

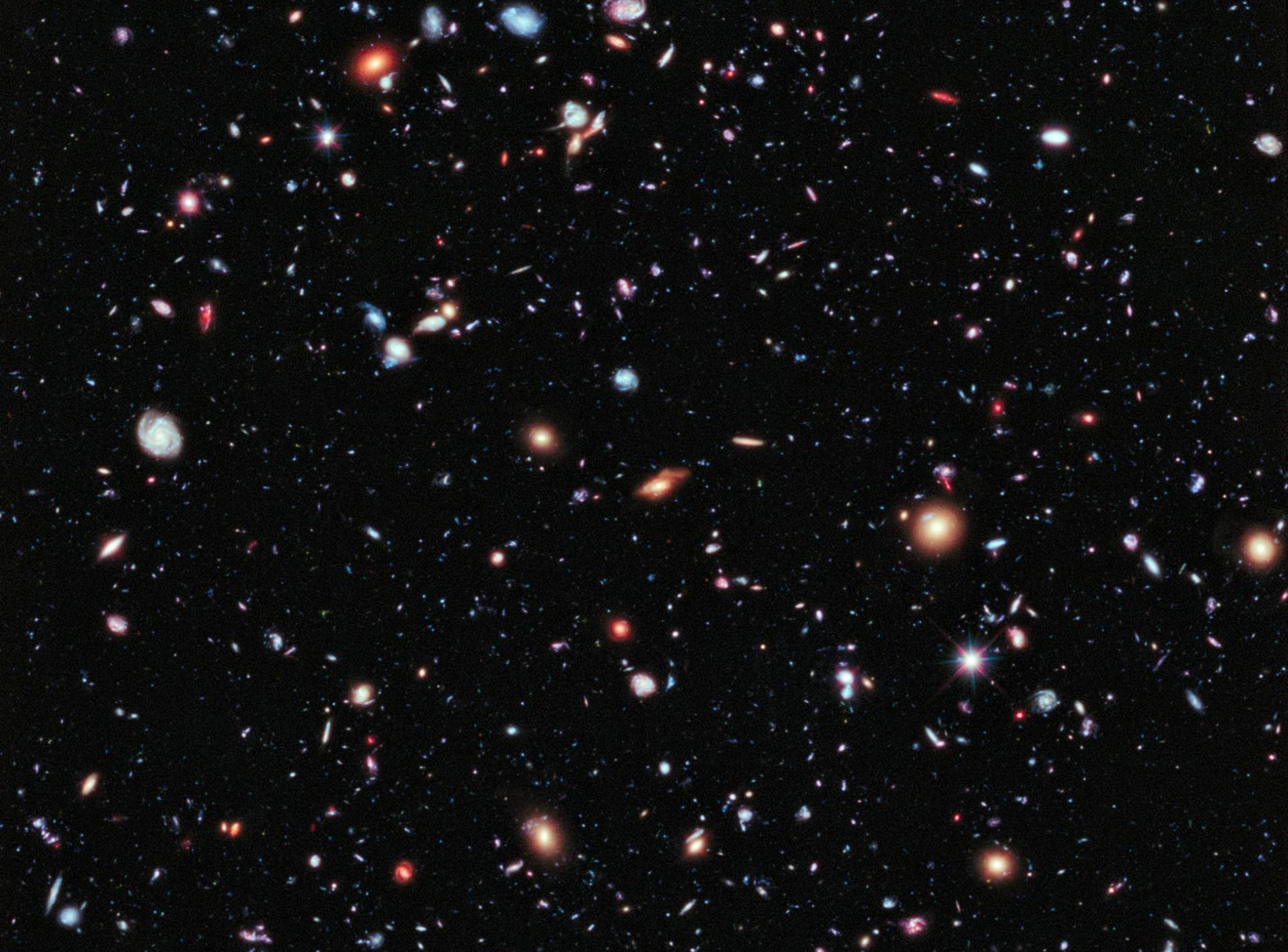
Космология - 1



Hubble Ultra Deep Field



Созвездие Печь
Наблюдения 2003-2004



Формирование галактик



Мы видим, что далекие галактики только формируются.
Они не похожи на симметричные галактики вокруг нас.

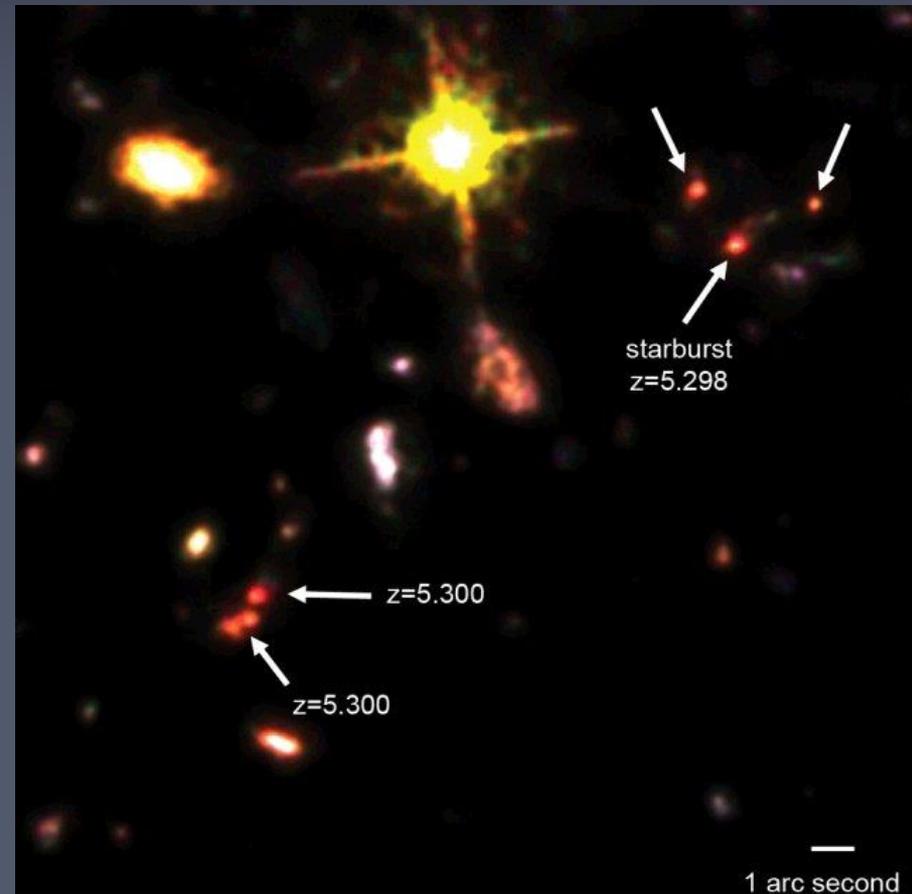
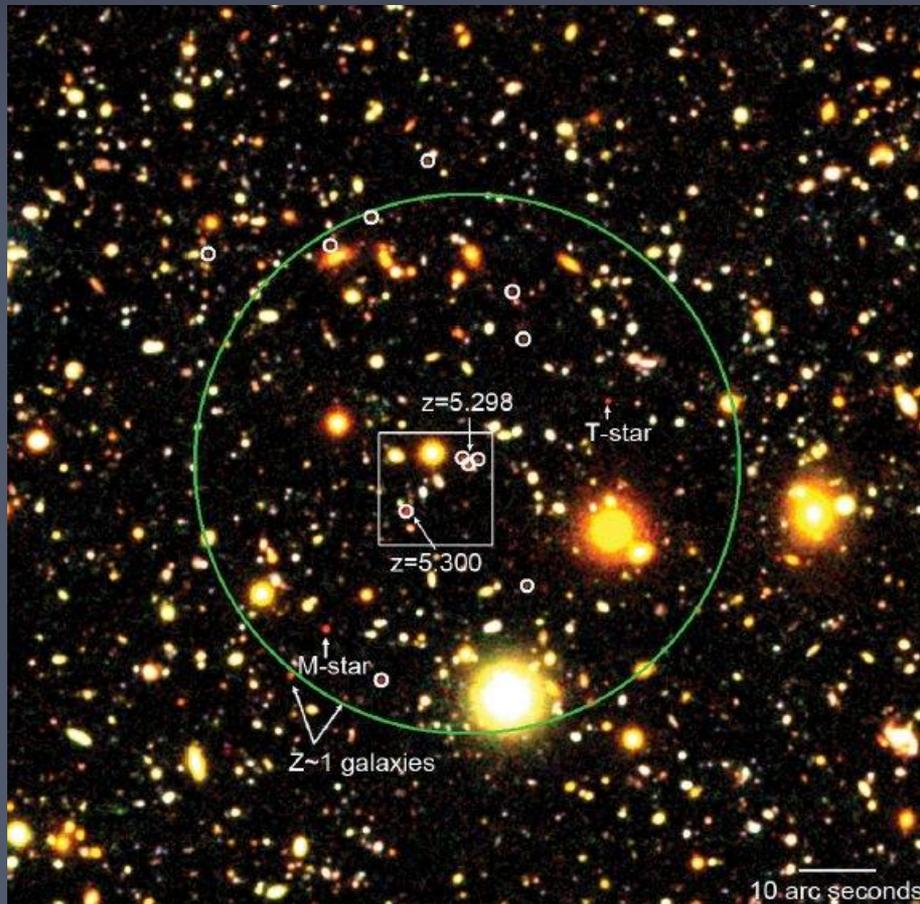
Формирование скоплений



Мы видим, что скопления возникают постепенно.

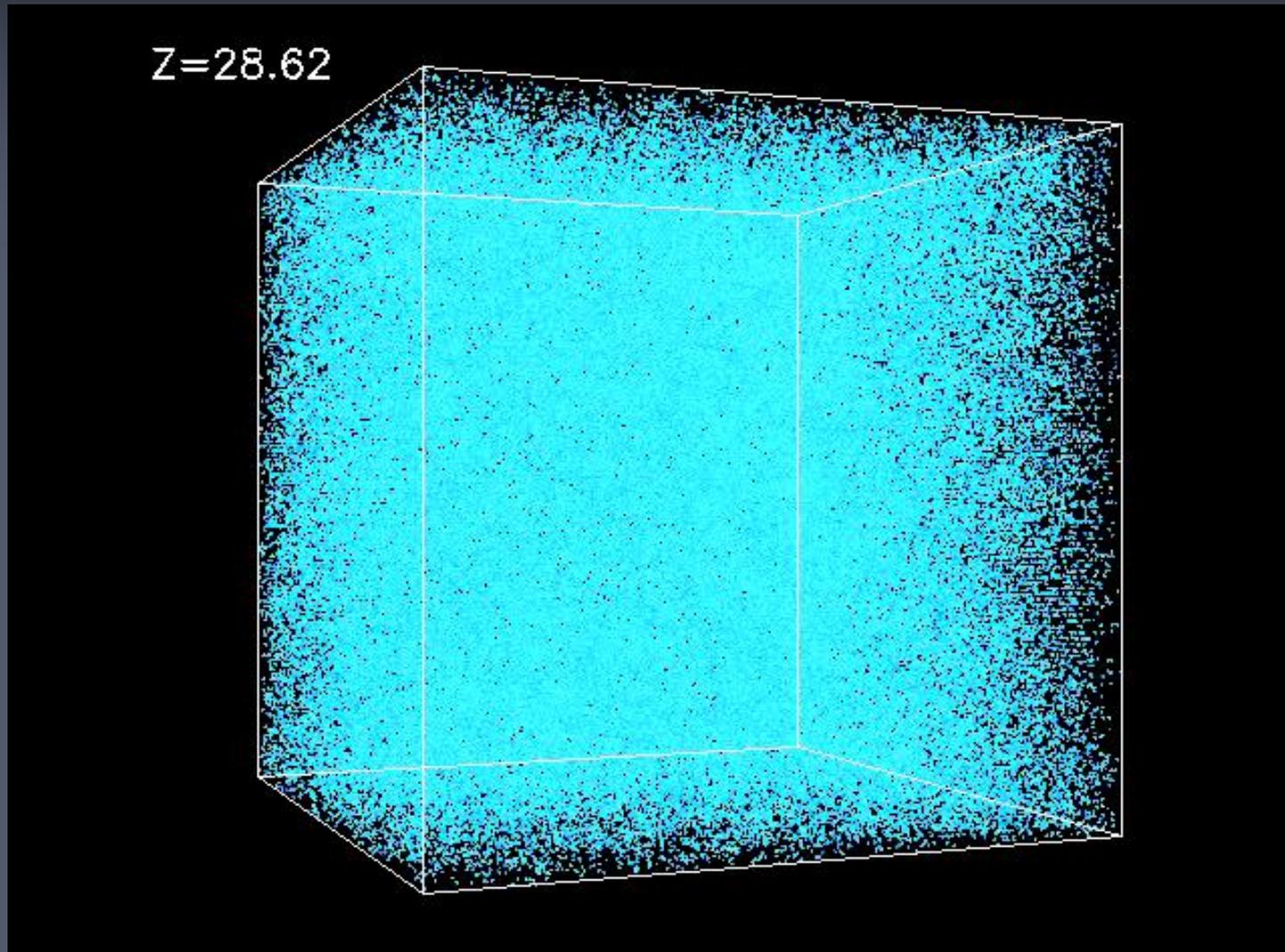
На больших расстояниях скопления еще не успели сформироваться.

Дальнее протоскопление галактик



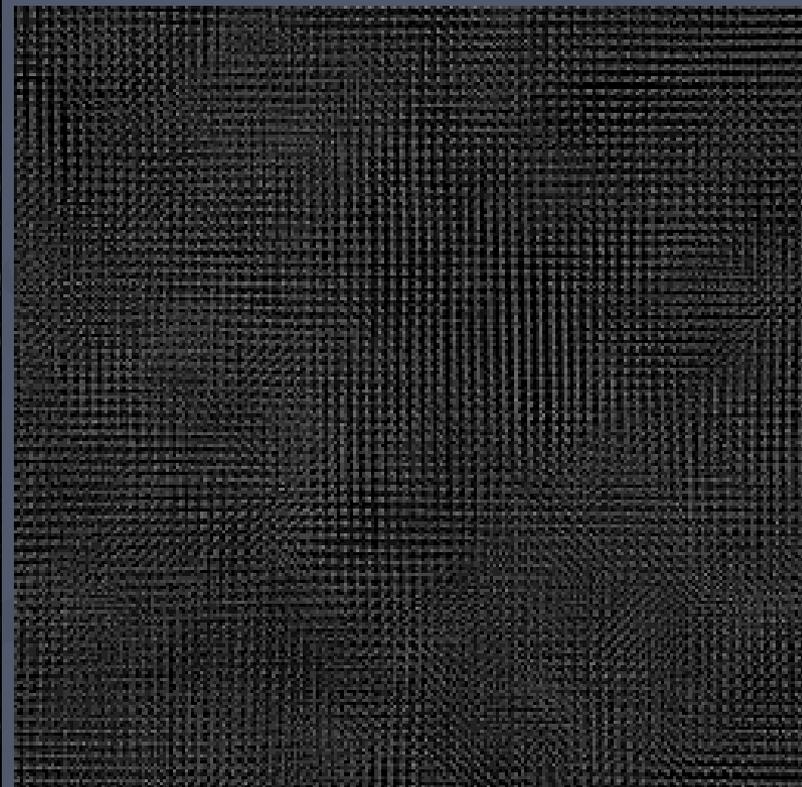
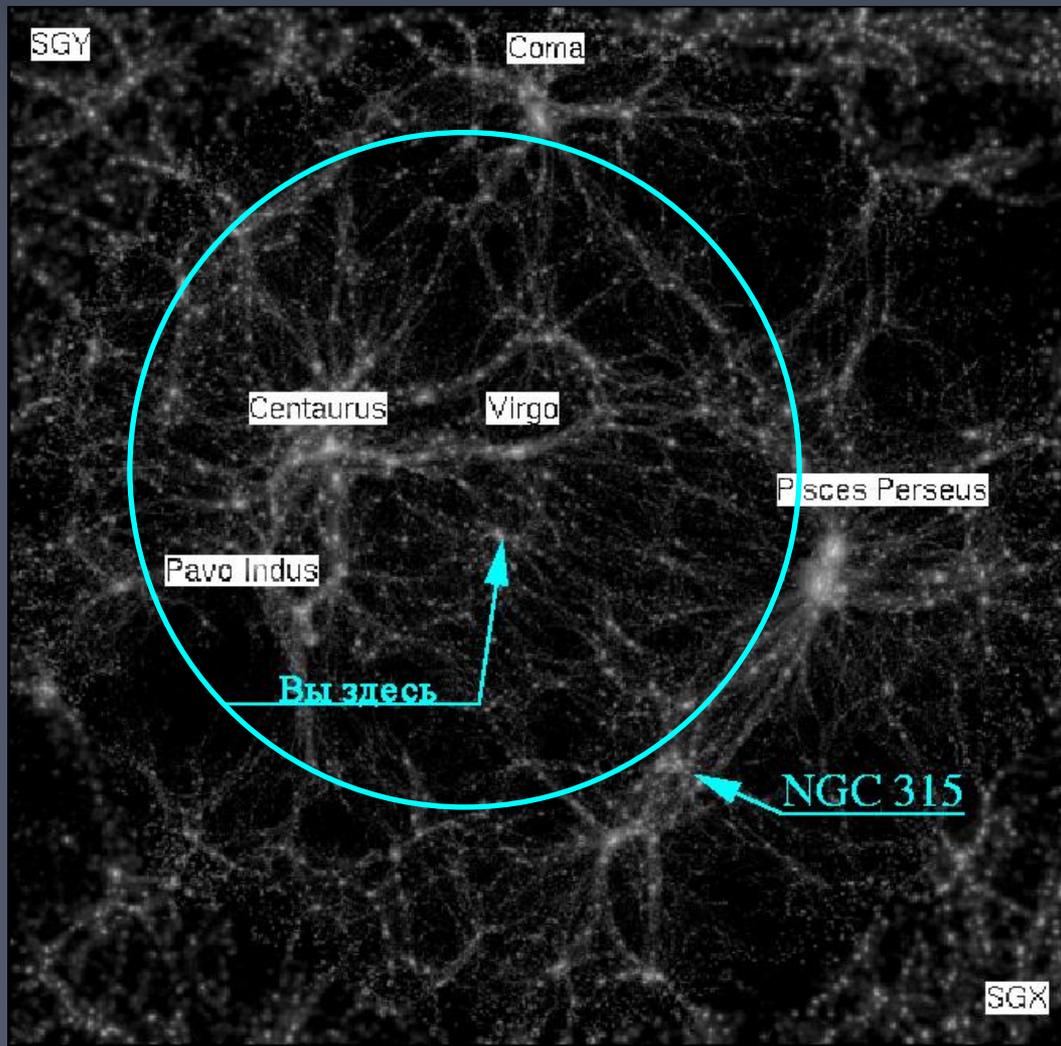
$Z=5.3$

Формирование структуры



А. Кравцов и др.

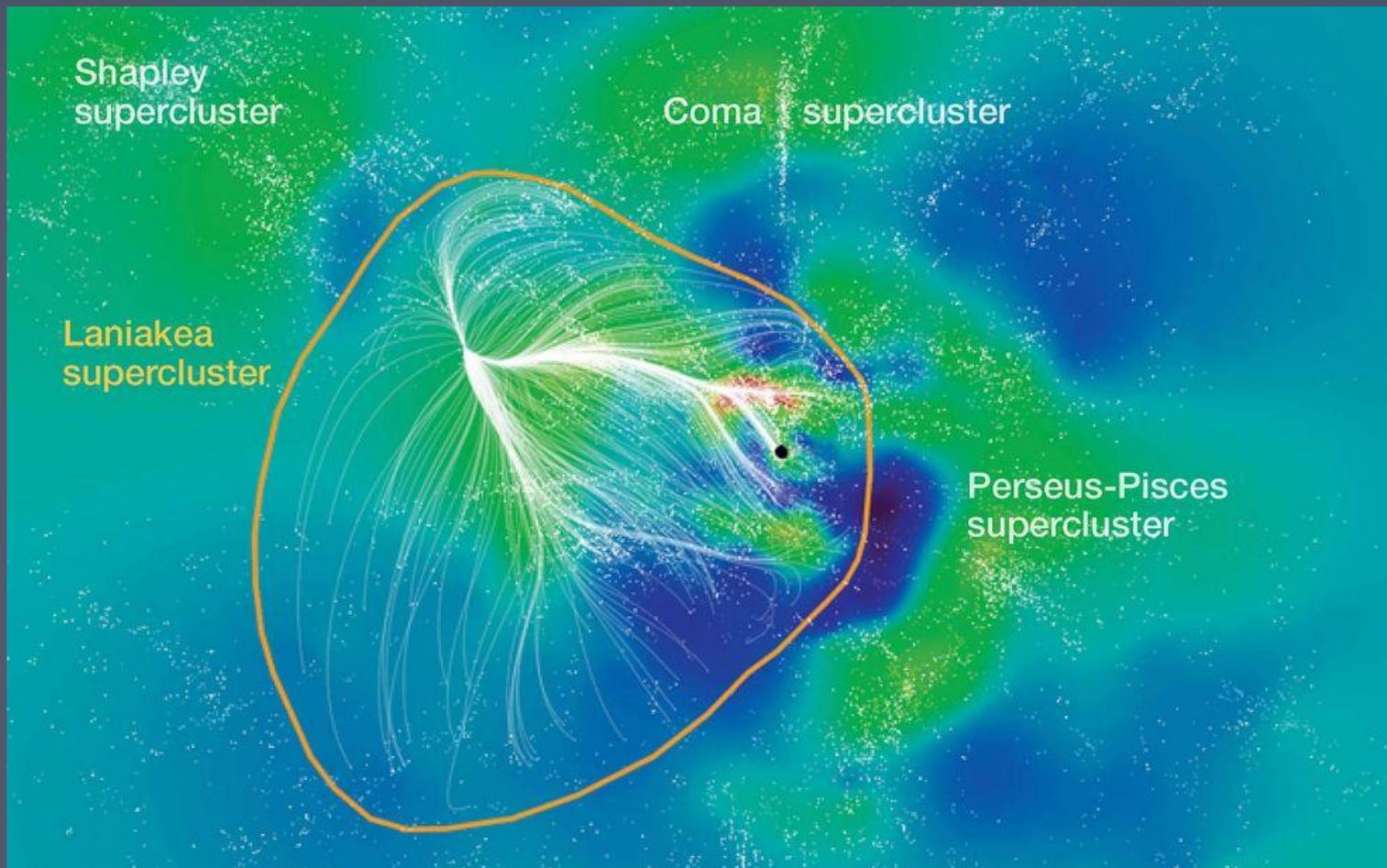
Наши «большие окрестности»



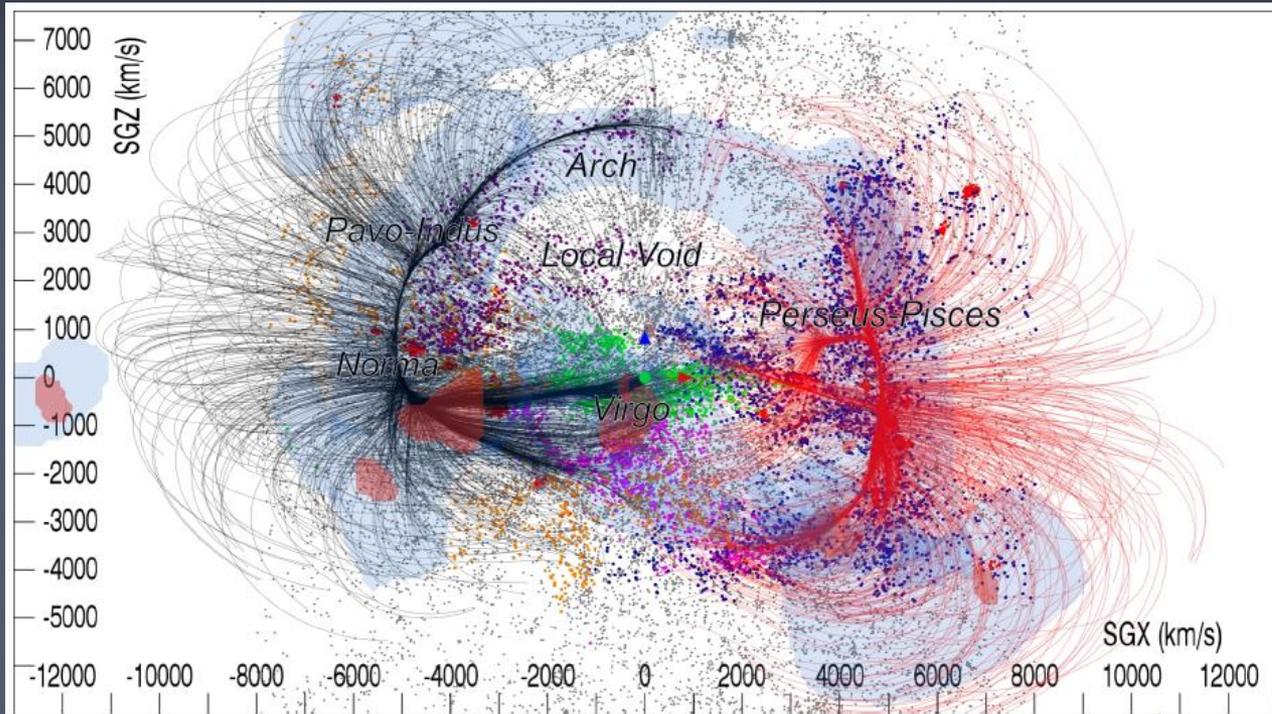
Ланиакеа

~100000 крупных галактик.

Полмиллиарда световых лет в поперечнике.

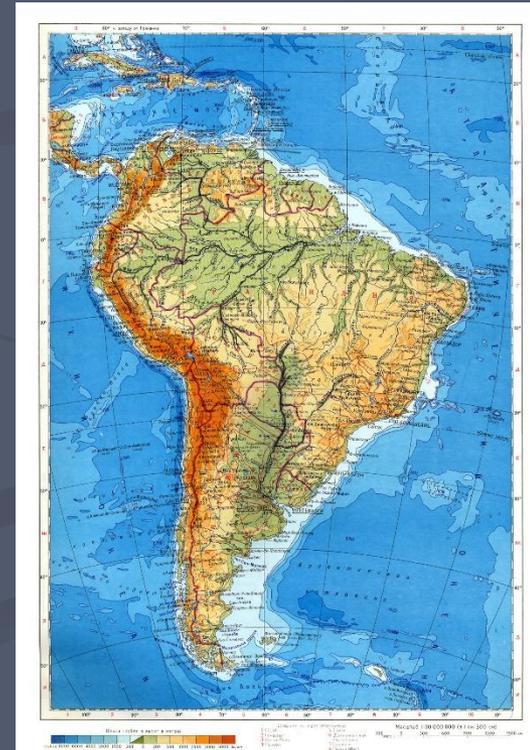


Структура потоков внутри 80 Мпк

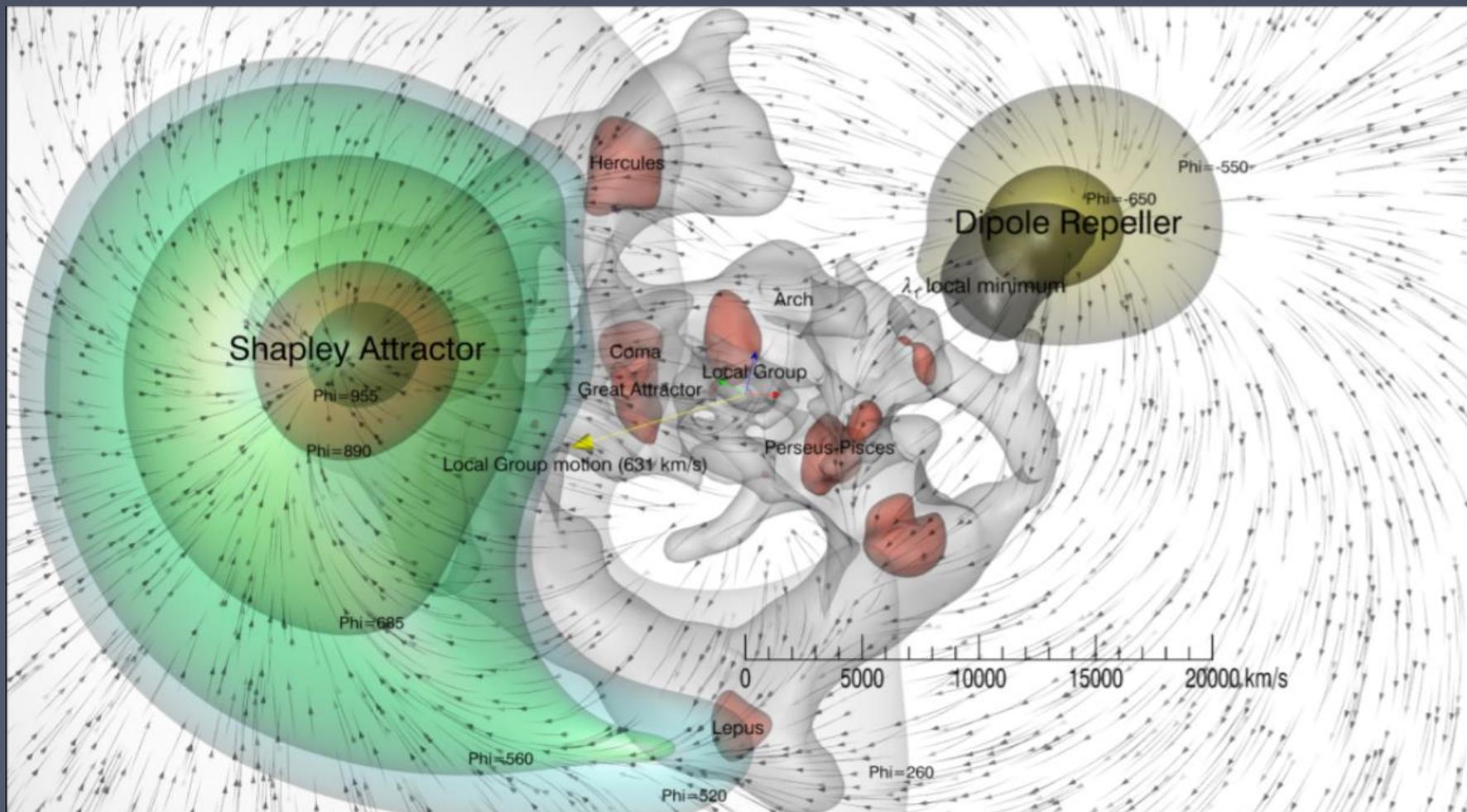


1409.0880

Теперь мы знаем, как образуется «наше»
сверхскопление галактик.



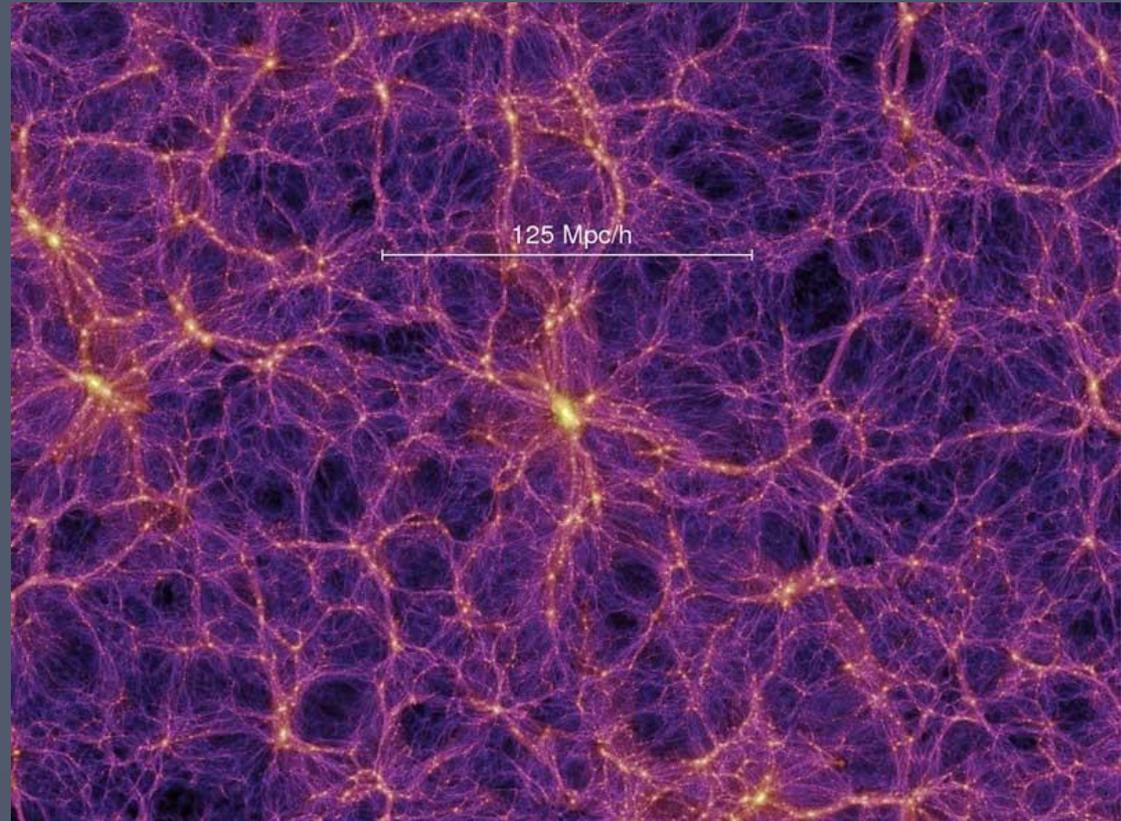
«ДИПОЛЬНЫЙ ОТТАКИВАТЕЛЬ»



Скелет вселенной

Крупномасштабная структура формируется в основном темным веществом. Но видим мы галактики, их скопления, горячий газ – т.е., обычное вещество.

Как увидеть сам скелет вселенной?

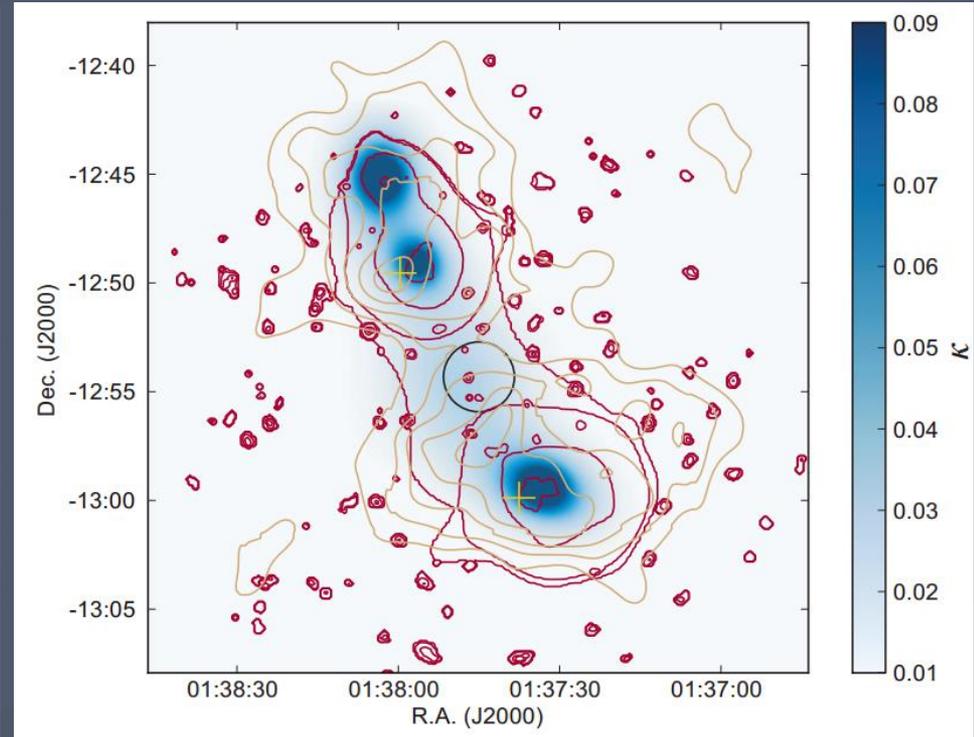
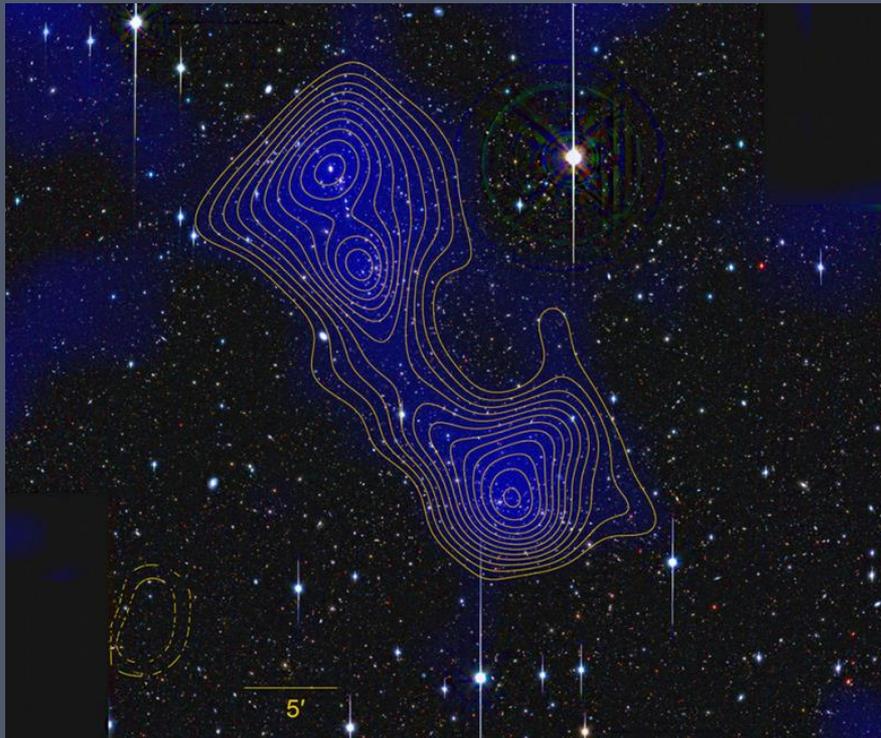


Волокно темного вещества

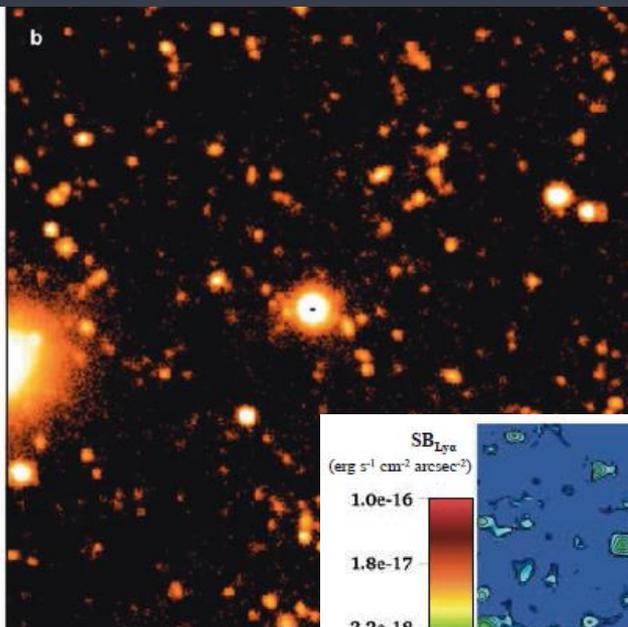
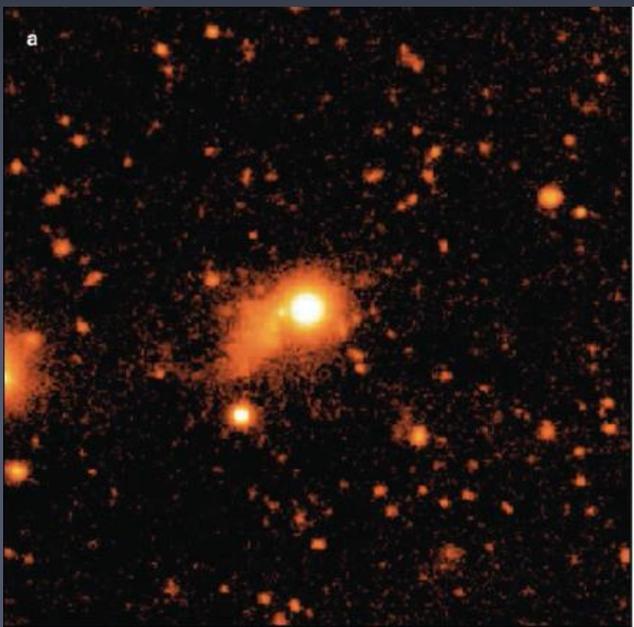
Скопления A222/223. $z \sim 0.2$ Между скоплениями 18 Мпк.

Распределение массы восстанавливается по линзированию.

Массы газа не хватит для объяснения массы волокна.

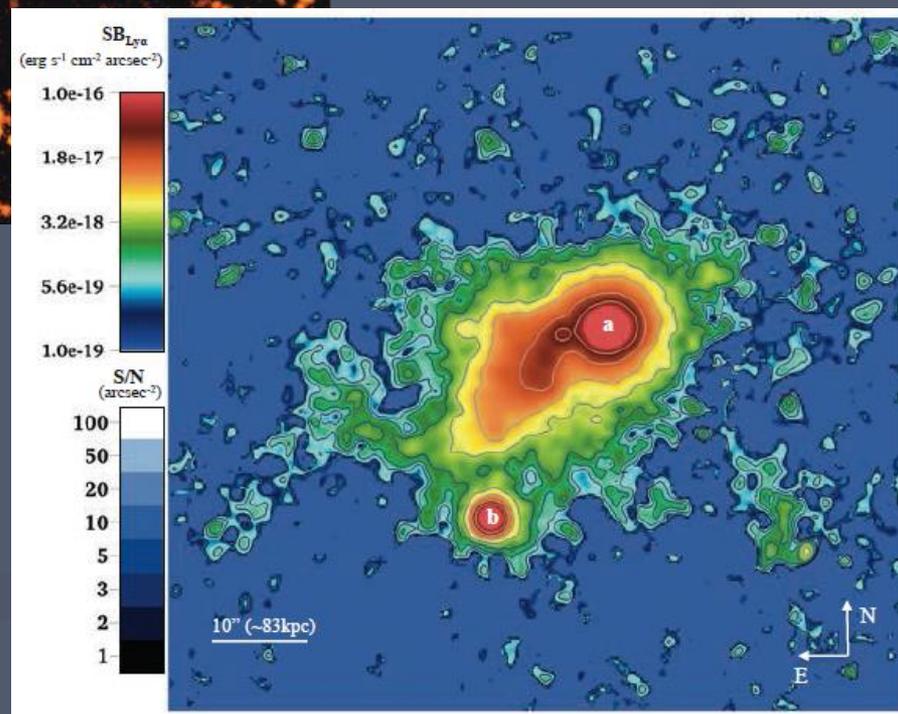


Волокно космической сети

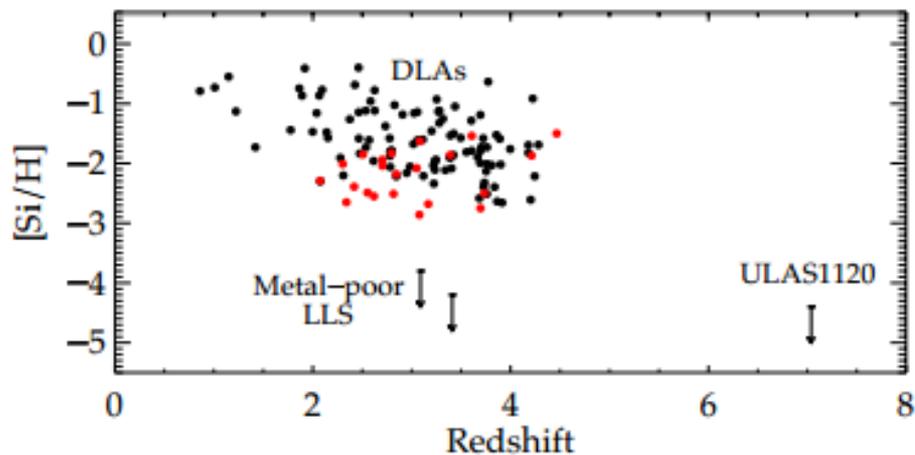
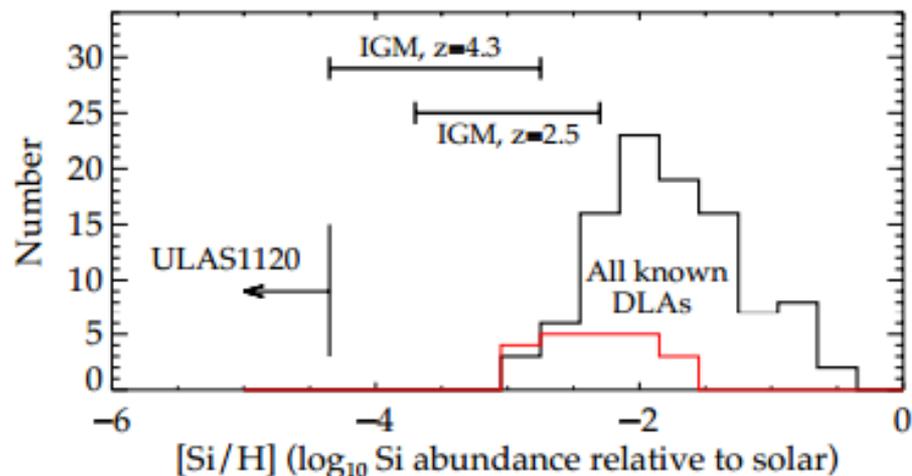


1401.4469

Около квазара на $z \sim 2.3$
в линии лайман-альфа
обнаружено газовое волокно
протяженностью более млн. св. лет



Очень малометаллический газ на $z=7$



772 млн лет после Большого Взрыва.

Т.о., мы видим, что меняется химический состав вселенной.

В итоге, вся вселенная предстает эволюционирующей

Глядя в прошлое

- По эффекту Сюняева-Зельдовича
- По возбуждению линий

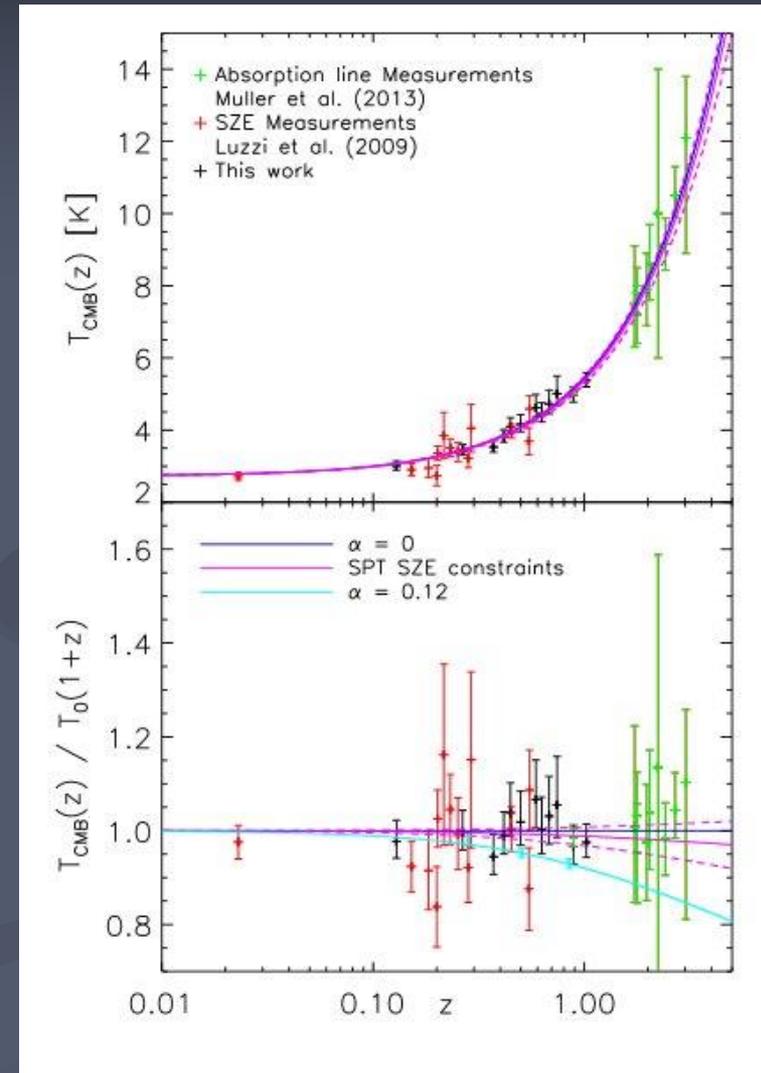
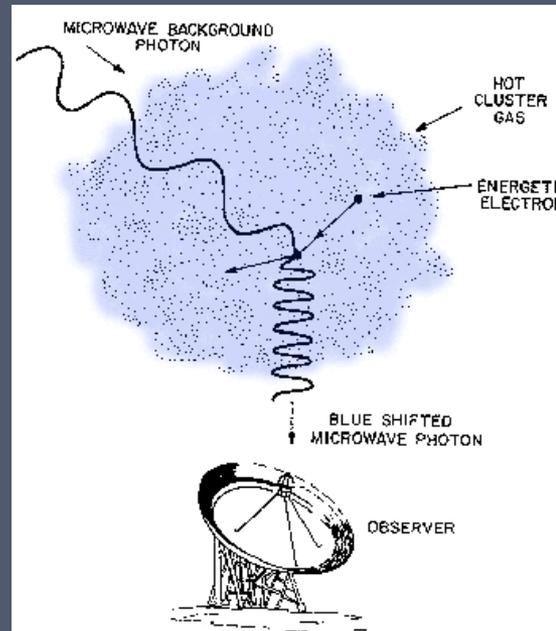


Измерение температуры реликта на разных красных смещениях

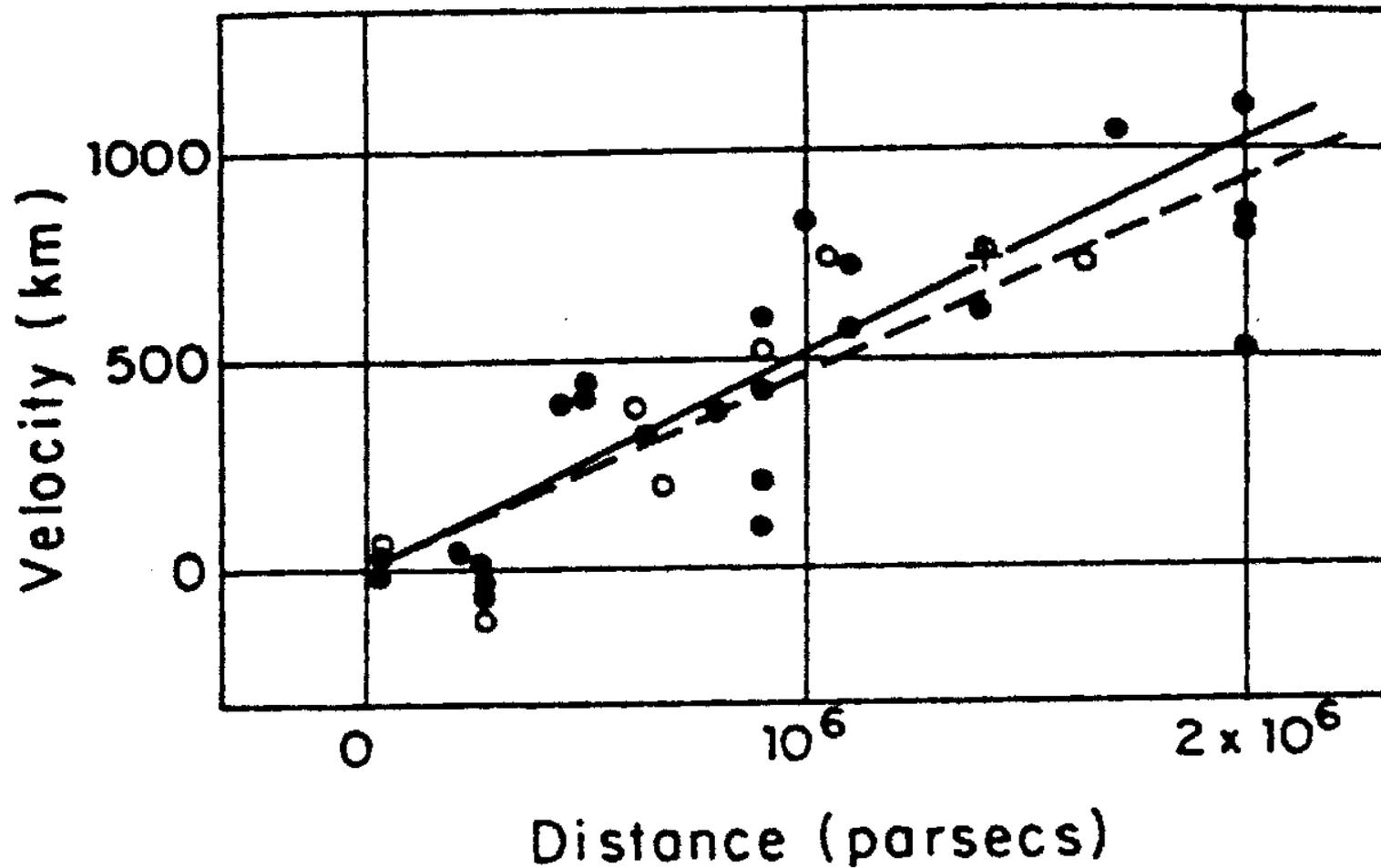
Как остывает реликт?

На South Pole Telescope авторы исследовали 158 скоплений галактик на $z=0.05-1.35$

Благодаря наблюдениям на разных частотах по эффекту Сюняева-Зельдовича удалось определить эволюцию температуры реликтового излучения.

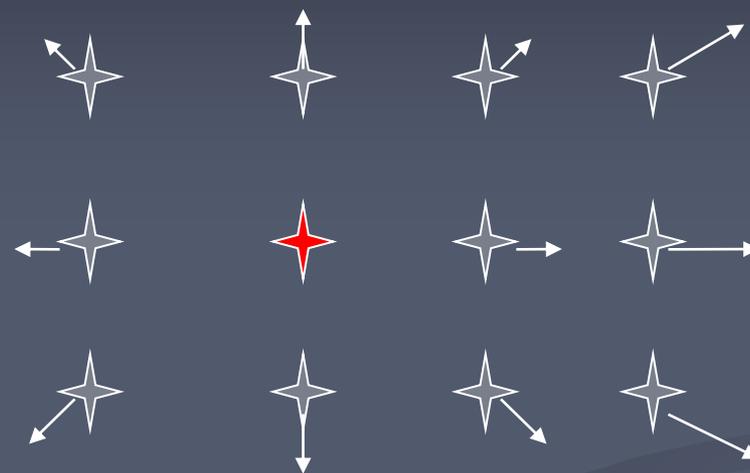


Расширение вселенной

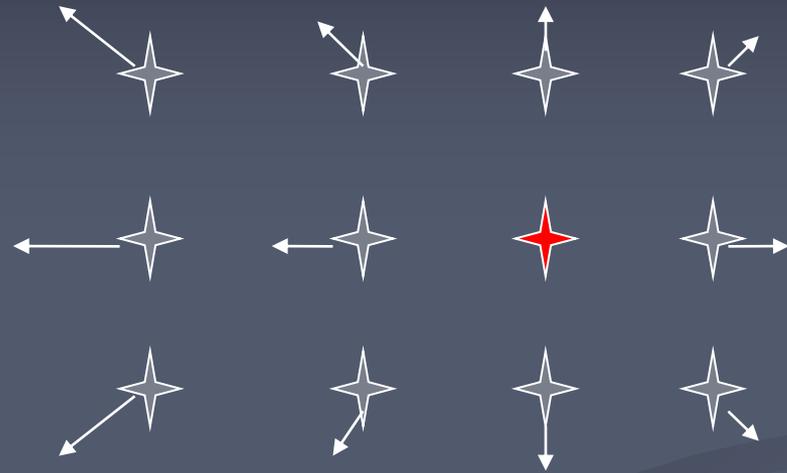


Хаббл 1929 г.

Как это работает?



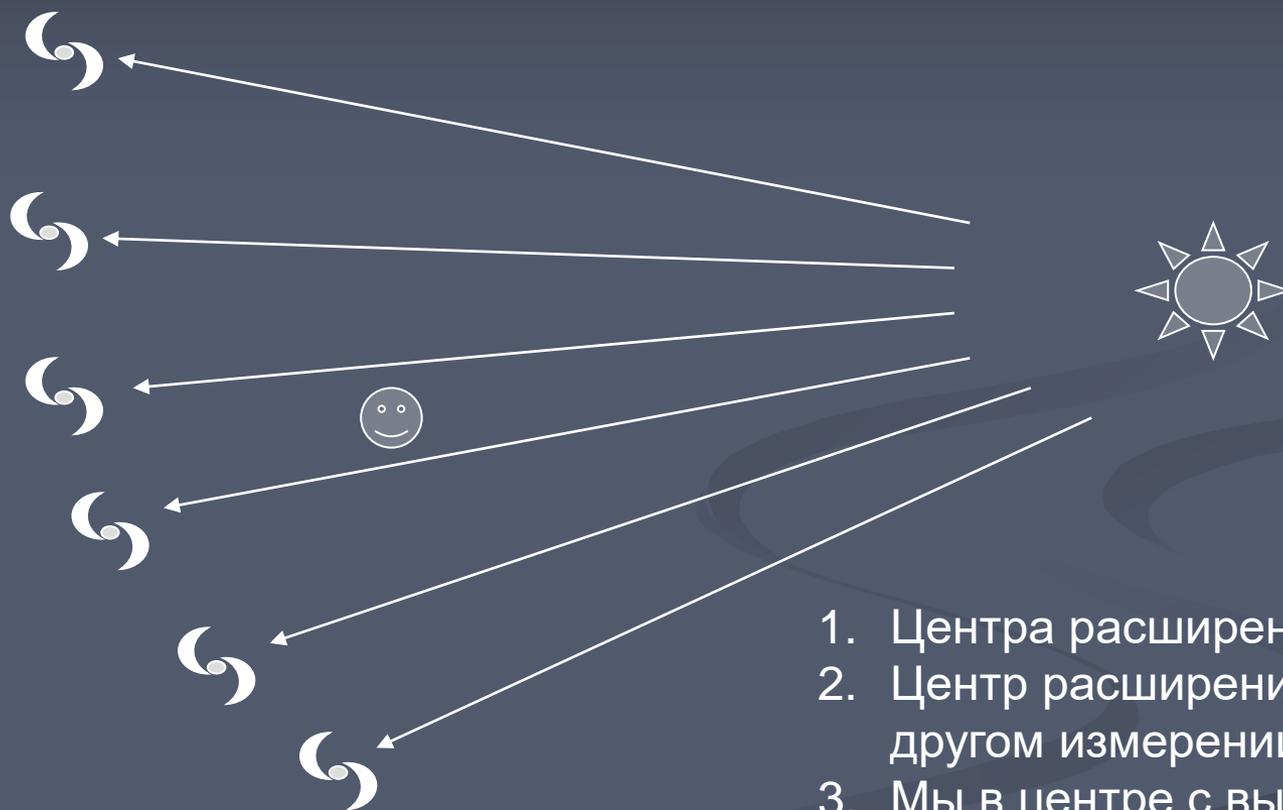
Как это работает?



Чем дальше галактика – тем быстрее она удаляется.
Центра расширения нет. Если мы перелетим в другое место,
то картина расширения не изменится.



Где центр расширения?



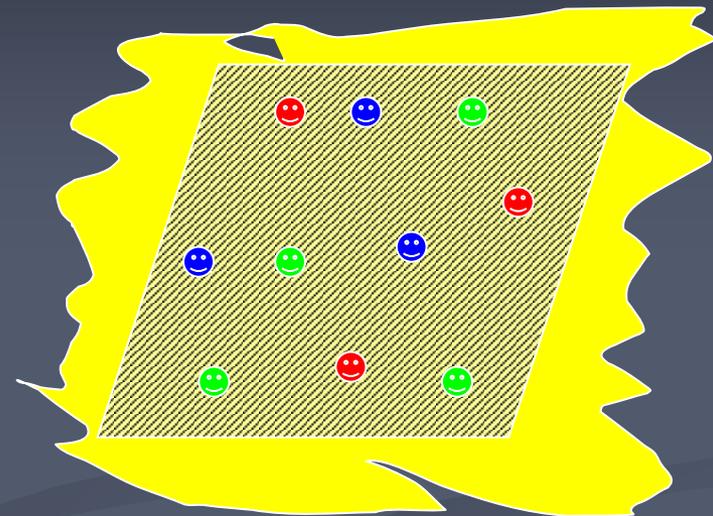
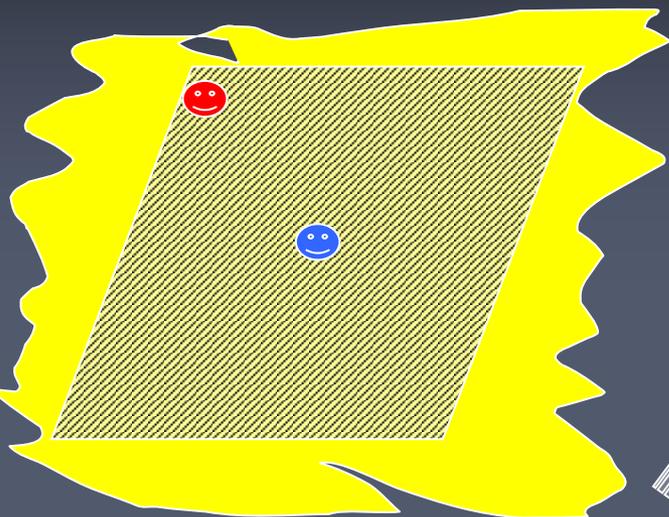
1. Центра расширения нет
2. Центр расширения в другом измерении
3. Мы в центре с высокой точностью (но это было бы крайне трудно объяснить).

Область наблюдения

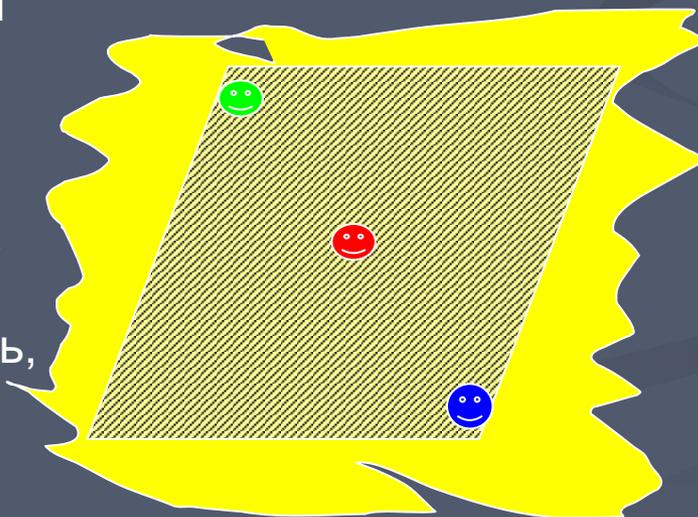


Для наблюдений нам доступна конечная область пространства, но вселенная там не заканчивается.

Конечна ли вселенная?

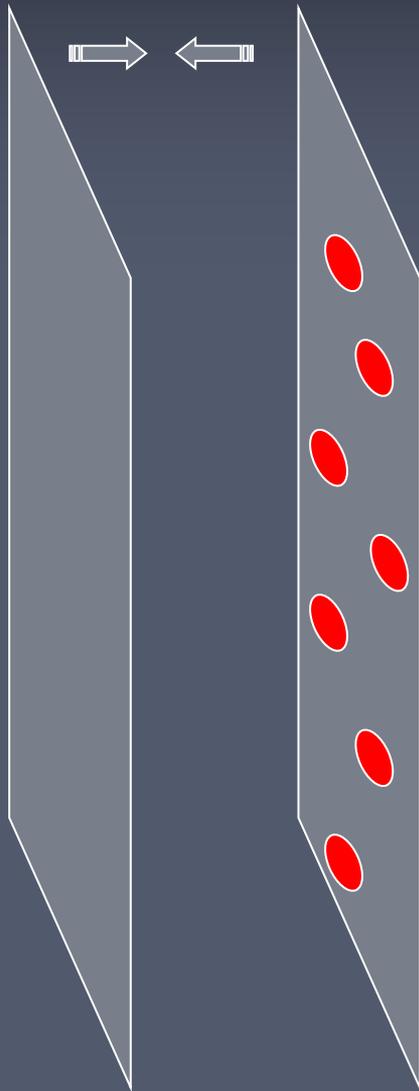


Нам для наблюдений доступна лишь конечная область. Но мы видим, что в далеких галактиках все примерно также, т.е., мы можем думать, что оттуда видна такая же картина. Да и почему нет?



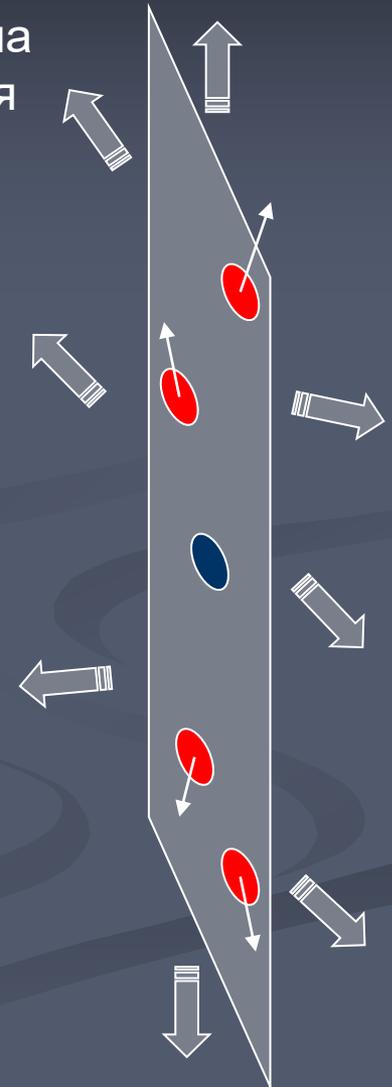
Мы не можем сказать, насколько вселенная больше той области, которую мы можем сейчас наблюдать.

Простая иллюстрация

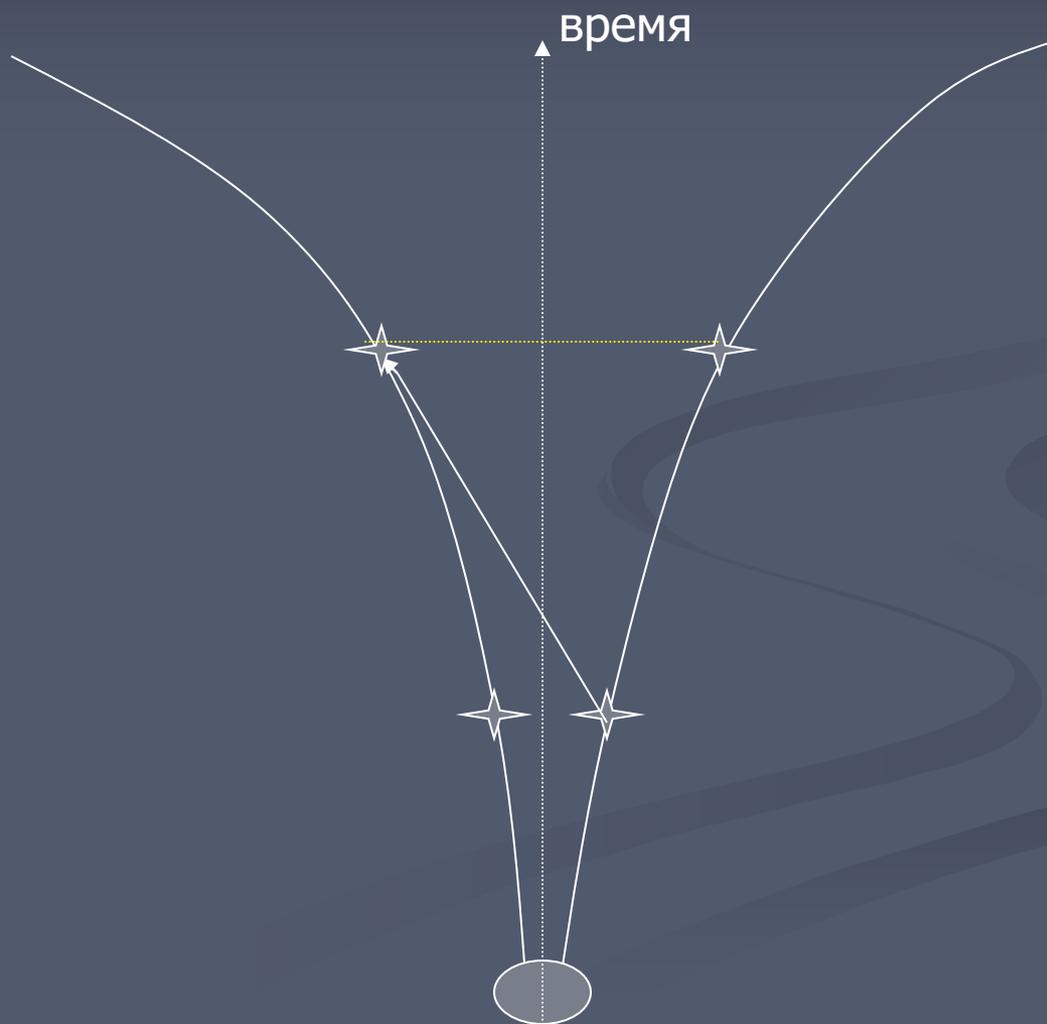


Эта сильно упрощенная картина помогает понять, что вселенная может быть безграничной и при этом расширяющейся

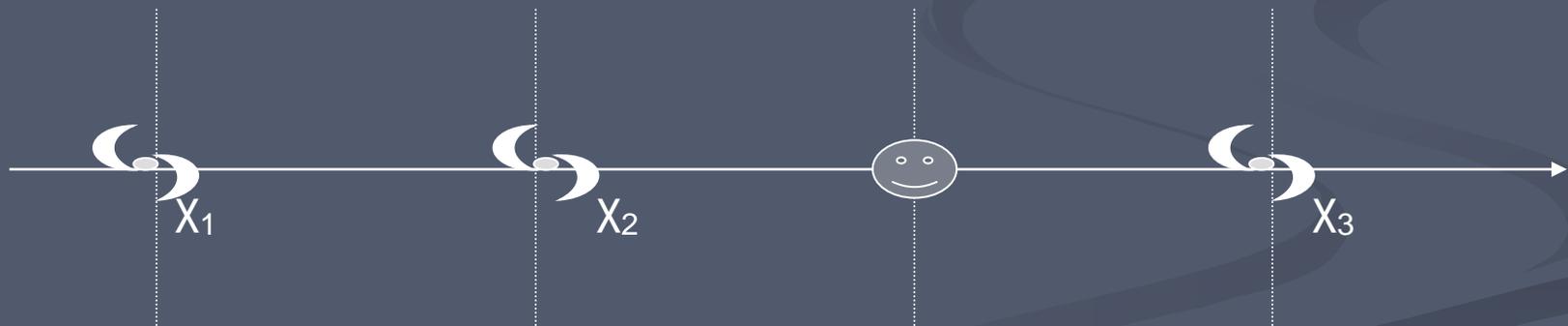
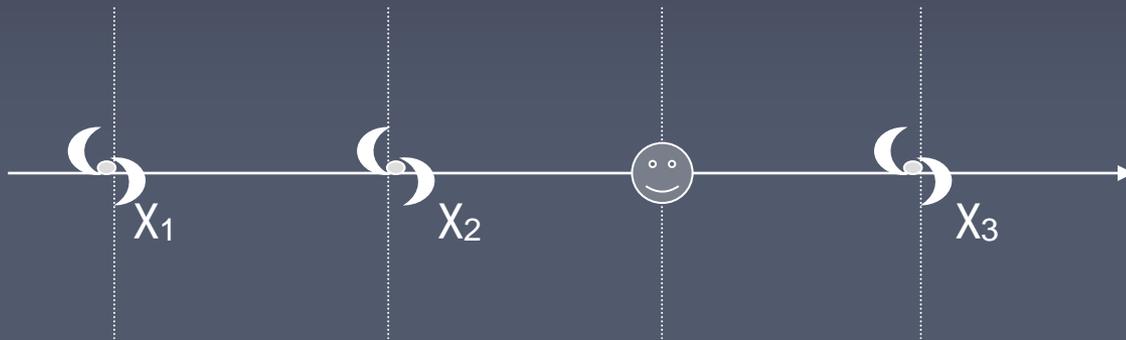
Важно, что уже в «момент ноль» вселенная может иметь конечный размер или даже сразу быть бесконечной.



Особенности в космологии

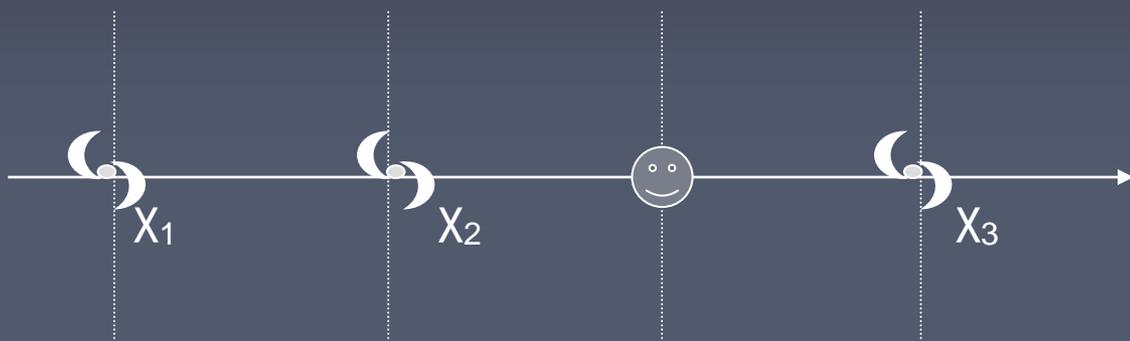


Сопутствующее расстояние

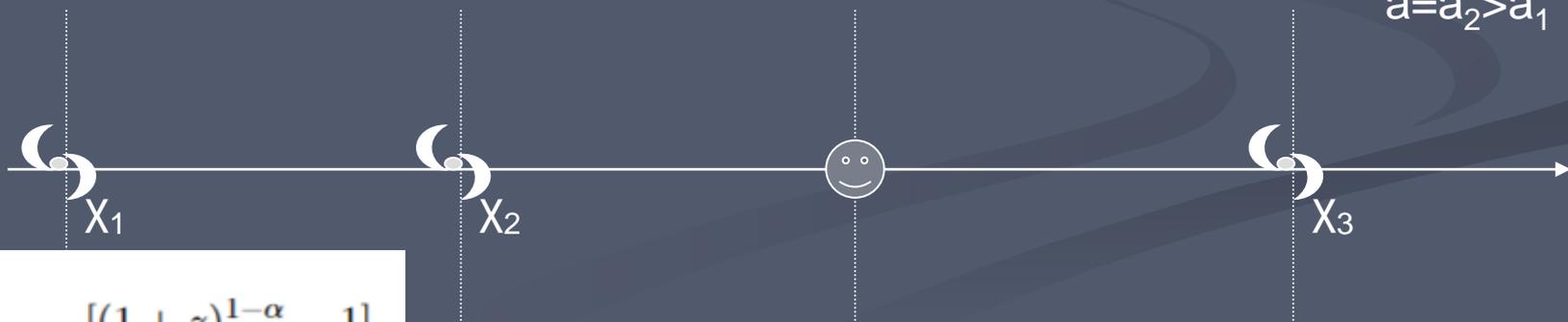


Собственное расстояние

$$d = a\chi$$



$t = t_1$
 $a = a_1$
 a – масштабный фактор



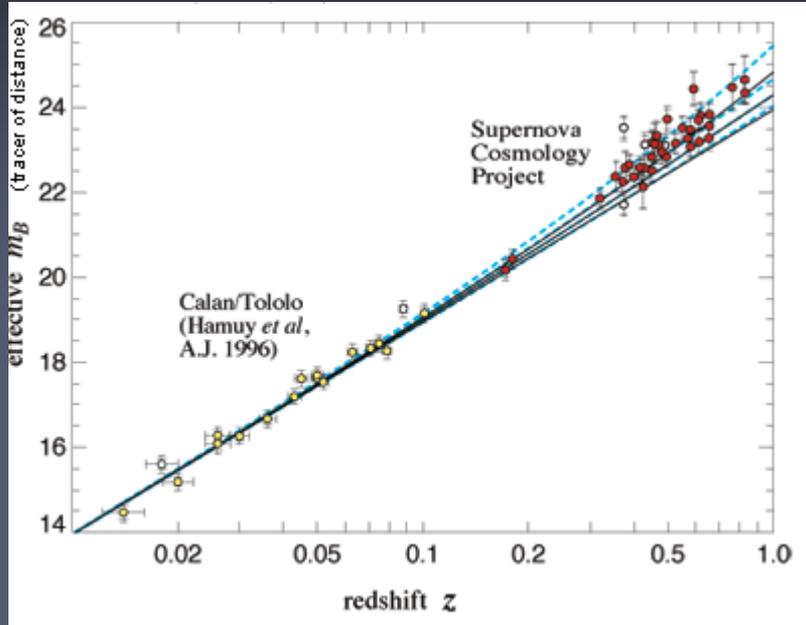
$t = t_2 > t_1$
 $a = a_2 > a_1$

$$d = \frac{c}{(1 - \alpha)H_0} [(1 + z)^{1 - \alpha} - 1].$$

$d \sim z$ при $z \approx 0$

Закон Хаббла

Perlmutter et al., 1999



$$v = H d$$

H – постоянная Хаббла.

$$72 \pm 2 \text{ км/с/Мпк}$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 dl^2.$$

$$H = \dot{a}/a$$

$$a^2(t) dl^2 = d\ell^2$$

$$d\ell = a(t) dl$$

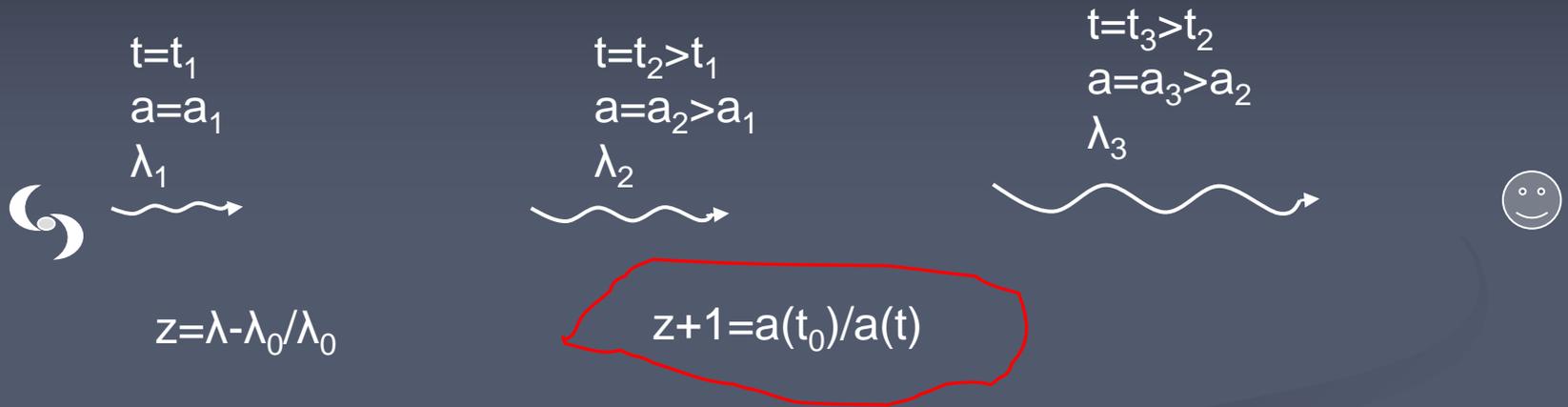
$$d = a(t) \int dl = a\chi$$

$$v = dd/dt = (da/dt)\chi = [(da/dt)/a](a\chi) = Hd$$

Релят. материя:	$\rho_r(z) = \rho_r(0)(1+z)^4,$	} \Rightarrow
Нерелят. материя:	$\rho_m(z) = \rho_m(0)(1+z)^3,$	
Кривизна:	$\rho_c(z) = \rho_c(0)(1+z)^2,$	
Вакуум:	$\rho_\Lambda(z) = const$	

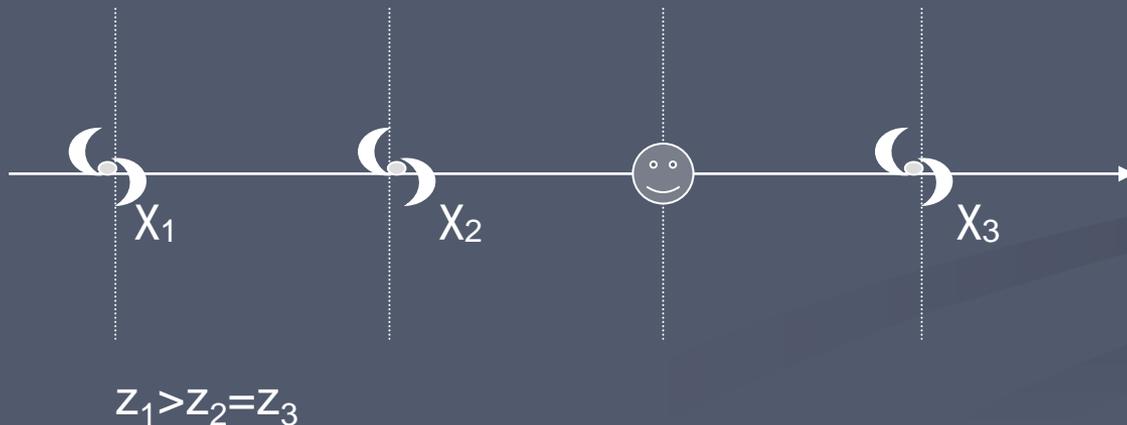
$$H^2(z) = H_0^2 \left(\Omega_r (1+z)^4 + \Omega_m (1+z)^3 + \Omega_c (1+z)^2 + \Omega_\Lambda \right)$$

Красное смещение



Это нельзя объяснить только эффектом Доплера!

Это нельзя объяснить только гравитационным красным смещением!



z – как χ :
растет для более далеких,
потому что наша вселенная
всегда расширялась

Космологическое красное смещение

а) Вблизи

$v \sim d \sim z$ Похоже на доплер! Почему?

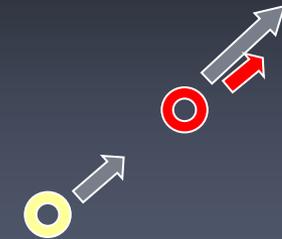
- Закон Хаббла.

Пространство расширяется везде одинаково.

Скорость пропорциональна расстоянию.

- Темп расширения меняется медленно.

Поэтому для близких галактик он примерно одинаков.

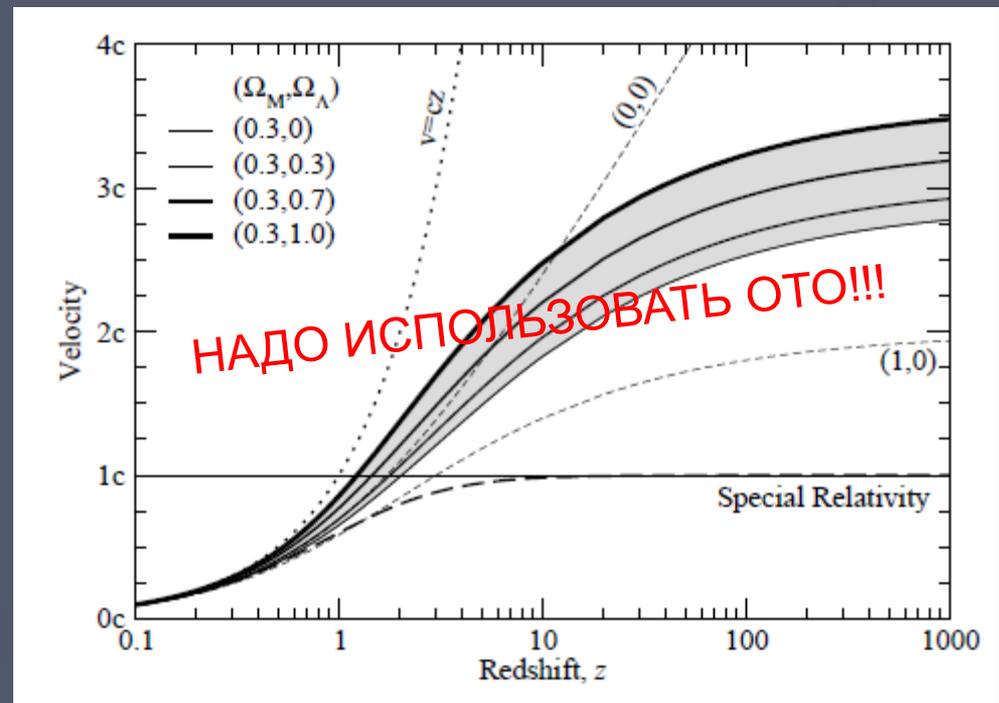


б) Вдали

Важно понимать, что вдали скорость расширения нельзя вычислить по красному смещению, используя релятивистский эффект доплера.

$$\text{GR} \quad v_{\text{rec}}(t, z) = \frac{c}{R_0} \dot{R}(t) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')},$$

~~$$\text{SR} \quad v_{\text{pec}}(z) = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}.$$~~



Формулы для расширения - 1

Разные среды:

- Вещество (пыль, $p=0$)
- Излучение ($p \sim \Gamma^4$)
- Космологическая постоянная ($p = -\rho c^2$)

$$p = w\rho c^2,$$

$$a \sim t^{1/\alpha},$$

$$\alpha = 3(w + 1)/2.$$

$$H = \dot{a}/a = 1/(\alpha t)$$

- Пыль $\alpha = 3/2$
- Излучение $\alpha = 2$
- Косм. пост. $\alpha = 0$

$$1 + z(t) = a(t_0)/a(t),$$

$$H = H_0(1 + z)^\alpha$$

Для света ($ds^2=0$):

$$\chi = \frac{c}{a(t_0)} \int_0^z \frac{dz}{H(z)} = \frac{c}{a(t_0)H_0} \frac{1}{1-\alpha} [(1+z)^{1-\alpha} - 1].$$

$$H^2(z) = H_0^2 \left(\Omega_r (1+z)^4 + \Omega_m (1+z)^3 + \Omega_c (1+z)^2 + \Omega_\Lambda \right)$$

Фотометрическое расстояние



Поток=светимость/площадь
площадь= $4\pi d_{\text{ph}}^2$



$$d_{\text{ph}} = (L/4\pi f)^{1/2} = a^2(t_0) \frac{\chi}{a(t_{\text{em}})},$$

Важно существование «стандартных свечей».
Например, это сверхновые типа Ia.

Угловое расстояние

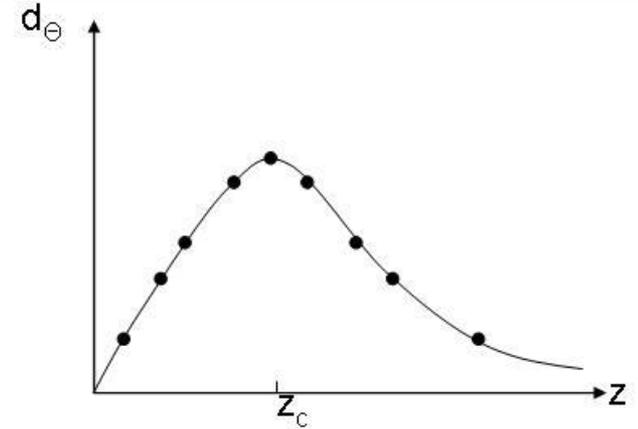
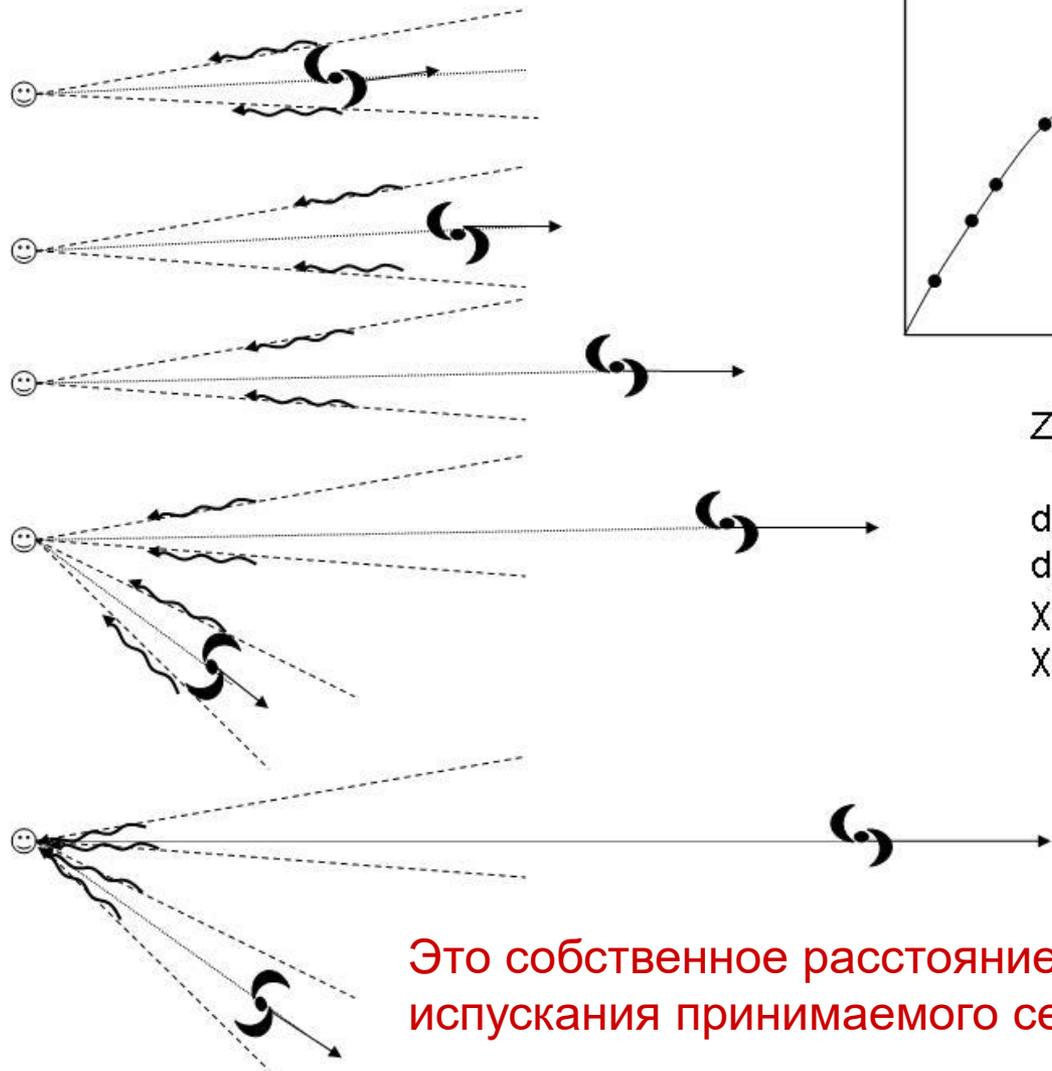
Размер s



α



$$d = s / \operatorname{tg} \alpha$$



$$z_c: v_{em} = c$$

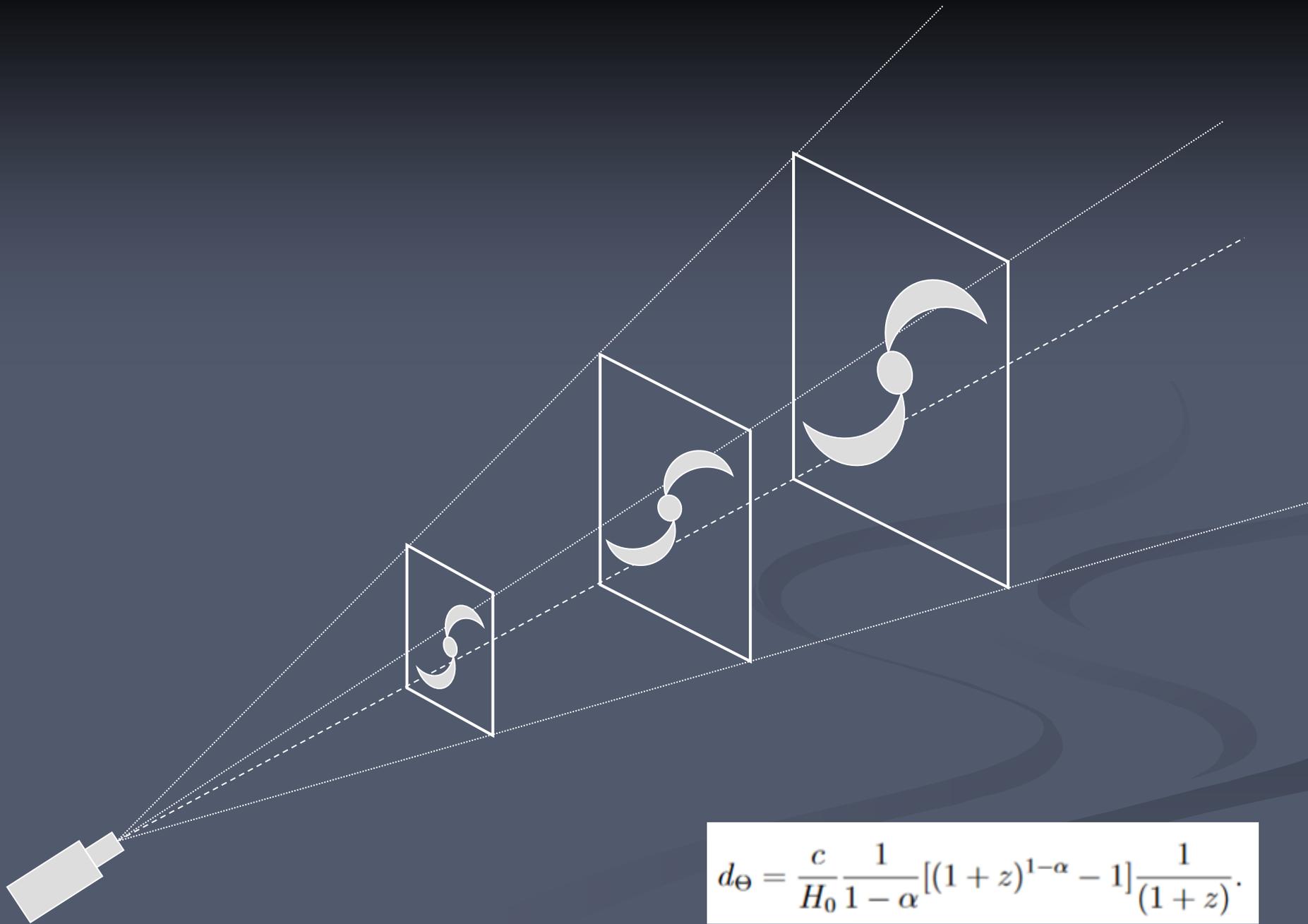
$$d_{\theta 1} = d_{\theta 2}$$

$$d_{em1} = d_{em2}$$

$$\chi_1 a(t_{em1}) = \chi_2 a(t_{em2})$$

$$\chi_1 > \chi_2, a(t_{em1}) < a(t_{em2})$$

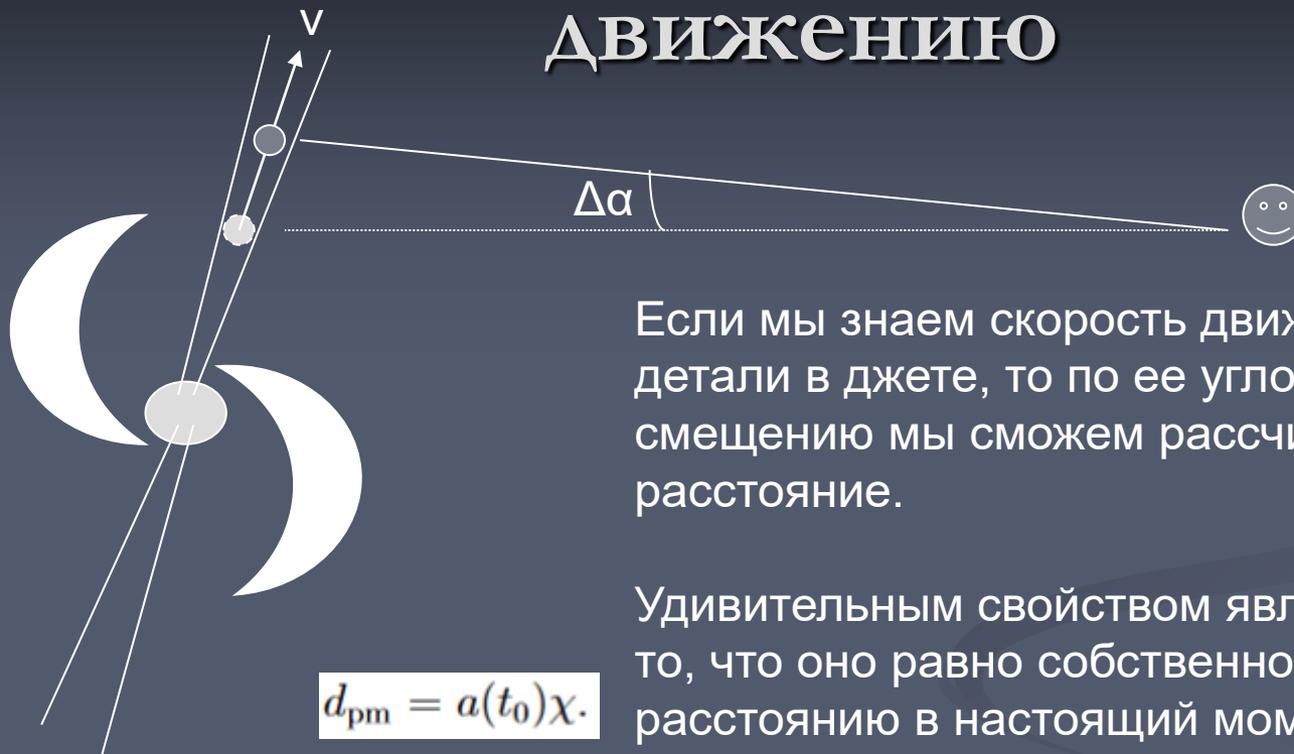
Это собственное расстояние на момент испускания принимаемого сейчас излучения!



$$d_{\Theta} = \frac{c}{H_0} \frac{1}{1-\alpha} [(1+z)^{1-\alpha} - 1] \frac{1}{(1+z)}.$$

Расстояние по собственному

ДВИЖЕНИЮ

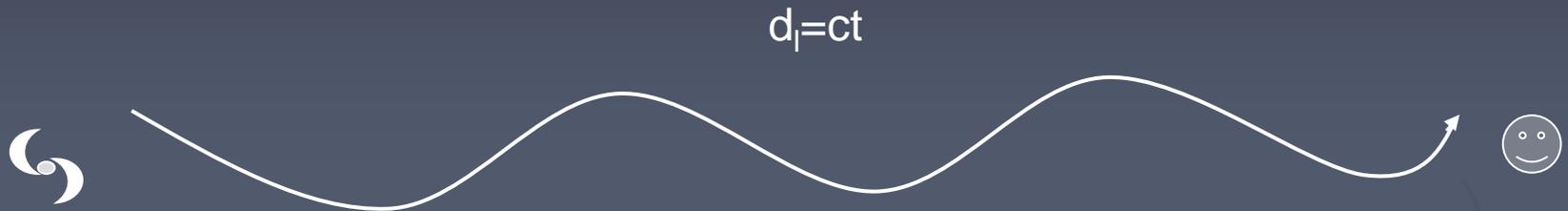


Если мы знаем скорость движения детали в джете, то по ее угловому смещению мы сможем рассчитать расстояние.

Удивительным свойством является то, что оно равно собственному расстоянию в настоящий момент времени.

К сожалению, мы не знаем примера «стандартной скорости».

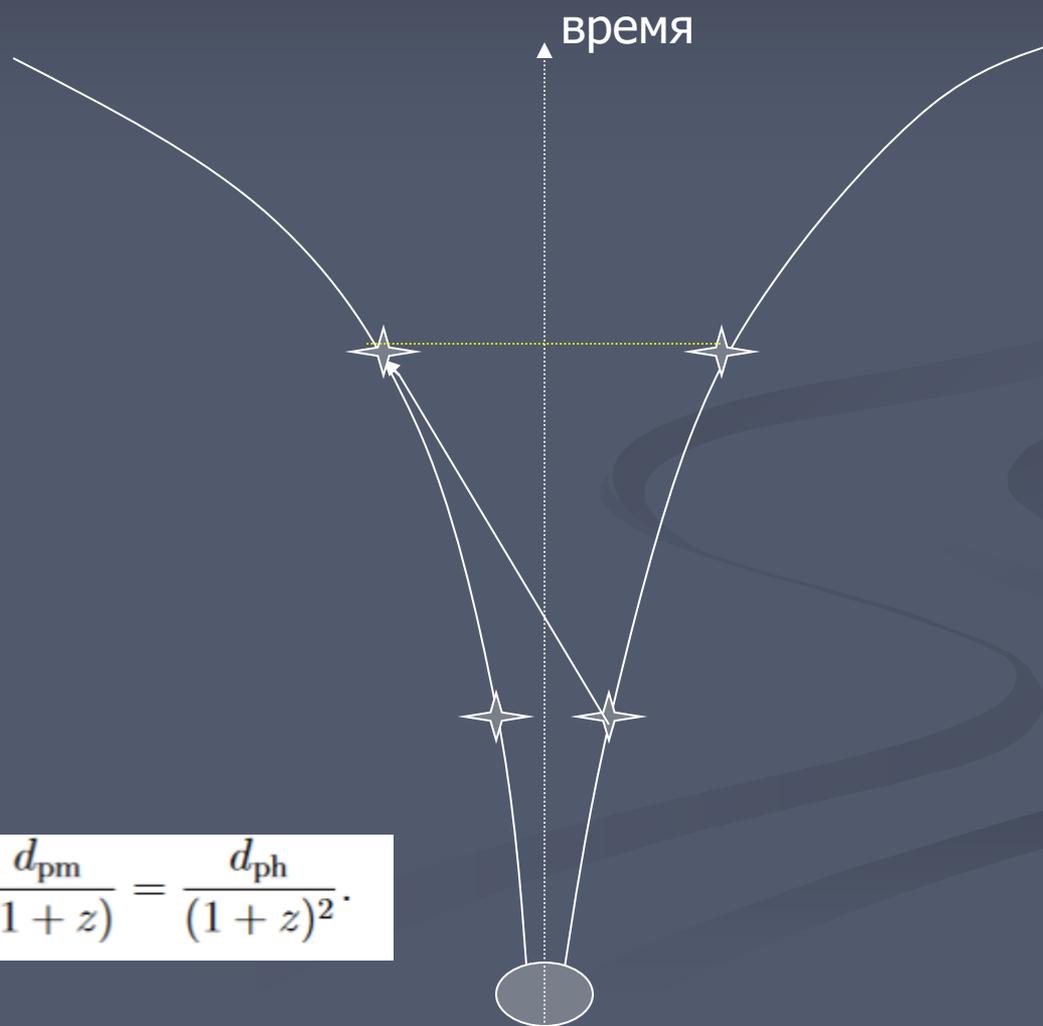
Время путешествия фотона



(именно об этом расстоянии чаще всего говорят в новостях:
«открыта далекая галактика, свет от которой шел к нам
10 миллиардов лет»)

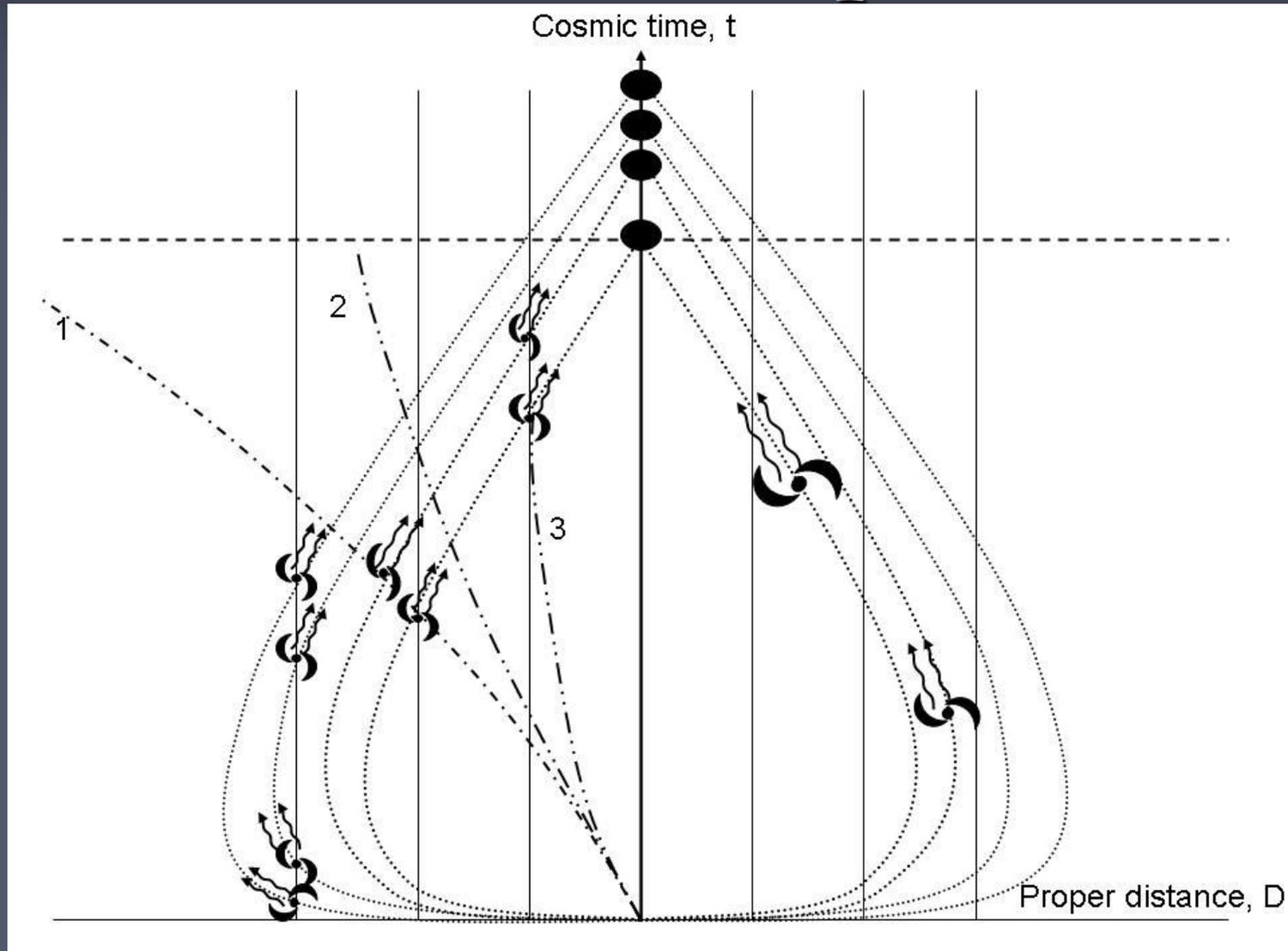
Но пока свет шел – вселенная расширялась!
Поэтому, если свет идет из точки А в точку Б,
то на момент прибытия расстояние между А и Б
будет больше чем просто произведение ct !

Особенности в космологии



$$d_{\Theta} = a(t_{\text{em}})\chi = \frac{d_{\text{pm}}}{(1+z)} = \frac{d_{\text{ph}}}{(1+z)^2}.$$

СМОТРИМ ВДОЛЬ СВЕТОВОГО КОНУСА, А ДВИЖЕМСЯ ПО МИРОВЫМ ЛИНИЯМ



Формулы для расширения - 2

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3},$$

$$\rho = \rho_m(a) = \frac{\rho_{m_0}}{a^3},$$

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G};$$

$$\Omega_m \equiv \frac{\rho_{m_0}}{\rho_c} = \frac{8\pi G}{3H_0^2}\rho_{m_0};$$

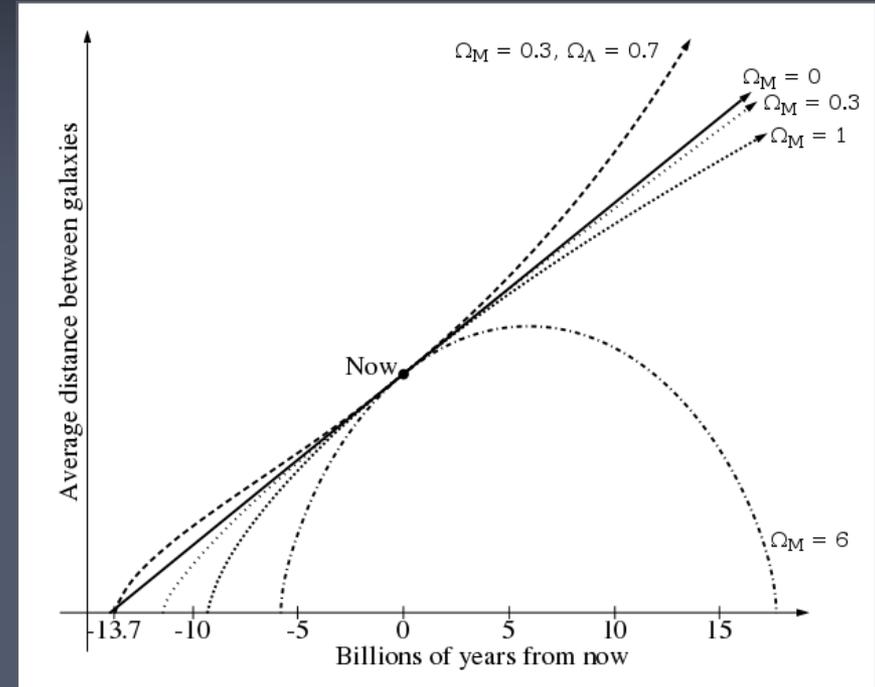
Кривизна: $k = -1, 0, 1$

$$dl^2 = \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(\sin^2\theta d\varphi^2 + d\theta^2)$$

$$\Omega_k \equiv \frac{-kc^2}{(a_0 H_0)^2}$$

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2},$$

$$H^2(z) = H_0^2 (\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda).$$



Параметр замедления q

$$q = - \left(1 + \frac{\dot{H}}{H^2} \right).$$

$$q=0 \quad t=1/H$$

$$q=1/2 \quad t=(2/3H)$$

Сейчас $q < 0$.

Космологический калькулятор

Enter values, hit a button

<input type="text" value="70"/>	H_0
<input type="text" value="0.3"/>	Ω_{M}
<input type="text" value="1.5"/>	z
<input type="button" value="Open"/>	<input type="button" value="Flat"/>
<input type="text" value="0.7"/>	Ω_{vac}
<input type="button" value="General"/>	

Open sets $\Omega_{\text{vac}} = 0$ giving an open Universe
[if you entered $\Omega_{\text{M}} < 1$]

Flat sets $\Omega_{\text{vac}} = 1 - \Omega_{\text{M}}$ giving a flat Universe.

General uses the Ω_{vac} that you entered.

For $H_0 = 70$, $\Omega_{\text{M}} = 0.300$, $\Omega_{\text{vac}} = 0.700$, $z = 1.500$

- It is now 13.462 Gyr since the Big Bang.
- The age at redshift z was 4.197 Gyr.
- The [light travel time](#) was 9.266 Gyr.
- The [comoving radial distance](#), which goes into Hubble's law, is 4363.4 Mpc or 14.232 Gly.
- The comoving volume within redshift z is 347.985 Gpc³.
- The [angular size distance \$D_A\$](#) is 1745.3 Mpc or 5.6926 Gly.
- This gives a scale of 8.462 kpc".
- The [luminosity distance \$D_L\$](#) is 10908.4 Mpc or 35.579 Gly.

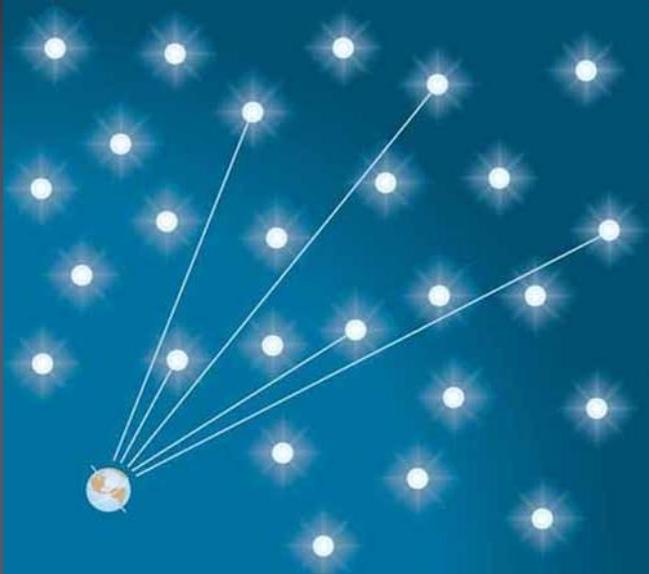
1 Gly = 1,000,000,000 light years or $9.461 \cdot 10^{26}$ cm.

1 Gyr = 1,000,000,000 years.

1 Mpc = 1,000,000 parsecs = $3.08568 \cdot 10^{24}$ cm, or 3,261,566 light years.

Чрезвычайно удобный инструмент, позволяющий рассчитывать разные расстояния для разных космологических параметров.

Парадокс Ольберса



Мы смотрим в прошлое.

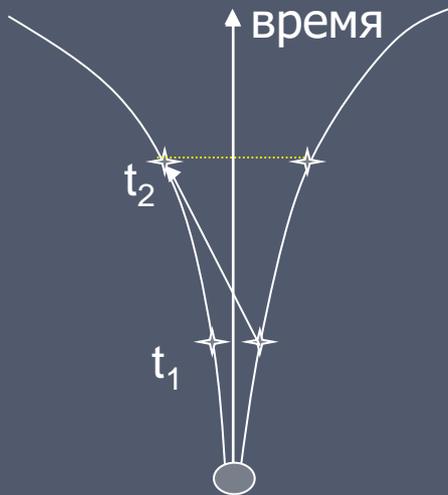
Темнота ночного неба
объясняется конечным
возрастом вселенной и
расширением вселенной!

$$\left. \begin{array}{l} \text{Поток: } F \sim \frac{L}{d_l^2} \\ \text{Яркость: } I = \frac{F}{\Delta\Omega} \\ \text{Угл.} \\ \text{размер: } \Delta\Omega \sim \theta^2 \sim \frac{1}{d_a^2} \end{array} \right\} \Rightarrow F \sim L \left(\frac{d_a}{d_l} \right)^2 = \frac{1}{(1+z)^4}$$

Cosmic time

«Часы Бога» - космическое
время

«Сейчас» космическое время
соответствует нашим часам.
Но, на каком-нибудь далеком
наблюдаемом объекте с точки
зрения наших наблюдений
часы идут медленнее.



Взгляд бога

- Космическое время
- Охватываем взглядом сразу все (т.е., видим все, как будто скорость света равна бесконечности)
- Смотрим «со стороны»

Удобно для иллюстрации и иногда для расчетов. Но при этом не связывается напрямую с наблюдениями.



Что читать

1. «Сверхсветовое разбегание галактик и горизонты Вселенной: путаница в тонкостях» С. Попов. Сайт Астронет. <http://www.astronet.ru/db/msg/11948302>
2. «За горизонтом вселенских событий» С.Попов, А. Топоренский. Вокруг Света 2006 Март (<http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/2557/>)
3. «Хаббловский поток в картине наблюдателя» А. Топоренский, С. Попов УФН 2014 г. N7 <http://www.ufn.ru>; arXiv: [1311.2472](https://arxiv.org/abs/1311.2472)
4. «Не боги расширение вселенной наблюдают» С. Попов, А. Топоренский Вселенная.Пространство. Время. 2014 февраль, март (см. также Астронет <http://www.astronet.ru/db/msg/1307314>)
5. «Куда смешается красное смещение?» С. Попов, А. Топоренский Вселенная.Пространство. Время. 2014 июль (см. также Астронет <http://www.astronet.ru/db/msg/1320286>)
6. «Cosmological redshift, recession velocities and acceleration measures in FRW cosmologies» А. Топоренский, С. Попов arXiv: 1503.05147
7. Расстояния в космологии: astro-ph/9905116, astro-ph/0609593