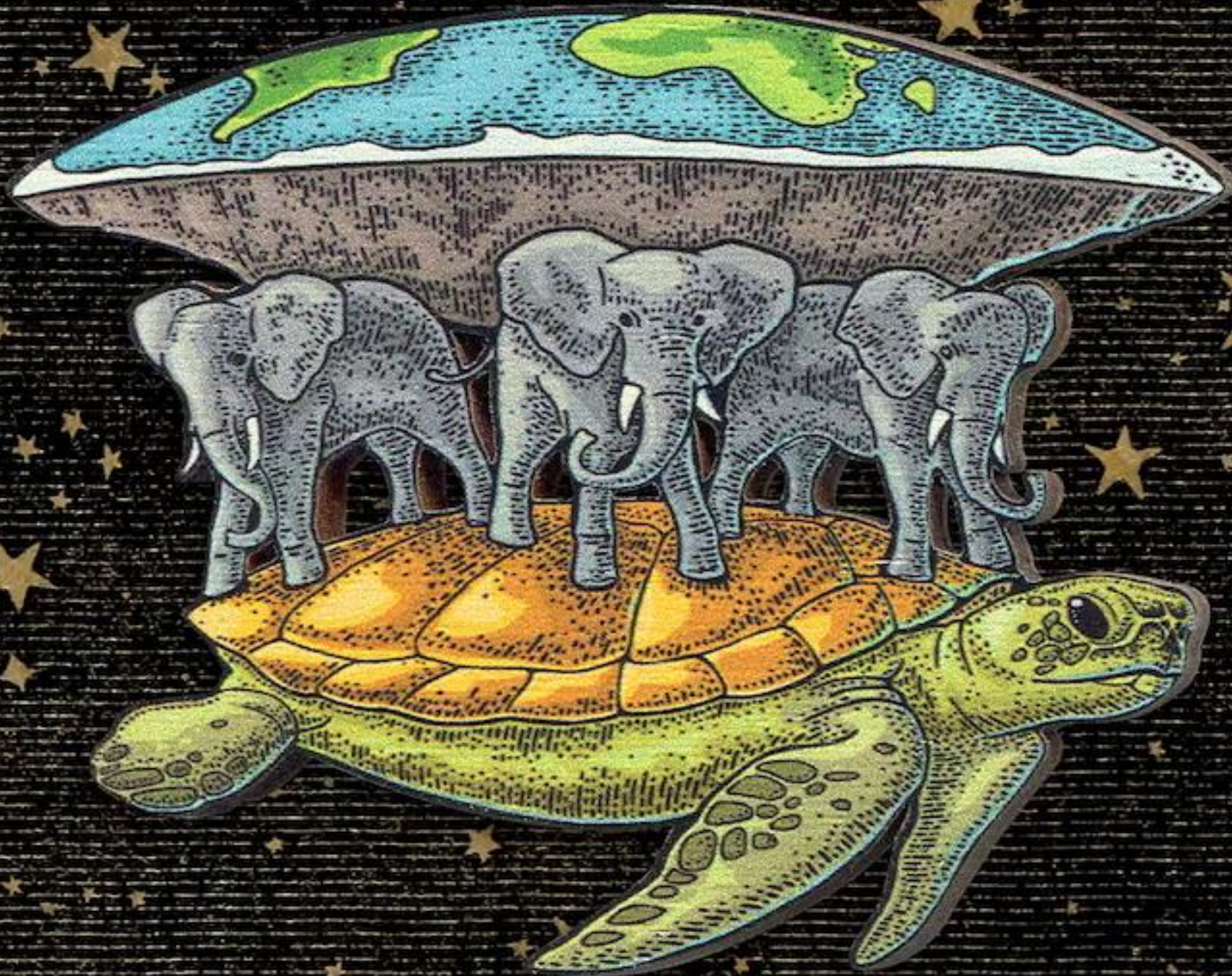


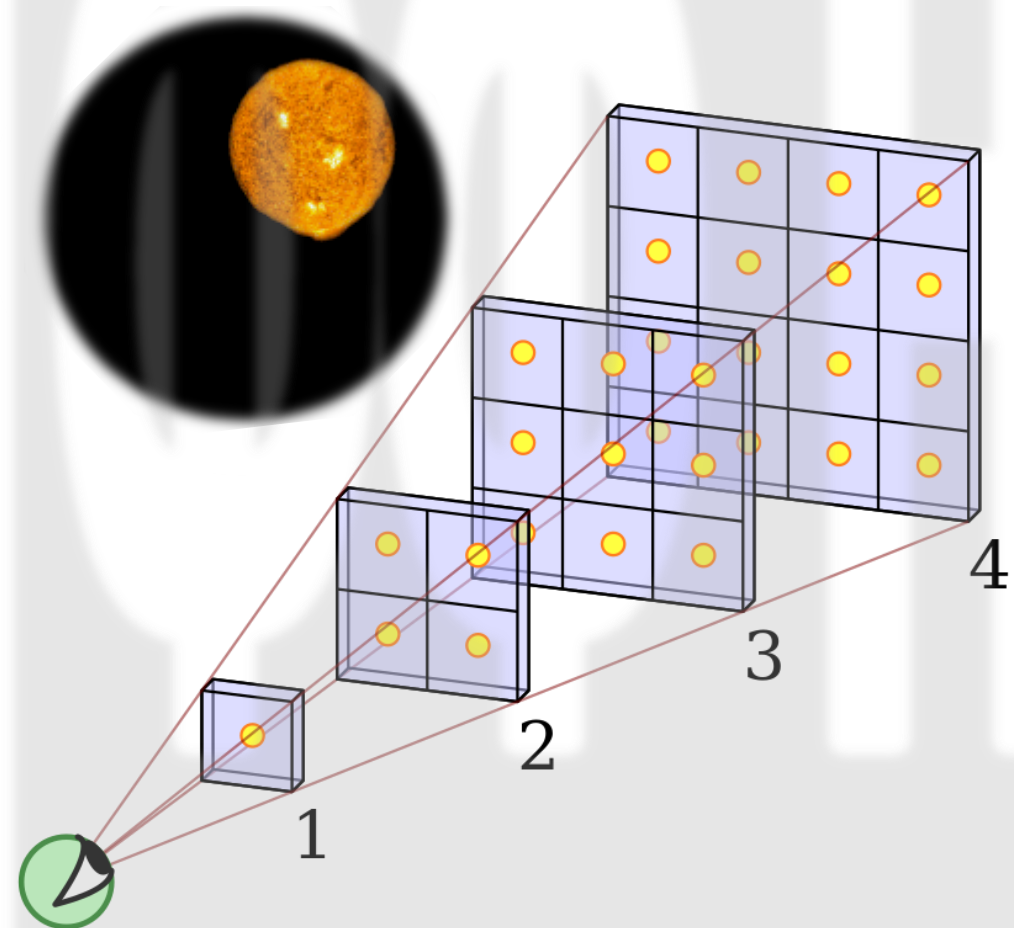


Лекция 14
Космология
ФФ НГУ, 2024

Парадокс Ольберса

Вопросом о (бес)конечности Космоса люди задавались еще с древних времен.

В 18-ом веке Эдмунд Галлей (1720) и Жан-Филипп Чезо (1744) сформулировали парадокс, известный сегодня как парадокс Ольберса. Сам Ольберс обсуждал его лишь в 1823 году:



«Почему небо черное? В статичной (вечной) и бесконечной Вселенной вдоль любого луча зрения должна быть звезда».

... Количество звезд в тонком слое растет $\sim r^2$, а их видимая яркость падает как $\sim r^{-2}$, таким образом вклад каждого слоя в полную яркость участка неба одинаков. Поскольку количество слоев бесконечно, то небо должно светиться равномерным светом с яркостью средней звезды. (С учетом конечного размера звезд.)

Парадокс Ольберса

Одним из первых, кто дал правильное объяснение парадокса, считается американский поэт Эдгар Алан По, в своей поэме «Эврика», в 1848 году:

The only mode, therefore, in which, under such a state of affairs, we could comprehend the voids which our telescopes find in innumerable directions, would be by supposing the distance of the invisible background so immense that no ray from it has yet been able to reach us at all.

Более строго математическое рассмотрение проблемы было выполнено Иоганном Медлером в 1861 году и Уильямом Томсоном (лорд Кельвин) в 1901 году.

По каким-то причинам мы наблюдаем не весь объем Вселенной, а только его часть. В качестве такой причины было высказано предположение о конечности возраста Вселенной. Из-за конечной скорости, свет от очень далеких звезд еще не успел дойти до нас.

Красное смещение

В 1910-х годах Весто Слайфер, проводя спектрометрические наблюдения спиральных туманностей, обнаружил, что спектры большинства из них «смещены» в красную область.



Vesto Slipher
1875 – 1969

additional nebula N.G.C. 1500 has been observed by Pease, who found a large receding velocity but gave no numerical estimate.

RADIAL VELOCITIES OF SPIRAL NEBULAE

+ indicates receding, - approaching

N. G. C.	R. A. h m	Dec. ° '	Rad. Vel. km. per sec.	N. G. C.	R. A. h m	Dec. ° '	Rad. Vel. km. per sec.
221	0 38	+40 26	- 300	4151*	12 6	+39 51	+ 980
224*	0 38	+40 50	- 300	4214	12 12	+36 46	+ 300
278†	0 47	+47 7	+ 650	4258	12 15	+47 45	+ 500
404	1 5	+35 17	- 25	4382†	12 21	+18 38	+ 500
584†	1 27	- 7 17	+1800	4449	12 24	+44 32	+ 200
598*	1 29	+30 15	- 260	4472	12 25	+ 8 27	+ 850
936	2 24	- 1 31	+1300	4486†	12 27	+12 50	+ 800
1023	2 35	+38 43	+ 300	4526	12 30	+ 8 9	+ 580
1068*	2 39	- 0 21	+1120	4565†	12 32	+26 26	+1100
2683	8 48	+33 43	+ 400	4594*	12 36	-11 11	+1100
2841†	9 16	+51 19	+ 600	4649	12 40	+12 0	+1090
3031	9 49	+69 27	- 30	4736	12 47	+41 33	+ 290
3034	9 49	+70 5	+ 290	4826	12 53	+22 7	+ 150
3115†	10 1	- 7 20	+ 600	5005	13 7	+37 29	+ 900
3368	10 42	+12 14	+ 940	5055	13 12	+42 37	+ 450
3379*	10 43	+13 0	+ 780	5194	13 26	+47 36	+ 270
3489†	10 56	+14 20	+ 600	5195†	13 27	+47 41	+ 240
3521	11 2	+ 0 24	+ 730	5236†	13 32	-29 27	+ 500
3623	11 15	+13 32	+ 800	5866	15 4	+56 4	+ 650
3627	11 16	+13 26	+ 650	7331	22 33	+33 23	+ 500
4111†	12 3	+43 31	+ 800				

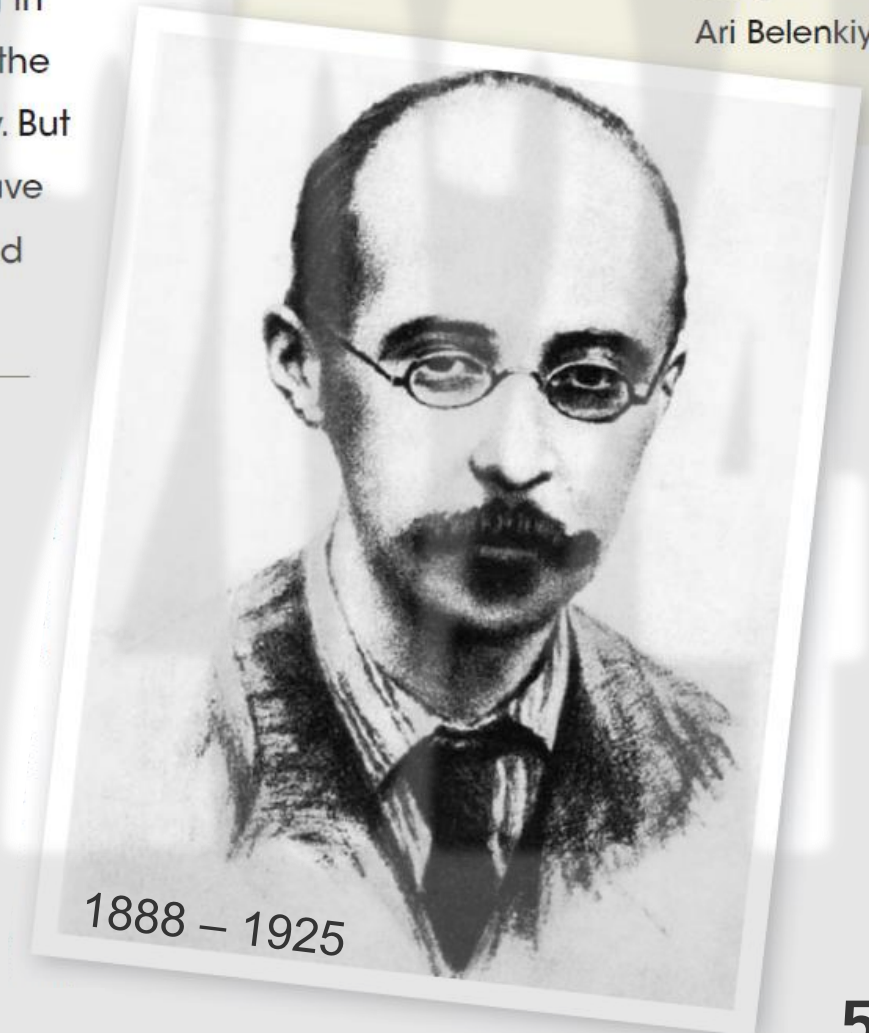
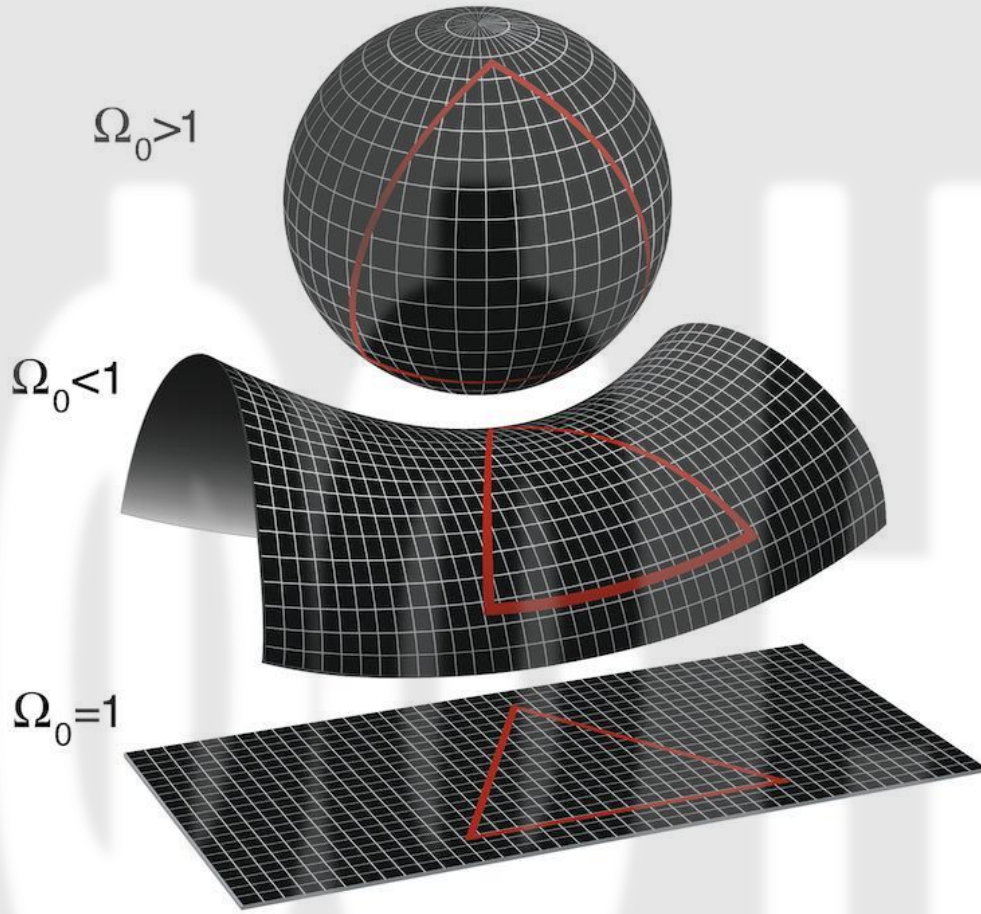
The great preponderance of positive (receding) velocities is very striking; but the lack of observations of southern nebulae is unfortunate, and forbids a final conclusion. From the above it is seen a preponderance of positive velocities.

Alexander Friedmann

and the origins of modern cosmology

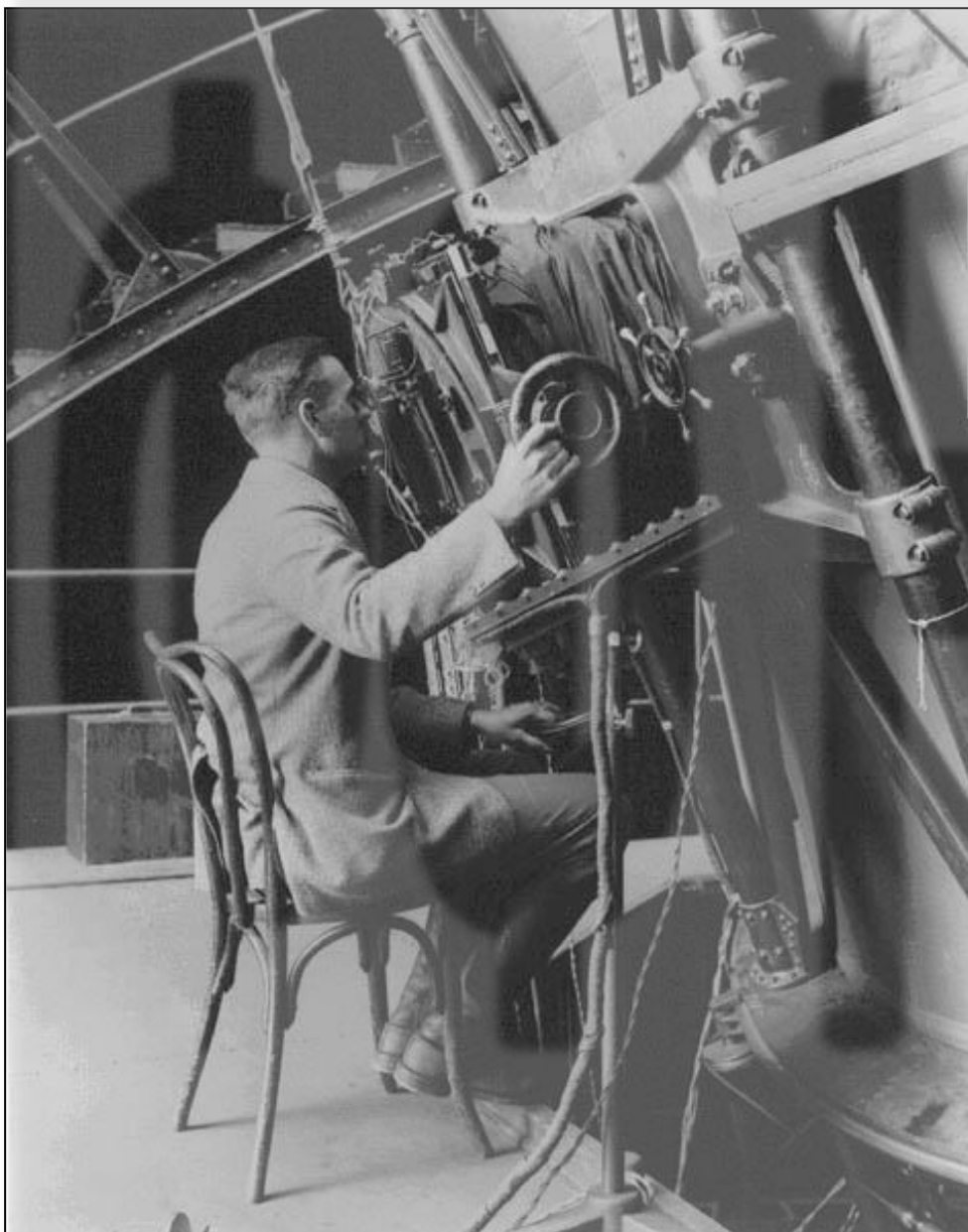
Ari Belenkiy

Friedmann, who died young in 1925, deserves to be called the father of Big Bang cosmology. But his seminal contributions have been widely misrepresented and undervalued.

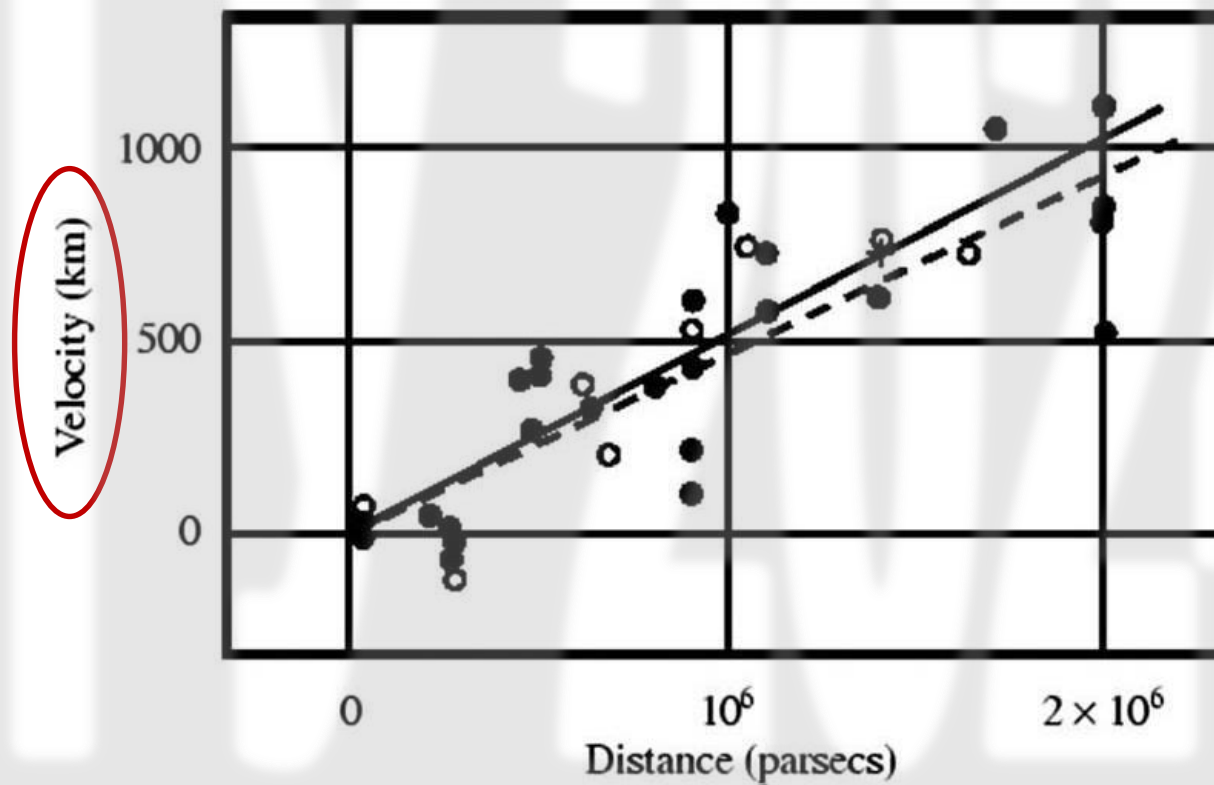


В 1922-23 годах Александр Фридман нашел общее решение уравнений ОТО для однородной и изотропной Вселенной как целое. Одним из результатов этой работы был вывод о том, что Вселенная не может быть статичной – расширение или сжатие.

Закон Хаббла



Кнут Лундмарк (1924) Георг Леметр (1927) и Эдвин Хаббл (1929) независимо обнаружили связь между скоростью удаления галактик с расстоянием до них – закон Хаббла.



$$H_0 \approx 500 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпс}}$$

$$v = H_0 d$$

Рождение Космологии

В 1912 году Весто Слайфер, проводя систематические спектрометрические наблюдения «туманностей», обнаружил, что спектры большинства из них смещены в красную область.

В 1916 году выходит первая работа Альберта Эйнштейна по Общей теории относительности.

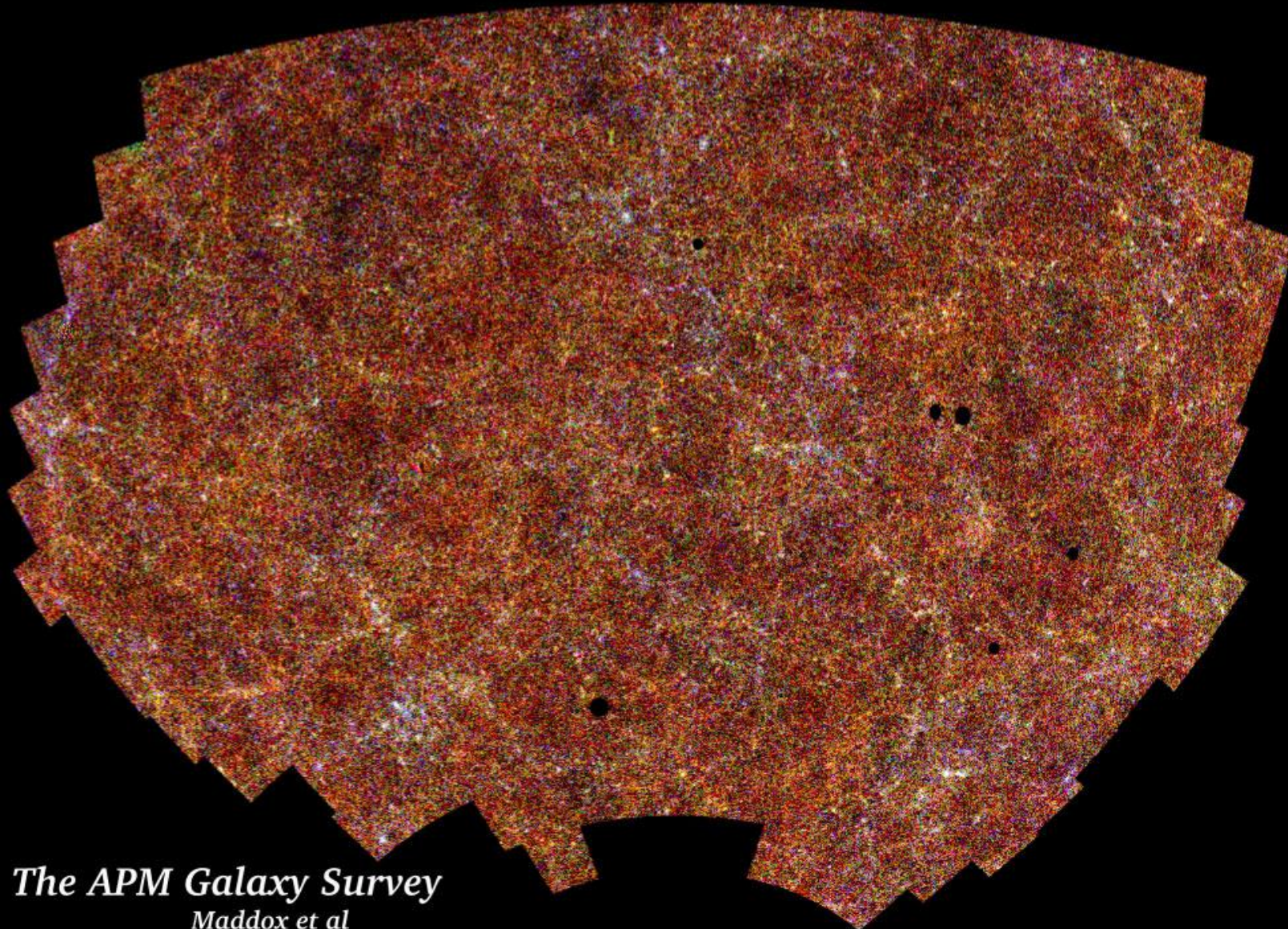
В 1922-24 годах Александр Фридман нашел общие решения ОТО для однородной и изотропной Вселенной как целое. Одним из результатов этой работы был вывод о том, что Вселенная не может быть статичной – расширение или сжатие.

Кнут Лундмарк (1924) Георг Леметр (1927) и Эдвин Хаббл (1929) независимо обнаружили связь между скоростью удаления галактик с расстоянием до них – закон Хаббла.

Таким образом, к началу 30-х годов 20-го века было установлено, что масштабы Вселенной **НАМНОГО** превосходят размеры Млечного Пути, а сама Вселенная является **динамической** структурой => рождение современной космологии.

Космологический принцип

На ОЧЕНЬ БОЛЬШИХ расстояниях Вселенная является однородной и изотропной.



The APM Galaxy Survey
Maddox et al

Уравнения ОТО

Уравнения Эйнштейна общей теории относительности:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R - 8\pi G \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

где $g_{\mu\nu}$ – метрический тензор, полностью описывает структуру (геометрию) пространства-времени, а $T_{\mu\nu}$ – тензор энергии-импульса, описывающий состояние (распределение) вещества.

Зная метрический тензор, для интервала ds имеем:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

В СТО метрический тензор имеет простой вид (пространство Минковского):

$$ds^2 = dt^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2$$

То есть $g_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$.

Метрика Фридмана

Принимая космологический принцип (изотропная и однородная Вселенная), Фридман в 1922-23 гг. нашел **общее** решение (метрику) уравнений общей теории относительности:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[\left(\frac{d\chi}{\sqrt{1 - \kappa\chi}} \right)^2 + (\chi d\theta)^2 + (\chi \sin\theta d\phi)^2 \right]$$

$\kappa = -1$ для гиперболической (открытой) Вселенной

$\kappa = 0$ для плоской Вселенной

$\kappa = +1$ для сферической (закрытой) Вселенной

$a(t)$ — масштабный фактор.

Момент времени, соответствующий нашей эпохе, будем обозначать t_0 и $a(t_0) \equiv 1$.

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 **процессе распространения** фотон «чувствует» расширение Вселенной, что сказывается на его длине физической волны.

Уравнение Фридмана

решение
уравнений ОТО

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

уравнение Фридмана

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

сохранение энергии-импульса

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

– параметр Хаббла;

ρ

– средняя плотность вещества Вселенной;

p

– давление.

$$\dot{f} \equiv \frac{df}{dt}$$

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

Уравнение состояния

В общем виде уравнение состояния вещества задается соотношением $p = \omega \rho c^2$.

нерелятивистское вещество (барионное вещество + темная материя)

$$\rho_m \quad \omega = 0$$

релятивистское вещество (излучение, нейтрино)

$$\rho_r \quad \omega = 1/3$$

темная энергия (вакуум ?)

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G} \quad \omega = -1$$

$$\rho = \rho_m + \rho_r + \rho_\Lambda$$

Эволюция средней плотности

Рассмотрим эволюцию различных вкладов с изменением масштаба Вселенной:

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

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

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

$$\rho_m = \rho_{m,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3$$

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

$$\dot{\rho} + 4 \frac{\dot{a}}{a} \rho = 0$$

$$\rho_r = \rho_{r,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^4$$

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!

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:

$$\rho_c \equiv \frac{3}{8\pi G} H^2 \quad \text{— критическая плотность энергии Вселенной}$$

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

$$H^2(1 - \Omega) a^2 = -\kappa c^2$$

При $t = t_0$ получаем:

$$H_0^2(1 - \Omega_0) a_0^2 = -\kappa c^2 \qquad a_0 \equiv a(t_0) = 1$$

тогда приравнявая и преобразуя, получим:

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

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).

Проблема тонкой настройки

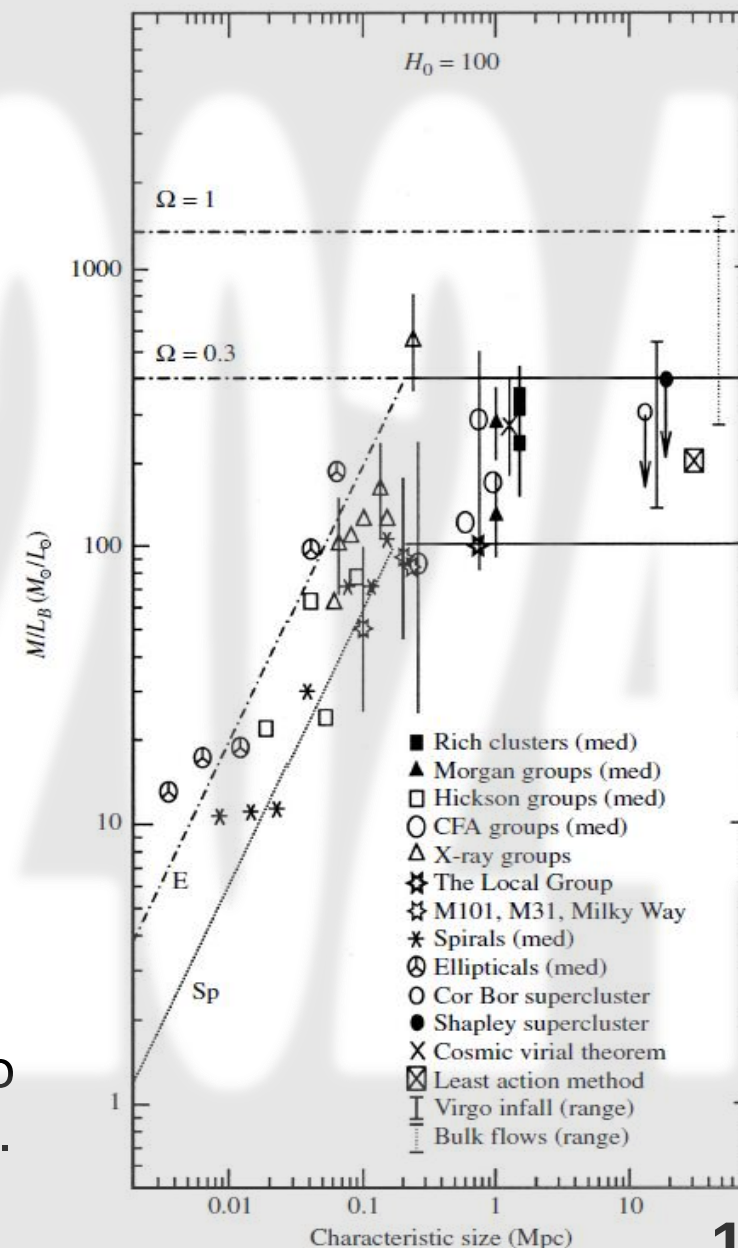
$$\Omega_m = 1 + \frac{\Omega_{m,0} - 1}{1 + z\Omega_{m,0}}$$

На протяжении второй половины 20-го века предпринимались существенные усилия по измерению средней плотности Вселенной. При увеличении масштабов, средняя плотность наблюдаемого вещества увеличивалась, достигнув $\Omega_{m,0} \simeq 0.25$.

При $t = 3$ минуты $z \sim 10^8$ и $\Omega_m \simeq 0.9999999993$!

Возникает вопрос – какие причины создают такую тонкую настройку параметра Ω на начальной стадии, что его значение настолько близко к 1, но всё же не равно 1?

Более «естественно» предположить, что с самого начала $\Omega_m = 1$, но тогда должно быть и $\Omega_{m,0} = 1$, что явно противоречит наблюдениям...если нет других вкладов в плотность энергии.



Эволюция параметра Хаббла

Для плоской Вселенной ($\Omega_{r,0} + \Omega_{m,0} + \Omega_{\Lambda} = 1$) получаем:

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

$$H(a) = H_0 \left[\Omega_{r,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^4 + \Omega_{m,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3 + \Omega_{\Lambda} \right]^{1/2}$$

Современные значения параметров ($a_0 \equiv 1$):

$$H_0 \simeq 72 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$$

$$\Omega_{m,0} \simeq 0.27$$

$$\Omega_{\Lambda,0} \simeq 0.73$$

$$\Omega_{r,0} \simeq 8.3 \times 10^{-5}$$

Вычислительный пример

Оценить, при каких значениях красного смещения вклад излучения в среднюю плотность становится определяющим.

В настоящее время вклад излучения в полную плотность энергии мал. Однако, при условии:

$$\Omega_{\text{r},0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^4 > \Omega_{\text{m},0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3$$

$$\frac{a}{a_0} < \frac{\Omega_{\text{r},0}}{\Omega_{\text{m},0}} \simeq \frac{8.3 \times 10^{-5}}{0.27} = 3.07 \times 10^{-4}$$

То есть при $z \gtrsim 3250$ плотность излучения определяла темп расширения Вселенной (эпоха излучения).

Вычислительный пример

Возраст «пылевой» Вселенной

Вычислить возраст Вселенной, заполненной только нерелятивистским веществом, т.е. $\Omega_{m,0} = 1$.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left(\Omega_{m,0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 + \cancel{\Omega_{r,0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^4} + \Omega_\Lambda \right) = \frac{\text{const}}{a^3}$$

Тогда:

$$\frac{\dot{a}}{a} = H_0 \frac{1}{a^{3/2}}$$

$$a^{1/2} da = H_0 dt$$

$$\int_0^a a'^{1/2} da' = H_0 \int_0^t dt'$$

Интегрируя, получаем:

$$a(t) = \frac{3}{2} (H_0 t)^{2/3}$$

$$H_0 = \frac{2}{3t_0}$$

Подставляя современное значение $H_0 = 72 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$:

$$t_0 = \frac{2}{3H_0} \simeq 9.1 \times 10^9 \text{ лет}$$

Это противоречит возрасту шаровых звездных скоплений: $t_0 \geq 12 \times 10^9$ лет!

Вычислительный пример

Возраст «пылевой» Вселенной

Вычислить возраст Вселенной, заполненной только нерелятивистским веществом, т.е. $\Omega_{m,0} = 1$.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left(\Omega_{m,0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 + \cancel{\Omega_{r,0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^4} + \Omega_\Lambda \right) = \frac{\text{const}}{a^3}$$

Тогда:

$$\frac{\dot{a}}{a} = H_0 \frac{1}{a^{3/2}}$$

$$a^{1/2} da = H_0 dt$$

$$\int_0^{a_0} a^{1/2} da = H_0 \int_0^{t_0} dt$$

Интегрируя, получаем:

$$H_0 = \frac{2}{3t_0}$$

Подставляя современное значение $H_0 = 72 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$:

$$t_0 = \frac{2}{3H_0} \simeq 9.1 \times 10^9 \text{ лет}$$

Это противоречит возрасту шаровых звездных скоплений: $t_0 \geq 12 \times 10^9$ лет!

Какое расстояние измеряется?

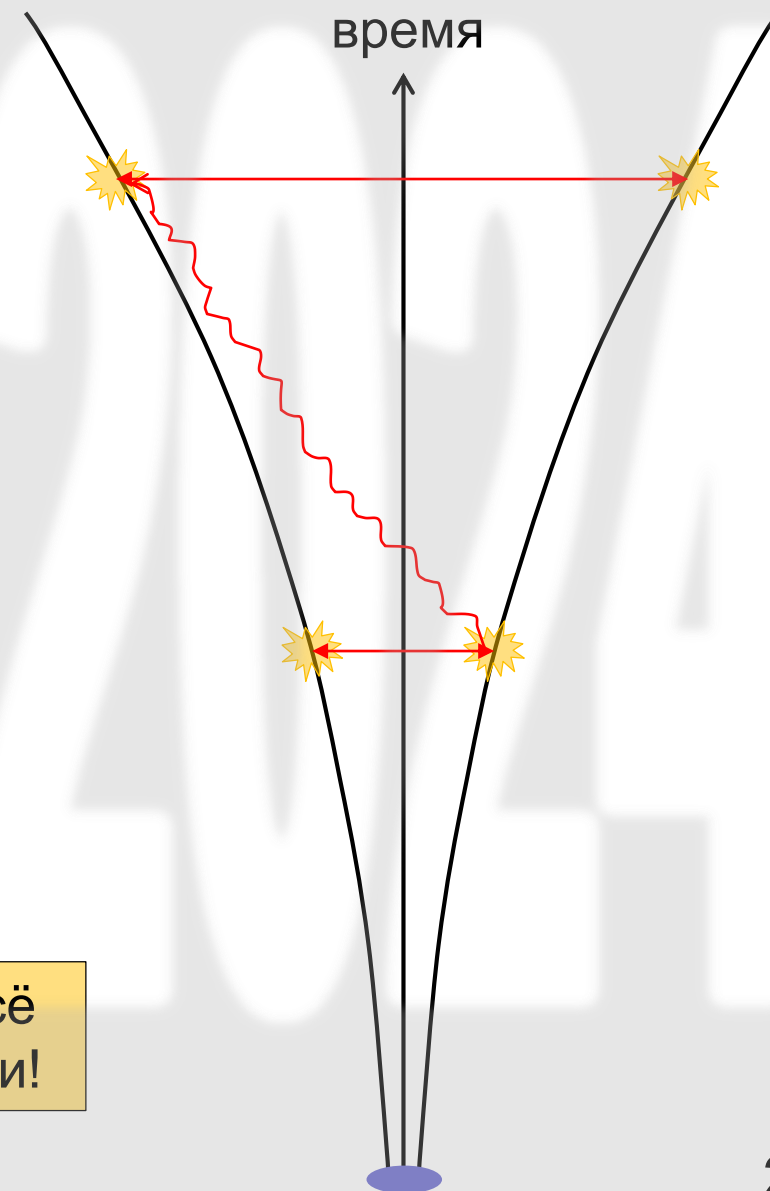
Расстояние между объектом и наблюдателем в момент испускания фотона объектом?

Расстояние, пройденное фотоном от 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!



Какие расстояние бывают?

Сопутствующее (comoving) – расстояние между объектами в конформных координатах в заданный момент времени.

Собственное (proper) – физическое (в км) расстояние между объектами в заданный момент времени.

Угломерное (angular) – расстояние до объекта, определенное по формуле:

$$d_{\text{уг}} = \frac{D}{\text{tg}\theta}$$

где D – известный линейный размер объекта, θ – его измеренный угловой размер.

Фотометрическое (photometric) – расстояние до объекта, определенное по формуле:

$$d_{\text{фм}}^2 = \frac{L}{4\pi f}$$

где L – известная светимость объекта, f – измеренная плотность потока.

Вычислительный пример

Горизонт частиц = радиус наблюдаемой части Вселенной.

Вычислить радиус плоской Вселенной, заполненной только веществом с $\Omega_{m,0} = 0.3$.

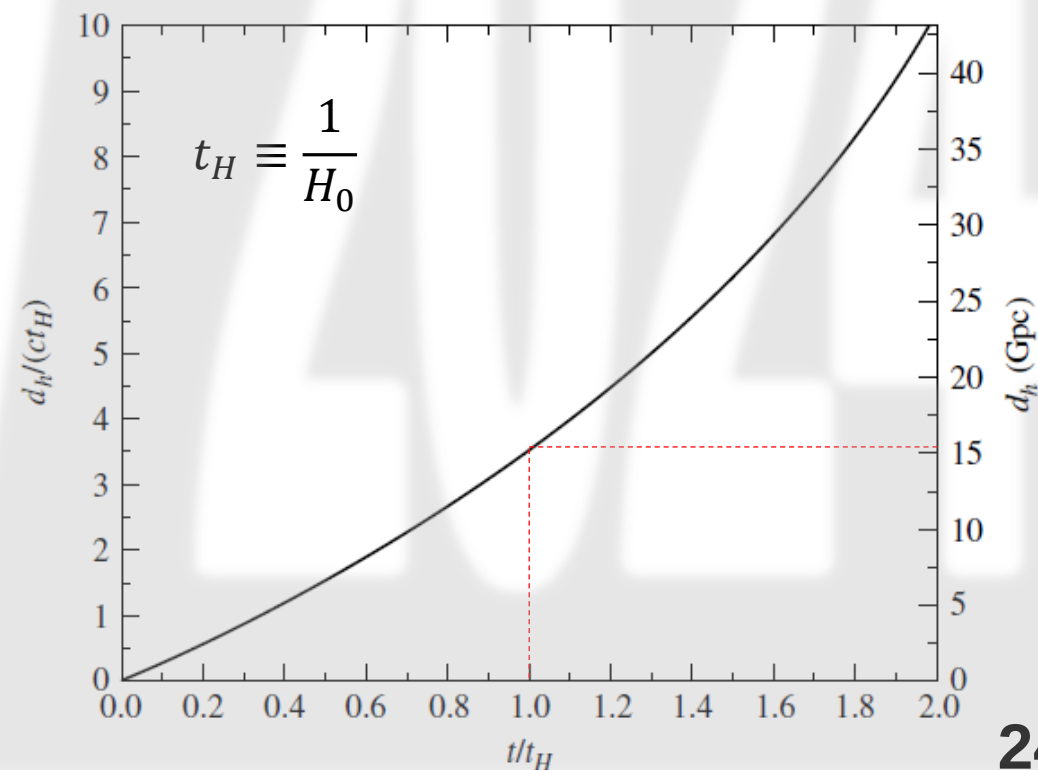
$$d(t) = a(t) \int_0^t \frac{cdt'}{a(t')}$$

$$d_0 \equiv d(t_0) = a(t_0) \int_0^{t_0} \frac{cdt'}{a(t')} = \int_0^1 \frac{cda'}{a'^2 H(a')}$$

Уравнение Фридмана:

$$H(a) = H_0 \left[\Omega_{r,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^4 + \Omega_{m,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3 + \Omega_{\Lambda} \right]^{1/2}$$

$$d_0 = \int_0^1 \frac{da'}{a'^2 H(a')} = \frac{2c}{H_0 \sqrt{\Omega_{m,0}}} \simeq \mathbf{50 \text{ св. Глет}}$$



Возраст Вселенной

Стартуем с уравнения Фридмана:

$$\frac{\dot{a}}{a} \equiv H(a) = H_0 \left[\Omega_{r,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^4 + \Omega_{m,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3 + \Omega_\Lambda \right]^{1/2}$$

$$dt = \frac{1}{H_0} \frac{da}{a} \left[\Omega_{r,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^4 + \Omega_{m,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3 + \Omega_\Lambda \right]^{-1/2}$$

Пренебрегая вкладом излучения, получим связь возраста Вселенной и масштабного фактора:

$$t = \frac{1}{H_0} \int_0^a a' [\Omega_{m,0} a' + \Omega_\Lambda a'^4]^{1/2} da' = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda}} \ln \left[\sqrt{\frac{\Omega_\Lambda}{\Omega_{m,0}}} a^3 + \sqrt{1 + \frac{\Omega_\Lambda}{\Omega_{m,0}}} a^3 \right]$$

При $a = 1$ (настоящее время), получим возраст Вселенной сегодня: $t_0 = 13.7$ Глет.

Look back time

Насколько более «молодыми» мы видим далекие объекты?

Перепишем только что полученное выражение через красное смещение:

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

$$t(z) = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda}} \ln \left[\sqrt{\frac{\Omega_\Lambda}{\Omega_{m,0}} \frac{1}{(1+z)^3}} + \sqrt{1 + \frac{\Omega_\Lambda}{\Omega_{m,0}} \frac{1}{(1+z)^3}} \right]$$

То есть это возраст Вселенной при красном смещении z . Тогда если мы сейчас наблюдаем объект на красном смещении z , то этот свет был испущен $t_0 - t(z)$ времени назад.

Так, для красного смещения $z = 1$, получаем:

$$t = t_0 - t(z) = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda}} \ln \left[\sqrt{8} \frac{\sqrt{R} + \sqrt{1+R}}{\sqrt{R} + \sqrt{8+R}} \right] \simeq 7.5 \text{ Глет}$$

«Большой взрыв»

Уравнение состояния релятивистского вещества $p = \rho/3$ и его плотность зависит от масштабного фактора как

$$\rho_r = \rho_{r,0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^4$$

С другой стороны, плотность энергии излучения зависит от температуры $\sim T^4$. Тогда:

$$T = T_0 \frac{a_0}{a} = T_0(1 + z)$$

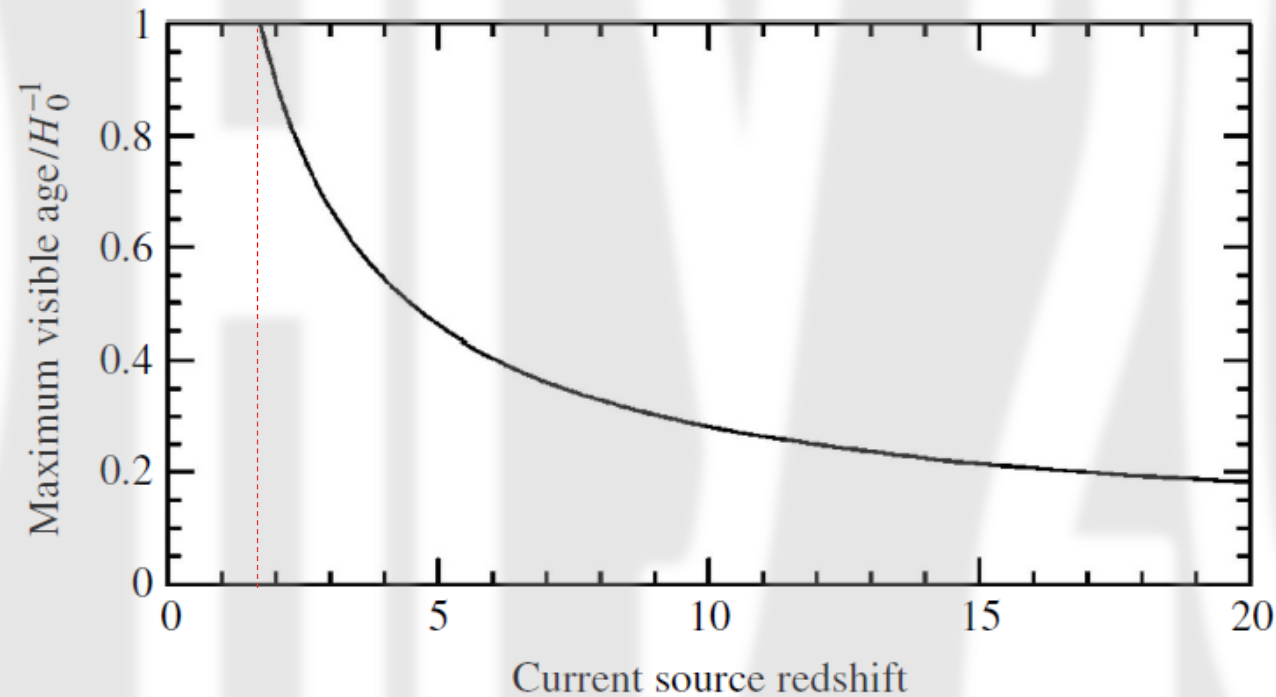
Сейчас Вселенная расширяется и остывает, тогда экстраполируя назад во времени, она должна была быть все более плотной и горячей – **«Большой Взрыв»**.

Кроме того, на ранней стадии излучение доминирует, тогда для плоской Вселенной:

$$\frac{\dot{a}}{a} = H_0 \frac{1}{a^2} \quad \longrightarrow \quad a(t) \sim \sqrt{t} \quad \text{и} \quad \rho_r(t) \sim \frac{1}{t^2}$$

Исчезающая Вселенная

В настоящее время от далеких объектов мы видим свет, испущенный много ранее. Из-за расширения, может так получиться, что для достаточно далеких объектов, свет, испущенный ими сейчас, уже никогда нас не достигнет.



Объекты с красным смещением $z \gtrsim 1.8$ уже находятся за пределами причинно-связанной с нами области, то есть сигнал, посланный нами сейчас, никогда их не достигнет.

Бариогенезис

В предположении «горячего» Большого Взрыва, на очень ранней стадии Вселенная была слишком горячей для стабильного существования атомов сложнее водорода (то есть плазмы в основном протонов и электронов).

По мере остывания, наступил такой (непродолжительный) период, когда температура была еще достаточно высокой для того, чтобы был возможен термоядерный синтез гелия, но достаточно низкой, чтобы предотвратить фото-диссоциацию уже образовавшихся атомов гелия.

С другой стороны, плотность барионного вещества (протонов и нейтронов) на ту эпоху должна быть достаточной, чтобы обеспечить синтез первичного гелия в количестве, согласующемся с наблюдениями (~25%).

Исходя из этих условий, в 1946 году Георгий Гамов, Ральф Алфер и Роберт Херман оценили температуру фотонов оставшихся с эпохи Большого Взрыва (реликтовое излучение, cosmic microwave background, CMB):

$$T_0 = 5 - 7 \text{ К}$$

Что соответствует длине волны $\lambda \simeq 8.4 \times 10^{-4}$ м. То есть находится в радиодиапазоне.

Реликтовое излучение

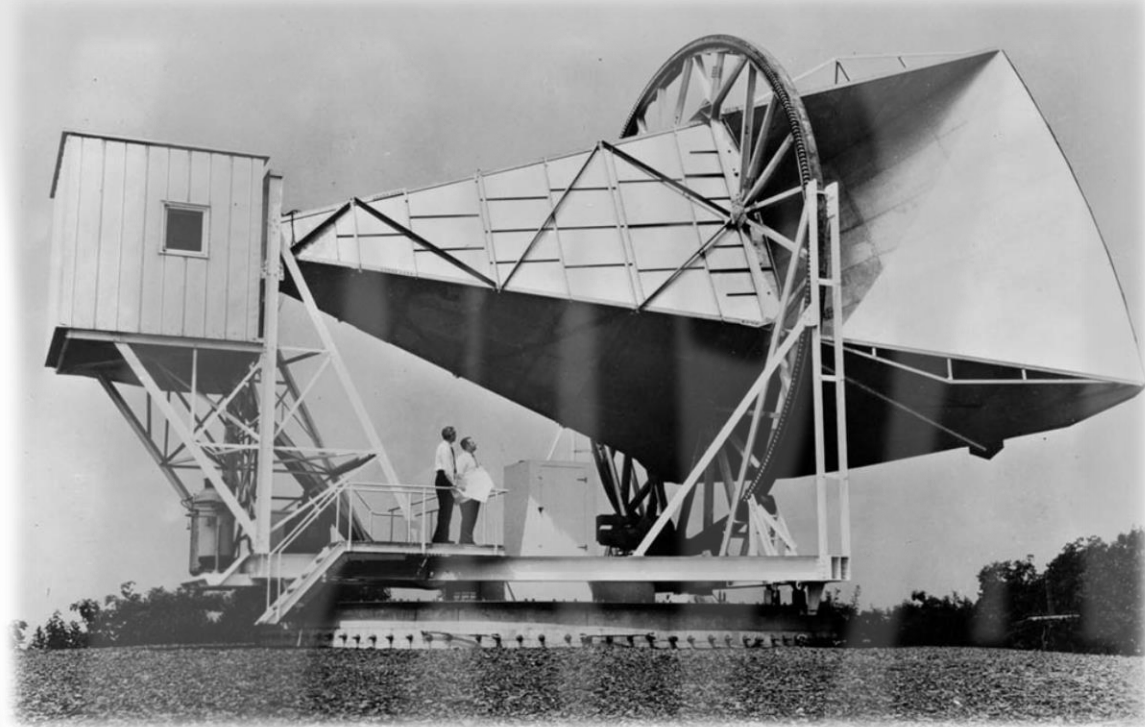
В конце 1940-ых Георгий Гамом, Ральф Алфер и Роберт Херман предсказали существование остаточного (реликтового) излучения, заполняющего Вселенную, с температурой 5 – 7 К.

В 1964 году Андрей Дорошкевич и Игорь Новиков обосновали возможность экспериментально обнаружить реликтовое излучение.

В 1964 году Дэвид Уилкинсон и Питер Ролл начали конструирование антенны с целью обнаружить реликтовое излучение, но...

«Well, boys, we've been scooped.»
(D. Wilkinson)

В 1964 году Арно Пензиас и Роберт Уилсон объявили о наблюдении радиосигнала (шума) с характерной температурой около 4 К.



Реликтовое излучение



Photo from the Nobel
Foundation archive.

Arno Allan Penzias

Prize share: 1/4

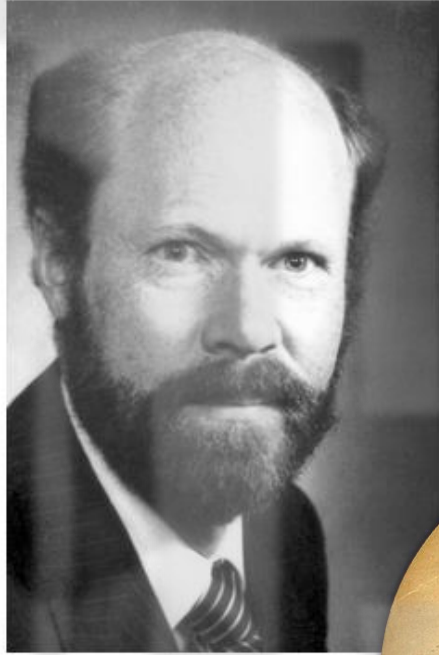


Photo from the Nobel
Foundation archive.

**Robert Woodrow
Wilson**

Prize share: 1/4



"for their discovery of cosmic microwave background radiation"

Возраст реликтового излучения

По мере дальнейшего остывания горячей Вселенной, произошло объединение ядер и электронов в нейтральные атомы – рекомбинация. Произошло разделение вещества и излучения – нейтральное вещество прозрачно для излучения (за исключением узких линий атомарных спектров).

Температуру рекомбинации можно оценить используя уравнение Саха:

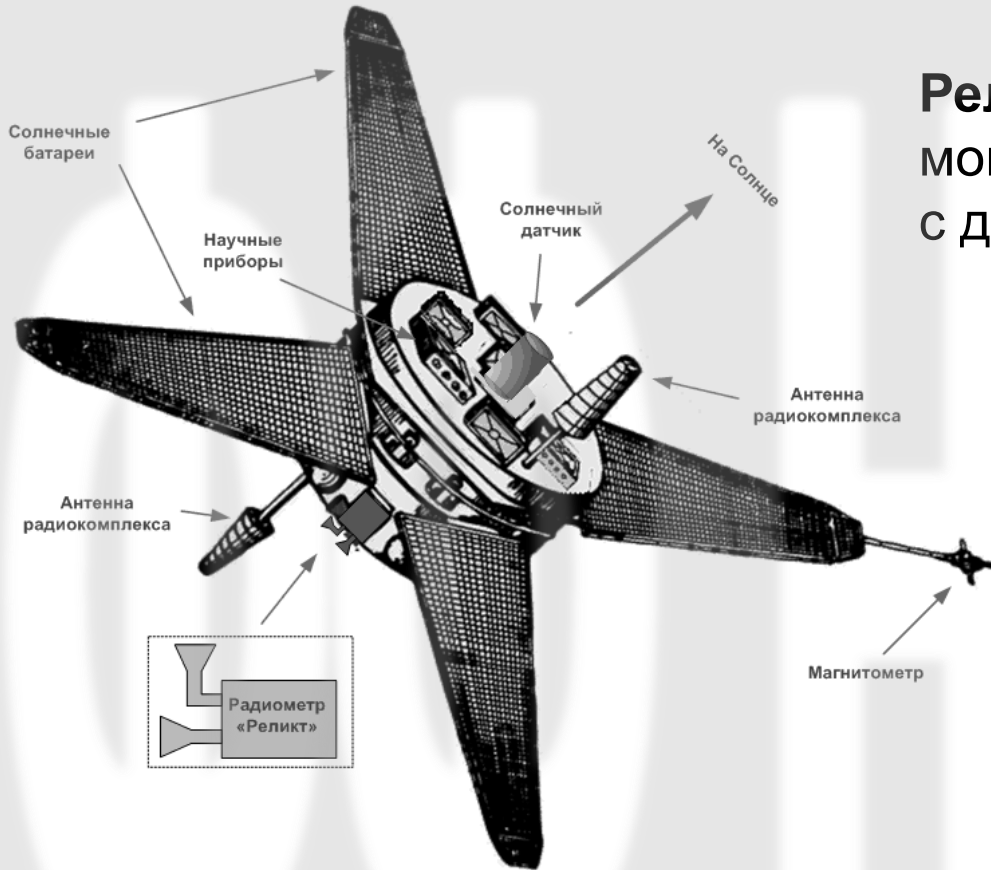
$$T_{\text{рек}} \simeq 3000 \text{ К}$$

Из закона эволюции температуры находим, что это соответствует красному смещению:

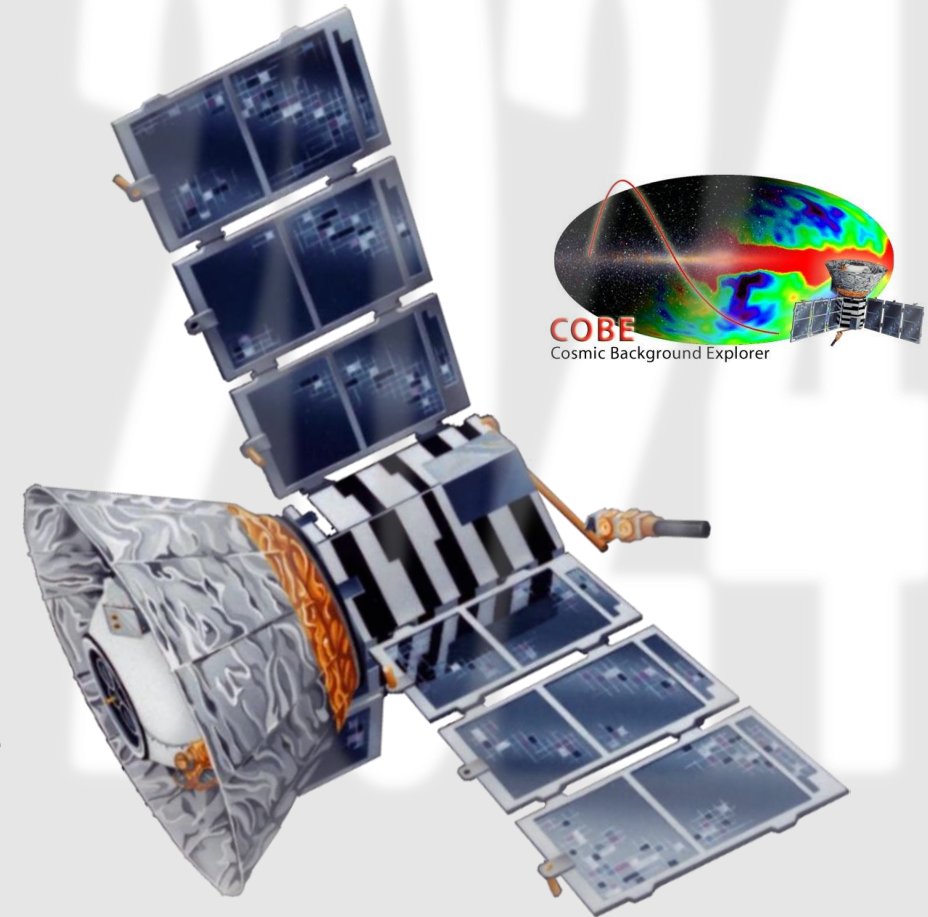
$$z = \frac{T_{\text{рек}}}{T_0} - 1 \simeq 1100$$

Таким образом, реликтовое излучение содержит информацию о Вселенной на момент рекомбинации. В частности о неоднородностях в плотности вещества, которые в дальнейшем станут центрами образования галактик и их скоплений.

Реликтовое излучение



Реликт-1: СССР, 1983-84. Впервые наблюдал дипольный момент в СМВ – анизотропия температуры СМВ, связанная с движением Солнечной системы относительно СМВ.



COBE: США, 1989-93. Провел высокоточное измерение спектра СМВ в широком диапазоне по частоте для всего неба. Впервые построил карту неоднородностей температуры СМВ.

Реликтовое излучение



Photo: P. Izzo
John C. Mather
Prize share: 1/2

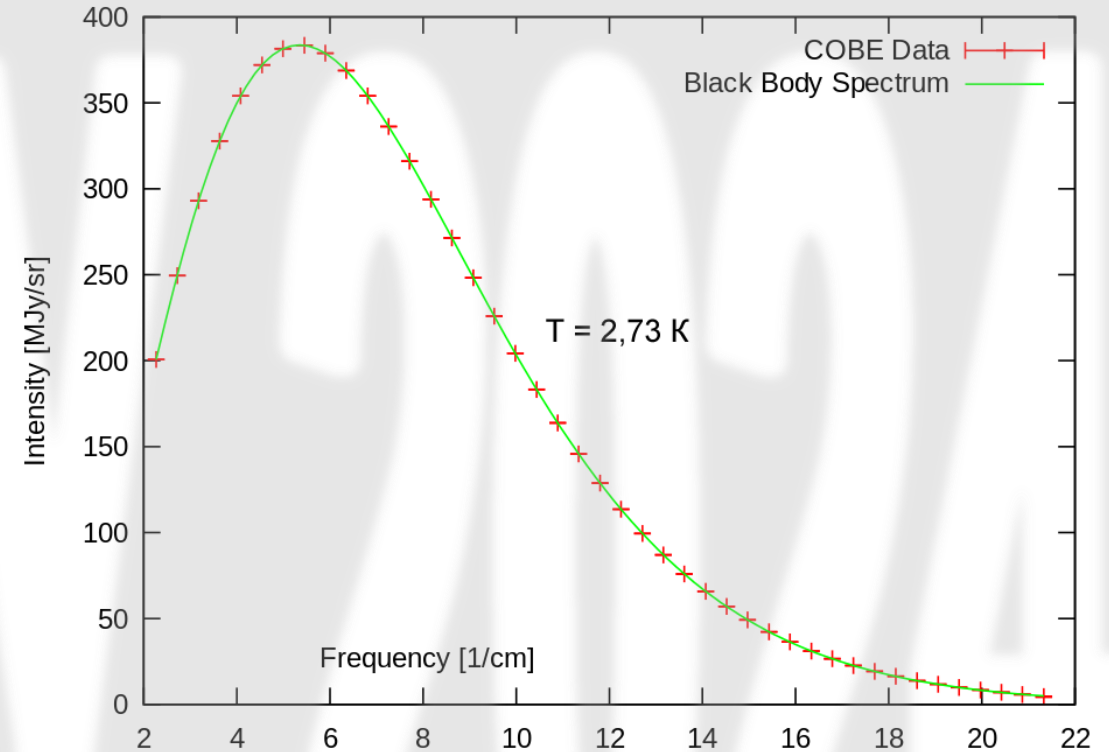


Photo: J. Bauer
George F. Smoot
Prize share: 1/2



2006

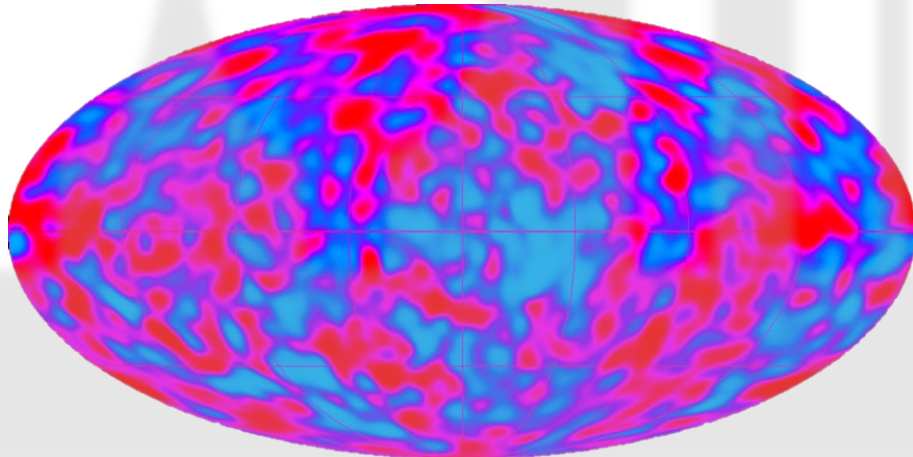
"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"



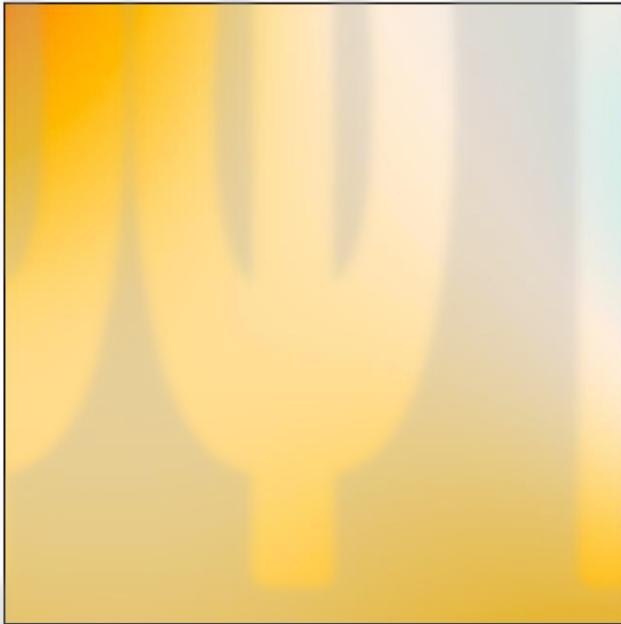
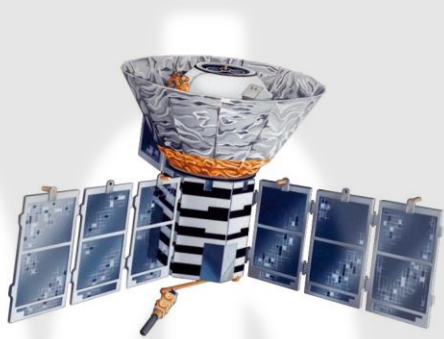
Спектр реликтового излучения оказался в полном согласии с планковским спектром абсолютно черного тела с температурой

$$T = 2.73 \text{ K}$$

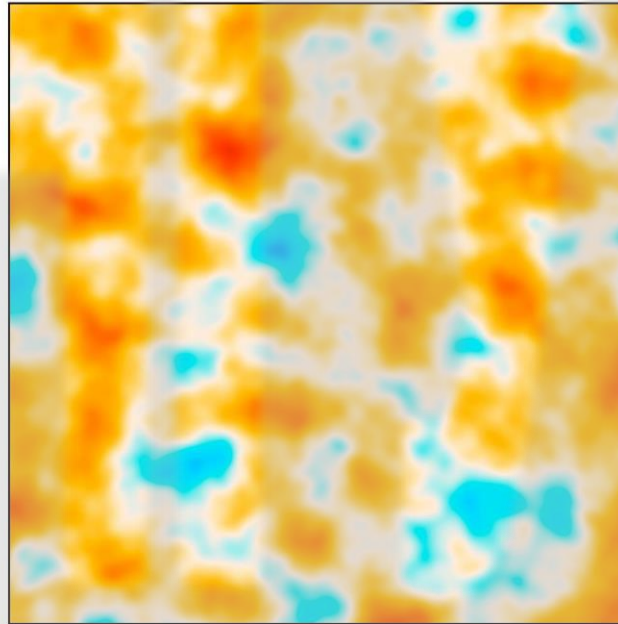
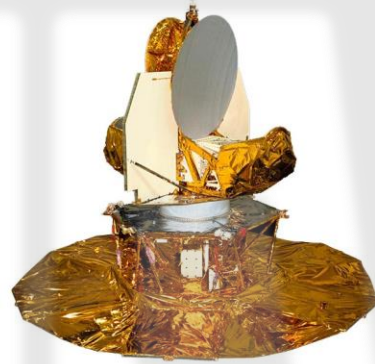
$$\delta T/T \approx 10^{-5}$$



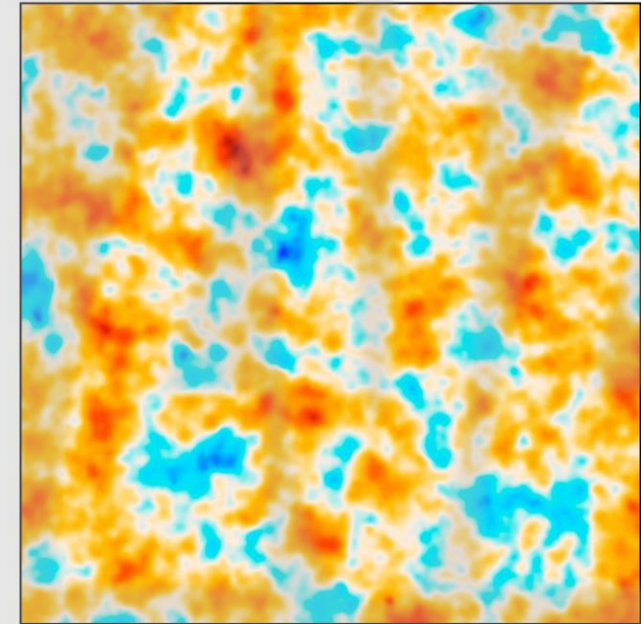
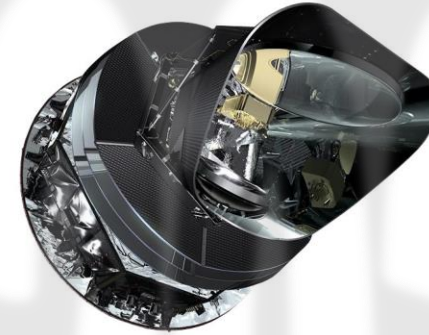
СМВ: спектр неоднородностей



COBE

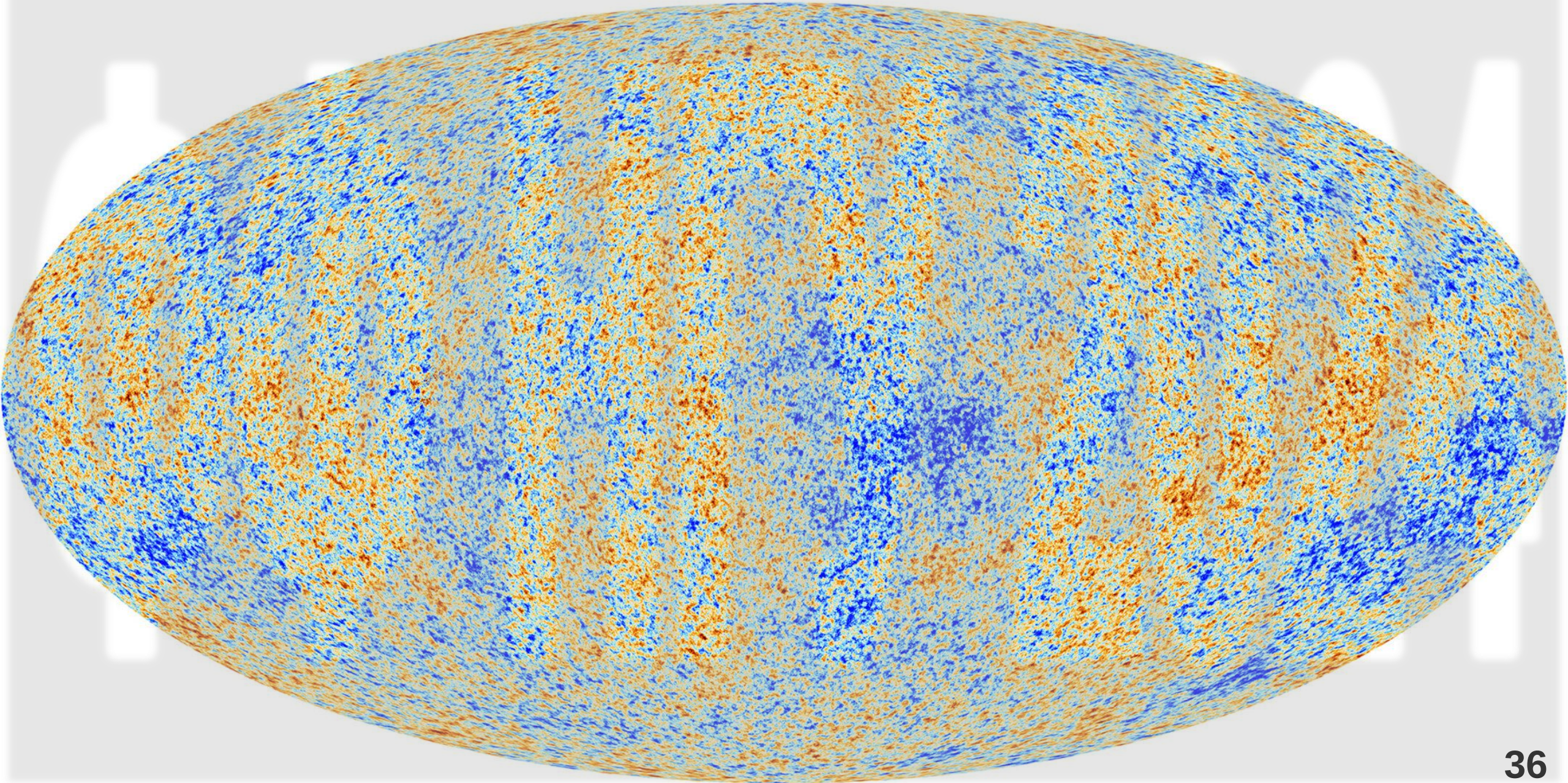


WMAP



Planck

СМВ: спектр неоднородностей



СМВ: спектр неоднородностей

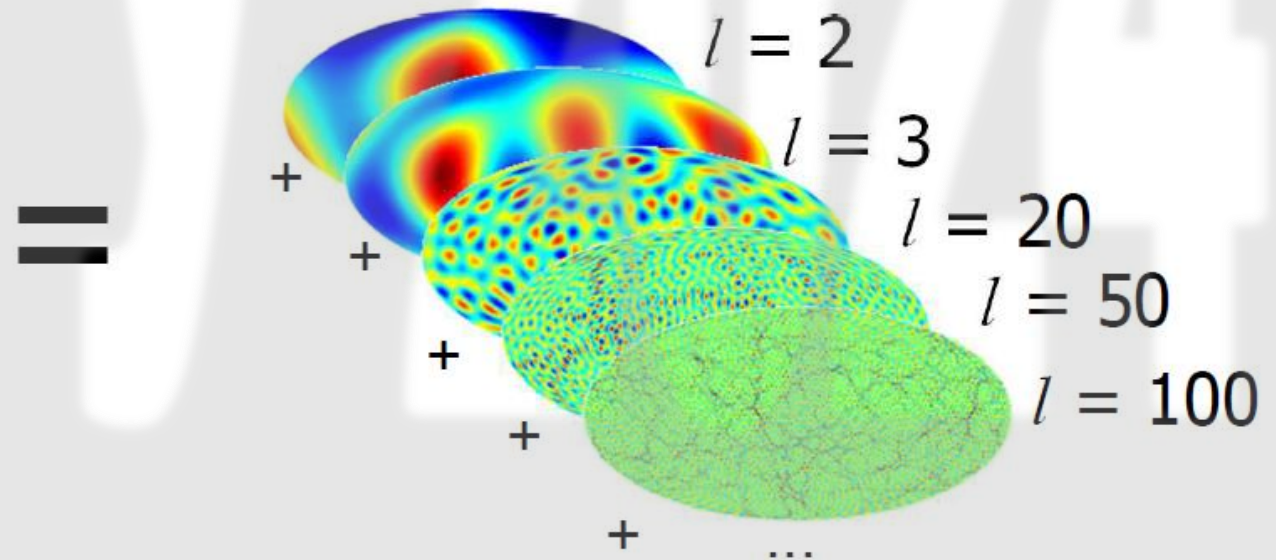
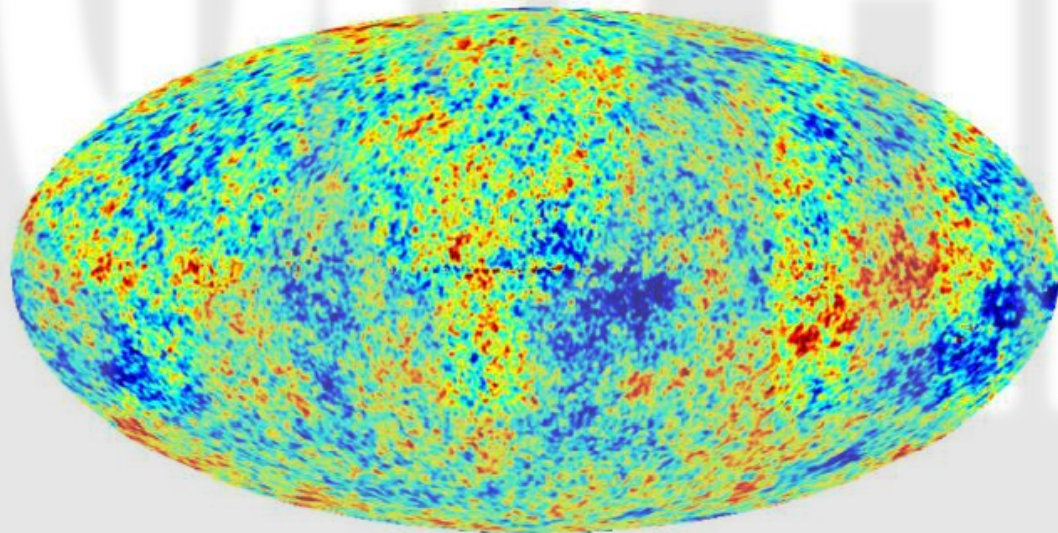
Проводится двумерный Фурье анализ распределения температуры $T(\hat{n})$ СМВ по небесной сфере – разложение по сферическим функциям

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

$$a_{\ell m} = \int_{4\pi} T(\hat{n}) Y_{\ell m}^*(\hat{n}) d\Omega$$

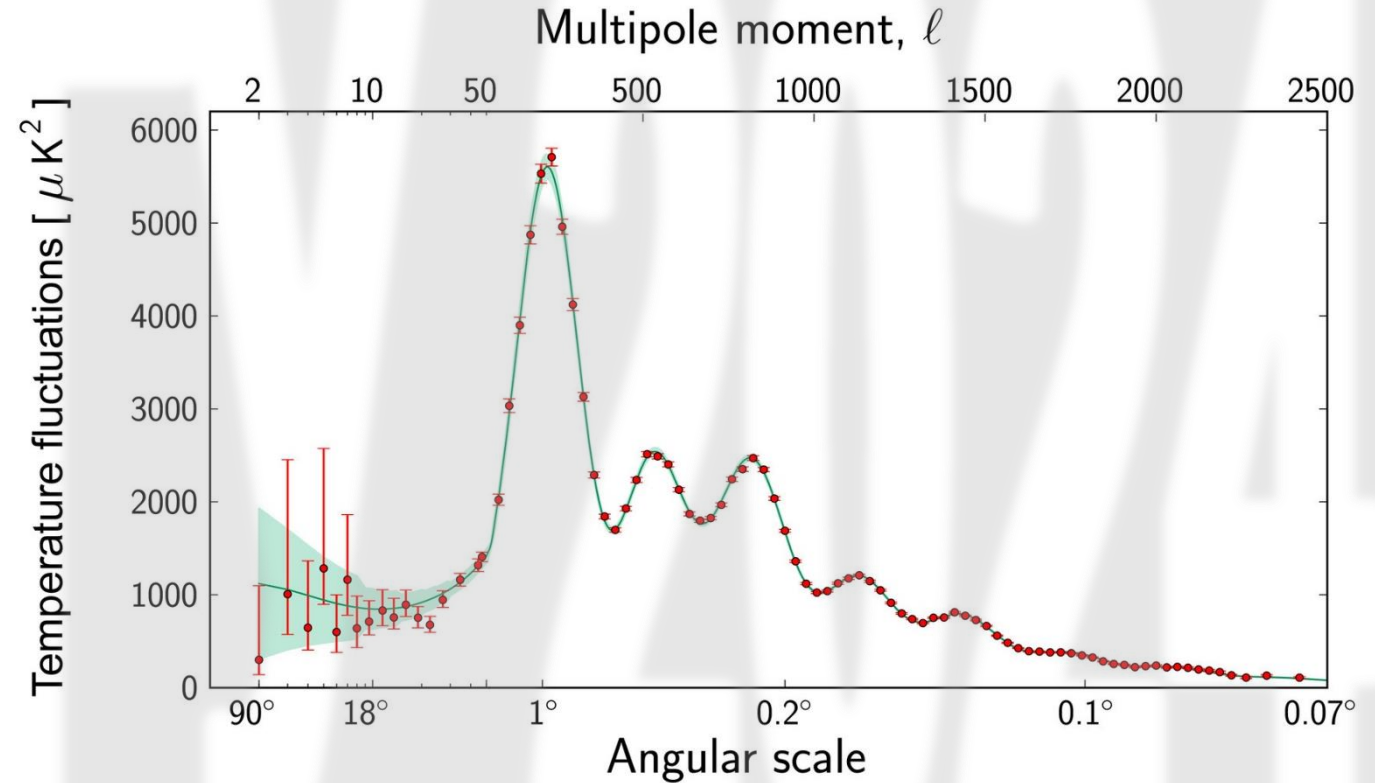
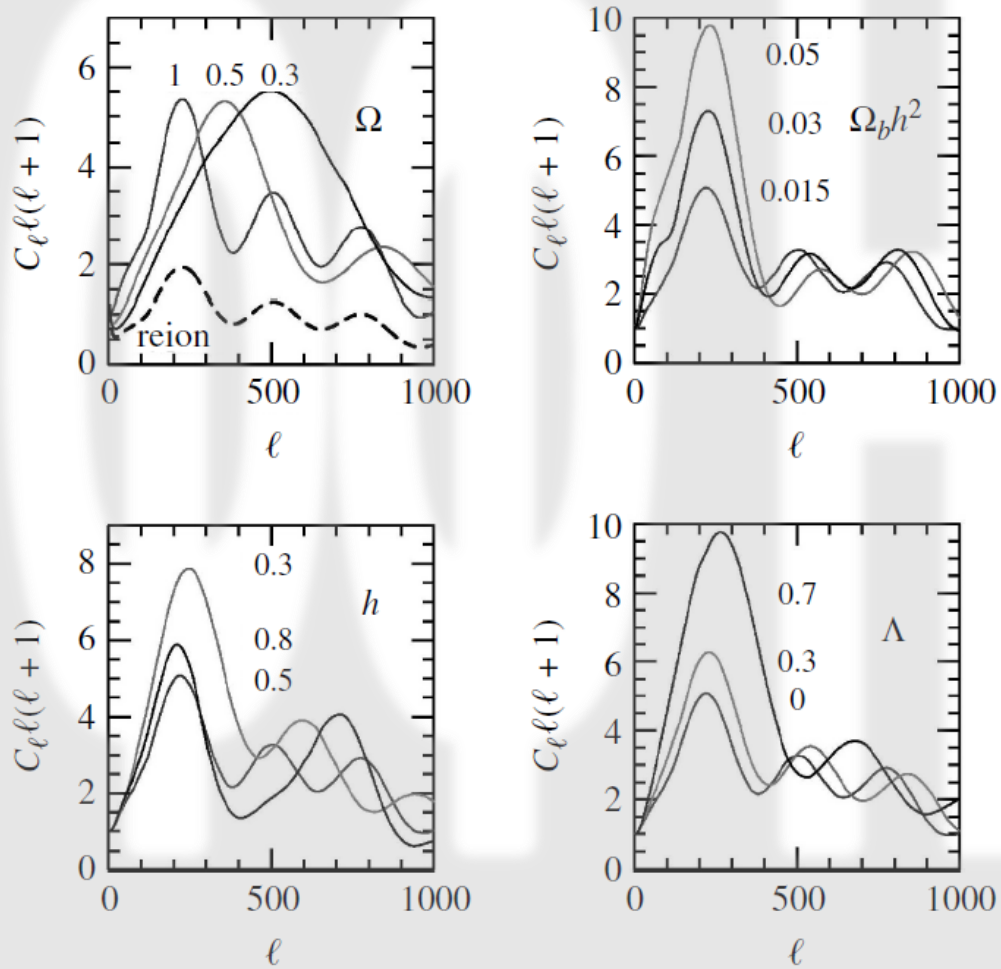
$$\sqrt{\frac{(2\ell+1)(\ell-m)!}{4\pi(\ell+m)!}} P_{\ell m}(\cos\theta) e^{im\phi} = Y_{\ell m}(\theta, \phi)$$

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



СМВ: спектр неоднородностей

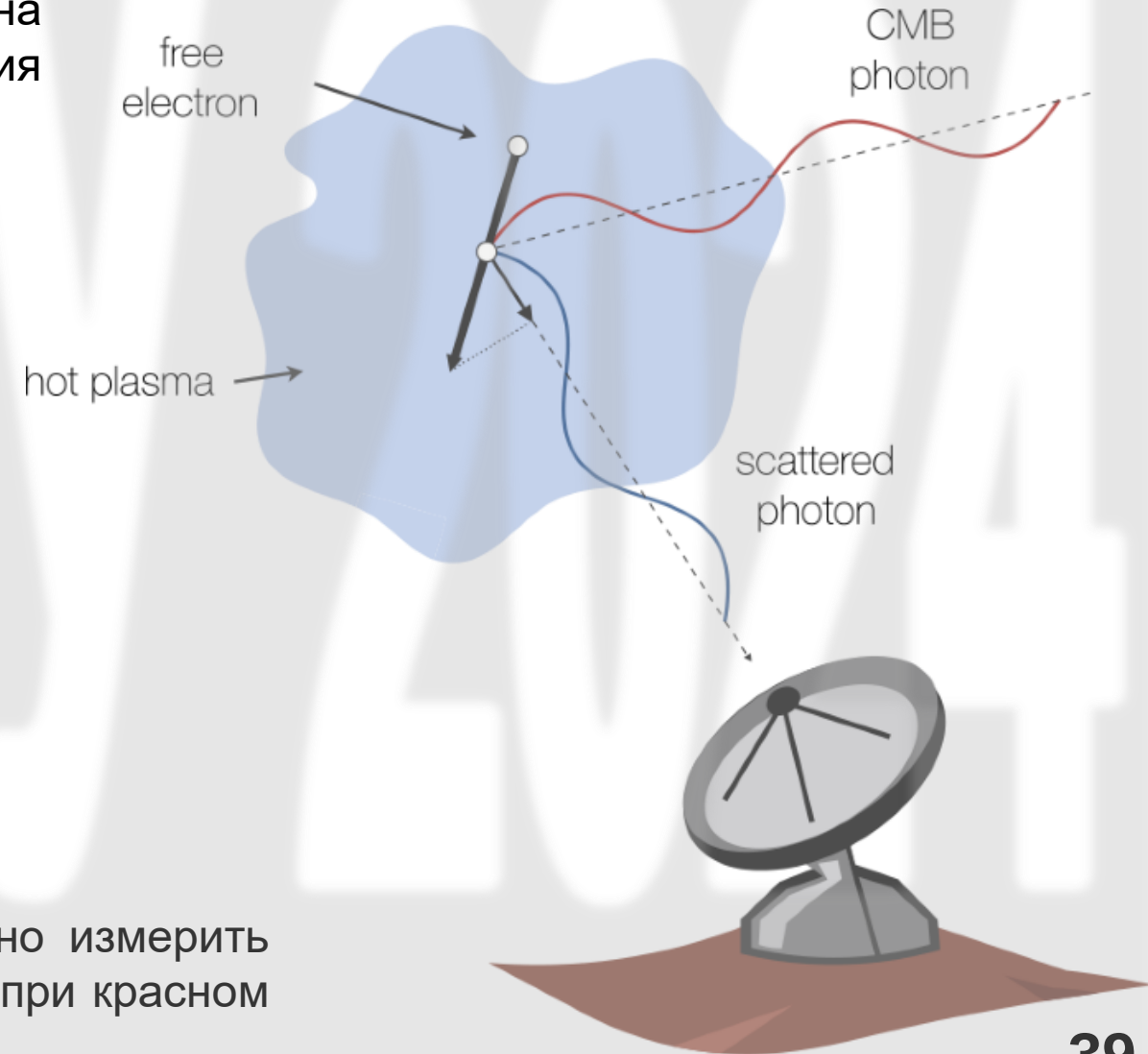
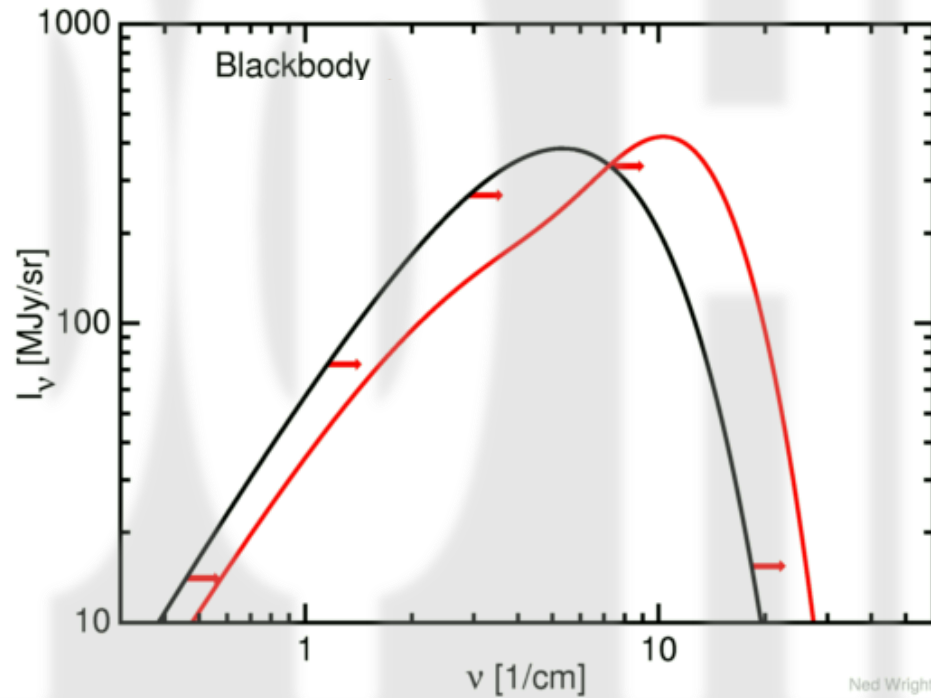
Распределение флуктуаций температуры СМВ содержит огромный объем информации о структуре Вселенной на момент рекомбинации – 380 тыс. лет после Большого Взрыва.



Точки – данные спутника Planck;
Линия – аппроксимация космологической моделью.

Эффект Сюняева-Зельдовича

Скопления галактик окружены гало из горячей ($\sim 10^6 - 10^7$ K) плазмы. Фотоны реликтового излучения (CMB), проходя через скопление, испытывают комптоновское рассеяние на электронах плазмы. При этом средняя энергия (температура) CMB увеличивается.

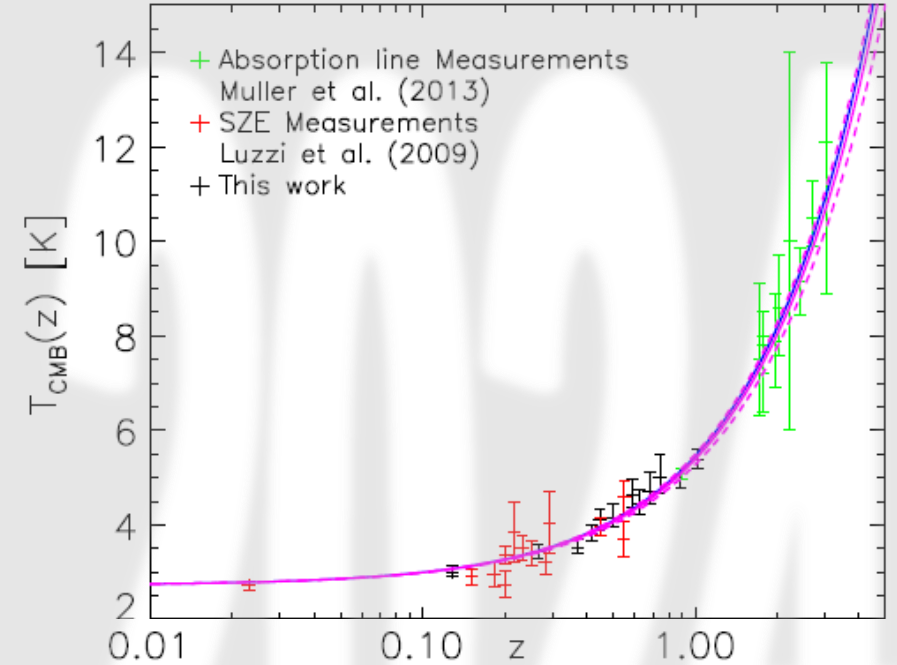


Температуру плазмы и «искаженный» спектр CMB можно измерить независимо => определить начальную температуру CMB при красном смещении скопления.

Эффект Сюняева-Зельдовича

На South Pole Telescope авторы исследовали
158 скоплений галактик при $z = 0.05 \dots 1.35$

arXiv:1312.2462



Проверялась зависимость температуры CMB
от красного смещения:

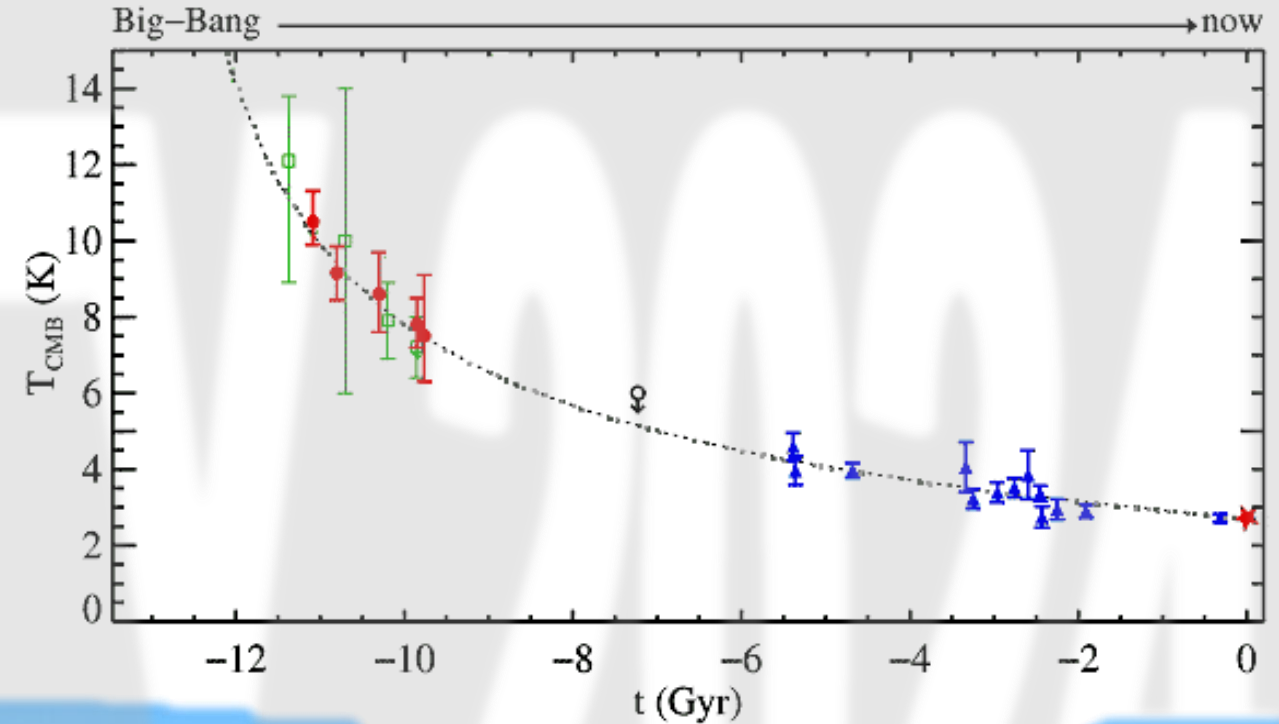
$$T(z) = T_0(1 + z)^\alpha$$

Из измерений получено, что:

$$\alpha = 0.983 \pm 0.029$$

Эффект Суняева-Зельдовича

На South Pole Telescope авторы исследовали 158 скоплений галактик при $z = 0.05 \dots 1.35$



Проверялась зависимость температуры CMB от красного смещения:

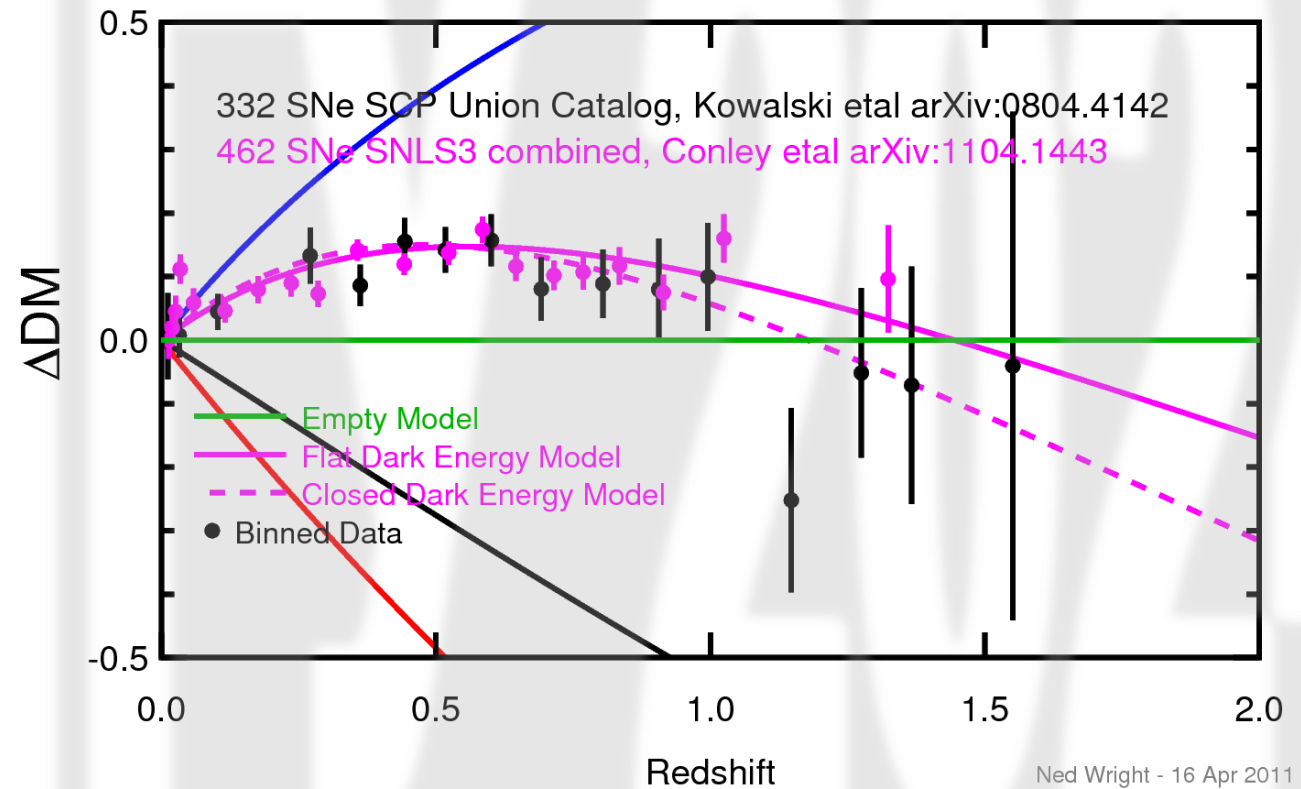
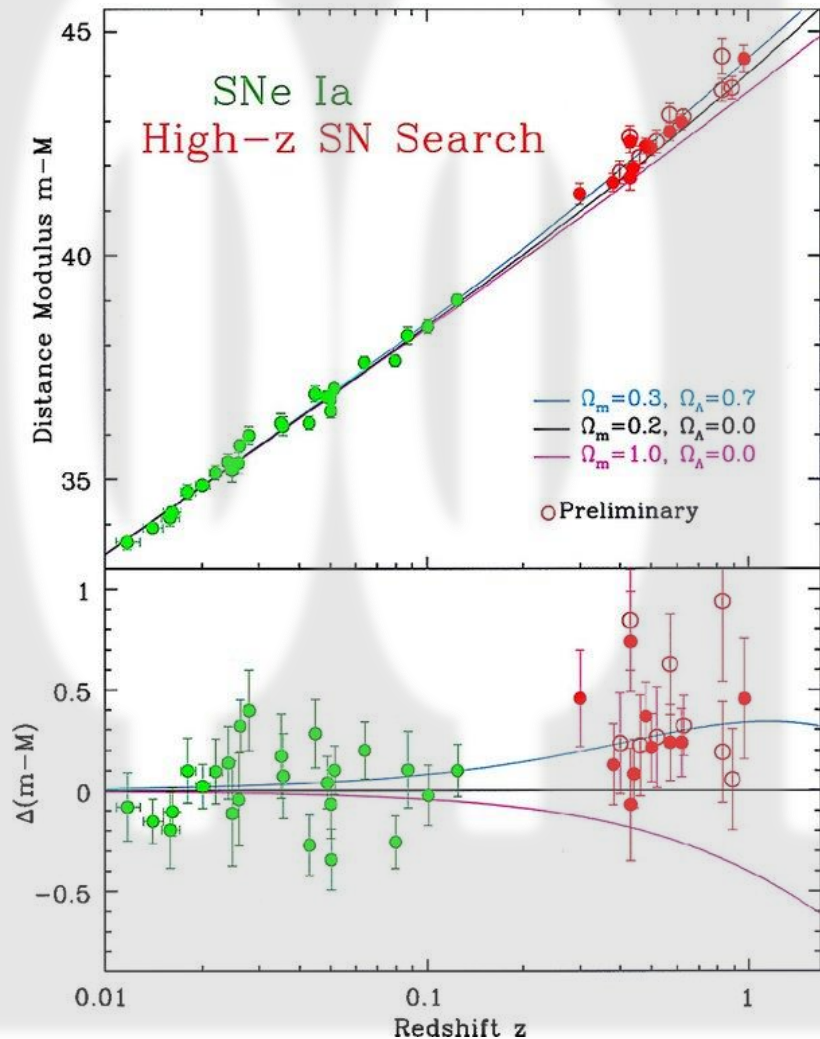
$$T(z) = T_0(1+z)^\alpha$$

Из измерений получено, что:

$$\alpha = 0.983 \pm 0.029$$

Расширение ускоряется!?

В 1990-ые две группы астрофизиков – The Supernova Cosmology Project (Коул Перлмутер) и High-Z Supernova Search Team (Брайан Шмидт) независимо изучали эволюцию расширения Вселенной с использованием вспышек сверхновых типа Ia на больших красных смещениях ($z \sim 1$).



Новые данные, полученные для $z > 1$ подтверждают первоначальные выводы!

Расширение ускоряется!



© The Nobel Foundation. Photo:
U. Montan

Saul Perlmutter

Prize share: 1/2



© The Nobel Foundation. Photo:
U. Montan

Brian P. Schmidt

Prize share: 1/4



© The Nobel Foundation. Photo:
U. Montan

Adam G. Riess

Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2011

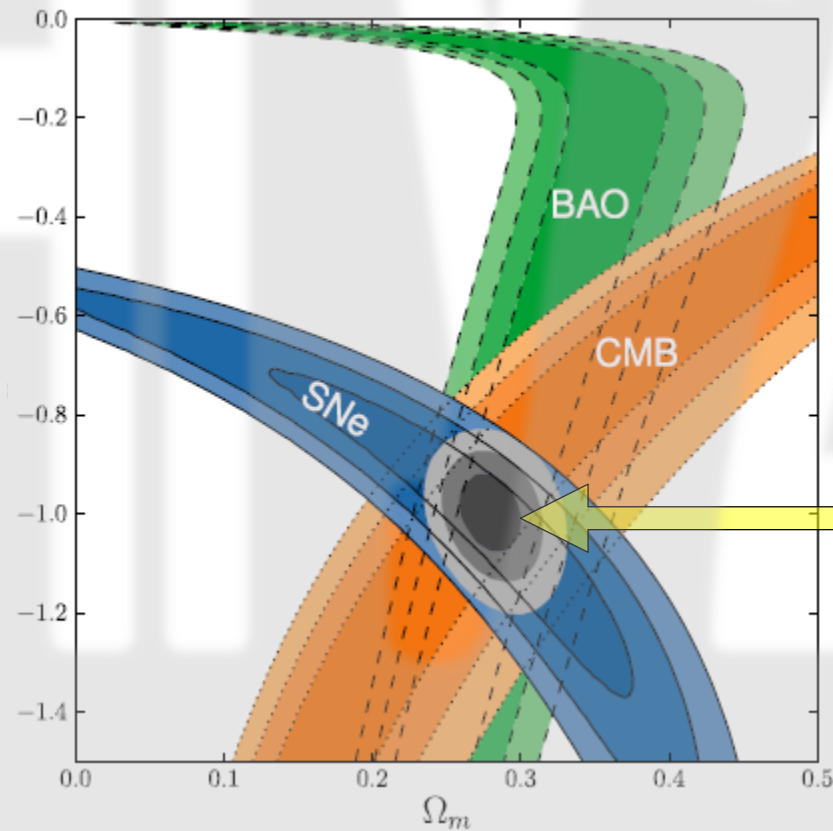
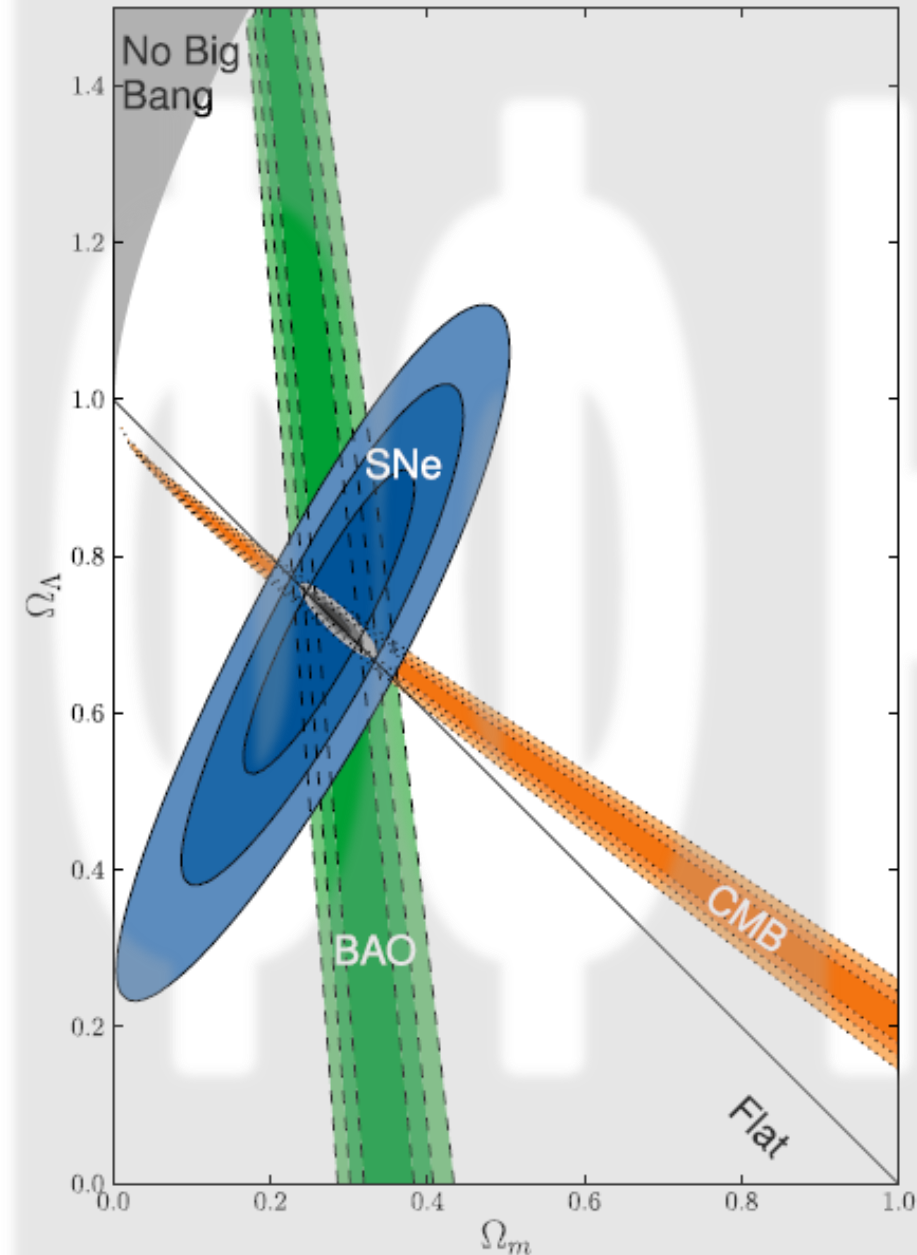


"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"

CMB vs SN Ia

Результаты измерения параметров из анализа CMB согласуются с результатами независимых исследований сверхновых типа Ia.

Ускорение расширения (т.е. наличие темной энергии) можно считать надежно установленным фактом.



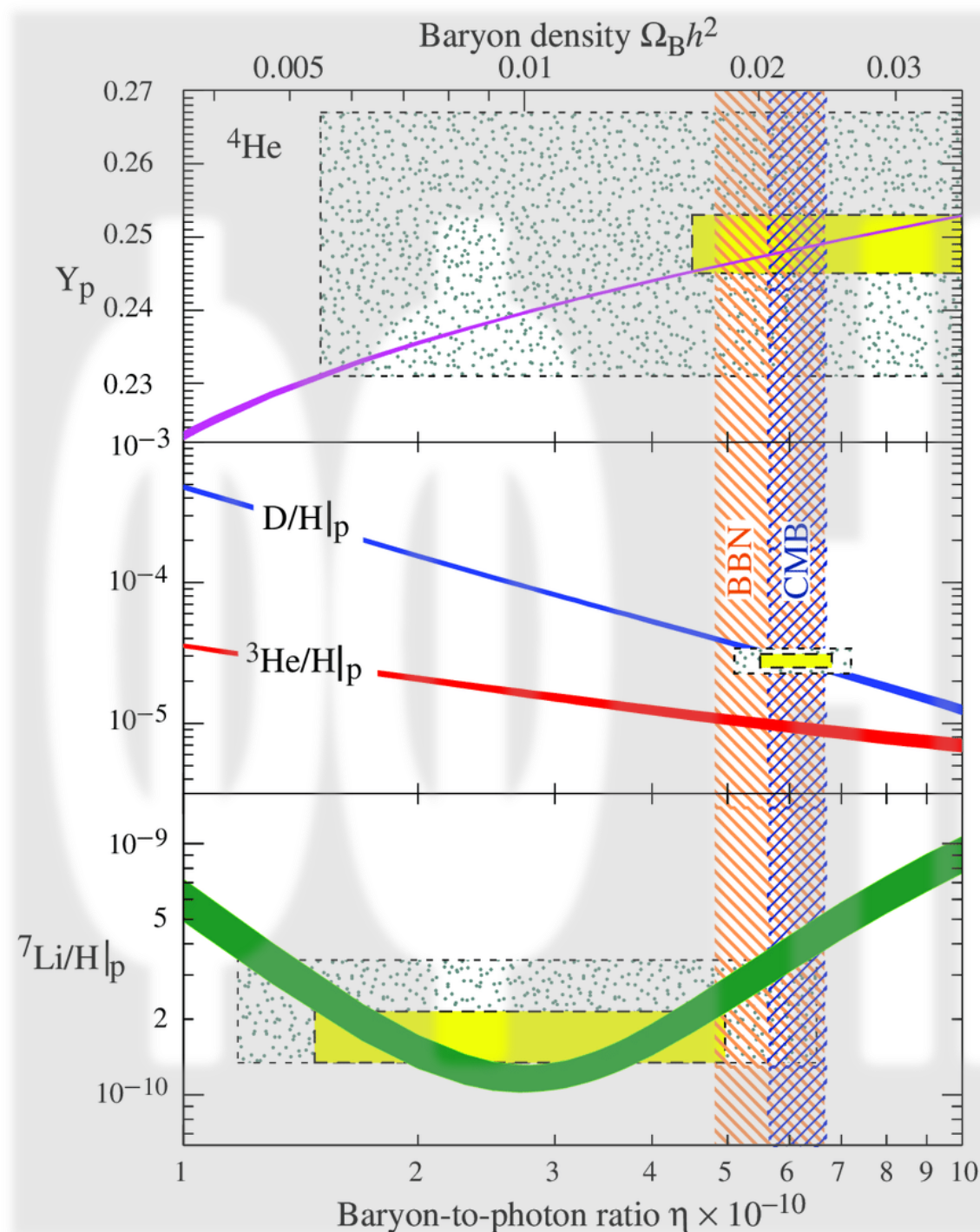
Уравнение состояния для темной энергии (т.е. связь $\rho_\Lambda = w\rho$, $w = -1$) также подтверждается из наблюдений.

Бариогенезис

Относительные доли элементов в первичном веществе существенно зависят от полной плотности **барионного** вещества.

Результаты прямых измерений (горизонтальные прямоугольники), расчетов по модели Большого взрыва (BBN) и из анализа микроволнового излучения (CMB) согласуются в диапазоне 10 порядков величины!.

По совокупности всех этих данных, доля барионной материи в средней плотности энергии Вселенной составляет лишь около 4.5%.



Наша Вселенная

За последние ~30 лет космология из «игр чистого разума» превратилась в область астрофизики, где точность ИЗМЕРЕНИЙ превышает многие классические направления астрономии.

Возраст Вселенной:

$$t_0 = 13.787 \pm 0.020 \text{ Глет}$$

Состав Вселенной:

барионная материя

$$\left. \begin{array}{l} \Omega_{b,0} = 0.049 \\ \Omega_{d,0} = 0.262 \end{array} \right\} \Omega_{m,0} = 0.311 \pm 0.006$$

темная материя

темная энергия

$$\Omega_{\Lambda,0} = 0.689 \pm 0.006$$

«излучение»

$$\Omega_{r,0} = 8.3 \times 10^{-5}$$

Текущая температура Вселенной:

$$T_0 = 2.72548 \pm 0.00057 \text{ К}$$

Текущая скорость расширения Вселенной*:

$$H_0 = 74.03 \pm 1.42 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$$

Напряженность Хаббла



Темная энергия

Природа темной энергии в настоящее время не известна. Одним из возможных способов ее описания является добавление дополнительного слагаемого Λ (параметр Λ) в уравнения ОТО.

Этот параметр никак не фиксируется «из общих соображений», и изначально был выбран Эйнштейном равным нулю.

После решений динамической Вселенной, полученных Фридманом, Эйнштейн снова добавил этот параметр, считая, что Вселенная «должна» быть стационарной. После работ Хаббла, Эйнштейн «покаялся», снова вычеркнул это слагаемое, и назвал это «своей величайшей ошибкой».

После обнаружения ускоренного расширения, мы снова вернули параметр Λ в уравнения ОТО, хоть и не понимаем, что он означает. Но это работает... по крайней мере пока.

Новые знания, новые вопросы...

Используя всего несколько параметров, космологическая модель Λ CDM (Λ + Cold Dark Matter) описывает **ОГРОМНОЕ** число наблюдаемых фактов. По всей видимости, в своей основе, мы правильно понимаем главные этапы эволюции Вселенной, по крайней мере с некоторого момента.

Однако новые знания рождают новые вопросы:

Что делать с сингулярностью при $t = 0$?

Почему температура CMB для причинно не связанных областей пространства одинакова с такой высокой точностью?

Почему геометрия Вселенной с высокой точностью плоская?

Какова природа темного вещества?

Какова природа темной энергии?

Почему вещества во Вселенной оказалось больше, чем антивещества?

...

По крайней мере некоторые из этих вопросов находят «естественное объяснение» в модели инфляции.

