

# Основы современной космологии

Как Вселенная возникла, развивается  
и меняется сегодня.



# Вселенная как объект науки

Космология изучает не только далёкие галактики, но и общие законы устройства Вселенной. Она соединяет наблюдения, теорию и математику, чтобы объяснить её состав, расширение и будущее.



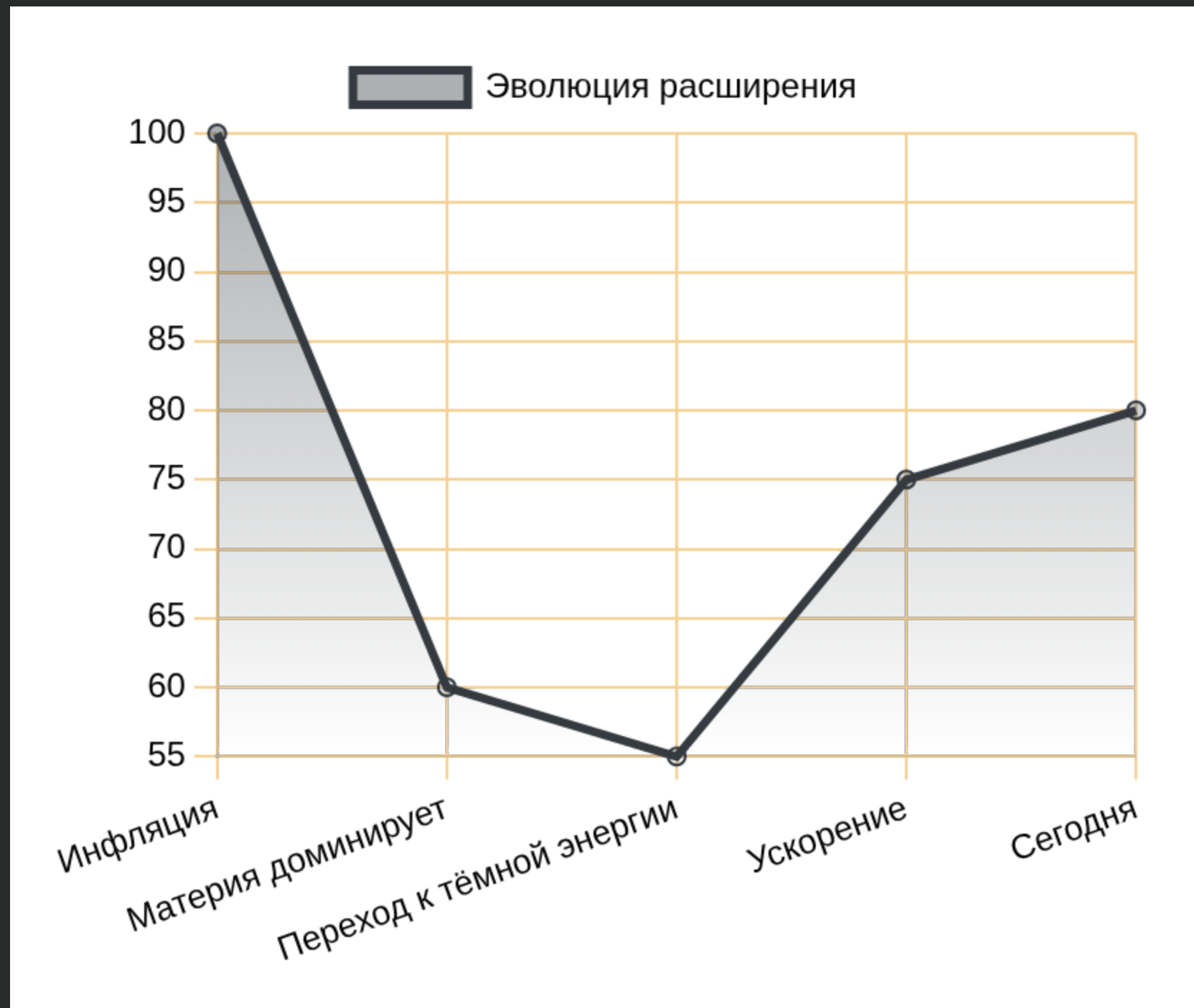
# 46,5 млрд СВЕТОВЫХ ЛЕТ

таков радиус наблюдаемой Вселенной,  
хотя её возраст намного меньше из-за  
расширения пространства.

Это показывает, насколько  
сильно меняется космическая  
геометрия со временем  
и почему большие масштабы  
описывают отдельными  
законами.

Современные космологические оценки наблюдаемой Вселенной;  
радиус по данным стандартной модели  $\Lambda$ CDM.

# Как менялось расширение Вселенной



Кривая отражает смену режимов расширения: от сверхбыстрой ранней фазы к замедлению и затем к современному ускорению.

История расширения не была одинаковой: её ход менялся вместе с доминирующим компонентом энергии Вселенной.

Обобщение космологической модели  $\Lambda$ CDM; ориентировочно по данным наблюдений сверхновых и реликтового излучения.

# Большой взрыв как начало горячей Вселенной

## Не взрыв в пустоте

Большой взрыв означает не разлёт вещества из точки в пустом пространстве, а расширение самого пространства из крайне плотного и горячего состояния.

## Охлаждение и атомы

По мере расширения температура снижалась, и возникли протоны, нейтроны, а затем первые атомы. Это подготовило переход к прозрачной Вселенной.



## Ранняя плазма

Поначалу Вселенная была непрозрачной: частицы, свет и вещество существовали в виде горячей плазмы, где фотоны постоянно взаимодействовали с заряженными частицами.

## Почему модель важна

Модель Большого взрыва хорошо объясняет наблюдаемое расширение, реликтовое излучение и относительное содержание лёгких элементов, получившихся в ранней Вселенной.

# Этапы ранней эволюции космоса

Последовательность основана на стандартной космологической модели и наблюдательных данных о ранней Вселенной.



# Главные параметры современной Вселенной

| Параметр | Значение      | Смысл                                           |
|----------|---------------|-------------------------------------------------|
| Возраст  | 13,8 млрд лет | Возраст Вселенной                               |
| Фон      | 2,725 К       | Температура реликтового излучения               |
| Состав   | 5/27/68%      | Обычная материя, тёмная материя, тёмная энергия |
| Итог     | Малая доля    | Видимая материя — не основа Вселенной           |

Параметры стандартной космологической модели  $\Lambda$ CDM; данные миссии Planck и согласованные астрофизические оценки.

Эта таблица показывает ключевые измеримые характеристики, по которым космология описывает состав и возраст Вселенной.

Наблюдаемые объекты составляют лишь малую часть космического содержимого; основную роль играют невидимые компоненты.

# Реликтовое излучение — след ранней Вселенной

## Момент освобождения света

Реликтовое излучение возникло, когда Вселенная достаточно остыла и электроны смогли связаться с ядрами. С этого момента свет начал свободно распространяться в пространстве.

1

## Очень ранняя эпоха

Это произошло примерно через 380 тысяч лет после Большого взрыва. До этого Вселенная была непрозрачной плазмой, а после — стала источником наблюдаемого микроволнового фона.

2

## Почти идеальный спектр

Спектр реликтового излучения близок к излучению абсолютно чёрного тела. Такое совпадение считается одним из самых сильных подтверждений горячего начала Вселенной.

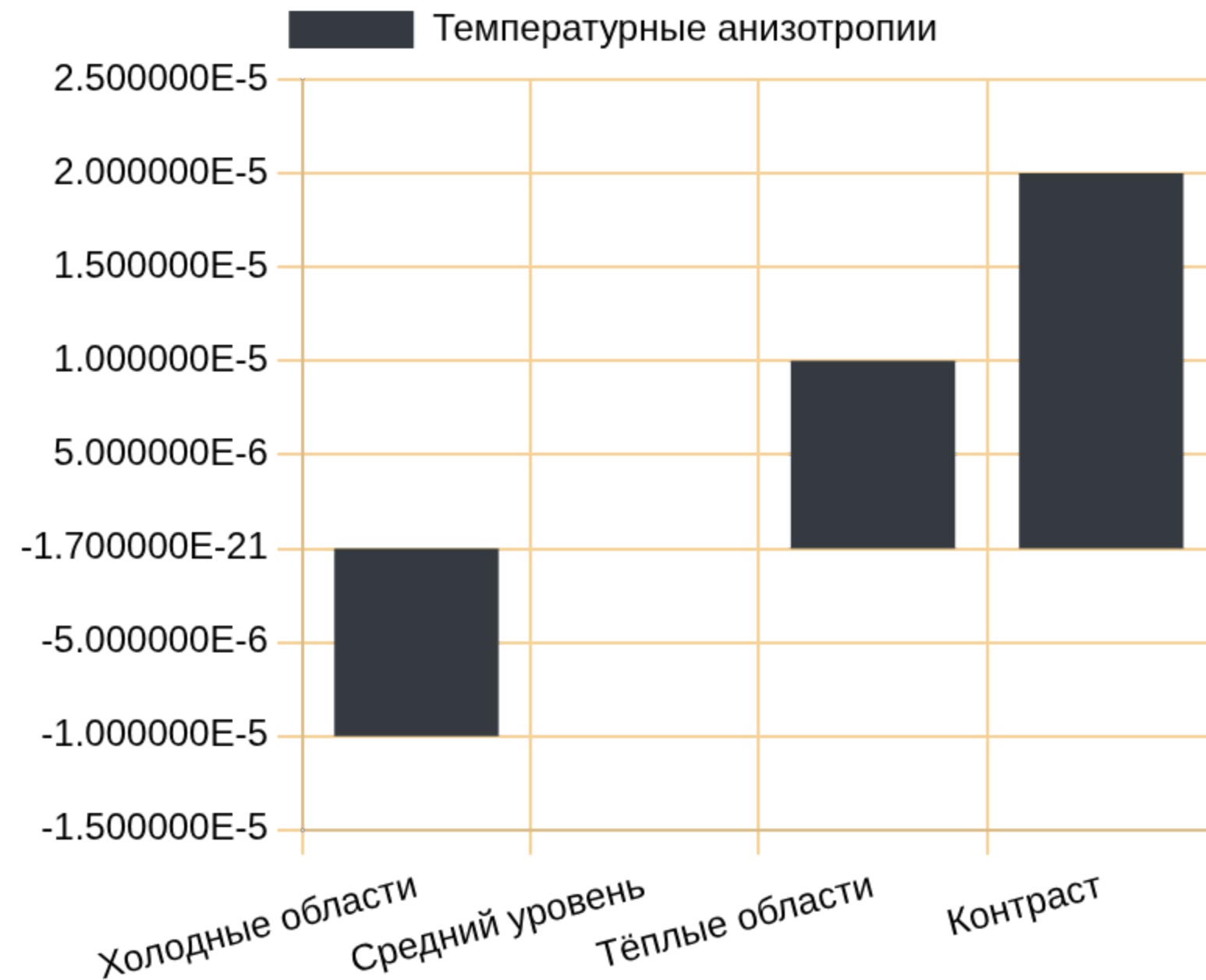
3

## След будущих структур

Мельчайшие температурные неоднородности в этом фоне отражают первичные различия плотности. Именно они стали основой для формирования галактик и скоплений.

4

# Небольшие различия температуры в реликтовом фоне



Даже столь малые отклонения несут информацию о ранних неоднородностях плотности, из которых позже выросли крупные структуры Вселенной.

Анизотропии крайне малы, но именно они позволяют восстановить состояние Вселенной в самом начале её истории.

Данные спутника Planck по температурным анизотропиям реликтового излучения.

# Тёмная материя и её гравитационные следы

## Невидимая, но заметная

Тёмная материя не испускает и не поглощает свет, поэтому напрямую её не наблюдают. О её существовании судят только по гравитационному воздействию на видимое вещество.

## Что показывают галактики

Плоские кривые вращения звёзд, поведение галактик в скоплениях и искривление света в гравитационных линзах указывают на дополнительную массу, не видимую телескопам.

## Почему это важно

По современным оценкам, тёмной материи примерно в пять раз больше, чем обычной материи. Без неё трудно объяснить устойчивость галактик и крупномасштабную структуру Вселенной.



# Как астрономы находят тёмную материю

| Признак            | Что наблюдают      | Вывод                 |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| Кривые вращения    | Скорость не падает | Есть невидимая масса  |
| Линзирование       | Сильнее расчёта    | Массы больше видимой  |
| Скопления галактик | Быстрое движение   | Гравитации не хватает |
| Реликтовый фон     | Анизотропии        | Нужен скрытый вклад   |

Наблюдения не показывают тёмную материю напрямую, но её присутствие проявляется через гравитационные эффекты в разных типах данных.

Во всех случаях видимой материи недостаточно, чтобы объяснить наблюдаемую гравитацию; поэтому вводится понятие тёмной материи.

Наблюдения вращения галактик, гравитационного линзирования, скоплений галактик и реликтового излучения

# Тёмная энергия и ускоренное расширение

1998: сверхновые Ia

Наблюдения далёких сверхновых показали, что Вселенная расширяется не медленнее, а быстрее, чем ожидалось по классическим моделям.

Введение тёмной энергии

Для объяснения ускорения в космологии было введено понятие тёмной энергии — компонента с отрицательным давлением, связанного с вакуумом.

Современный вывод

Сегодня тёмная энергия считается главной причиной ускоренного расширения и определяет возможную будущую судьбу Вселенной, оставаясь одной из ключевых нерешённых проблем физики.

# Из чего состоит Вселенная

Тёмная энергия    Тёмная материя  
Обычная материя



Видимая материя — это звёзды, планеты, газ и мы сами, но она составляет лишь малую долю космического содержания.

Основная часть Вселенной скрыта от прямого наблюдения: доминируют тёмная энергия и тёмная материя, а обычное вещество — лишь небольшая доля.

Современные космологические оценки состава Вселенной; значения округлены

# От первичных неоднородностей к галактикам

## Рост неоднородностей

Под действием гравитации более плотные области начали притягивать вещество, а разреженные — отставать, усиливая контрасты.

## Галактики и паутина

Со временем звёзды объединились в галактики и скопления, а вещество на крупнейших масштабах сформировало нити и пустоты космической паутины.

## После рекомбинации

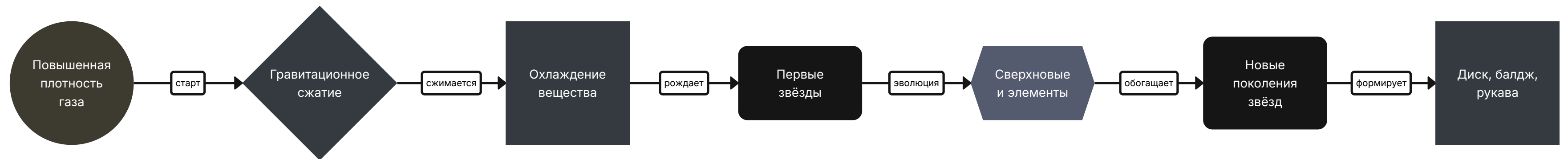
Свет отделился от вещества, и во Вселенной стали заметны крошечные различия плотности, оставшиеся после ранней эпохи.

## Первые звёзды

Сжимающиеся газовые облака нагревались и зажигали первые звёзды, которые стали источниками света и тяжёлых элементов.

# Путь от газа к галактике

Схема показывает, как гравитация, охлаждение и звёздообразование превращают первичное облако газа в зрелую галактику.



# Методы современной космологии

## Красное смещение

Спектральное смещение линий позволяет оценить скорость удаления галактик и связать наблюдаемую картину неба с расширением пространства.



## Стандартные свечи

Сверхновые типа Ia имеют предсказуемую светимость, поэтому по их видимой яркости можно надёжно определять космические расстояния.

## Барионные осцилляции

Следы звуковых волн ранней Вселенной образуют характерный масштаб в распределении галактик и служат ориентиром для проверки моделей.

## Гравитационное линзирование

Искривление света массивными объектами показывает, как распределена масса, включая невидимую, и помогает строить карты вещества.

## Обзоры неба

Большие обзоры объединяют миллионы наблюдений и позволяют выявлять статистические закономерности, которые не видны в отдельных объектах.

# Приборы и миссии, изменившие представления о Вселенной

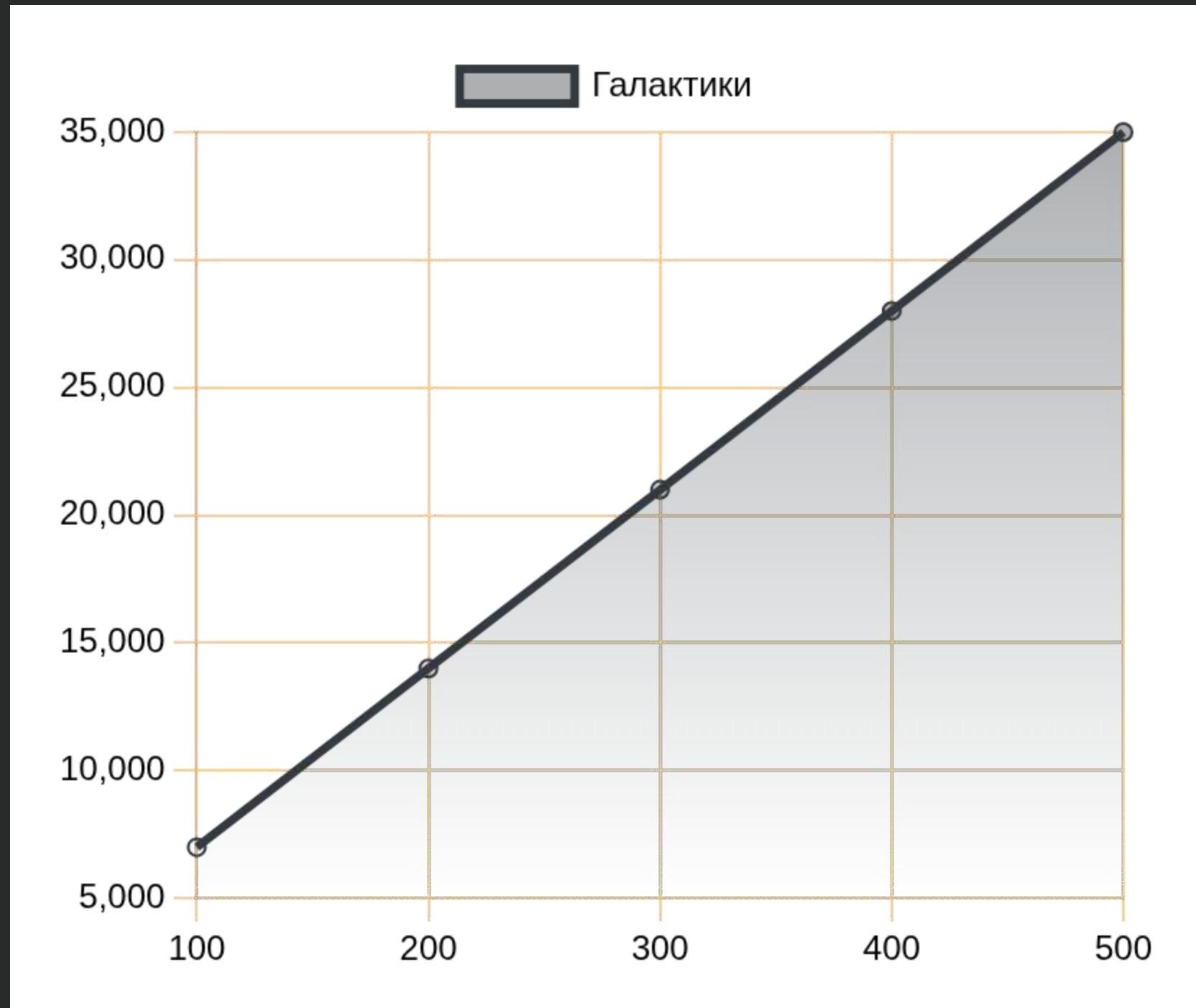
| Миссия   | Вклад             |
|----------|-------------------|
| Hubble   | Далёкие галактики |
| WMAP     | Параметры фона    |
| Planck   | Анизотропии фона  |
| SDSS/DES | Карта структуры   |
| JWST     | Ранние галактики  |

Миссии Hubble, WMAP, Planck, SDSS, DES и JWST

Каждая из этих миссий добавила новый слой точности: от глубоких снимков галактик до детальных карт реликтового излучения и крупномасштабной структуры.

Современная космология опирается на сочетание космических и наземных инструментов, которые сделали измерения Вселенной значительно точнее.

# Закон Хаббла и красное смещение



Чем дальше объект, тем сильнее его спектральные линии смещаются в красную область, что служит ключевым признаком космического расширения.

Положительная зависимость скорости от расстояния подтверждает закон Хаббла; современная оценка  $H_0$  около 70 км/с/Мпк задаёт масштаб расширения.

Закон Хаббла; современная оценка  $H_0$  около 70 км/с/Мпк

# Главные вопросы, которые остаются открытыми

## Тёмная материя

Мы видим её гравитационное действие, но не знаем, из каких частиц или полей она состоит и почему не взаимодействует со светом.

## Тёмная энергия

Известно, что она ускоряет расширение, однако физическая природа этого компонента и его связь с вакуумом остаются неясными.

## Инфляция

Ранняя сверхбыстрая стадия хорошо объясняет структуру Вселенной, но её точный механизм и источник энергии до конца не установлены.

## Постоянная Хаббла

Разные методы дают немного разные значения  $H_0$ , и это расхождение может указывать на недоучтённую систематическую ошибку или новую физику.

## Границы $\Lambda$ CDM

Стандартная модель успешно описывает многие данные, но учёные проверяют, хватает ли её для полного объяснения всех наблюдений.

# Вселенная становится понятнее, когда её измеряют

Современная космология показывает, что возраст, расширение и состав Вселенной можно изучать не догадками, а точными наблюдениями, физическими законами и математическими моделями.