

The background of the slide is a deep space image showing a vast field of galaxies. A prominent bright star with a four-pointed diffraction pattern is located in the upper right quadrant. The galaxies are distributed across the frame, with some appearing as distinct spiral or elliptical shapes and others as fainter, more distant points of light. The overall color palette is dominated by deep blues and purples, with the star providing a bright white and yellow light source.

The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)

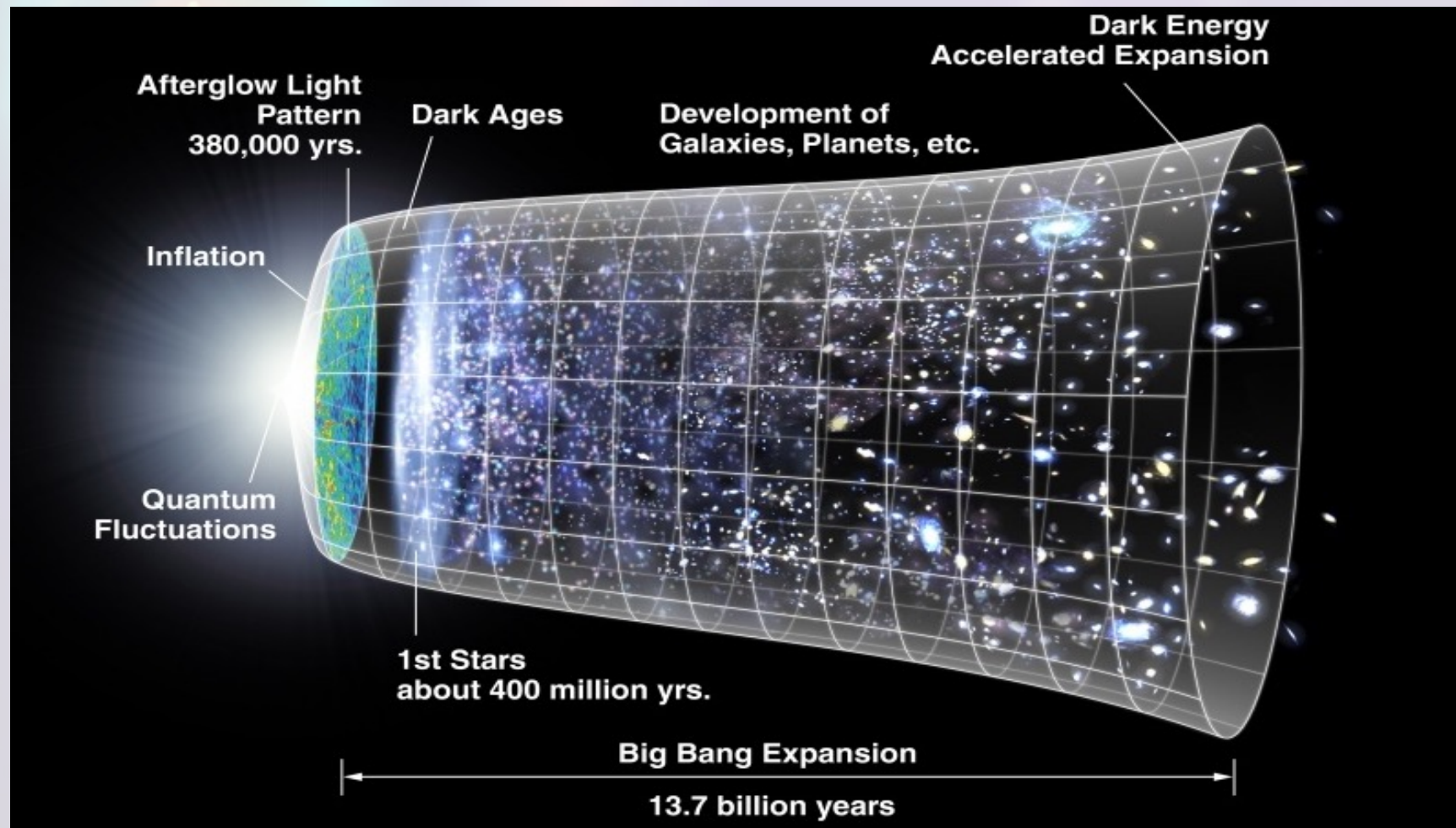
Ю.Г.Нарышкин

Семинар ОФВЭ, 28.10.2025

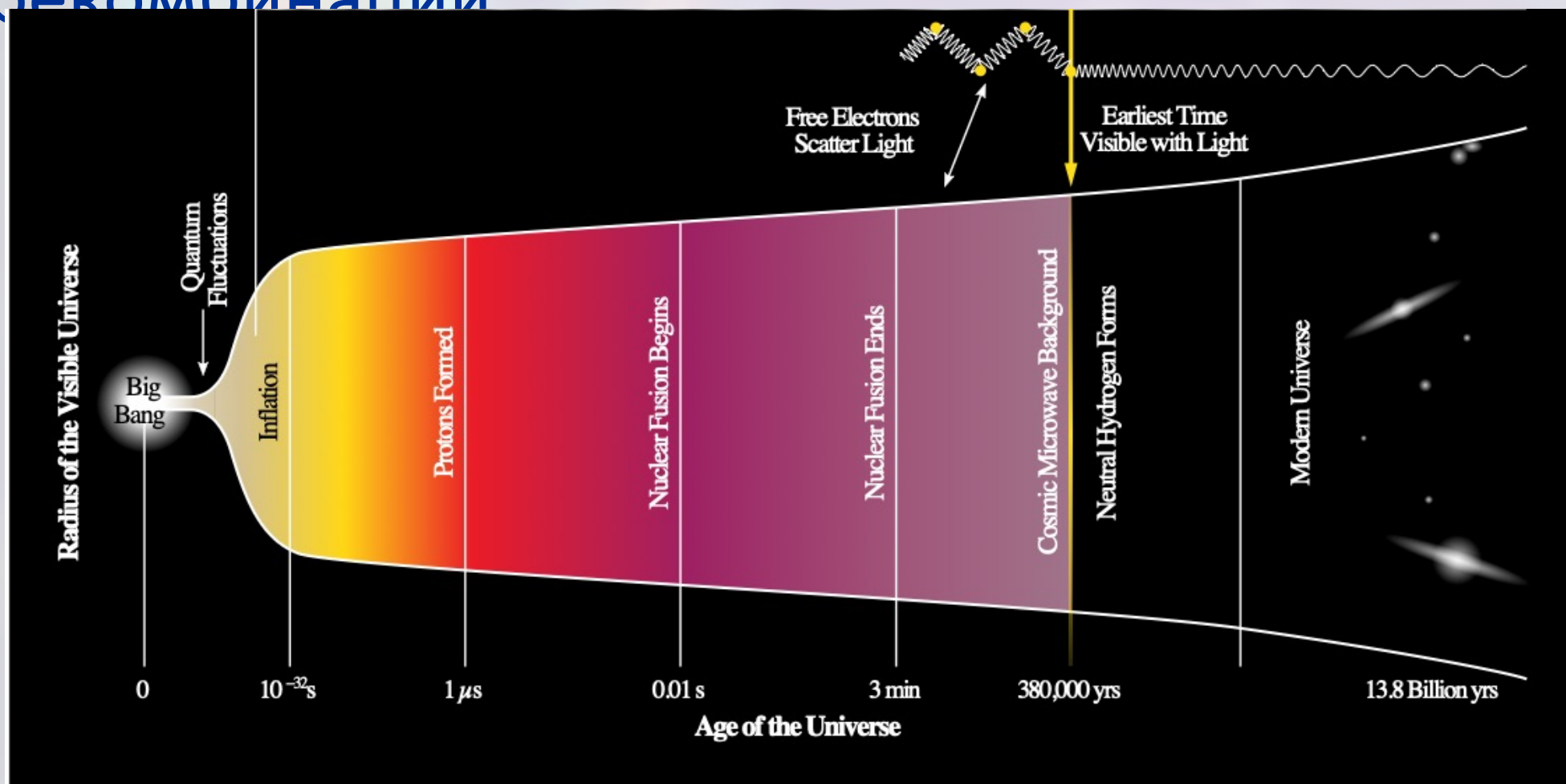
План семинара

- Эволюция вселенной
- СМВ
- Расширение вселенной
- Λ CDM модель, Уравнение Фридмана, Темная энергия
- Барионные акустические колебания, сверхновые 1a
- Программа по исследованию вселенной, SDSS
- Эксперимент DESI
- Результаты эксперимента DESI

Эволюция Вселенной



Эволюция Вселенной: до рекомбинации



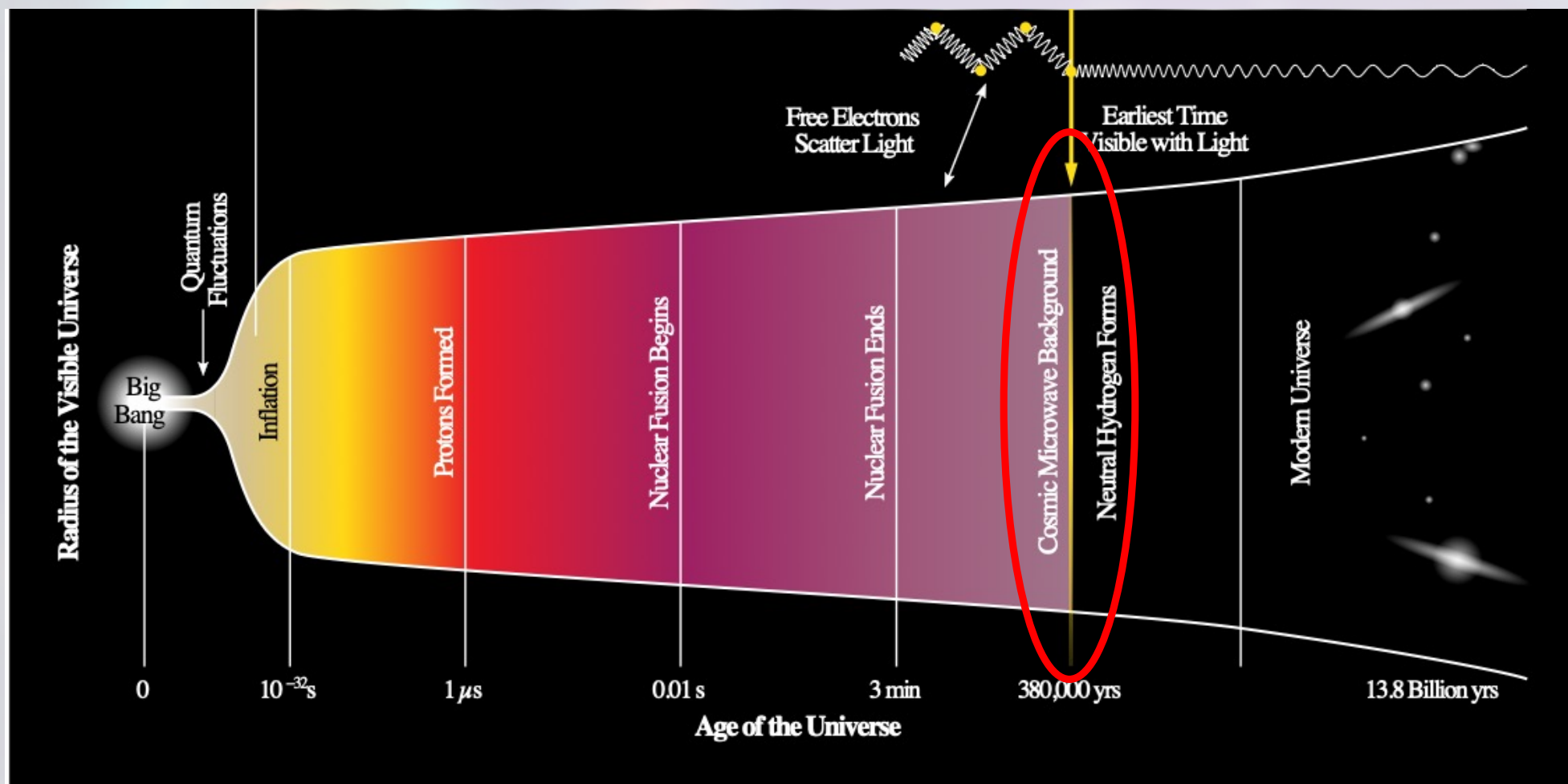
Эволюция Вселенной: до рекомбинации

Время	Эпоха	События
0, сек	?	Большой взрыв Согласно теории Большого взрыва, Вселенная расширяется из начального сверхплотного и "сверхгорячего" состояния. Является ли это исходное состояние сингулярным или нет — активно дебатированный вопрос, разрешить который надеются разработкой квантовой теории гравитации.
$0 - 10^{-43}$, сек	Планковская эпоха	Все четыре фундаментальные силы природы объединены в одну суперсилу что означает, что четыре взаимодействия (гравитационное, сильное ядерное, слабое ядерное и электромагнитное) были объединены в одно единое взаимодействие и Вселенная находилась в состоянии сверхвысокой плотности энергии, температуры и давления. (10^{32} К). По мере того, как Вселенная расширялась и остывала, эта единая сила разделилась на отдельные фундаментальные взаимодействия.
$10^{-43} - 10^{-32}$, сек	Эпоха инфляции	быстрое экспоненциальное расширение. Этот период, согласно инфляционной теории, способствовал сглаживанию Вселенной, сформировал её крупномасштабную структуру из квантовых флуктуаций и привел к образованию обычной материи. ($10^{32} - 10^{22} - 10^{27}$ К) Вселенная увеличилась в размерах как минимум в 10^{26} раз, плотность энергии Вселенной оставалась практически постоянной из-за отрицательного давления инфлатонного поля.

Эволюция Вселенной: до рекомбинации

10^{-32} - 10^{-12} , сек	Электрослабая эпоха	• Электрослабая эпоха: образование тяжелых частиц, таких как W- и Z-бозоны, а также бозон Хиггса. По мере расширения и охлаждения Вселенной, электромагнитное и слабое взаимодействия разошлись, а образование W- и Z-бозонов прекратилось. (10^{28} - 10^{12} К) • Кварковая эпоха: Образование кварк глюонной плазмы (температура и энергия столкновений были слишком высоки для образования адронов, поэтому кварки оставались в свободном состоянии). Когда температура Вселенной упала ниже энергии связи адронов, кварки начали объединяться, образуя протоны и нейтроны: начало адронной эпохи (10^{15} - 10^{13} К). • Адронная эпоха: преобладают протоны и нейтроны. Этот этап начался, когда температура упала достаточно, чтобы кварки могли объединяться в адроны, а закончился, когда большинство адронов и их античастиц аннигилировало, что привело к началу лептонной эпохи. (10^{15} - 10^{12} К) • Лептонная эпоха — это период в ранней истории Вселенной, когда лептоны, такие как электроны, мюоны, тау-лептоны и их нейтрино, составляли большую часть её массы. (10^{12} - 10^{10} К)
10^{-12} - 10^{-6} , сек	Кварковая эпоха	
10^{-6} - 1, сек	Адронная эпоха	
1 - 10, сек	Лептонная эпоха	
10 сек - 379000 лет	Фотонная и Протонная эпохи (включает эпоху первичного нуклеосинтеза)	• Фотонная эпоха — эпоха доминирования фотонов в энергии Вселенной. Началась после аннигиляции лептонов и антилептонов, примерно через 10 секунд после Большого взрыва. • Первичный нуклеосинтез произошел в течение первых нескольких минут фотонной эпохи. После первичного нуклеосинтеза наступила протонная эпоха • протонная эпоха — это период в эволюции ранней Вселенной, между 3 мин и 379 тыс. лет после Большого Взрыва. В течение первых 20 минут протонной эпохи продолжается первичный нуклеосинтез, в процессе которого образуются элементы не тяжелее лития. К концу первичного нуклеосинтеза соотношение по массе составляло примерно 75% водорода и 25% гелия. Примерно через 70 тыс. лет после большого взрыва вещество начинает доминировать над излучением, что приводит к изменению режима расширения Вселенной.

Эволюция Вселенной



Эволюция Вселенной: рекомбинация и после

Время	Стадия	Эпоха	События
379000		Эпоха рекомбинации	Вселенная постепенно охлаждалась стала достаточно холодной (3000 K): образуются атомы. Таким образом, из состояния плазмы, непрозрачного для большей части электромагнитного излучения, материя перешла в газообразное состояние. Вселенная становится прозрачной для фотонов теплового излучения. Тепловое излучение той эпохи мы можем непосредственно наблюдать в виде реликтового излучения
379000 лет – 550 миллионов лет		Темные века	Вселенная заполнена водородом и гелием, реликтовым излучением, излучением атомарного водорода на волне 21см.
550 – 800 миллионов лет		Эпоха реионизации	Образуются первые звёзды (звёзды населения III), галактики, квазары, скопления и галактик. Происходит реионизация водорода светом звёзд и квазаров. от $z=15$ до $z=6.4$
800 миллионов лет – 8.9 миллиардов лет		Эра вещества	Образование межзвездного облака из которого образовалась солнечная система
8.9 – 9.1 миллиардов лет			Образование земли и планет нашей солнечной системы
> 9.8 миллиардов лет			Жизнь на земле

Ранняя вселенная: Инфляция

Ускоренное расширение Вселенной сразу после Большого взрыва (эпоха инфляции) происходило под влиянием инфлантонного поля.

Инфлатон — квант скалярного инфлатонного поля (по одной из гипотез, бозон Хиггса является кандидатом на роль инфлатона).

Квантовые флуктуации этого поля, усиленные быстрым расширением, и привели к появлению начальных возмущений, приблизительно одинаковых по амплитуде как в малых, так и в больших областях пространства. Эти расширенные флуктуации стали первыми неоднородностями во Вселенной, то есть областями с немного отличающейся плотностью энергии.

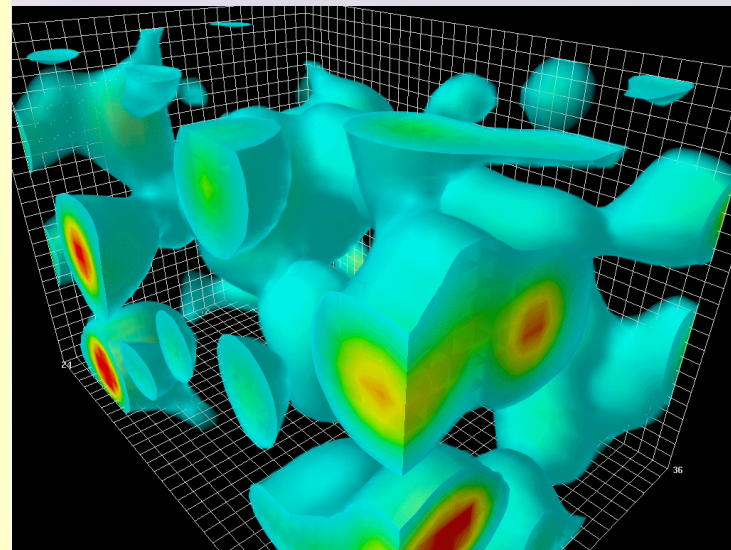
Квантовые флуктуации инфлатонного поля, которые в результате инфляции были растянуты до огромных космических масштабов, стали основой для крупномасштабной структуры Вселенной т.е. привели к образованию галактик и скоплений галактик.

Барионная материя взаимодействовала с фотонами (свет) вплоть до эпохи рекомбинации, что ограничивало ее сжатие в областях с высокой плотностью, тогда как темная материя, не взаимодействующая с фотонами, могла быстрее накапливаться в гравитационных ямах, тем самым усиливая последующее формирование структур.

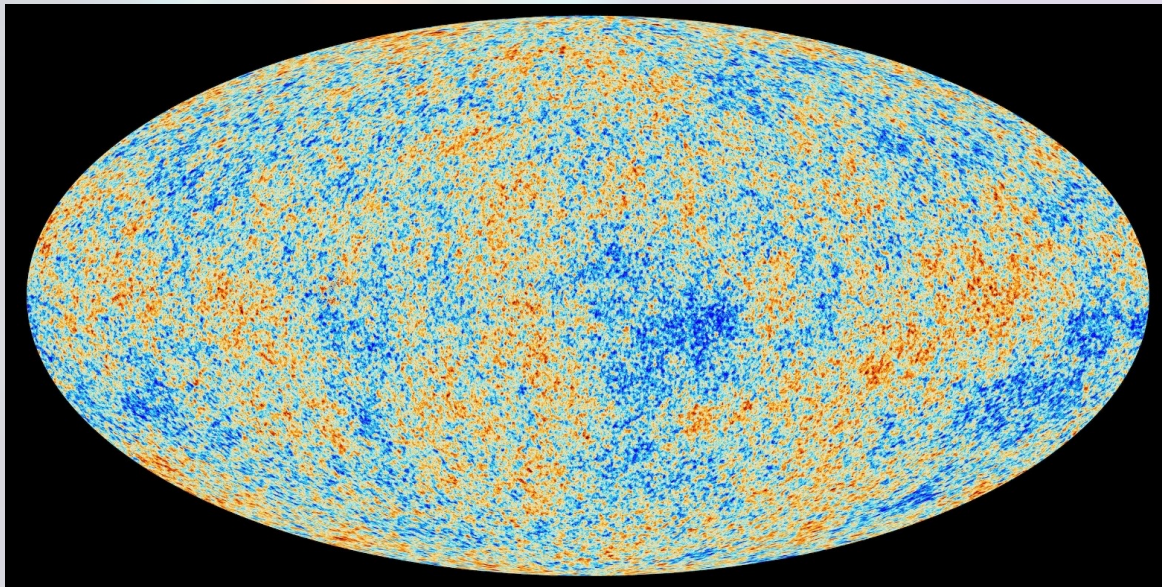
Попытка найти инфлатон предпринималась в эксперименте FASER.

Эксперимент BICEP2: исследование космологической инфляции. BICEP2 зафиксировал реликтовые В-моды (вихревая составляющая поляризации) поляризации космического микроволнового излучения. Наличие этих В-мод указывает на то, что во Вселенной распространялись сильные гравитационные волны, которые, согласно теории, могли возникнуть только во время сверхбыстрого расширения (инфляции)

Yu. Naryshkin, семинар ОФВЭ, 28.10.2025



CMB microwave background



На осях карты реликтового излучения в системе координат RA (прямое восхождение) и Dec (склонение) показано распределение температуры реликтового микроволнового фонового излучения по небесной сфере, Карты реликтового излучения, такие как данные телескопов [Planck](#) или [WMAP](#), показывают небольшие температурные флуктуации, которые дают информацию о ранней Вселенной после Большого взрыва.

- Реликтовое излучение возникло в эпоху рекомбинации, когда вселенной было 379 000 лет, при $z = 1089$.
- Открыто Арно Пензиасом и Робертом Уилсоном в 1965 году.
- Вселенная остыла до температуры около 2700°C , достаточно низкой для «рекомбинации» электронов и протонов в атомы водорода (и гелия). Максимальная длина волны: 1.9 мм
Соответствующая частота: 160.4 ГГц.
- Температура не одинакова (анизотропия) Вселенная не совсем изотропна и однородна. Ранее отклонения температуры составляли 10^{-4} , 10^{-5} т.е. неоднородность была очень маленькая. В процессе эволюции вселенная стала еще более неоднородной
- Распределение материи, созданное акустическими осцилляциями, привело к образованию областей с различной плотностью. Там, где было больше барионов, было и больше фотонов, что привело к более высокой температуре реликтового излучения.
- На карте реликтового излучения наблюдаются очень мелкие отклонения от средней температуры — это и есть анизотропия. Области с более высокой температурой соответствуют областям повышенной плотности барионов в момент рекомбинации, а области с более низкой температурой — областям пониженной плотности.

CMB microwave background

Открытие Пензиасом и Уилсоном (1965 г.):

Арно Пензиас и Роберт Уилсон случайно обнаружили изотропное фоновое микроволновое излучение. За это открытие они получили Нобелевскую премию.

Реликт-1 (СССР, 1983-1984 гг.):

Первый космический эксперимент для изучения реликтового излучения. По результатам анализа данных этого эксперимента была обнаружена анизотропия, хотя эти результаты оспаривались из-за недостаточной точности.

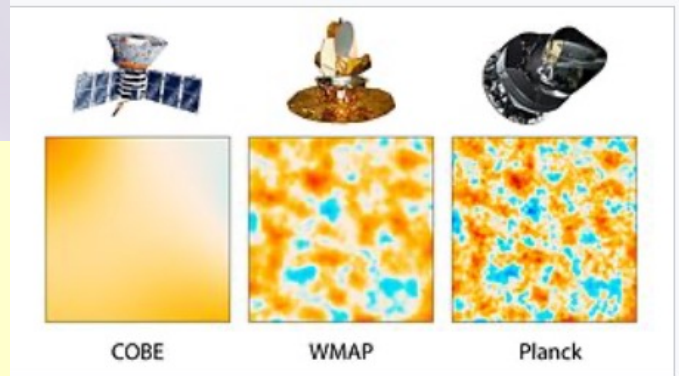
Cosmic Background Explorer (COBE, США, 1992 г.):

Космический аппарат, который провел первые точные измерения анизотропии реликтового излучения и подтвердил, что оно соответствует спектру абсолютно чёрного тела. Джордж Смут и Джон Мазер за это открытие получили Нобелевскую премию. Миссия NASA Cosmic Background Explorer (COBE), запущенной в 1989 году и завершившей научную деятельность в 1993 году. Эта «детская фотография» Вселенной, как её называет NASA, подтвердила предсказания теории Большого взрыва, а также показала признаки ранее не наблюдавшейся космической структуры.

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP, США, 2003 г.):

Более подробная карта составлена в 2003 году Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), запущен в июне 2001 года и прекратившему сбор научных данных в 2010 году.

Планк (Европейское космическое агентство, 2013 г.): 2009 -2013 «Планк» регистрировал реликтовое излучение, измеряя его температуру. На основании анализа анизотропии в температуре РИ, которые появились из-за квантовых флуктуаций в ранней Вселенной, был определен состав Вселенной. По данным «Планка», вселенная состоит на 4,9 % из барионной материи (предыдущая оценка — по данным WMAP — 4,6 %), на 26,8 % из тёмной материи (против 22,4 %) и на 68,3 % (против 73 %) из тёмной энергии.



Красное смещение

Фотон “краснеет”, когда его энергия уменьшается, что приводит к увеличению его длины волны, и, как следствие, к смещению спектра в сторону более красных (длинноволновых) цветов. В космологии есть три вида красного смещения:

1. **Гравитационное красное смещение:** Когда свет покидает область с сильной гравитацией, он теряет энергию, преодолевая гравитационное притяжение. Эта потеря энергии проявляется как увеличение длины волны фотона, то есть красное смещение.
2. **Доплеровское красное смещение:** Если источник света удаляется от наблюдателя, длина волны света увеличивается (красное смещение).
3. **Космологическое красное смещение:** В расширяющейся Вселенной, свет от далеких галактик испытывает красное смещение за счет расширения вселенной.

В наблюдаемое красное смещение от галактик вносят вклад как космологическое красное смещение из-за расширения пространства Вселенной, так и красное или синее смещение эффекта Доплера вследствие собственного движения галактик. При этом на больших расстояниях вклад космологического красного смещения становится преобладающим.

Практически, с помощью телескопа и спектрометра измеряется изменение интенсивности звездного света в зависимости от частоты.

- Красное смещение (и синее смещение) характеризуется относительной разницей между наблюдаемой и излучаемой длинами волн (или частотой) объекта.
- В астрономии обозначается как z и определяется:

Based on wavelength	Based on frequency
$z = \frac{\lambda_{\text{obsv}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}}$	$z = \frac{f_{\text{emit}} - f_{\text{obsv}}}{f_{\text{obsv}}}$
$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obsv}}}{\lambda_{\text{emit}}}$	$1 + z = \frac{f_{\text{emit}}}{f_{\text{obsv}}}$

λ - длина волны, f - частота
($\lambda f = c$, где c — скорость света)

Некоторые определения

Масштабный фактор $a(t)$ определяет изменение расстояния между галактиками, т.о. все расстояния между галактиками пропорциональны $a(t)$. Расширение Вселенной означает увеличение масштабного коэффициента со временем.

Постоянная Хаббла (параметр Хаббла) H — коэффициент который связывает расстояние до внегалактического объекта со скоростью его удаления. Имеет размерность, обратную времени, но выражается обычно в км/с на мегапарсек, обозначая среднюю скорость разлёта в современную эпоху двух галактик, разделённых расстоянием в 1 Мпк. Изменяется со временем, в каждый данный момент времени во всех точках Вселенной величина H одинакова.

Параметр Хаббла – относительная скорость изменения масштабного фактора: $H = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$.

1 мегапарсек = 3.3×10^6 световых лет = 3.1×10^{24} см

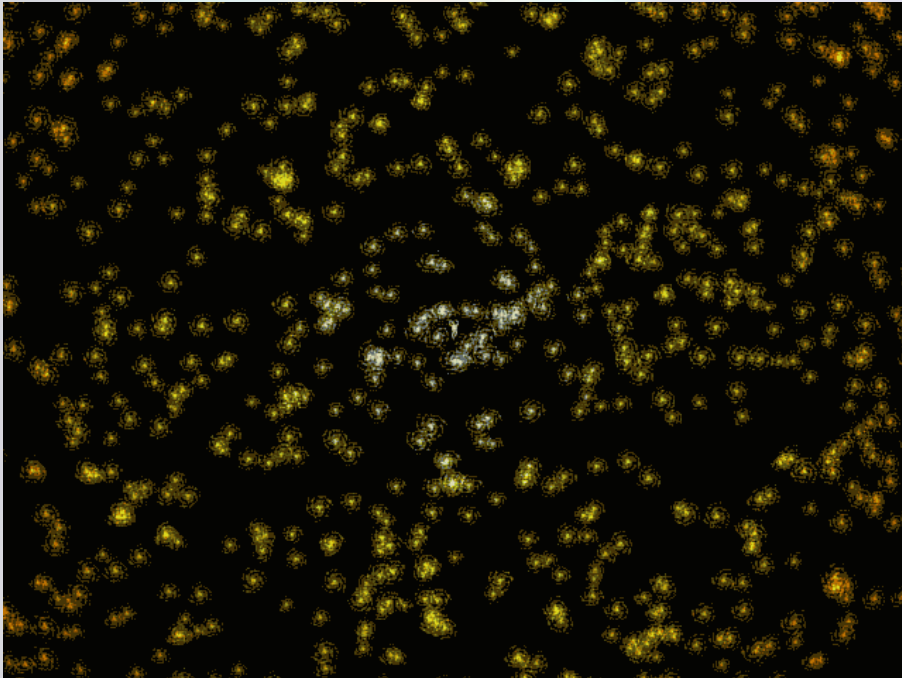
Наша галактика - 8 килопарсек

До андромеды м31 - 800 килопарсек

Скопления галактик $\sim$ несколько мегапарсек

Видимая вселенная $\sim$ 28.5 гигапарсек

Расширение Вселенной



- Теоретически явление было предсказано и обосновано А. Фридманом в 1922.
- Вселенная расширяется однородно и изотропно т.е. расстояние между галактиками увеличивается со временем. Вселенная расширяется во всех направлениях равномерно, то есть она расширяется одинаково во все стороны. Чем дальше от нас галактика, тем быстрее она удаляется.
- Определяется по красному смещению галактик - излучение более далёких галактик сдвинуто в более красную (более длинноволновую) область спектра.
- Расширение Вселенной было впервые зафиксировано Эдвином Хабблом в 1929 году, когда он наблюдал, что галактики удаляются друг от друга. Закон Хаббла — описывает расширение Вселенной: скорость удаления галактик прямо пропорциональна расстоянию до них.
- Экспериментально расширение Вселенной подтверждается выполнением закона Хаббла, а также уменьшением светимости экстремально удалённых сверхновых типа Ia «стандартных свеч».

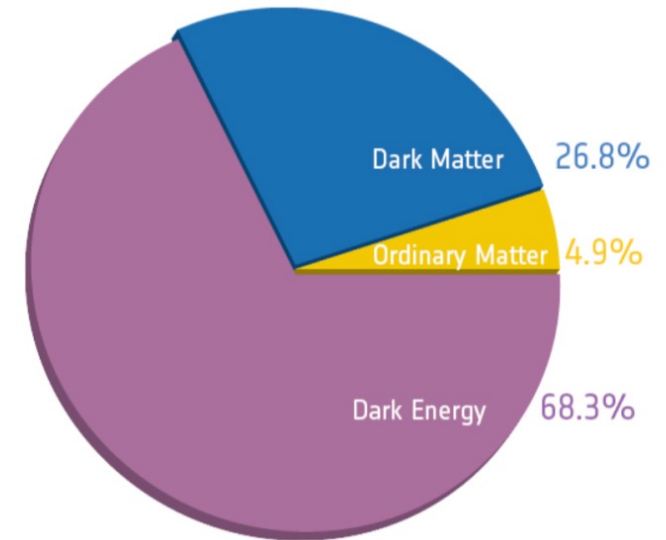
Расширение вселенной и «темная энергия»

- 1922 год: А. Фридман получил теоретические доказательства расширения Вселенной, решив уравнения Эйнштейна.
- 1927 год: Ж. Леметр независимо от Фридмана также пришел к теоретическому выводу и представил первые наблюдательные данные о линейной зависимости скорости удаления галактик от расстояния.
- 1929 год: Э. Хаббл подтвердил эти наблюдения, показав, что все галактики удаляются от нас, причем тем быстрее, чем дальше они находятся. Это открытие известно как закон Хаббла.
- 1998 год: Две независимые группы «Supernova Cosmology Project» и «High-Z Supernova Search Team» обнаружили, что Вселенная расширяется **не с постоянной скоростью, а с ускорением**, которое началось примерно через 7,6 миллиарда лет после Большого взрыва. Использовались сверхновые типа Ia как "стандартные свечи", (измерялось расстояния до них).
- Когда измеряли расстояние до далёких сверхновых Ia, было обнаружено, что они находятся дальше, чем должны были бы быть, если бы Вселенная расширялась с постоянной скоростью или замедлялась.
- Ускорение расширения Вселенной стало неожиданностью, поскольку предполагалось, что гравитация материи должна замедлять это расширение.

**Для объяснения ускоренного расширения Вселенной была введена концепция “темной энергии”
энергия вакуума — один из ведущих кандидатов на роль темной энергии**

Модель Лямбда-CDM

- **Λ CDM Lambda-Cold Dark Matter**—стандартная космологическая модель, в которой пространственно-плоская Вселенная заполнена, помимо обычной барионной материи, **темной энергией (описываемой космологической постоянной Λ в уравнениях Эйнштейна)** и холодной тёмной материей (Cold Dark Matter). Λ используется для количественной оценки ускорения Вселенной. Эта постоянная представляет собой неизменную плотность энергии, присущую самому вакууму.
- Согласно Λ CDM, для согласования с наблюдениями возраст Вселенной должен быть принят равным $13,799 \pm 0,021$ миллиарда лет.
- Модель предполагает, что ОТО является правильной теорией гравитации на космологических масштабах.
- Λ CDM возникла в конце 1990-х годов и включает в себя космологическую инфляцию на ранних стадиях Большого взрыва для объяснения пространственной плоскостности Вселенной и начального спектра возмущений.



Модель включает в себя расширение Вселенной, которое хорошо подтверждается космологическим красным смещением спектров удалённых галактик и квазаров.

Уравнения Фридмана

Λ CDM — является моделью Фридмана, включающая в себя помимо барионной материи, тёмную материю и тёмную энергию.

- Уравнения Фридмана, также известные как уравнения Фридмана–Леметра (ФЛ), представляют собой набор уравнений в физической космологии, которые описывают космическое расширение в однородных и изотропных моделях Вселенной в контексте общей теории относительности.

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}, \quad \frac{\ddot{a}}{a} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$$

H - постоянная Хаббла, $a(t)$ масштабный фактор (показатель изменения расстояния между галактиками в результате расширения Вселенной.), G - гравитационная постоянная, Λ - космологическая константа, ρ - плотность энергии, p - давление, k - кривизна пространства

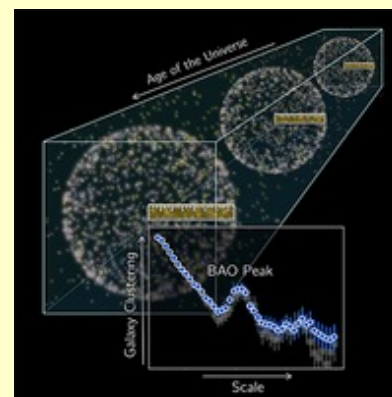
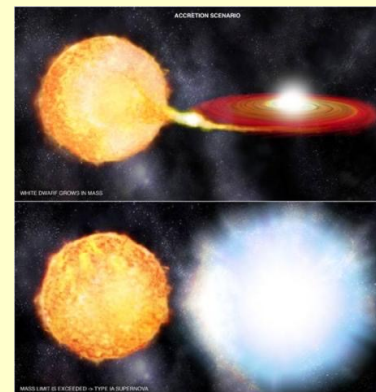
- Первое уравнение задаёт связь между скоростью расширения Вселенной (параметром Хаббла), плотностью материи и энергии, и пространственной кривизной.
- Второе уравнение определяет, как ускоряется или замедляется расширение Вселенной. Замедление происходит из-за гравитационного притяжения материи, а ускорение вызвано отрицательным давлением, связанным с тёмной энергией.
- Впервые они были выведены Александром Фридманом в 1922 году из уравнений Эйнштейна для метрики Фридмана–Леметра–Робертсона–Уокера и идеальной жидкости с заданной плотностью массы ρ и давлением.

Расширение вселенной и «темная энергия»

- ускоряющееся расширение Вселенной началось приблизительно 5 миллиардов лет назад.
- до этого расширение замедлялось благодаря гравитационному действию тёмной материи и барионной материи.
- Плотность барионной материи в расширяющейся Вселенной уменьшается быстрее, чем плотность тёмной энергии что приводит к **доминированию тёмной энергии**.
- Когда объём Вселенной удваивается, плотность барионной материи уменьшается вдвое, а плотность тёмной энергии остается неизменной. Расширение пространства не снижает плотность, темной энергии а наоборот, увеличивает общее количество тёмной энергии во Вселенной. Это отрицательное давление «выталкивает» пространство и вызывает ускоренное расширение.
- Динамика Вселенной зависит от тонкого баланса между гравитационным притяжением материи и отталкивающим эффектом тёмной энергии. Вселенная, состоящая только из материи, в конечном итоге замедлила бы своё расширение под действием гравитационных сил и, сколлапсировала бы.
- Предполагается, что тёмная энергия однородна по всей вселенной.
- Уравнение состояния тёмной энергии — это параметр w определяемый как отношение её давления p к плотности энергии ρ : $w=p/\rho$. В модели Λ CDM w равно -1 .

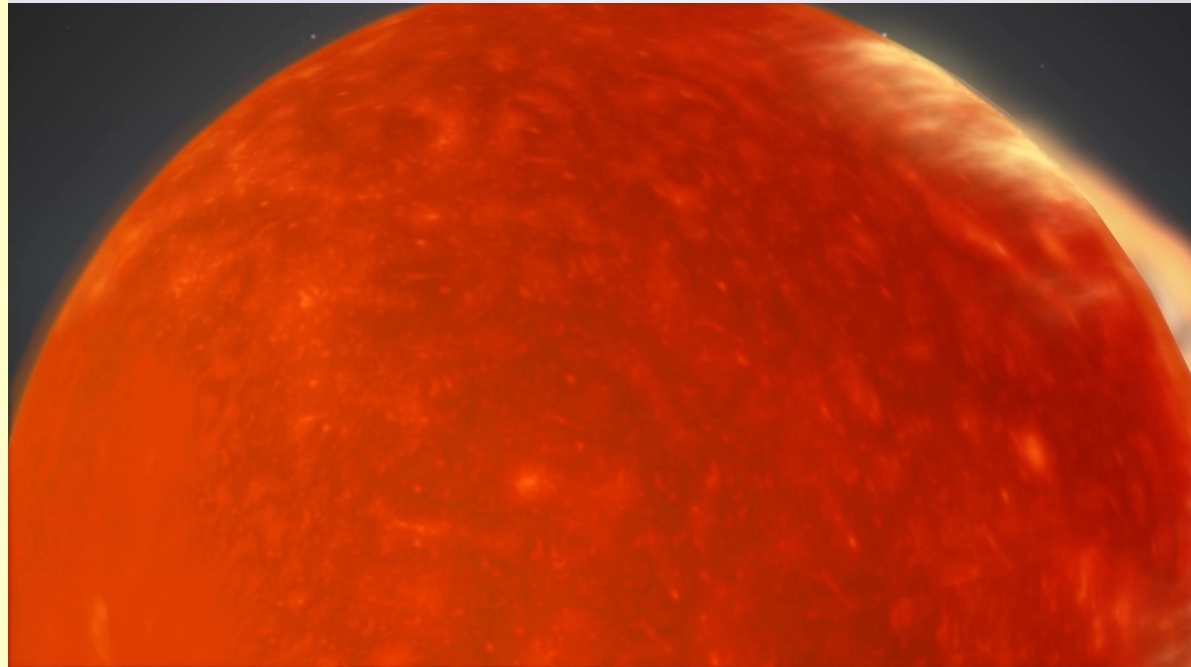
Методы исследования «темной энергии»

- Наблюдение сверхновых типа Ia
- Исследование Барионных Акустических Осцилляций



Сверхновые тип 1a

- Сверхновые типа Ia возникают в двойной звездной системе – системе, состоящей из двух звезд. Для взрыва типа Ia одна из звезд должна быть белым карликом (звезда на поздней стадии эволюции, состоящая из плотной электронной плазмы, лишенная термоядерных реакций и постепенно остывающая). Другая – менее эволюционировавшая звездой, например, красным гигантом. Два белых карлика сталкиваются, так же образуя сверхновую типа Ia.
- Гравитационная сила белого карлика притягивает к себе вещество менее эволюционировавшей звезды. Белый карлик постепенно становится массивнее. Этот процесс известен как аккреция. Когда белый карлик достигает 1,44 массы Солнца (предел Чандрасекара), он становится нестабильным и взрывается как сверхновая типа Ia.
- В ходе этого процесса происходит взрыв углеродного горения, при котором ядра углерода (C) и кислорода (O) начинают реакцию с образованием более тяжелых элементов. Основные реакции:
 - $C + C \rightarrow Mg + \gamma$ (гамма квант)
 - $C + O \rightarrow$ Распады в более тяжелые элементы



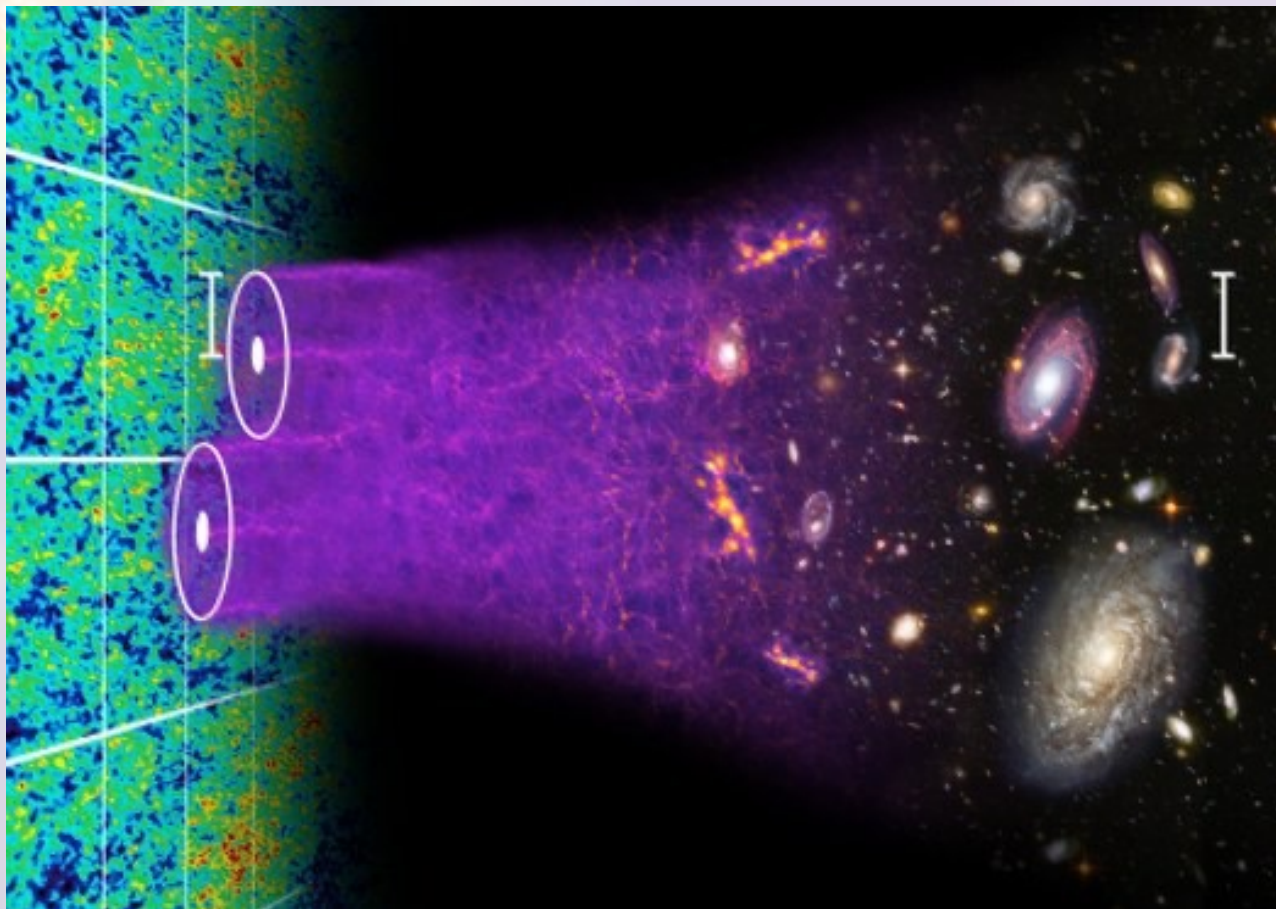
Сверхновые тип 1a: «Стандартные свечи»

- Массы пред-сверхновых белых карликов близки к одинаковому значению, все сверхновые типа Ia имеют примерно одинаковую пиковую светимость.
- Это позволяет использовать их как «стандартные свечи» для определения расстояний до галактик и измерения скорости расширения Вселенной.
- Зная, насколько яркой должна быть сверхновая, можно измерить ее видимую яркость (то есть, насколько она тусклая на небе).
- Для точного расчёта используется формула модуля расстояния:
$$m - M = 5 \log_{10}(d) - 5$$

m — видимая звёздная величина
 M — абсолютная звёздная величина
 d — расстояние до объекта в парсеках

Поскольку абсолютная звёздная величина M для сверхновых типа Ia считается известной, можно легко вычислить расстояние d .
- Более тусклая сверхновая означает, что она находится дальше, а более яркая — ближе. В спектрах сверхновых типа Ia отсутствуют водородные линии, поскольку водорода в них очень мало.

Барионные Акустические Осцилляции

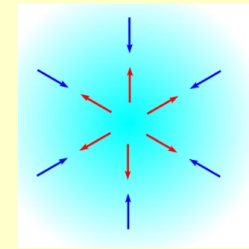


Барионные акустические осцилляции (БАО)

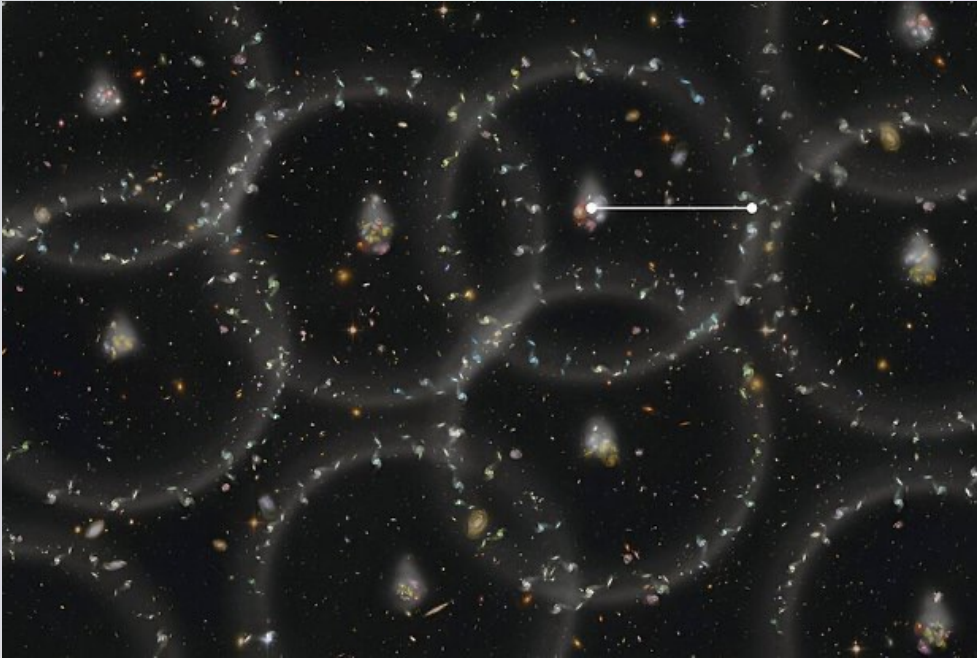
- Барионные акустические осцилляции (БАО) представляют собой звуковые волны.
- Предсказаны в конце 60-х гг. XX века Д. Пиблз и Джер Ю из Принстонского университета и, независимо от них, Я. Зельдовичем и Р. Сюняевым.
- БАО начинают формироваться с первичной плазмы в ранней вселенной (примерно через $\sim 350\,000$ лет после Большого взрыва) до рекомбинации (примерно $380\,000$ лет после Большого взрыва).
- Квантовые флуктуации инфлантонного поля, усиленные быстрым расширением, и привели к появлению начальных возмущений.

Как возникают БАО

- Фотоны, барионы и электроны составляли плотную плазму, в которой фотоны упруго рассеивались на электронах (томпсоновское рассеяние).
- Это рассеяние препятствовало свободному движению фотонов создавая внутреннее давление излучения, которое противодействовало гравитационному сжатию барионной материи.
 - **Гравитация:** Стремилась сжать материю.
 - **Давление фотонов:** Это давление фотонов вызывало расширение областей плазмы.
- После расширения, гравитация начинала действовать на эти области, притягивая барионы обратно к центру.
- Цикл расширения (под действием фотонов) и сжатия (под действием гравитации) создал звуковые волны, которые колебались в плазме, подобно звуковым волнам в газе.
- В результате упругие акустические волны — барионные акустические осцилляции.
- Когда Вселенная остыла примерно до 3000 кельвинов (380000 лет), начался процесс рекомбинации. В эпоху рекомбинации электроны объединились с протонами и образовались атомы водорода. Эта среда прозрачная для фотонов и процесс распространения волн закончился.



Как проявляются БАО



Первое наблюдение 2005 год. Использовались данные SDSS на основе выборки из 46 748 светящихся красных галактик на площади более 3816 квадратных градусов неба (примерно пять миллиардов световых лет в диаметре) с красным смещением $z = 0.47$

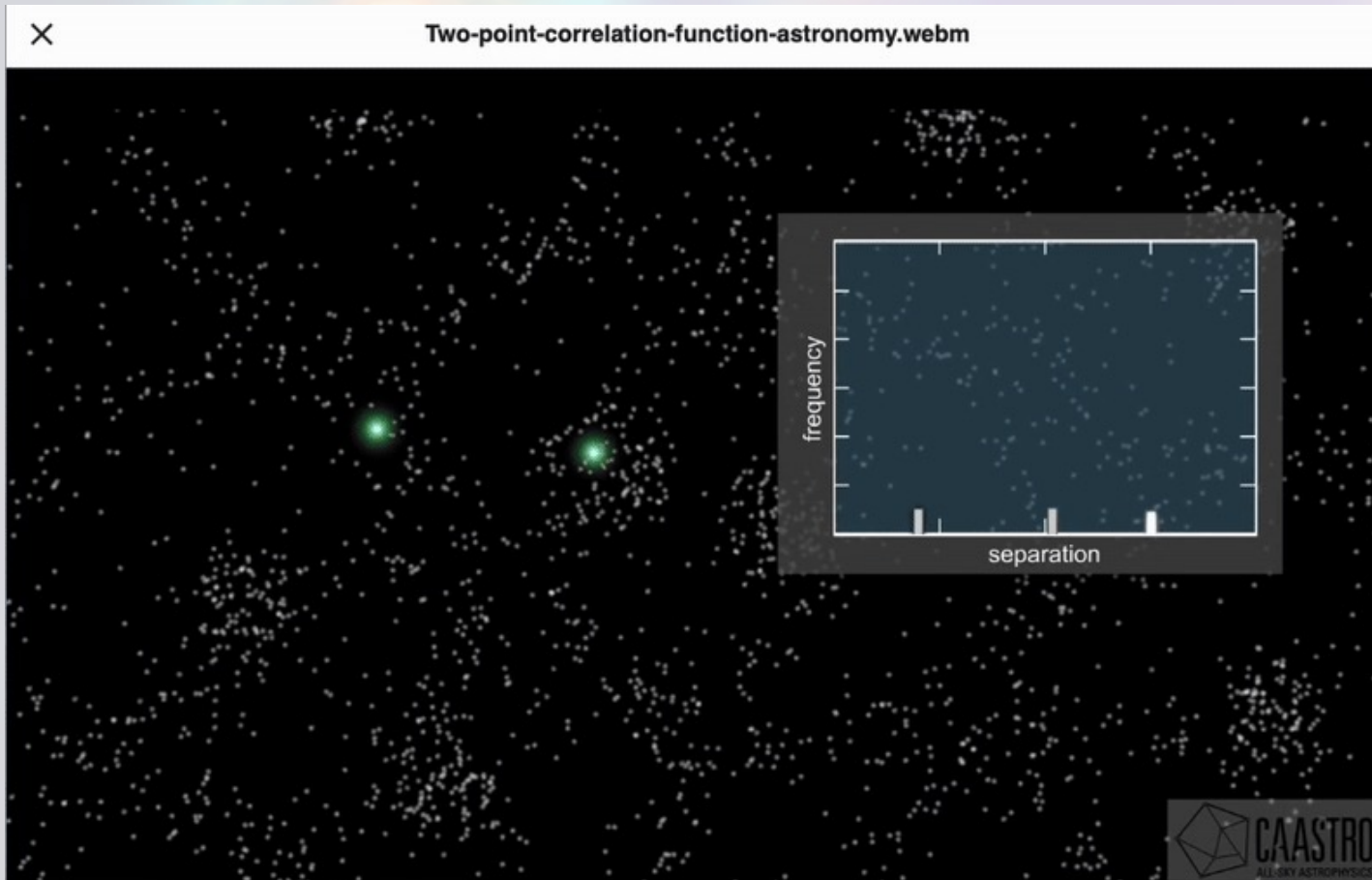
- Поскольку все возмущения плотности появились одновременно в первый же момент Большого взрыва, звуковые волны оказались синхронизированными по фазе.
- Барионы остались в виде оболочек, которые образовались вокруг первоначальных центров сгущения тёмной материи. В этих оболочках впоследствии стали формироваться галактики.
- Размер БАК определяется максимальным расстоянием, которое акустические волны могли пройти в ранней Вселенной до момента рекомбинации.
- Это расстояние называется акустическим горизонтом (радиус сферы) и соответствует примерно 100 Мпк или около 326 миллионов что позволяет использовать его как "стандартную линейку" для измерения крупномасштабной структуры Вселенной.
- Таким образом, современное распределение галактик имеет характерную структуру: существует статистически больше пар галактик, разделённых расстоянием в 100 Мпк.

Функции корреляции

По положению и размерам БАО в разных эпохах можно измерить, как быстро расширяется Вселенная.

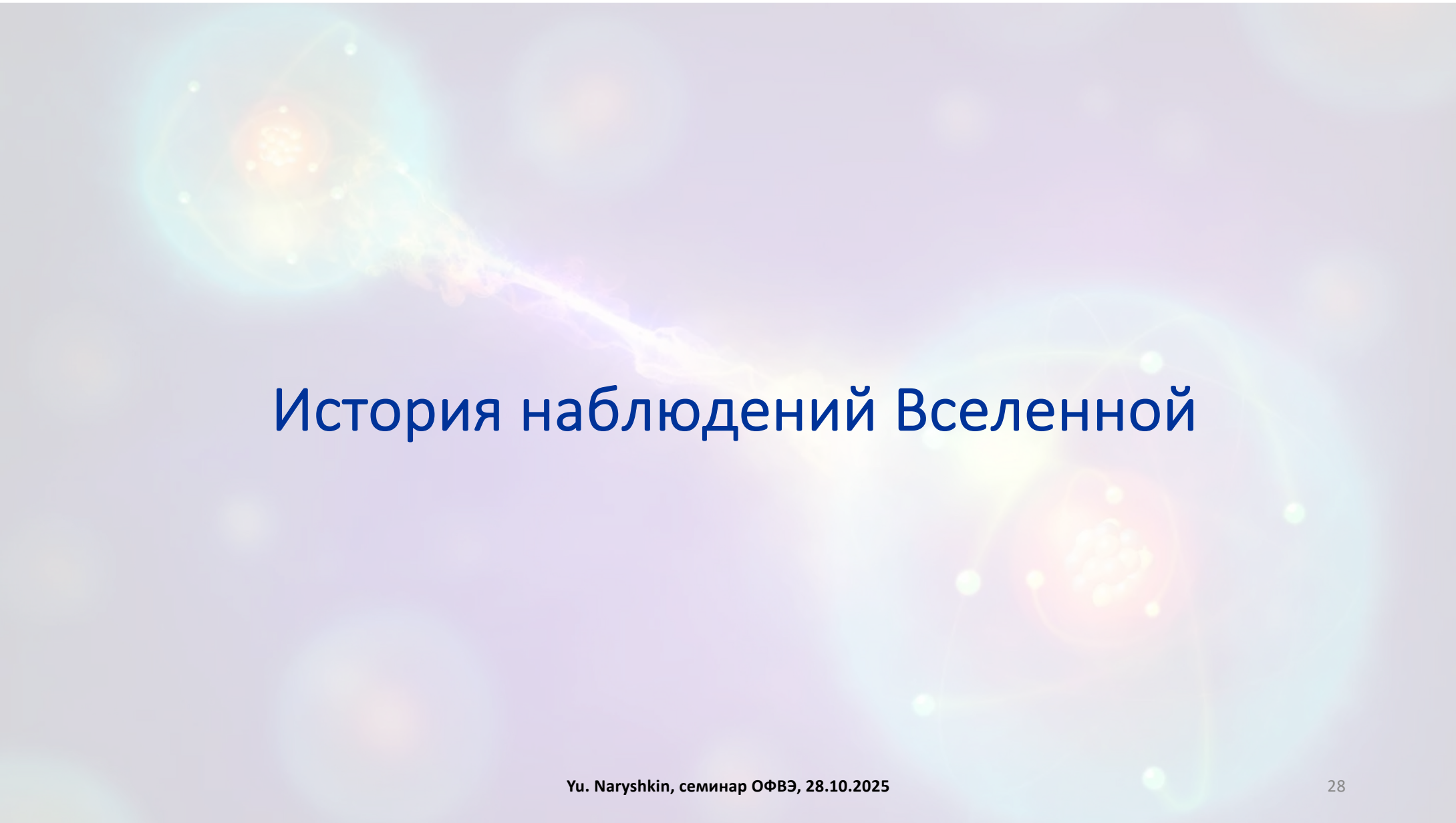
- Измеряются положения галактик
- Для каждой пары галактик определяется расстояние между ними. Затем вычисляется, насколько часто встречаются пары на одинаковом расстоянии, по сравнению с тем, что ожидалось бы при случайном, однородном распределении.
- Результаты отображаются в виде функции, где по оси абсцисс отложено расстояние, а по оси ординат – степень корреляции или вероятность встретить галактику на этом расстоянии.
- корреляционная функция галактик разлагается по полиномам Лежандра для анализа анизотропии кластеризации, а полученные мультипольные моменты (монопольный, квадрупольный) используются для извлечения информации о БАО.
- Пик БАО является наиболее заметной особенностью корреляционной функции галактик и соответствует наиболее вероятному расстоянию между этими галактиками, известному из физики ранней Вселенной. Это расстояние служит стандартной линейкой для измерения расширения Вселенной с течением времени.

Как наблюдают Барионные акустические осцилляции



В крупномасштабном распределении галактик существует статистическая закономерность: если пара галактик разделена расстоянием около 100 Мпк, то такая пара встречается чаще, чем другие. Это проявляется как пик в распределении галактик.

Этот пик, или всплеск, в корреляционной функции распределения галактик, является прямым наблюдательным проявлением барионных акустических колебаний, сформировавшихся в ранней Вселенной.

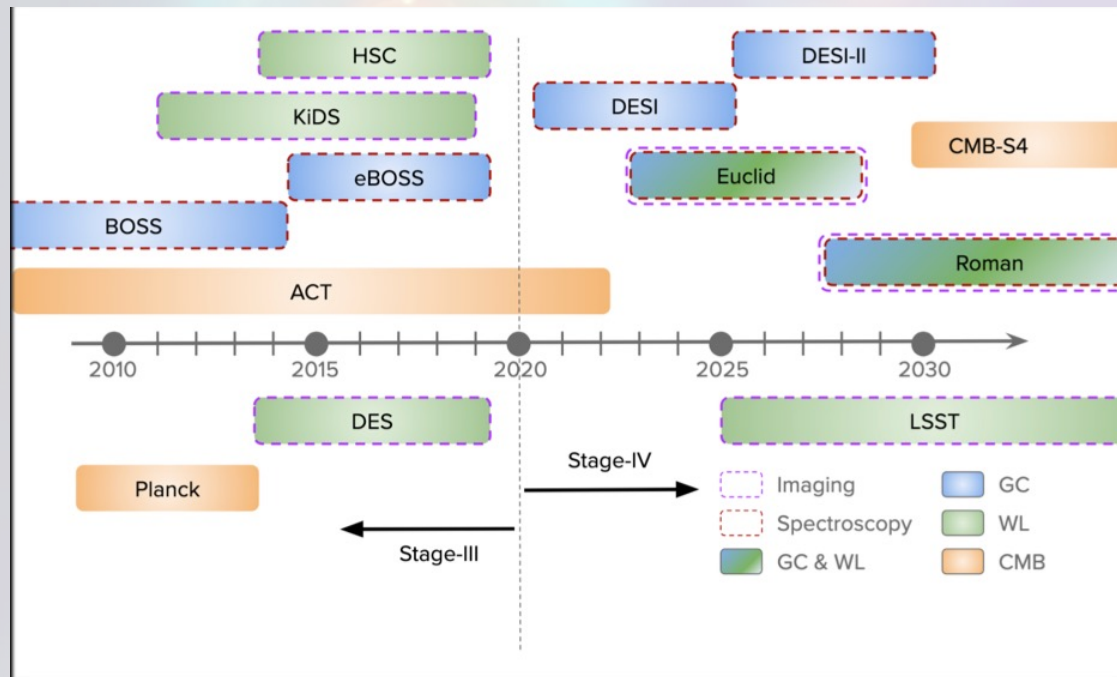
The background of the slide is a deep purple space filled with faint, colorful nebulae and star clusters. Two prominent galaxy clusters are visible: one in the upper left with a bright orange-red core and a cyan glow, and another in the lower right with a red core and a cyan glow. A bright, yellowish-white filament connects these two clusters, representing the cosmic web. The title text is centered over this background.

История наблюдений Вселенной

SDSS (Sloan Digital Sky Survey)

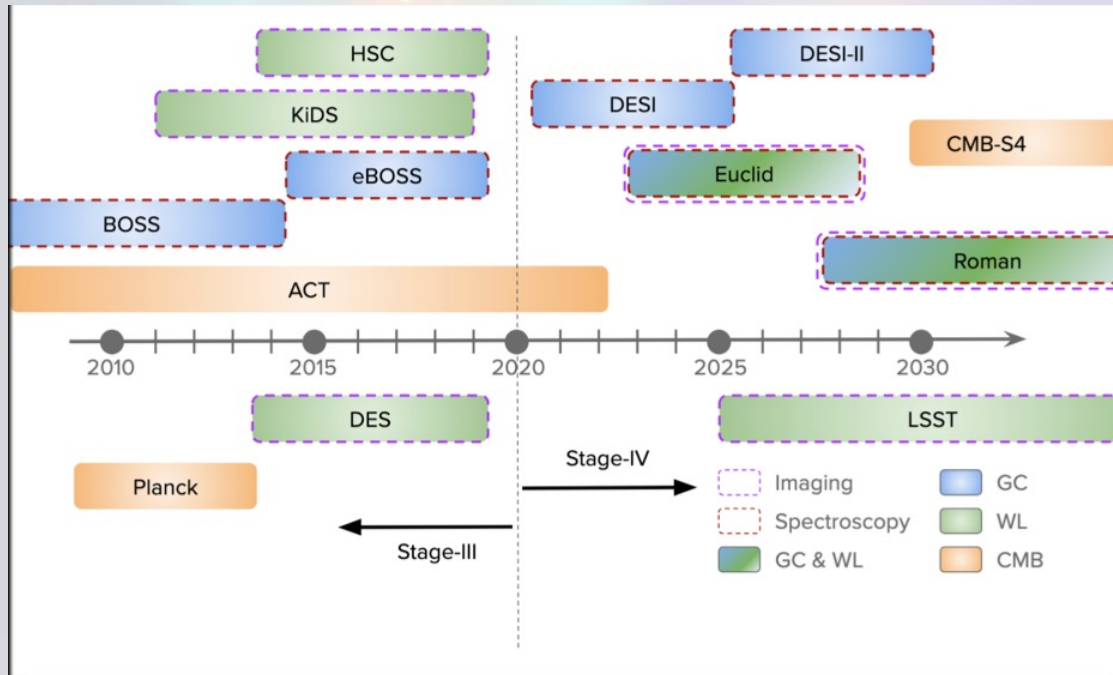
- Слоуновский обзор (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) — крупномасштабный астрономический проект, использующий 2,5-метровый широкоугольный телескоп в обсерватории Апачи-Пойнт (Нью-Мексико, США) для создания обширных многоспектральных изображений и спектров красного смещения звезд и галактик. Проект назван в честь [фонда Альфреда Слоуна](#), цель — создание точной цифровой карты неба.
- Проект делится на несколько фаз: SDSS-I (2000—2005), SDSS-II (2005—2008), SDSS-III (2008—2014), SDSS-IV (2014—2020). Собранные в ходе обзоров данные публикуются в виде отдельных релизов (Data Release), последний из них, DR13 опубликован в августе 2016 года
- Обзор охватывает более 7500 квадратных градусов Северного галактического полушария с данными почти о двух миллионах объектов и спектры более чем 800 000 галактик и 100 000 квазаров. Информация о позициях и расстояниях до объектов позволила получить представление о крупномасштабной структуре Вселенной.

Эксперименты ...



- **Hyper Suprime-Cam (HSC):** Оптический обзор изображений, проводимый с помощью телескопа Subaru. Его основная космологическая цель — изучение слабого гравитационного линзирования, мощного инструмента для исследования темной материи и темной энергии путем наблюдения за тем, как гравитация крупномасштабных структур искажает свет от далеких галактик.
- **Kilo-Degree Survey (KiDS):** Оптический обзор слабого линзирования и обзор галактик с использованием телескопа VLT Survey Telescope. Он также отображает распределение темной материи в больших масштабах.
- **Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (eBOSS):** (SDSS), спектроскопический обзор, измеряющий трехмерное положение галактик и квазаров в обширном пространстве (измерения барионных акустических осцилляций (BAO)).
- **Planck:** [астрономический спутник Европейского космического агентства](#) (ЕКА), созданный для изучения CMB.

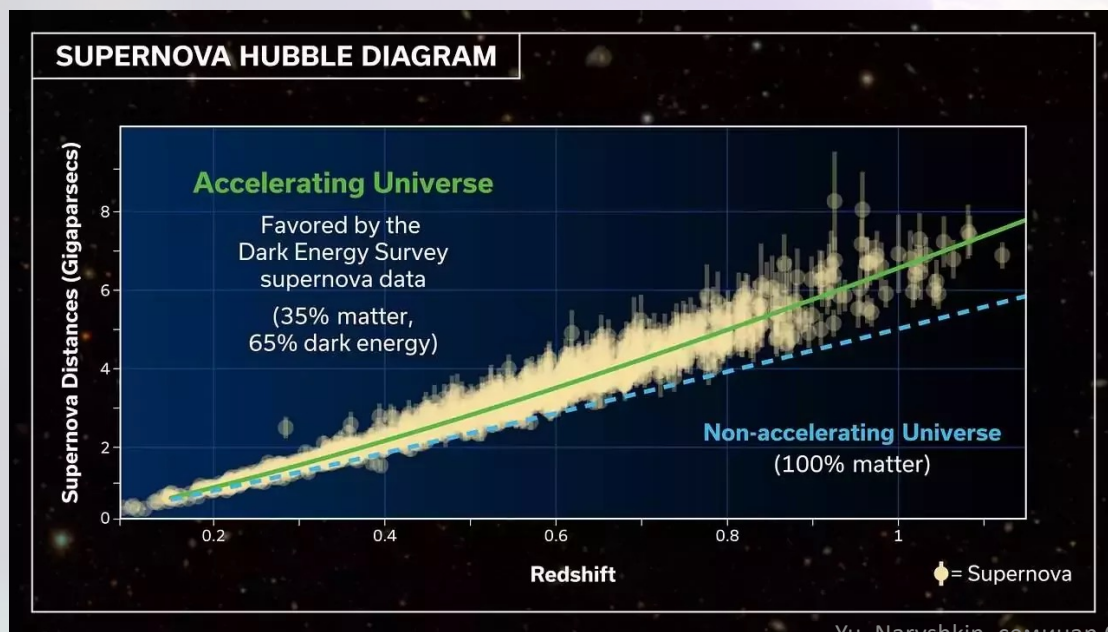
Эксперименты ...



- **Euclid** A European Space Agency mission to map the large-scale structure of the universe through galaxy surveys, focusing on the effects of dark energy.
- **Nancy Grace Roman Space Telescope (formerly WFIRST)** A NASA mission that will also map large-scale structures. Its wavelength coverage begins where Euclid's ends, making it a complementary partner.
- **CMB-S4** A next-generation, ground-based experiment that will provide highly detailed observations of the cosmic microwave background (CMB).
- **LSST ([Vera C. Rubin Observatory](#))** A ground-based observatory that will produce a vast dataset for a wide range of astronomical research. It will survey a large portion of the sky, providing data that can be combined with space-based observations to improve cosmological measurements.

DES Dark Energy Survey

- **Dark Energy Survey** (DES, с [англ.](#) — «Обзор тёмной энергии») — это [астрономический обзор](#) в видимой и ближней инфракрасной области спектра, целью которого является изучение динамики [расширения Вселенной](#) и роста [крупномасштабной структуры Вселенной](#).
- Фотографирование неба осуществлялось при помощи 4-метрового [телескопа имени Виктора Бланко](#), расположенного в [Межамериканской обсерватории Серро Тололо](#) (СТИО) в Чили, оснащенного Dark Energy Camera (DECam). По сравнению с ранее применявшимися инструментами, этот прибор обладает более высокой чувствительностью изображения в красной части видимого спектра и в ближней инфракрасной области



Yu. Naryshkin, семинар ОФВЭ, 28.10.2025

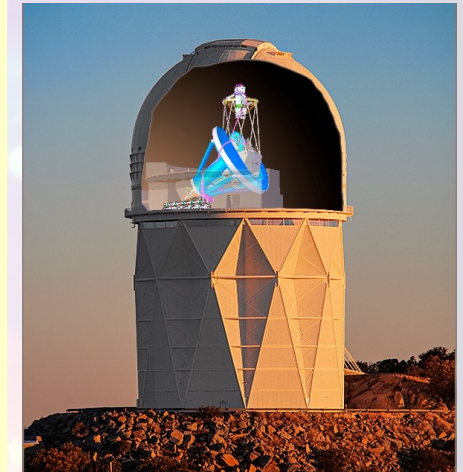
DES vs DESI

- DESI — проект следующего поколения, четвёртой стадии, предназначенный для получения более точных данных.
- Главное отличие заключается в том, что Dark Energy Survey (DES) использует широкополосные цветные изображения для оценки расстояний до галактик, в то время как Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) использует детальную спектроскопию для более точных измерений красного смещения для картирования Вселенной.
- Оба проекта направлены на изучение тёмной энергии путём картирования крупномасштабной структуры Вселенной, но используют разные методы, масштабы и точность.

DESI эксперимент: основные задачи

DESI ([Dark Energy Spectroscopic Instrument](#)) — обзорный спектрограф, установленный в главном фокусе 4-метрового телескопа Mayall в Китт-Пике, на телескопе имени Николаса Мэйалла в Аризоне. Использует 5000 оптических волокон для одновременного сбора спектров от тысяч галактик и квазаров, создавая детальную трехмерную карту Вселенной и изучая темную энергию и ее влияние на расширение космоса. Получит спектры и данные о красном смещении не менее 18 миллионов галактик с эмиссионными линиями, 4 миллионов ярких красных галактик и 3 миллионов квазизвёздных объектов QSO, с целью:

- **картографирование Вселенной:** собирает спектры 5000 объектов (галактик и квазаров за последние 11 миллиардов лет) за одну экспозицию, используя 5000 роботизированных оптических волокон, и строит самую большую и точную трехмерную карту космоса.
- **исследования влияние тёмной энергии** на расширение вселенной с помощью Барийных Акустических Осцилляций (БАО)
- **Измерение скорости расширения Вселенной:** Анализ красного смещения от далеких объектов, можно определить, как быстро расширяется Вселенная.
- измерение суммы масс нейтрино
- исследование признаков первичной инфляции.
 - LRG (Large Red Galaxy Survey): это большой обзор крупно красных галактик.
 - ELG (Emission Line Galaxy Survey): это обзор галактик с линиями эмиссии.
 - QSO (Quasar Survey): это обзор квазаров.



DESI эксперимент

Mayall 4-meter Telescope

Location(s)	Arizona
Coordinates	 31°57'48"N 111°36'00"W 
Altitude	2,120 m (6,960 ft) 
First light	February 27, 1973 ^[1]
Discovered	Methane ice on Pluto
Diameter	4 m (13 ft 1 in) 
Collecting area	11.4 m ² (123 sq ft) 
Website	noirlab.edu/public/programs/kitt-peak-national-observatory/nicholas-mayall-4m-telescope/  

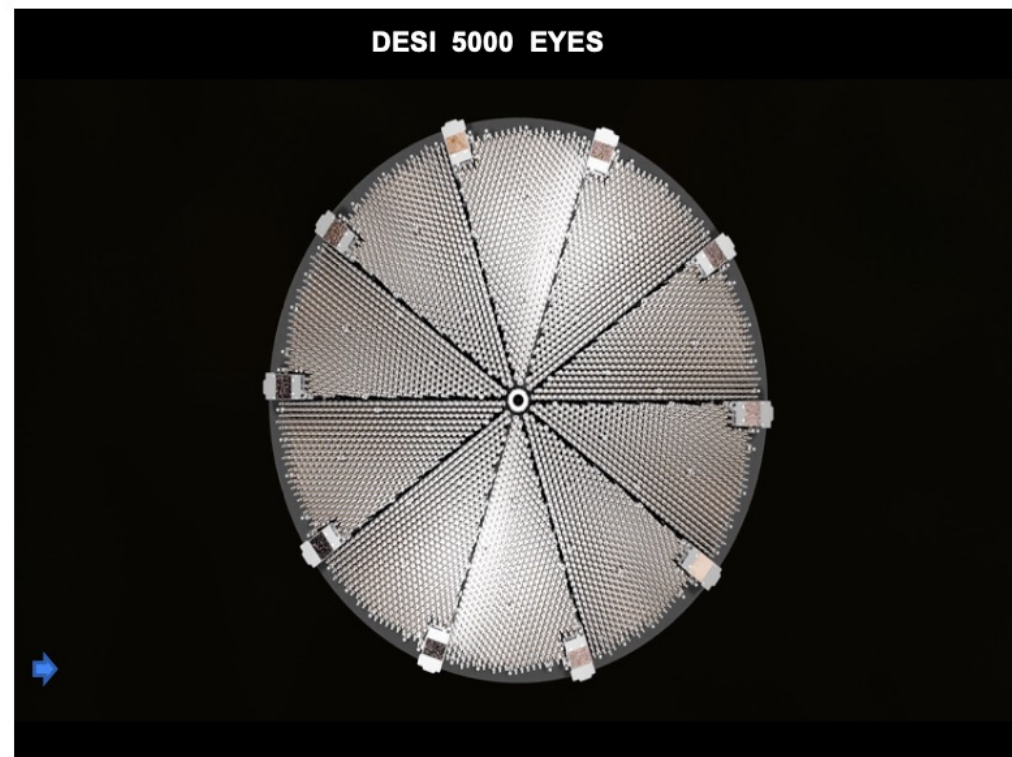
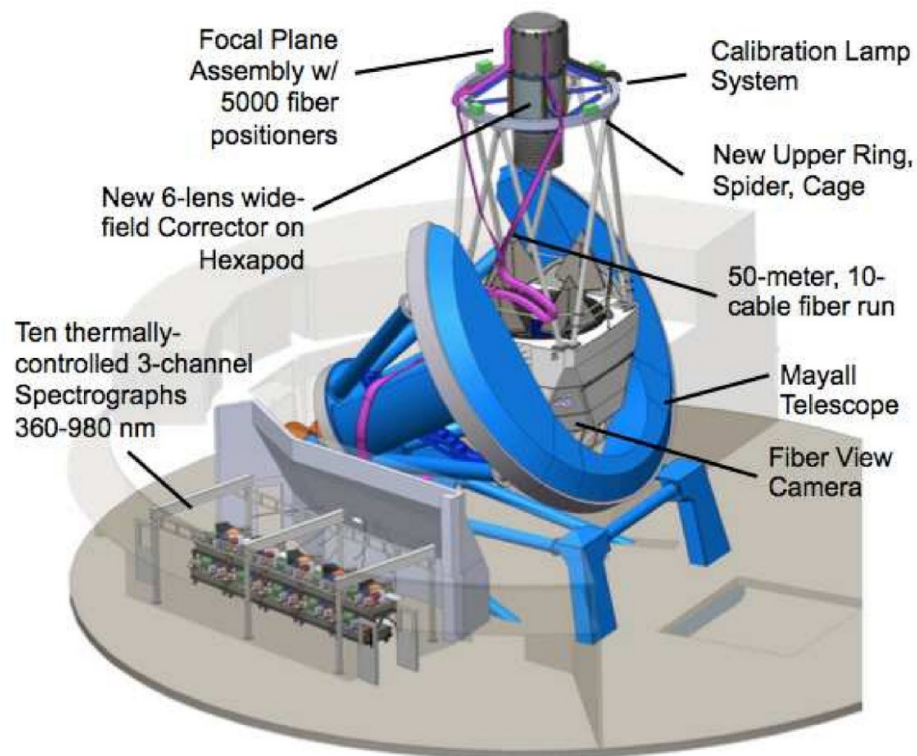


Location of Nicholas U. Mayall Telescope



DESI эксперимент: детектор

- DESI (спектрометр для исследования темной энергии) – это наземный эксперимент IV этапа по исследованию темной энергии, который изучает барионные акустические колебания с помощью обзора красного смещения галактик и квазаров.



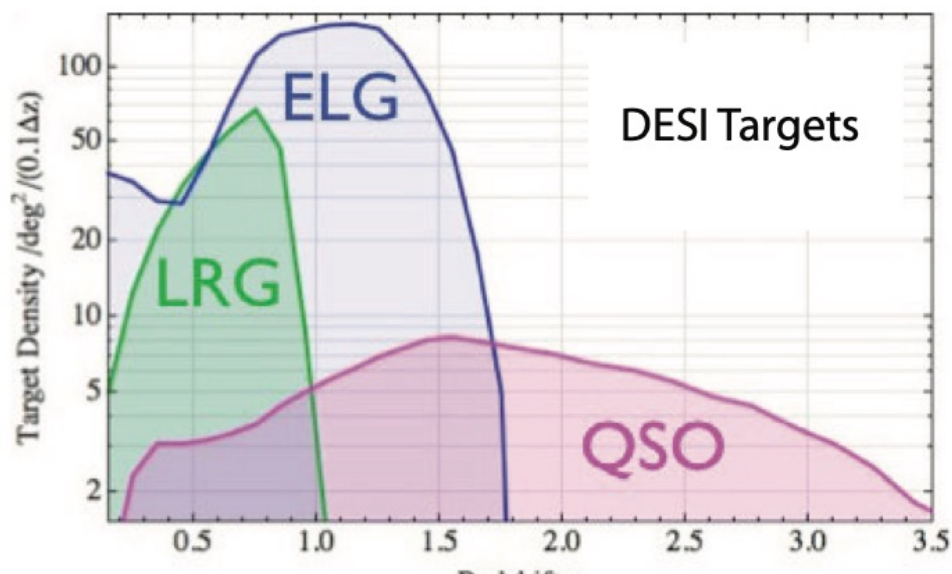
DESI эксперимент: основные принципы

- Прибор DESI представляет собой роботизированный спектрограф, способный одновременно регистрировать до 5000 спектров в диапазоне длин волн от 360 до 980 нм.
- 5000 оптических волокон, управляемых роботизированными системами, направляют свет от спектрографов (точность позиционирования 10 микрон), которые разделяют его на составляющие для анализа.
- Объектив спектрографа, который фокусирует свет и направляется на дифракционную решетку. Решетка раскладывает свет на его составляющие длины волн, формируя спектр.
- Полученный спектр проецируется на массив цифровых детекторов (подобных ПЗС-матрицам), которые фиксируют интенсивность света на каждой длине волны.
- Оптоволоконные кабели питают десять трехлучевых спектрографов с разрешением $R = \lambda/\Delta\lambda$ от 2000 до 5500, в зависимости от длины волны.
- Программное обеспечение анализирует эти спектры, определяя химический состав, температуру, скорость движения и другие характеристики объектов, а также информацию о темной энергии и расширении Вселенной.
- DESI способен регистрировать спектры 5000 объектов за одну экспозицию, что позволяет получить до 100 000 объектов за ночь.

DESI эксперимент: объекты наблюдения

Программа направлена на изучение:

- ярких инфракрасных галактик (LRG),
- квазаров (QSO)
- галактик с эмиссионными линиями (ELG).



Чем раньше образовался объект, тем больше его красное смещение

Яркие инфракрасные галактики (LRG): luminous infrared galaxies ЭТО галактики с высокой светимостью $10^{11} \odot$, чрезвычайно высокой скоростью звездообразования (до 100 звезд в год) и значительным количеством пыли, которая поглощает свет и переизлучает его в инфракрасном диапазоне. Многие из них находятся в стадии слияния или взаимодействия, и многие имеют активные ядра галактик.

Галактики с сильными эмиссионными линиями (ELG): Наблюдение сильных эмиссионных линий говорит о том, что в галактике происходят процессы ионизации газа, которые могут быть вызваны ультрафиолетовым излучением от молодых, горячих звезд или активным ядром [OIII], [NII], H_α , H_β . Подобные спектры характерны для определенных типов галактик, в которых активно происходит звездообразование, например, для молодых спиральных галактик или галактик с активными ядрами.

Квазары (QSO): квазары представляют собой активные ядра галактик на начальном этапе развития, в которых сверхмассивная чёрная дыра поглощает окружающее вещество, формируя аккреционный диск. Квазары являются основным индикатором для режимов с большими красными смещениями.

[OIII] — это линия излучения дважды ионизированного кислорода (O^{2+}). Она часто наблюдается в спектрах областей активного звездообразования и планетарных туманностей.

[NII] — это линия излучения дважды ионизированного азота (N^{2+}). Как и [OIII], она часто встречается в областях активного звездообразования.

H_α (альфа-линия водорода) — самая сильная линия в бальмеровской серии водорода. Она является признаком присутствия ионизированного водорода и используется для оценки скорости звездообразования.

H_β (бета-линия водорода) — это вторая по силе линия бальмеровской серии. Её отношение к H_α позволяет определить возраст звезд и степень пылевого

DESI эксперимент: объекты наблюдения

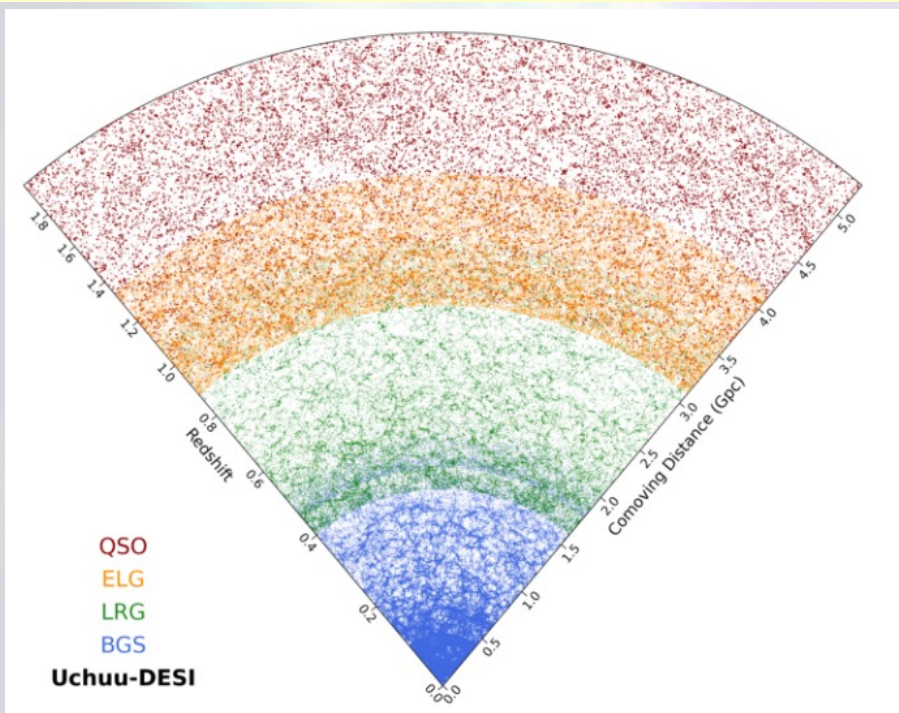
Программа направлена на изучение:

- ярких инфракрасных галактик (LRG),
- квазаров (QSO)
- галактик с эмиссионными линиями (ELG).

Яркие инфракрасные галактики (LRG): luminous infrared galaxies ЭТО галактики с высокой светимостью $10^{11} \odot$, чрезвычайно высокой скоростью звездообразования (до 100 звезд в год) и значительным количеством пыли, которая поглощает свет и переизлучает его в инфракрасном диапазоне. Многие из них находятся в стадии слияния или взаимодействия, и многие имеют активные ядра галактик.

Галактики с сильными эмиссионными линиями (ELG): Наблюдение сильных эмиссионных линий говорит о том, что в галактике происходят процессы ионизации газа, которые могут быть вызваны ультрафиолетовым излучением от молодых, горячих звезд или активным ядром [OIII], [NII], H_α , H_β . Подобные спектры характерны для определенных типов галактик, в которых активно происходит звездообразование, например, для молодых спиральных галактик или галактик с активными ядрами.

Квазары (QSO): квазары представляют собой активные ядра галактик на начальном этапе развития, в которых сверхмассивная чёрная дыра поглощает окружающее вещество, формируя аккреционный диск. Квазары являются основным индикатором для режимов с большими красными смещениями.



Чем раньше образовался объект, тем больше его красное смещение

[OIII] — это линия излучения дважды ионизованного кислорода (O^{2+}). Она часто наблюдается в спектрах областей активного звездообразования и планетарных туманностей.

[NII] — это линия излучения дважды ионизованного азота (N^{2+}). Как и [OIII], она часто встречается в областях активного звездообразования.

H_α (альфа-линия водорода) — самая сильная линия в бальмеровской серии водорода. Она является признаком присутствия ионизованного водорода и используется для оценки скорости звездообразования.

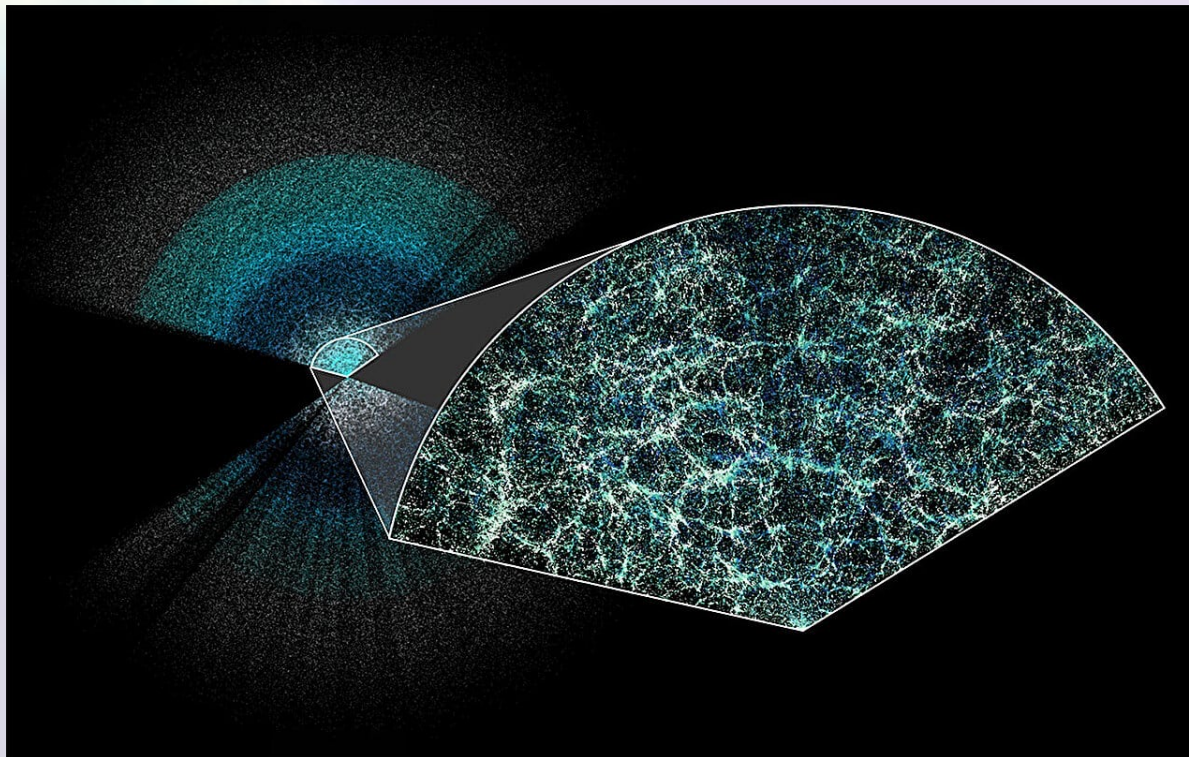
H_β (бета-линия водорода) — это вторая по силе линия бальмеровской серии. Её отношение к H_α позволяет определить возраст звезд и степень пылевого

DESI эксперимент: результаты

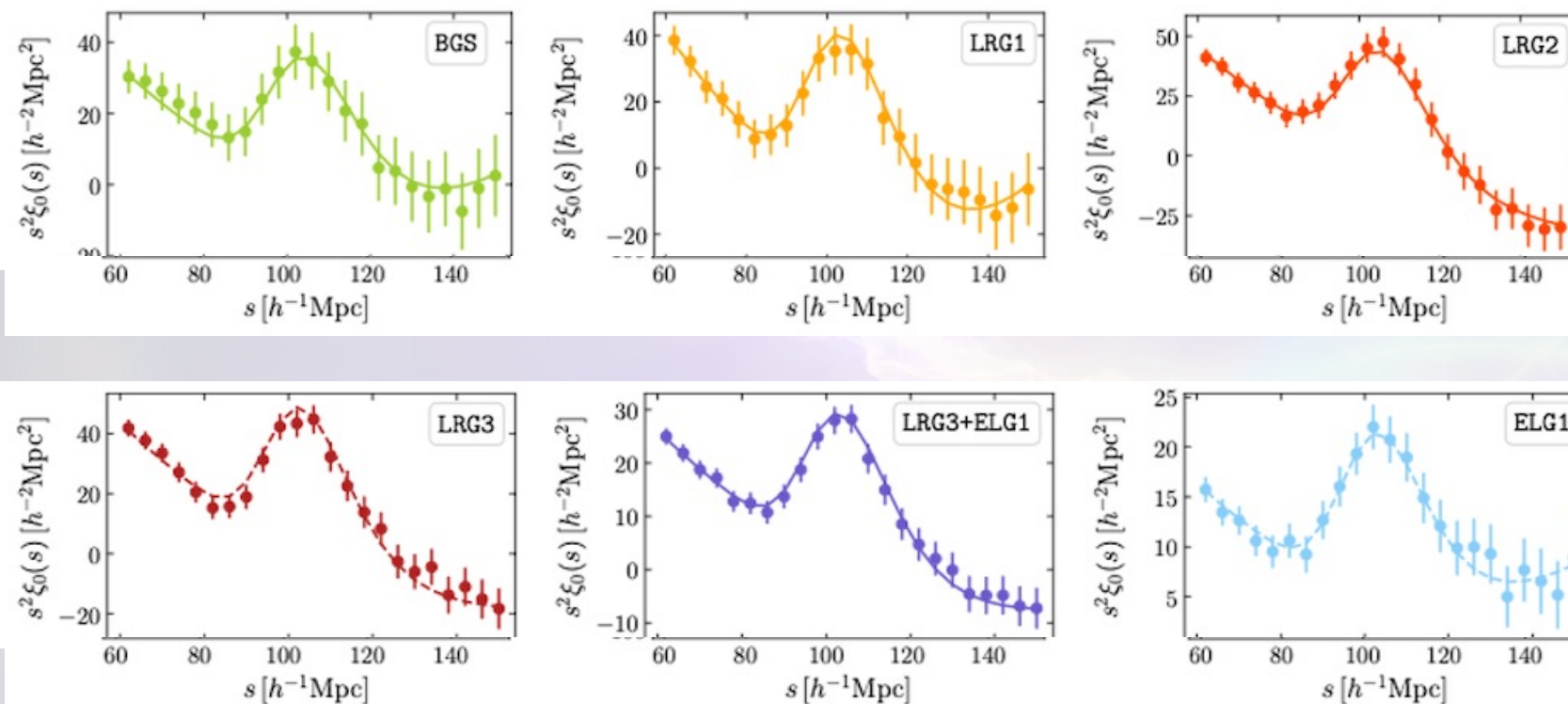
DESI DR1: с мая 2021 года по июнь 2022 года

DESI DR2: с мая 2021 года по апрель 2024 года

Data Release 1 (DR1), опубликованный 19 марта 2025 года, содержит данные о 18,7 миллионах объектов. Эти объекты включают примерно 4 миллиона звёзд, 13,1 миллиона галактик и 1,6 миллиона квазаров.



DESI эксперимент: результаты BAO DR2

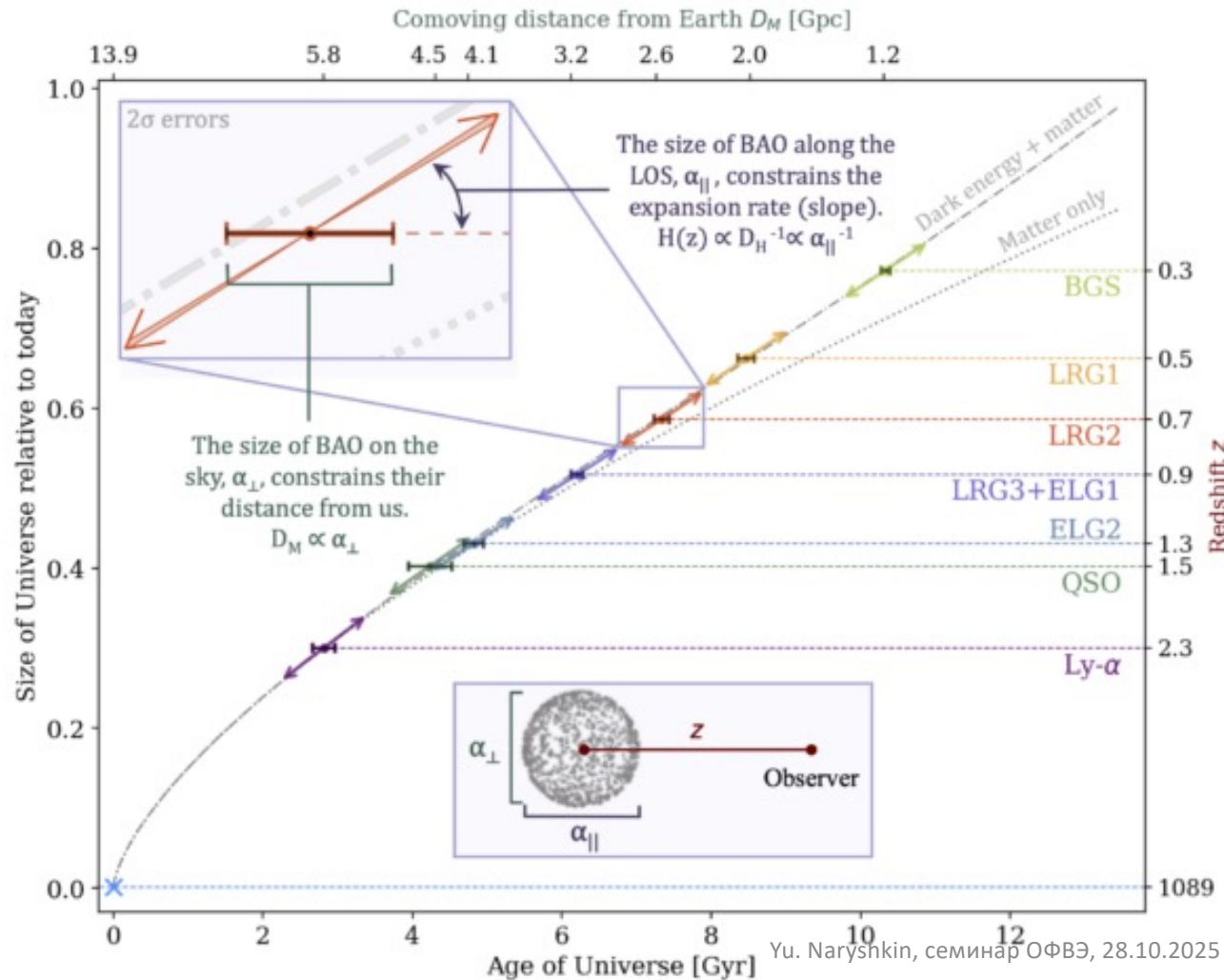


Акустический пик в корреляции около обнаружен при $100 h^{-1} \text{Mpc}$ для всех трассеров. Статистическая значимость обнаружения варьируется от $5,6\sigma$ для QSO до $14,7\sigma$ для LRG3+ELG1, что представляет собой самое сильное обнаружение особенности BAO в галактическом обзоре на сегодняшний день.

$s[h^{-1}]$ это сопутствующее расстояние между парами галактик, которое учитывает расширение Вселенной.

- Монопольные моменты корреляционных функций галактик и квазаров DESI DR2
- Монопольный член, соответствующий полиному Лежандра $P_l(\mu)$, $l=0$ описывает изотропную (сферически-симметричную) часть пространственного распределения галактик (усреднённую по всем направлениям).
- Монополь содержит основной пик БАО, который соответствует характерному радиусу, пройденному акустическими волнами в ранней Вселенной до момента рекомбинации.
- Положение этого пика даёт информацию о масштабе БАО.
- Кружки соответствуют данным измерений, а линии показывают наиболее соответствующую модель БАО.

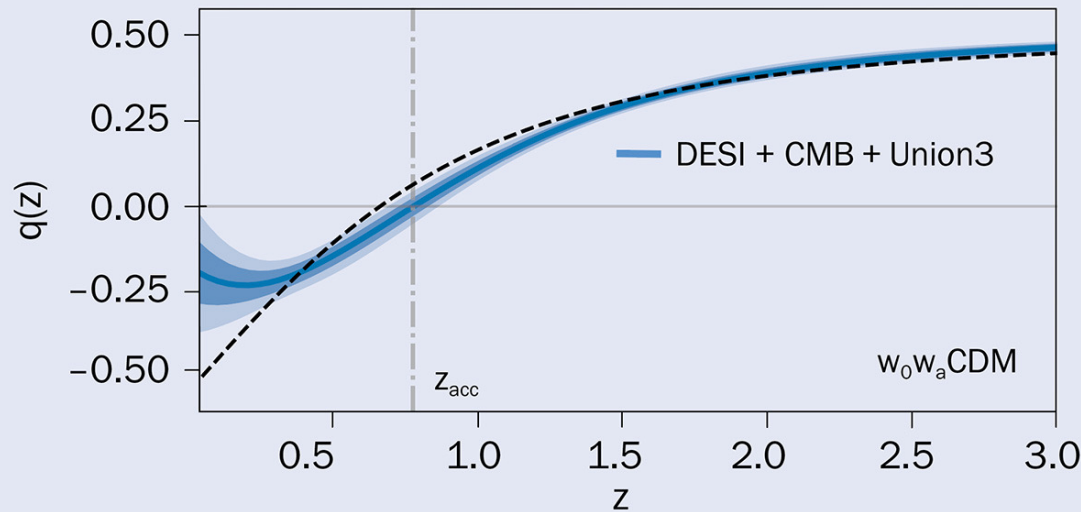
DESI: эволюция вселенной



Yu. Naryshkin, семинар ОФВЭ, 28.10.2025

- Размер BAO вдоль луча зрения (LOS) измеряет расстояние Хаббла D_H (расстояние, на котором скорость удаления галактики будет равно скорости света $D_H = \frac{c}{H}$) и, следовательно, скорость расширения, которая соответствует наклону кривой.
- Показаны измерения DESI DR2 BAO, представленные в данной статье для каждого из семи образцов трассеров.
- Модели DESI эволюционирующей темной энергией визуально неотличимы от модели Λ CDM на этом графике.

DESI: результат



- Параметр замедления $q(z) = -1 - \frac{\ddot{H}}{H^2}$ как функция красного смещения z которое является мерой расстояния и времени.
- $q(z) > 0$ означает замедление расширения при этом красном смещении, а $q(z) < 0$ – ускорение, при этом увеличение красного смещения соответствует большим расстояниям и более ранним моментам времени.
- Подгонка DESI+CMB+Union3 и её уровни достоверности в одну и две сигмы (синяя линия) сравниваются с моделью Λ CDM (пунктирная линия).
- z_{acc} (штрихпунктирная линия) соответствует началу космического ускорения. (K Lodha et al. 2025 arXiv:2503.14743)

- Результаты DESI противоречат модели Lambda-CDM, поскольку данные указывают на то, что тёмная энергия не является постоянной космологической константой, а, по-видимому, меняется со временем, потенциально ослабевая и усиливаясь. Это говорит о том, что свойства тёмной энергии могут быть непостоянными, как предсказывает модель Lambda-CDM, и могут указывать на то, что расширение Вселенной не ускоряется вечно, а может стабилизироваться или даже коллапсировать в будущем «Большом сжатии».
- Lambda-CDM, предсказывает, что Вселенная будет расширяться вечно с ускоряющейся скоростью.
- Данные DESI предполагают, что ускорение Вселенной началось раньше, но в настоящее время меньше, чем предсказывает Λ CDM.
- В стандартной модели Λ CDM $q(z)$ имеет точку перегиба вблизи $z \approx 0,1$ и отрицательна для более низких красных смещений, что согласуется с наблюдениями.

Темная энергия слабеет

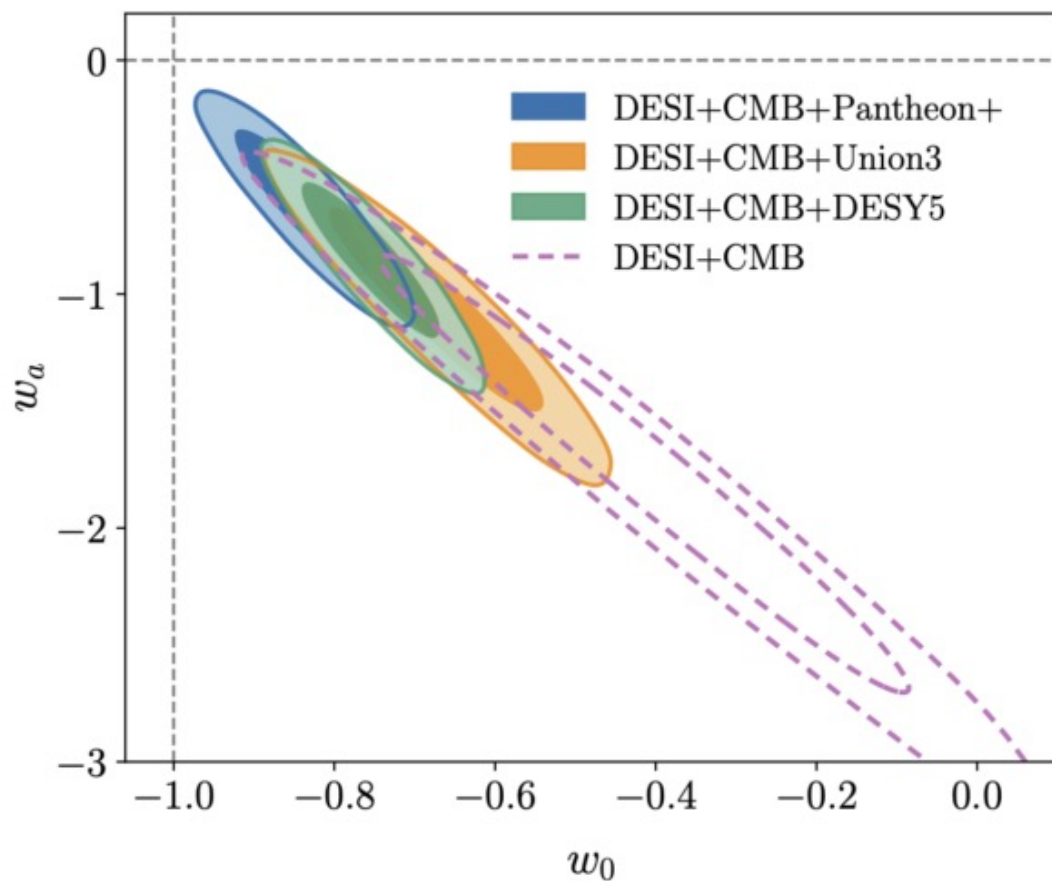
Параметризация CPL (Шевалье-Полярского-Линдера)

- Динамическая темная энергия — это модель темной энергии, которая предполагает, что ее плотность и свойства изменяются со временем, в отличие от стандартной космологической постоянной Λ , которая остается постоянной. Это контрастирует с моделью Λ CDM и подтверждается недавними наблюдениями, предполагающими, что влияние темной энергии может меняться. Доказательства этого получены из параметризации CPL, которая моделирует уравнение состояния темной энергии как изменяющееся и исследуется с использованием данных DESI.
- В то время как космологическая постоянная имеет значение $w=-1$ (константа), наблюдения показывают, что темная энергия может быть динамическим полем с изменяющимся во времени или слегка отличающимся постоянным значением, возможно, близким к -1, но не точно. Условие ускоренного расширения Вселенной требует $w < -1/3$.
- Параметризация CPL (Шевалье-Полярского-Линдера) — это двухпараметрическая модель, используемая в космологии для описания изменяющегося во времени уравнения состояния w темной энергии. Она определяется формулой

$$\omega(z) = \omega_0 + \frac{\omega_a z}{1+z}$$

- Вводится два свободных параметра, ω_0 и ω_a для описания эволюции темной энергии, где ω_0 — текущее значение, а ω_a описывает его изменение с красным смещением z .
- модель допускает возможность перехода в поведении темной энергии на протяжении космической истории, и наблюдения показали предпочтение значениям ω_0 и ω_a , которые согласуются с фантомоподобным поведением в недавнем прошлом и нефантомоподобным поведением в настоящее время.

DESI: результат $w_\alpha w_0$ CDM



- **DESI:** The BAO measurements from DESI DR2 include tracers of the bright galaxy sample, luminous red galaxies, emission line galaxies, quasars, and the Lyman- α forest, Ref.(Abdul Karim et al. 2025).
- **Pantheon+** comprises 1550 spectroscopically confirmed type Ia supernovae (SNe) from 18 different surveys, covering $0.01 < z < 2.26$ (Brout et al. 2022).
- **DESY5:** The DESY5 sample comprises 1635 photometrically classified SNe from the released part of the full 5 yr data of the Dark Energy Survey collaboration (with redshifts in the range $0.1 < z < 1.3$), complemented by 194 low-redshift SNe (with redshifts in the range $0.025 < z < 0.1$), totaling 1829 SNe.
- **Union3** is a large, standardized dataset of 2087 [Type Ia supernovae](#). The data is combined and calibrated from 24 different surveys, and it can be used alongside other datasets, such as those from the Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI), to refine cosmological models and test the standard Lambda-CDM model.
- Результаты для апостериорных распределений w_0 и w_α , полученные с помощью подгонки модели $w_0 w_\alpha$ CDM к DESI в сочетании с CMB и тремя наборами данных SNe.
- Серые пунктирные линии обозначают $w_0 = -1$ и $w_\alpha = 0$; предел Λ CDM ($w_0 = -1$, $w_\alpha = 0$) находится на их пересечении. Значимость подавления Λ CDM составляет $2,8\sigma$, $3,8\sigma$ и $4,2\sigma$ для комбинаций с образцами SNe Pantheon+, Union3 и DESY5 соответственно, и $3,1\sigma$ для DESI+CMB без SNe.

Заключение

- DESI создал самую большую трехмерную карту структуры Вселенной, проанализировав свет далеких квазаров, поглощенный межгалактическими облаками газа.
- измерения BAO, полученные по более чем 14 миллионам дискретных трассеров галактик и квазаров, собранные за первые три года работы DESI и которые включены во второй выпуск данных (DR2).
- Эти результаты основаны на выборках близких ярких галактик, LRG, ELG и квазары в диапазоне красного смещения $0,1 < z < 2,1$ и охватывают совокупный эффективный объем более 42 Гпк. Дополнительные измерения BAO, основанные на корреляциях леса Ly α и квазаров с высоким красным смещением при эффективном красном смещении $z = 2,33$.
- Эксперимент выявил около 2500 карликовых галактик с активными ядрами, что более чем в четыре раза превышает предыдущие результаты.
- Наблюдательные данные: Наблюдения за сверхновыми и другие данные показали, что $q(z)$ в настоящее время отрицательна ($z = 0$), что указывает на ускоряющееся расширение.
- Результаты DESI противоречат модели Lambda-CDM, поскольку данные указывают на то, что тёмная энергия не является постоянной космологической константой, а, по-видимому, меняется со временем, потенциально ослабевая и усиливаясь. Это говорит о том, что свойства тёмной энергии могут быть непостоянными, как предсказывает модель Lambda-CDM, и могут указывать на то, что расширение Вселенной не ускоряется вечно, а может стабилизироваться или даже коллапсировать в будущем «Большом сжатии».
- В модели Λ CDM ускорение увеличивается со временем, по мере того как красное смещение приближается к 0. Данные DESI предполагают, что ускорение Вселенной началось раньше, но в настоящее время меньше, чем предсказывает Λ CDM.
- В совокупности эти результаты являются самыми точными измерениями BAO, когда-либо выполненными для всех исследованных красных смещений, включая $z < 0,8$, где DESI DR2 теперь значительно превосходит точность Sloan Digital Обзор неба (SDSS).

Лес Лайман-альфа

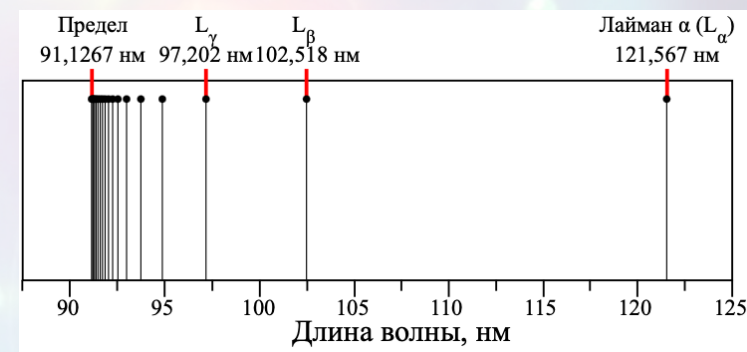
Лес Лайман-альфа ($Ly\alpha$ -лес) — многократное повторение абсорбционной линии Лайман-альфа в спектрах далеких астрономических объектов.

С́ерия Лáймана — серия спектральных линий в спектре атома водорода. Эта серия образуется при переходах электронов с возбуждённых энергетических уровней на первый невозбуждённый уровень основного состояния атома водорода в спектре излучения (эмиссионном спектре) и с первого уровня на все остальные в спектре поглощения.

Переход с ближайшего верхнего уровня на некоторый уровень во всех спектральных сериях водорода обозначается греческой буквой α , со следующего — буквой β и т. д. Для обозначения самой серии Лаймана используется либо латинская буква L или сокращение Ly . Таким образом, полное обозначение спектральной линии, возникающей при переходе электрона со второго уровня на первый — $Ly\alpha$ (*Лайман альфа*).

Согласно формуле Ридберга, разность энергий между первым ($n=1$) и вторым ($n=2$) возбуждённым состоянием соответствует фотону с длиной волны $1216 \text{ \AA}$.

Линия Лайман-альфа водорода лежит (в лабораторных условиях) на длине волны 1215.668 нм ($1.216 \cdot 10^{-7} \text{ м}$), что отвечает частоте $2.47 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$. Таким образом, она лежит в ультрафиолетовой части электромагнитного спектра, однако из-за большой удалённости (сильного красного смещения) она смещается в видимый диапазон, что даёт возможность детектировать её наземными средствами наблюдения.



Лес Лайман-альфа

Если свет с длиной волны $1216 \text{ \AA}$ проходит через скопление нейтральных атомов водорода, они будут поглощать фотоны этого света, используя их для возбуждения своих электронов с первого уровня на второй.

Чем больше таких атомов водорода окажется на пути света, тем большее число фотонов с длиной волны $1216 \text{ \AA}$ будет поглощено. Количественно это выражается в провале в функции интенсивности детектируемого наблюдателем на Земле света в зависимости от длины волны.

Чем дальше находится источник света, тем больше таких «слоев» атомов водорода на его пути, и их суммарное поглощение создает эффект «леса» из множества линий.

Самые древние звёзды состоят преимущественно из водорода, поэтому в их спектре нет спектральных линий короче этого предела.

Вследствие этого резкое падение интенсивности их спектра в коротковолновой части может быть однозначно интерпретировано как наблюдение предела Лаймана. При этом из-за расширения Вселенной предел Лаймана испытывает [красное смещение](#), которое может быть вычислено по наблюдаемой длине волны предела и известному значению для покоящегося относительно наблюдателя газа. Кроме того, существует связь между красным смещением и расстоянием до звезды.

Таким образом, наблюдение предела Лаймана позволяет определять расстояние до далёких и древних звёзд. Из-за красного смещения свет далёких галактик и квазаров находится частично в видимом или инфракрасном спектральном диапазоне, что позволяет исследовать крупномасштабное распределение водорода во Вселенной по анализу поглощения линии Лайман-альфа в межгалактическом нейтральном водороде даже наземными обсерваториями.

Кривизна вселенной

Кривизна Вселенной — это общее искривление пространства-времени, которое определяется плотностью всей содержащейся в ней материи и энергии.

$$\text{Плотность вселенной: } \Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$$

ρ (фактическая плотность): Суммарная плотность всей материи и энергии в во Вселенной (барионная материя, тёмная материя, тёмная энергия).

ρ_c (критическая плотность): Плотность, при которой Вселенная является плоской и будет расширяться бесконечно, но с замедляющейся скоростью. Её значение составляет около $9.47 \times 10^{-27} \text{ кг/м}^3$.

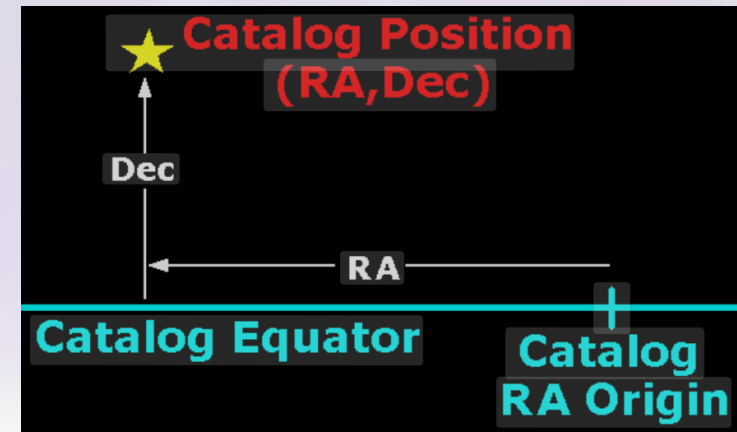
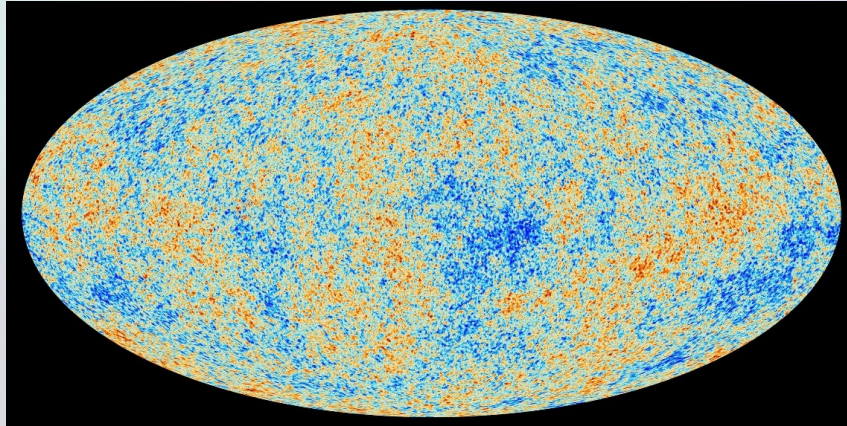
Геометрия Вселенной:

$\Omega > 1$, Вселенная замкнута (имеет положительную кривизну).

$\Omega < 1$, Вселенная разомкнута (имеет отрицательную кривизну).

$\Omega = 1$, Вселенная плоская (имеет нулевую кривизну).

CMB microwave background: axis



Координаты RA (прямое восхождение) и Dec (склонение) — это небесные координаты, используемые в экваториальной системе координат для точного определения положения объектов на небесной сфере, подобно долготе и широте на Земле. Dec (склонение) — это угловое расстояние объекта к северу (+) или югу (-) от небесного экватора, измеряемое в градусах. RA (прямое восхождение) — это угловое расстояние объекта на востоке от точки весеннего равноденствия по небесному экватору, измеряемое в часах, минутах и секундах (или градусах).

Склонение (Dec) - небесный аналог земной широты. Угловое расстояние объекта к северу или югу от небесного экватора, в диапазоне от $+90^\circ$ (Северный полюс мира) до -90° (Южный полюс мира), положительные значения указывают на северное полушарие небесной сферы, отрицательные — на южное.

Прямое восхождение (RA) - небесный аналог земной долготы. Угловое расстояние объекта на востоке от точки весеннего равноденствия вдоль небесного экватора. Исторически выражается в часах, минутах и секундах (от 0h до 24h), но может выражаться и в градусах (от 0° до 360°). 24 часа соответствуют полному обороту неба (360°), поэтому 1 час прямого восхождения равен 15° . Отсчитывается против часовой стрелки, если смотреть со стороны северного полюса мира.