

Космология



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.

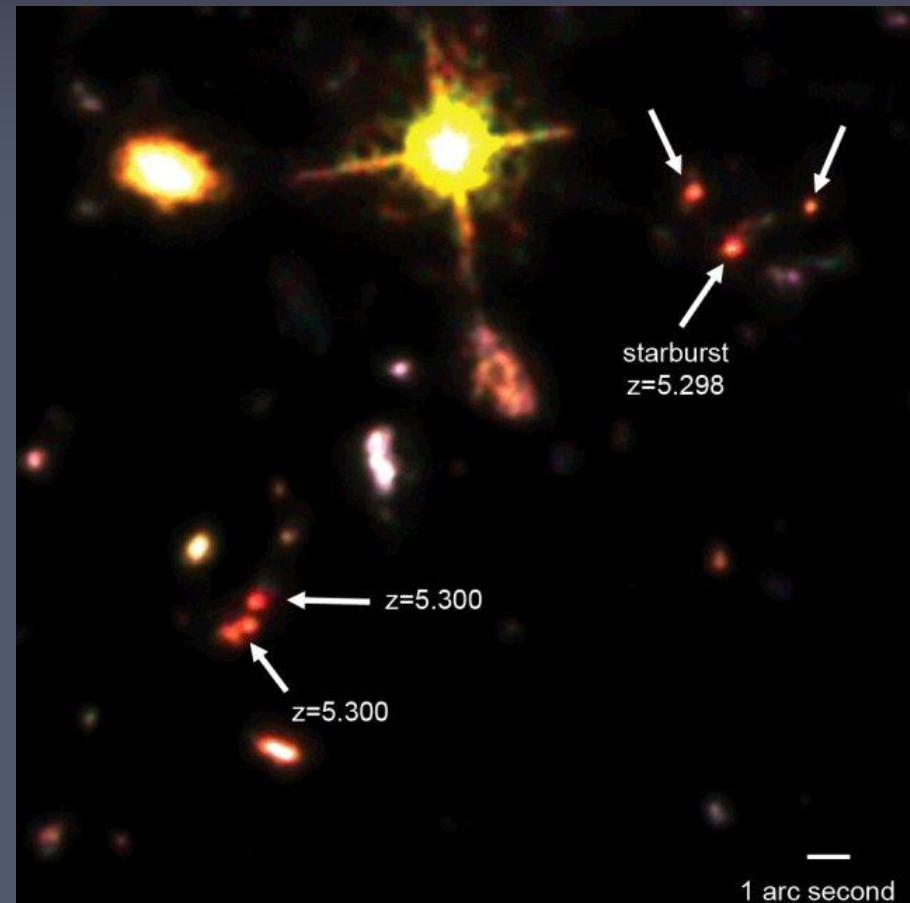
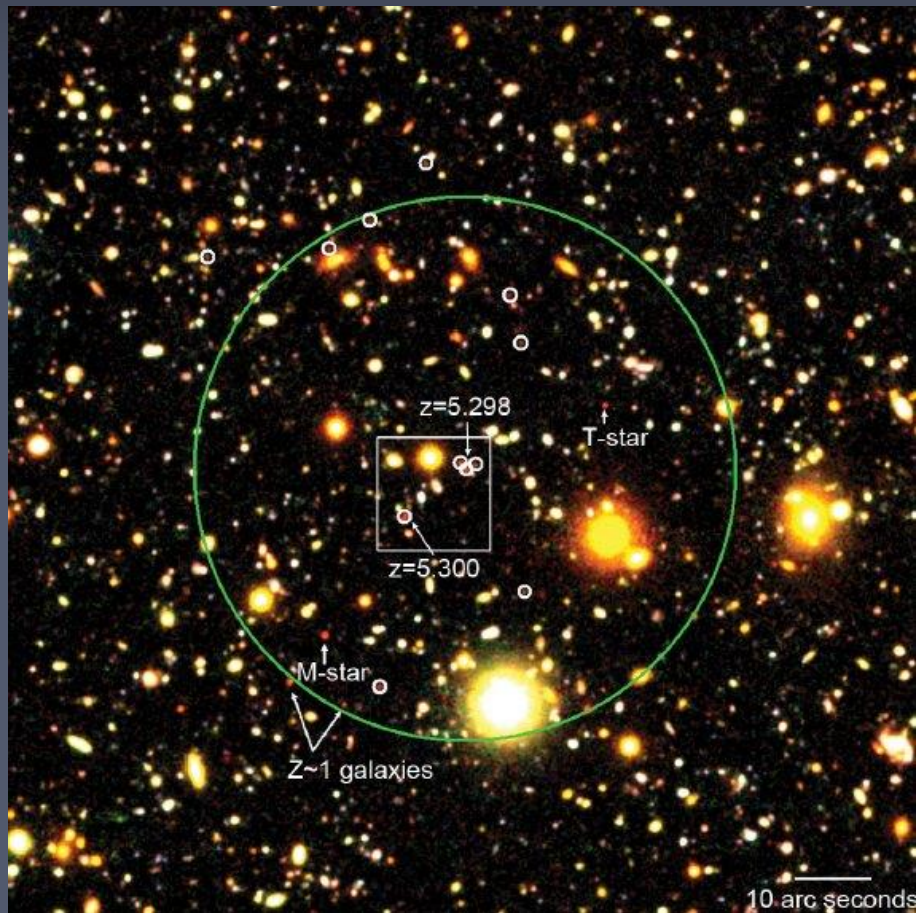
Формирование скоплений



Мы видим, что скопления
возникают постепенно.

На больших расстояниях
скопления еще не успели
сформироваться.

Дальнее протоскопление галактик

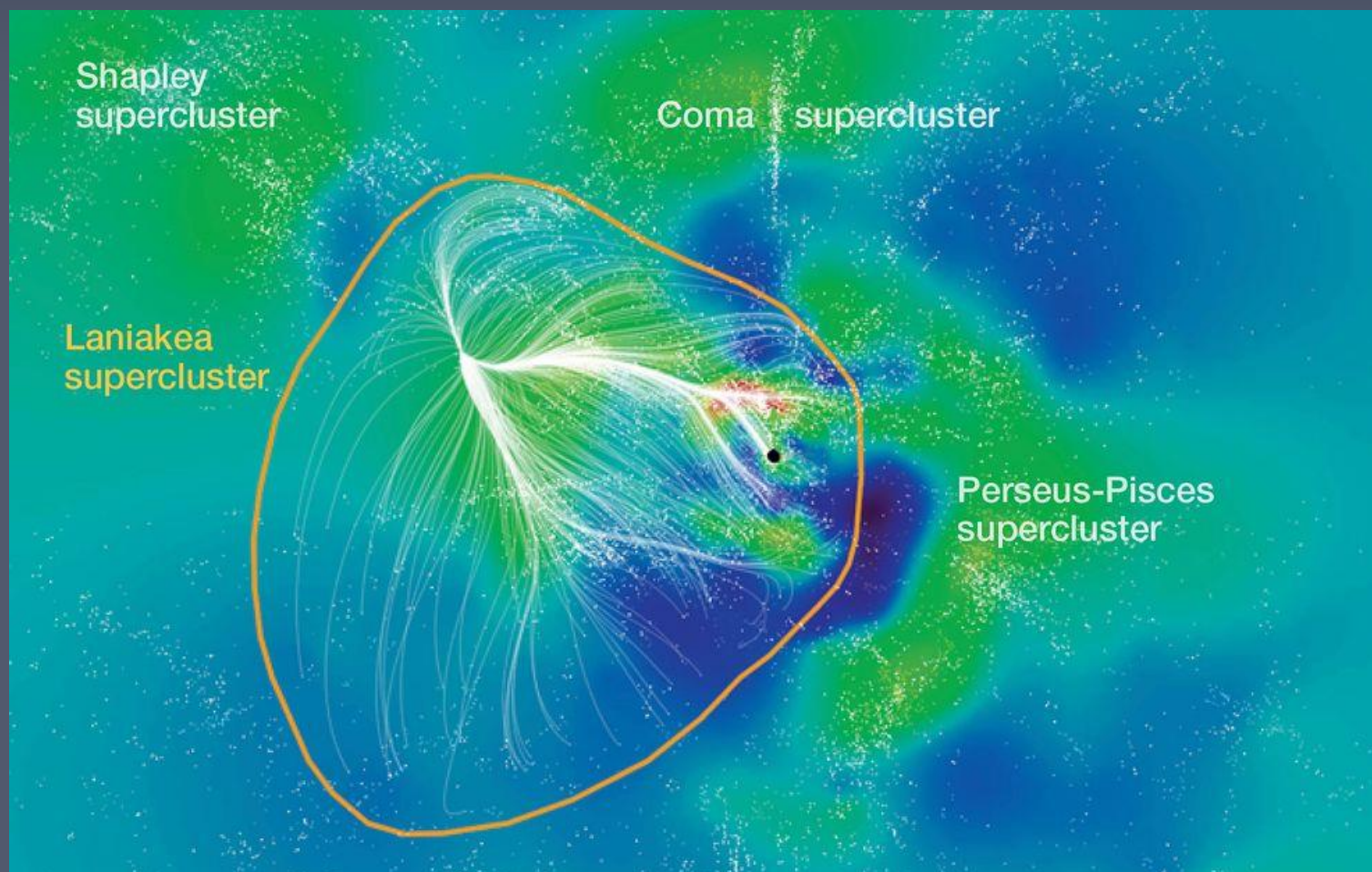


$Z=5.3$

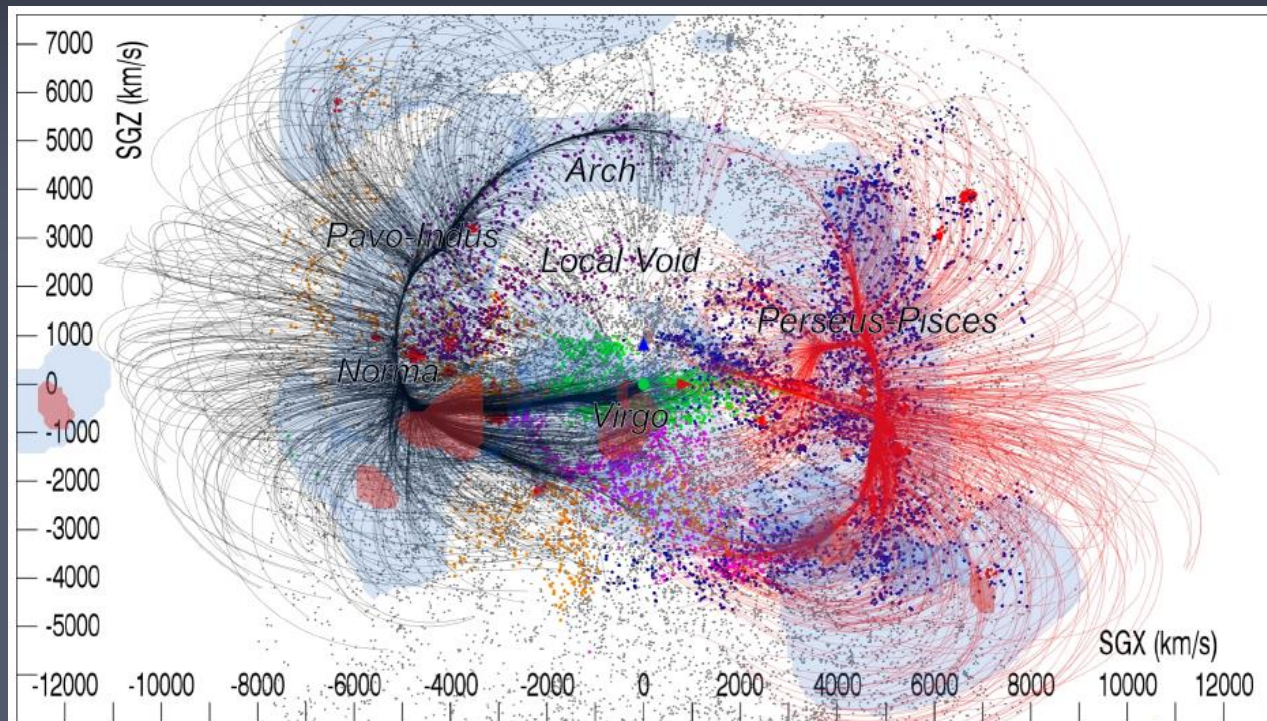
Ланиакееа

~100000 крупных галактик.

Полмиллиарда световых лет в поперечнике.

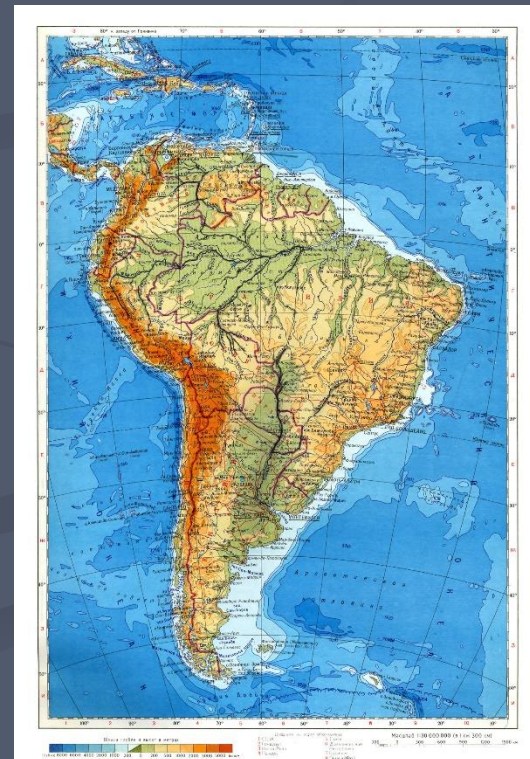


Структура потоков внутри 80 Мпк

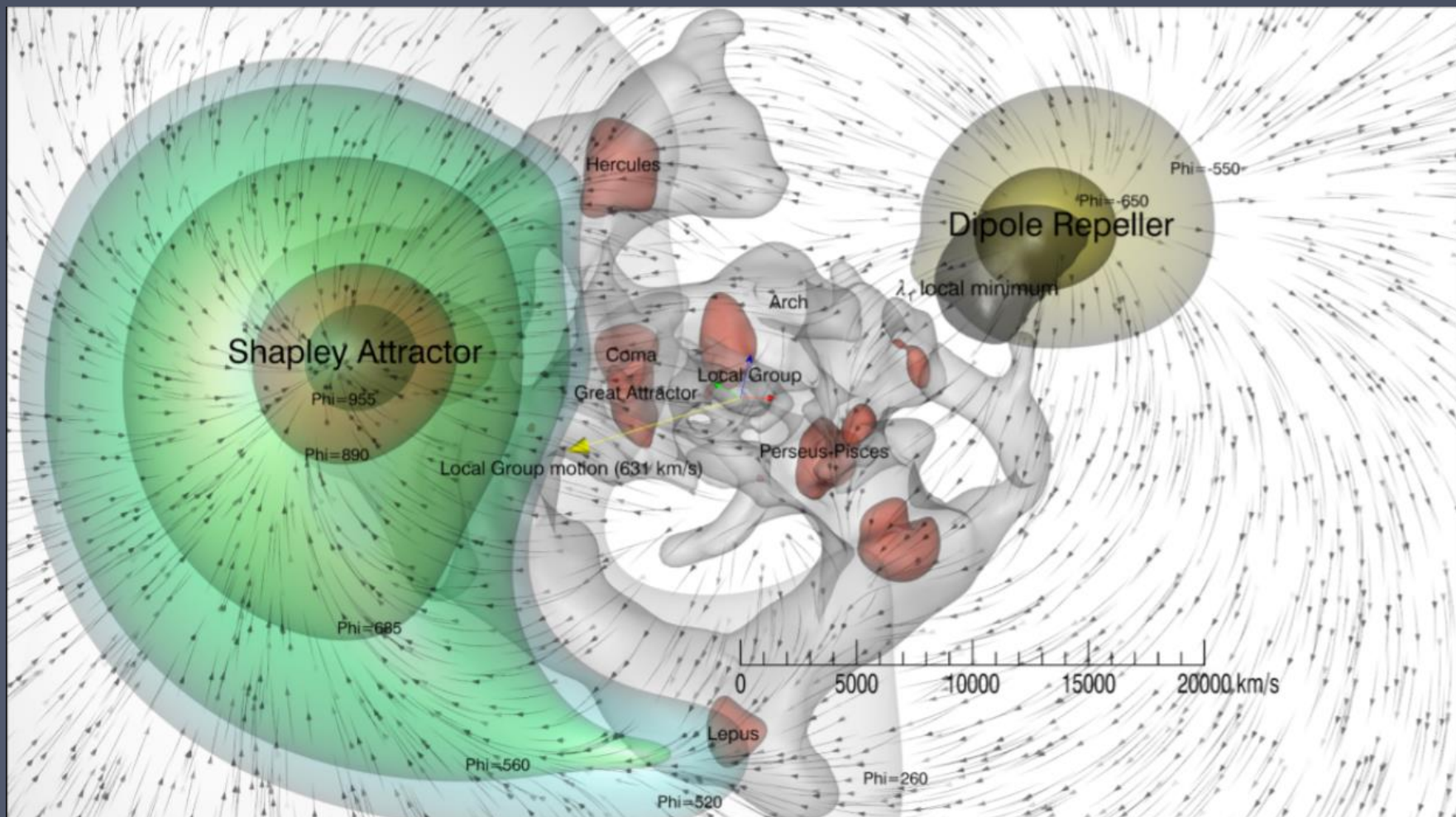


1409.0880

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



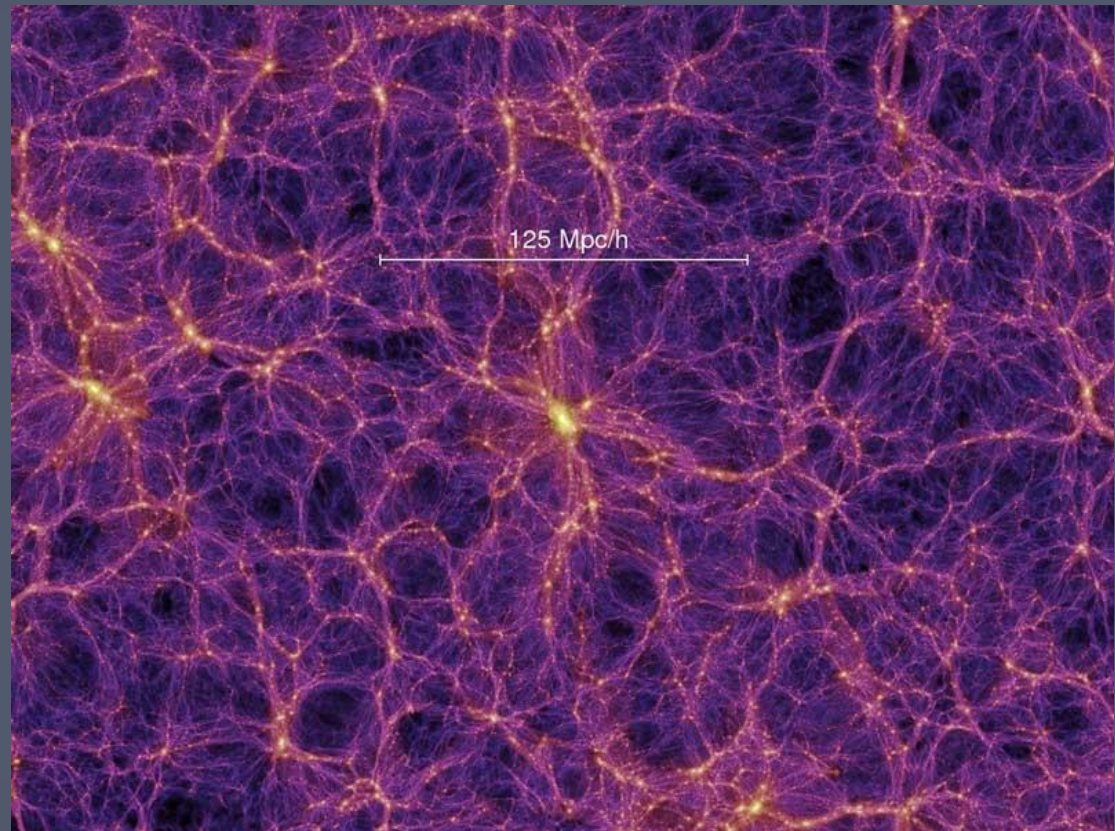
«ДИПОЛЬНЫЙ ОТТАКИВАТЕЛЬ»



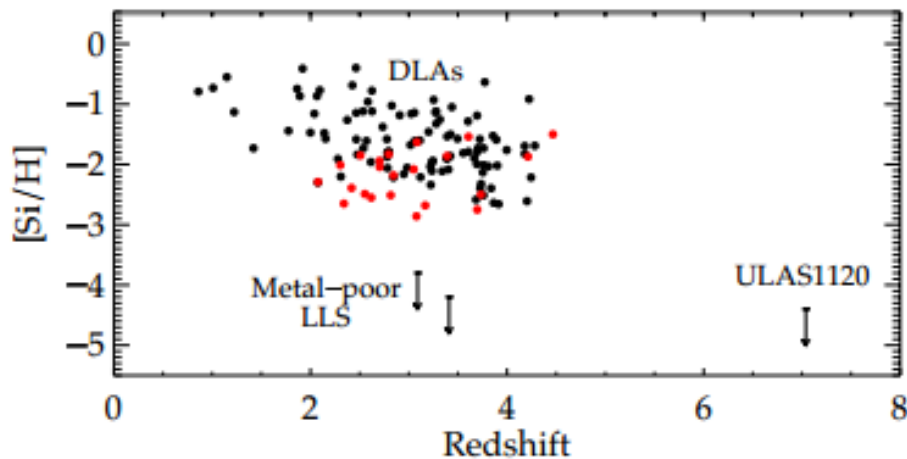
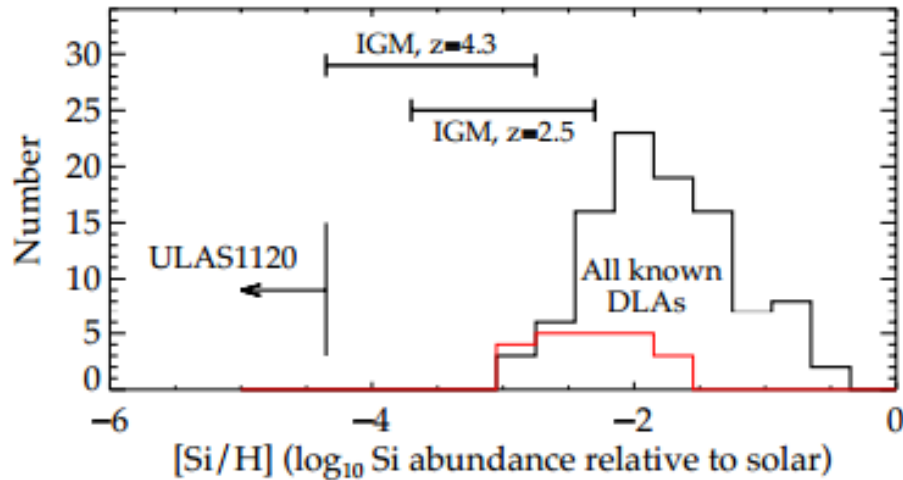
Скелет вселенной

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

Как увидеть сам скелет вселенной?



Очень малометаллический газ на $z=7$



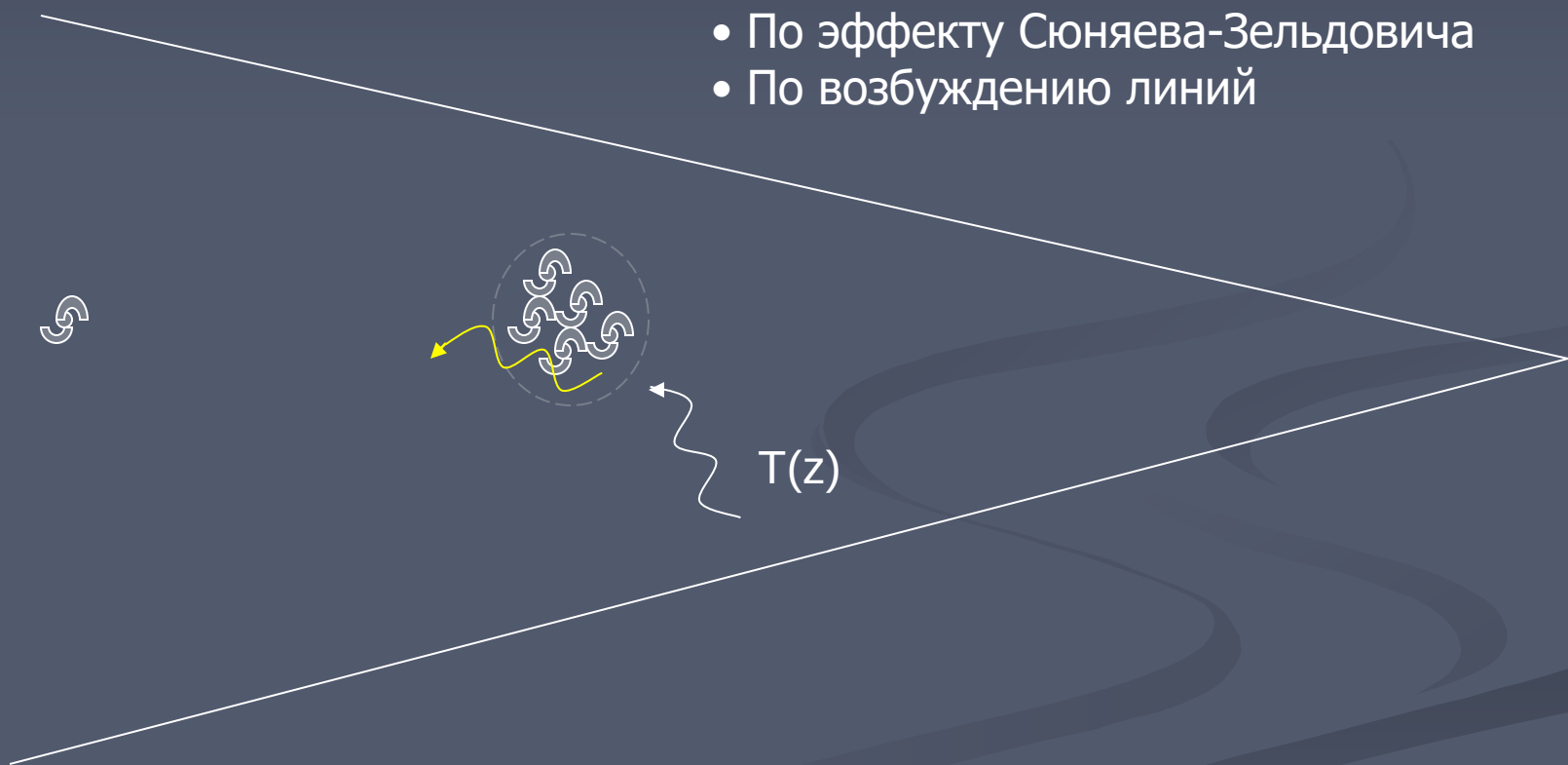
772 млн лет после Большого Взрыва.

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

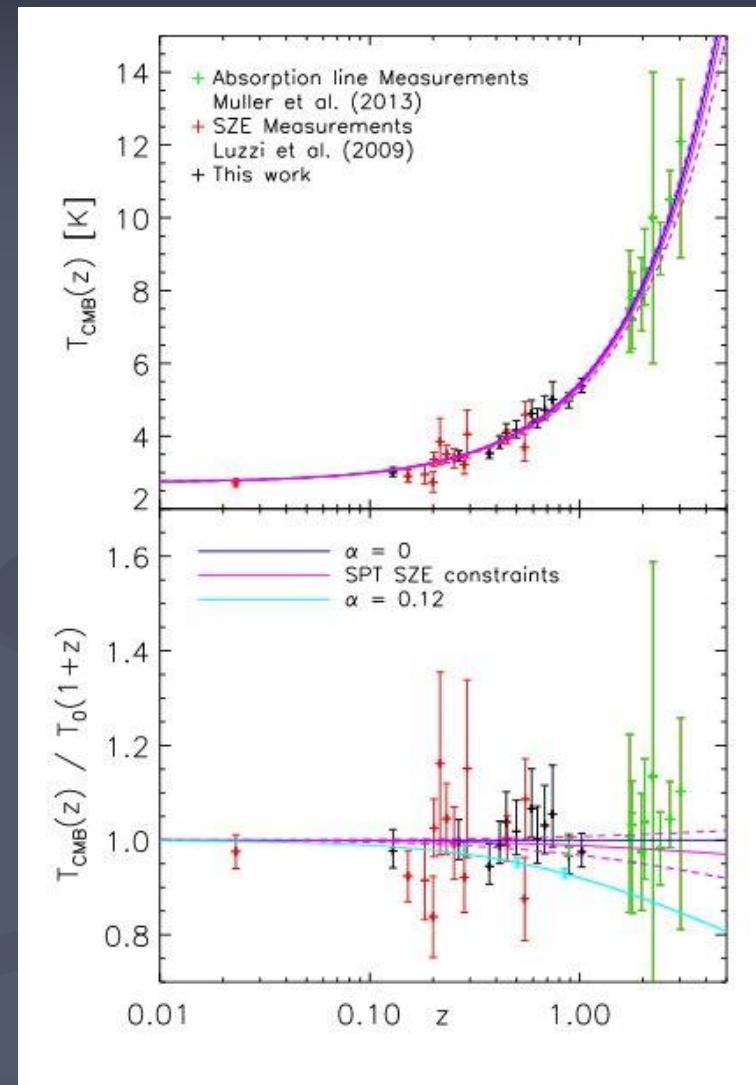
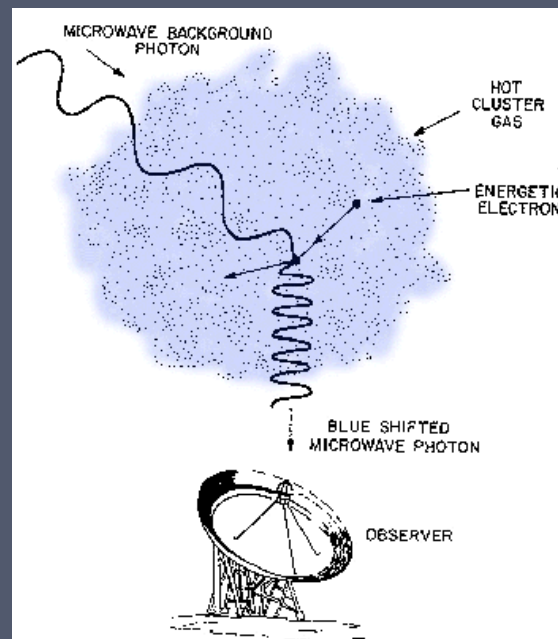


Измерение температуры реликта на разных красных смещениях

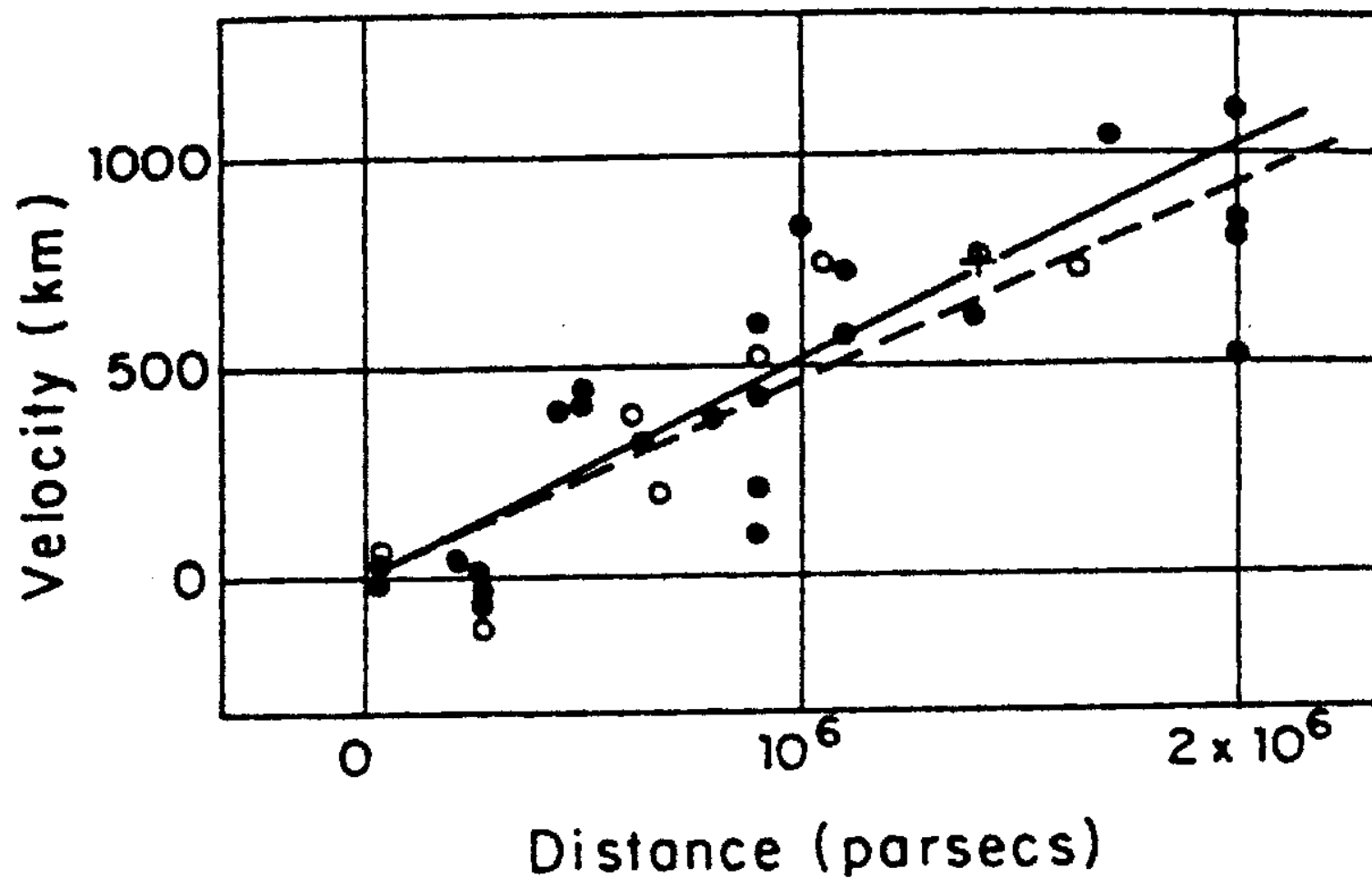
Как остывает реликт?

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.

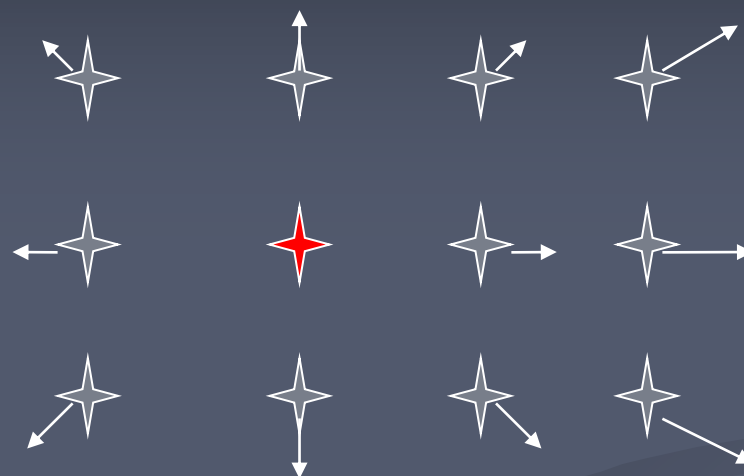


Расширение вселенной

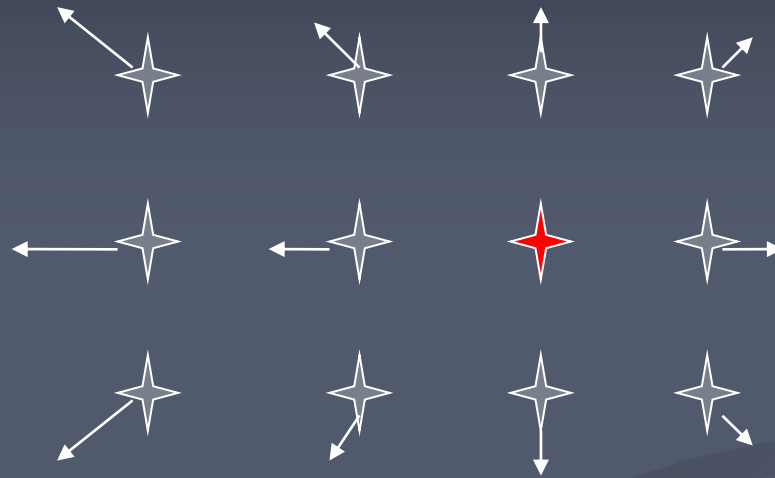


Хаббл 1929 г.

Как это работает?



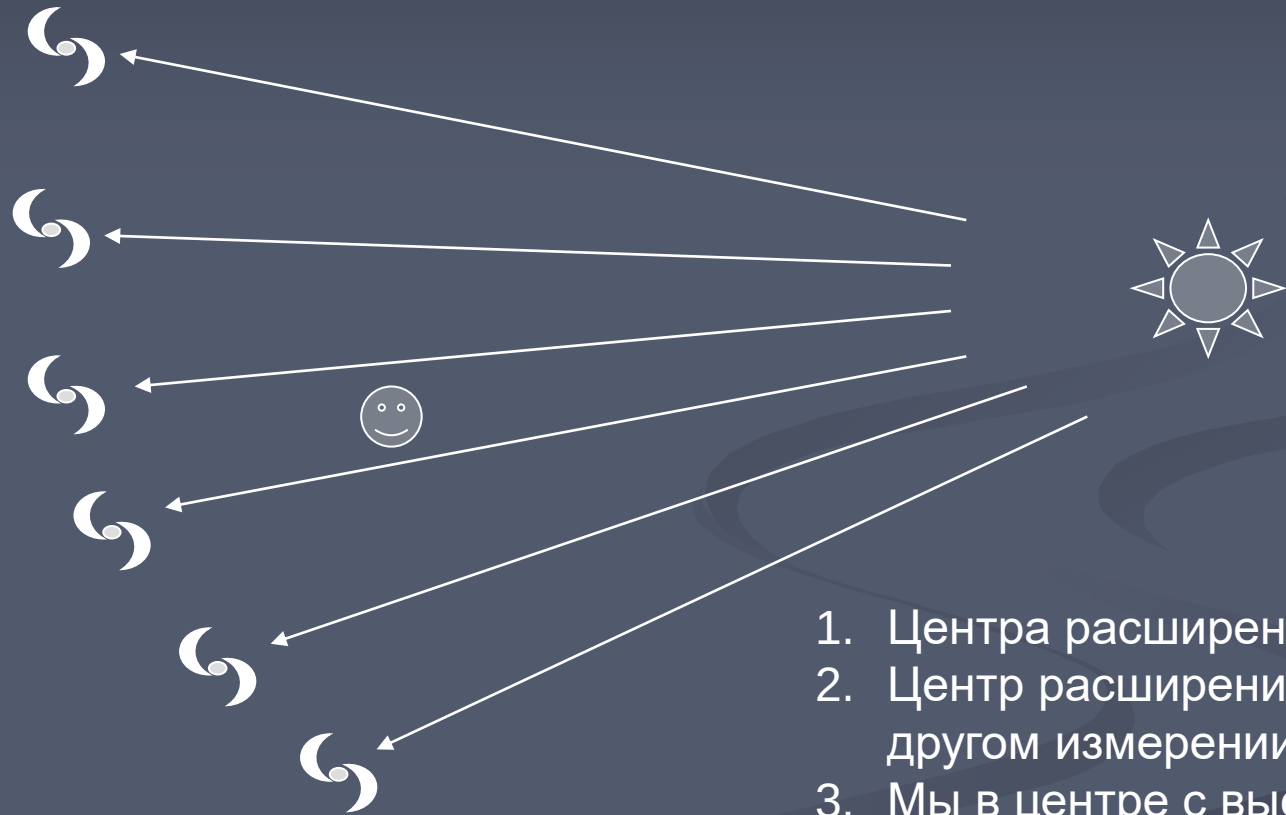
Как это работает?



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



Где центр расширения?



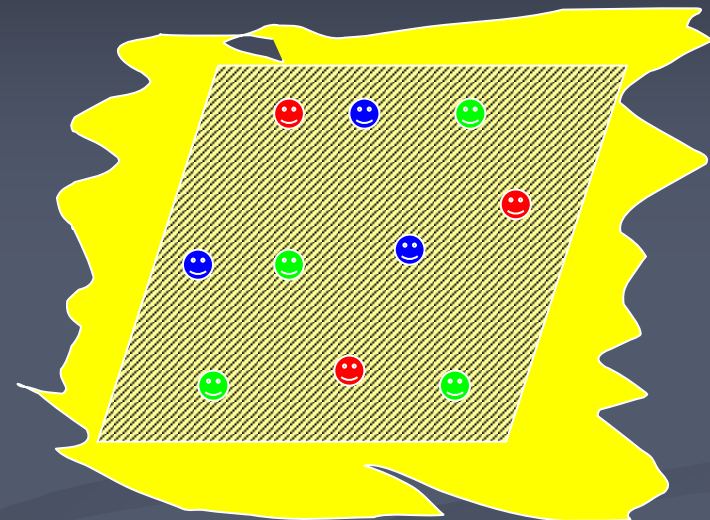
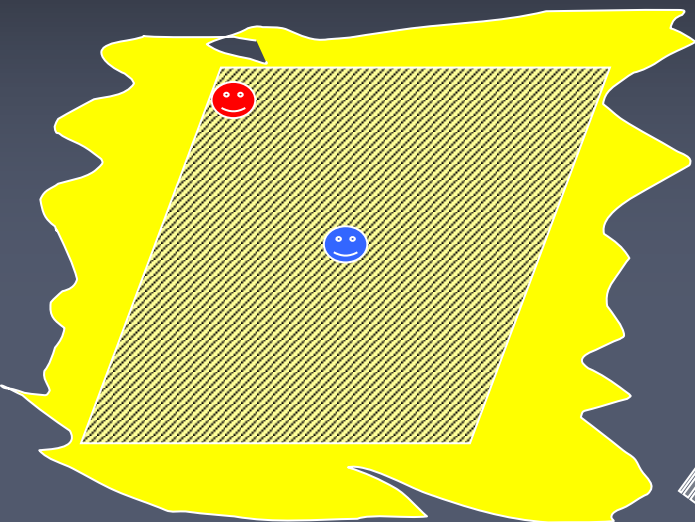
1. Центра расширения нет
2. Центр расширения в другом измерении
3. Мы в центре с высокой точностью (но это было бы крайне трудно объяснить).

Область наблюдения

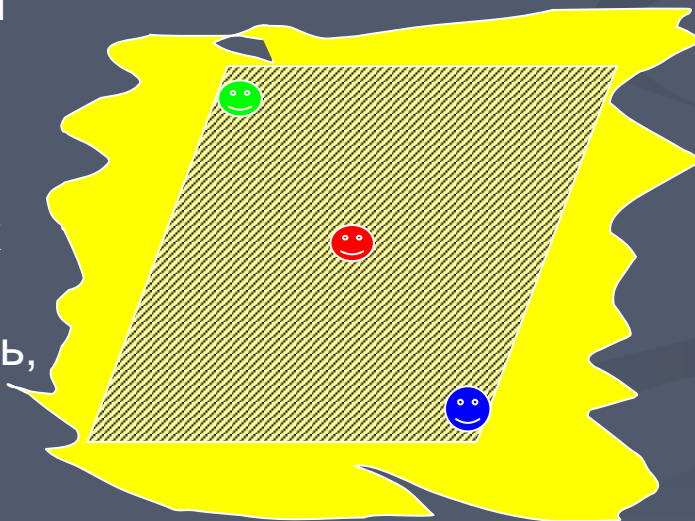


Для наблюдений нам доступна конечная область пространства, но вселенная там не заканчивается.

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?

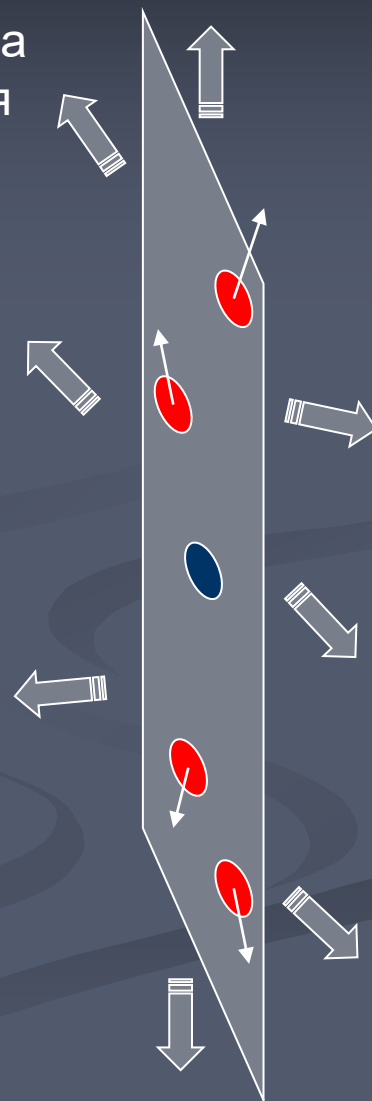
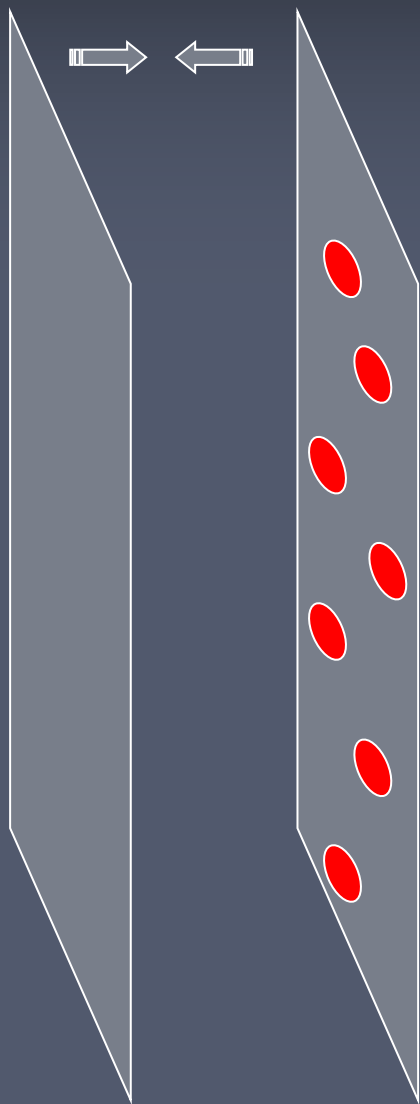


Мы не можем сказать, насколько вселенная больше той области, которую мы можем сейчас наблюдать.

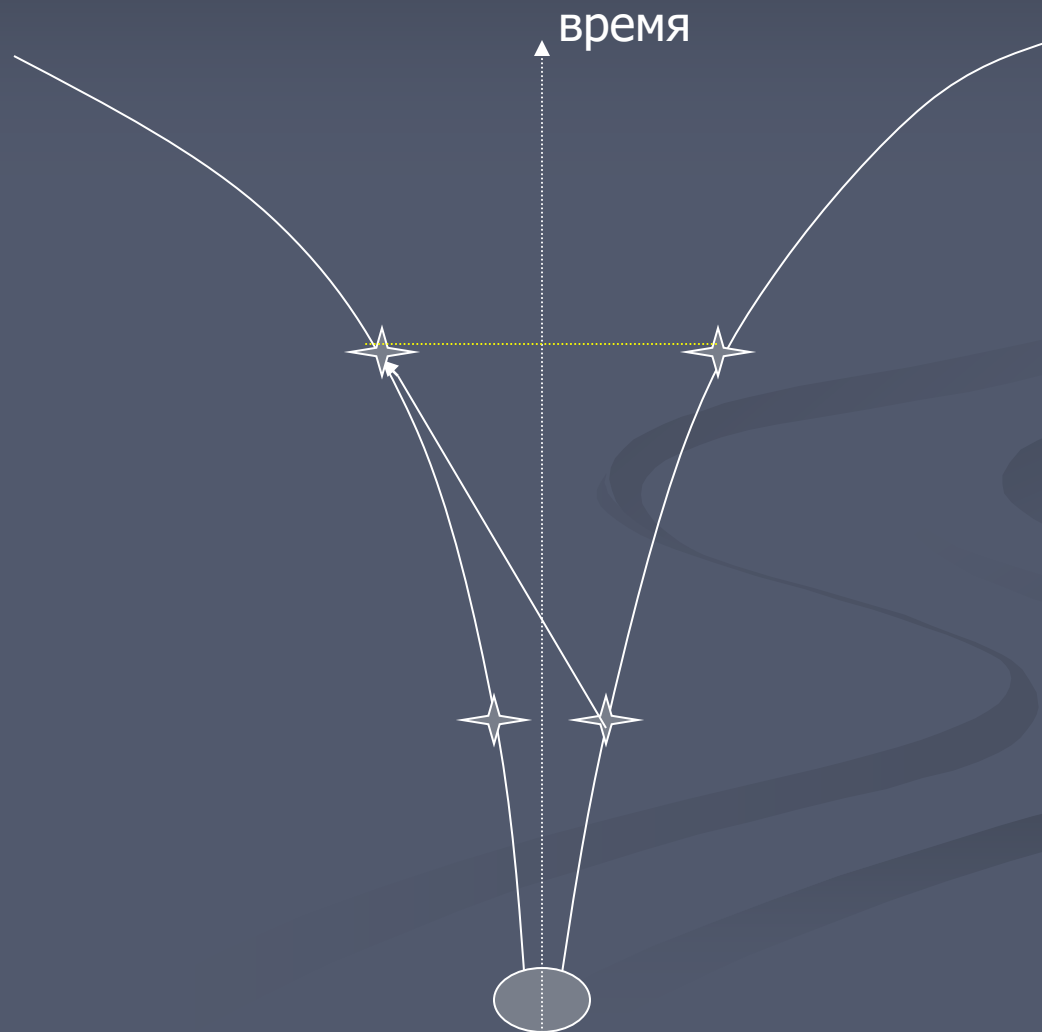
Простая иллюстрация

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

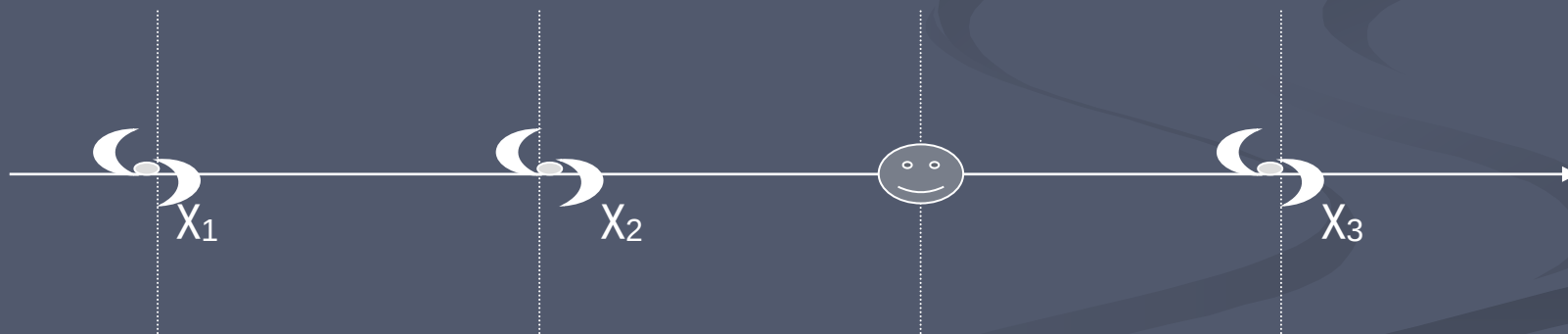
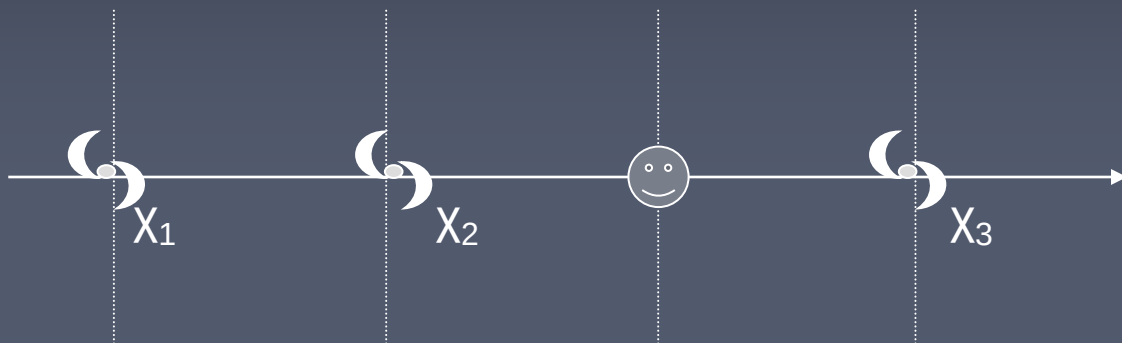
Важно, что уже в «момент ноль» вселенная может иметь конечный размер или даже сразу быть бесконечной.



Особенности в космологии

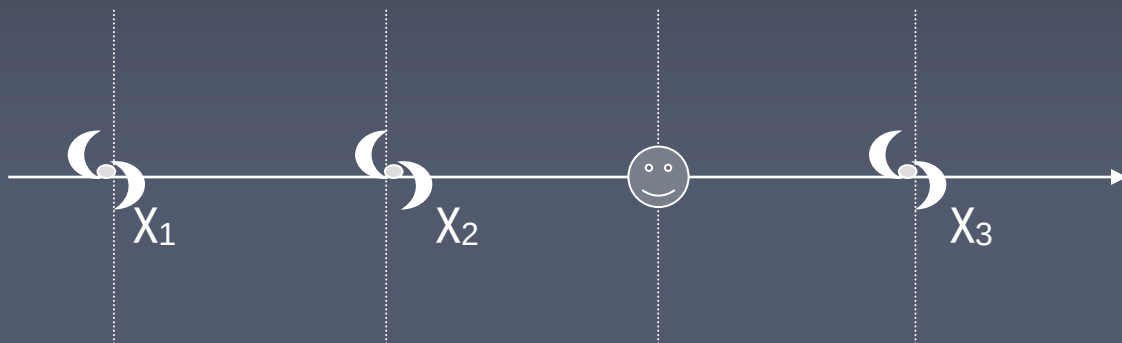


Сопутствующее расстояние

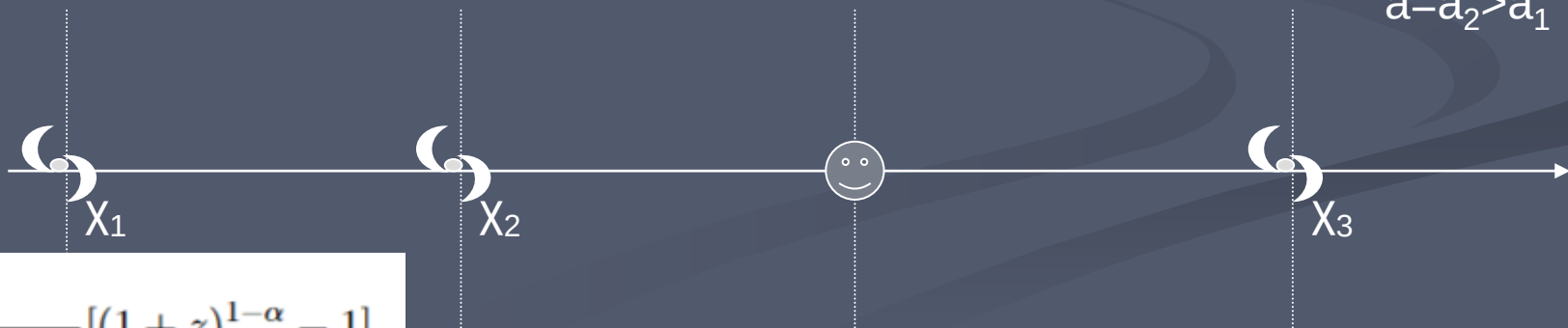


Собственное расстояние

$$d = a\chi$$



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

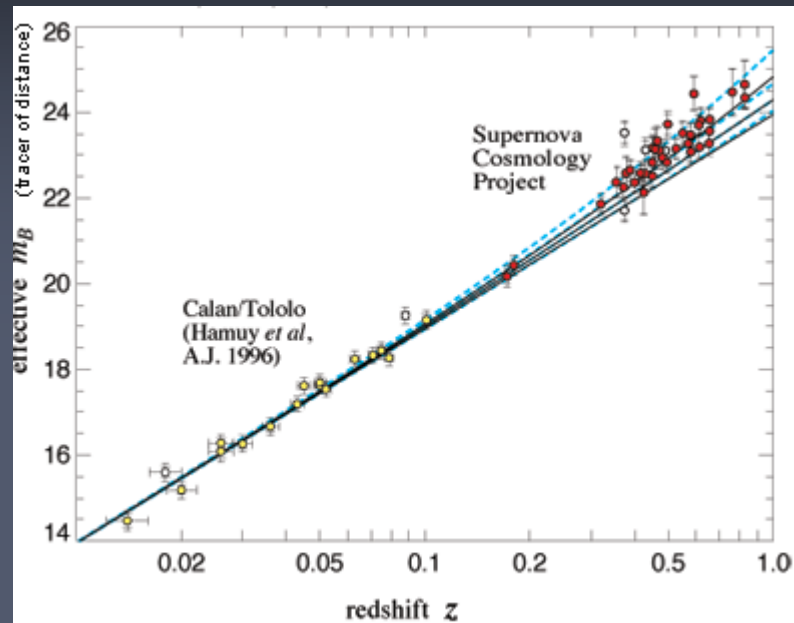


$t = t_2 > t_1$
 $a = a_2 > a_1$

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

$d \sim z$ при $z \approx 0$

Закон Хаббла



$$v = H d$$

H – постоянная Хаббла.

$$72 \pm 2 \text{ км/с/Мпк}$$

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

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

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

$$dd = a(t) dl$$

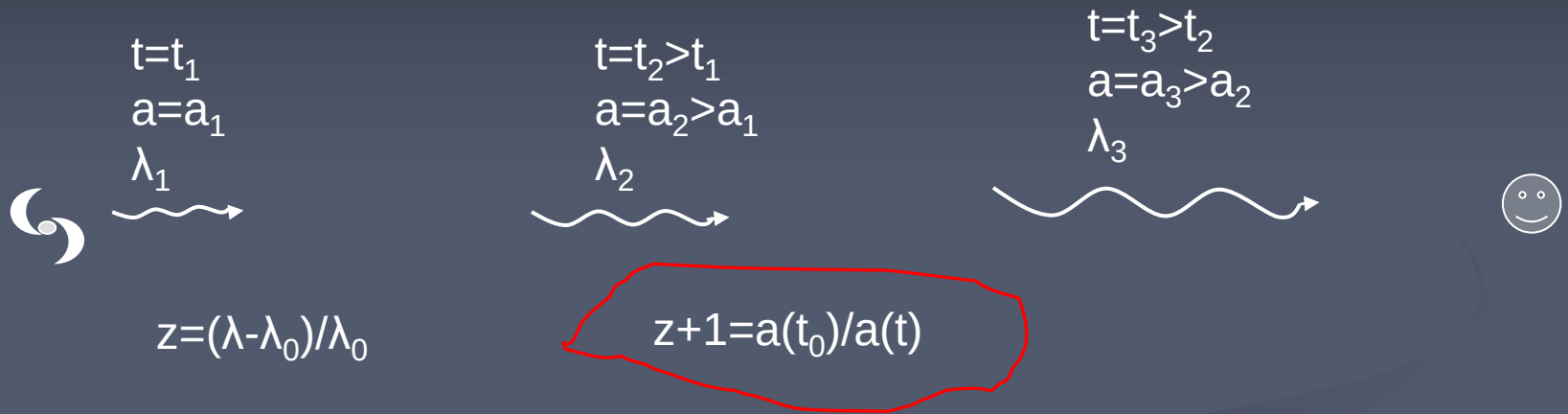
$$d = a(t) \int dl = a\chi$$

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

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Релят. материя:} & \rho_r(z) = \rho_r(0)(1+z)^4, \\ \text{Нерелят. материя:} & \rho_m(z) = \rho_m(0)(1+z)^3, \\ \text{Кривизна:} & \rho_c(z) = \rho_c(0)(1+z)^2, \\ \text{Вакуум:} & \rho_\Lambda(z) = \text{const} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

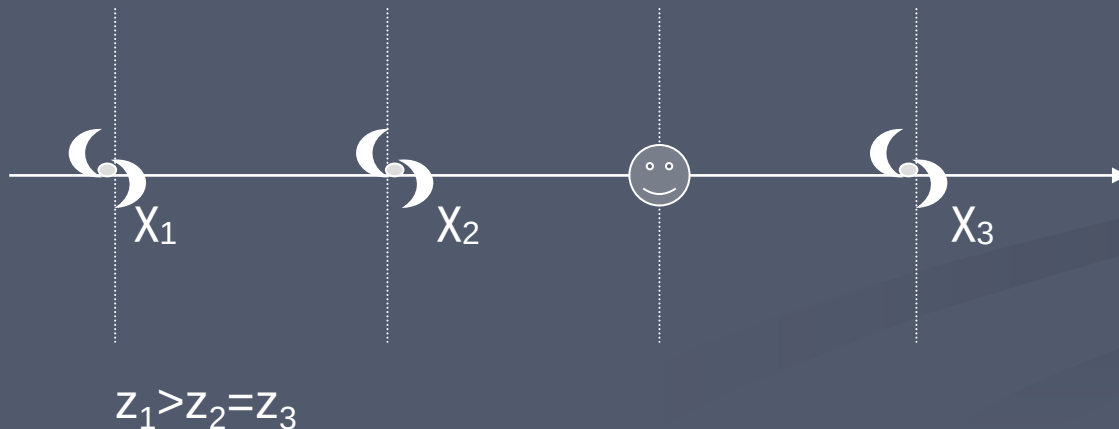
$$H^2(z) = H_0^2 \left(\Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_c(1+z)^2 + \Omega_\Lambda \right)$$

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?

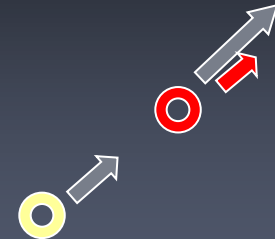
- Закон Хаббла.

Пространство расширяется везде одинаково.

Скорость пропорциональна расстоянию.

- Темп расширения меняется медленно.

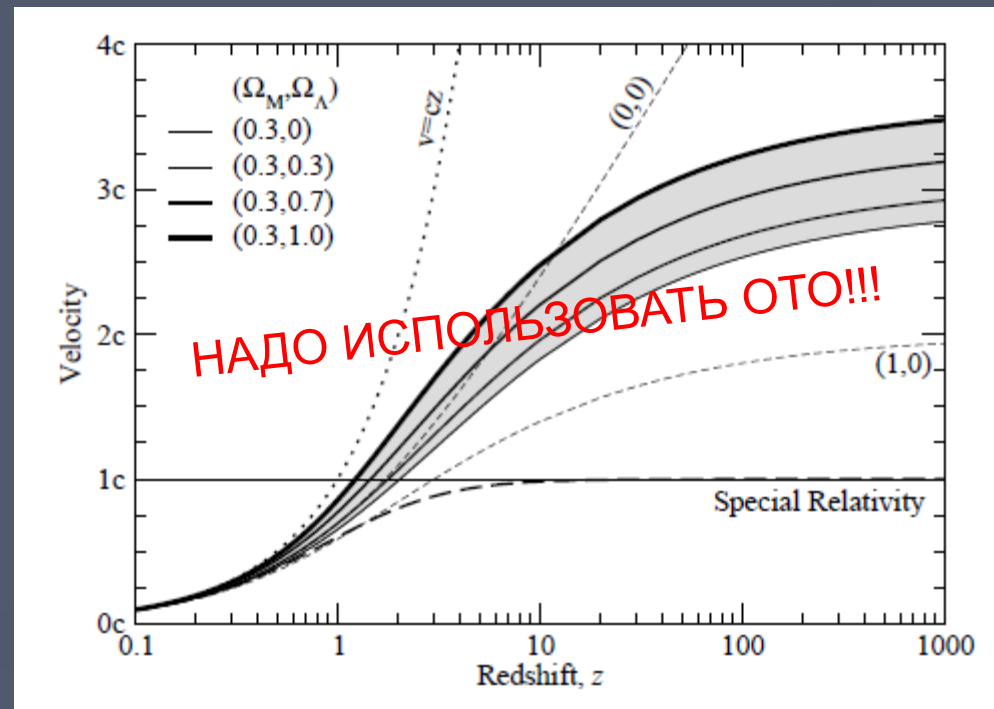
Поэтому для близких галактик он примерно одинаков.



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 ($p \sim T^4$)
- 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

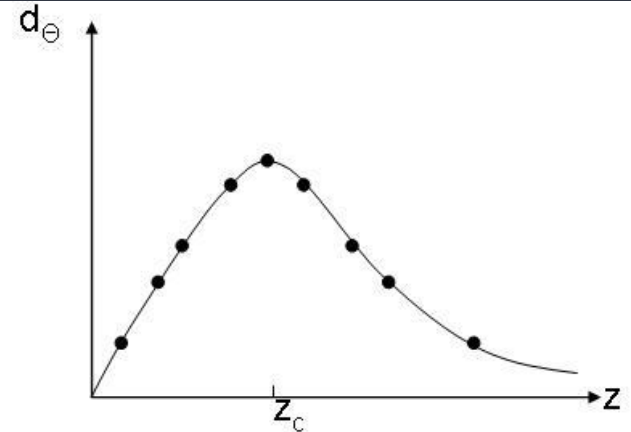
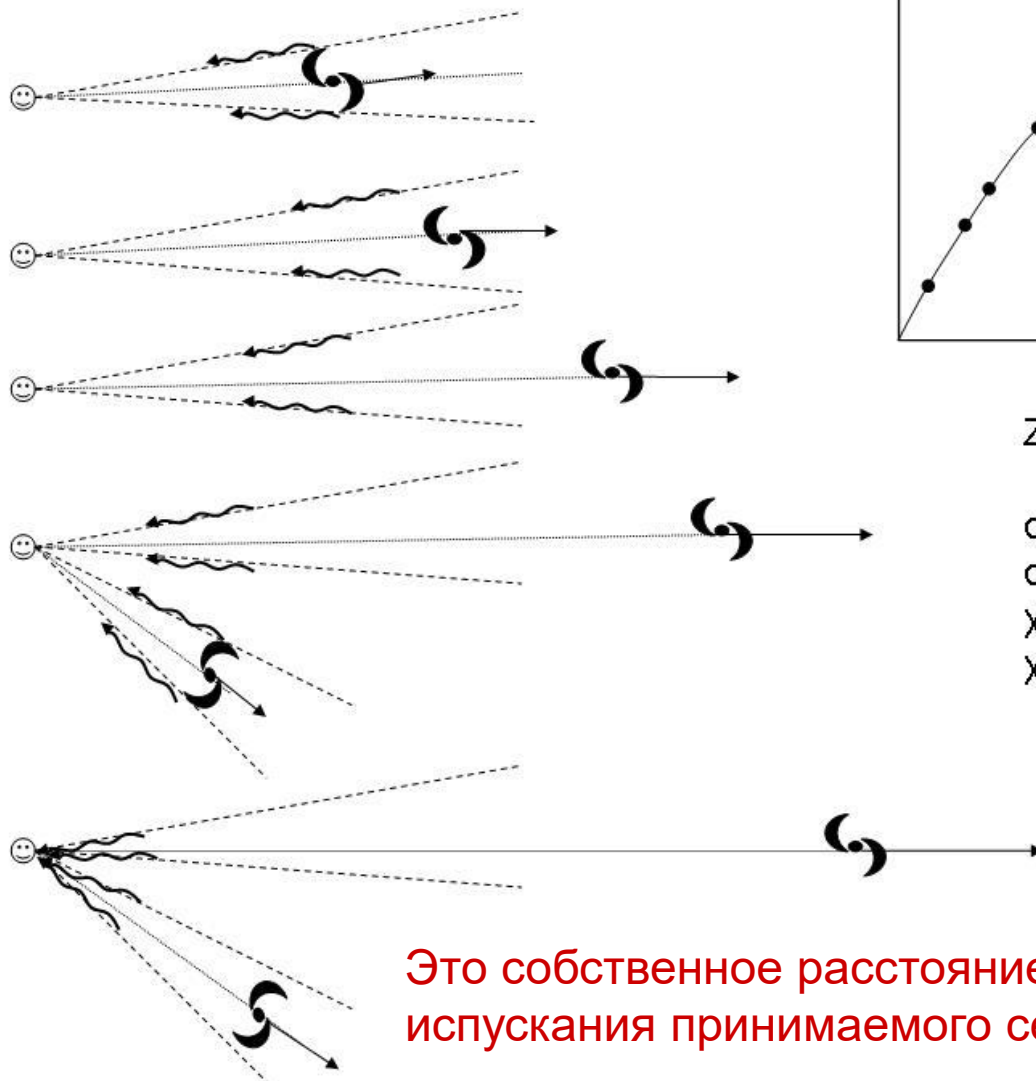
Размер s



α



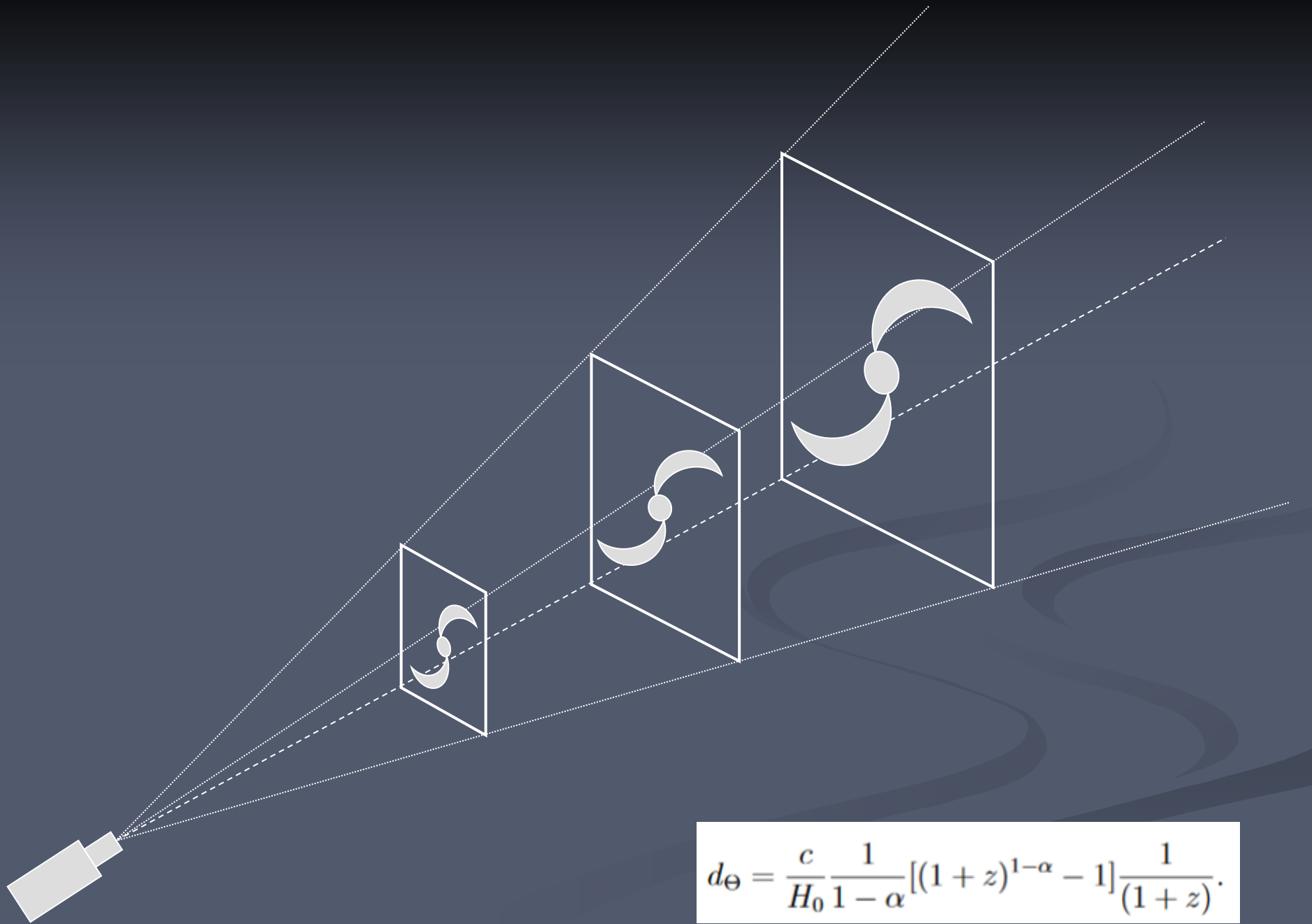
$$d = s / \tan \alpha$$



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

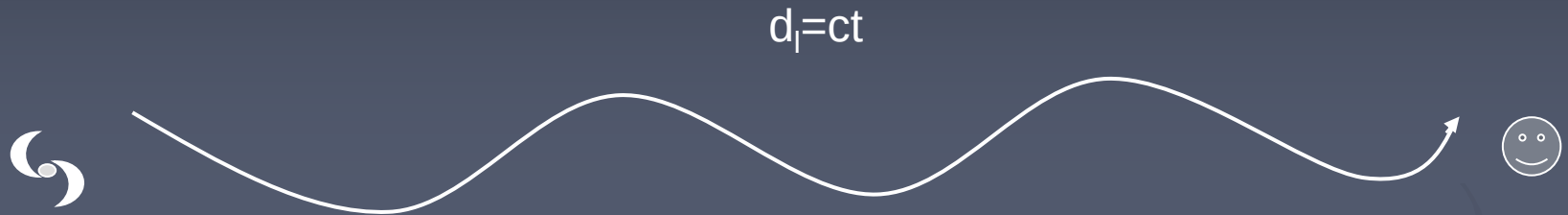
$$\begin{aligned} d_{\theta 1} &= d_{\theta 2} \\ d_{em1} &= d_{em2} \\ \chi_1 a(t_{em1}) &= \chi_2 a(t_{em2}) \\ \chi_1 > \chi_2, a(t_{em1}) &< a(t_{em2}) \end{aligned}$$

Это собственное расстояние на момент
испускания принимаемого сейчас излучения!



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

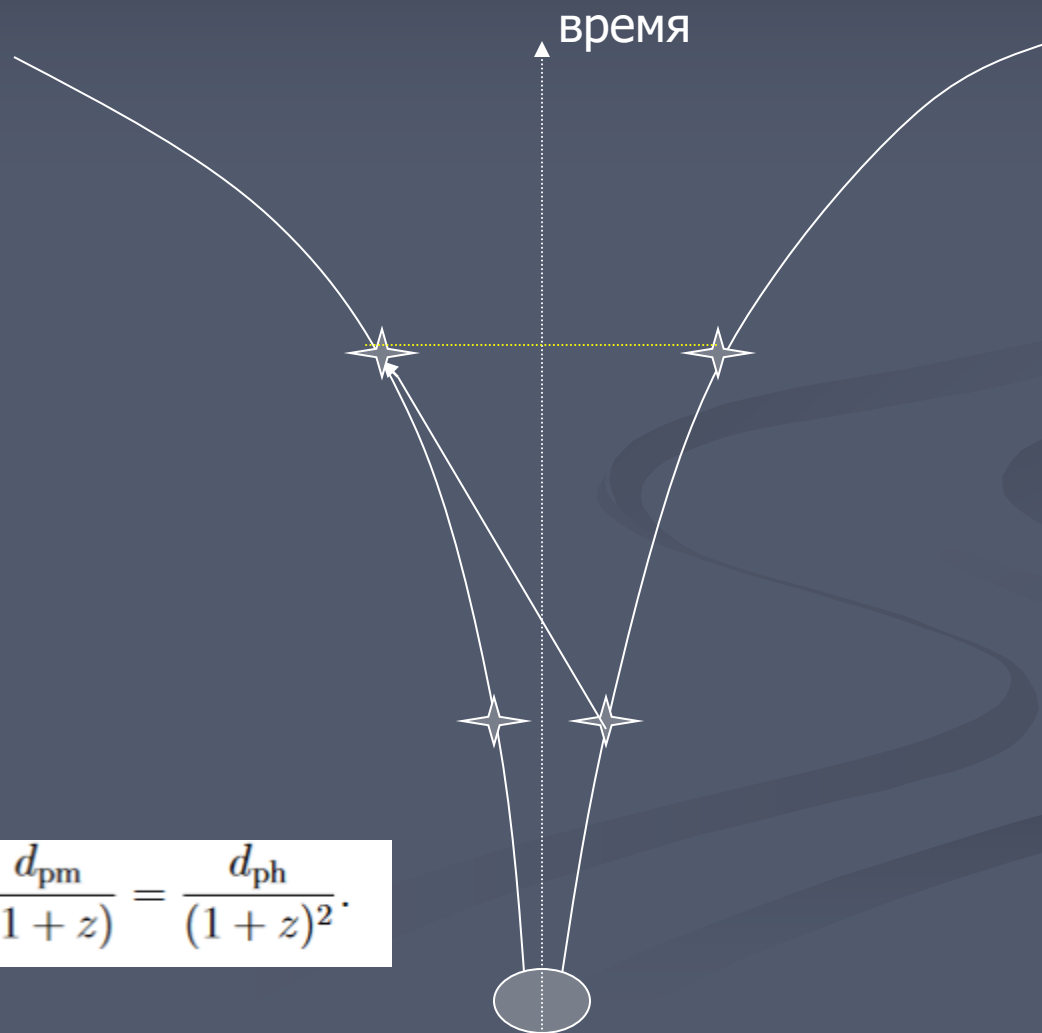
Время путешествия фотона



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

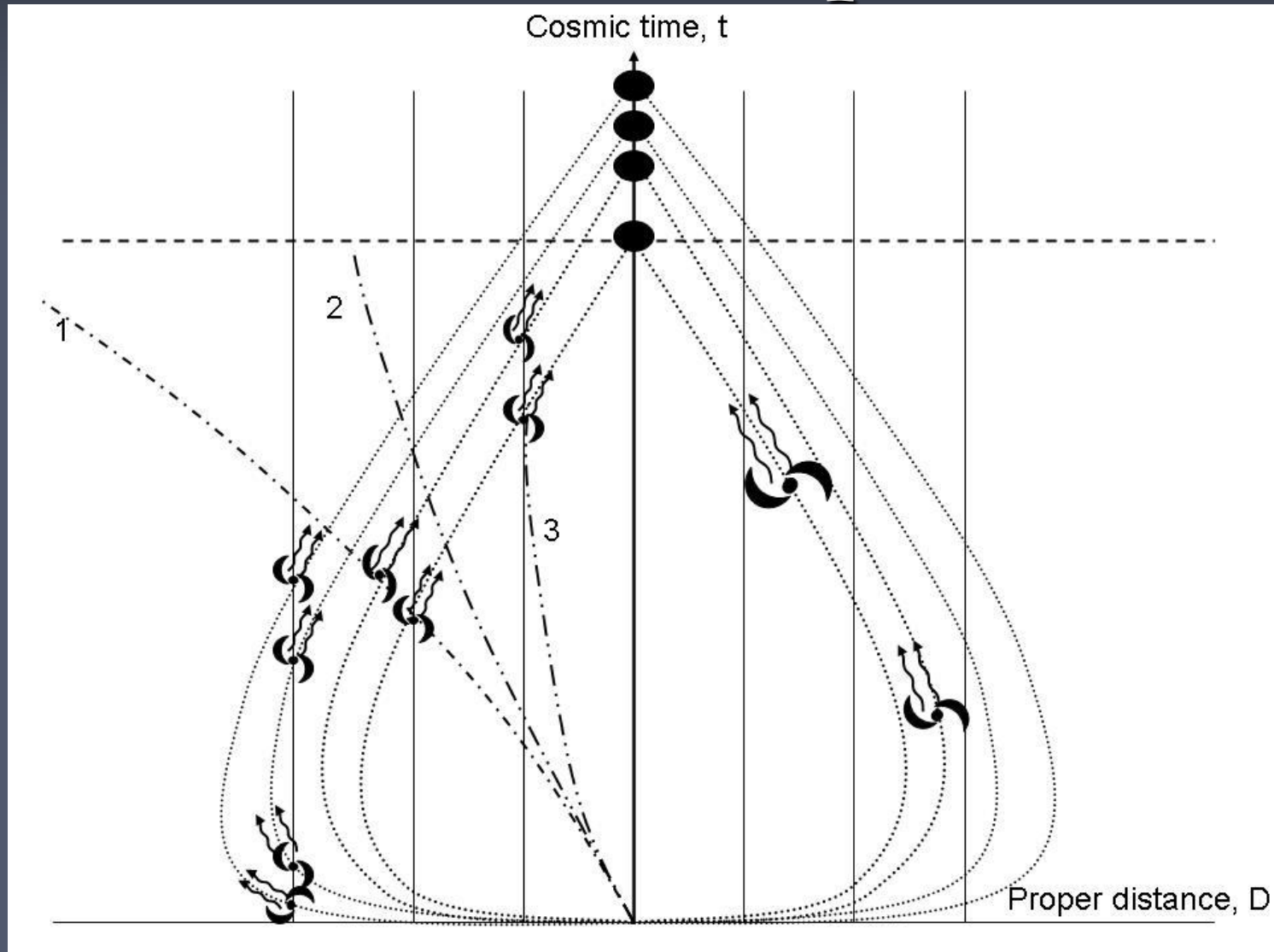
Но пока свет шел – вселенная расширялась!
Поэтому, если свет идет из точки А в точку Б,
то на момент прибытия расстояние между А и Б
будет больше чем просто произведение ct !

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

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

$$\rho = \rho_m(a) = \frac{\rho_{m0}}{a^3},$$

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

$$\Omega_m \equiv \frac{\rho_{m0}}{\rho_c} = \frac{8\pi G}{3H_0^2}\rho_{m0};$$

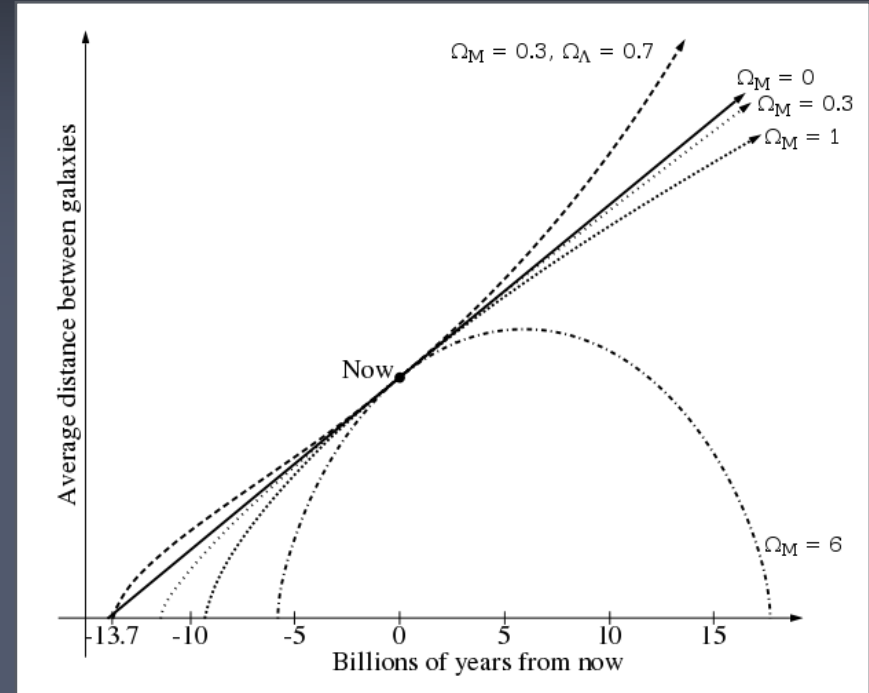
Кривизна: $k = -1, 0, 1$

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

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

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

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



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

70	H_0
0.3	Ω_{M}
1.5	z
Open	Flat
0.7	Ω_{vac}
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 Gpc^3 .
- 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.

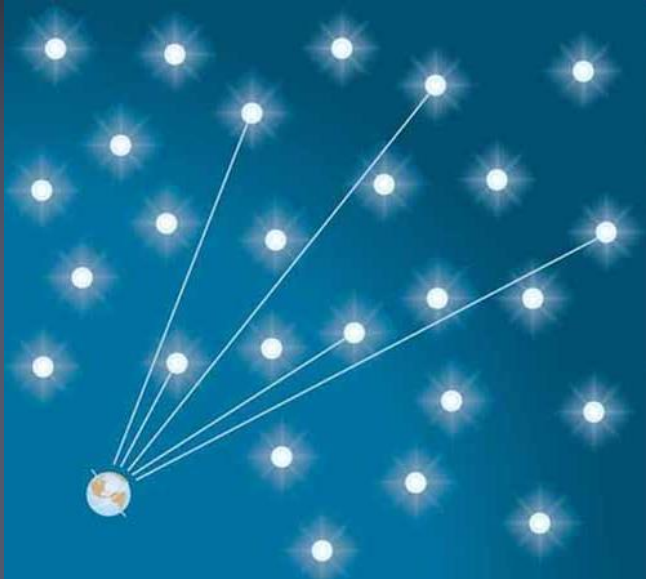
1 Gly = 1,000,000,000 light years or 9.461×10^{26} cm.

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

1 Mpc = 1,000,000 parsecs = 3.08568×10^{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.

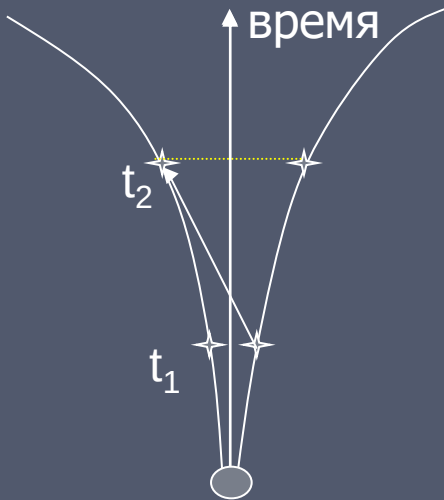
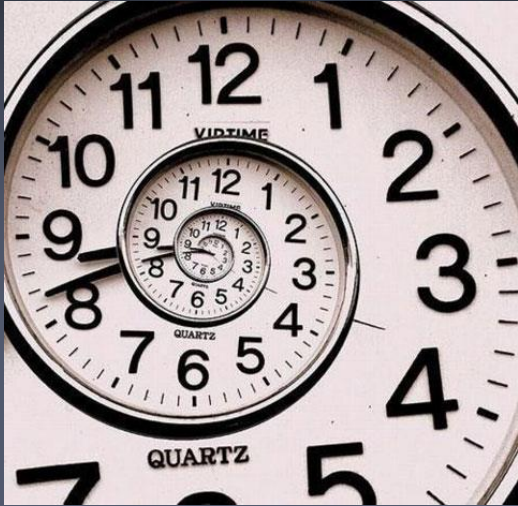
Темнота ночного неба
объясняется конечным
возрастом вселенной и
расширением вселенной!

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

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.



Скорость расширения

У нас есть разные определения расстояний и как минимум два определения времени («космическое» и по часам наблюдателя), значит, мы можем определять скорости разными способами.

Скорость это всегда изменение расстояния за данный промежуток времени.

Разные скорости иллюстрируют разные аспекты расширения вселенной.

Важно, что скорость удаления далекой (и при этом наблюдаемой) галактики не связана ограничением $v < c$, т.к. локально галактика покоится.



Что значит «быстрее света»?

v — скорость удаления

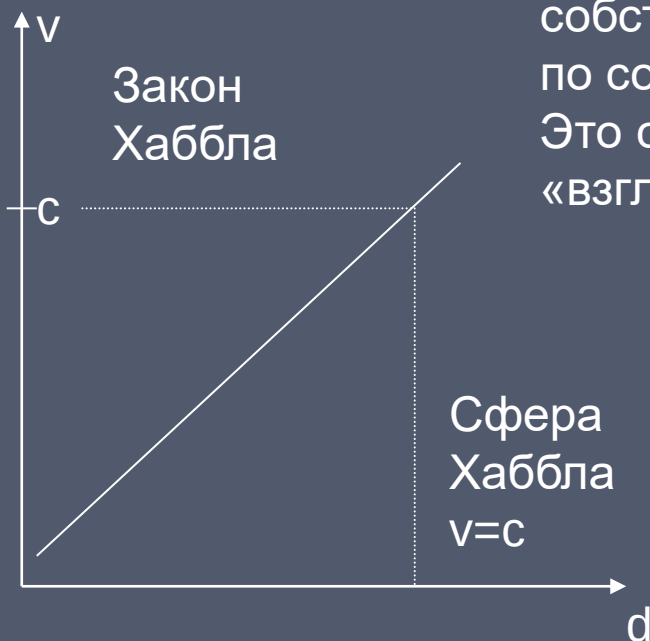
$v > c$



(скорости складываются по галилеевскому закону, не надо применять здесь релятивистский закон из СТО)

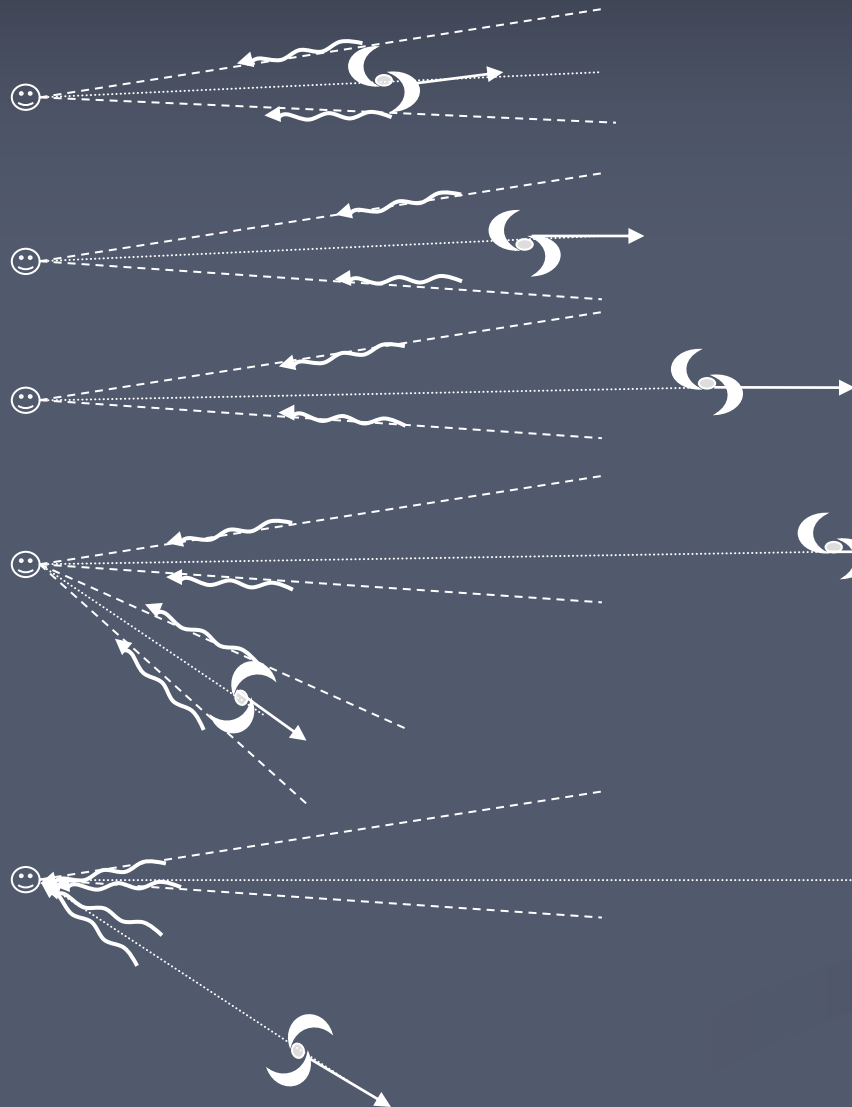
Свет же удаляется со скоростью $v + c > v > c$

Речь идет о скорости изменения собственного расстояния по собственному времени. Это соответствует «взгляду бога».



Скорость по угловому расстоянию

Это наблюдаемая величина. Мы можем определить ее по своим часам.



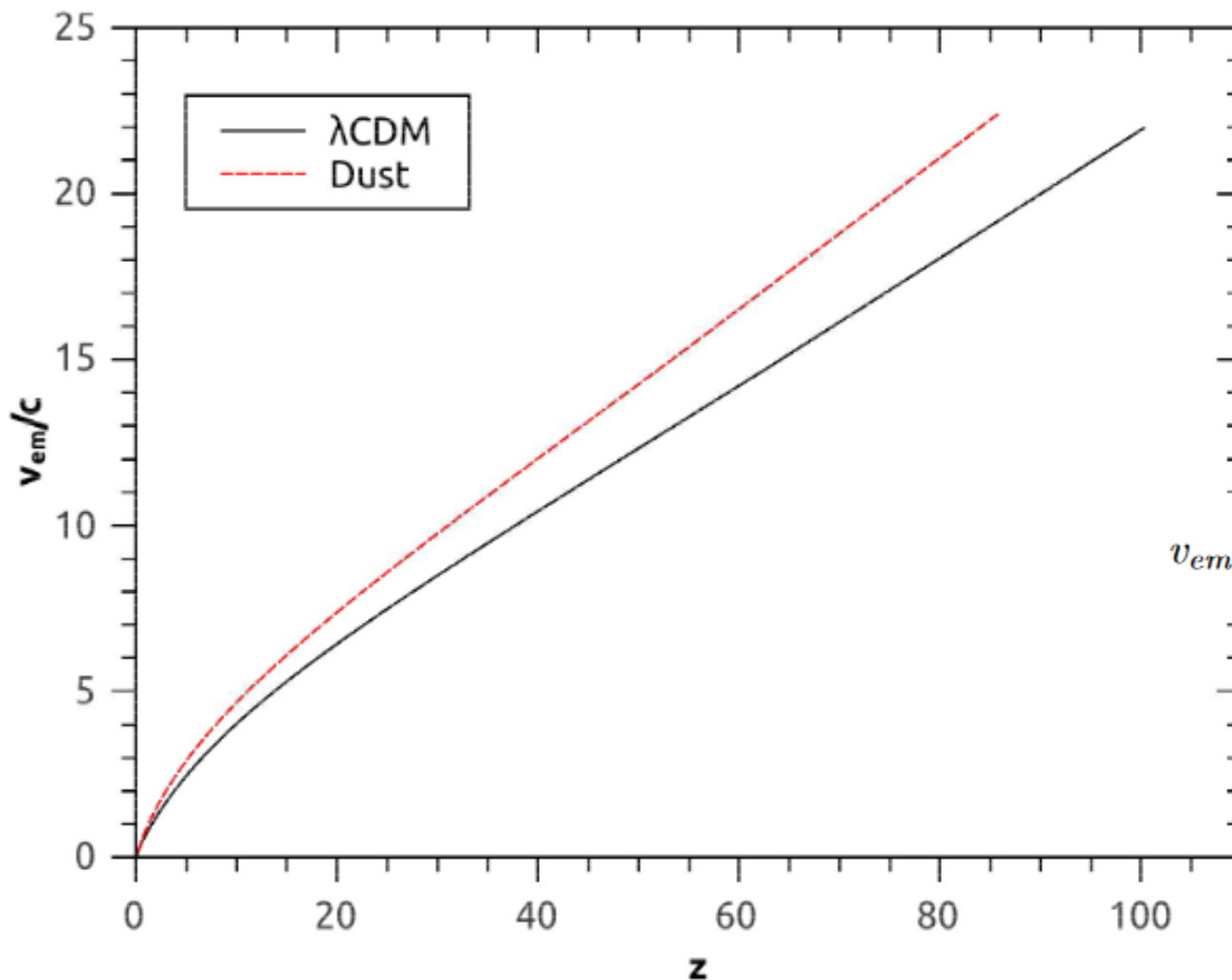
Такая скорость имеет такой смысл: она показывает, с какой скоростью удалялась от нас галактика в момент, когда было испущено излучение, которое мы сейчас принимаем, но по нашим часам. Для нее не действует закон Хаббла.

Три скорости

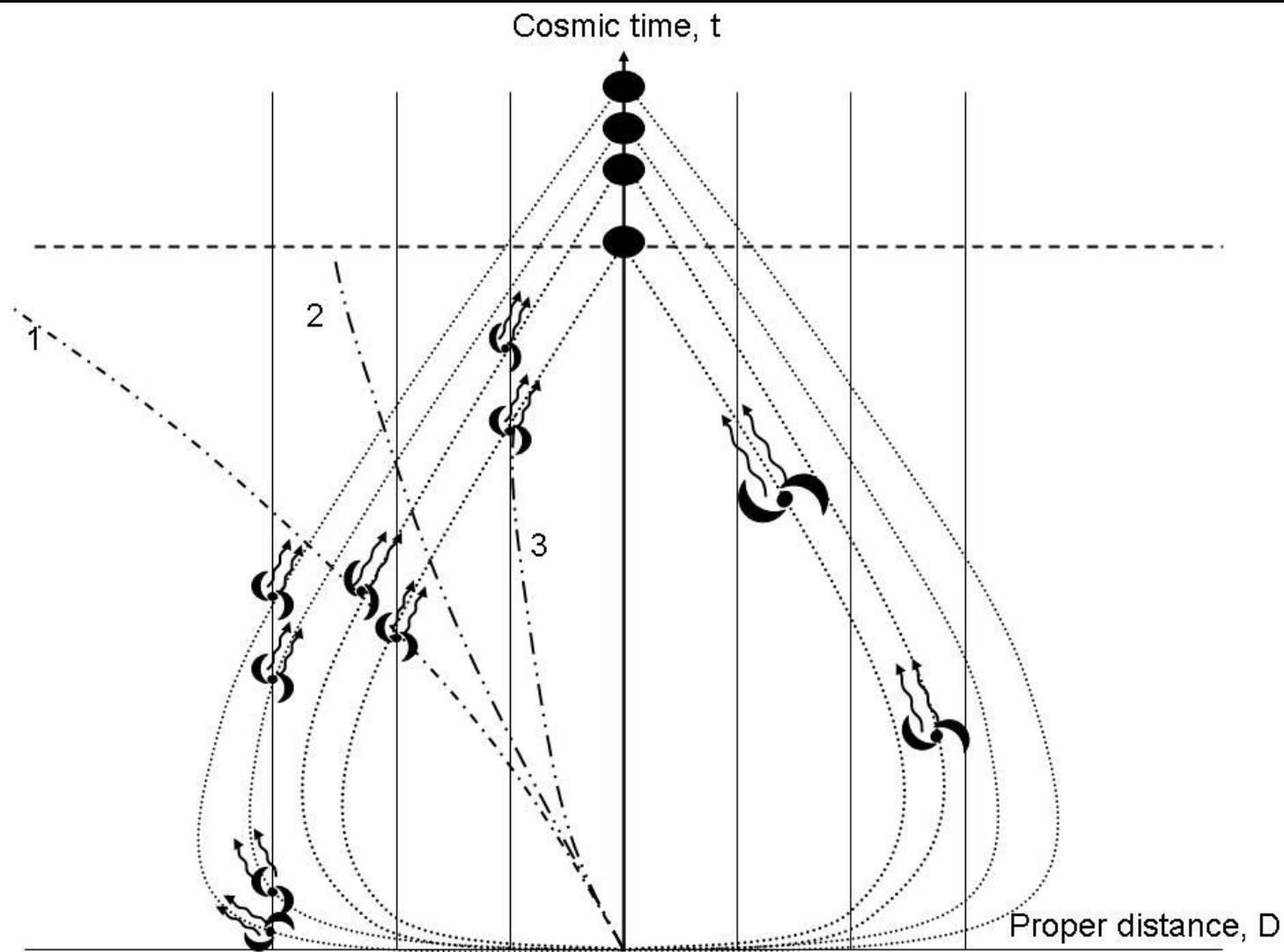


Все три могут быть больше c

Скорость в момент испускания



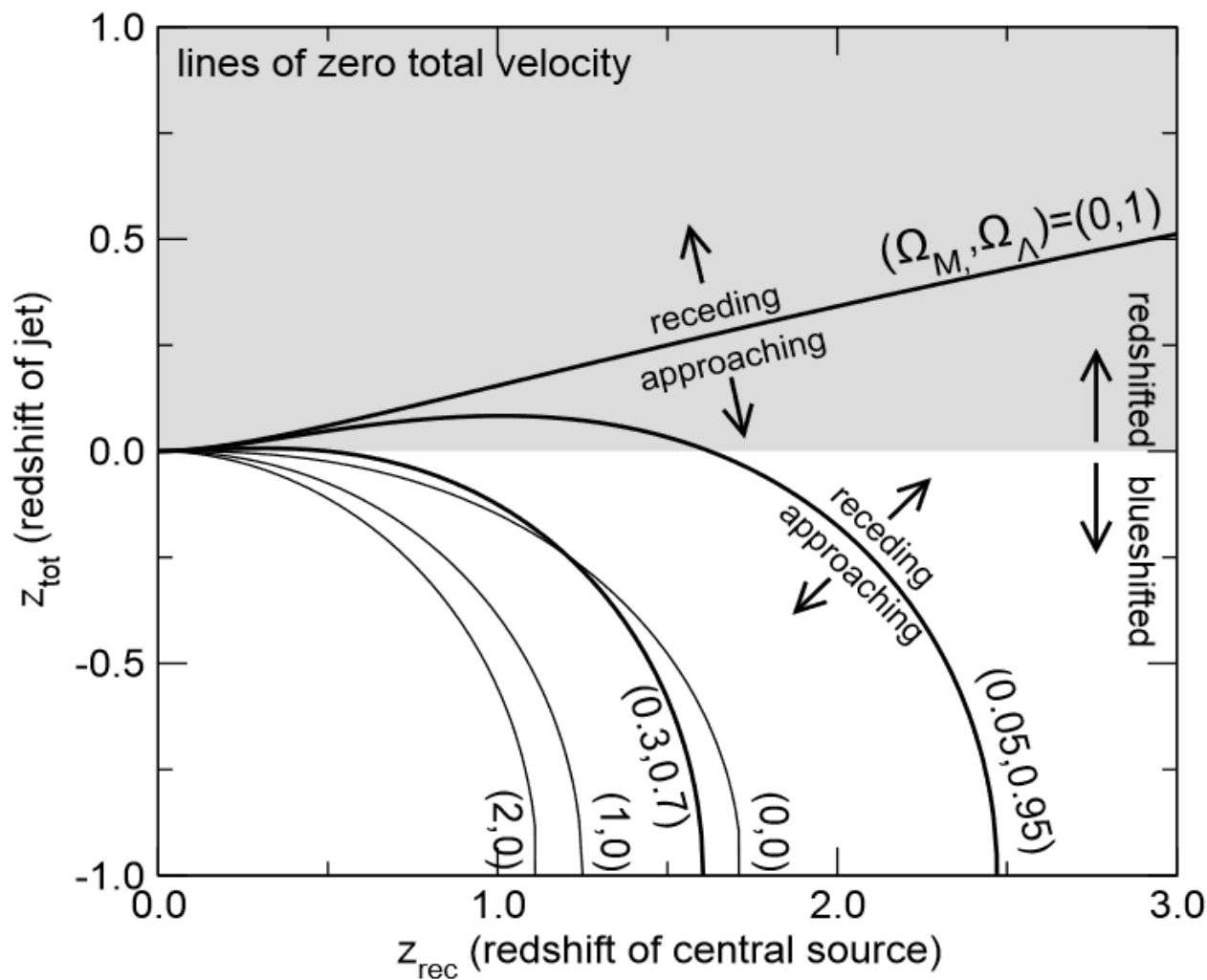
$$v_{em} = \frac{c}{1-\alpha} [1 - (1+z)^{\alpha-1}].$$



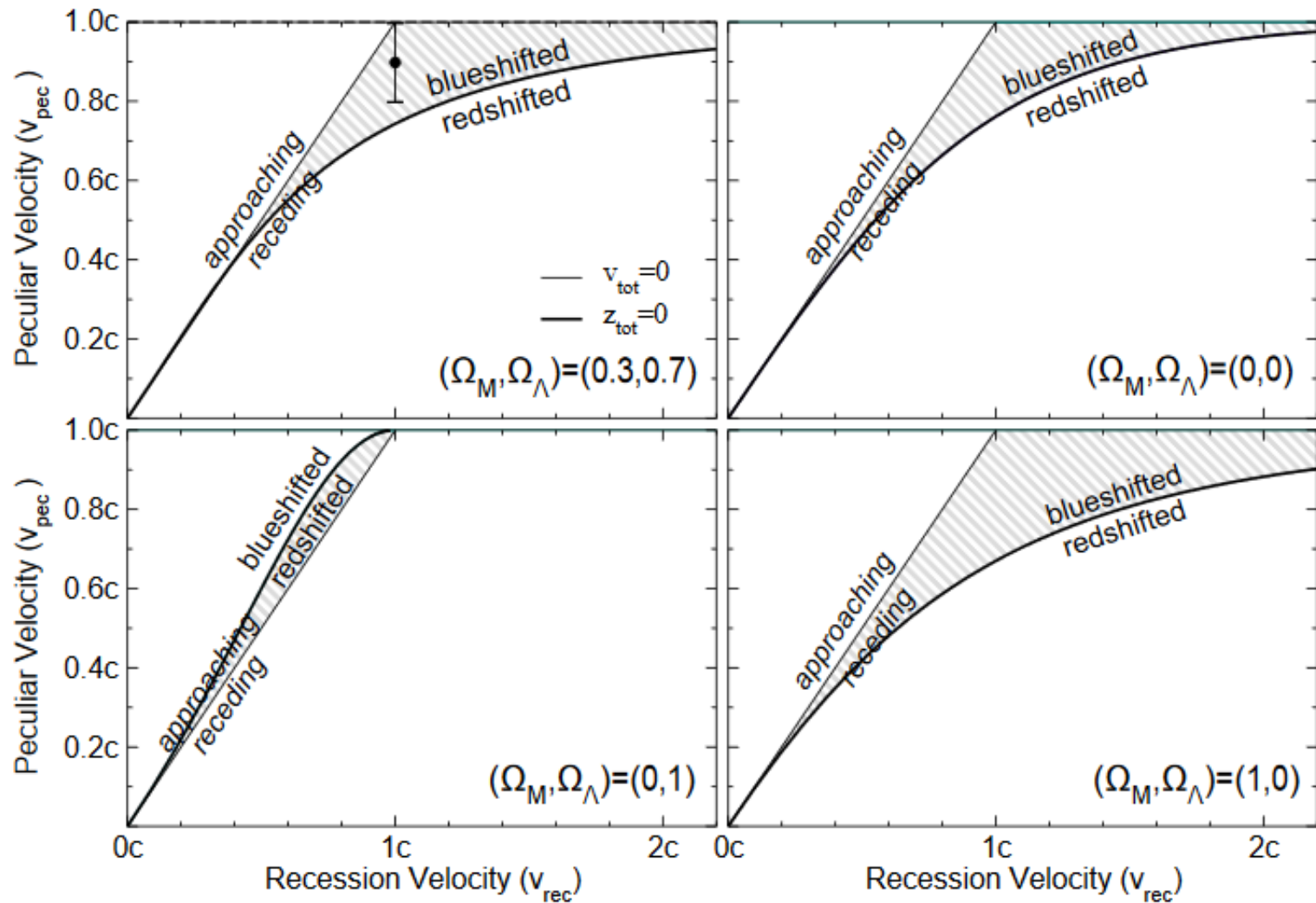
$$v_{\text{now}} = \frac{c}{1-\alpha} [(1+z)^{1-\alpha} - 1],$$

$$v_{\text{em}} = \frac{c}{1-\alpha} [1 - (1+z)^{\alpha-1}].$$

Джет из галактики

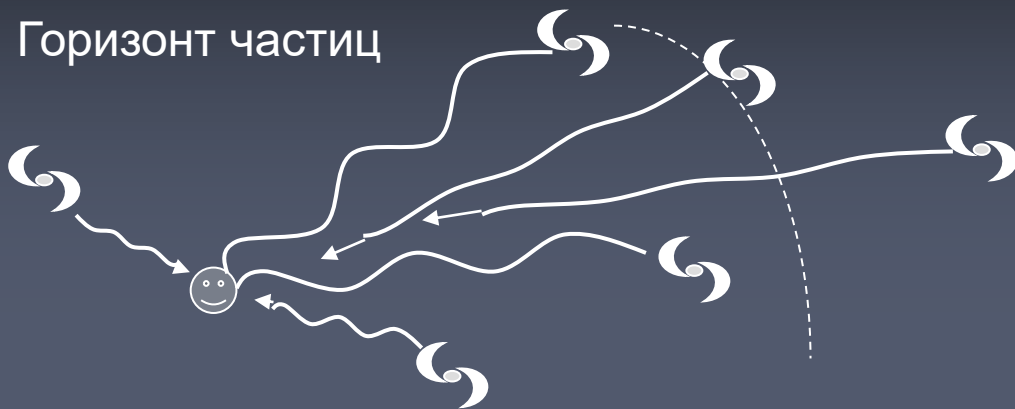


Расширение vs. пекулярное движение



Космические горизонты

1. Горизонт частиц



Этот горизонт соответствует самому далекому объекту, который мы сейчас видим.

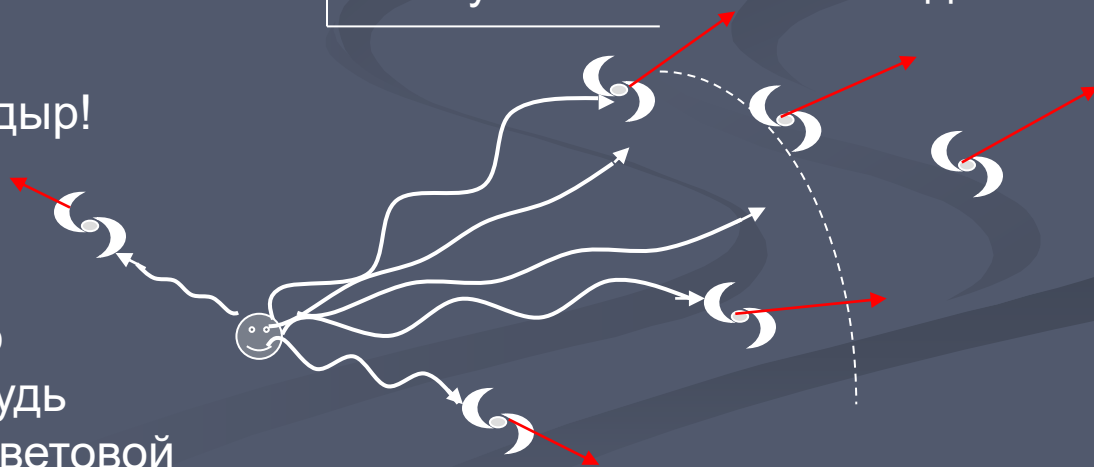
В реальных случаях важно помнить, что мы должны считать не от момента «ноль», а от момента, скажем, образования первых звезд или галактик, или испускания какого-то вида частиц.

Сколько свет прошел за время жизни вселенной.

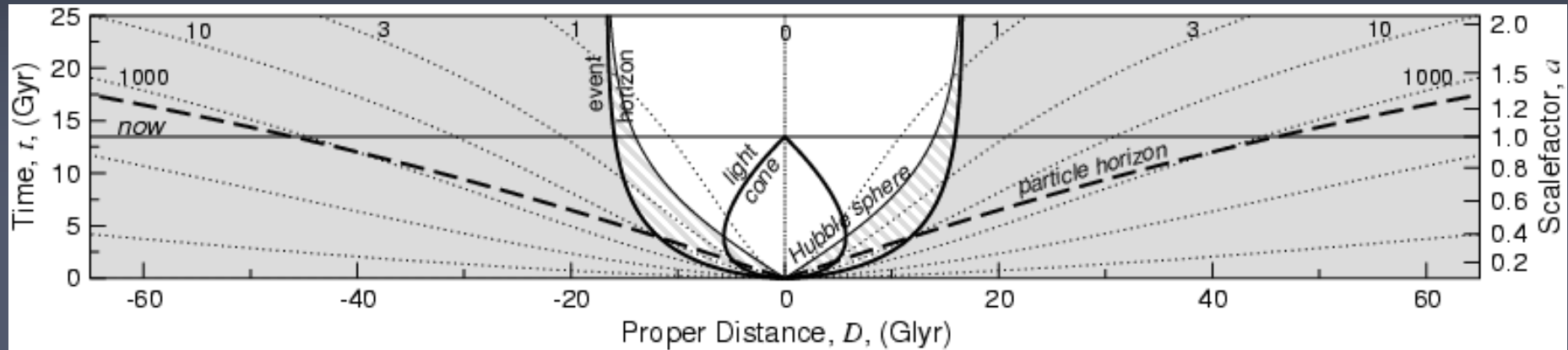
2. Горизонт событий

Он не совсем похож на
Горизонт событий у черных дыр!

Можно сказать, что горизонт событий — это расстояние до самого далекого объекта, до которого когда-нибудь в будущем сможет прийти наш световой сигнал, посланный сейчас.

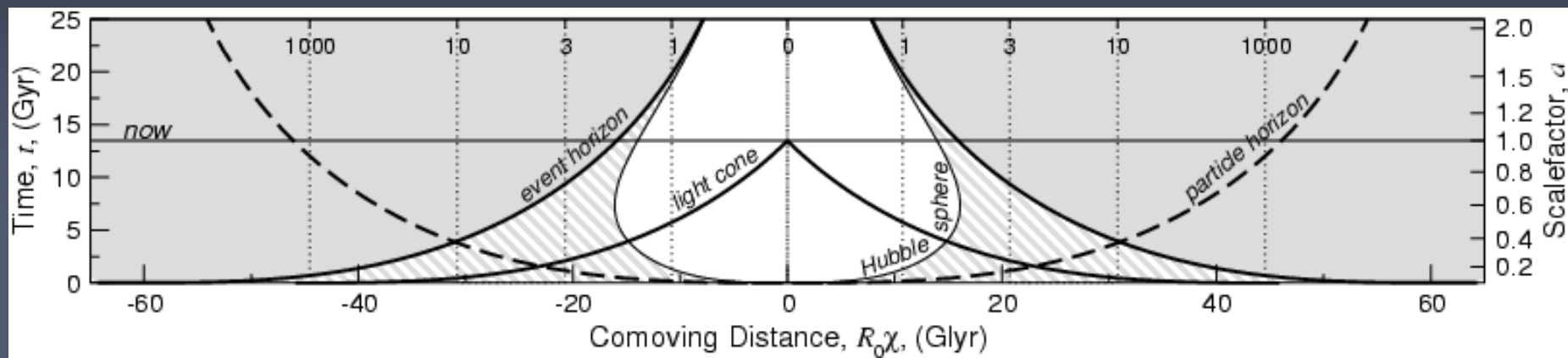


Горизонты и эволюция



Рисунки соответствуют стандартной на сегодняшний день космологической модели.

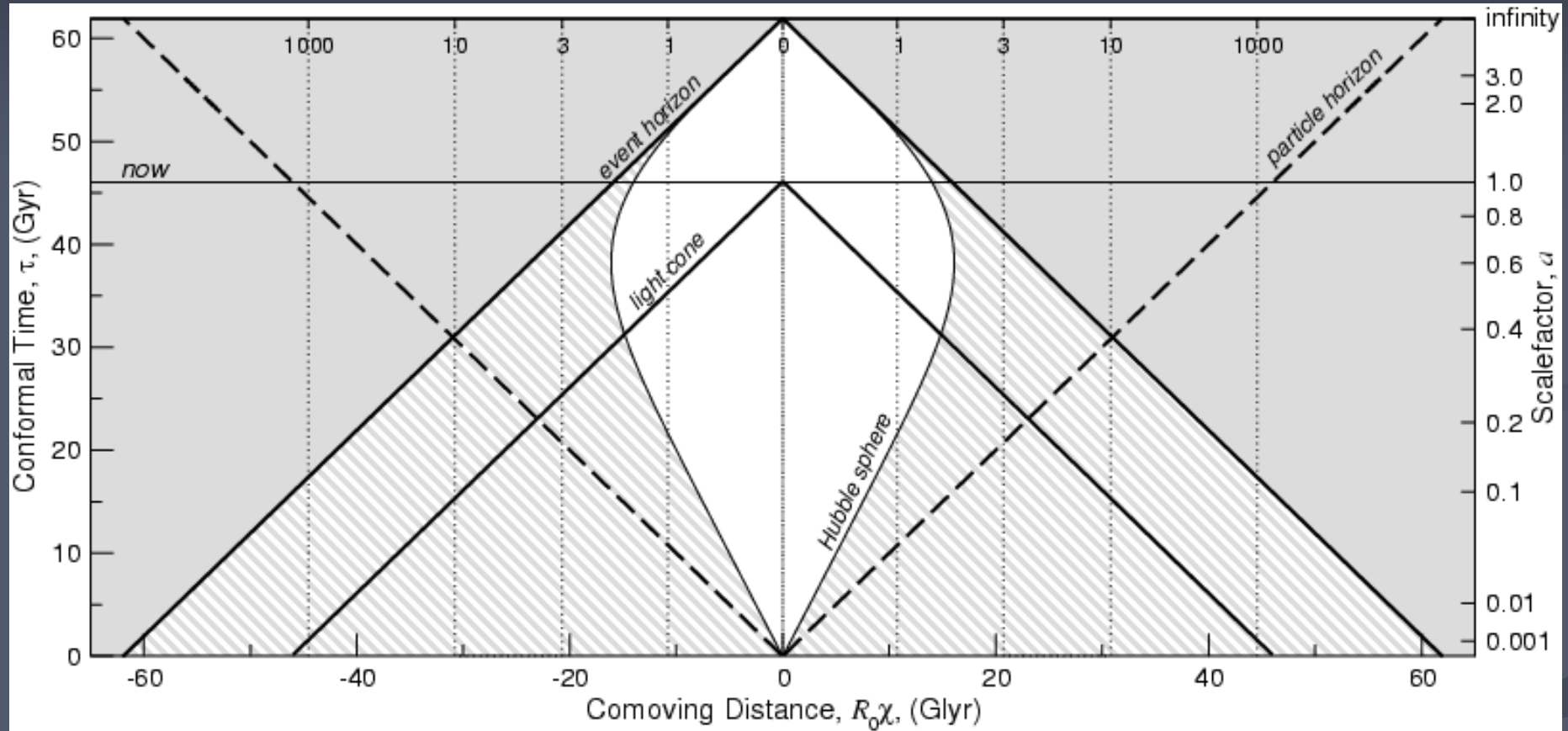
Сопутствующее расстояние



Рисунки соответствуют стандартной на сегодняшний день космологической модели.

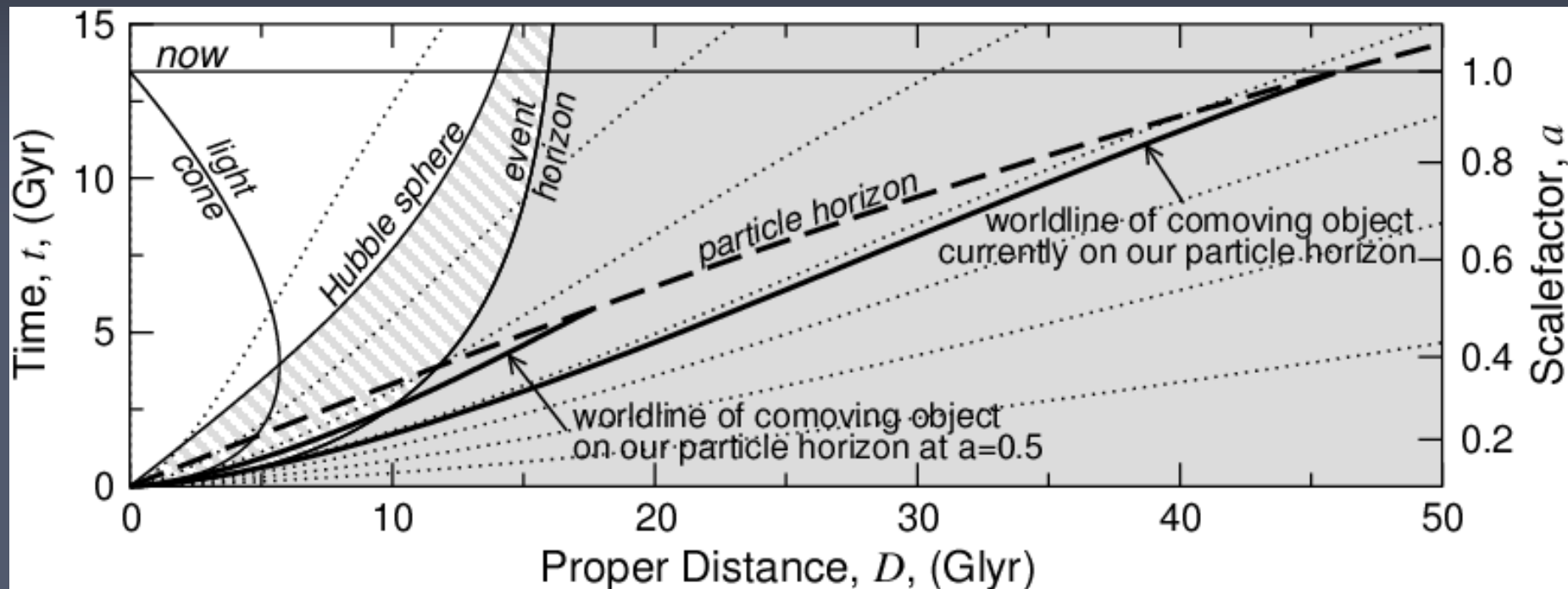
Конформное время

$$d\tau = dt/a(t)$$



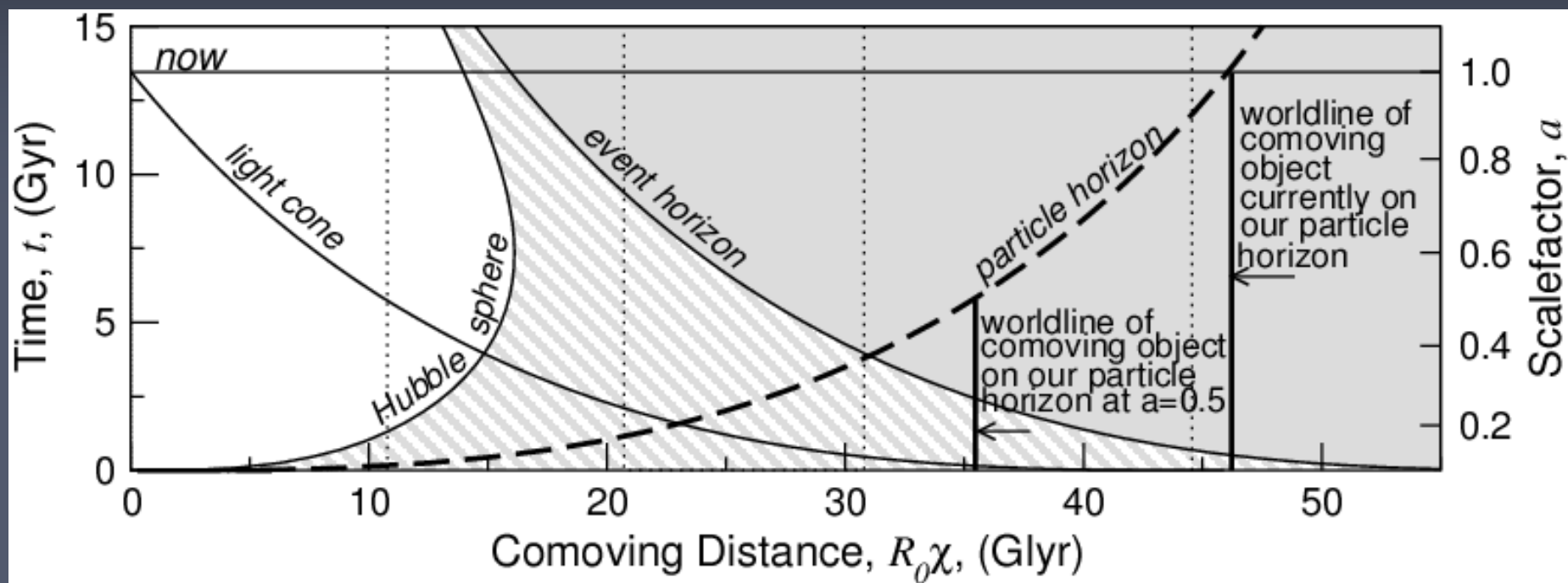
Рисунки соответствуют стандартной на сегодняшний день космологической модели.

В более мелких деталях ...



Рисунки соответствуют стандартной на сегодняшний день космологической модели.

... а теперь для сопутствующего...



Рисунки соответствуют стандартной на сегодняшний день космологической модели.

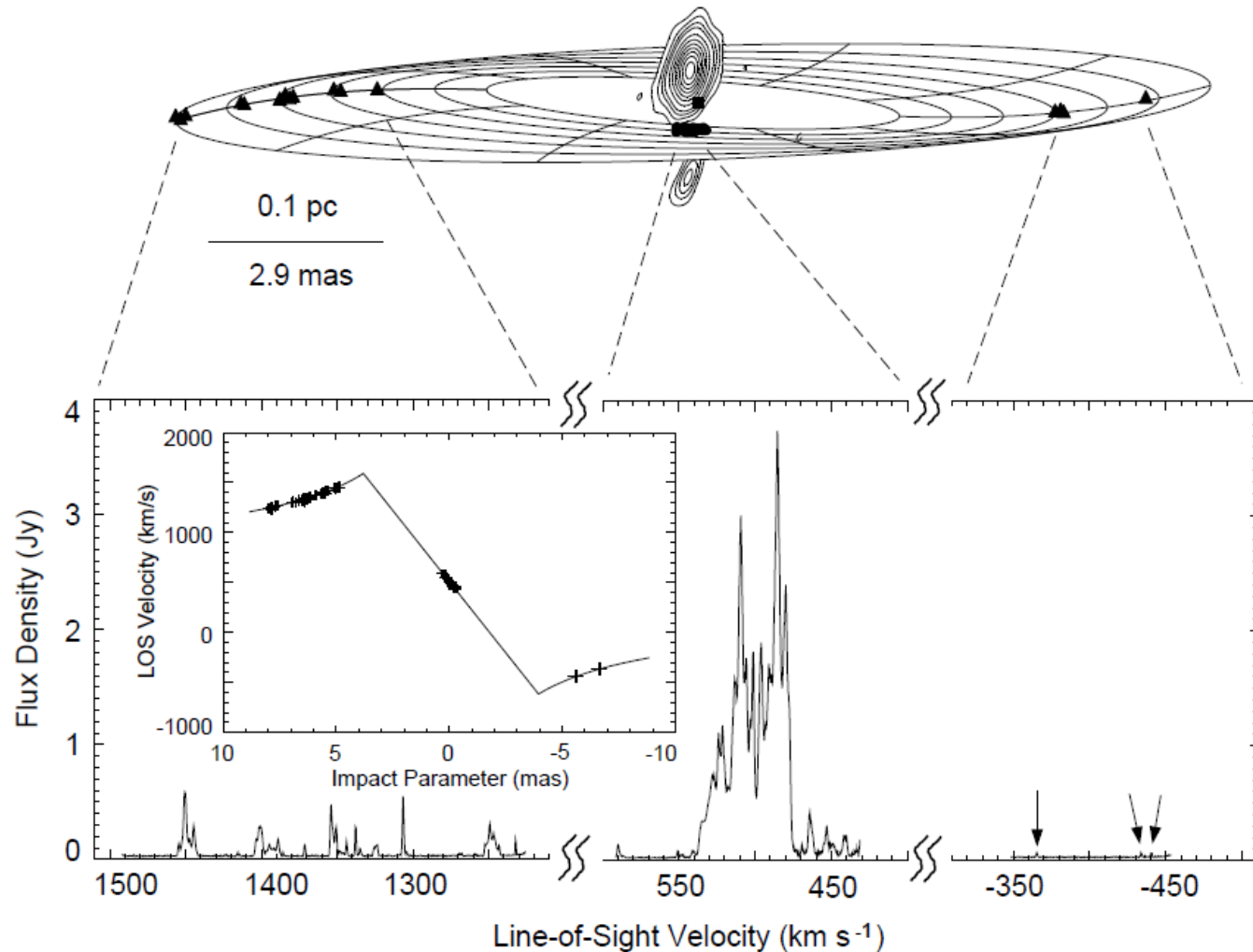
Как мы можем «увидеть» расширение вселенной?

- Изменение красного смещения
- Изменение фотометрического расстояния
- Изменение углового расстояния
- Изменение расстояния по собственному движению

Вероятнее всего первым будет зарегистрировано изменение красного смещения. Это потребует ввода нового поколения спектрографов на новых телескопах.

Затем, видимо, удастся увидеть изменение углового расстояния, измеряемого по наблюдениям мазерных источников (arXiv: 1207.7273, 1402.3590).

Расстояние и мазеры



Измеряют:

- Собственное движение
- Скорости
- Ускорение

Все вместе позволяет определить расстояние прямым геометрическим методом.

Это угловое расстояние.

Угловое расстояние

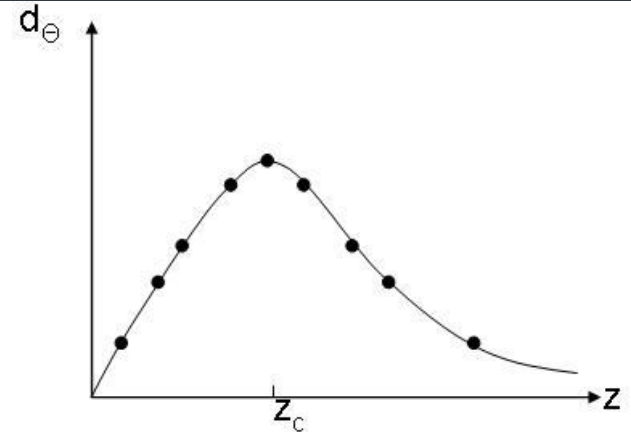
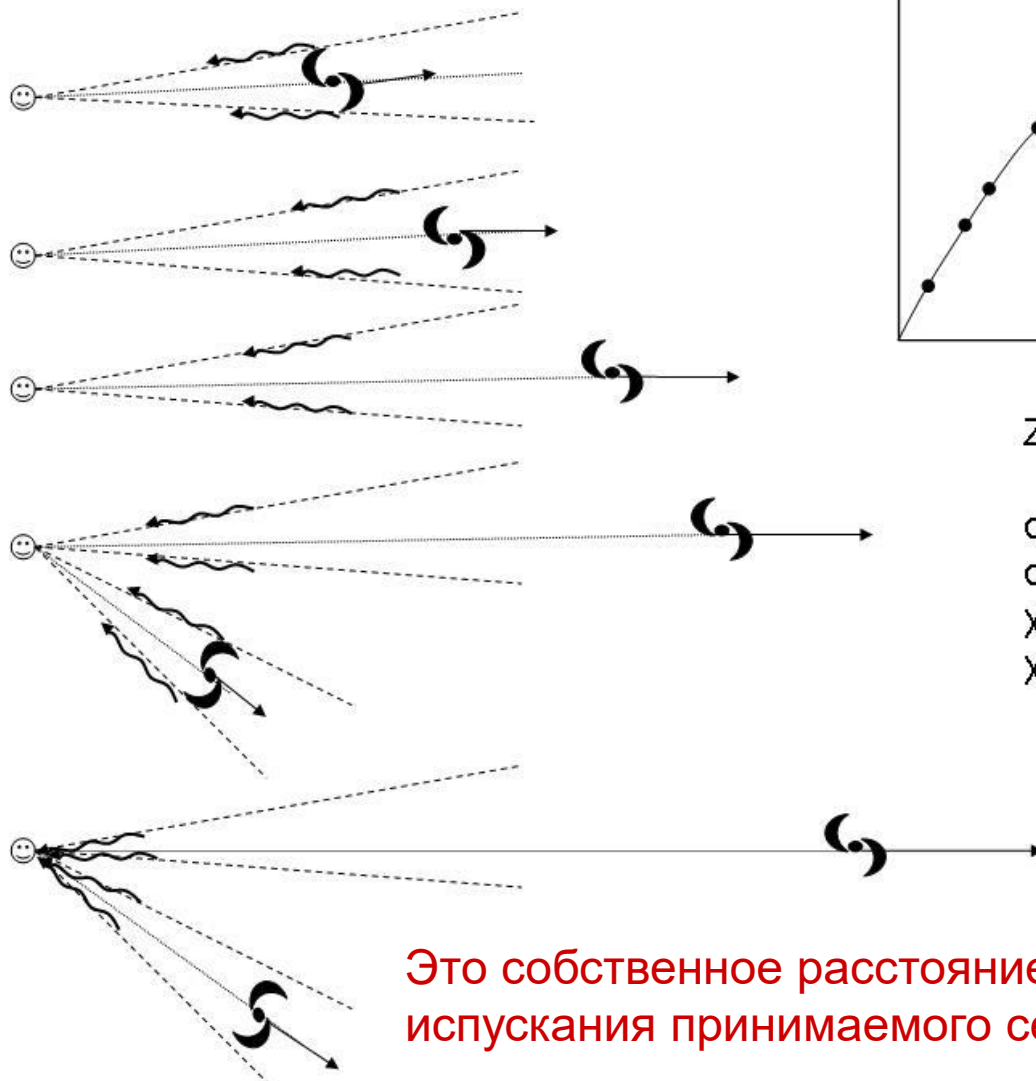
Размер s



α



$$d = s / \tan \alpha$$

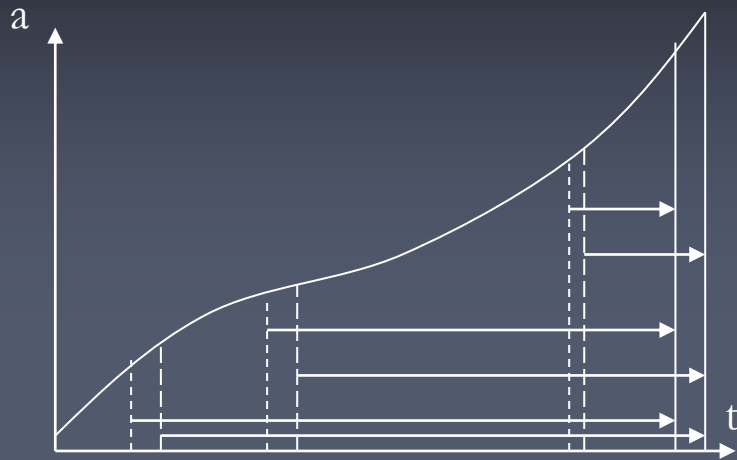


$$z_c: v_{em} = c$$

$$\begin{aligned} d_{\theta 1} &= d_{\theta 2} \\ d_{em1} &= d_{em2} \\ \chi_1 a(t_{em1}) &= \chi_2 a(t_{em2}) \\ \chi_1 > \chi_2, a(t_{em1}) &< a(t_{em2}) \end{aligned}$$

Это собственное расстояние на момент
испускания принимаемого сейчас излучения!

Как меняется красное смещение?



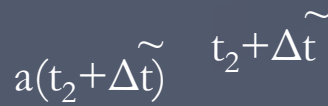
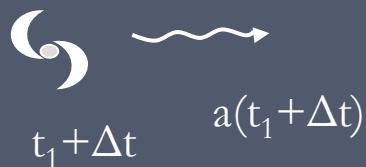
$$z+1 = a(t_2)/a(t_1)$$

$$\Delta z = a(t_2 + \Delta \tilde{t})/a(t_1 + \Delta t) - a(t_2)/a(t_1)$$

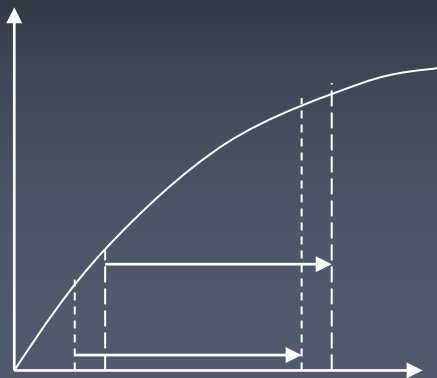
Вселенная все время расширяется, но иногда это происходит быстрее, иногда — медленнее.

Изменение красного смещения показывает, как изменилась динамика расширения вселенной с момента излучения к настоящему.

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



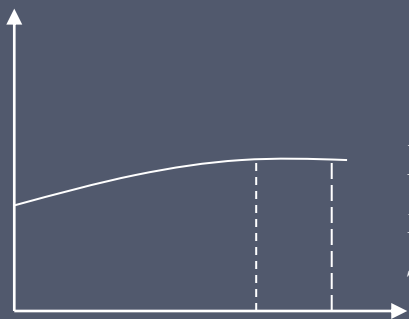
Замедляющаяся вселенная



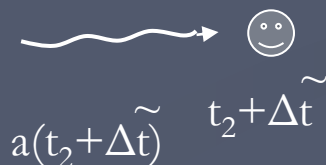
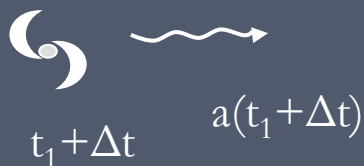
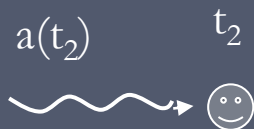
$$z+1 = a(t_2)/a(t_1)$$

$$\Delta z = a(t_2 + \Delta \tilde{t})/a(t_1 + \Delta t) - a(t_2)/a(t_1)$$

Числитель растет медленнее, чем знаменатель.
Поэтому красное смещение данного объекта
со временем будет уменьшаться.



Масштабный фактор
практически не меняется,
т.к. расширение замедлилось.

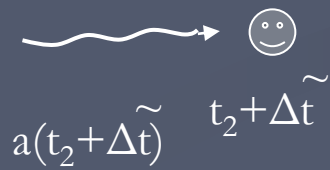
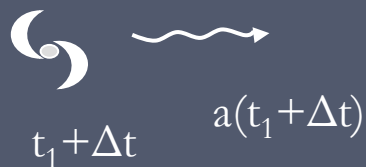
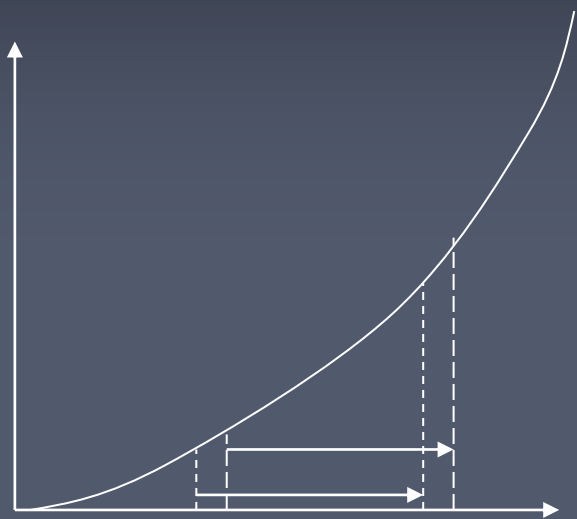


Ускоряющаяся вселенная

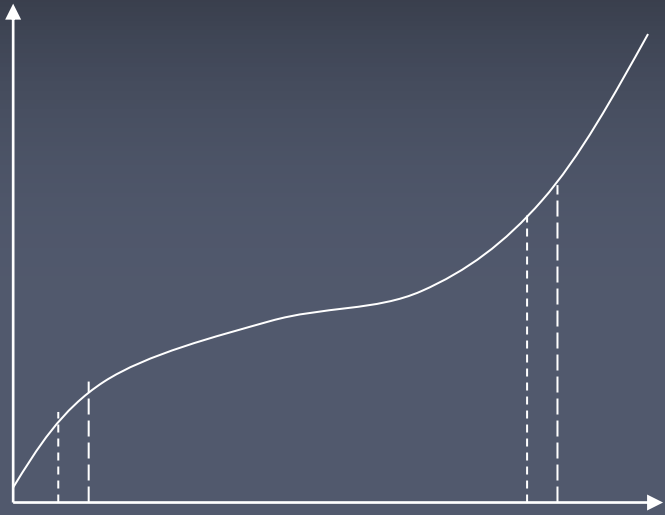
$$z+1 = a(t_2)/a(t_1)$$

$$\Delta z = a(t_2 + \Delta \tilde{t})/a(t_1 + \Delta t) - a(t_2)/a(t_1)$$

Числитель растет быстрее знаменателя, поэтому красное смещение будет расти.



Реалистичная вселенная

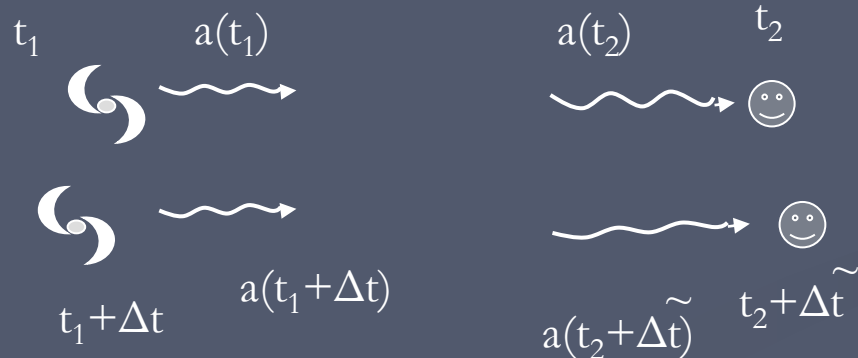


$$z+1 = a(t_2)/a(t_1)$$

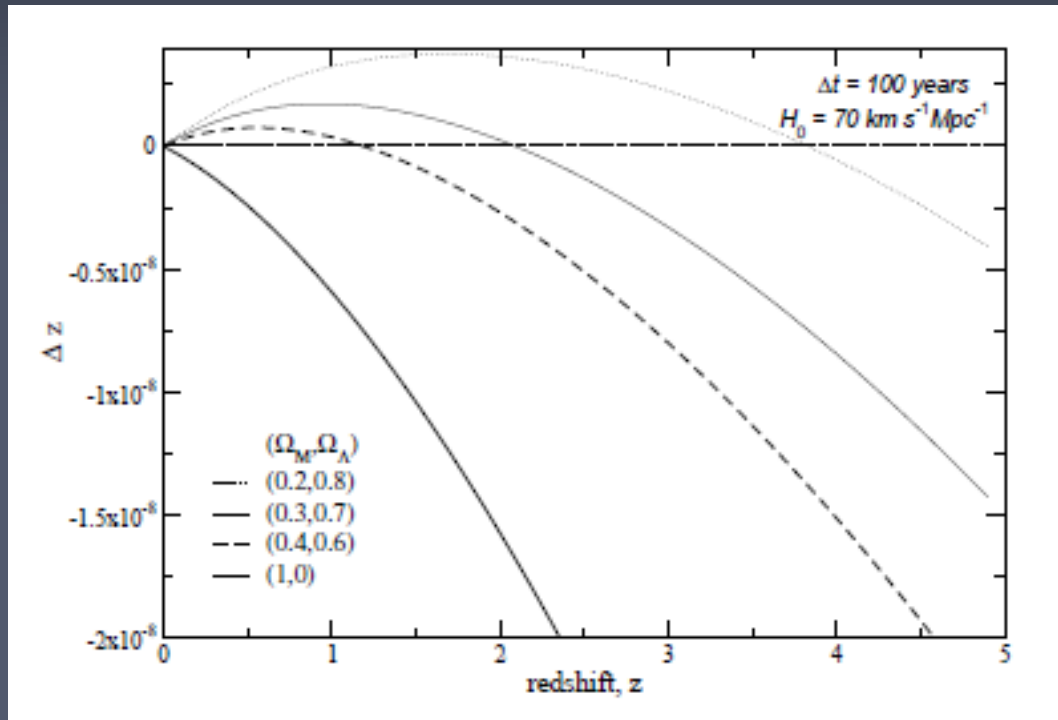
$$\Delta z = a(t_2 + \tilde{\Delta t})/a(t_1 + \Delta t) - a(t_2)/a(t_1)$$

Здесь ситуация сложнее,
т.к. в начале вселенная расширялась
с замедлением, а потом — с ускорением.

Соответственно, если мы проводим сейчас
наблюдения с высокой точностью, то мы
увидим, что далекие галактики «синеют»,
а близкие — краснеют.



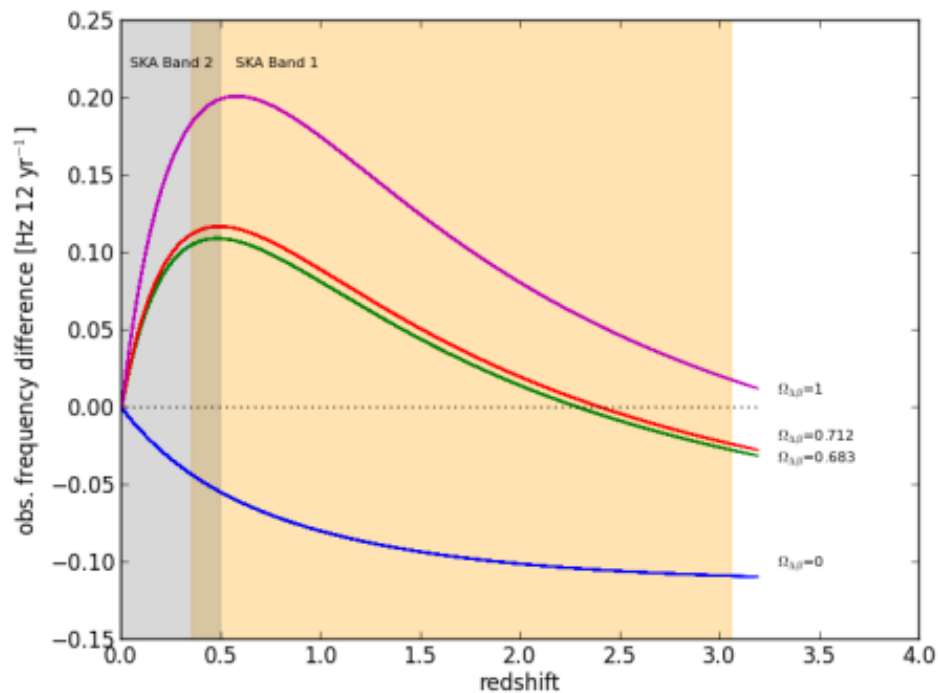
Красное смещение в Λ CDM



Красное смещение объектов с $z < 2$ будет расти, а более далеких - уменьшаться

Davis et al. (astro-ph/0310808)

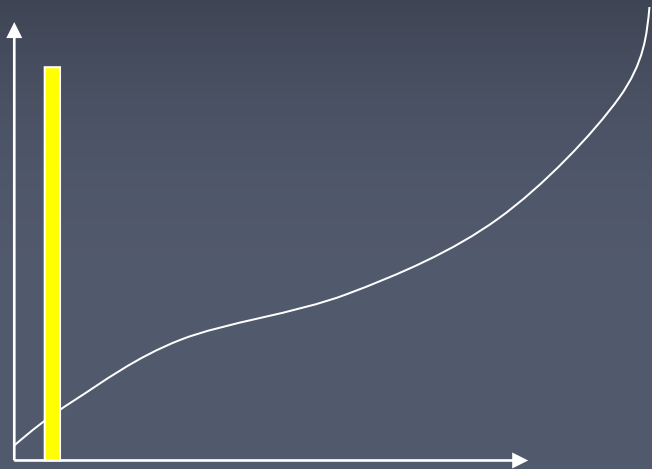
SKA



За 12 лет наблюдений на SKA2
можно будет надеяться что-то увидеть.
За 50 лет работы мы получим данные
по темпу расширения вплоть до $z=1$
с точность несколько процентов.



Красное смещение реликтового излучения



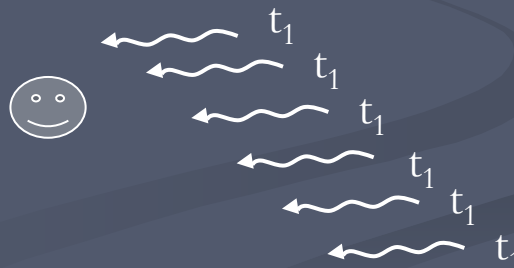
Реликтовое излучение мы всегда видим таким, каким оно было в момент «освобождения».

$$z = a(t_2) / a(t_1)$$

$$\Delta z = a(t_2 + \Delta t) / a(t_1) - a(t_2) / a(t_1)$$



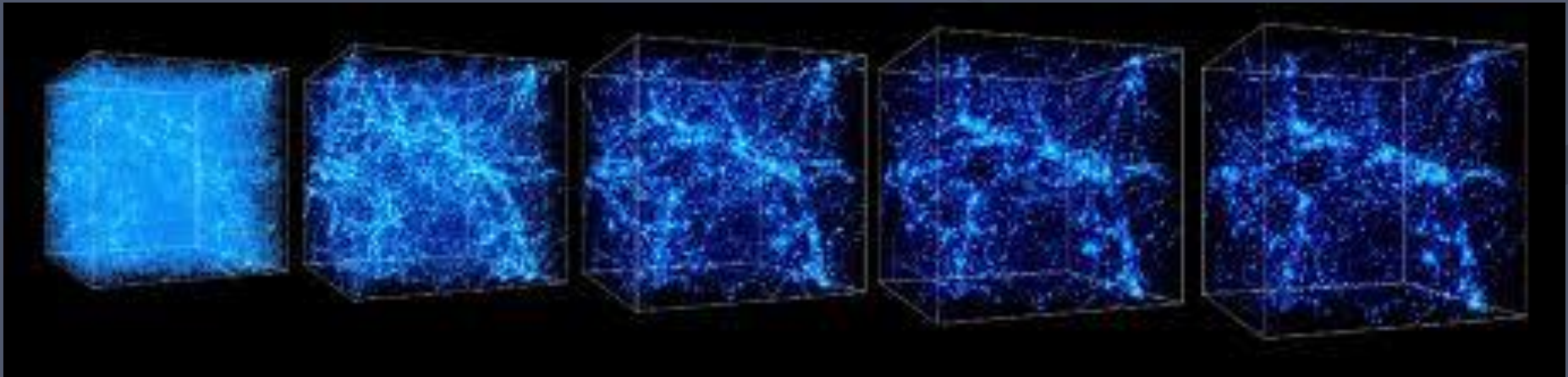
Поэтому красное смещение реликтового излучения всегда растет, вне зависимости от того, какова динамика расширения вселенной.





Подведем итоги....

- У нас есть большой комплекс данных, говорящий о том, что вселенная расширяется, эволюционирует и имеет конечный возраст.
- Для расчетов в космологии надо применять ОТО, а не СТО
- Галактики могут удаляться от нас быстрее скорости света, и мы их видим!
- Мы не знаем конечно ли наша вселенная, но нет данных в пользу конечности
- Есть разные определения расстояния и скорости в космологии
- Для реальных объектов существуют горизонты частиц и событий



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. Toporensky, S. Popov arXiv: 1503.05147
7. Расстояния в космологии: astro-ph/9905116, astro-ph/0609593