

# Астрометрия: как измеряют положение и движение небесных тел



Точная карта неба начинается с измерения координат, расстояний и движений звезд.

# Зачем астрономии нужна астрометрия

Именно астрометрия превращает наблюдения неба в точные координаты, каталоги и расстояния. Она помогает строить карту Млечного Пути, рассчитывать орбиты малых тел и искать экзопланеты по малым смещениям звезд.



# Что измеряет астрометрия

## 1. Координаты объекта

Прямое восхождение и склонение задают положение светила на небесной сфере. Эти величины служат основой каталогов и позволяют сопоставлять наблюдения, сделанные в разное время и разными инструментами.

## 2. Годичный параллакс

При наблюдении Земли с противоположных точек орбиты ближайшая звезда немного смещается относительно далёкого фона. По величине этого угла вычисляют расстояние до объекта.

## 3. Собственное движение

Медленное смещение звезды по небу за годы и десятилетия показывает её реальное движение в Галактике. Для близких звезд этот эффект заметен уже в пределах человеческой жизни.

## 4. Радиальная скорость

Если доступны спектроскопические данные, астрометрия дополняется измерением движения вдоль луча зрения. Вместе эти данные дают полную трёхмерную картину движения объекта в пространстве.

# Небесная сфера и координатные системы

## Небесная сфера

Для удобства положение светил описывают так, будто они проецируются на воображаемую сферу вокруг наблюдателя. На ней отмечают полюса мира, небесный экватор и эклиптику.

## Экваториальная система

Она используется в звездных каталогах и большинстве астрономических наблюдений. Координаты объекта почти не зависят от места наблюдения и удобны для точного сравнения данных.

## Горизонтальная и эклиптическая системы

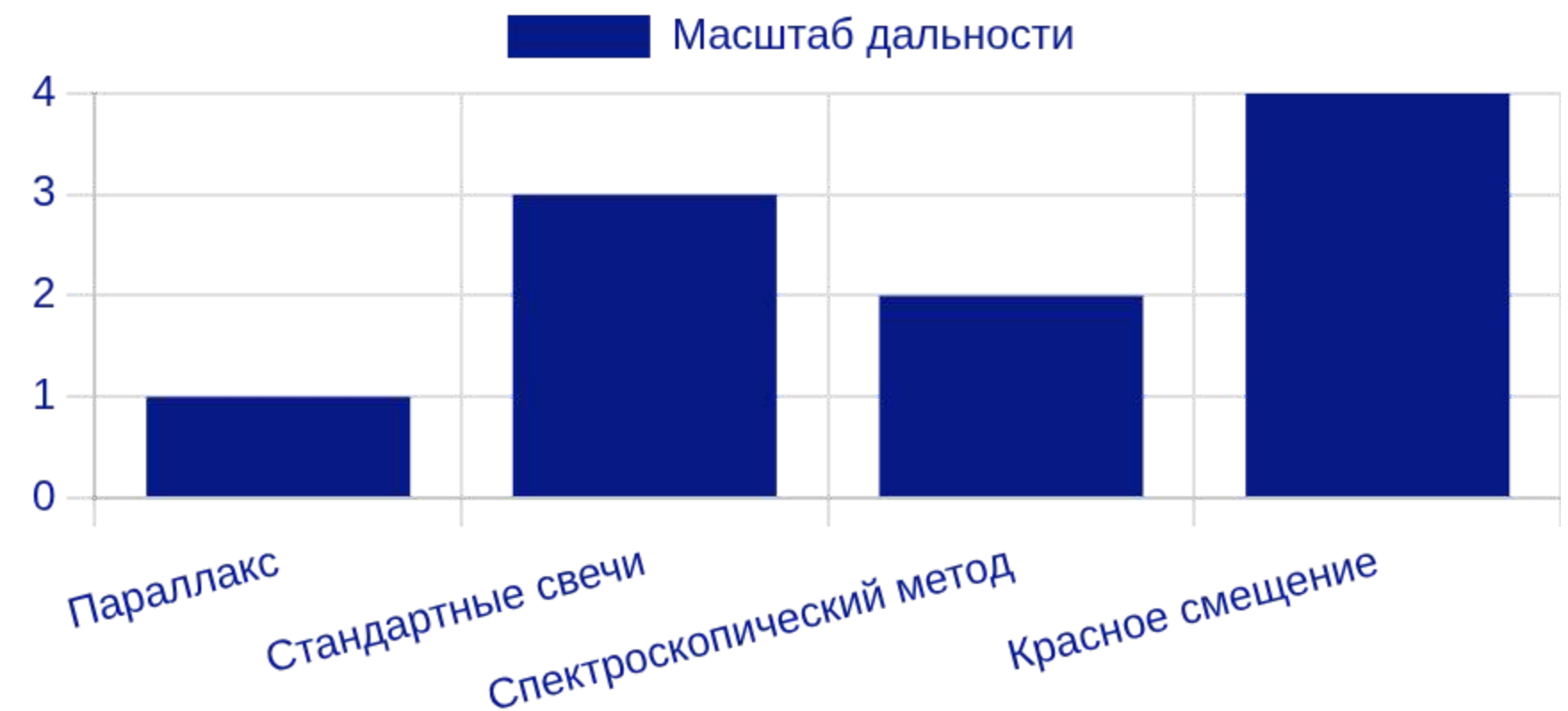
Горизонтальная система помогает ориентироваться наблюдателю на конкретной точке Земли, а эклиптическая связана с движением планет и положением Земли на орбите вокруг Солнца.



# Основные способы определения расстояний в астрономии

Методы образуют иерархию: от ближайших звезд к далёким галактикам. Выбор способа зависит от яркости объекта, доступных данных и требуемой точности.

Параллакс даёт опору для ближнего космоса, а более удалённые объекты требуют косвенных методов, основанных на свойствах света.



# Точность астрометрических инструментов

| Инструмент       | Точность               | Масштаб              |
|------------------|------------------------|----------------------|
| Земные телескопы | доли–единицы мас. дуги | зависит от атмосферы |
| Hipparcos        | ≈1 мас. дуги           | >100 тыс. звезд      |
| Gaia             | до мкс дуги            | ≈1,8 млрд звезд      |

ESA; миссии Hipparcos и Gaia

Сравнение показывает, как переход в космос резко повышает точность измерений и масштаб каталогов.

Главное преимущество космических миссий — отсутствие атмосферных искажений, что позволяет одновременно повысить и точность, и объём данных.

# 3,26

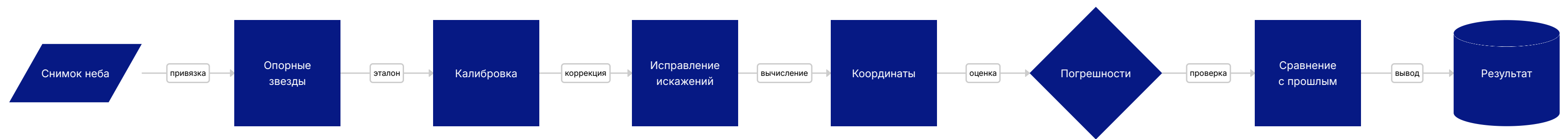
**светового года  
составляет 1 парсек**

Эта величина удобна для астрономов, потому что напрямую связана с угловым параллаксом и делает измерение ближайших звезд физически наглядным.

Астрономические единицы и определения; Международный астрономический союз

# Как выполняется астрометрическое измерение

Последовательность обработки наблюдений от снимка до научного результата





# Почему атмосфера мешает точным измерениям

## Размытие изображения

Наземный снимок проходит через турбулентные слои воздуха, поэтому звезда выглядит не точкой, а размытым пятном. Это снижает точность определения её положения на кадре.

## Атмосферная рефракция

Из-за преломления свет отклоняется при прохождении через разные слои атмосферы. Наблюдаемое положение объекта немного смещается, и это приходится отдельно учитывать при обработке данных.

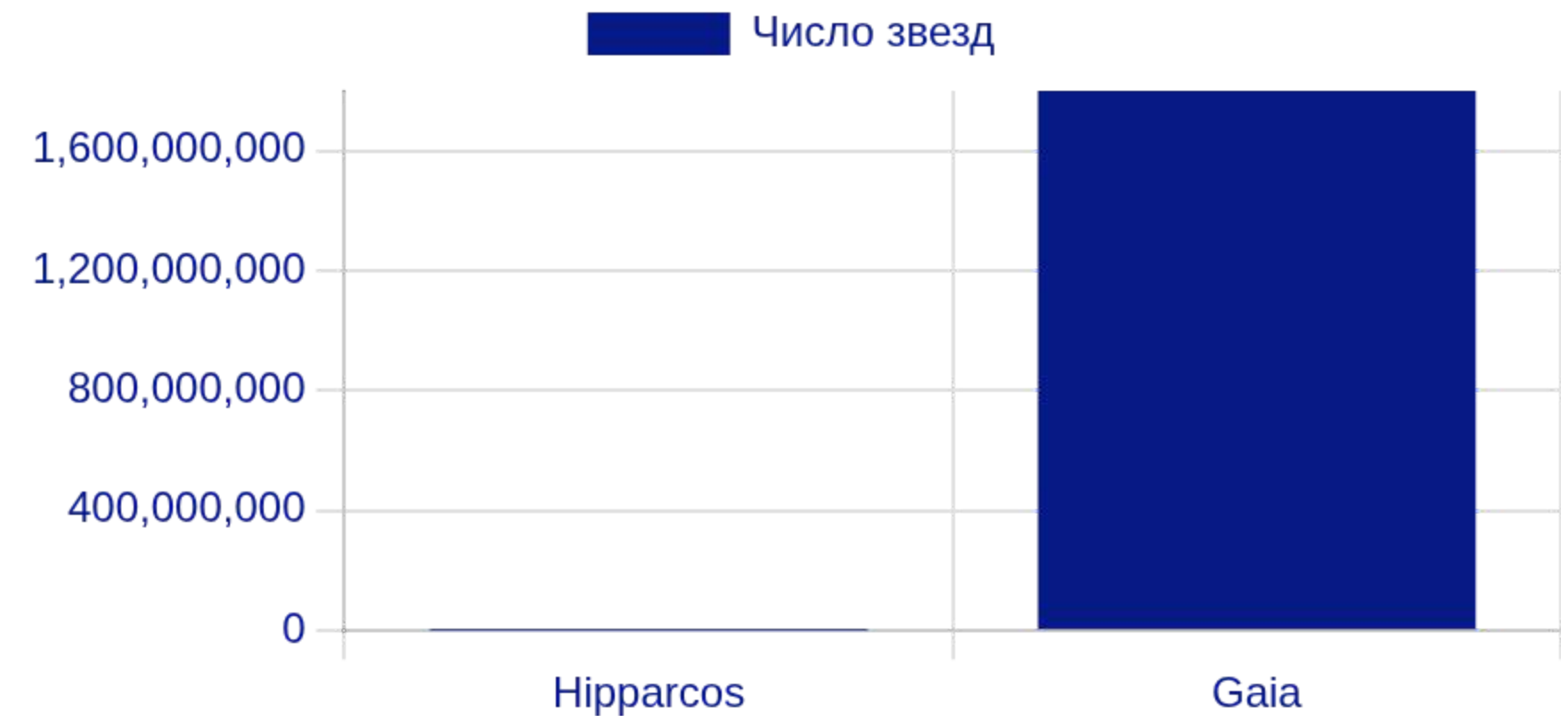
## Нестабильность условий

Температурные потоки, облачность и изменение плотности воздуха делают наблюдения переменными даже в течение одной ночи. Космические телескопы устраняют этот источник ошибки.

# Миссия Gaia и масштаб современной астрометрии

Gaia не просто увеличила каталог, а превратила астрометрию в массовое измерение параметров звёзд для всей Галактики.

Разница в масштабе показывает, почему Gaia стала основой трёхмерной карты Млечного Пути и новых исследований звёздных потоков.



ESA Gaia; официальные данные миссии

# Собственное движение звезд

## 1. Что именно движется

Собственное движение — это медленное смещение звезды относительно далёкого фона на небесной сфере. Его измеряют в угловых единицах за год, сравнивая положения объекта на снимках, сделанных в разные эпохи.

## 2. Почему оно заметно

Для большинства звёзд движение слишком мало, но у ближайших объектов оно накапливается десятилетиями и становится видимым даже в пределах жизни человека. Чем ближе звезда, тем сильнее её угловое смещение.

## 3. Что можно узнать

По собственному движению выделяют ближайшие звезды, проверяют принадлежность к скоплениям и звездным потокам, а также восстанавливают общую историю движения объектов. Это помогает понять структуру окрестностей Солнца.

## 4. Связь с пространственной скоростью

Собственное движение само по себе не даёт полной картины, но в сочетании с параллаксом и радиальной скоростью позволяет вычислить истинное движение звезды в пространстве. Так астрометрия превращает плоское небо в трёхмерную картину.

# Основные источники погрешностей в астрометрии

| Источник   | Причина          | Влияние            |
|------------|------------------|--------------------|
| Рефракция  | Атмосфера        | Смещение положения |
| Деформация | Нагрев телескопа | Сдвиг шкалы        |
| Шум        | Детектор         | Падает точность    |
| Каталог    | Ошибки опоры     | Передаются дальше  |

В астрономии, в отличие от геодезии, измерения не проводятся на малых расстояниях, поэтому погрешности, связанные с деформацией телескопа, шумом детектора и ошибками опоры, не являются главными. Главными являются погрешности, связанные с рефракцией атмосферы и с ошибками каталогов.

Даже очень точные измерения требуют учёта всех искажений, иначе ошибка переходит из наблюдения в итоговый каталог.

Высокая точность зависит не только от телескопа, но и от калибровки, опорных каталогов и математической коррекции наблюдений.

# Астрометрия в поиске экзопланет

## Невидимое притяжение планеты

Если у звезды есть массивная планета, она не остаётся неподвижной: обе системы обращаются вокруг общего центра масс. Астрометрия фиксирует едва заметное боковое смещение звезды и помогает обнаруживать планеты на широких орбитах, где другие методы работают хуже.

## Дополнение к другим методам

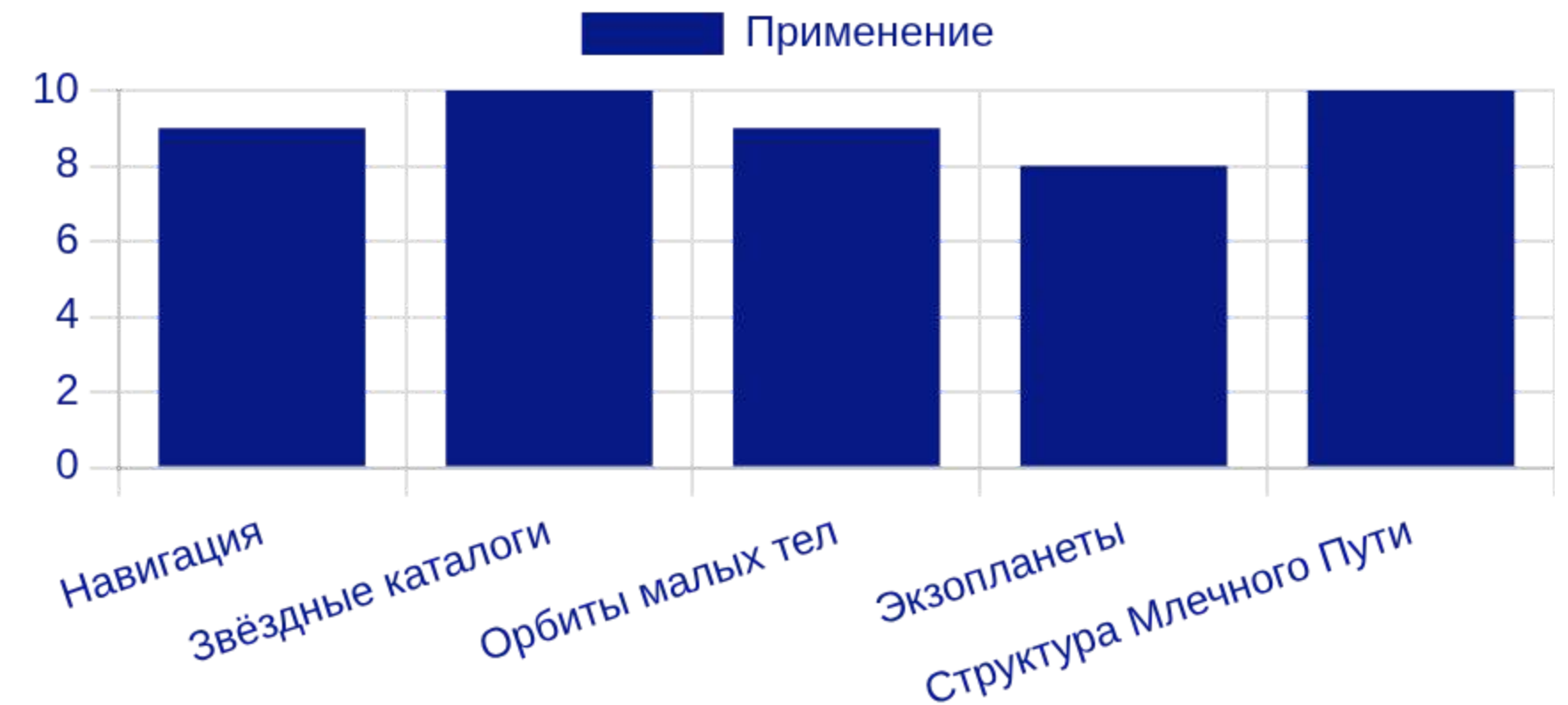
Астрометрический поиск особенно ценен там, где транзит не наблюдается, а лучевая скорость даёт лишь косвенный сигнал. В сочетании с другими подходами он уточняет массу планеты, форму орбиты и реальную геометрию системы.



# Области применения астрометрии

Разные задачи астрометрии опираются на один и тот же принцип: точное измерение положения объекта на небе и его изменения со временем.

Наибольшую научную отдачу дают каталоги звёзд, изучение Галактики и расчёт траекторий опасных объектов.



Обобщение прикладных направлений астрометрии по данным современной астрономии

# Наблюдения малых тел Солнечной системы

## Первые снимки

Астероид или комета фиксируются серией коротких экспозиций. Важно точно знать момент каждого кадра, потому что быстрое движение объекта меняет его положение уже за минуты.

## Уточнение орбиты

Координаты сравнивают со звёздным каталогом и объединяют с предыдущими наблюдениями. Так уменьшается неопределённость траектории и становится возможным более надёжный прогноз движения.

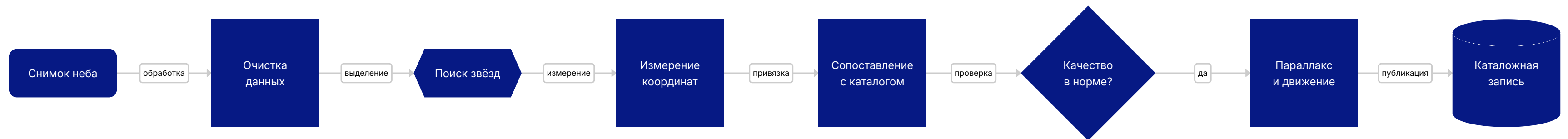
## Прогноз и защита

После вычисления орбиты можно оценивать будущие сближения с Землёй, следить за транснептуновыми объектами и использовать результаты в задачах планетарной защиты и долгосрочной динамики Солнечной системы.

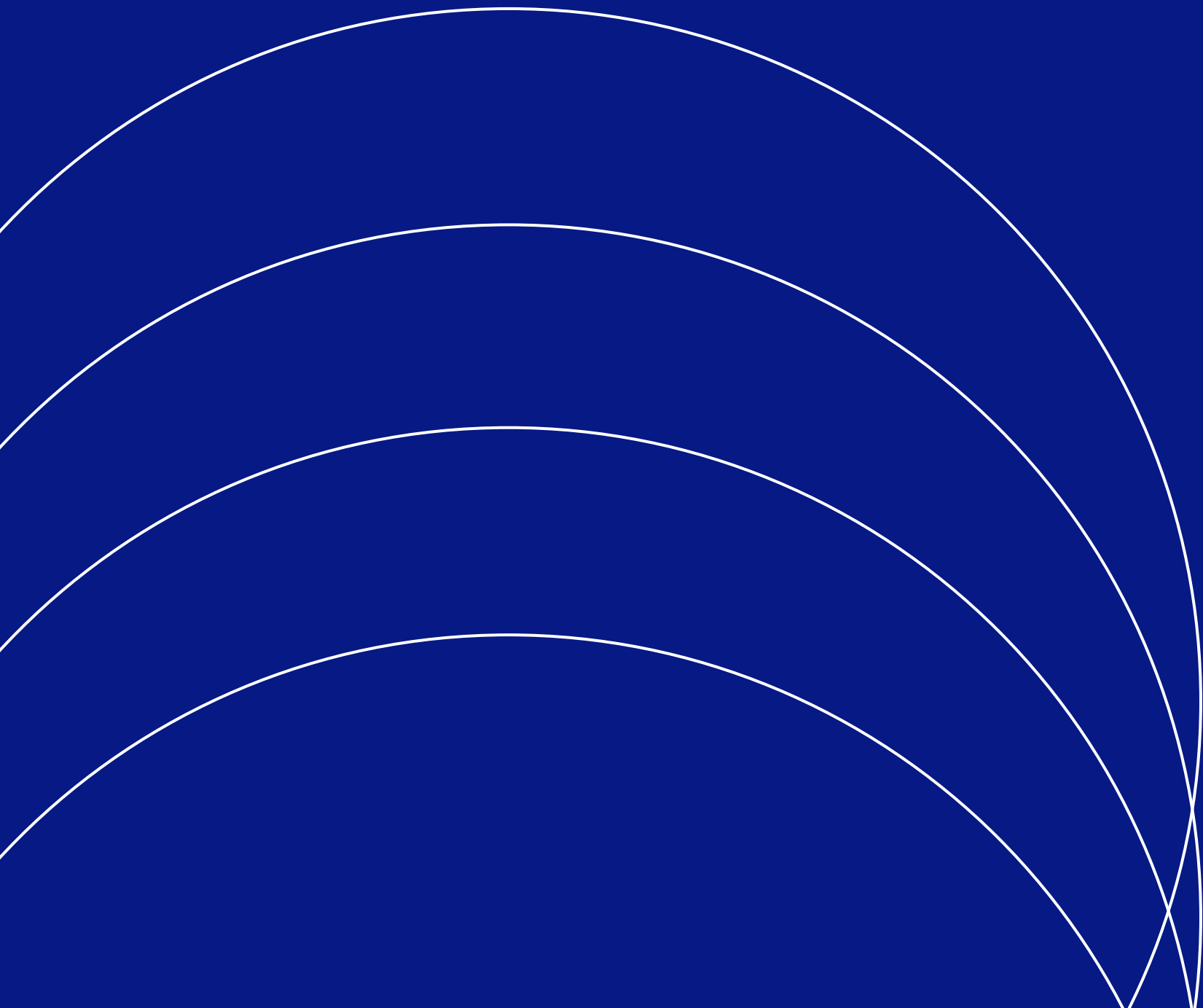


# От изображения неба к каталожной записи

Преобразование наблюдения в астрометрический результат требует последовательной обработки и контроля ошибок.



# Исторические вехи развития астрометрии



## Античность

Гиппарх создал один из первых точных звёздных каталогов и показал, что положение светил можно измерять и сравнивать. Это стало основой количественной астрономии.

## Эпоха Тихо Браге

Тщательные наблюдения без телескопа заметно повысили точность измерений. Работы Браге подготовили переход от описательной астрономии к строгой проверке данных.

## XIX век

Были измерены первые звёздные параллаксы, и стало ясно, насколько огромны расстояния до звёзд. Это подтвердило, что небесная сфера имеет глубину, а не только видимую плоскость.

## Космическая эра

Миссия Hipparcos начала новую эпоху в 1989 году, а Gaia с 2013 года перевела астрометрию в режим миллиардов измерений и рекордной точности.

# Ключевые единицы астрометрии

| Величина          | Обозначение | Значение      |
|-------------------|-------------|---------------|
| Угловая секунда   | "           | 1/3600°       |
| Миллисекунда дуги | mas         | 1/1000»       |
| Микросекунда дуги | μas         | 1/1000 mas    |
| Парсек            | pc          | 3,26 св. года |

Стандартные астрономические единицы измерения

Астрометрия работает с чрезвычайно малыми углами и огромными расстояниями, поэтому использует специализированные единицы измерения.

Эти единицы позволяют описывать тончайшие смещения на небе и связывать угловые измерения с реальными расстояниями до звёзд.

# Значение астрометрии в современной науке

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p><b>Навигация</b></p> <p>Точные координаты звёзд и объектов Солнечной системы помогают ориентироваться в пространстве, а также поддерживают расчёты для межпланетных миссий и наземных навигационных систем.</p>  |
|   | <p><b>Каталоги неба</b></p> <p>Астрометрия создаёт эталонные списки звёзд с координатами, движениями и расстояниями. Такие каталоги становятся базой для любых последующих наблюдений и сравнений.</p>              |
|  | <p><b>Опасные сближения</b></p> <p>Измерения орбит астероидов и комет позволяют заранее оценивать траектории сближения. Это важно для планетарной защиты и для проверки долгосрочной устойчивости орбит.</p>        |
|  | <p><b>Структура Галактики</b></p> <p>По положениям и скоростям миллионов звёзд исследуют диски, потоки и соседние области Млечного Пути. Так астрометрия превращается в инструмент изучения строения Галактики.</p> |

# Астрометрия — основа точной картины неба

Астрометрия превратила измерение положений звёзд в точную науку о расстояниях, движении и траекториях. Именно она делает небо не просто красивым, а измеримым, сравнимым и понятным.