

Problems with fitting the cosmological data in Λ CDM

Dmitry Gorbunov

Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow

On-line seminar
from INR RAS, Moscow, Russia

PNPI KI, Gatchina, Leningradky region, Russia

24.02.2022

Three Generations of Matter (Fermions) spin 1/2

	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 $-\frac{1}{3}$ Left d Right down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ Left s Right strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ Left b Right bottom
	0 eV 0 Left ν_e Right electron neutrino	0 eV 0 Left ν_μ Right muon neutrino	0 eV 0 Left ν_τ Right tau neutrino
	0.511 MeV -1 Left e Right electron	105.7 MeV -1 Left μ Right muon	1.777 GeV -1 Left τ Right tau
Leptons			

The Matter generations are indistinguishable by electric weak and strong forces

0
0
g
gluon

0
0
 γ
photon

distinguishable by gravity and Yukawa forces

91.2 GeV
0
Z⁰
weak force

>114 GeV
0
0
H
Higgs boson

Bosons (Forces) spin 1

80.4 GeV
 ± 1
W[±]
weak force

spin 0

$m_H \approx 125$ GeV

Description of neutrino oscillations (I)

- Two bases: gauge $|\nu_\alpha\rangle$, $\alpha = e, \mu, \tau$ and mass $|\nu_j\rangle$, $j = 1, 2, 3$

$$|\nu_j\rangle = U_{\alpha i} |\nu_\alpha\rangle \quad \text{with unitary PMNS } 3 \times 3 \text{ matrix } U_{\alpha i}$$

- Neutrino mass matrix is then

$$M_{\alpha\beta} = \langle \nu_\alpha | M | \nu_\beta \rangle = (UM^{(m)}U^\dagger)_{\alpha\beta}, \quad \text{where } M_{ij}^{(m)} = m_j \delta_{ij}.$$

- Free neutrino evolution in time and space

$$|\nu_j(t)\rangle = e^{-im_j t} |\nu_j(0)\rangle \quad \rightarrow \quad |\nu_j(t, L)\rangle = e^{-i(E_j t - p_j L)} |\nu_j(0)\rangle,$$

in ultrarelativistic case \rightarrow Hamiltonian

$$p_j = \sqrt{E^2 - m_j^2} = E - m_j^2/2E \quad \rightarrow \quad |\nu_j(L)\rangle = e^{-i \frac{m_j^2}{2E} L} |\nu_j(0)\rangle.$$

Description of neutrino oscillations (II)

- Neutrino effective Hamiltonian

$$|\nu_j(L)\rangle = e^{-i\frac{m_j^2}{2E}L} |\nu_j(0)\rangle \rightarrow H_{\text{eff}} = \frac{M^2}{2E}$$

- Transition amplitude of neutrino ν_α to neutrino ν_β is

$$A(\alpha \rightarrow \beta) = \sum_j \langle \nu_\beta | \nu_j(L) \rangle \langle \nu_j(0) | \nu_\alpha \rangle = \sum_j \langle \nu_\beta | \nu_j \rangle e^{-i\frac{m_j^2}{2E}L} \langle \nu_j | \nu_\alpha \rangle = \sum_j U_{\beta j} e^{-i\frac{m_j^2}{2E}L} U_{\alpha j}^*$$

- Transition probability

$$\Delta m_{ji}^2 \equiv m_j^2 - m_i^2$$

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |A(\alpha \rightarrow \beta)|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j>i} \text{Re}[U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^*] \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ji}^2}{4E} L \right) \\ &\quad + 2 \sum_{j>i} \text{Im}[U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^*] \sin \left(\frac{\Delta m_{ji}^2}{2E} L \right), \end{aligned}$$

Description of neutrino oscillations (III)

- Two-neutrino oscillations: transition probability

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\beta \neq \alpha}) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2}{4E} L \right),$$

- Two-neutrino oscillations: survival probability

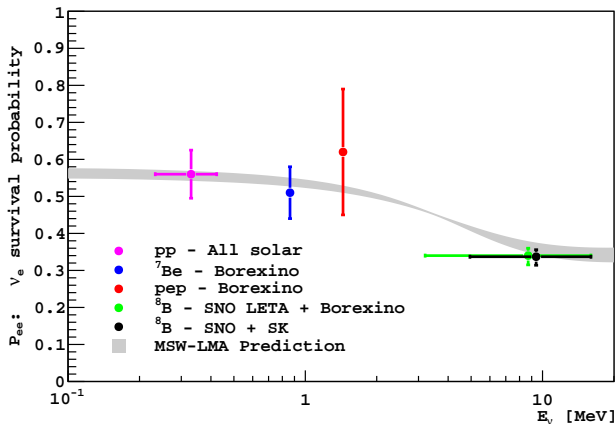
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2}{4E} L \right)$$

- Oscillation length

$$L_{osc} = \frac{4\pi E}{\Delta m^2} = (2.5 \text{ km}) \cdot \frac{E \text{ eV}^2}{\text{GeV} \Delta m^2}$$

Neutrino matter effect

Mikheev–Smirnov–Wolfenstein effect



BOREXINO measurements of solar neutrino flux

Fermi charged currents

$$\mathcal{L} = -2\sqrt{2}G_F \bar{\nu}_e \gamma^\mu e \cdot \bar{e} \gamma_\mu \nu_e$$

only matter, no currents

$$\langle \langle \bar{e}_k \gamma_{kl}^0 e_l \rangle \rangle = \langle \langle e^\dagger e \rangle \rangle = n_e,$$

$$\langle \langle \bar{e}_k \gamma_{kl}^j e_l \rangle \rangle = 0.$$

$$\langle \langle e_k \bar{e}_l \rangle \rangle = -\frac{1}{4} \gamma_{kl}^0 \cdot n_e$$

Fermi interaction gives

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = -\sqrt{2}G_F n_e \bar{\nu}_e \gamma^0 \nu_e.$$

$$i\gamma^0 \partial_0 \rightarrow i\gamma^0 \partial_0 - \sqrt{2}G_F n_e \gamma^0,$$

effective potential

$$i\partial_0 - V, \text{ with } V = \sqrt{2}G_F n_e$$

competes with

$$H_{\text{eff}} = \Delta m^2 / 2E$$

Sterile neutrinos: NEW ingredients

One of the optional physics beyond the SM:

- sterile:** new fermions uncharged under the SM gauge group
neutrino: explain observed oscillations by mixing with SM (active) neutrinos

Attractive features:

- possible to achieve within renormalizable theory
- only $N = 2$ Majorana neutrinos needed
- baryon asymmetry via leptogenesis
- dark matter (with $N \geq 3$ at least)
- light(?) sterile neutrinos might be responsible for neutrino anomalies. . . ?

Disappointing feature:

Major part of parameter space is UNTESTABLE

Three Generations of Matter (Fermions) spin $\frac{1}{2}$

	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	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	Left d Right down	Left s Right strange	Left b Right bottom
Leptons	<0.0001 eV ~ 10 keV	~ 0.01 eV \sim GeV	~ 0.04 eV \sim GeV
	0	0	0
	Left ν_e Right N_1	Left ν_μ Right N_2	Left ν_τ Right N_3
	electron neutrino sterile neutrino	muon neutrino sterile neutrino	tau neutrino sterile neutrino
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV
	-1	-1	-1
Left e Right electron	Left μ Right muon	Left τ Right tau	

Bosons (Forces) spin 1	0	g	gluon
	0	γ	photon
	91.2 GeV	Z^0	weak force
	80.4 GeV	W^\pm	weak force

>114 GeV	H	Higgs boson
0		spin 0

Seesaw mechanism: $M_N \gg 1 \text{ eV}$

With $m_{\text{active}} \lesssim 1 \text{ eV}$ we work in the seesaw (type I) regime:

$$\mathcal{L}_N = \bar{N} i \not{\partial} N - f \bar{L}_e^c \tilde{H} N - \frac{M_N}{2} \bar{N}^c N + \text{h.c.}$$

Higgs gains $\langle H \rangle = v/\sqrt{2}$ and then

$$\mathcal{Y}_N = \frac{1}{2} (\bar{\nu}_e, \bar{N}^c) \begin{pmatrix} 0 & v \frac{f}{\sqrt{2}} \\ v \frac{f}{\sqrt{2}} & M_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ N \end{pmatrix} + \text{h.c.}$$

For a hierarchy $M_N \gg M^D = v \frac{f}{\sqrt{2}}$ we have

flavor state $\nu_e = U \nu_1 + \theta N$ with $U \approx 1$ and

active-sterile mixing: $\theta = \frac{M^D}{M_N} = \frac{v f}{2 M_N} \ll 1$

and mass eigenvalues

$$\approx M_N \quad \text{and} \quad -m_{\text{active}} = \theta^2 M_N \lll M_N$$

Sterile neutrino: a vast region of mass

Within the seesaw paradigm, as far as

$$m_a \sim \frac{f^2 v^2}{M_N^2} M_N \sim \theta^2 M_N$$

Any set

(mass scale M_N , Yukawa coupling f)

is viable

And with special tuning or symmetry larger (but not smaller) mixing
3 sterile neutrinos is
viable

$$\hat{m}_a \sim \hat{f}^T \frac{1}{\hat{M}_N} \hat{f} v^2$$

Light sterile neutrinos and cosmology

- Analysis of CMB & LSS (e.g., Planck, SDSS):
Mixing $\theta \sim 0.1-1$, mass ~ 1 eV
NONE (or, may be, one)
 - there are 2σ discrepancies in H_0 , σ_8 , lensing, ...
small scale crisis, SPT vs Planck, ...
- Explanation of the combined anomalous results
needs TWO or MORE
 - of course, some anomalies may be just anomalies...
- Production in the early Universe can be efficiently suppressed, e.g.,
by scalar field

$$\mathcal{L} = \phi \bar{N}^c N + \text{h.c.}$$

or if the reheating scale is low, $T_{reh} \sim 10$ MeV

Description of neutrino oscillations

- Oscillation length

small L_{osc} \leftrightarrow big Δm^2

$$L_{osc} = \frac{4\pi E}{\Delta m^2} = (2.5 \text{ m}) \cdot \frac{E}{\text{MeV}} \frac{\text{eV}^2}{\Delta m^2}$$

- Oscillation probability:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \left| \delta_{\alpha\beta} - \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{L \Delta m_{41}^2}{4E} \right) \right|, \quad \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} = 4 |U_{\alpha 4}|^2 \left| \delta_{\alpha\beta} - |U_{\beta 4}|^2 \right|$$

- transition probability

appearance

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_{\beta \neq \alpha}) = \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{L \Delta m_{41}^2}{4E} \right), \quad \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} = 4 |U_{\alpha 4}|^2 |U_{\beta 4}|^2$$

- survival probability

disappearance

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta_{\alpha\alpha} \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{41}^2}{4E} L \right), \quad \sin^2 \theta_{\alpha\alpha} = |U_{\alpha 4}|^2$$

Reactor anomaly: recent results...

1809.10516

PROSPECT (USA, 2018-...)

85 MW_{th} compact reactor
segmented detector covering
 $L = 6 - 7.5$ m

measures flux ratios

STEREO (France, 2018-...)

58 MW_{th} compact reactor
segmented detector covering
 $L = 9.4 - 11.1$ m

measures flux ratios

NEUTRINO-4 (Russia, 2018-...):

100 MW_{th}

extracompact

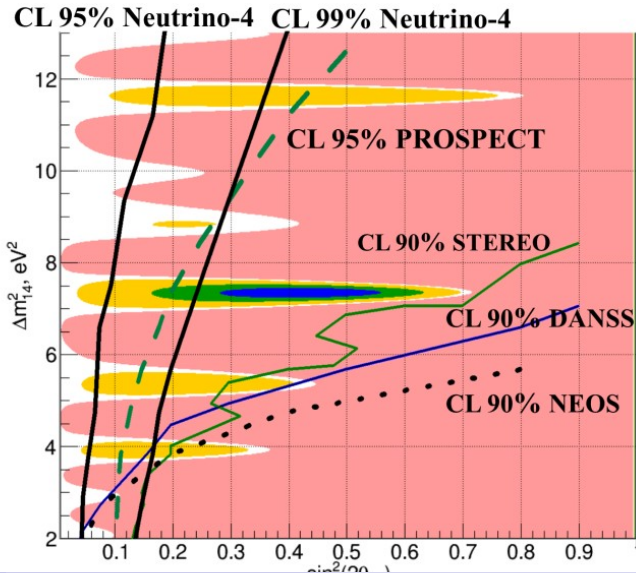
reactor SM-3 (Dimitrovgra)
segmented movable detector
 $L = 6 - 12$ m

measures flux ratios

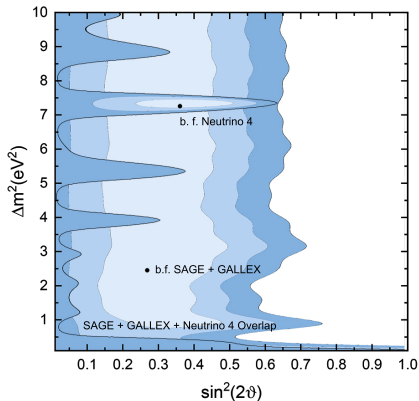
best fit

$$\Delta m^2 \simeq 7.2 \text{ eV}^2$$

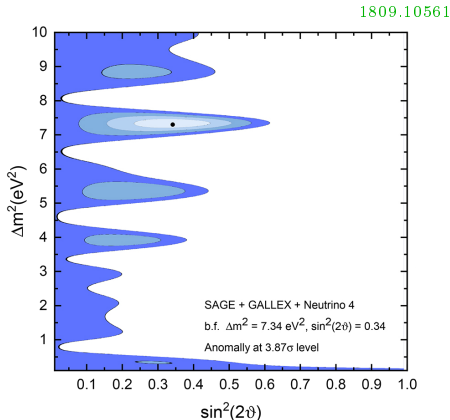
$$\sin^2 2\theta_{ee} \simeq 0.35$$



Consistency of Gallium and NEUTRINO-4 anomalies



1905.07437



1809.10561

almost 4 σ anomaly

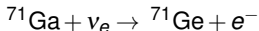
Baksan Experiment on Sterile Transition

proposal: 1006.2103, 1204.5379, ...

artificial dichromatic source:

^{51}Cr of 3 MCi ($\Delta W/W < 0.5\%$)

neutrino flux measurement:

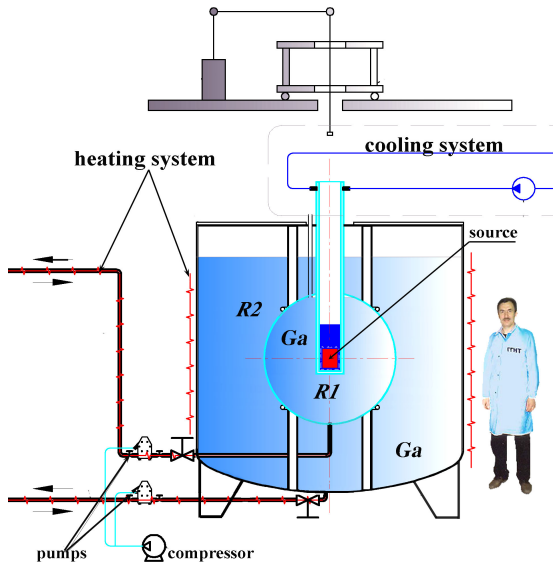


2 detector volumes:
for the flux cross check

geometry is chosen:
to search for $\simeq 1$ eV neutrino

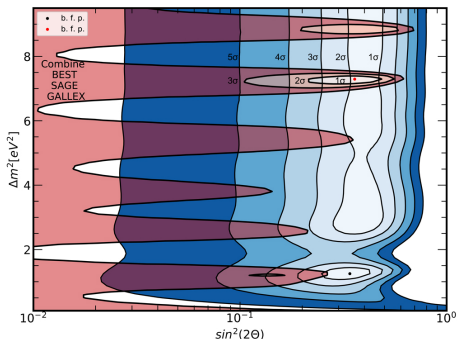
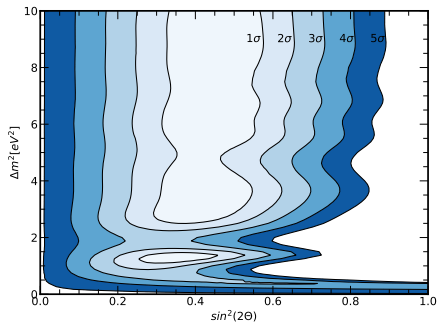
data taking:
July–September 2019

$\tau_{^{51}\text{Cr}} = 27.7\text{d}$



BEST: $R_1 = 0.791 \pm 0.050$, $R_2 = 0.766 \pm 0.050$

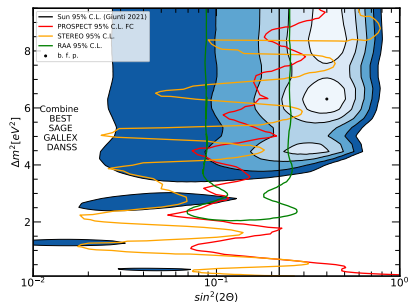
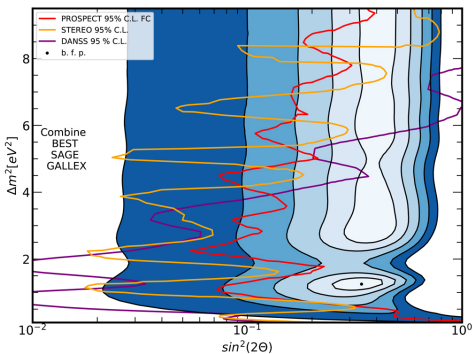
2109.11482



5- σ evidence for ν_s
confirmation of Gallium anomaly
consistent with NEUTRINO-4

2109.14654

BEST combined with others



5.7- σ combined evidence for ν_s

BEST b.f.p. is excluded by reactor neutrino experiments

Combined 2- σ region is consistent with Reactor Anomaly

Combined 2- σ region is excluded

from solar neutrinos
and from cosmology

Light sterile neutrinos in cosmology

Impact on processes

- Big Bang Nucleosynthesis: increase of expansion rate

$$H^2 = \frac{8\pi}{3} G\rho, \quad \rho = \frac{\pi^2}{30} \left(2 \times T_\gamma^4 + 2 \times (3 + \Delta N_\nu) \times T_\nu^4 \right)$$

with $\Delta N_\nu > 0$ higher H neutrons freeze out earlier giving more Helium

- expansion rate at Equality, $\rho_{rad} = \rho_{mat}$, and at CMB epoch change of CMB anisotropy $-0.34 < \Delta N_\nu < 0.33$ (95% CL)
- become non-relativistic, but have high velocity
free streaming leads to washing out of low-scale perturbations
change galaxy spectrum $\text{limits on } \Delta N_\nu \text{ \& \& neutrino masses}$

Sterile neutrino production in cosmology

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_s) = \sin^2 2\theta_\alpha \cdot \sin^2 \left(\frac{t}{2t_\alpha^{\text{vac}}} \right),$$

$$t_\alpha^{\text{vac}} = \frac{2E_\nu}{\Delta m^2}, \quad \Delta m^2 = m_s^2 - m_1^2 \simeq m_s^2.$$

$$H = U \cdot \text{diag} \left(\frac{m_1^2}{2E_\nu}, \frac{m_2^2}{2E_\nu} \right) \cdot U^\dagger + V_{\text{int}},$$

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta_\alpha & \sin \theta_\alpha \\ -\sin \theta_\alpha & \cos \theta_\alpha \end{pmatrix}, \quad V_{\text{int}} = \begin{pmatrix} V_{\alpha\alpha} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$V_{\tau\tau} = -\frac{14\pi}{45\alpha} \sin^2 \theta_W \cos^2 \theta_W \cdot G_F^2 T^4 \cdot E_\nu \approx -25 \cdot G_F^2 T^4 \cdot E_\nu,$$

Sterile neutrino production in cosmology

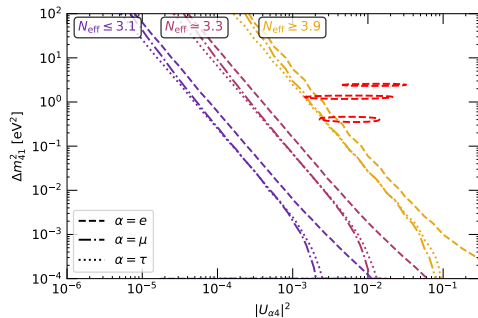
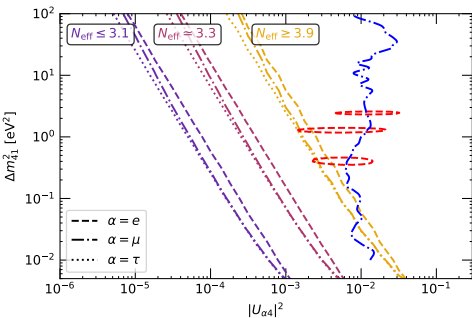
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_s) = \sin^2 2\theta_\alpha^{\text{pl}} \cdot \sin^2 \left(\frac{t}{2t_\alpha^{\text{pl}}} \right),$$

$$t_\alpha^{\text{pl}} = \frac{t_\alpha^{\text{vac}}}{\sqrt{\sin^2 2\theta_\alpha + (\cos 2\theta_\alpha - V_{\alpha\alpha} \cdot t_\alpha^{\text{vac}})^2}}, \quad \sin 2\theta_\alpha^{\text{pl}} = \frac{t_\alpha^{\text{pl}}}{t_\alpha^{\text{vac}}} \cdot \sin 2\theta_\alpha,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} f_s - H \mathbf{p} \frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} f_s = \frac{1}{4} \Gamma_\alpha \sin^2 2\theta_\alpha^{\text{pl}} f_\alpha(t, \mathbf{p}).$$

$$\Omega_{\nu_s} \simeq 0,2 \cdot \left(\frac{\sin 2\theta_\alpha}{10^{-4}} \right)^2 \cdot \left(\frac{m_s}{1 \text{ keV}} \right)^2.$$

Spectrum is exactly Fermi–Dirac



Sterile neutrino production with asymmetry

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_s) = \sin^2 2\theta_\alpha^{\text{pl}} \cdot \sin^2 \left(\frac{t}{2t_\alpha^{\text{pl}}} \right),$$

$$t_\alpha^{\text{pl}} = \frac{t_\alpha^{\text{vac}}}{\sqrt{\sin^2 2\theta_\alpha + (\cos 2\theta_\alpha - V_{\alpha\alpha} \cdot t_\alpha^{\text{vac}})^2}}, \quad \sin 2\theta_\alpha^{\text{pl}} = \frac{t_\alpha^{\text{pl}}}{t_\alpha^{\text{vac}}} \cdot \sin 2\theta_\alpha,$$

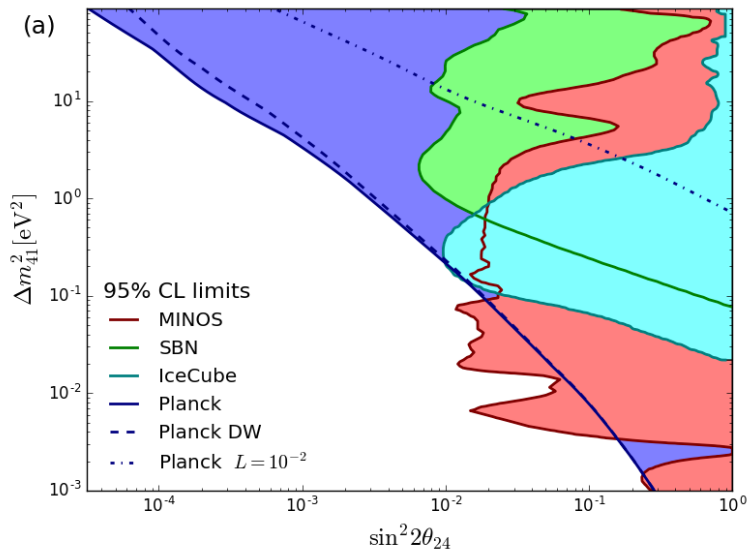
$$\frac{\partial}{\partial t} f_s - H\mathbf{p} \frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} f_s = \frac{1}{4} \Gamma_\alpha \sin^2 2\theta_\alpha^{\text{pl}} f_\alpha(t, \mathbf{p}).$$

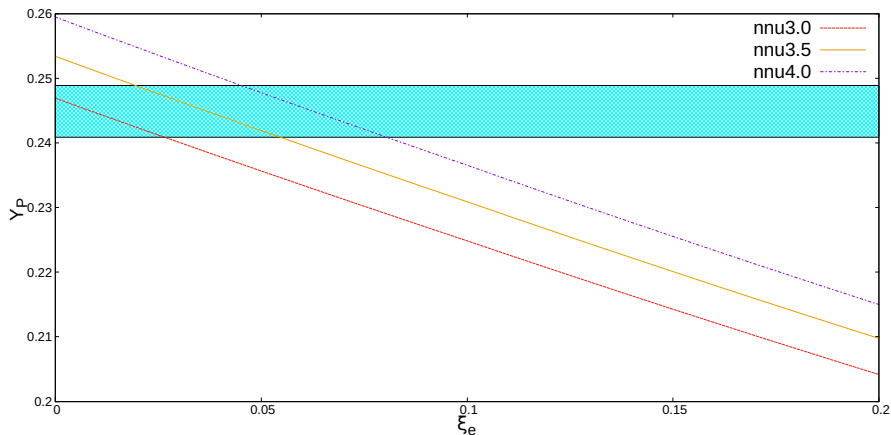
$$V_{\alpha\alpha}^{\text{sym}} \propto G_F T^2 G_F T^2 E_\nu, \quad V_{\alpha\alpha}^{\text{asym}} \propto G_F T^2 L T$$

$$t_{\text{vac}} = \frac{4E_\nu}{m_s^2}$$

BBN, CMB: asymmetry $L < 10^{-2}-10^{-3}$, realistic models (νMSM) $L < 10^{-4}$

Spectrum is not like Fermi-Dirac





Asymmetry changes the thermal neutron density
 Extra radiation changes the expansion rate

COULD BE ONE OF THE SOLUTIONS...

(NEED TO EXPLAIN THE LEPTON ASYMMETRY)

JUST DO IT

COULD BE ONE OF THE SOLUTIONS...

(NEED TO EXPLAIN THE LEPTON ASYMMETRY)

JUST DO IT

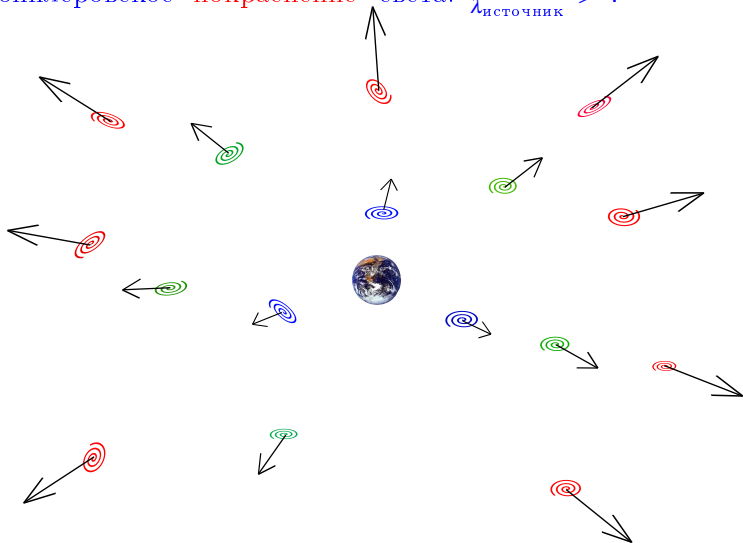
AND NOW

WE TURN TO

PROBLEMS IN COSMOLOGY

Вселенная расширяется !

Доплеровское “покраснение” света: $\frac{\lambda_{\text{приёмник}}}{\lambda_{\text{источник}}} > 1$



Измерение скоростей удалённых объектов

Эффект Доплера

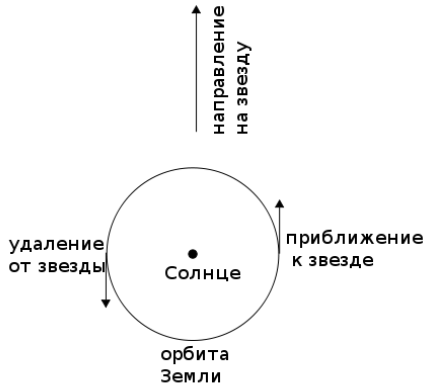
$$\omega = \omega_0 \frac{1 + \frac{v_{\text{приёмник}}}{c_{\text{волн в среде}}}}{1 - \frac{v_{\text{источник}}}{c_{\text{волн в среде}}}}$$

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!



Расширяющаяся Вселенная: масштабный фактор

Доплеровское “покраснение” света: $\frac{\lambda_{\text{приёмник}}}{\lambda_{\text{источник}}} > 1$

$$L \propto a(t)$$

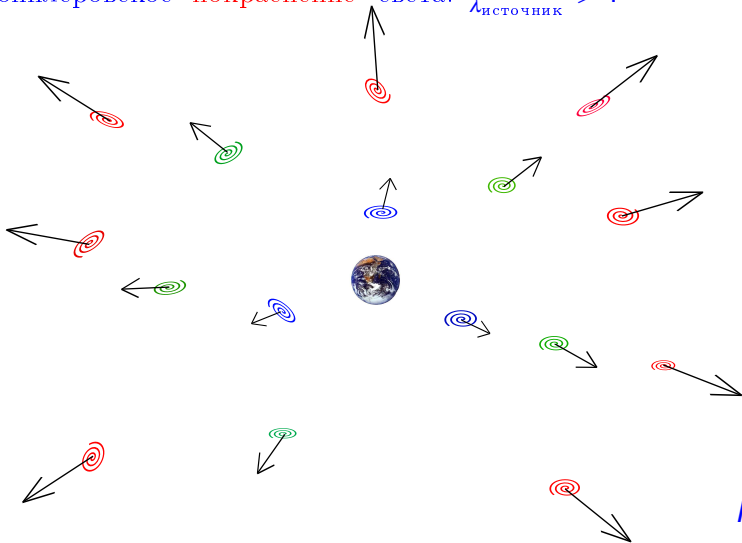
$$n \propto a^{-3}(t)$$

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

параметр
Хаббла

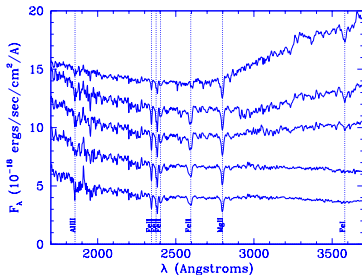
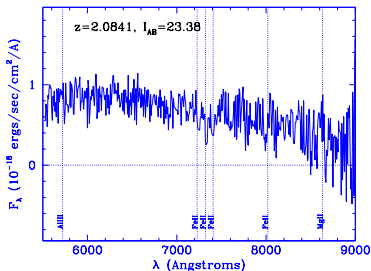
закон
Хаббла

$$H(t_0) r = v_r$$



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

$z \ll 1$ закон Хаббла : $cz = H_0 r$



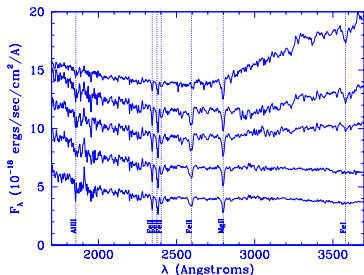
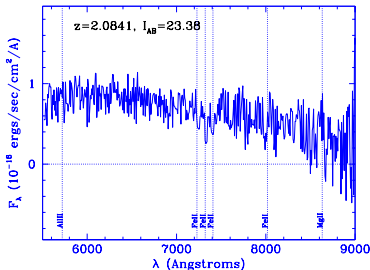
Расширение: красное смещение z $\lambda_{\text{abs.}}/\lambda_{\text{em.}} \equiv 1 + z$

$z \ll 1$ 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

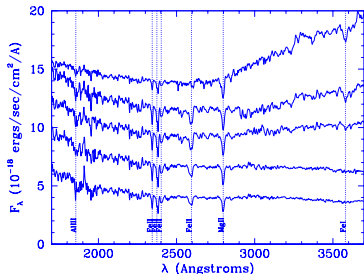
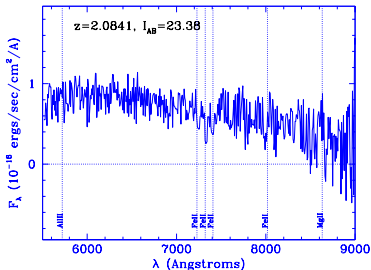
$$cz = H_0 r$$

Измерения Э.Хаббла (1929)

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

Измерения.. на рубеже веков

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

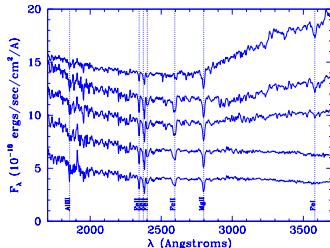
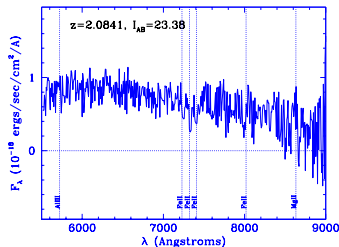
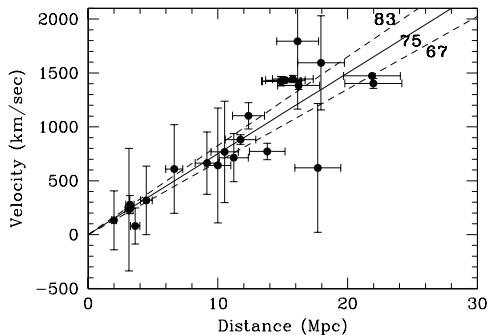


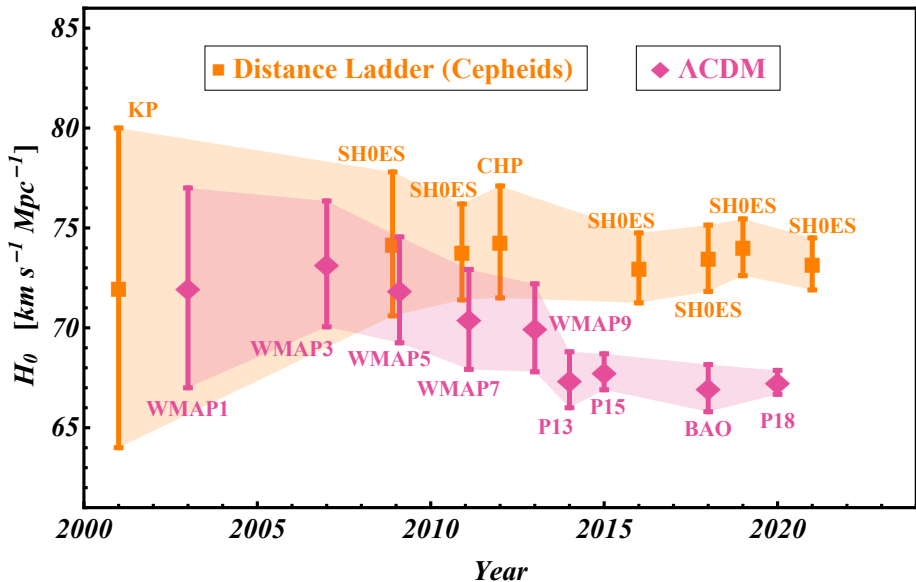
Расширение: красное смещение z $\lambda_{\text{abs.}}/\lambda_{\text{em.}} \equiv 1 + z$

закон Хаббла : $c z = H_0 r$

стандартные свечи

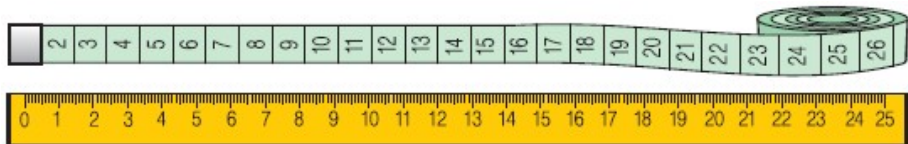
Hubble Diagram for Cepheids (flow-corrected)



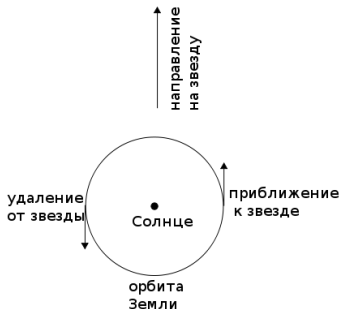


2105.05208

Лестница расстояний... стартуем от наблюдателя



ИЗМЕРЯЕМ



- размер орбиты Земли

$$2\pi R = v \times 1 \text{ год}$$

- расстояние по углу (годовой параллакс)

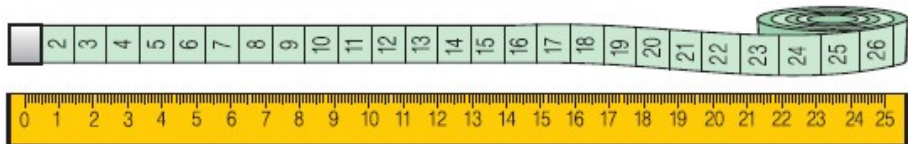
$$L = \theta \times 2R$$

- светимость F по яркости J и расстоянию

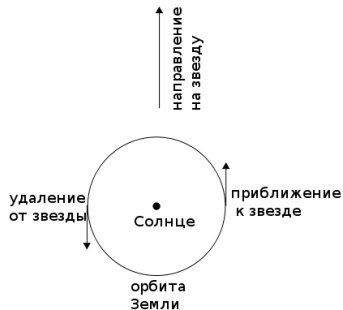
$$J = \frac{F}{4\pi L^2}$$

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

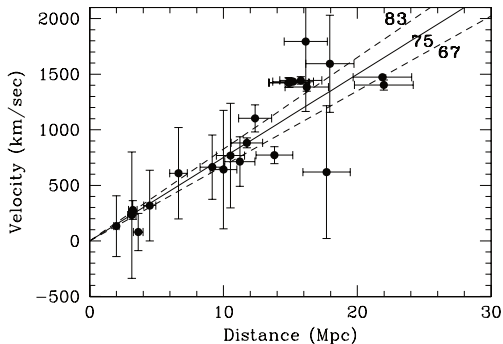
Лестница расстояний... стартуем от наблюдателя



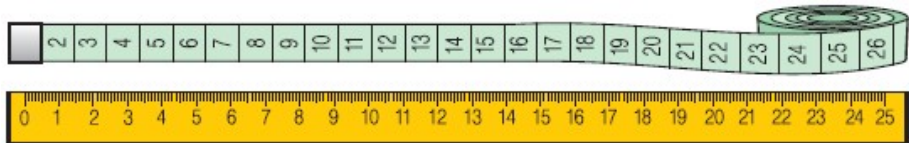
Измеряем светимость по яркости и расстоянию



Hubble Diagram for Cepheids (flow-corrected)



Лестница расстояний... от цефеид к сверхновым



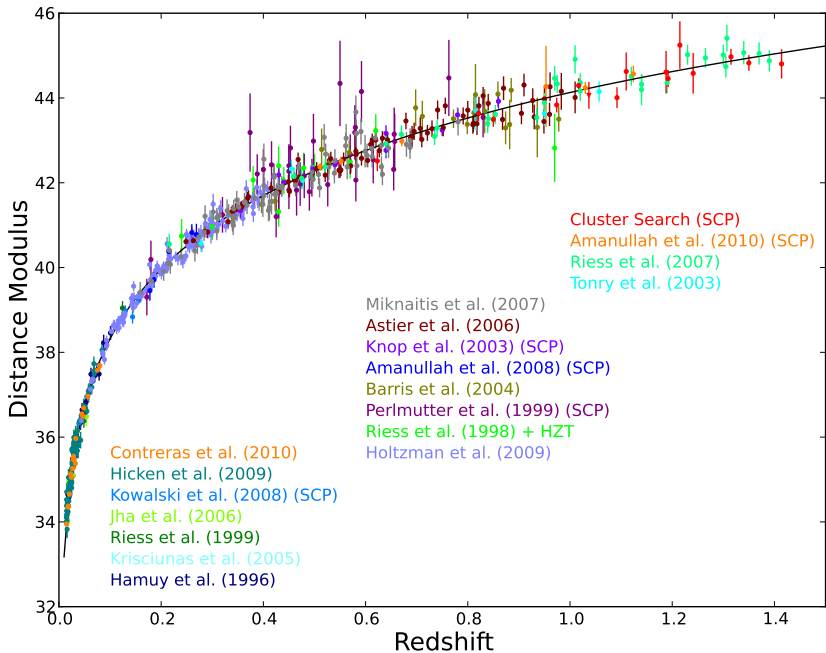
Измеряем яркость объекта J заданной светимости F – “стандартные свечи”

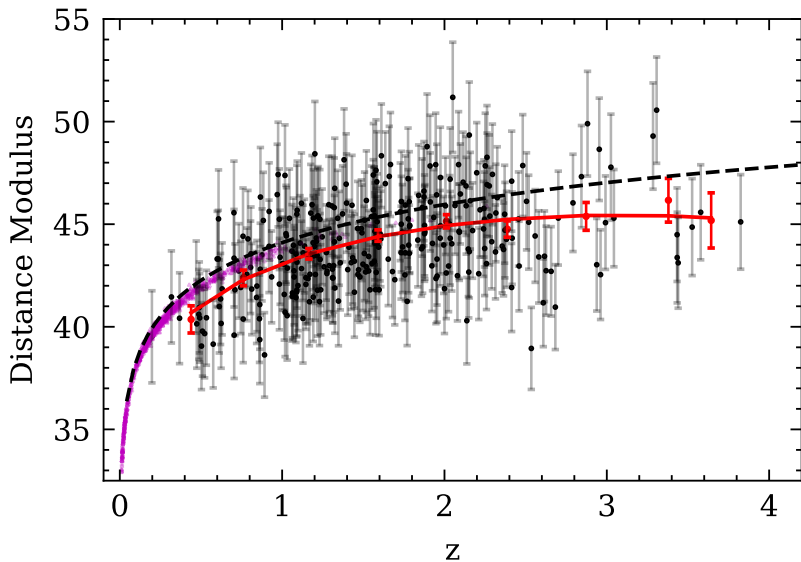
$$J = \frac{F}{4\pi L^2} \rightarrow J = \frac{F}{4\pi L^2(1+z)(1+z)} \quad \frac{\text{энергия}}{\text{время} \times \text{площадь}}$$



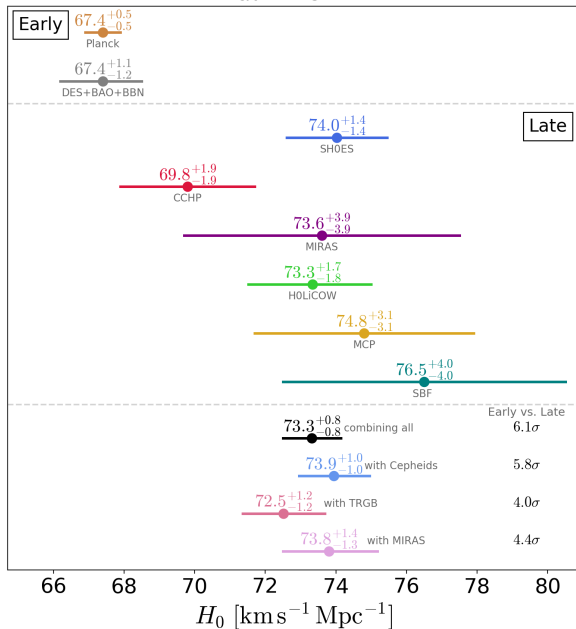
Для расширяющейся Вселенной формула модифицируется

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





flat - Λ CDM



1907.10625

Измерив $H(z)$ узнаем много чего....

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

- интервал между событиями модифицируется

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

в ОТО расширение описывается уравнением Фридмана

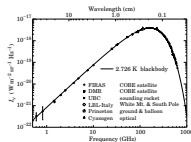
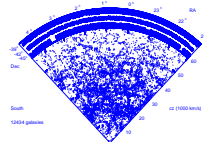
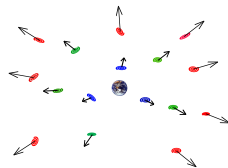
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\text{плотность энергии}}$$

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

- в прошлом Вселенная была “плотнее” и “горячее”, и заполнена электромагнитной плазмой

$$\rho_{\text{вещество}} \propto \frac{1}{a^3(t)}, \quad \rho_{\text{радиация}} \propto \frac{1}{a^4(t)}, \quad \rho_{\text{тёмная энергия}} = \text{const}$$

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

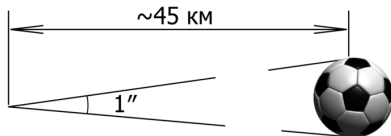


Альтернатива: расстояние углового размера

- Измеряя угловой размер θ объектов известного размера d

– однотипные галактики

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



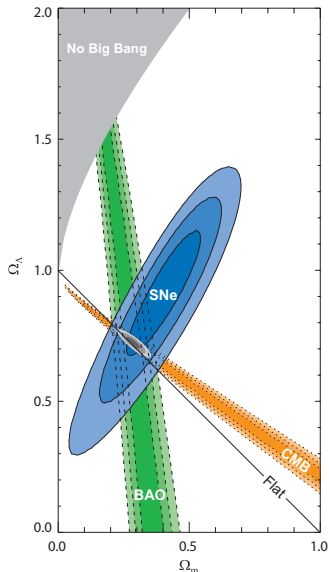
- изменяющегося со временем по известному закону, например: $d(t) \propto a(t)$

– крупномасштабные неоднородности в космических структурах

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



Данные из астрофизики и космологии сходятся



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

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

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

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

$$\frac{3H_0^2}{8\pi G} = \rho_{\text{энергии}}(t_0) \equiv \rho_c \approx 0.53 \times 10^{-5} \frac{\text{ГэВ} \text{с}^2}{\text{см}^3}$$

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

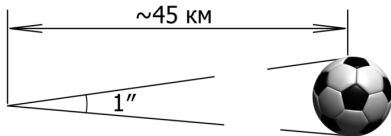
Вклад тёмной материи: $\Omega_{DM} \equiv \frac{\rho_{DM}}{\rho_c} = 0.25$
 Вклад тёмной энергии: $\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = 0.70$

Альтернатива: расстояние углового размера

Измеряем угловой размер θ объектов известного размера d

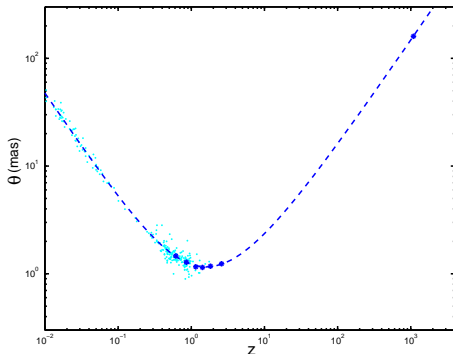
– однотипные галактики

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



в расширяющейся Вселенной
формула модифицируется,

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

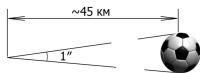


Стандартная линейка: стартуем из ранней Вселенной

Измеряя угловой размер θ объекта

- известного размера r – характерный размер пятна в анизотропии реликтового излучения

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



- изменяющегося со временем по известному закону, например:

$$d(z) \propto a(z)$$

– связанные неоднородности в распределении галактик

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

- при этом r – звуковой горизонт эпохи рекомбинации
- $d(z_{rec}) \approx r$

Вселенная заполнена “горячими” фотонами

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

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

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

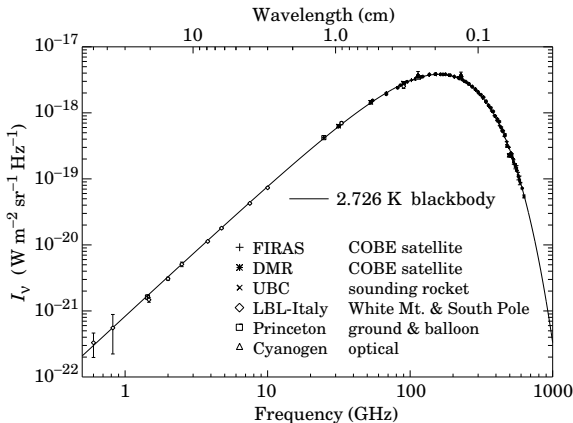
$$\begin{aligned} \rho_\gamma &= \int \frac{\omega^3}{\pi^2} d\omega f_\gamma(\omega) \\ &= \frac{\pi^2}{15} T_0^4 = 4\sigma T_0^4 \end{aligned}$$

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

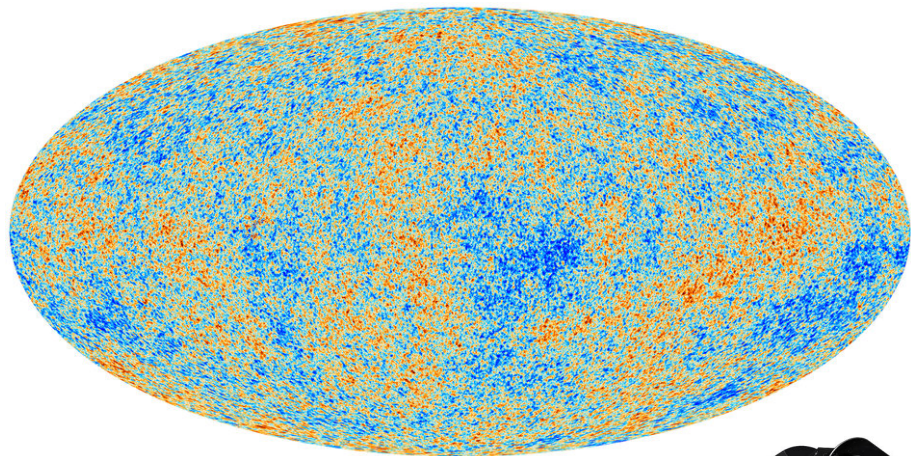
где σ есть константа
из закона

Стефана-Больцмана

$$P = \sigma S T^4$$

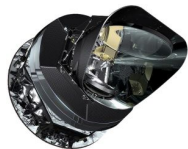


Первые результаты эксперимента Planck (2013)



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

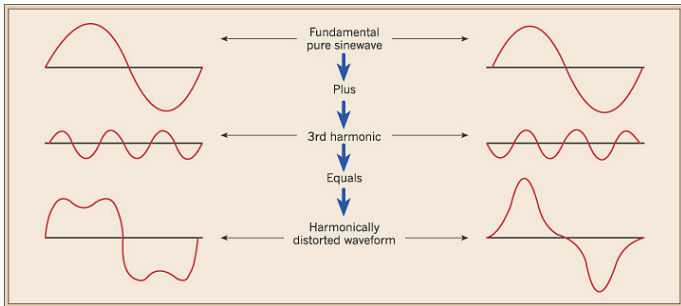
Спектр остаётся планковским !!



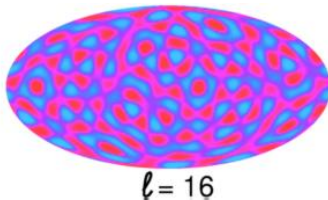
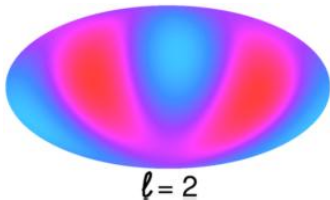
Откуда взялась анизотропия ??

- Эпоха образования водорода: $p^+ + e^- \rightarrow H + \gamma$
- Пропали свободные электроны: Вселенная прозрачна для фотонов
- Идея анизотропии: небольшие $\delta n_e/n_e \propto \Delta T/T \sim 10^{-4}$ неоднородности в распределении материи
- Больше локальная плотность — позже образование водорода — холоднее фотоны
- Эволюция неоднородностей в плазме — распространение звуковых волн !!
- Флуктуации случайны (гауссовы), но их величина, форма, структура содержат информацию о скорости звука, числе барионов и др.
- Эксперимент: гауссовы адиабатические флуктуации с “плоским” спектром, дают начало структурам

Разложение по гармоникам

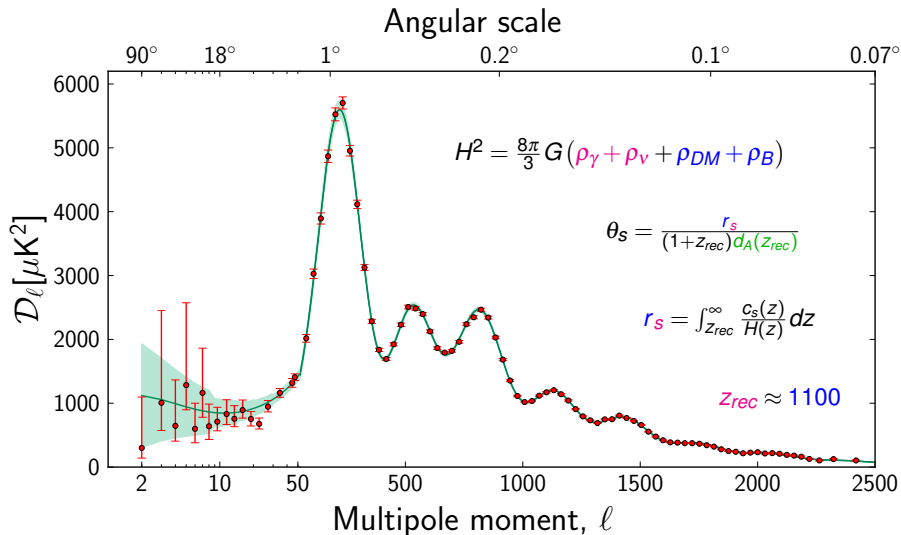


ЗВУК



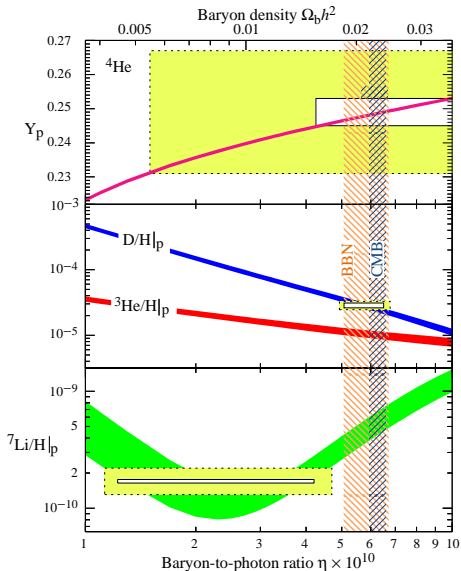
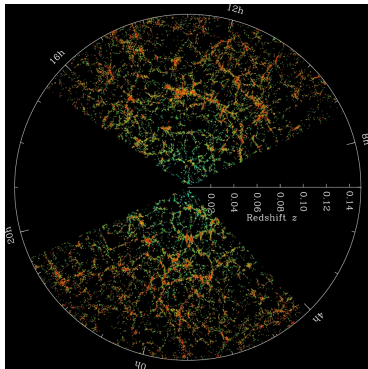
Температура на
небесной сфере

Традиционная форма представления (Planck 2013)



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

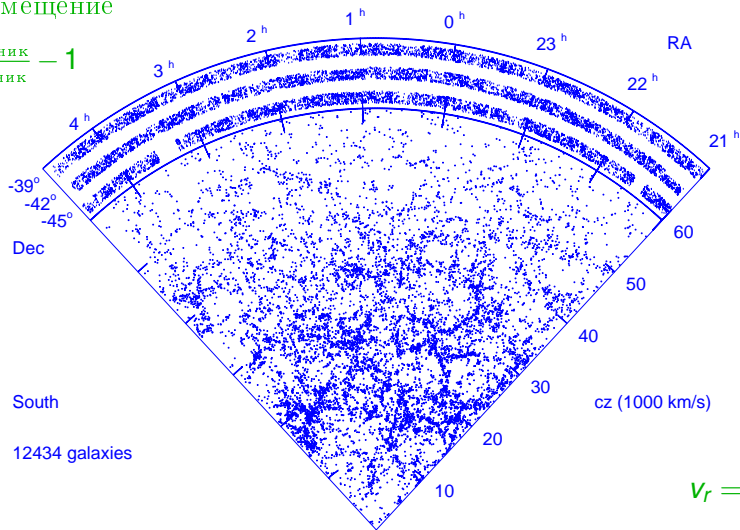
независимо извлечь состав плазмы
можно из распространённости
элементов



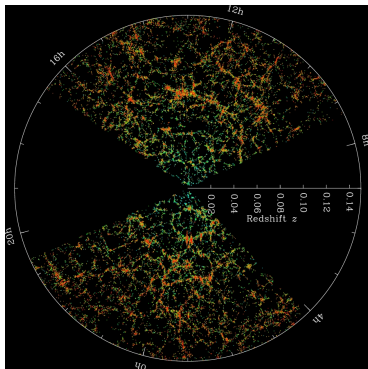
Расположение галактик во Вселенной

красное смещение

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

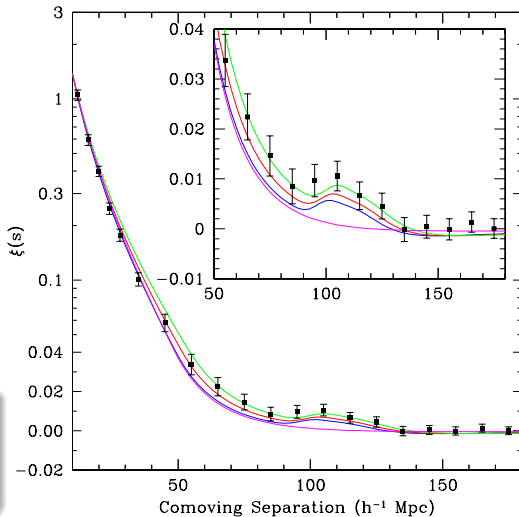


Барионные акустические (“сахаровские”) осцилляции

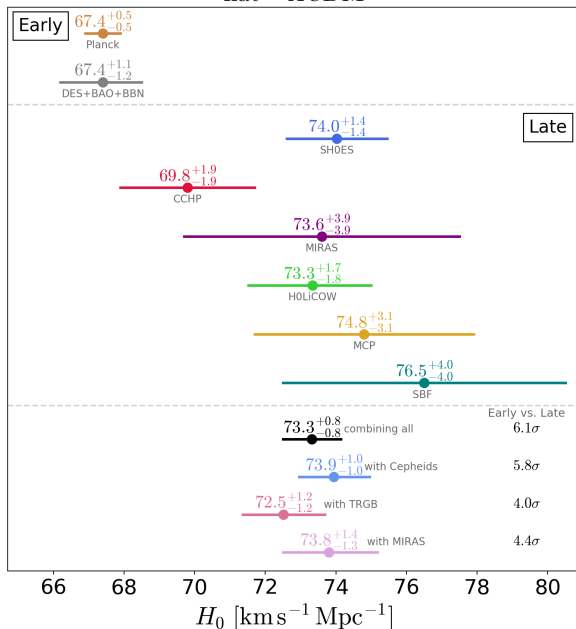


пик при $r_s \approx 147$ Мпк

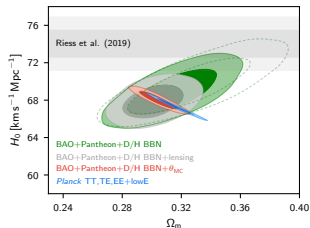
$$\xi_z(s) \propto \frac{\langle n_z(\vec{x}) n_z(\vec{x} + \vec{z}) \rangle_{\vec{x}}}{n_z n_z}$$



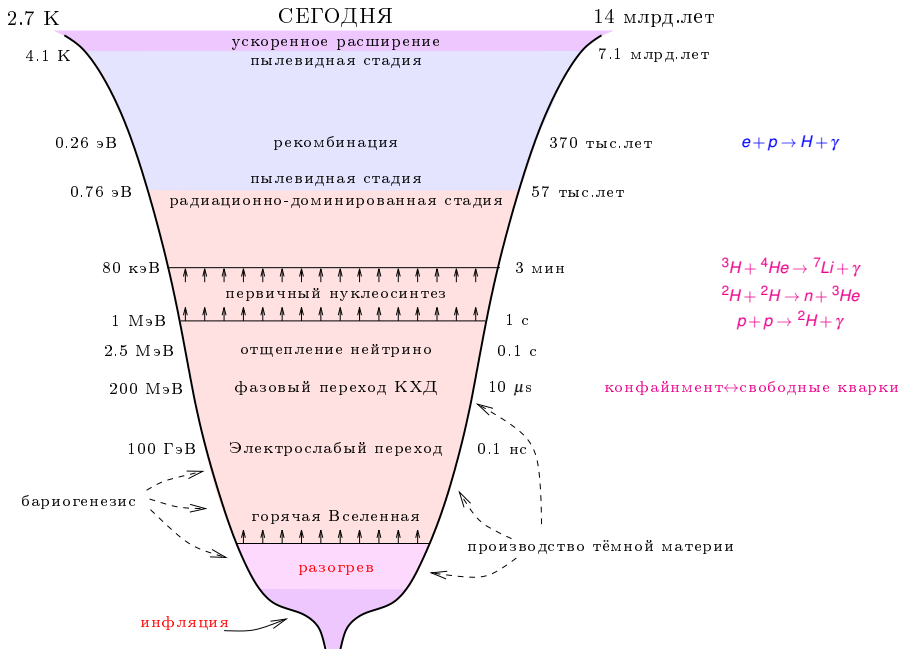
flat - Λ CDM



1807.06209



1907.10625



“Недавние” Нобелевские премии “за космологию”

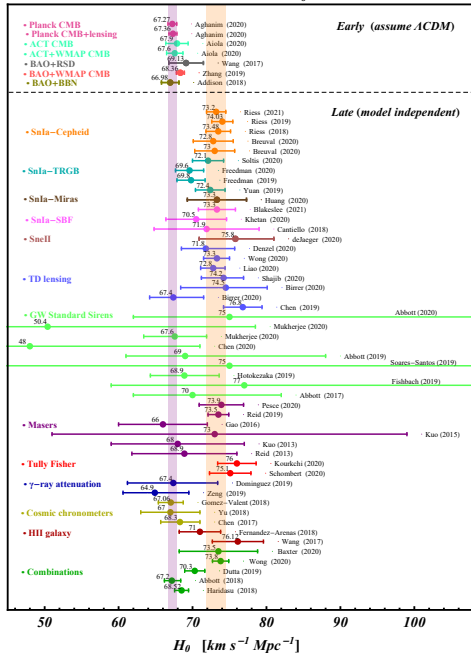
За анизотропию реликтового излучения (РИ)

2006: jointly to John C. Mather and George F. Smoot “for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation”

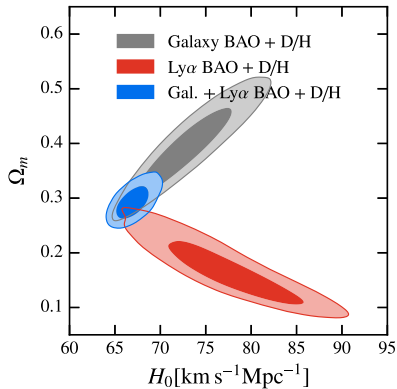
За ускоренное расширение (тёмная энергия)

2011: one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess “for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae”

Constraints on H_0



2105.05208



1707.06547

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

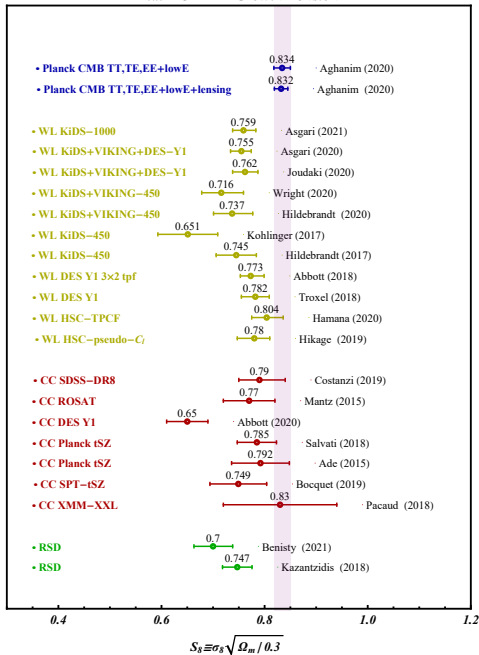
- **Новые наблюдаемые**

- **Новые данные:**

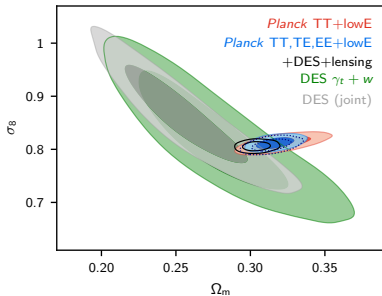
структуры (EUCLID, SKA, LSST) и реликтовое излучение (наземные и космические проекты)

Backup slides

Flat Λ CDM – Growth Tension



2105.05208



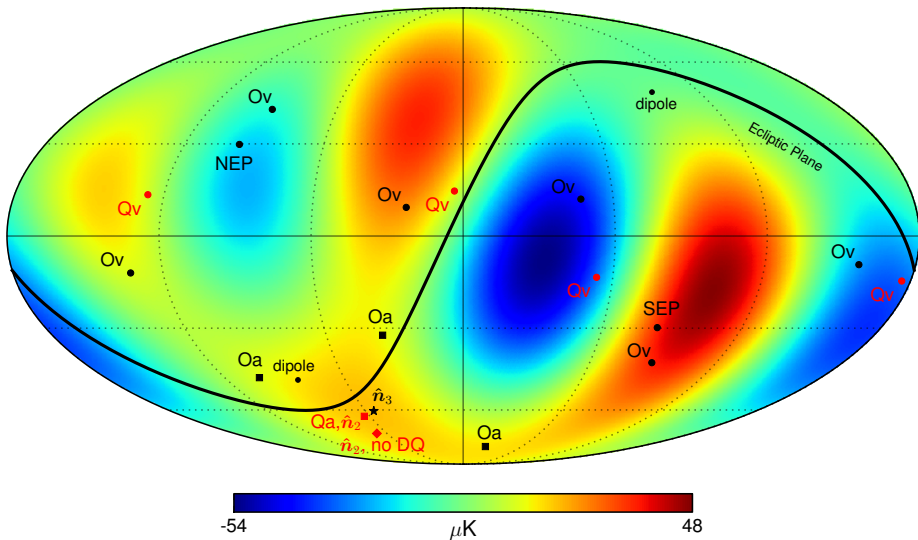
1807.06209

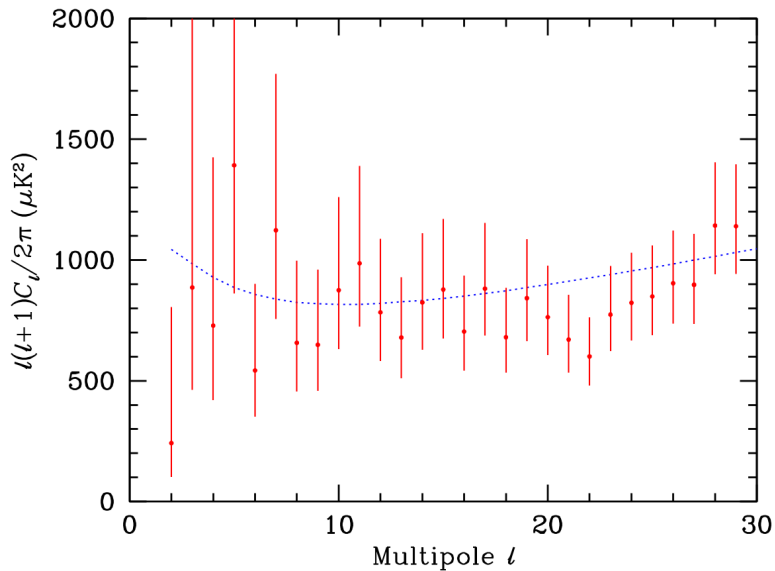
CMB anomalies

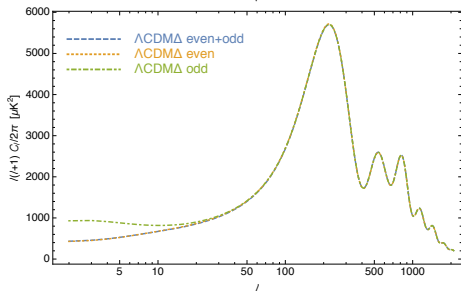
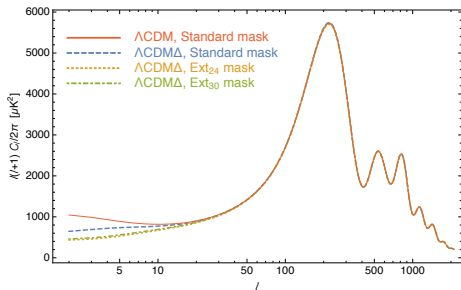
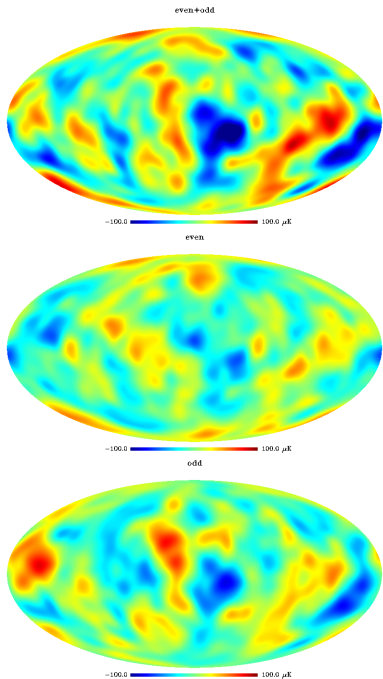
- quadrupole-octopole alignment, $p < 0.5\%$
- $l = 1, 2, 3$ alignment, $p < 0.2\%$
- odd parity preference $l_{max} = 28$, $p < 0.3\%$; $l_{max} < 50$, $p < 2\%$ (lee)
- dipolar modulation for $l = 2 - 67$, $p < 1\%$
- cold spot, $p < 1\%$
- low variance ($N_{side} = 16$), $p < 0.5\%$
- 2-correlation $\chi^2(\theta > 60^\circ)$, $p < 3.2\%$
- 2-correlation $S_{1/2}$, $p < 0.3\%$; (larger masks) $p < 0.1\%$
- hemispherical variance asymmetry, $p < 0.1\%$

$$S_{1/2} \equiv \int_{-1}^{1/2} C^2(\theta) d(\cos \theta)$$

topology? primordial spectrum with broken scale invariance or isotropy?
ISW from local LSS? ... Foregrounds?





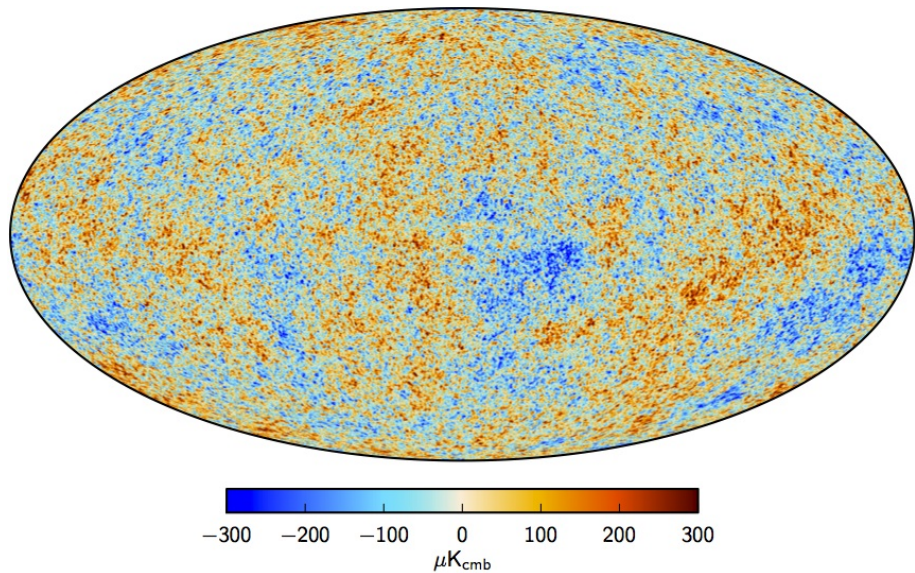


$$P(k) = k^3 / (k^2 + \Delta^2)^{2-n_s/2}$$

1712.03288

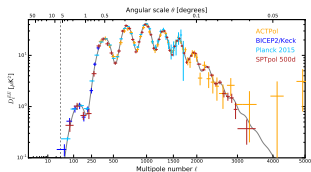
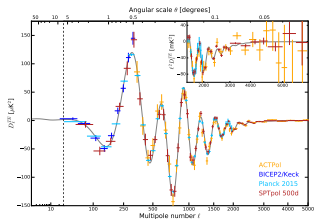
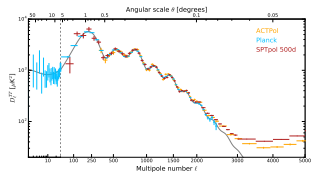
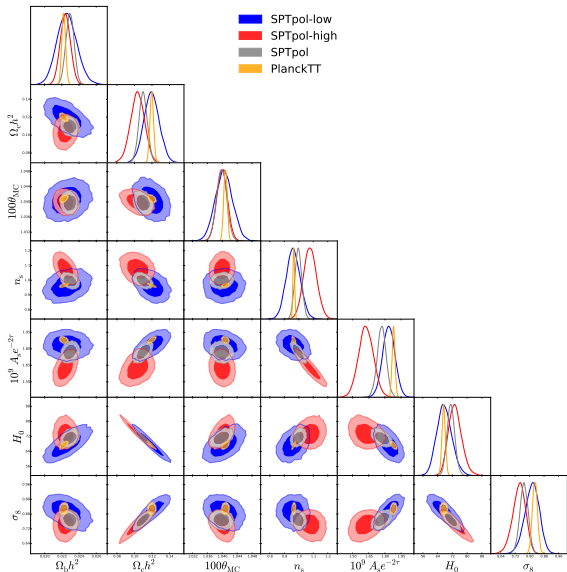
CMB map (Planck)

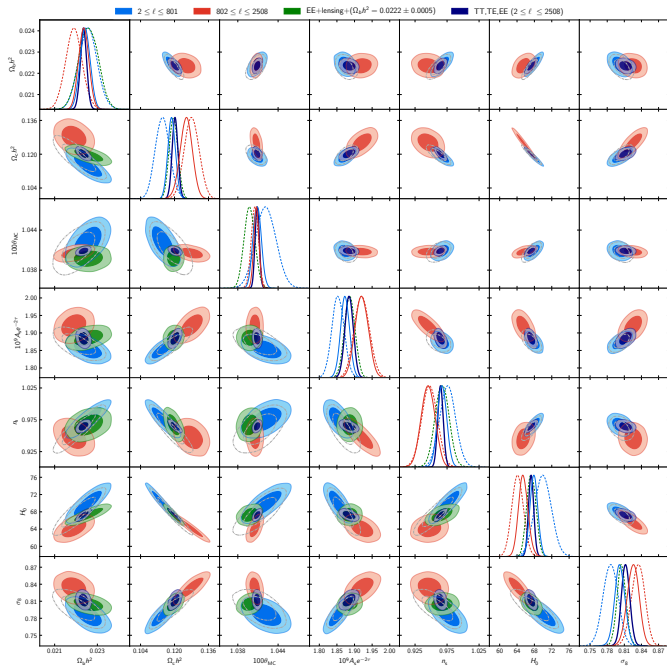
1502.01582



SPTpole with critical $I = 1000$

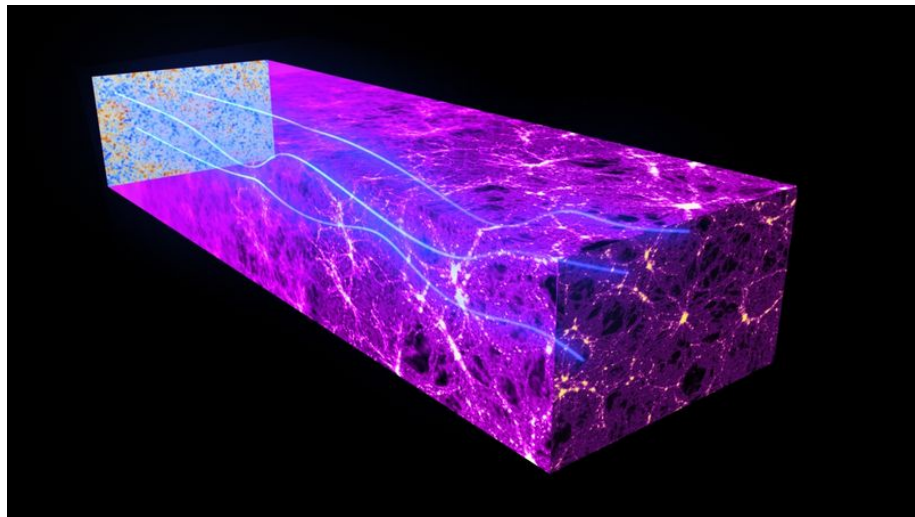
1707.09353



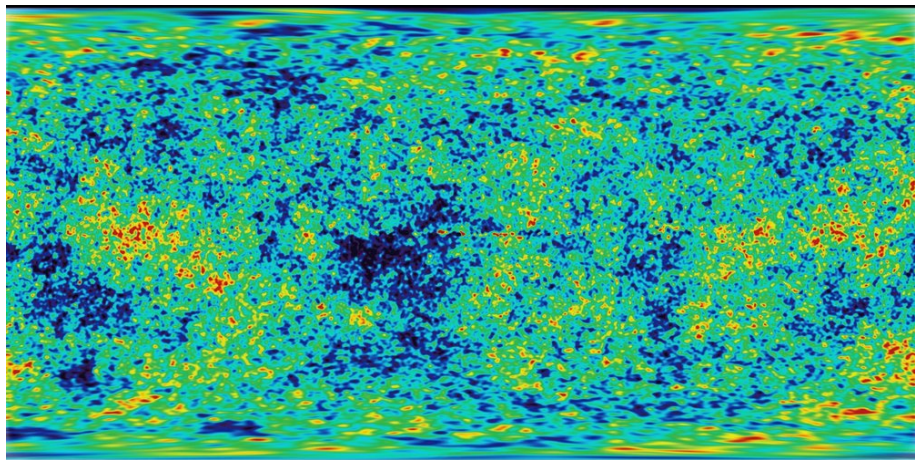


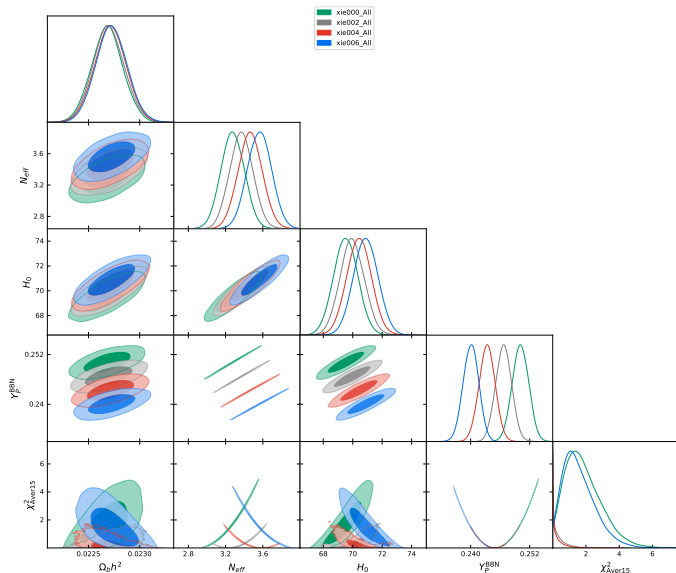
1807.06209

Фотоны движутся в расширяющейся Вселенной



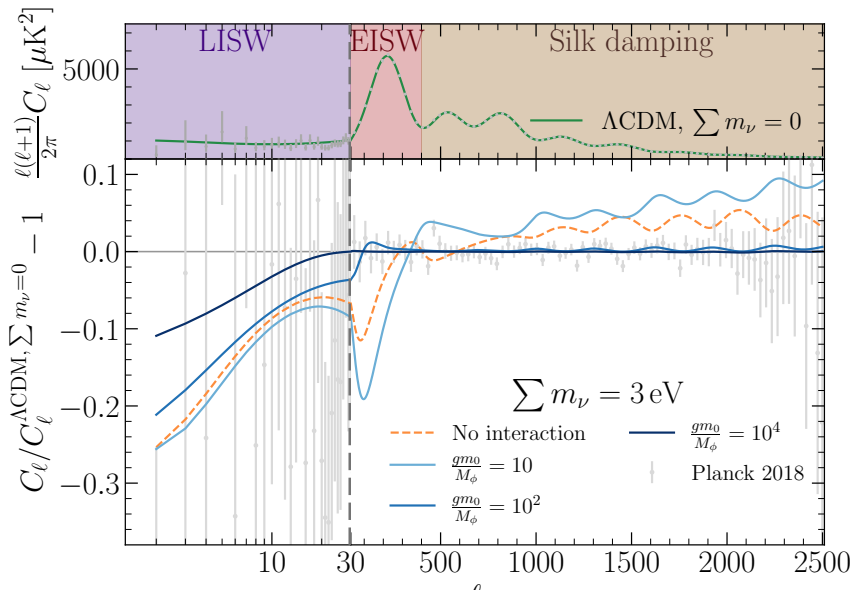
Всё давно написано, дело за читателем





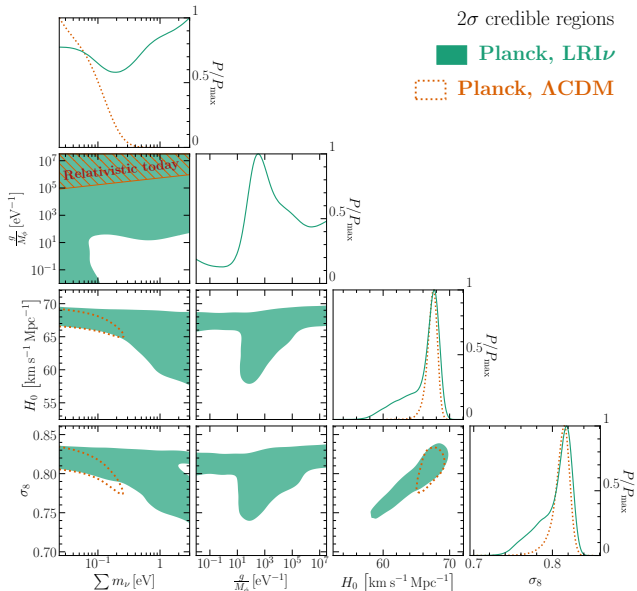
CMB: 'heavy' neutrinos with long-range force

2101.05804



CMB: 'heavy' neutrinos with long-range force

2101.05804



CMB: 'heavy' neutrinos with long-range force

2101.05804

