

# Астрометрия: как измеряют Вселенную

---

Точные координаты звезд открывают устройство и движение космоса.



# От древних каталогов к космической точности



Астрометрия начиналась с ручных наблюдений ярких звезд, а сегодня опирается на телескопы, электронику и космические миссии. За две тысячи лет она прошла путь от ориентиров на небе до измерений, меняющих наше представление о Галактике.

# Что именно измеряет астрометрия

## Координаты на небе

Астрометрия фиксирует прямое восхождение и склонение — два угла, которые задают положение объекта на небесной сфере и позволяют однозначно находить его среди звезд.

1

## Параллакс и расстояние

По видимому смещению звезды относительно далекого фона можно вычислить ее расстояние. Это главный прямой метод для близких звезд и основа космической шкалы расстояний.

2

## Собственное движение

Наблюдая объект в разные годы, астрономы измеряют его медленное перемещение по небу. Так можно восстановить движение звездных популяций и структуру Галактики.

3

## Орбиты и массы

Если звезда входит в двойную систему или окружена спутником, ее траектория меняется. По этим отклонениям определяют параметры орбиты и даже оценивают массы компонентов.

4

## Каталоги и системы отсчета

Все измерения сводят в звездные каталоги и координатные системы, которые служат общей опорой для наблюдений, навигации и сопоставления данных разных эпох.

5

# Небесная сфера и координатные системы



## Удобная модель неба

Небесная сфера не является физической оболочкой, но помогает описывать положение светил так, как мы видим их с Земли, без лишних пространственных сложностей.

## Экваториальные координаты

Прямое восхождение и склонение используются в большинстве звездных каталогов. Эта система удобна для сравнения наблюдений, потому что меньше зависит от положения наблюдателя.

## Горизонтальные координаты

Азимут и высота над горизонтом нужны для практических наблюдений: они показывают, где искать объект прямо сейчас из конкретной точки на Земле.

## Опорные линии и звезды

Небесный экватор, полюс мира и эклиптика помогают ориентироваться на схеме. Для примера удобно взять Сириус или Вега — яркие звезды, чьи координаты легко представить.

# Как менялась точность астрометрических измерений



Рост точности стал возможен благодаря улучшению оптики, стабилизации приборов и переходу к цифровой регистрации данных.

За историческое время точность выросла на многие порядки, а современная астрометрия стала массовой и чрезвычайно тонкой.

Обобщение по истории астрометрии: античные каталоги, телескопы, фотопластинки, ПЗС и миссия Gaia.

# Параллакс как главный способ измерить расстояние до звезды

1

## Что наблюдают

Параллакс — это кажущееся смещение звезды на фоне далеких объектов, когда Земля находится в разных точках своей орбиты. Чем ближе звезда, тем заметнее эффект.

2

## Как получают расстояние

Угол параллакса измеряют в угловых секундах, а расстояние выражают в парсеках. Простая формула  $d = 1 / p$  делает метод удобным и наглядным.

3

## Где метод особенно полезен

Параллакс наиболее надежен для сравнительно близких звезд, потому что их смещение заметнее. Для удаленных объектов нужны уже косвенные методы оценки расстояния.

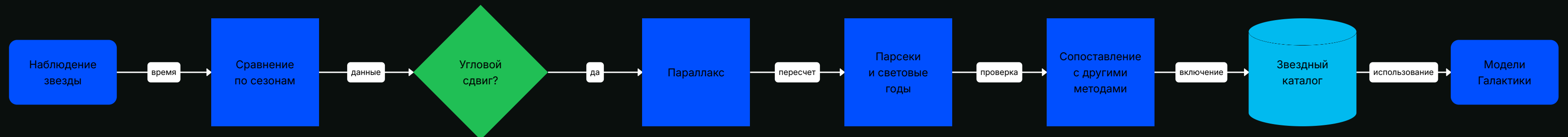
4

## Почему это важно

Именно параллакс задает опорные точки всей шкалы расстояний в астрономии. Без него было бы гораздо труднее точно калибровать остальные способы измерения.

# Путь от наблюдения к расстоянию

Последовательность астрометрических действий при определении расстояния до звезды



# Инструменты астрометрии и их возможности

| Инструмент       | Точность         | Сильная сторона          | Ограничение               |
|------------------|------------------|--------------------------|---------------------------|
| Астролябия       | минуты дуги      | простота                 | низкая точность           |
| Меридианный круг | секунды дуги     | надежность               | медленные измерения       |
| Фотопластинка    | доли дуги        | архив наблюдений         | деформация слоя           |
| ПЗС-камера       | десятые и меньше | высокая чувствительность | зависимость от калибровки |
| Gaia             | микроугл. сек.   | масштаб данных           | только из космоса         |

Сравнение показывает, как менялись методы наблюдений и почему цифровые и космические системы стали качественным скачком.

Чем новее технология, тем выше точность, быстрее обработка и больше объем доступных измерений.

Обобщение по истории астрометрических приборов

# Земля и космос: два взгляда на одно небо



## Когда атмосфера мешает видеть точно

С земли телескоп может работать только в пределах погоды и состояния атмосферы. Воздушная турбулентность слегка размывает изображение, а рефракция смещает положение звезды, поэтому даже хороший инструмент нуждается в постоянной коррекции и калибровке.



## Преимущество орбиты

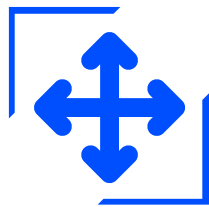
Космический аппарат наблюдает звезды без облаков, ветра и атмосферного дрожания. Благодаря этому он может долго и непрерывно измерять одни и те же объекты, собирая данные, недоступные наземным обсерваториям.



## Два подхода, одна задача

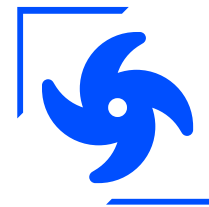
Наземные и космические наблюдения не конкурируют, а дополняют друг друга. Земные телескопы удобны для гибких программ и больших зеркал, а спутники дают особенно стабильную геометрию измерений и высокую точность координат.

# Собственное движение звезд



## Медленное смещение

Собственное движение показывает, как звезда постепенно меняет свое положение на небесной сфере. Обычно его измеряют в угловых секундах за год, поэтому эффект заметен только при длительных наблюдениях.



## Карта движений Галактики

По направлениям и скоростям собственных движений астрономы восстанавливают кинематику звездных популяций. Это помогает понять вращение Галактики и отличить локальные группы звезд от потоков.



## Связь со скоплениями

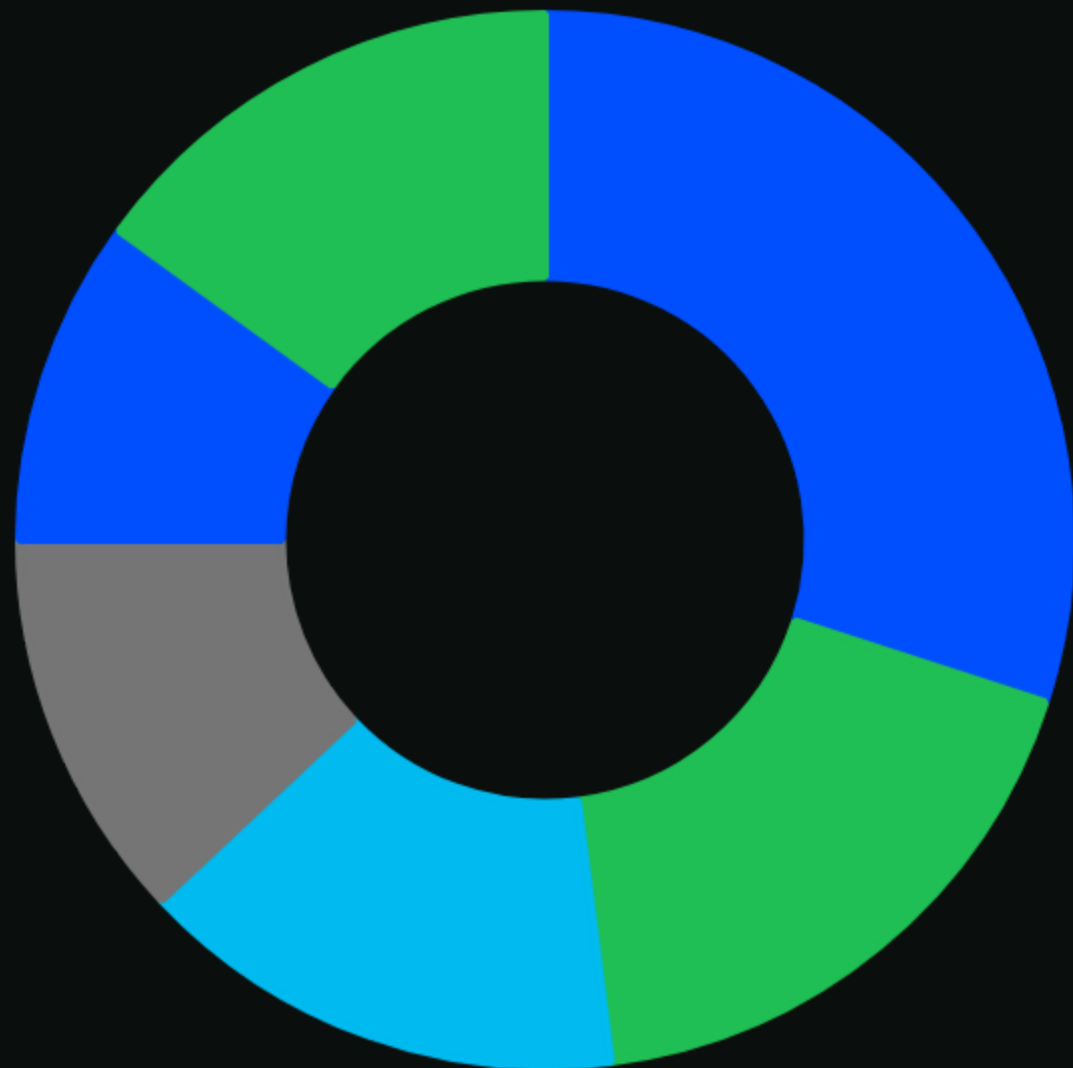
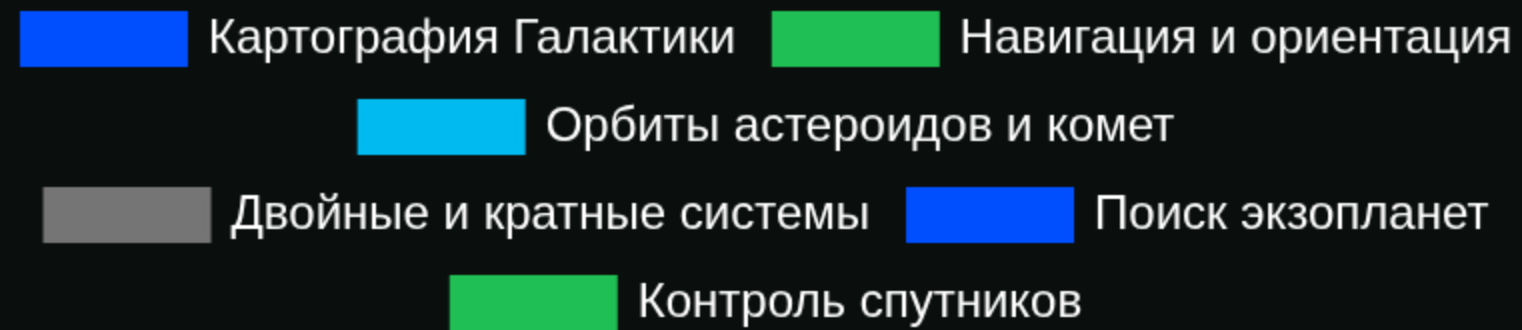
Если несколько звезд движутся почти одинаково, это может указывать на общее происхождение или принадлежность к одному скоплению. Так астрометрия помогает искать родственные звездные семьи.



## Наглядный пример

У близких звезд, например у Сириуса, собственное движение заметно даже на исторических шкалах времени. Именно поэтому старые и новые карты неба иногда показывают ощутимую разницу.

# Где астрометрия дает наибольший эффект



Астрометрия работает и в фундаментальной науке, и в прикладных задачах, где важны точные координаты и прогноз движения объектов.

Наибольший вклад связан с картографией Галактики; остальные направления показывают, что точные положения нужны и в астрономии, и в космической практике.

Иллюстративная схема по материалам презентации

# Астрометрия и двойные звезды

## Поиск скрытого спутника

Если звезда периодически отклоняется от прямолинейного движения, это может означать наличие невидимого компаньона. Такой «след» особенно важен там, где второй объект слишком тусклый для прямого наблюдения.

1

## Орбитальные параметры

По форме и размеру астрометрической орбиты находят период обращения, эксцентриситет и наклонение. Эти параметры позволяют восстановить геометрию системы и понять, насколько вытянутой является ее траектория.

2

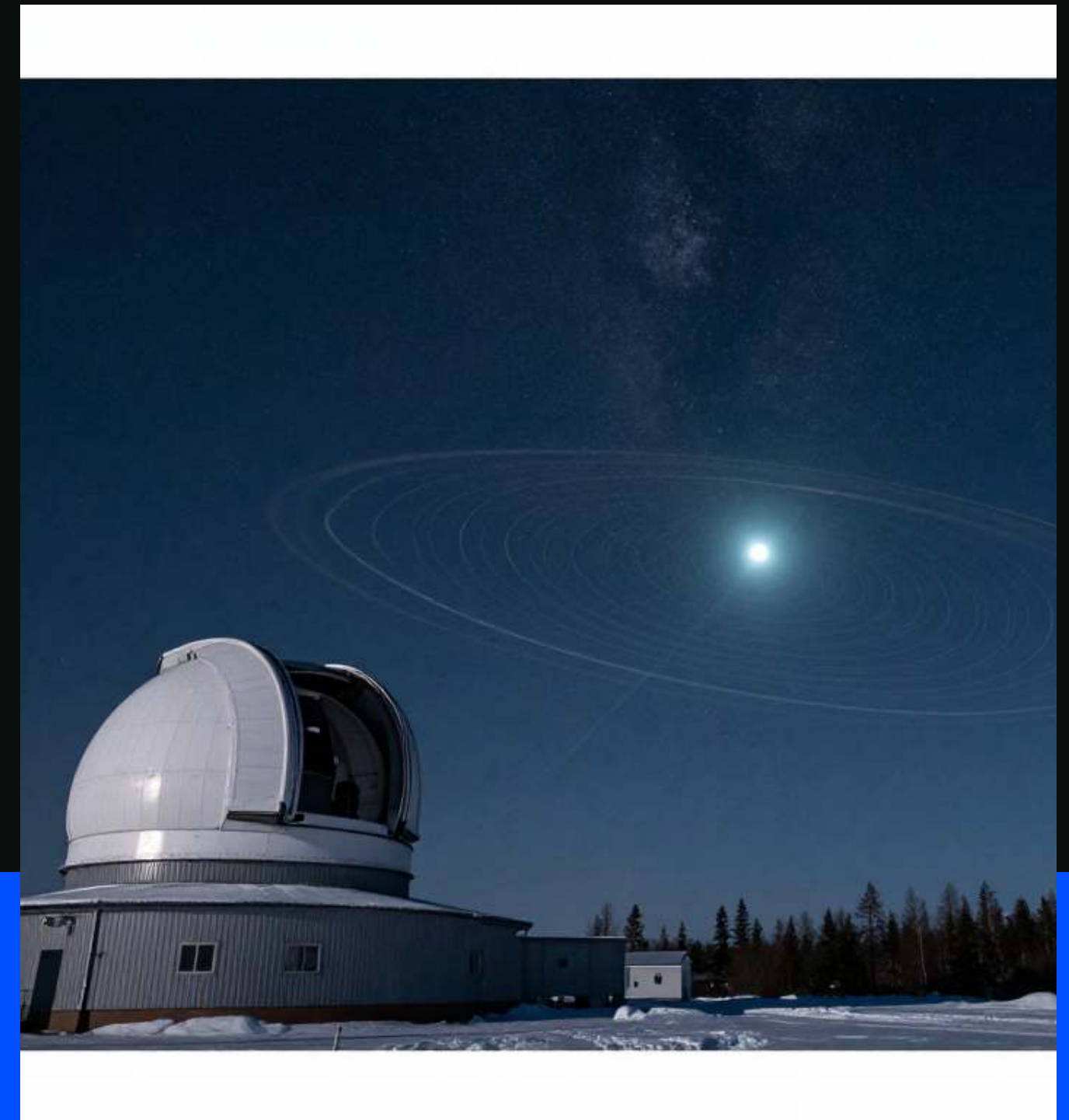
## Оценка масс

Совместив астрометрические данные с другими наблюдениями, можно определить массу компонентов двойной системы. Это особенно ценно для белых и красных карликов, а также для тесных пар звезд.

## Связь с экзопланетами

Тот же метод помогает заметить очень слабые колебания положения звезды, вызванные массивной планетой. Поэтому астрометрия дополняет спектроскопию и расширяет список способов поиска экзопланет.

4



# Искажения и источники ошибок в астрометрии

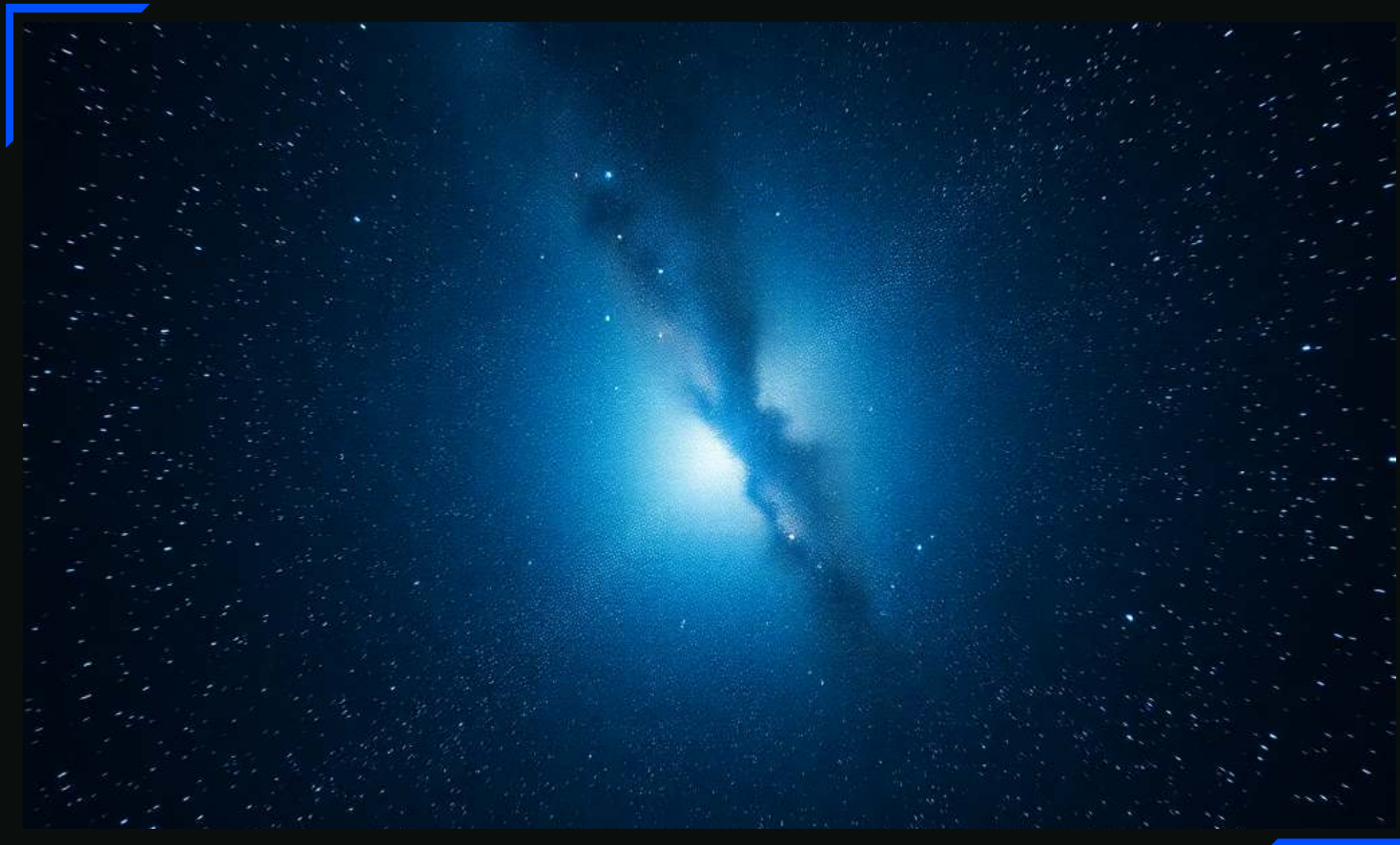
Основные факторы, которые смещают измеренные координаты и требуют обязательной поправки перед научным анализом.

Точность определяется не только прибором, но и качеством поправок. Без учета среды, техники и статистики даже хорошие данные теряют надежность.

| Источник      | Проявление           | Коррекция        |
|---------------|----------------------|------------------|
| Рефракция     | Смещение у горизонта | Модель атмосферы |
| Дрейф прибора | Уход шкалы           | Калибровка       |
| Шум детектора | Размытые центры      | Фильтрация       |

Обобщение типичных источников ошибок в астрометрических измерениях

# Gaia и новая карта Млечного Пути



Трехмерная карта миллиардов звезд

Gaia измеряет положения и расстояния звезд с беспрецедентной для своей задачи полнотой. Из этих данных складывается объемная карта Млечного Пути, где видны не только звезды, но и их движение в пространстве.

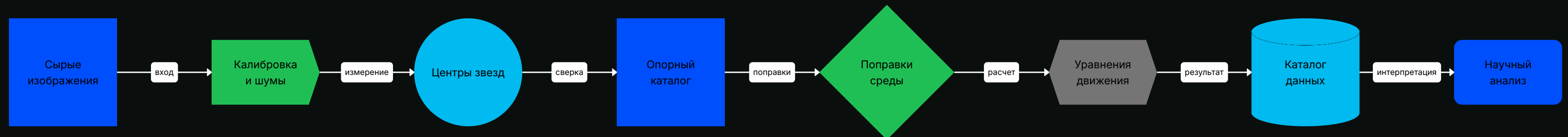


Следы прошлого Галактики

По направлениям и скоростям звезд астрономы находят звездные потоки и остатки древних слияний. На изображении это можно показать как тонкие дуги и линии, проходящие через основное звездное облако, словно следы исторических событий.

# Как обрабатываются астрометрические данные

Типичный путь от снимка до научного каталога координат и движений звезд.



# Применения астрометрии в Солнечной системе

## Астероиды и кометы

Точные координаты позволяют уточнять орбиты малых тел и рассчитывать их будущие положения. Это необходимо, чтобы оценивать вероятность сближения с Землей и вовремя обновлять прогнозы.

## Спутники и аппараты

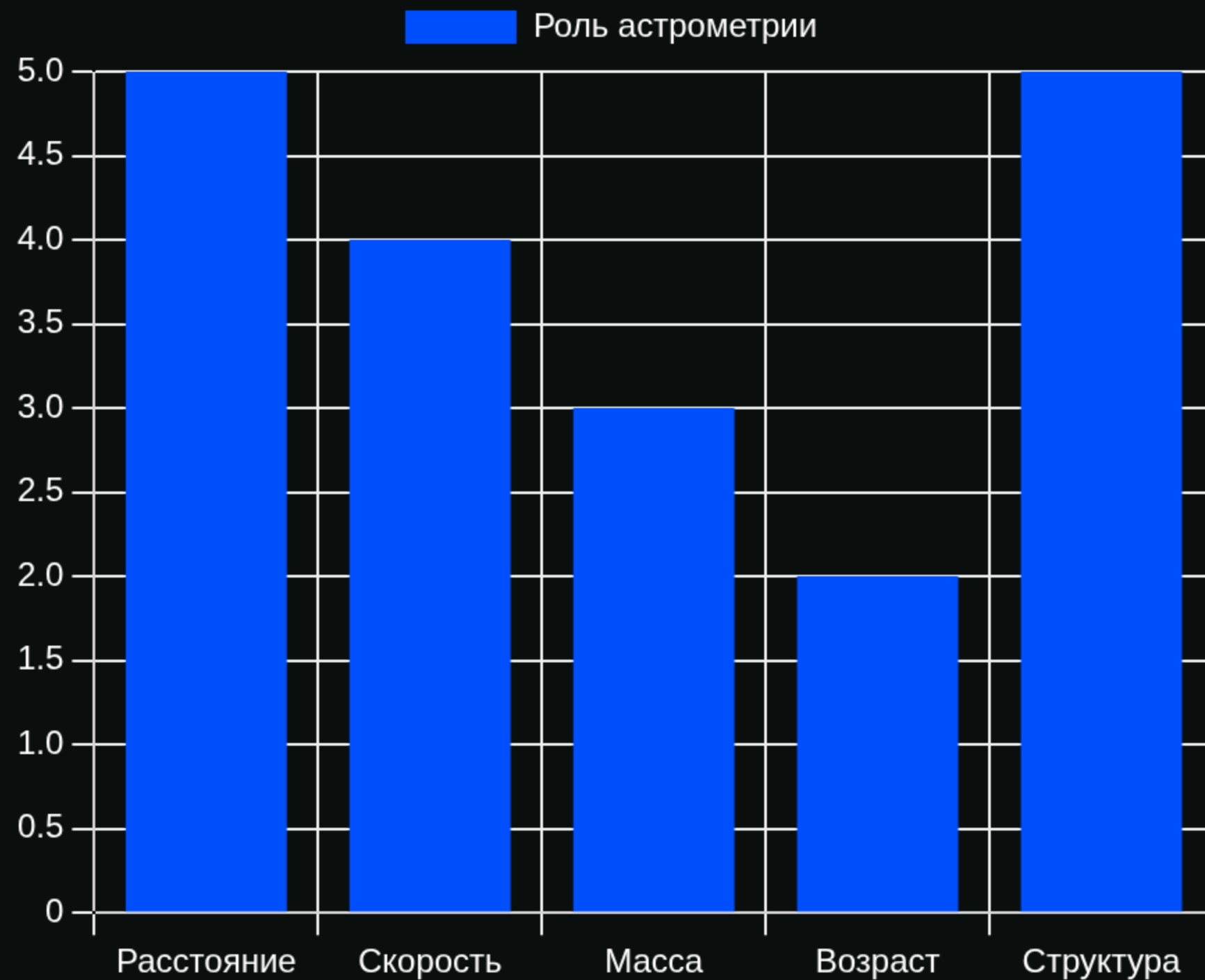
Для искусственных спутников астрометрия нужна при навигации, коррекции траектории и проверке расчетов. Она помогает предсказывать, где объект будет виден на небе и как быстро меняется его положение.

## Посадочные миссии

При сближении с планетой или астероидом особенно важна точность координат. Ошибка в положении может изменить окно посадки, поэтому астрометрические данные становятся частью подготовки миссии.



# Что измерение положения говорит о космосе



Астрометрия не отвечает на все вопросы сама по себе, но задает координатную основу, без которой другие методы не могут дать полный ответ.

Наибольшая ценность астрометрии — в построении базы для расчета расстояний и структуры; затем эти данные связывают со скоростью, массой и возрастом.

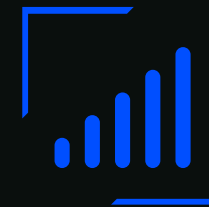
Иллюстративная оценка по роли астрометрии в комплексных исследованиях

# Связь астрометрии с другими разделами астрономии



## Фотометрия

Точные координаты помогают сопоставлять яркость объекта в разных обзорах и исключать смещение источников. Без этого невозможно надежно сравнивать измерения, сделанные в разные годы и разными телескопами.



## Спектроскопия

Астрометрия указывает, какой именно объект наблюдается, а спектроскопия раскрывает его физические свойства. Вместе они позволяют различать движение, химический состав и состояние звездных систем.



## Космическая динамика

В задачах движения планет, спутников и малых тел точные координаты нужны для проверки расчетов. Астрометрия делает модели тяготения наблюдаемыми и позволяет уточнять орбиты по реальным данным.



## Слабые компаньоны

Если рядом с яркой звездой находится тусклый спутник, его легче выявить по отклонению положения главного объекта. Поэтому астрометрия особенно полезна для поиска скрытых компонентов двойных систем.

# Перспективы развития астрометрии



「1」

## Глубже и точнее

Новые обзоры неба будут видеть более слабые объекты и уточнять координаты там, где прежние каталоги уже не дают нужной точности. Это расширит границы наблюдаемой Вселенной для астрометрии.

「2」

## Больше автоматизации

Обработка больших массивов данных все сильнее опирается на алгоритмы машинного анализа. Это ускоряет поиск астероидов, звездных потоков и кандидатов в экзопланеты, не теряя точности измерений.

「3」

## Единая наблюдательная сеть

Главный тренд — совместная работа наземных станций, космических миссий и долгосрочных архивов. Такое объединение позволяет непрерывно отслеживать положение объектов и улучшать модели их движения.

# Астрометрия: точность, которая делает небо измеримым

---

Астрометрия превращает наблюдение неба в строгую науку о положении, расстоянии и движении. Именно она связывает звездные каталоги, навигацию и модели Галактики в единую точную картину Вселенной.