

Космология - 3

Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)



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

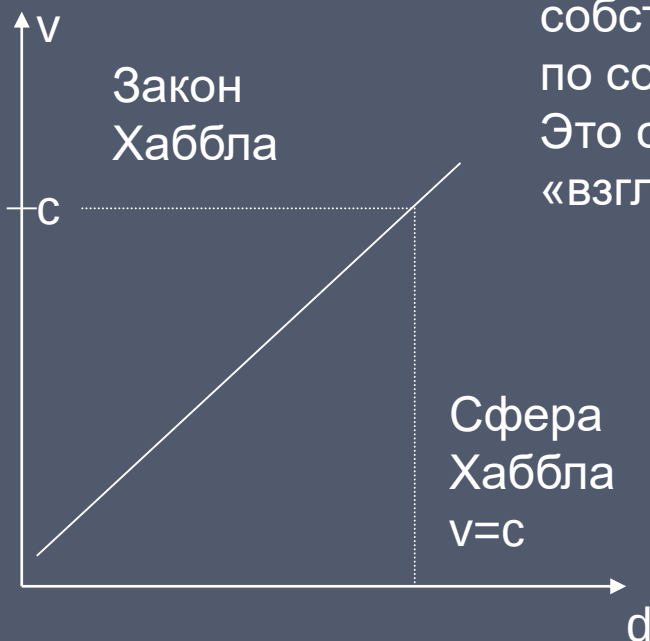
$v > c$



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

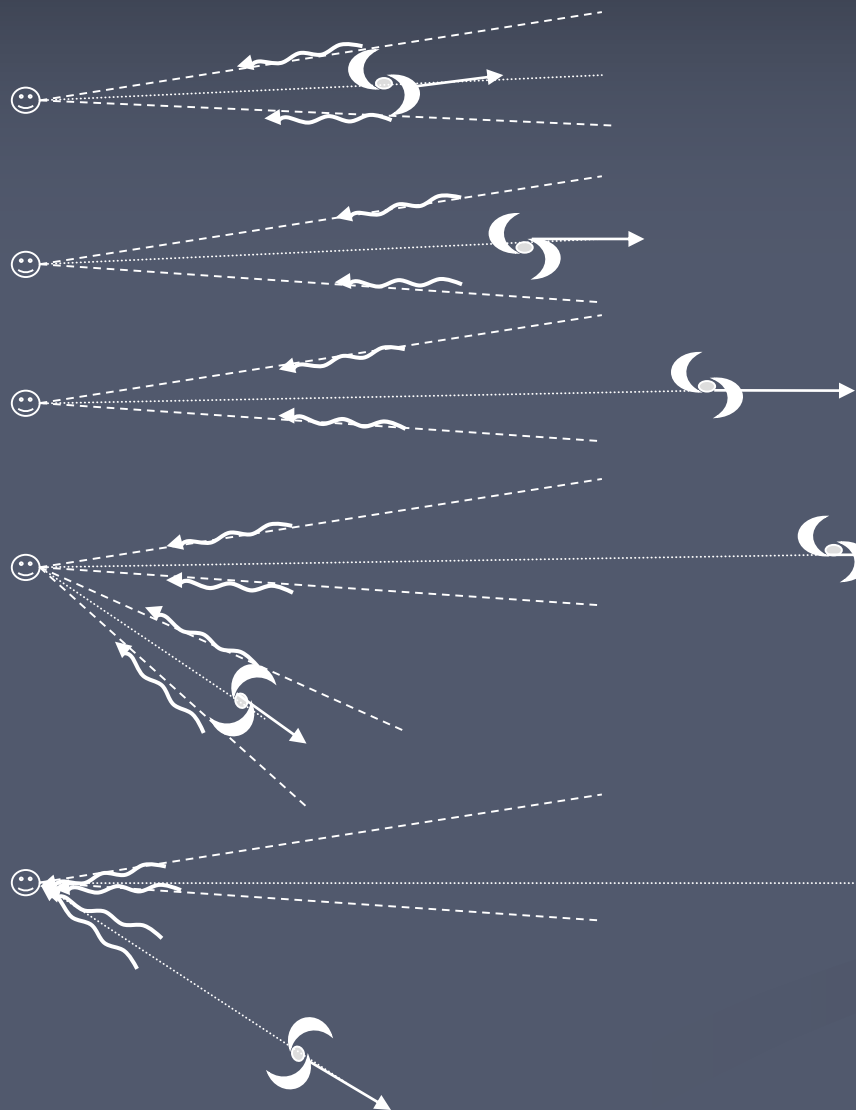
Свет же удаляется со скоростью $v + c > v > c$

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.

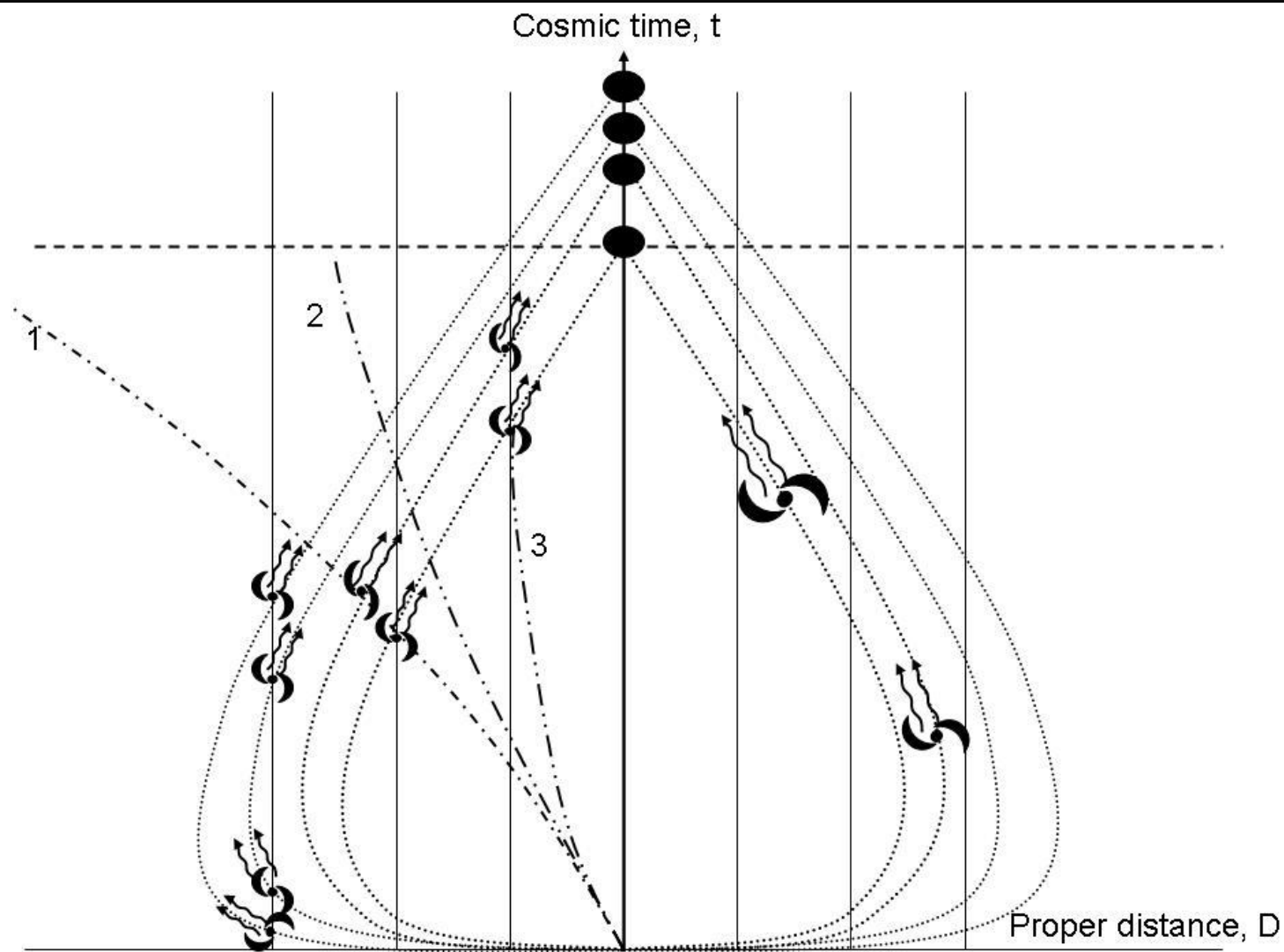


Такая скорость имеет такой смысл: она показывает, с какой скоростью удалялась от нас галактика в момент, когда было испущено излучение, которое мы сейчас принимаем, но по нашим часам. Для нее не действует закон Хаббла.

Три скорости



Все три могут быть больше c



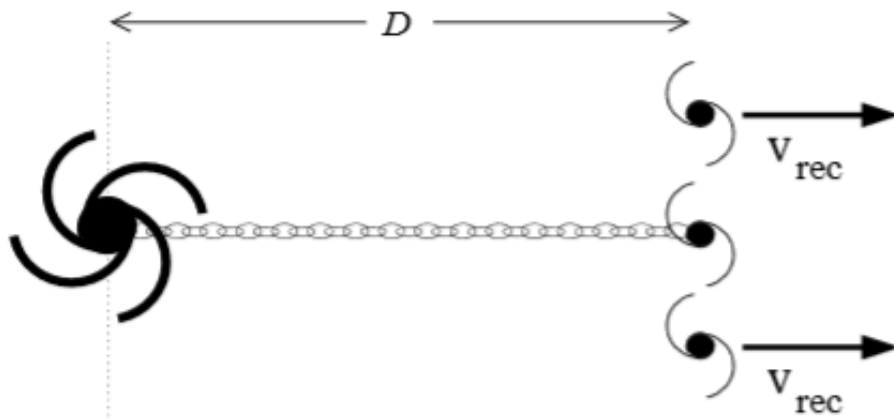
$$v_{\text{now}} = \frac{c}{1-\alpha} [(1+z)^{1-\alpha} - 1],$$

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

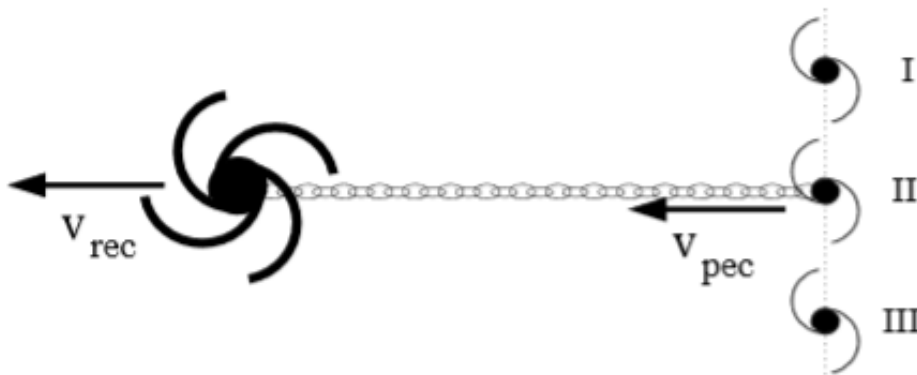
«Привязанные» галактики

Представим себе, что мы «выцепили» галактику из хаббловского потока. Тогда у нее появится какая-то peculiarная скорость.

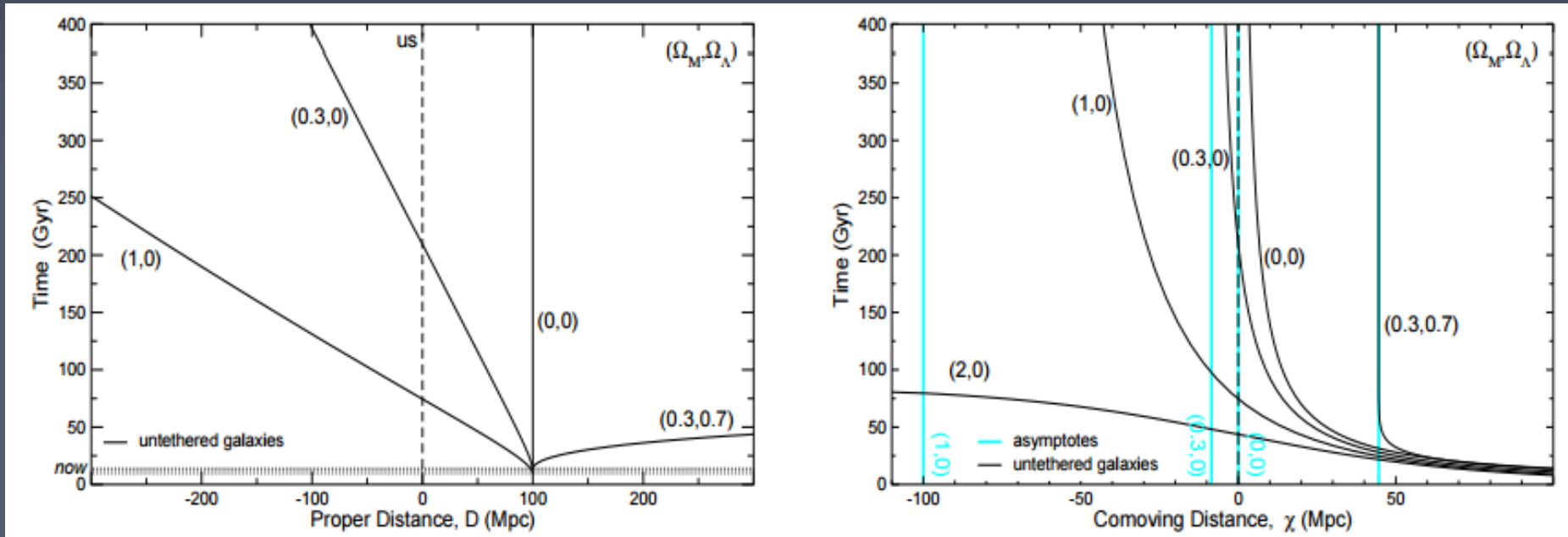
a



b



Движение «отвязанной» галактики



В разных космологиях галактика может как приближаться, так и удаляться. Но галактика все равно «нырнет» обратно в Хаббловский поток.

Выкачивание энергии из расширения вселенной

Утверждается, что это возможно!

MINING ENERGY IN AN EXPANDING UNIVERSE

EDWARD R. HARRISON

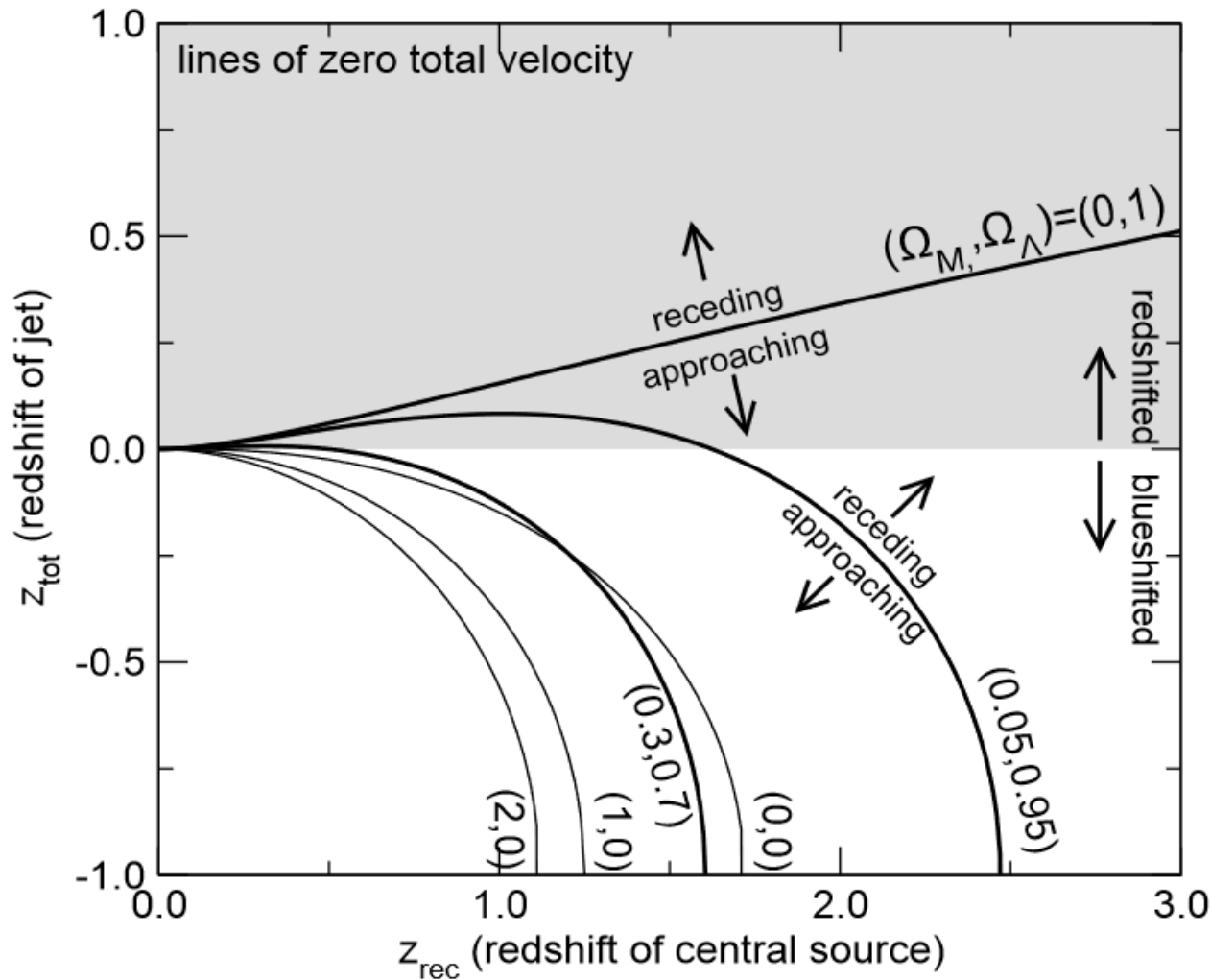
Department of Physics and Astronomy, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003

Received 1994 April 4; accepted 1994 December 13

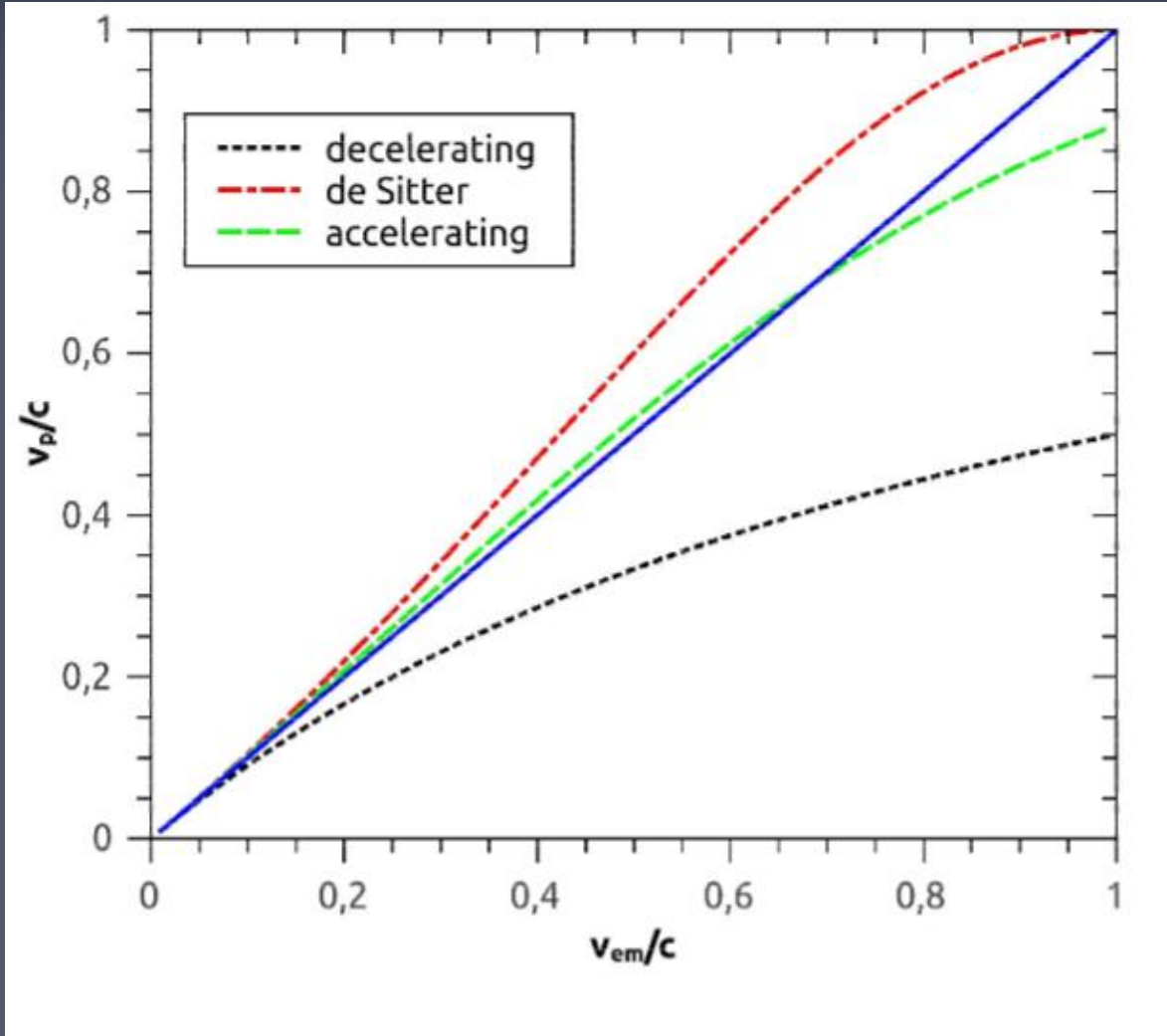
ABSTRACT

In principle, the expansion of the universe can be harnessed to provide energy. In a gedankenexperiment, energy is gained by connecting together widely separated bodies with strings. The tension and the energy generated are calculated for single strings. Mining energy in an expanding universe in this way raises unresolved issues concerning the conservation of energy. Apparently, the tethered-body experiment delivers “nascent” energy that previously did not exist in any identifiable and quantifiable form. It is argued that energy in a homogeneous and unbounded universe, in general, is not conserved on the cosmic scale.

Джет из галактики



Пекулярная скорость и скорость в момент излучения

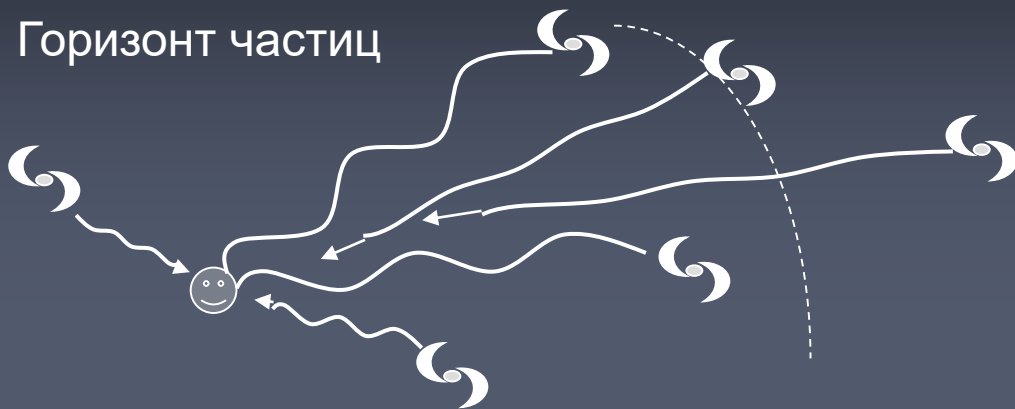


Чтобы оставаться «привязанной», галактике надо очень быстро двигаться относительно соседей.

Существенно помнить, что пекулярная скорость меняется по мере расширения!
 $V \sim 1/a$

Космические горизонты

1. Горизонт частиц



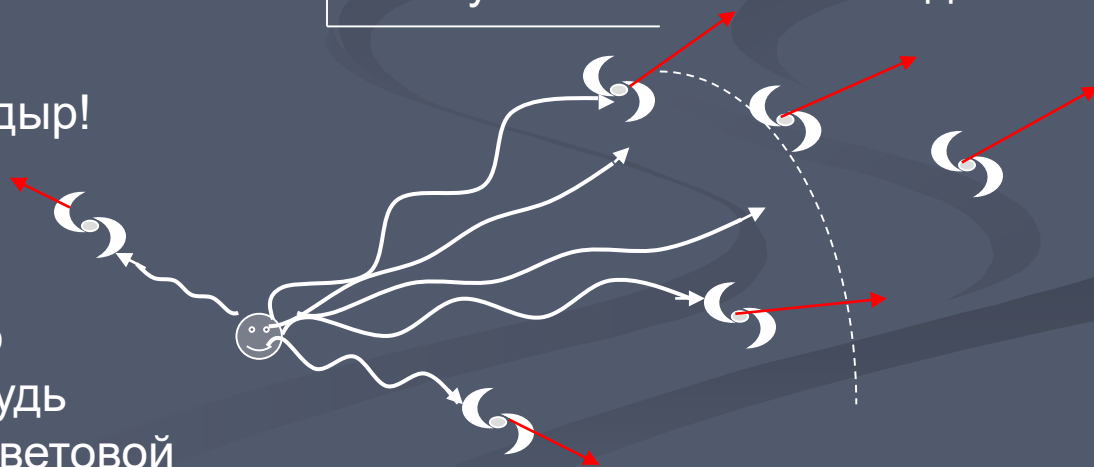
Этот горизонт соответствует самому далекому объекту, который мы сейчас видим.

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.

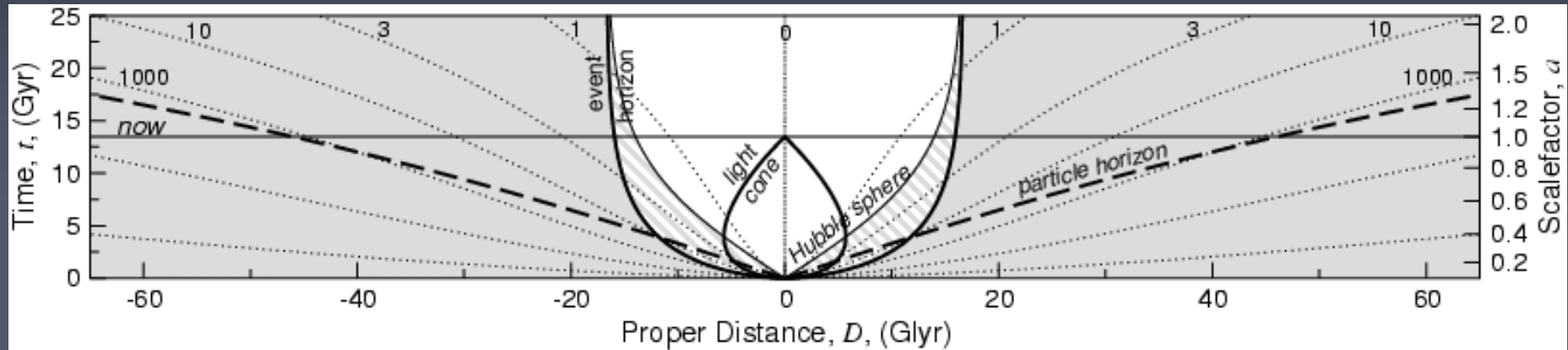
2. Горизонт событий

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 дойти наш световой сигнал, посланный сейчас.

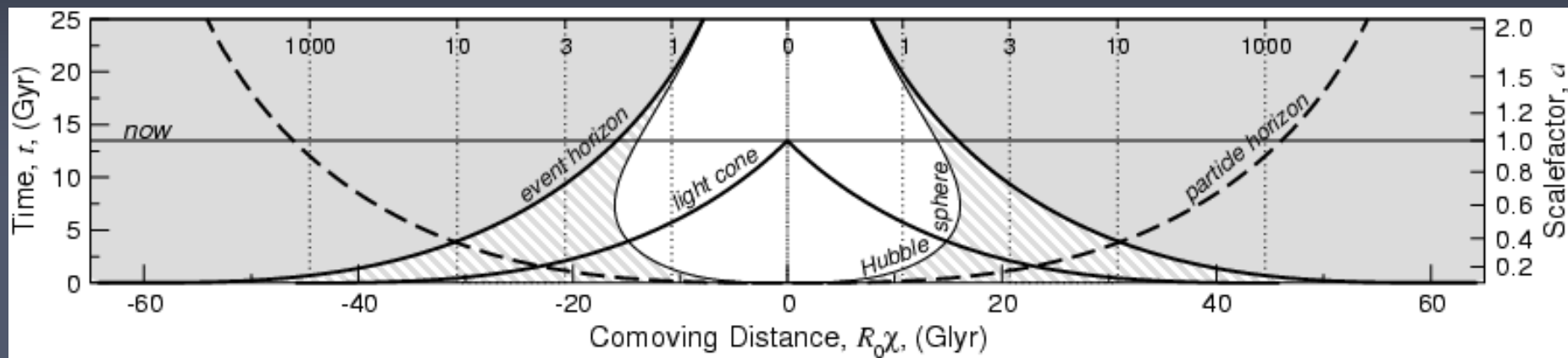


Горизонты и эволюция



Рисунки соответствуют стандартной на сегодняшний день космологической модели.

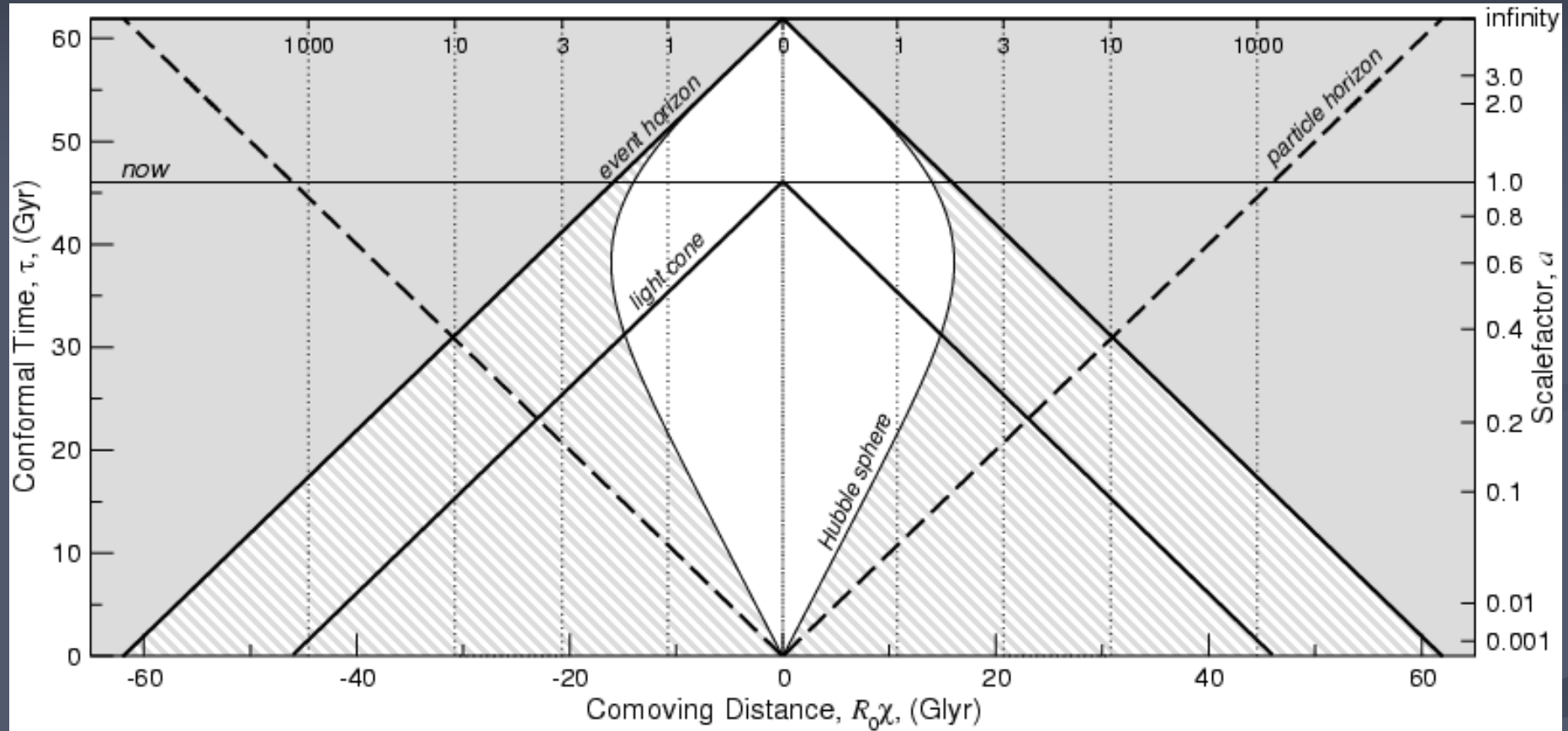
Сопутствующее расстояние



Рисунки соответствуют стандартной на сегодняшний день космологической модели.

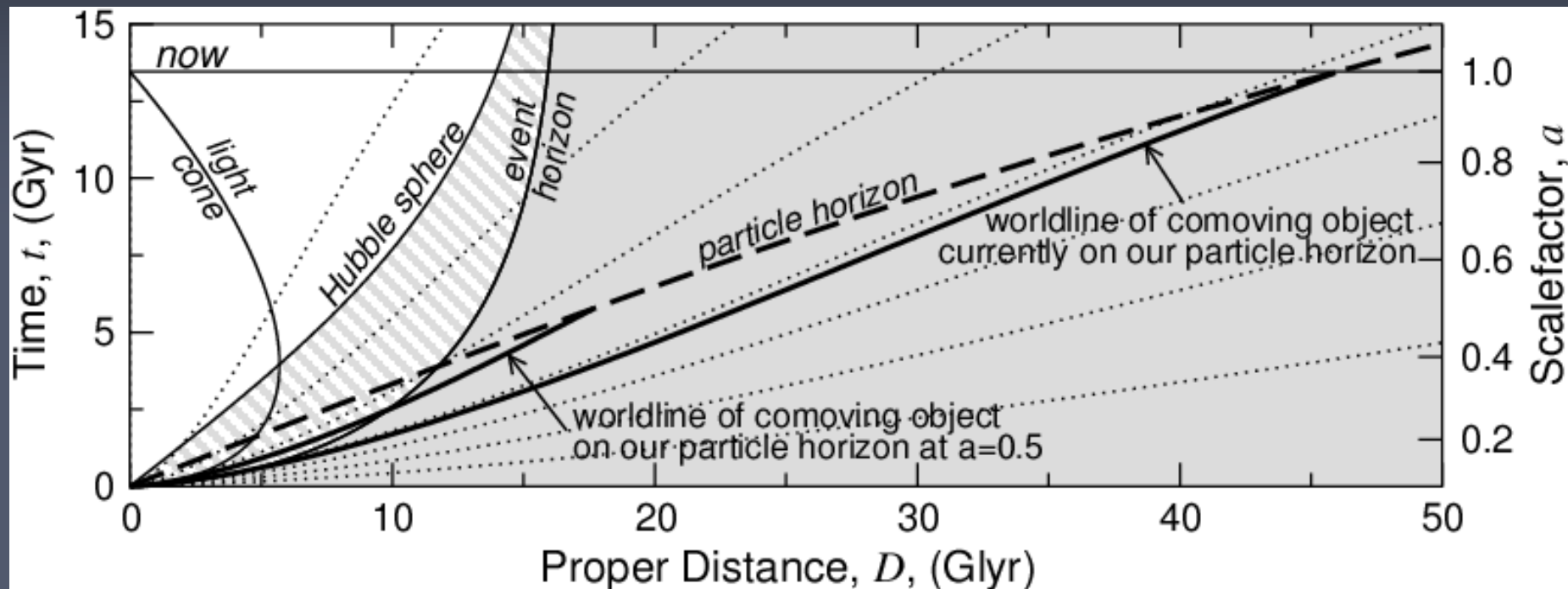
Конформное время

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



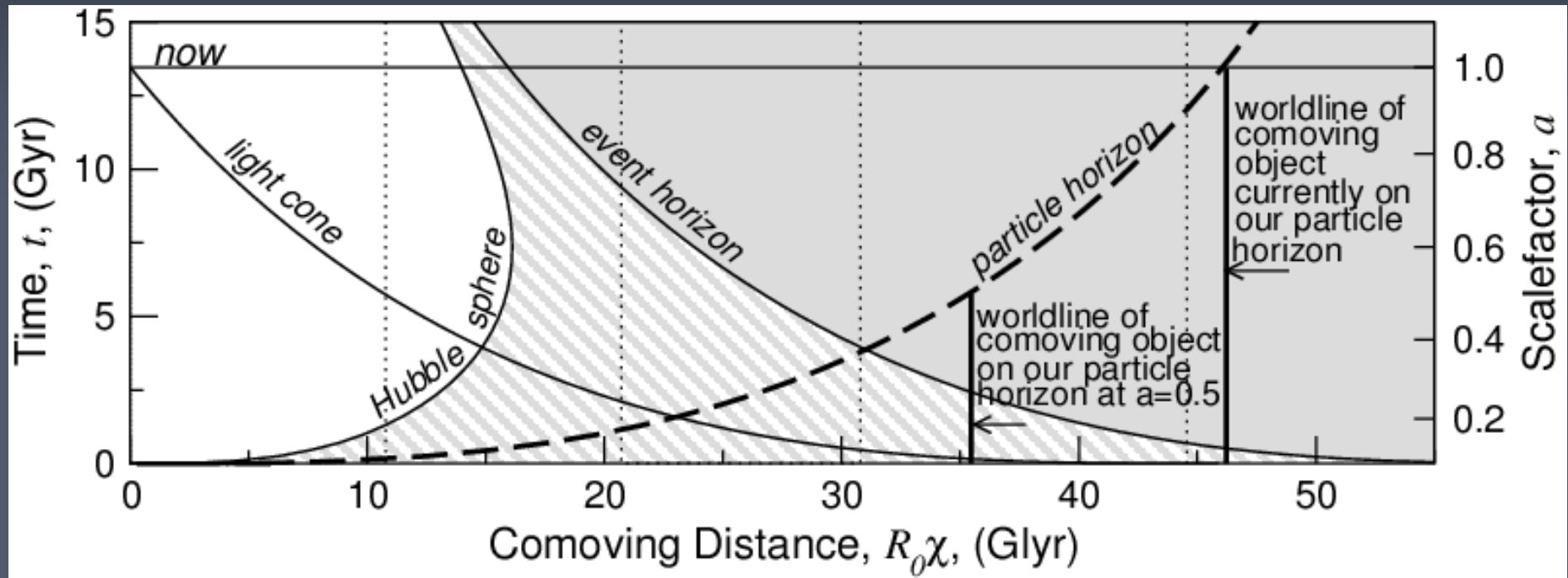
Рисунки соответствуют стандартной на сегодняшний день космологической модели.

В более мелких деталях ...



Рисунки соответствуют стандартной на сегодняшний день космологической модели.

... а теперь для сопутствующего...



Рисунки соответствуют стандартной на сегодняшний день космологической модели.

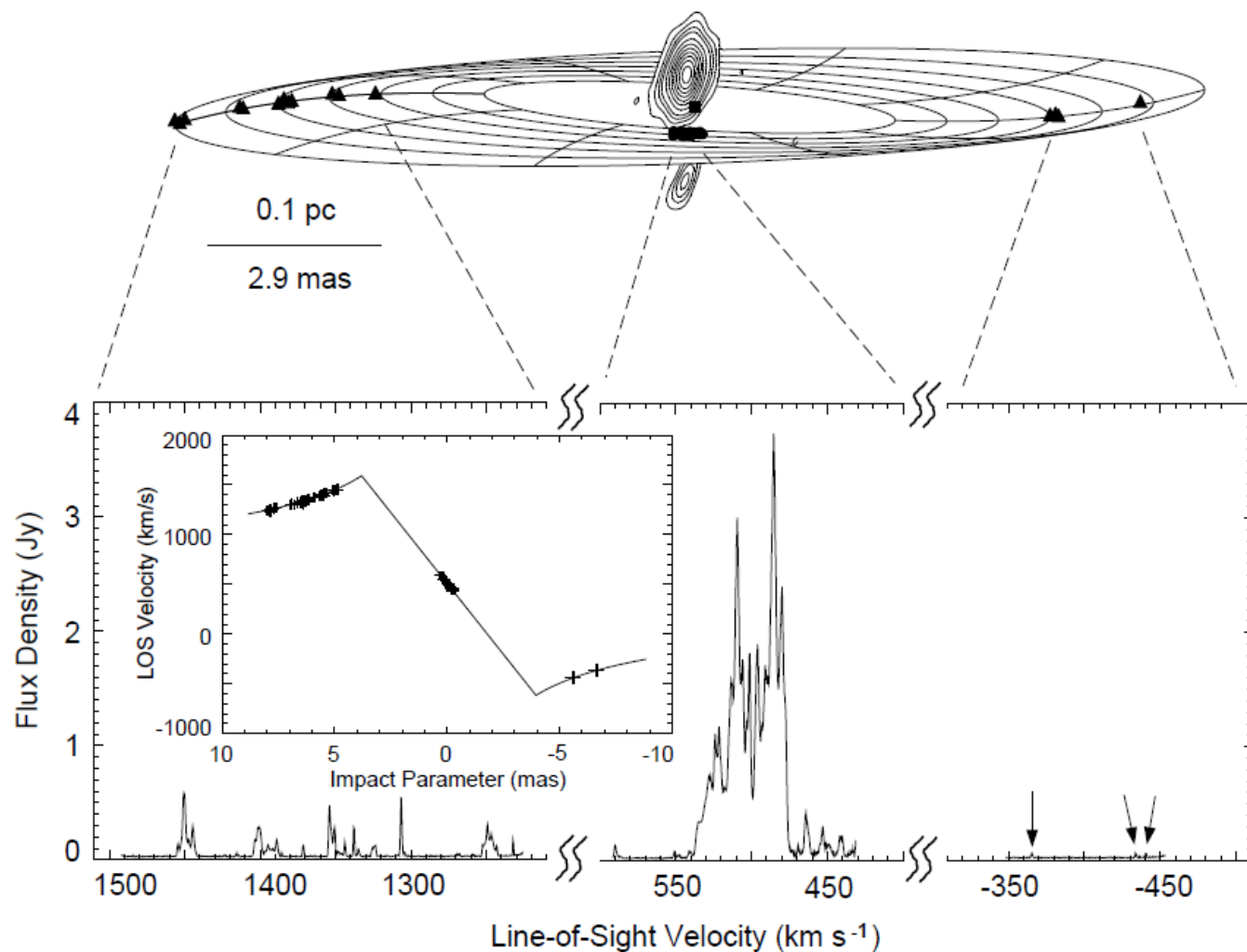
Как мы можем «увидеть» расширение вселенной?

- 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

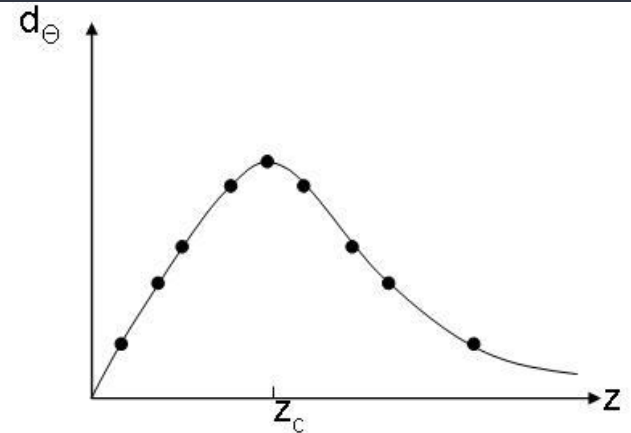
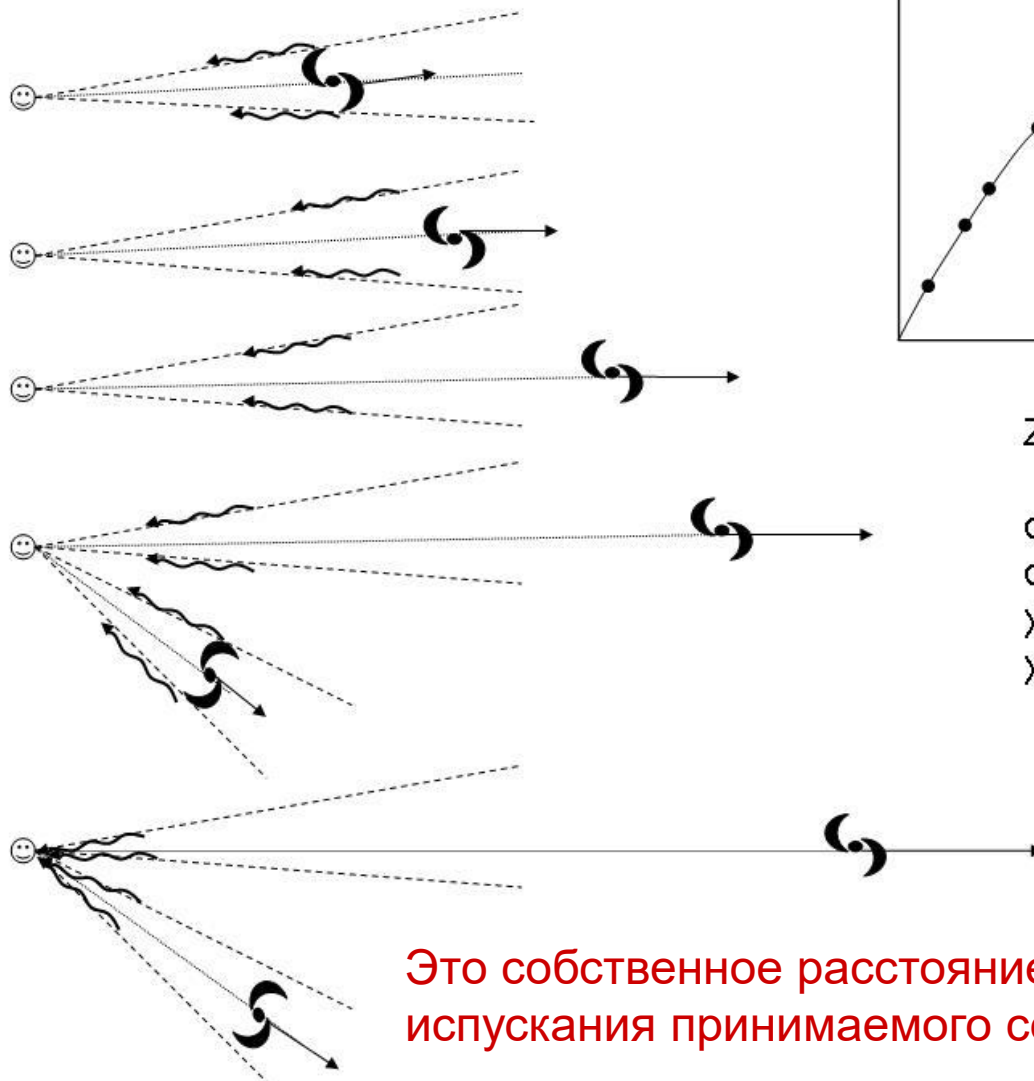
Размер s



α



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

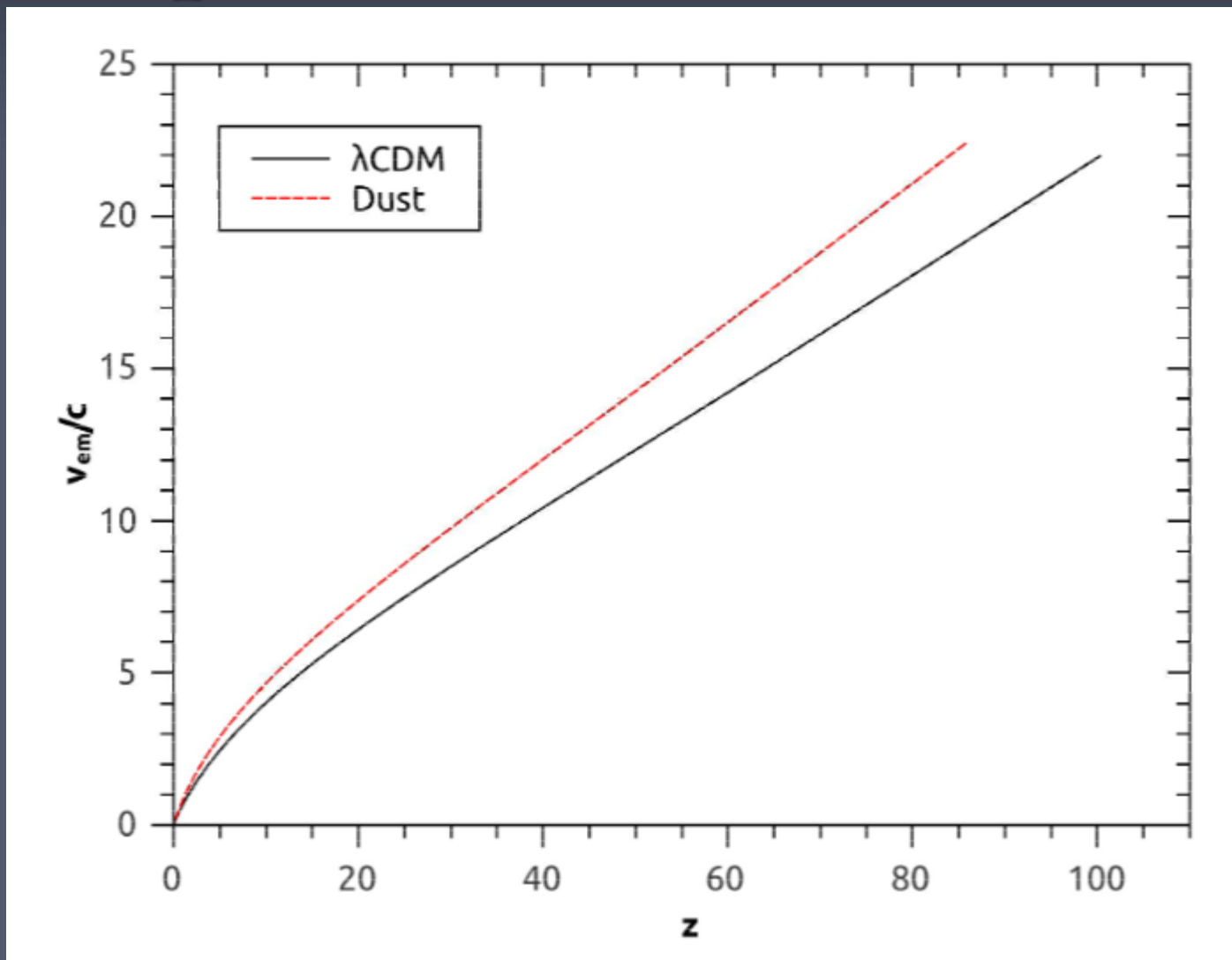


$$z_c: v_{em} = c$$

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

Это собственное расстояние на момент
испускания принимаемого сейчас излучения!

Скорость в момент излучения в разных космологиях

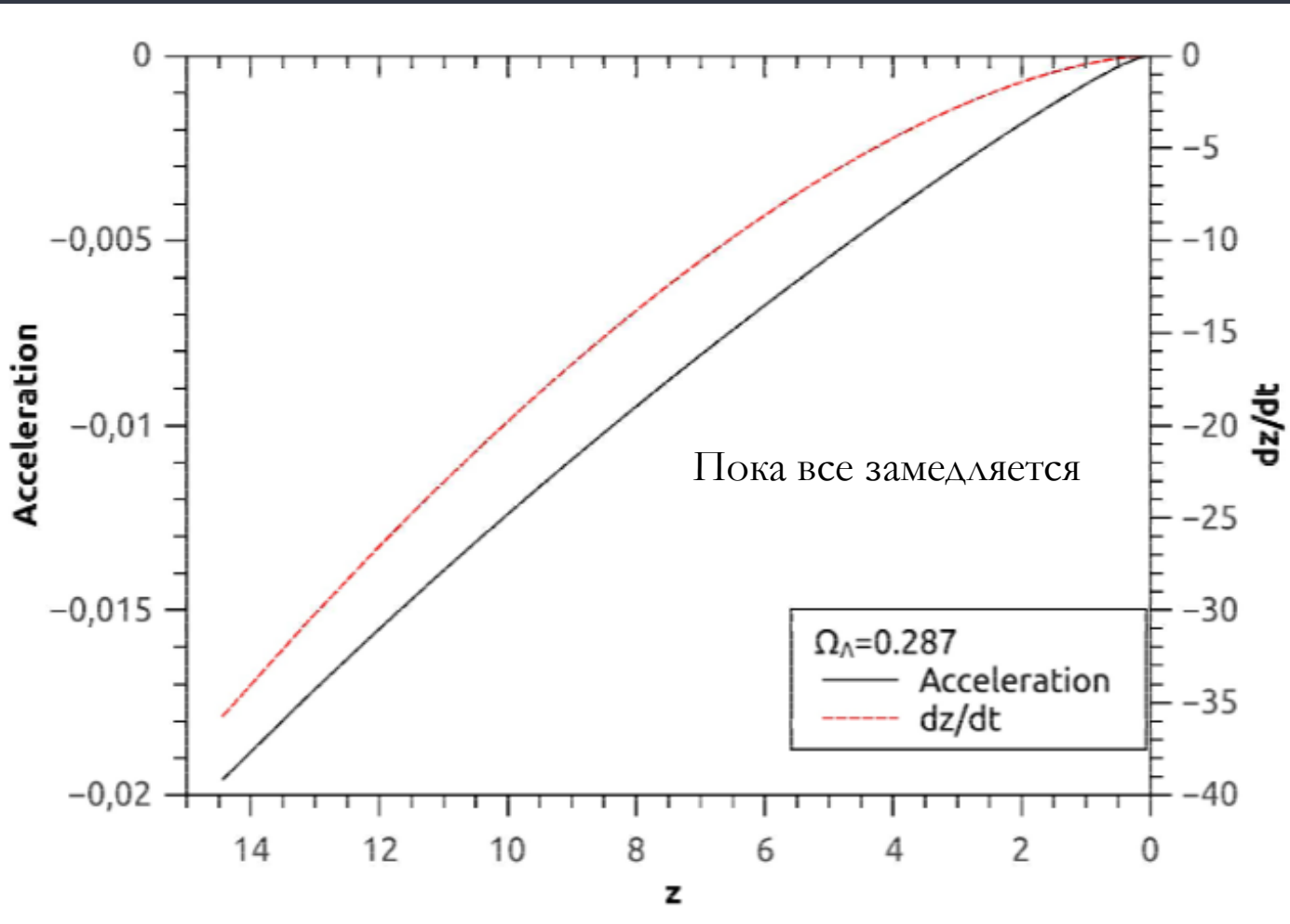


Ускорения в КОСМОЛОГИИ

Как и со скоростями, здесь есть несколько возможностей:

- Есть ускорение «с точки зрения бога»
- Есть ускорение, которое можно частично наблюдать, частично вычислять
- Наконец, есть ускорение, которое можно целиком получить из наблюдений

Ускорение в разные моменты

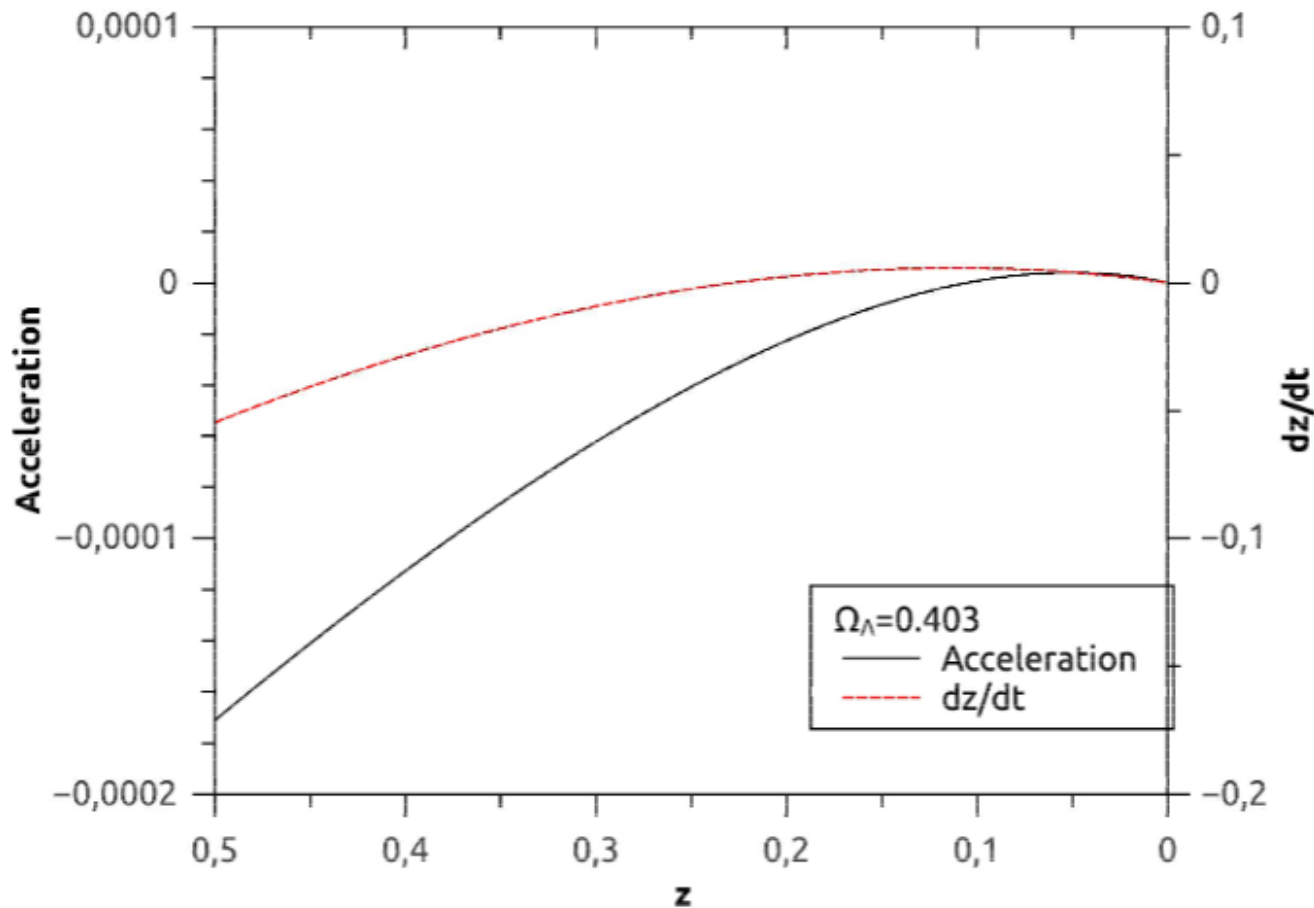


$$\mathfrak{A}_2 = dv_{em}/\Delta t_{obs},$$

$$\mathfrak{A}_2 = \ddot{a}(t_{em})\chi/(1+z).$$

$$\mathfrak{A}_2 = \frac{dv_{em}}{dz} \frac{dz}{dt},$$

Это ускорение частично вычисляется, оно характеризует изменение скорости изменения собственного расстояния в момент испускания излучения по часам наблюдателя.

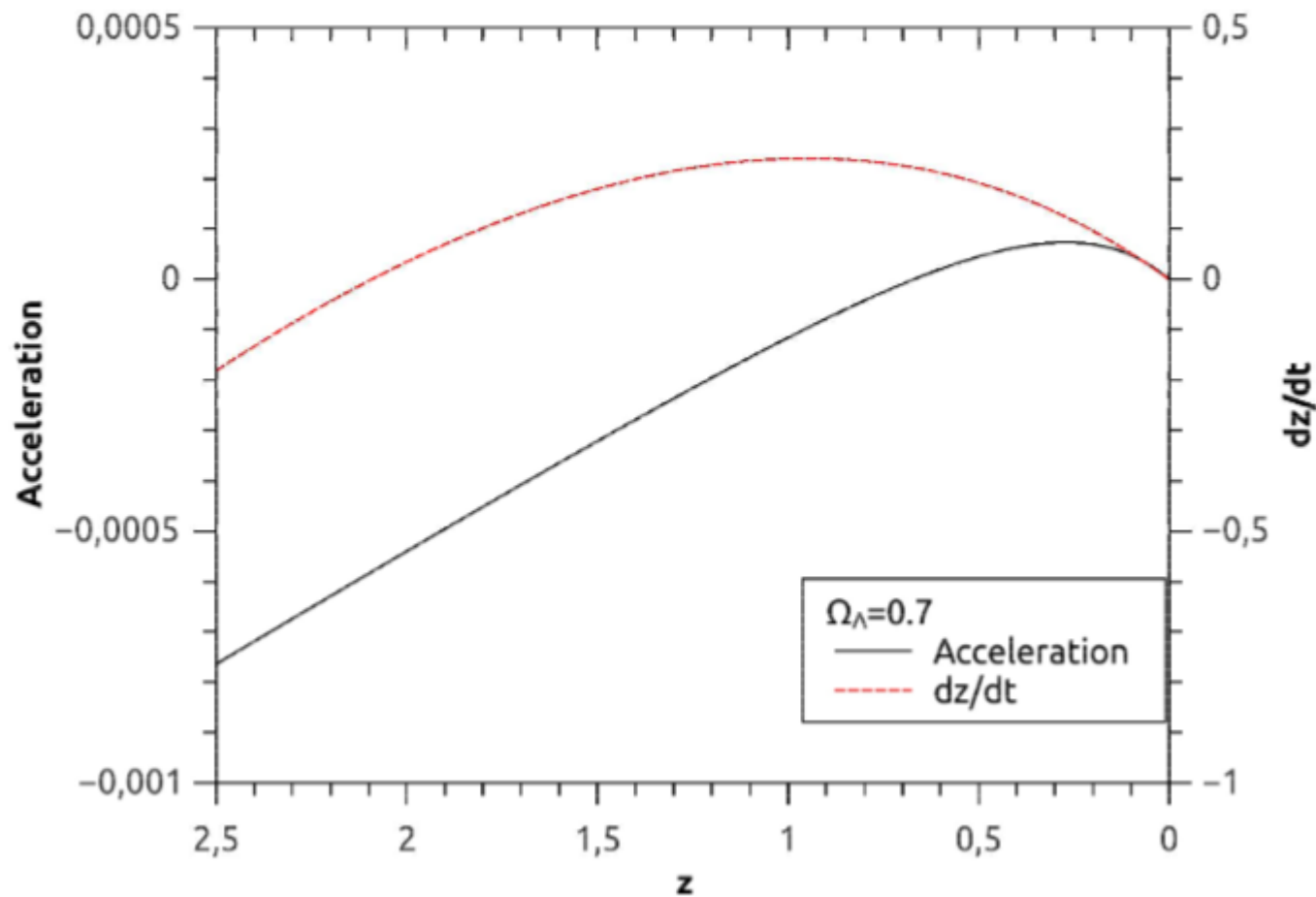


$$\mathfrak{A}_2 = dv_{em}/\Delta t_{obs},$$

$$\mathfrak{A}_2 = \ddot{a}(t_{em})\chi/(1+z).$$

$$\mathfrak{A}_2 = \frac{dv_{em}}{dz} \frac{dz}{dt},$$

Постепенно начинается ускорение

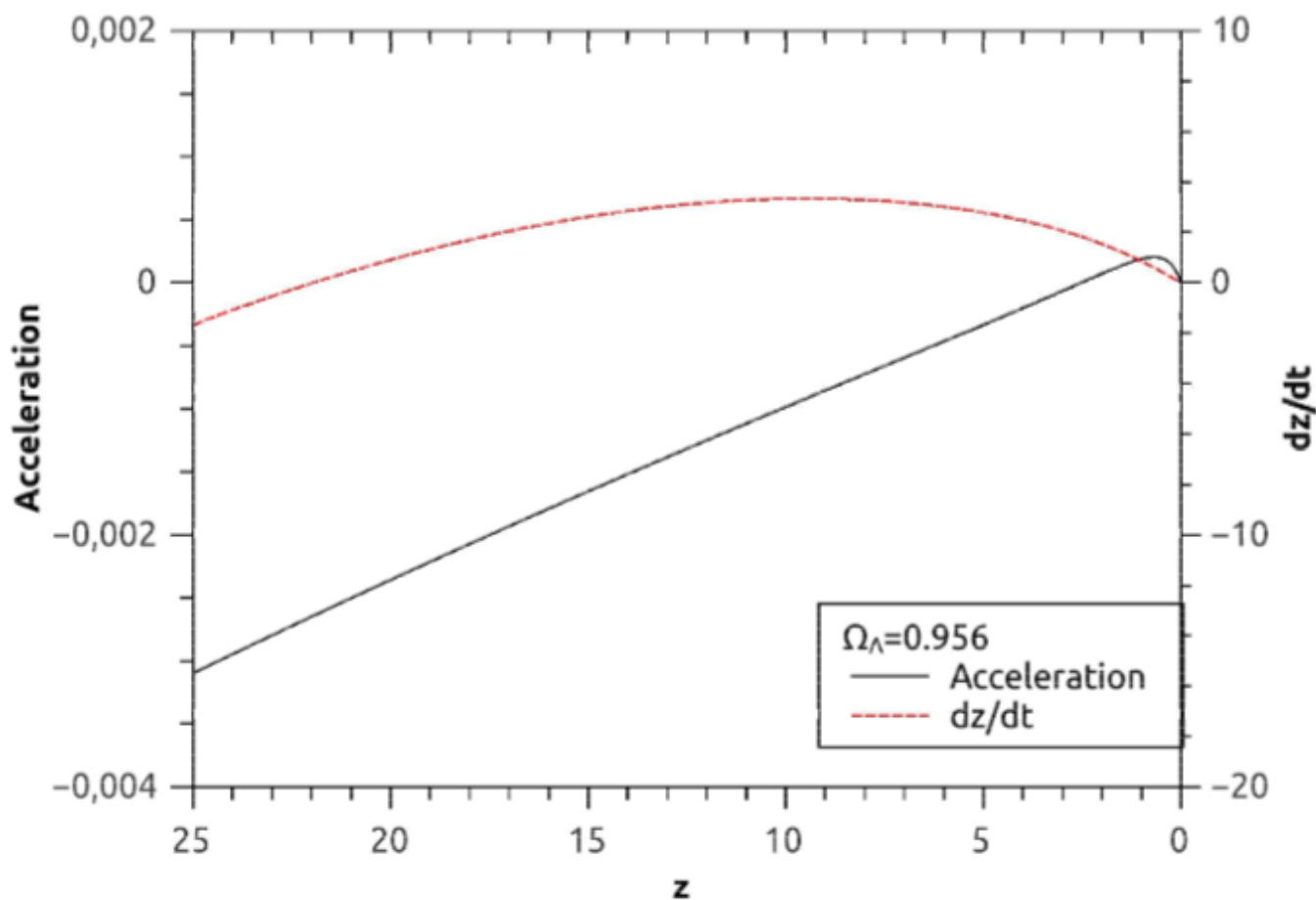


$$\mathfrak{A}_2 = dv_{em}/\Delta t_{obs},$$

$$\mathfrak{A}_2 = \ddot{a}(t_{em})\chi/(1+z).$$

$$\mathfrak{A}_2 = \frac{dv_{em}}{dz} \frac{dz}{dt},$$

В настоящее время



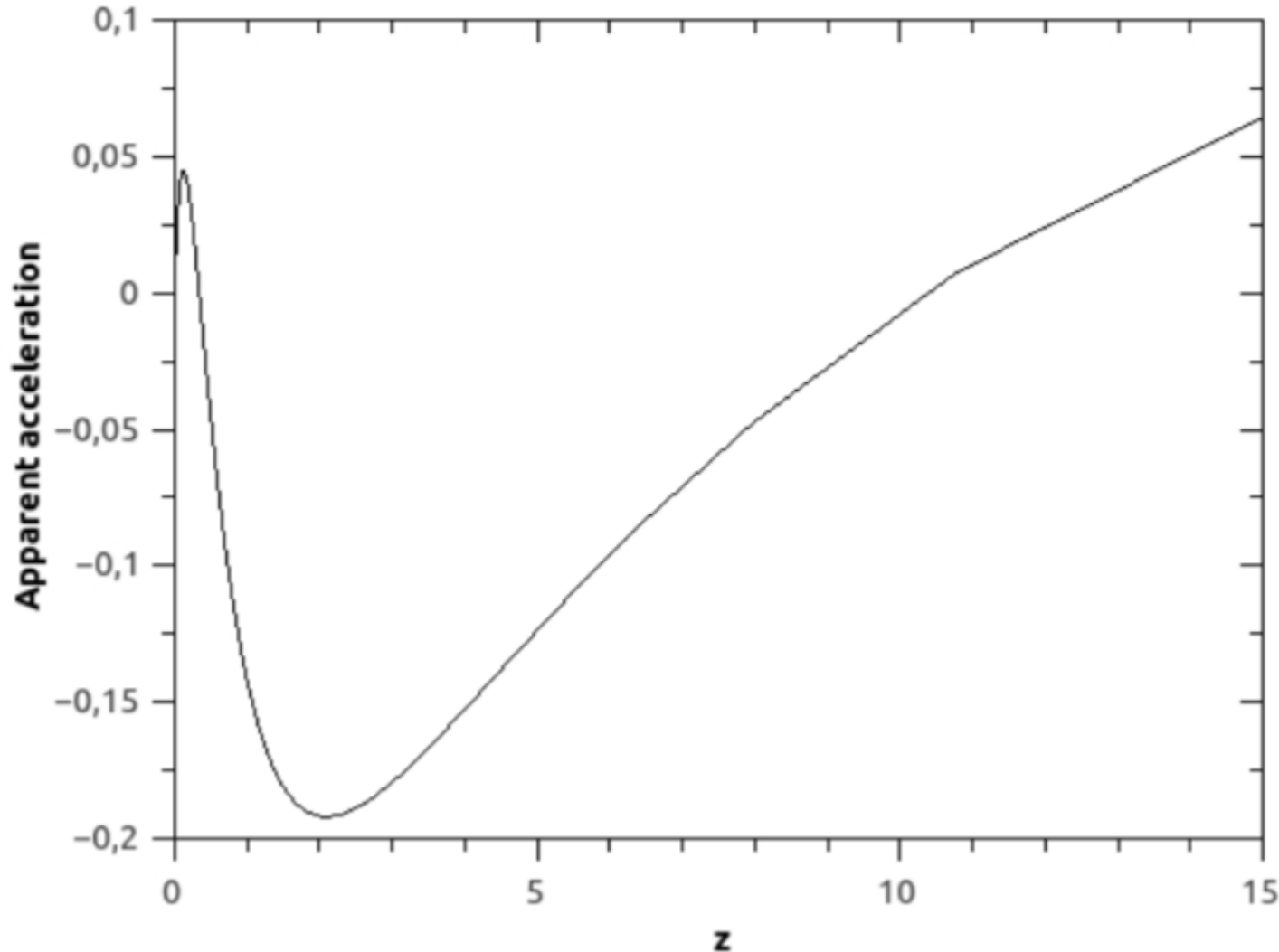
$$\mathfrak{A}_2 = dv_{em}/\Delta t_{obs},$$

$$\mathfrak{A}_2 = \ddot{a}(t_{em})\chi/(1+z).$$

$$\mathfrak{A}_2 = \frac{dv_{em}}{dz} \frac{dz}{dt},$$

В будущем. Видно, как вселенная ускоряется.

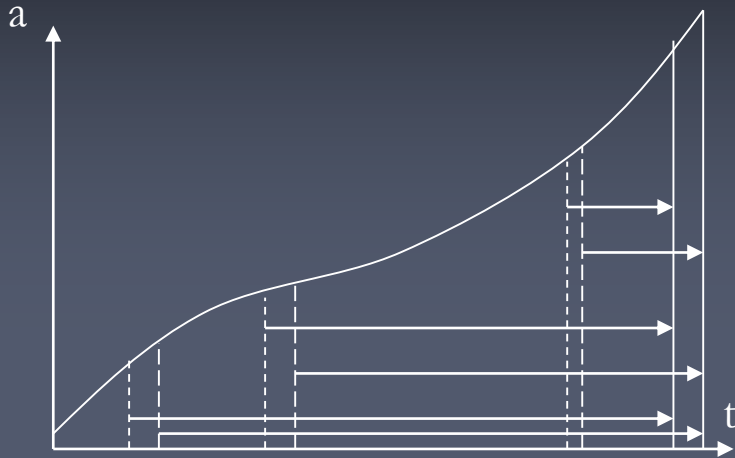
Непосредственно измеряемое ускорение



$$\mathfrak{A}_3 = dv_{app}/\Delta t_{obs}$$

Изменение видимой скорости по часам наблюдателя

Как меняется красное смещение?



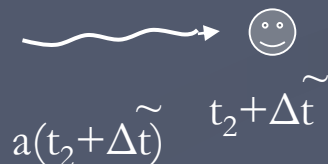
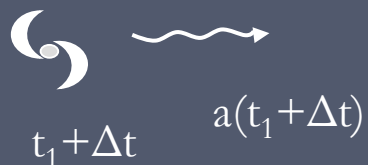
$$z+1 = a(t_2)/a(t_1)$$

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

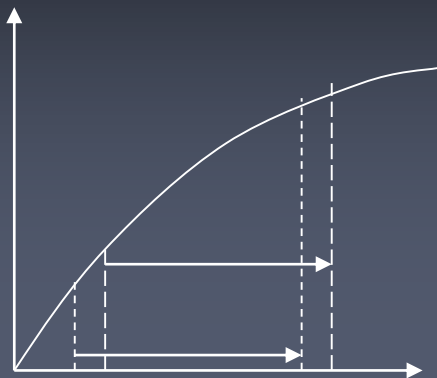
Вселенная все время расширяется, но иногда это происходит быстрее, иногда — медленнее.

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

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



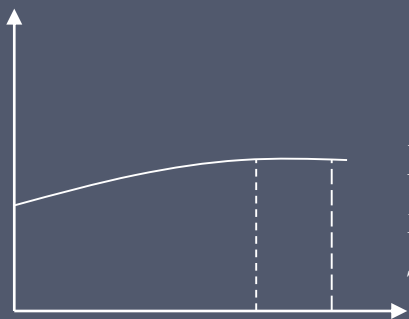
Замедляющаяся вселенная



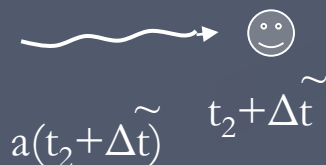
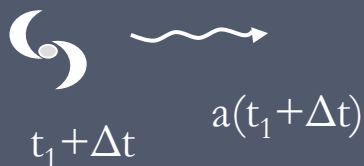
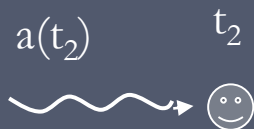
$$z+1 = a(t_2)/a(t_1)$$

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

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



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

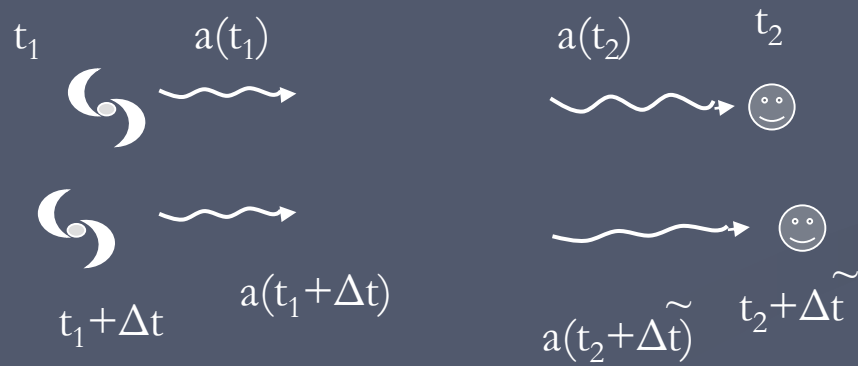
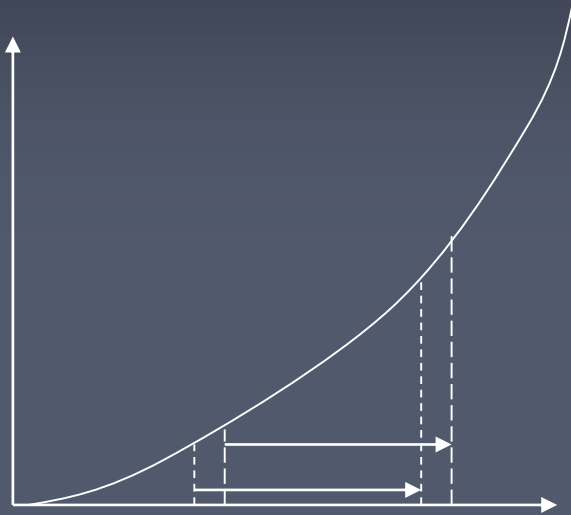


Ускоряющаяся вселенная

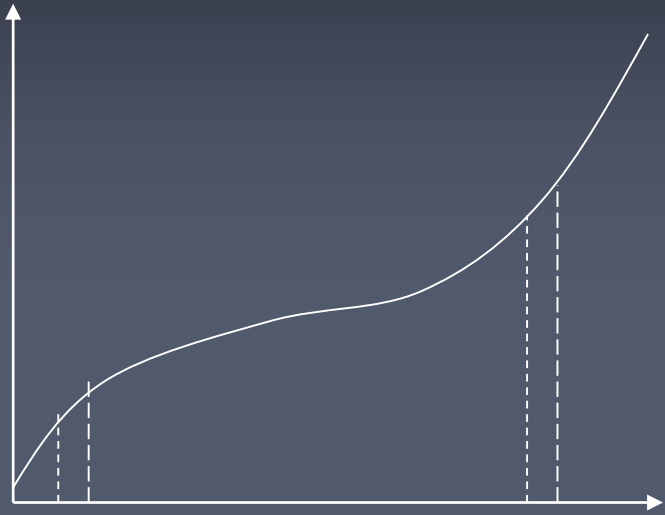
$$z+1 = a(t_2)/a(t_1)$$

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

Числитель растет быстрее знаменателя, поэтому красное смещение будет расти.



Реалистичная вселенная

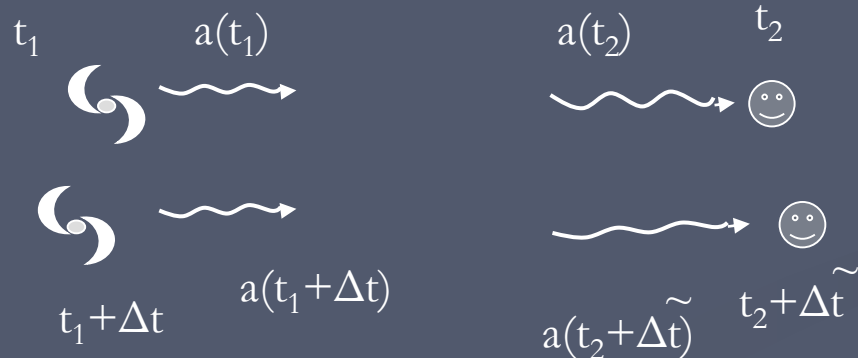


$$z+1 = a(t_2)/a(t_1)$$

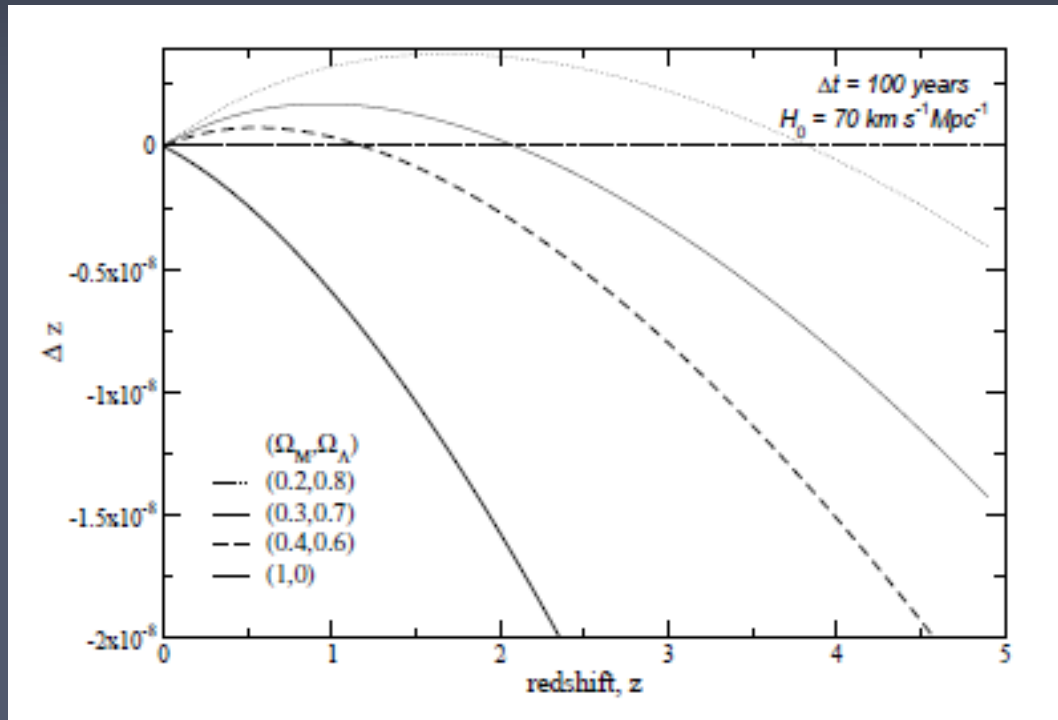
$$\Delta z = a(t_2 + \tilde{\Delta t})/a(t_1 + \Delta t) - a(t_2)/a(t_1)$$

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.



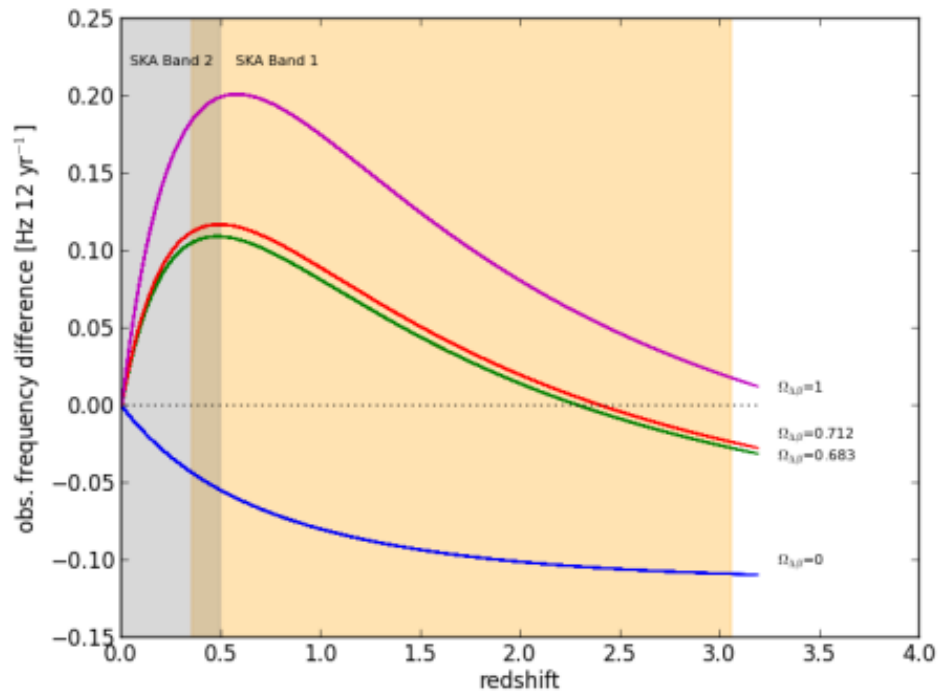
Красное смещение в Λ CDM



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

Davis et al. (astro-ph/0310808)

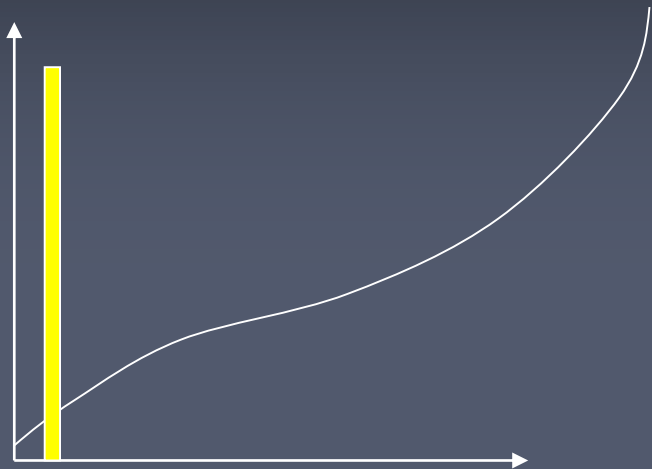
SKA



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

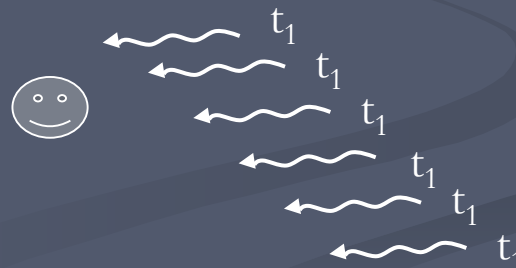


Реликтовое излучение мы всегда видим таким, каким оно было в момент «освобождения».

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

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

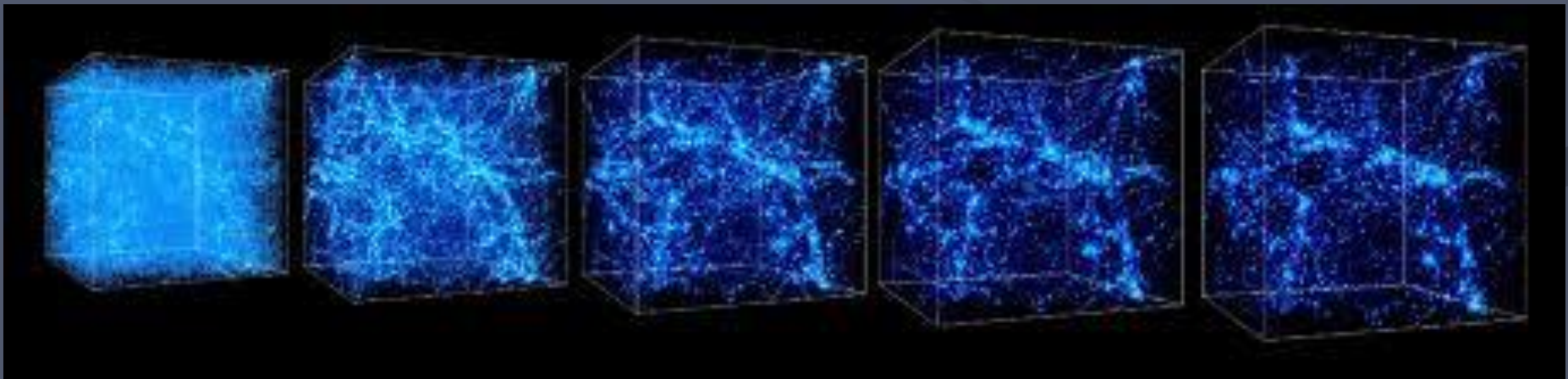
Поэтому красное смещение реликтового излучения всегда растет, вне зависимости от того, какова динамика расширения вселенной.





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» A. Toporensky, S. Popov arXiv: 1503.05147