Строение Млечного Пути

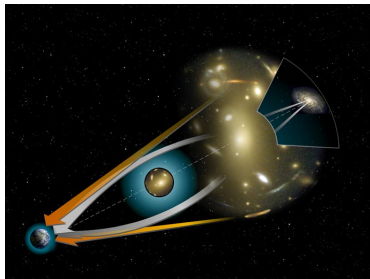


гало также помогает стабилизировать структуру диска . . .

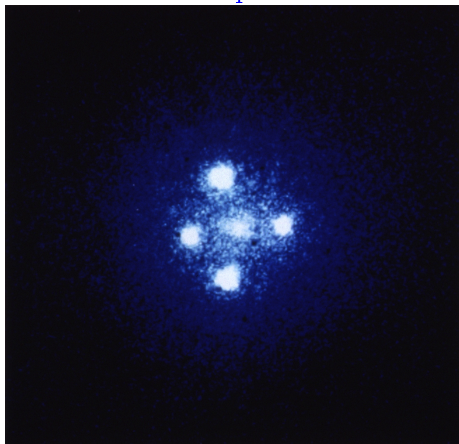


Гравитационное линзирование

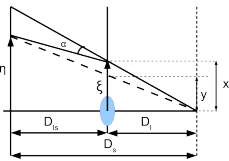
ОТО: $\alpha = 4GM/(c^2 b)$



Крест Эйнштейна



источник: квазар $D_s = 8$ млрд. св.лет
 линза: галактика $D_l = 0.4$ млрд. св.лет



$$\vec{\eta} = \frac{D_s}{D_l} \vec{\xi} - D_{ls} \vec{\alpha}(\vec{\xi})$$

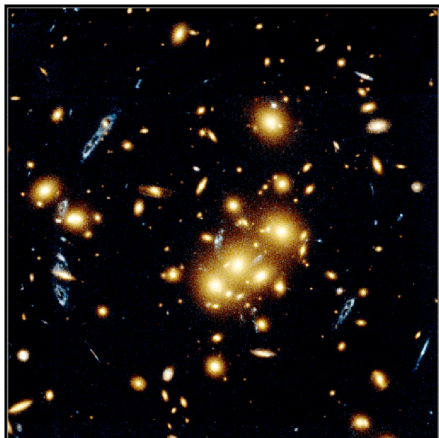
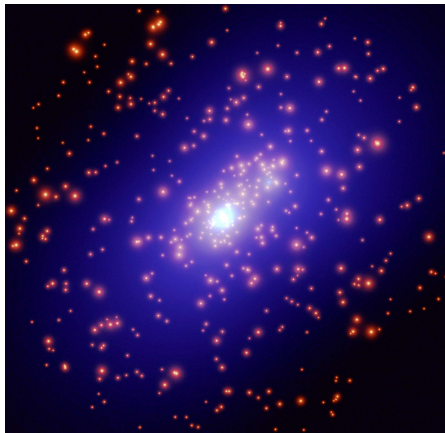
обычная линза
 со специфическим
 коэффициентом
 преломления

$$\vec{\alpha}(\vec{\xi}) = \frac{4G}{c} \int \frac{\vec{\xi} - \vec{\xi}'}{|\vec{\xi} - \vec{\xi}'|^2} d^2 \xi' \int \rho(\vec{\xi}', z) dz$$

Тёмная материя в центре скоплений галактик

гравитационное линзирование

восстановление линзы по изображению



Тёмная материя в скоплениях галактик

X-лучи от горячего газа из центров скоплений

$$\frac{\Delta P}{\Delta R} = -\mu n_e(R) m_p \frac{GM(R)}{R^2}, \quad M(R) = 4\pi \int_0^R \rho(r) r^2 dr, \quad P(R) = n_e(R) T_e(R)$$

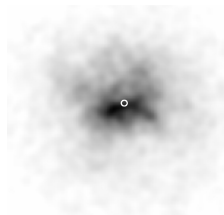
галактики в скоплениях

галактики вириализованы,

$$U + 2E_k = 0$$

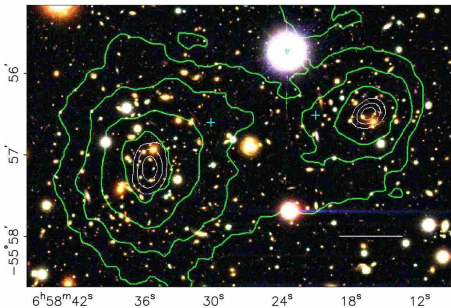
$$3M \langle v_r^2 \rangle = G \frac{M^2}{R}$$

v_r — проекция скорости на луч зрения

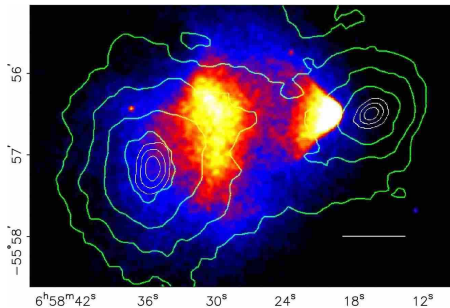


Галактика Млечный путь: движение к центру сверхскопления Девы

Столкнувшиеся скопления (Bullet cluster) 1E0657-558



Гравитационное линзирование



Рентгеновское излучение

$$M \simeq 10 \times m$$

приведён масштаб в 700 тыс. св.лет

скопления удалены на расстояние 5 млрд. св.лет

Свойства тёмной материи

Если новые частицы (X):

- 1 стабильные на космологических временах ($t \gg 14$ млрд. лет)
- 2 нерелятивистские (иначе покинут галактики!
Млечный путь: $v_X \sim v_{\text{звёзды}} \sim 10^{-3} c \simeq 300 \text{ км/с}$)
- 3 (почти) бесстолкновительны
- 4 (почти) электрически нейтральны

(квантовое!) условие локализации в галактиках:

волна де Бройля

$$\lambda = h/(M_X v_X), \quad \lambda \lesssim L_{\text{галактика}} \rightarrow$$

для бозонов

$$M_X \gtrsim 3 \times 10^{-22} \text{ эВ}/c^2$$

для фермионов

$$M_X \gtrsim 750 \text{ эВ}/c^2$$

принцип Паули: 1 состояние \leq 1 частица

$$f(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \frac{\rho_X(\mathbf{x})}{M_X} \cdot \frac{1}{(\sqrt{2\pi} M_X v_X)^3} \cdot e^{-\frac{p^2}{2M_X^2 v_X^2}} \Bigg|_{\mathbf{p}=0} \leq \frac{g_X}{h^3}$$

Основные представления о Вселенной: расширяется

Доплеровское “покраснение” света

$$L \propto a(t)$$

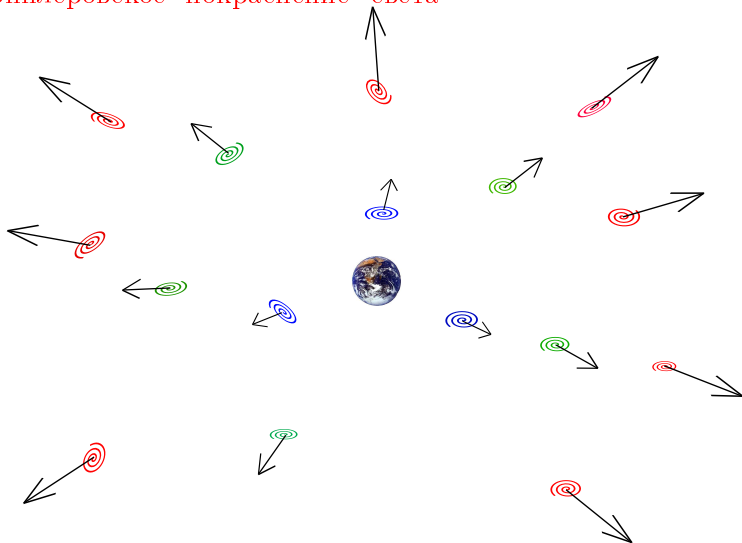
$$n \propto a^{-3}(t)$$

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

параметр
Хаббла

закон
Хаббла

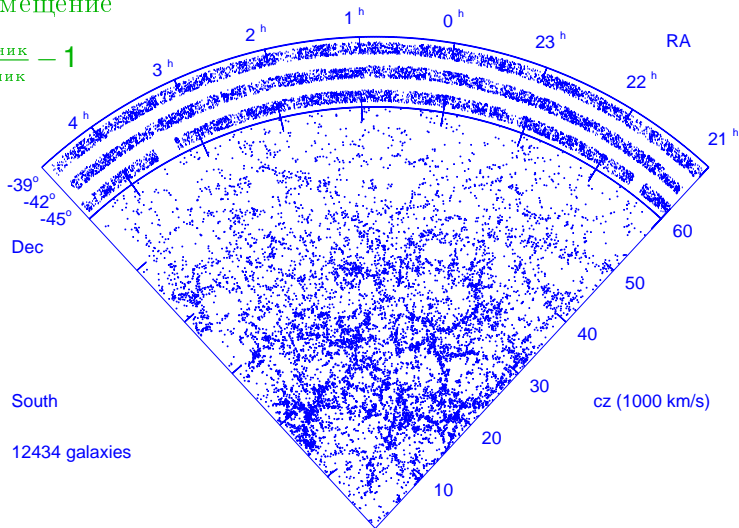
$$H(0) r = v_r$$



Наша Вселенная: однородна и изотропна

красное смещение

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{приёмник}}}{\lambda_{\text{источник}}} - 1$$



Вселенная заполнена “горячими” фотонами

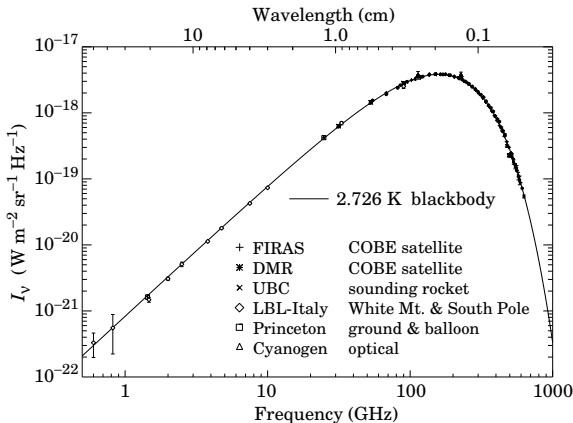
спектр $f_\gamma(\omega)$ и концентрация n_γ согласованы...

$$T_0 = 2.726 \text{ K}$$

$$f_\gamma(\omega) = \frac{1}{e^{\omega/T_0} - 1}$$

$$\begin{aligned} \rho_\gamma &= \int \frac{\omega^3}{\pi^2} d\omega f_\gamma(\omega) \\ &= \frac{\pi^2}{15} T_0^4 = 4\sigma T_0^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_\gamma &= \int \frac{\omega^2}{\pi^2} d\omega f_\gamma(\omega) \\ &= 411 \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$



где σ есть константа из закона

Стефана-Больцмана

$$j = \sigma T^4$$

Выводы из наблюдений

Итак, Вселенная однородна, изотропна, расширяется и “горячая”...

Выводы

- интервал между событиями модифицируется

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - a^2(t) \Delta \vec{x}^2$$

в ОТО расширение описывается уравнением Фридмана

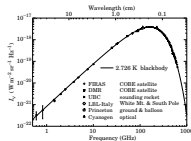
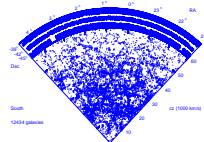
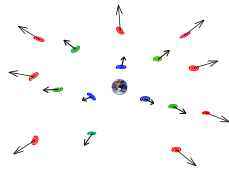
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\text{энергии}}$$

$$\rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}} = \rho_{\text{радиация}} + \rho_{\text{вещество}}^{\text{обычное}} + \rho_{\text{материя}}^{\text{тёмная}} + \dots$$

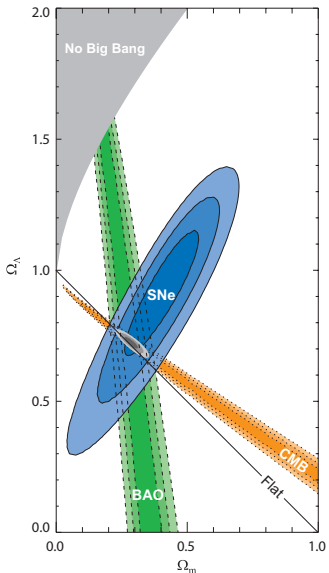
- в прошлом Вселенная была “плотнее” и “горячее”, была электромагнитная плазма

$$\rho_{\text{вещество}} \propto 1/a^3(t), \quad \rho_{\text{радиация}} \propto 1/a^4(t)$$

надёжно знаем вплоть до $T \sim 1 \text{ МэВ } c^2/k \sim 10 \text{ млрд. К}$



Данные из астрофизики и космологии сходятся



$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\text{плотность энергии}}$$

$$\rho_{\text{энергии}} = \rho_{\text{радиация}} + \rho_{\text{обычное вещество}} + \rho_{\text{тёмная материя}} + \rho_{\Lambda}$$

$$\rho_{\text{радиация}} \propto 1/a^4(t) \propto T^4(t), \quad \rho_{\text{вещество}} \propto 1/a^3(t)$$

$$\rho_{\Lambda} = \text{const}$$

$$\frac{3H_0^2}{8\pi G} = \rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}}(t_0) \equiv \rho_c \approx 5.3 \times 10^{-6} \frac{\text{ГэВ} c^2}{\text{см}^3}$$

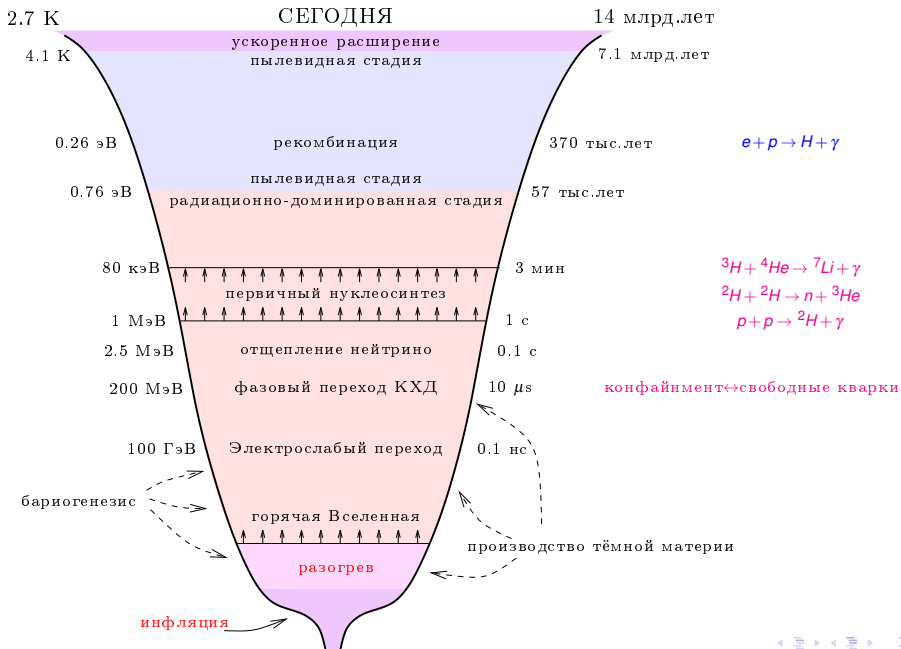
вклад РИ: $\Omega_{\gamma} \equiv \frac{\rho_{\gamma}}{\rho_c} = 0.5 \times 10^{-4}$

Вклад барионов (водород, гелий): $\Omega_B \equiv \frac{\rho_B}{\rho_c} = 0.046$

Вклад нейтрино: $\Omega_{\nu} \equiv \frac{\sum \rho_{\nu_i}}{\rho_c} < 0.01$

Вклад тёмной материи: $\Omega_{DM} \equiv \frac{\rho_{DM}}{\rho_c} = 0.25$

Вклад тёмной энергии: $\Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\rho_{\Lambda}}{\rho_c} = 0.70$



Измерение $a(t)$ даёт состав современной Вселенной

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - a^2(t) \Delta \vec{x}^2$$

Как мы его проверяем?

Измеряя расстояние L до объекта!

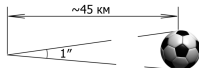
Изменяется закон распространения света

- Измеряя угловой размер θ объекта известного размера d не зависящего от возраста

– однотипные галактики

пятна в анизотропии реликтового излучения

$$\theta = \frac{d}{L}$$



- изменяющегося со временем по известному закону, например: $d(t) \propto a(t)$

– барионные акустические осцилляции

$$\theta(t) = \frac{d(t)}{L}$$



- Измеряя яркость объекта J заданной светимости F

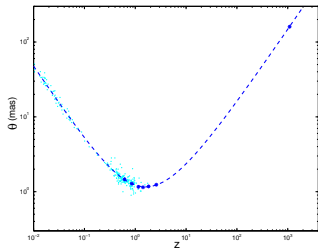
– “стандартные свечи”

$$J = \frac{F}{4\pi L^2} \rightarrow J = \frac{F}{4\pi L^2(1+z)(1+z)} \quad \frac{\text{энергия}}{\text{время} \times \text{площадь}}$$

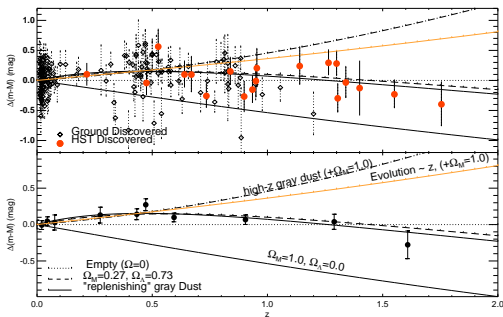
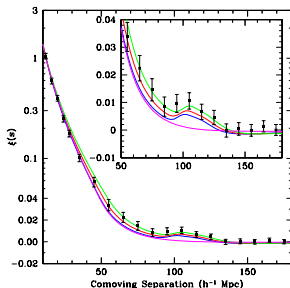


В расширяющейся Вселенной все эти законы модифицируются

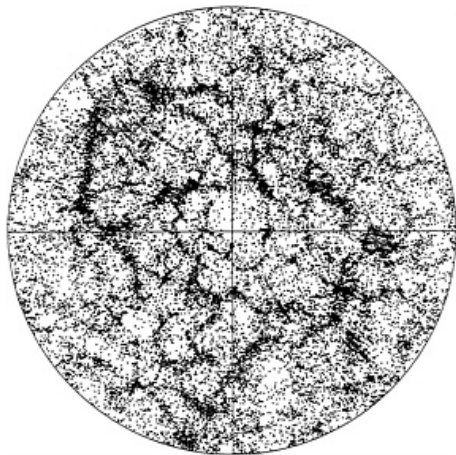
Результаты “измерений расстояний”



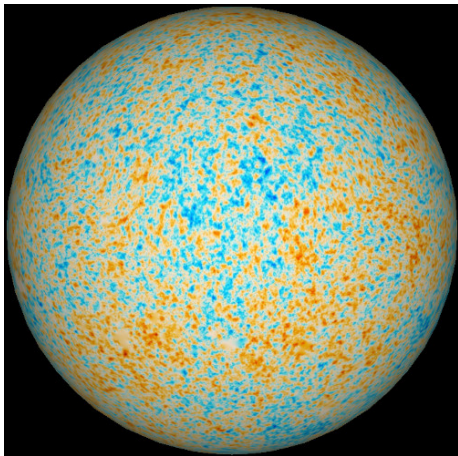
$$\Delta(m-M) = 5 \log \frac{r_{ph}}{r_{ph}(\Omega_c = 0.8, \Omega_M = 0.2)}$$



У них одна природа... и она квантовая

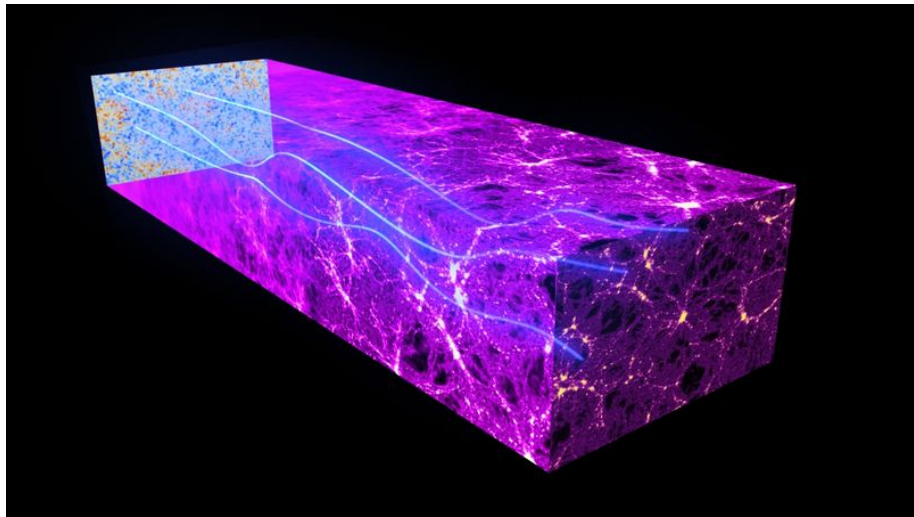


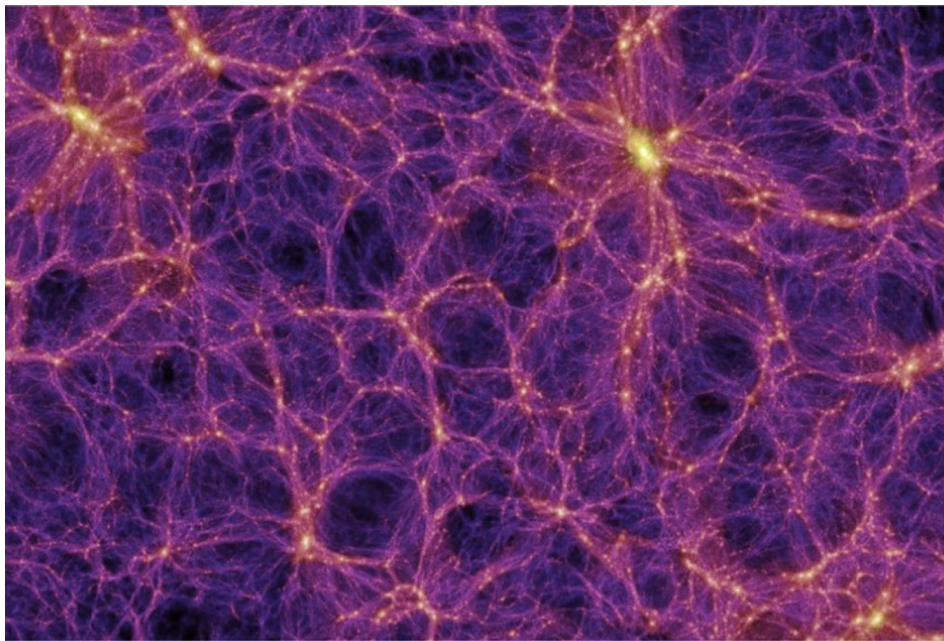
Крупномасштабная структура



Анизотропия РИ

Рост неоднородностей в расширяющейся Вселенной

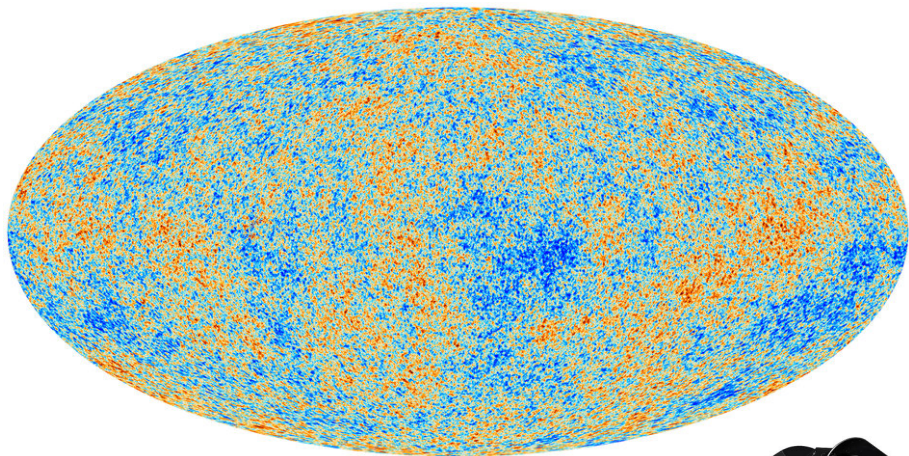




План

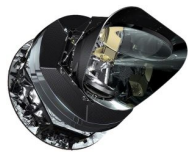
- 1 Мир элементарных частиц
- 2 Что нас беспокоит в космологии
 - Барионная асимметрия Вселенной
 - Тёмная материя в современной Вселенной
 - Тёмная материя в ранней Вселенной
- 3 Новые данные – новые знания (?)

Первые результаты эксперимента Planck (2013)

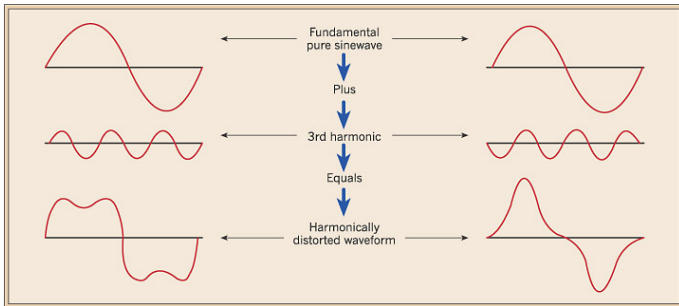


$$\frac{\Delta T}{T} \sim \frac{1}{1000}$$

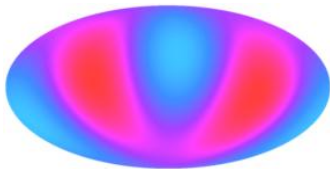
Спектр остаётся планковским !!



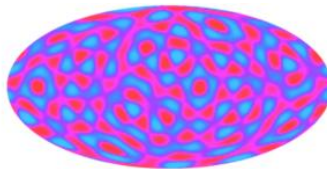
Разложение по гармоникам



ЗВУК



$l = 2$

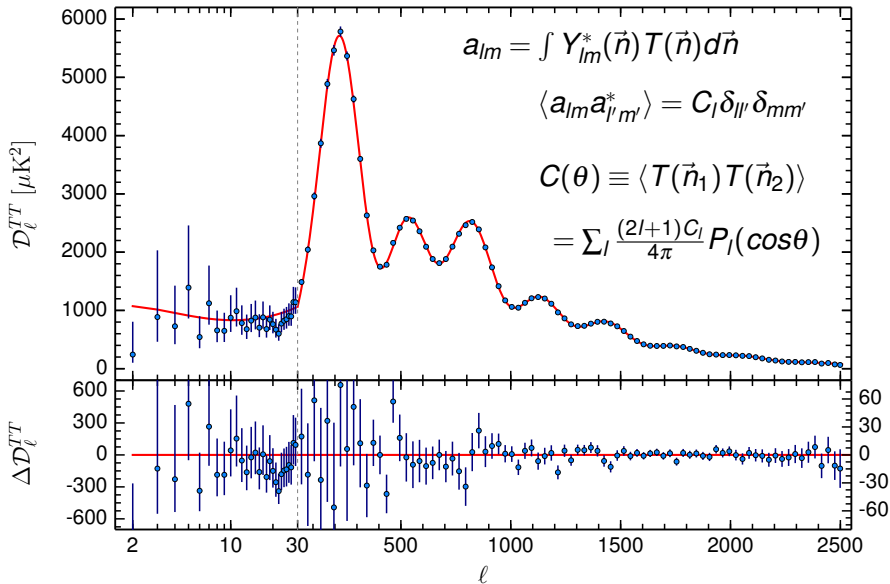


$l = 16$

Температура на
небесной сфере

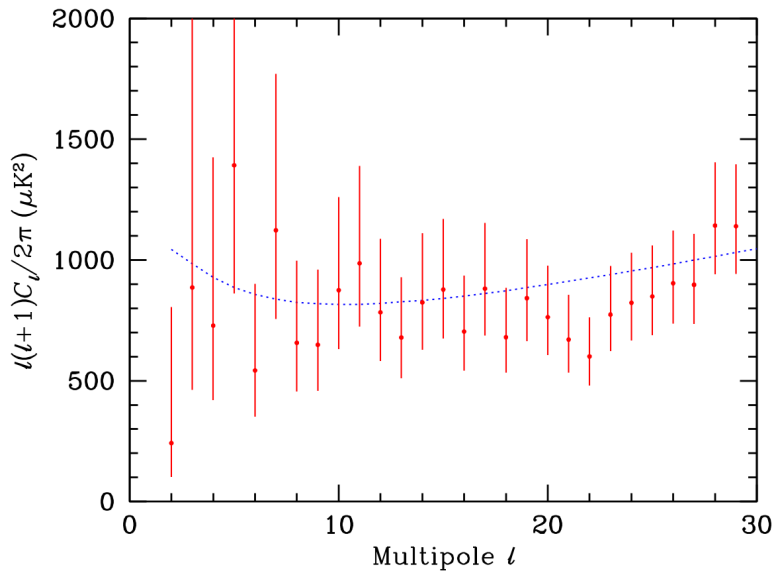
Спектр анизотропии РИ, Planck

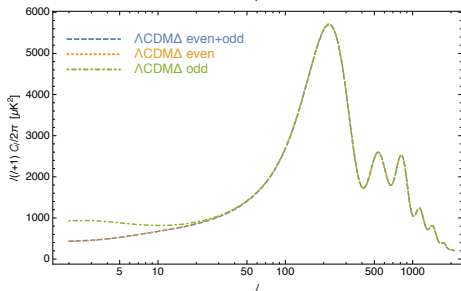
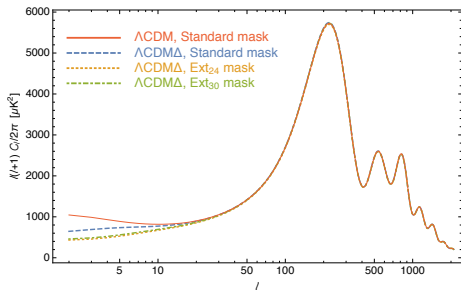
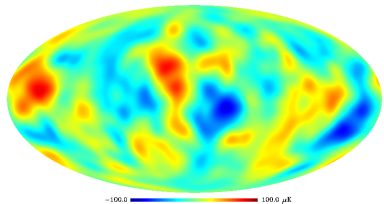
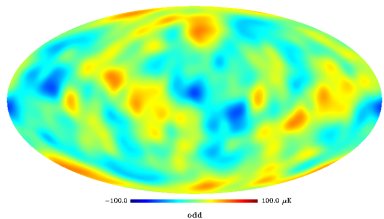
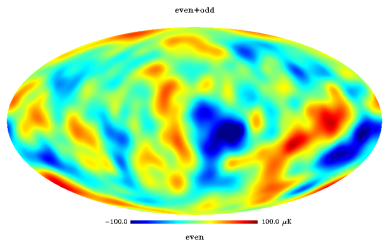
1502.01582



Анизотропия на больших углах

1603.09703



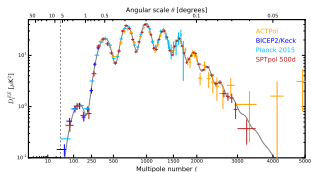
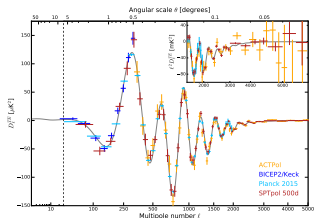
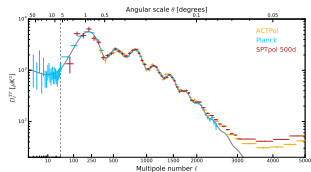
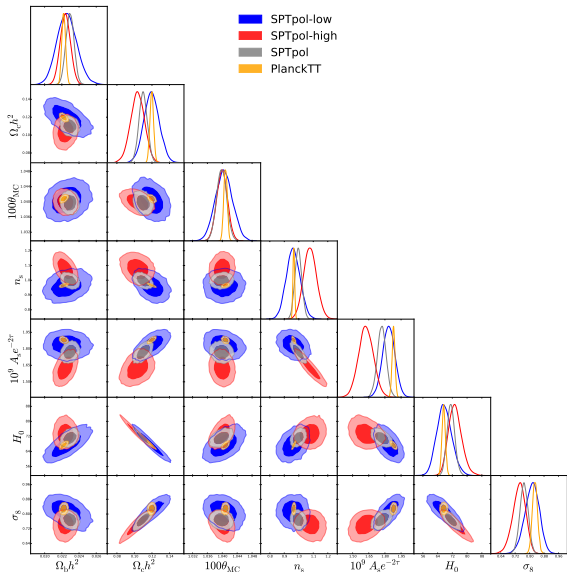


$$P(k) = k^3 / (k^2 + \Delta^2)^{2-n_s/2}$$

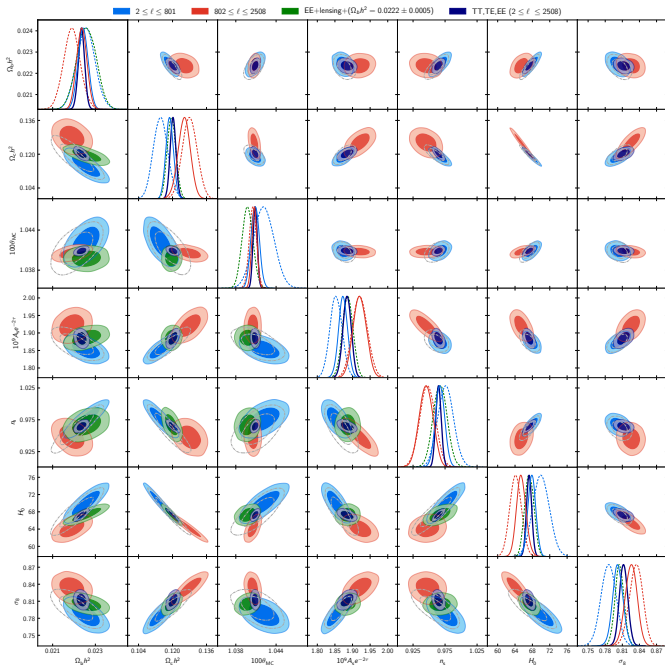
1712.03288

SPTpole with critical $I = 1000$

1707.09353

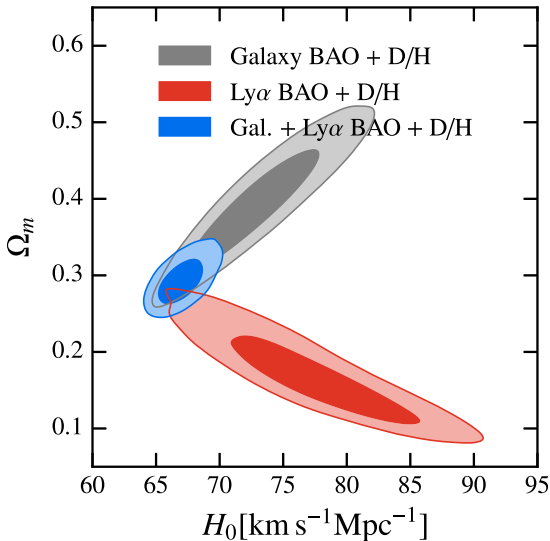
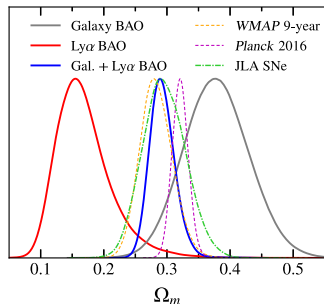
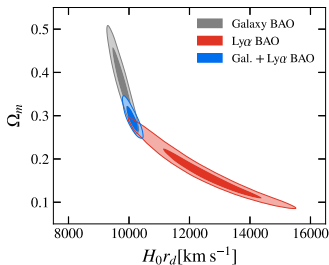


Новые данные – новые знания (?)



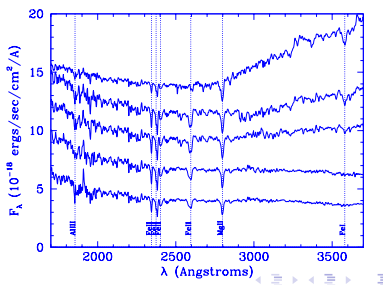
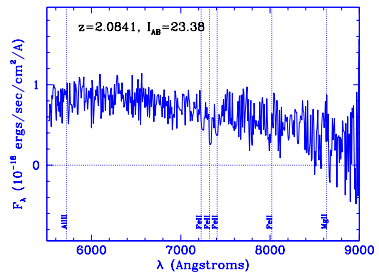
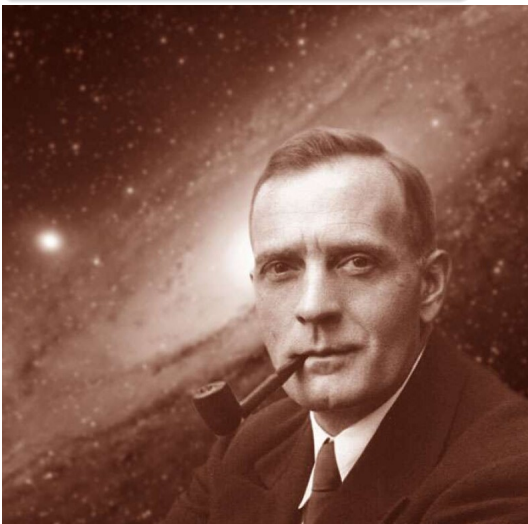
Impact of BAO: Galaxies vs Ly- α

1707.06547



Расширение: красное смещение z $\lambda_{\text{abs.}}/\lambda_{\text{em.}} \equiv 1 + z$

$z \ll 1$ закон Хаббла : $cz = H_0 r$



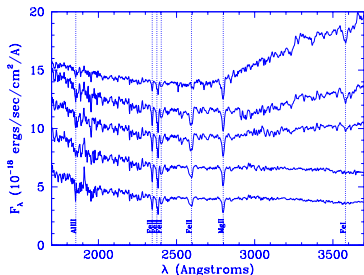
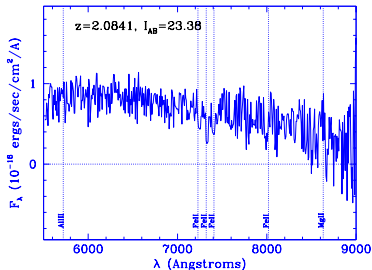
Расширение: красное смещение z $\lambda_{\text{abs.}}/\lambda_{\text{em.}} \equiv 1 + z$

$z \ll 1$ закон Хаббла

$$cz = H_0 r$$

Измерения Э.Хаббла (1929)

$$H_0 \approx 550 \pm 100 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$$



Расширение: красное смещение z $\lambda_{\text{abs.}}/\lambda_{\text{em.}} \equiv 1 + z$

$z \ll 1$ закон Хаббла

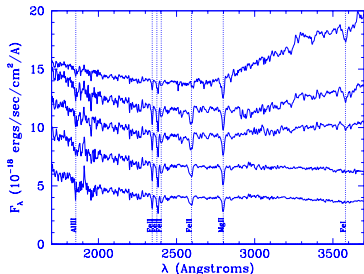
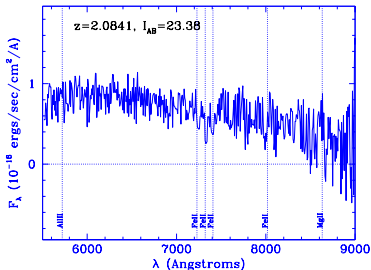
$$cz = H_0 r$$

Измерения Э.Хаббла (1929)

$$H_0 \approx 550 \pm 100 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$$

Измерения.. на рубеже веков

$$H_0 \approx 73 \pm 7 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$$



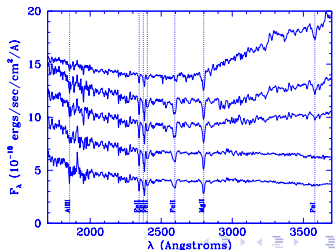
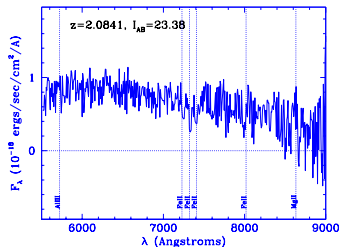
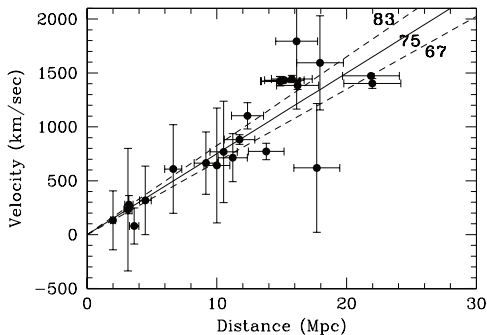
Расширение: красное смещение z

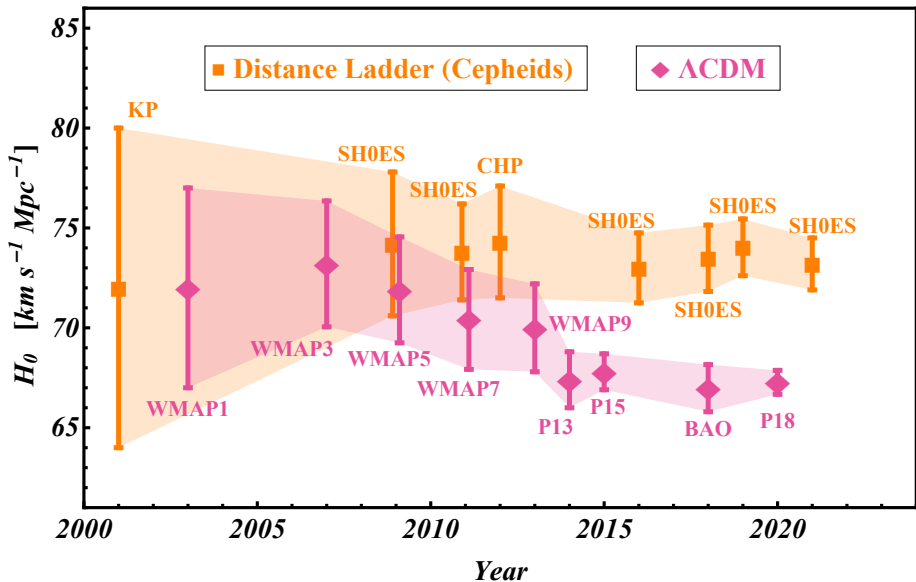
$$\lambda_{\text{abs.}} / \lambda_{\text{em.}} \equiv 1 + z$$

закон Хаббла : $c z = H_0 r$

стандартные свечи

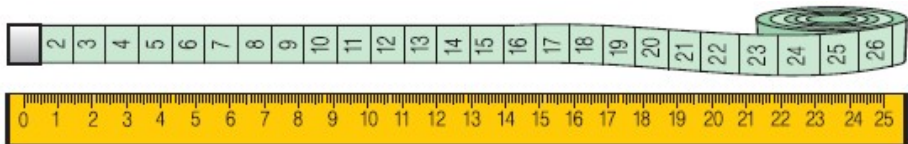
Hubble Diagram for Cepheids (flow-corrected)



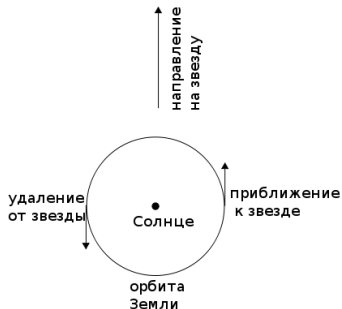


2105.05208

Лестница расстояний... стартуем от наблюдателя



ИЗМЕРЯЕМ



- размер орбиты Земли

$$2\pi R = v \times 1 \text{ год}$$

- расстояние по углу (годовой параллакс)

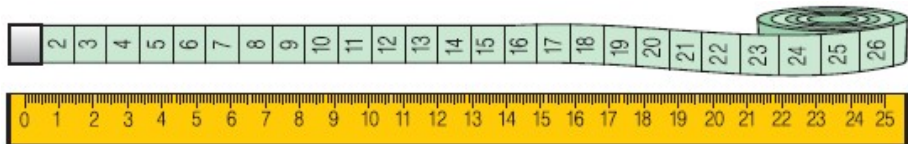
$$L = \theta \times 2R$$

- светимость F по яркости J и расстоянию

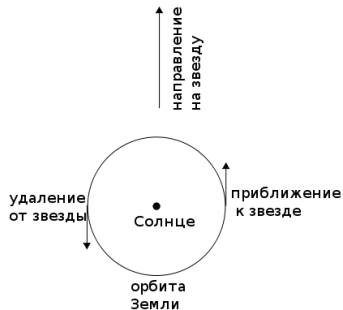
$$J = \frac{F}{4\pi L^2}$$

- нашли связь F и другой наблюдаемой (частота вспышек, темп затухания, ...) – **определили стандартную свечу**

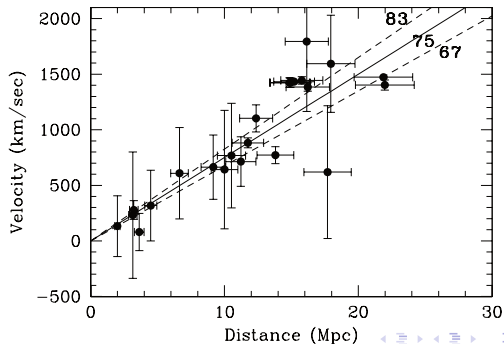
Лестница расстояний... стартуем от наблюдателя



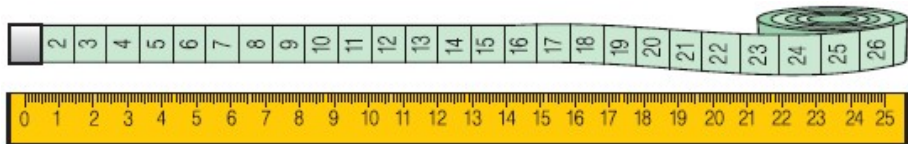
Измеряем светимость по яркости и расстоянию



Hubble Diagram for Cepheids (flow-corrected)



Лестница расстояний... от цефеид к сверхновым



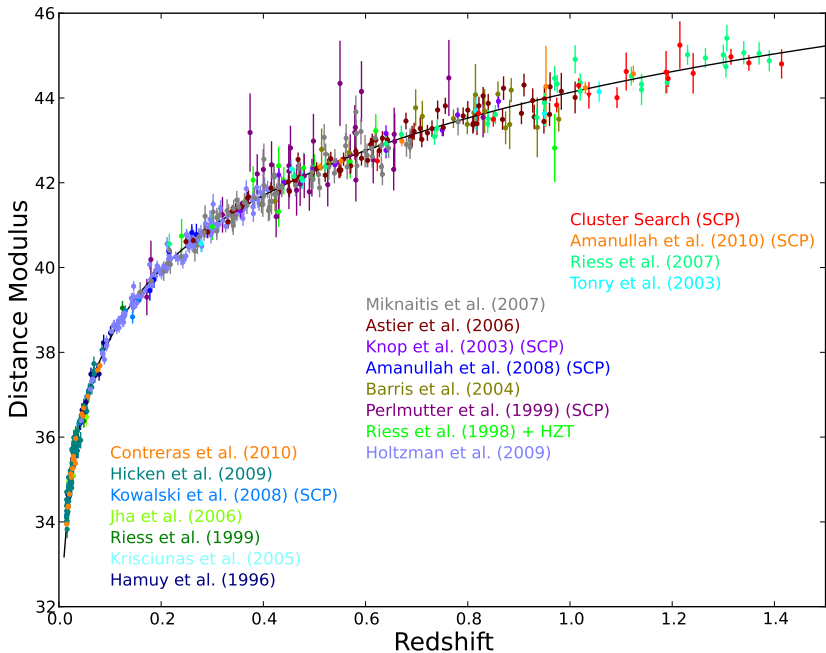
Измеряем яркость объекта J заданной светимости F – “стандартные свечи”

$$J = \frac{F}{4\pi L^2} \rightarrow J = \frac{F}{4\pi L^2(1+z)(1+z)} \quad \frac{\text{энергия}}{\text{время} \times \text{площадь}}$$



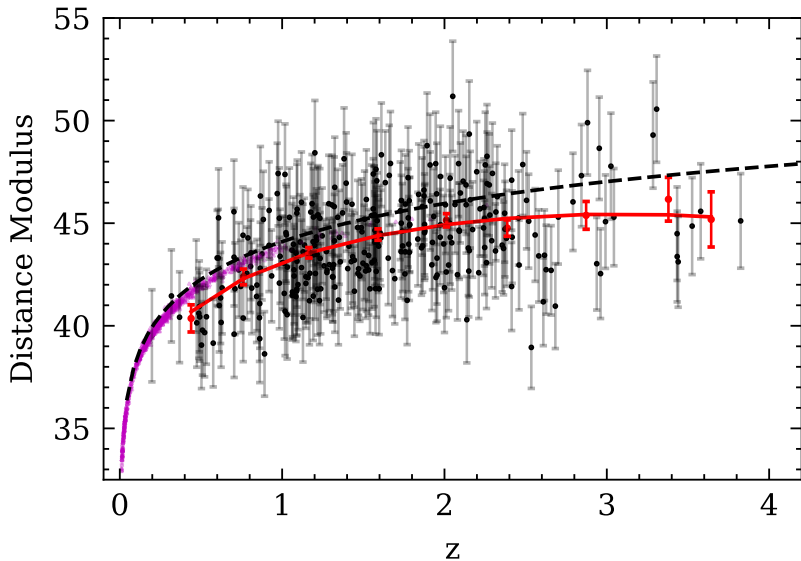
Для расширяющейся Вселенной формула модифицируется

$$J = \frac{F}{4\pi d_L^2}, \quad \text{где} \quad d_L = c(1+z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

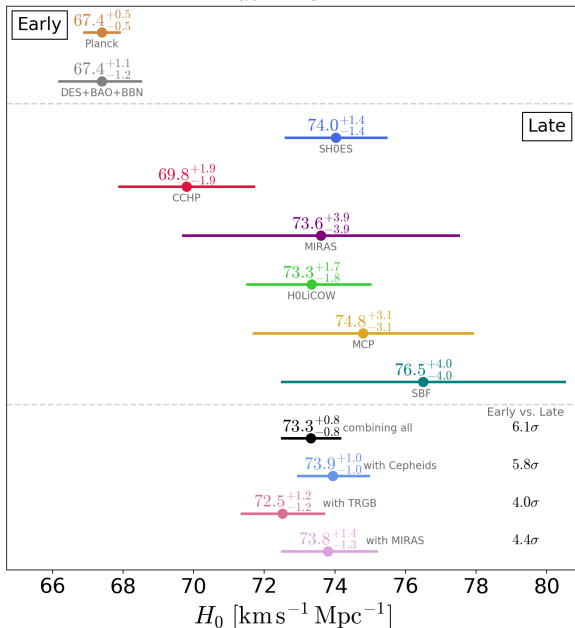


Ещё дальше – квазары

2110.03671



flat – Λ CDM

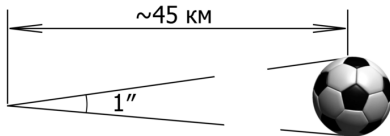


Альтернатива: расстояние углового размера

Измеряем угловой размер θ объектов известного размера d

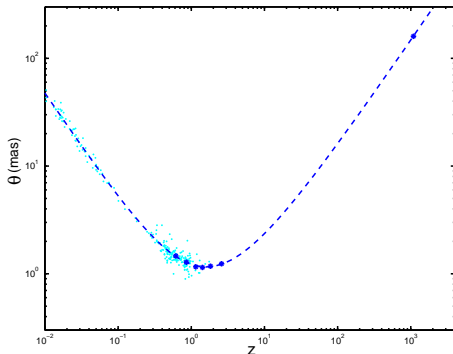
– однотипные галактики

$$\theta = \frac{d}{L}$$

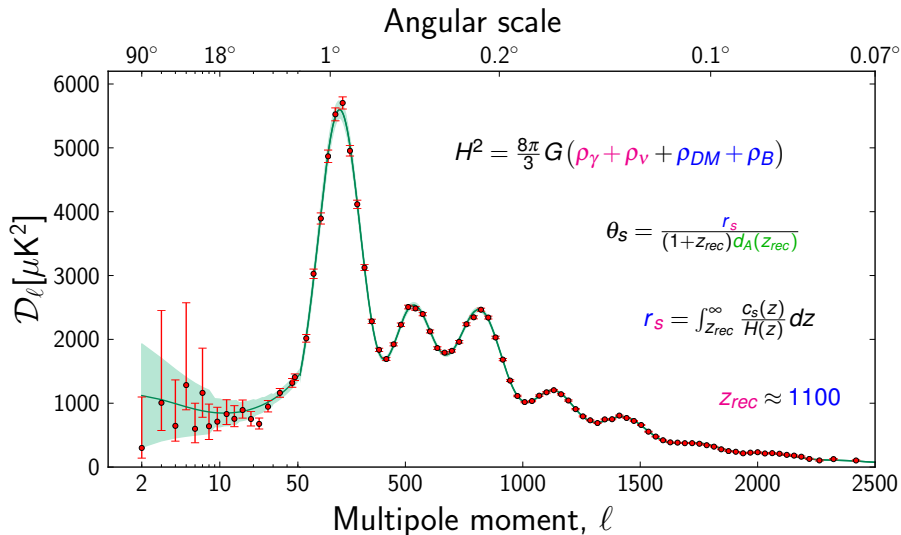


в расширяющейся Вселенной
формула модифицируется,

$$L \rightarrow d_A(z) = \frac{c}{(1+z)} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

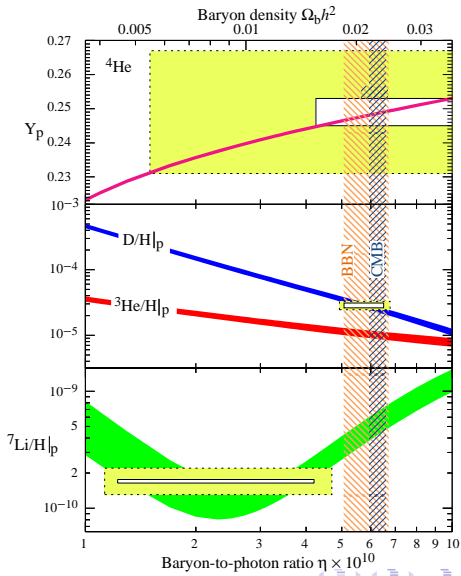
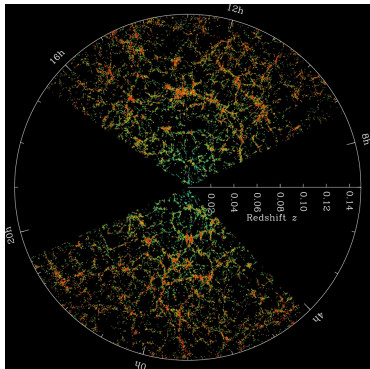


Традиционная форма представления (Planck 2013)

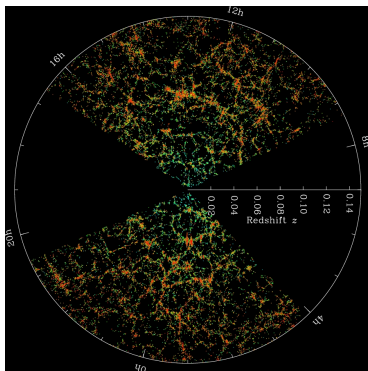


Протоны и фотоны $n_B/n_\gamma \sim 10^{-9}$ уже в BBN

независимо извлечь состав плазмы
можно из распространённости
элементов

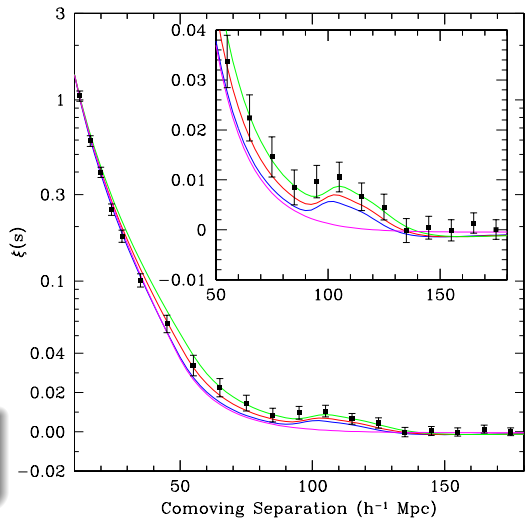


Барионные акустические (“сахаровские”) осцилляции

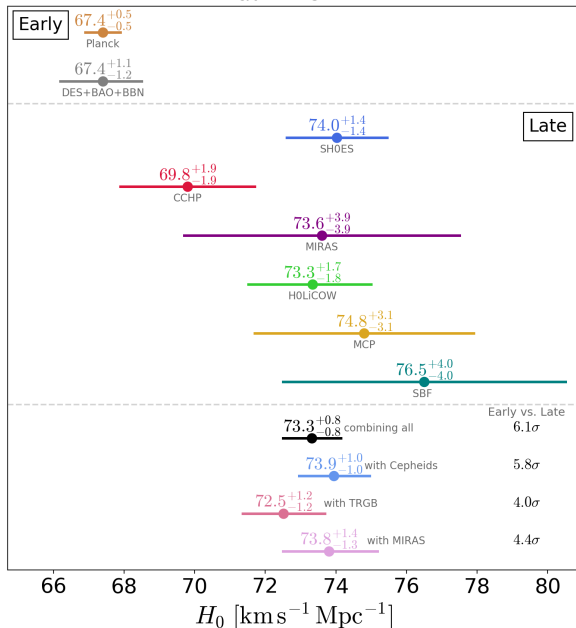


пик при $r_s \approx 147$ Мпк

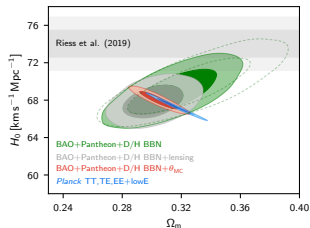
$$\xi_z(s) \propto \frac{\langle n_z(\vec{x}) n_z(\vec{x} + \vec{z}) \rangle_{\vec{x}}}{n_z n_z}$$



flat – Λ CDM



1807.06209



1907.10625

Заключение: надежды и перспективы

Два измерения несовместны (10^{-6} !!), поскольку различаются “линейки”

- **Интересное решение:**

видим динамику тёмной энергии – подправляем Λ CDM

влияние стерильных нейтрино, аксионов, ... – расширяем физику частиц

- **Полезное решение:**

систематика в астрофизике – разбираемся с калибровками звёзд

- **Фантастическое решение:**

изменяем звуковой горизонт рекомбинации – новая космология ранней Вселенной

- **Осложнения при выборе:**

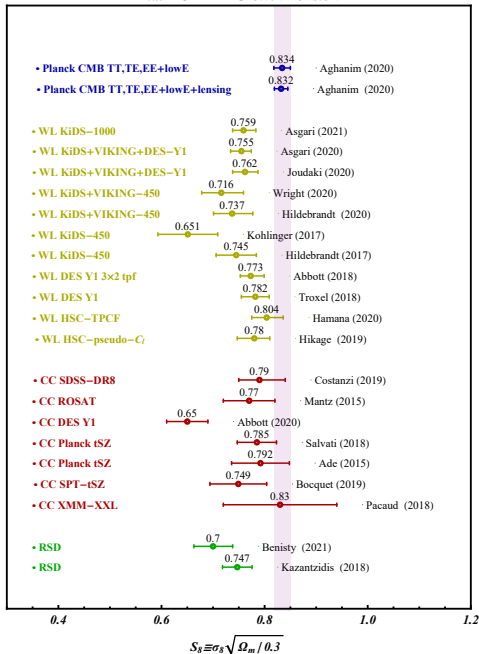
есть несколько других нестыковок, не столь значимых статистически

- **Новые наблюдаемые**

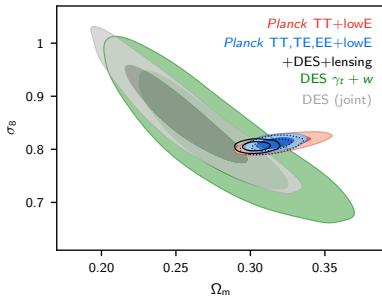
- **Новые данные:**

структуры (EUCLID, SKA, LSST) и реликтовое излучение (наземные и космические проекты)

Flat Λ CDM – Growth Tension



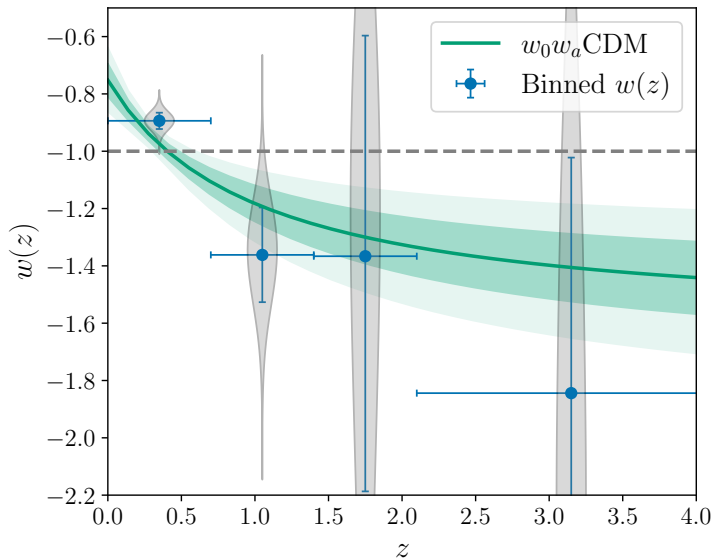
2105.05208



1807.06209

Results of DESI: DE evolution $\rho = \omega(z)\rho$

2503.14738



$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi}{3}\rho$$

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

$\omega = -1$: $p = -\rho$
gives $\rho = \text{const}$

$\omega > -1$ gives $\rho \searrow$

$\omega < -1$ gives $\rho \nearrow$

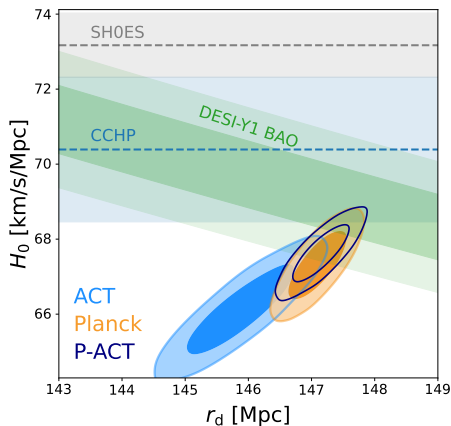
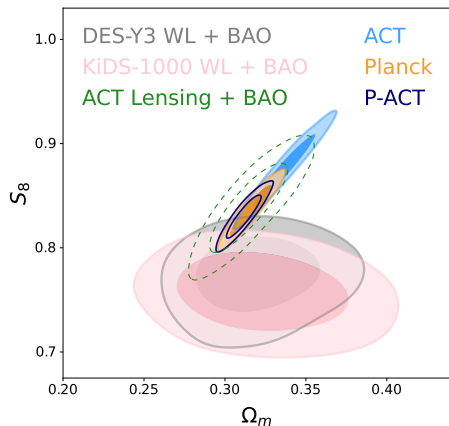
$\omega = 0$ is an oscillator:
 $\langle E_k \rangle = \langle E_p \rangle$
dark matter

$$\delta\rho = c_s^2 \delta\rho$$

$$\frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)} < -1$$

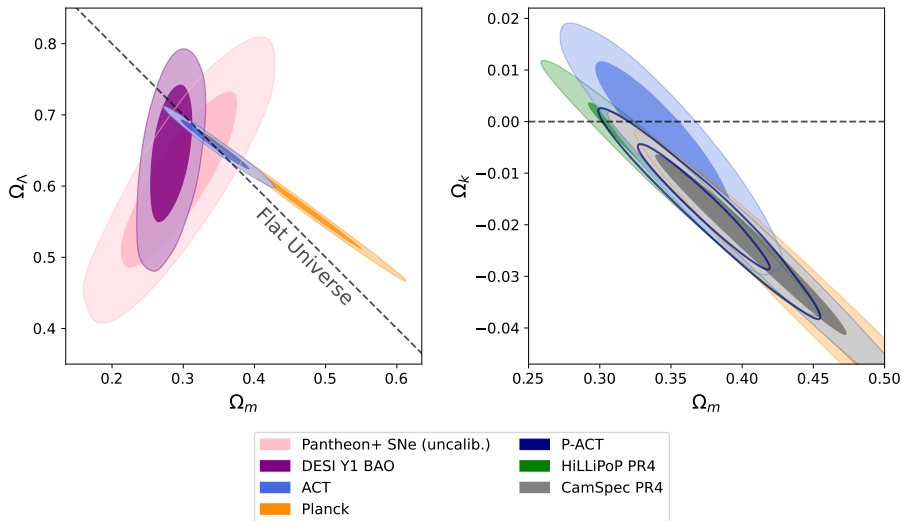
ACT and crisis and tensions

2503.14452



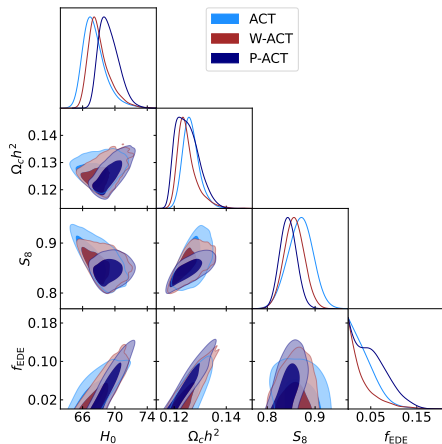
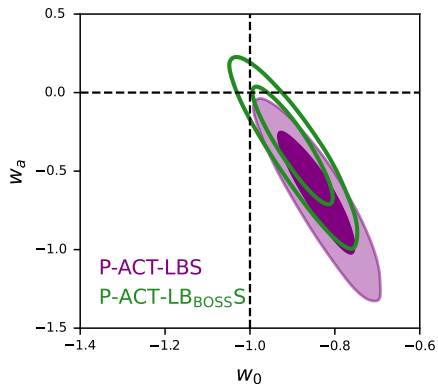
ACT and standard cosmology

2503.14452



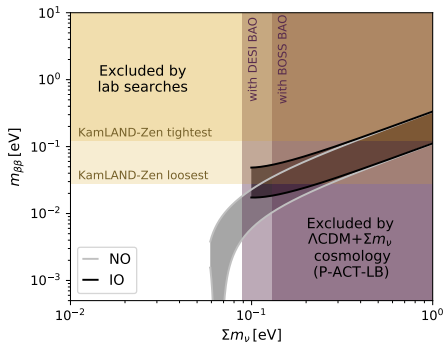
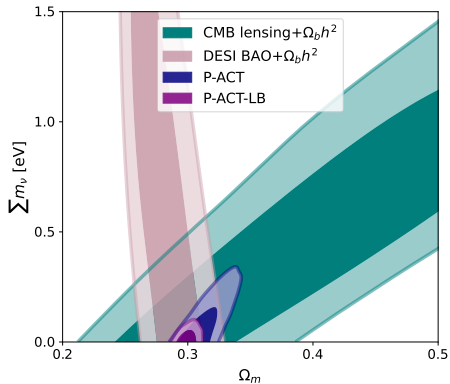
ACT and non-standard cosmology

2503.14454



Cosmological data and neutrino masses

2503.14454



Dark Energy: all evidences are from cosmology

Working hypothesis is cosmological constant $\Lambda \approx (2.5 \times 10^{-3} \text{ eV})^4$:
 $\rho = w(t)\rho$, $w = \text{const} = -1$, $\rho = \Lambda$

$$S_\Lambda = -\Lambda \int d^4x \sqrt{-\det g_{\mu\nu}}$$

both parts contribute

$$S_{\text{grav}} = -\frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-\det g_{\mu\nu}} R,$$

$$S_{\text{matter}} = \int d^4x \sqrt{-\det g_{\mu\nu}} \left(\frac{1}{2} g^{\lambda\rho} \partial_\lambda \phi \partial_\rho \phi - V(\phi) \right)$$

natural values

$$\Lambda_{\text{grav}} \sim 1/G^2 \sim (10^{19} \text{ GeV})^4, \quad \Lambda_{\text{matter}} \sim V(\phi_{\text{vac}}) \sim (100 \text{ GeV})^4, (100 \text{ MeV})^4, \dots$$

Why Λ is small?

Why $\Lambda \sim \rho_{\text{matter}}$? Why $\rho_B \sim \rho_{DM} \sim \rho_\Lambda$ today?



List of long-standing problems

- What is Dark Energy ?
- What is Dark Matter ?
- BAU ?
- Why the Universe is flat, homogeneous and isotropic?
- What is the source of perturbations?
- Li^7 in BBN...