

**Интересные и полезные  
задачи небесной  
механики**

*Н. В. Емельянов*

2019

# Введение

*Зачем нужно изучать Солнечную систему?*

- **Удовлетворение любопытства людей**
- **Расширение среды обитания человека**
- **Защита от опасностей со стороны  
Солнечной системы**

# Введение

## *Методы небесной механики*

- **Классическая небесная механика**
  - **задача трех тел (не решается)**
  - **устойчивость Солнечной системы**  
(Лагранж, Лаплас, Пуассон – задача так и не решена)

# Введение

## *Методы небесной механики*

- **Современная небесная механика**

- *расширение среды обитания*

- *успешно решается*

- *защита от опасностей со стороны*

- Солнечной системы*

- *решает только*

- современная небесная механика*

# Введение

*Особенности методов небесной механики*

- **Другие разделы астрономии**

*- увидеть и объяснить*

- **Небесная механика**

*- увидеть невидимое и приспособить  
для жизни и прогресса*

*Где у нас лежат*

*методы небесной механики?*

# План доклада

- Состав и размеры Солнечной системы
- Силы взаимодействия в Солнечной системе
- Основные задачи динамики Солнечной системы
- Методы наблюдений тел Солнечной системы
- Методы построения модели Солнечной системы
- Особенности задач динамики Солнечной системы
- Специальные задачи динамики Солнечной системы
- Источники данных о движении тел Солнечной системы

# Состав и размеры Солнечной системы

Состав Солнечной системы:

- Солнце
- планеты (8)
- спутники планет (176), Луна
- малые планеты (астероиды) (**793 869** на 8 апреля 2019 г.)
- кометы (более 5000)

Искусственные спутники Земли:

- метеорологические ( $h=600-1000$  км)
- геодинамические ( $h=6000$  км)
- навигационные ( $h=20\ 000$  км)
- геостационары ( $h=36\ 000$  км)

# Состав и размеры Солнечной системы

## Размеры Солнца, планет и их орбит:

|          |                 |         |      |
|----------|-----------------|---------|------|
| Солнце   | (R= 700 000 км) |         |      |
| Меркурий | (R= 2 400 км)   | a = 0.4 | а.е. |
| Венера   | (R= 6 000 км )  | a = 0.7 | а.е. |
| Земля    | (R= 6 400 км )  | a = 1.0 | а.е. |
| Марс     | (R= 3 400 км )  | a = 1.5 | а.е. |
| Юпитер   | (R= 70 000 км ) | a = 5.2 | а.е. |
| Сатурн   | (R= 60 000 км ) | a = 9.5 | а.е. |
| Уран     | (R= 25 000 км ) | a = 20  | а.е. |
| Нептун   | (R= 25 000 км ) | a = 30  | а.е. |

Самый далекий объект обнаружен на расстоянии

**97 а.е.**

от Солнца

- карликовая планета Эрида диаметром 2400 км  
имеет спутник Дисномию диаметром 300 км.



# Состав и размеры Солнечной системы

## Астероиды и кометы:

| Группа                        | Радиус,<br>км | Ср. расстояние<br>от Солнца, а.е. | Количество |
|-------------------------------|---------------|-----------------------------------|------------|
| Главный пояс                  | < 500         | 2 - 3.5                           | > 550 000  |
| Троянцы                       | < 300         | 5.2                               | 1200       |
| Транснептуновые               | 100 - 1000    | 30 - 50                           | 1068       |
| Сближающиеся<br>с Землей      | < 100         | 0.7 - 4.0                         | 300        |
| Кентавры<br>(астероид-комета) | < 100         | 5 - 30                            | 209        |
| Кометы                        | ?             | > 5.2                             | > 5000     |

# Состав и размеры Солнечной системы

Луна ( $R=1700$  км) ,  $a = 380\,000$  км

## Спутники планет:

| Всего <b>189</b><br>спутников | Близкие | Главные | Далекие | Всего | Прим.      |
|-------------------------------|---------|---------|---------|-------|------------|
| Спутники Марса                | -       | 2       | -       | 2     |            |
| Спутники Юпитера              | 4       | 4       | 71      | 79    |            |
| Спутники Сатурна              | 16      | 8       | 38      | 62    | +3 сгустка |
| Спутники Урана                | 13      | 5       | 9       | 27    |            |
| Спутники Нептуна              | 7       | 1       | 6       | 14    |            |
| Спутники Плутона              | -       | 1       | 4       | 5     |            |

Радиусы (max) 2631 км (Ганимед)

# План доклада

Состав и размеры Солнечной системы

**Силы взаимодействия в Солнечной системе**

Основные задачи динамики Солнечной системы

Методы наблюдений тел Солнечной системы

Методы построения модели Солнечной системы

Особенности задач динамики Солнечной системы

Специальные задачи динамики Солнечной системы

Источники данных о движении тел Солнечной системы

# Силы взаимодействия тел Солнечной системы

Доминируют силы гравитационной природы

## Другие силы :

световое давление

**Трудности** учета : вхождение в тень

сопротивление среды

**Трудности** учета :  
непредсказуемость плотности

вязко-упругое  
сопротивление  
тел деформациям

**Трудности** учета :  
почти ничего не знаем  
о внутренностях небесных тел

# Силы взаимодействия тел Солнечной системы

Силы гравитационной природы :

На практике чаще вместо решения уравнений поля ОТО используют постньютоновское приближение ...

- Закон притяжения Ньютона
- + релятивистские эффекты  
(например, в рамках задачи Шварцшильда)

**В большинстве задач пока вполне достаточно закона притяжения Ньютона**

Методические проблемы решения уравнений:

Аналитические методы : чрезвычайно громоздкие ряды по степеням малых параметров

Методы численного интегрирования : загружают непомерной задачей даже современные суперкомпьютеры

# План доклада

Состав и размеры Солнечной системы

Силы взаимодействия в Солнечной системе

**Основные задачи динамики тел Солнечной системы**

Методы наблюдений тел Солнечной системы

Методы построения модели Солнечной системы

Особенности задач динамики Солнечной системы

Специальные задачи динамики Солнечной системы

Источники данных о движении тел Солнечной системы

# Основные задачи динамики Солнечной системы

Во все времена Основными задачами небесной механики были :

## ГЕОДЕЗИЯ И НАВИГАЦИЯ

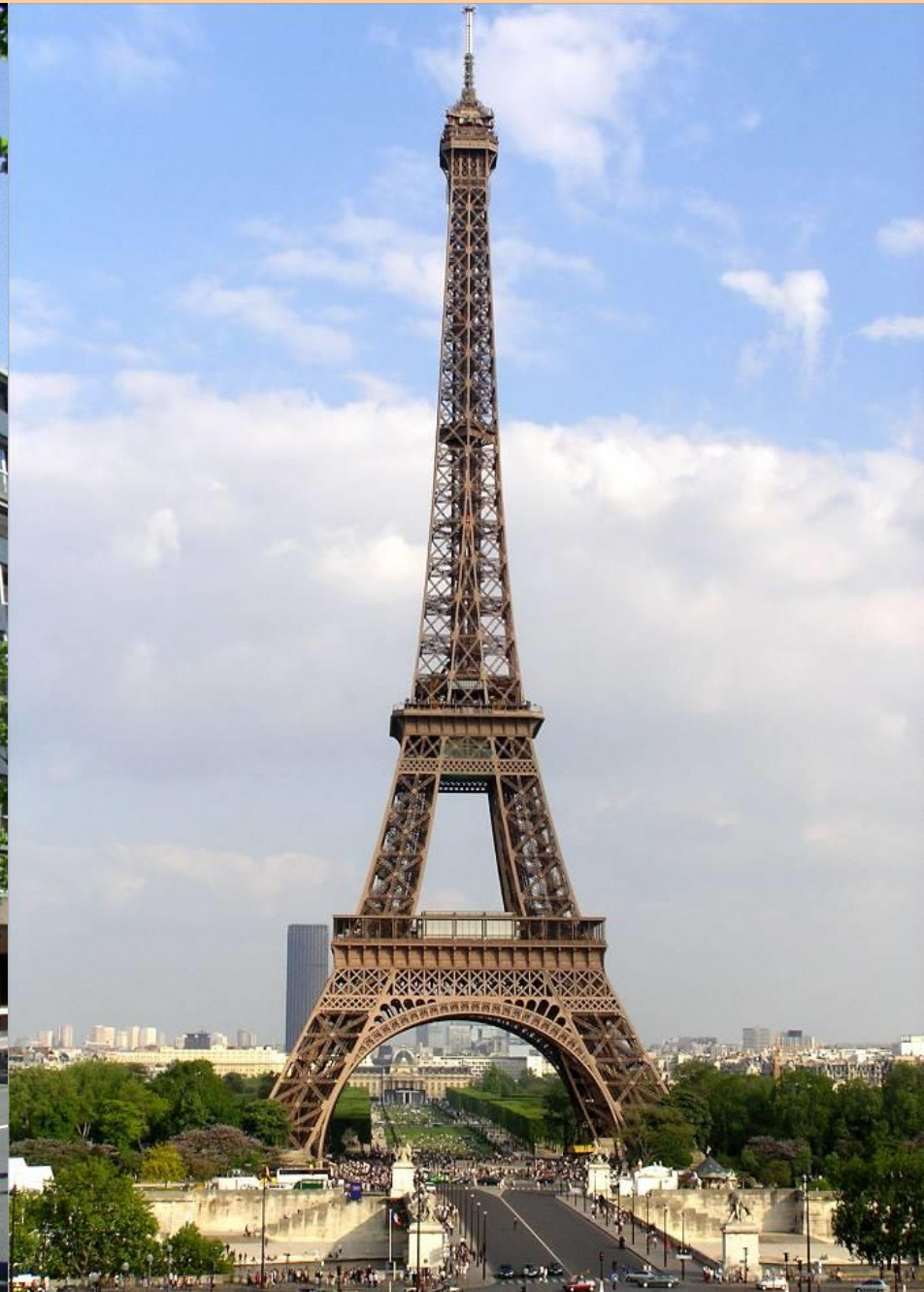
Главный в мире институт небесной механики в Париже в течение 200 лет (до 1998 года) назывался **Бюро долгот**.  
*Лагранж, Лаплас, Пуанкаре, Тиссеран, Леверье, Бретаньон*



# Основные задачи динамики Солнечной системы



Institut de Mécanique Céleste  
et de Calcul des Ephémérides





# Классики небесной механики на Эйфелевой башне

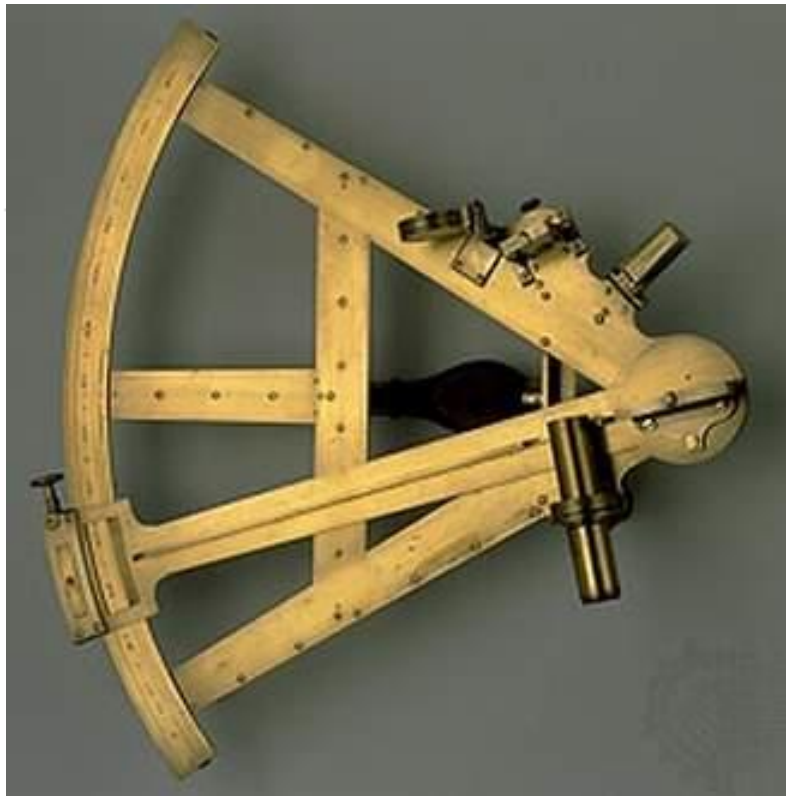
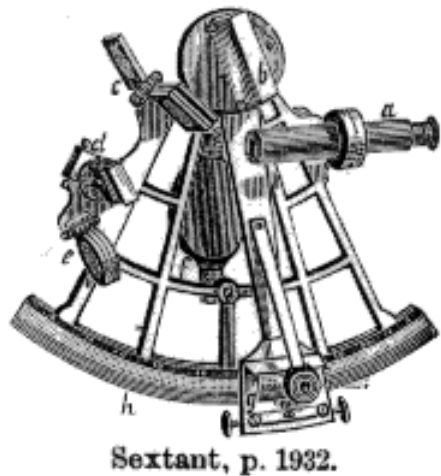


# Основные задачи динамики Солнечной системы

## ГЕОДИНАМИКА И НАВИГАЦИЯ

От секстанта и окулярного микрометра

до GPS и ГЛОНАСС



# Основные задачи динамики Солнечной системы

Новая задача небесной механики, возникшая во второй половине 20-го века, -- **межпланетная навигация.**

Основная проблема - в достаточно хорошем знании движения планет, спутников и астероидов и других малых тел Солнечной системы.

- Чтобы поменьше потратить горючего, нужно поточнее попасть

Задача совпала с вечной проблемой человечества -- **изучение среды обитания.**

Изучение строения и динамики тел Солнечной системы является важной частью астрономии.

Решается эта задача методами **небесной механики** на основе астрометрических **наблюдений.**

# План доклада

Состав и размеры Солнечной системы

Силы взаимодействия в Солнечной системе

Основные задачи динамики Солнечной системы

**Методы наблюдений тел Солнечной системы**

Методы построения модели Солнечной системы

Особенности задач динамики Солнечной системы

Специальные задачи динамики Солнечной системы

Источники данных о движении тел Солнечной системы

Источником всех знаний о Солнечной системе являются наблюдения

Никакие идеи или теории не могут быть источником знаний,  
Это только методы.



# Методы наблюдений тел Солнечной системы

Во что смотрят астрономы ?

...

В 19-м веке астрономы глядели в телескопы

В 20-м веке астрономы глядели в микроскопы

В 21-м веке астрономы глядят ... в компьютеры

Мы говорим «наблюдения»,  
подразумеваем «измерения»

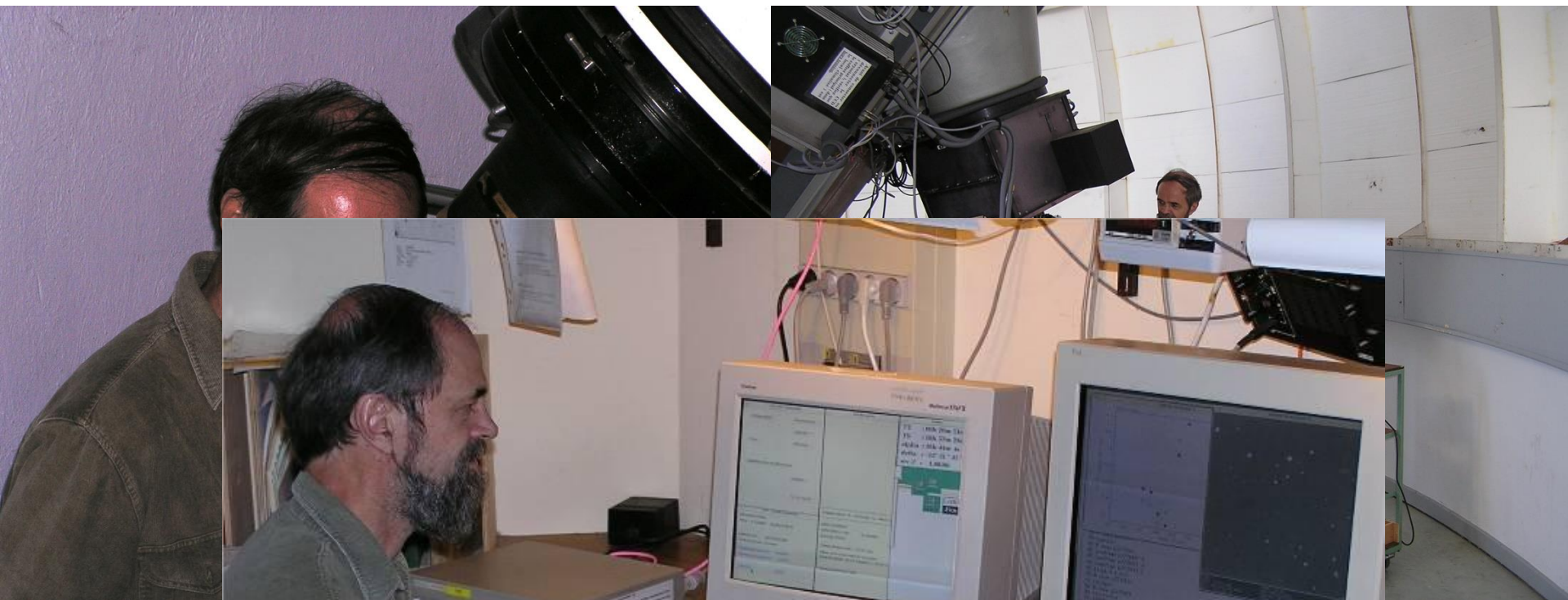


Это не наблюдения, а подготовка к наблюдениям





Это не наблюдения, а подготовка к наблюдениям

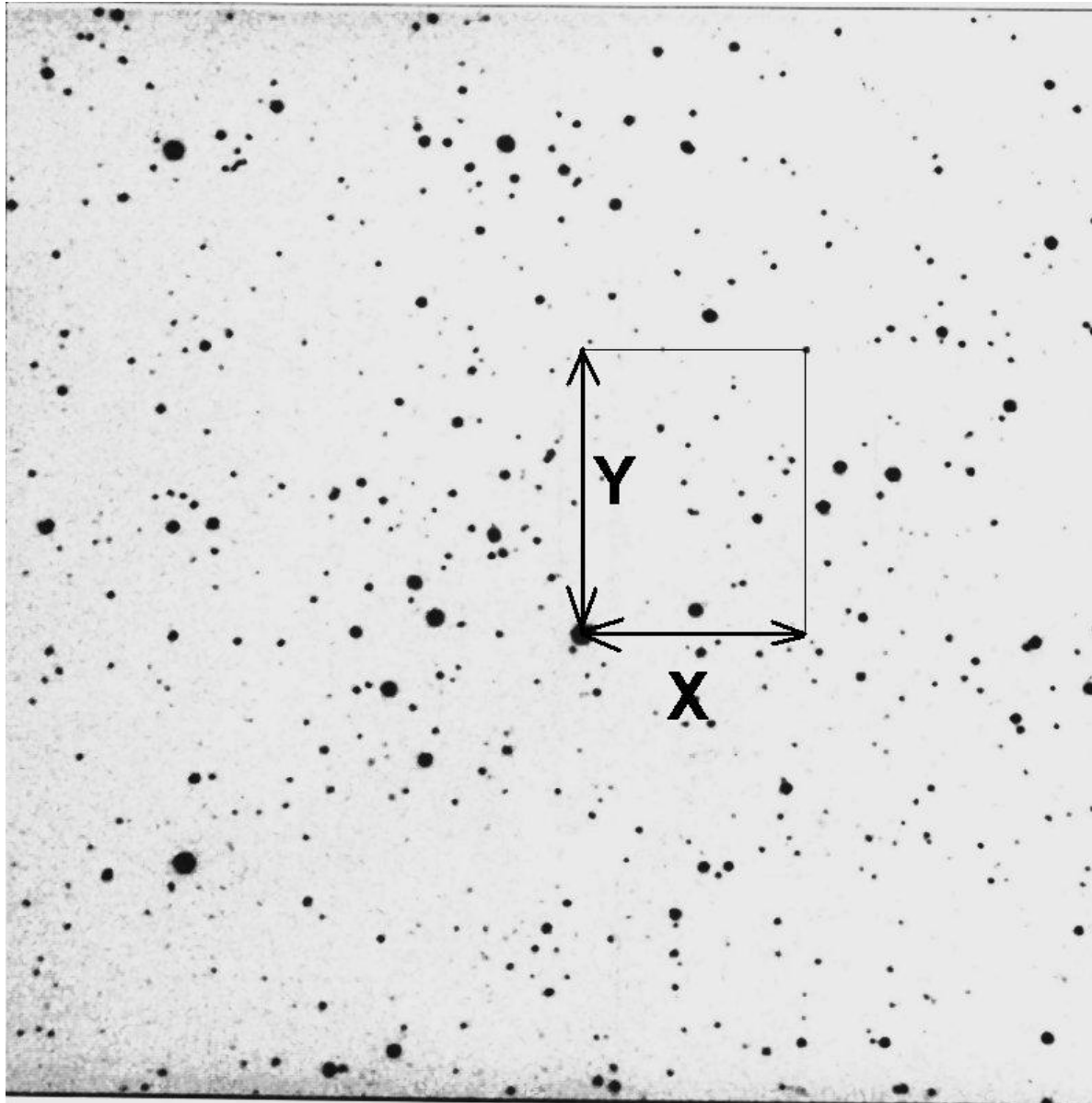


**Это - наблюдения**



# Методы наблюдений тел Солнечной системы

Наземные и космические астрометрические наблюдения.



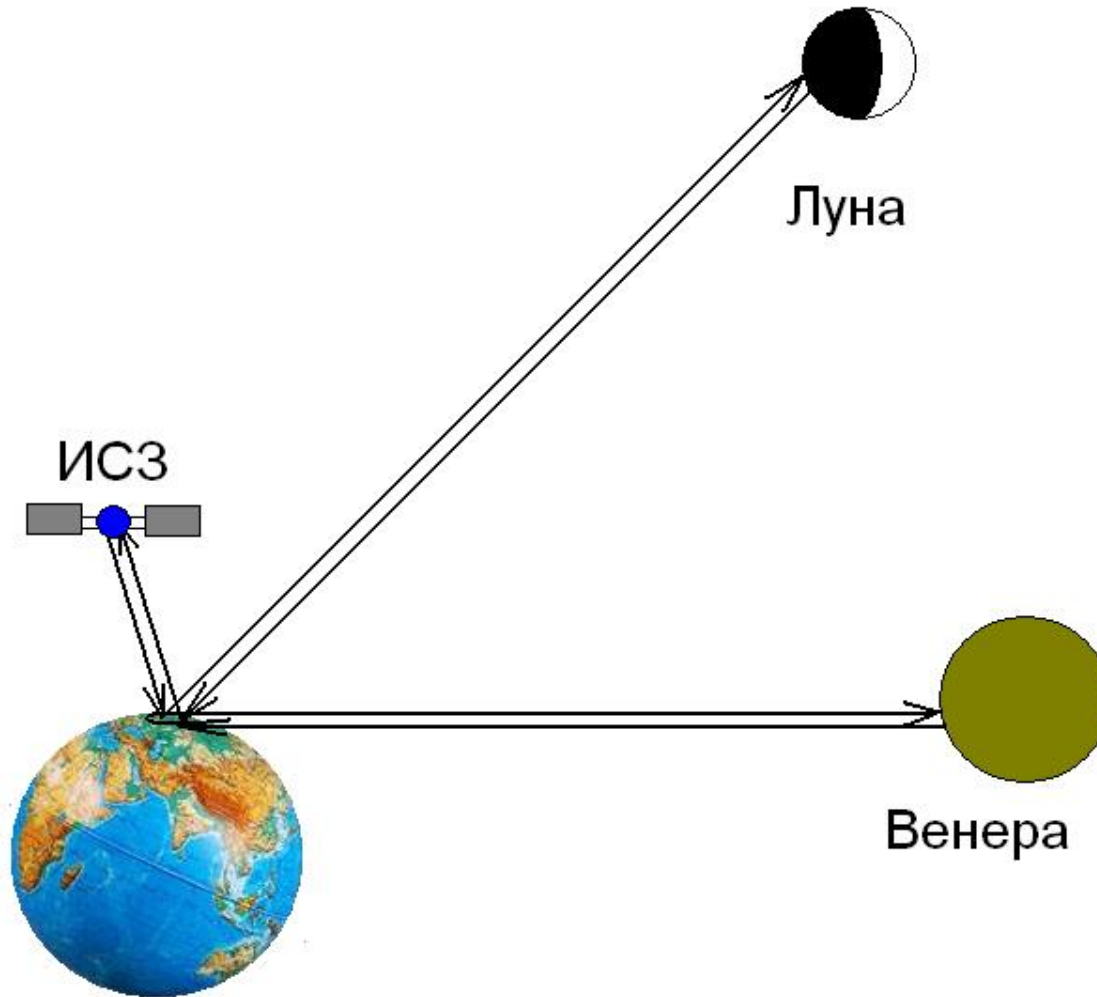
Измеряются  
разности  
прямоугольных  
координат небесных  
тел  
(в миллиметрах  
или в пикселах)

Например,  
измеряются  
координаты  
астероида  
относительно  
звезд

$$\xi = \{X, Y\}$$

# Методы наблюдений тел Солнечной системы

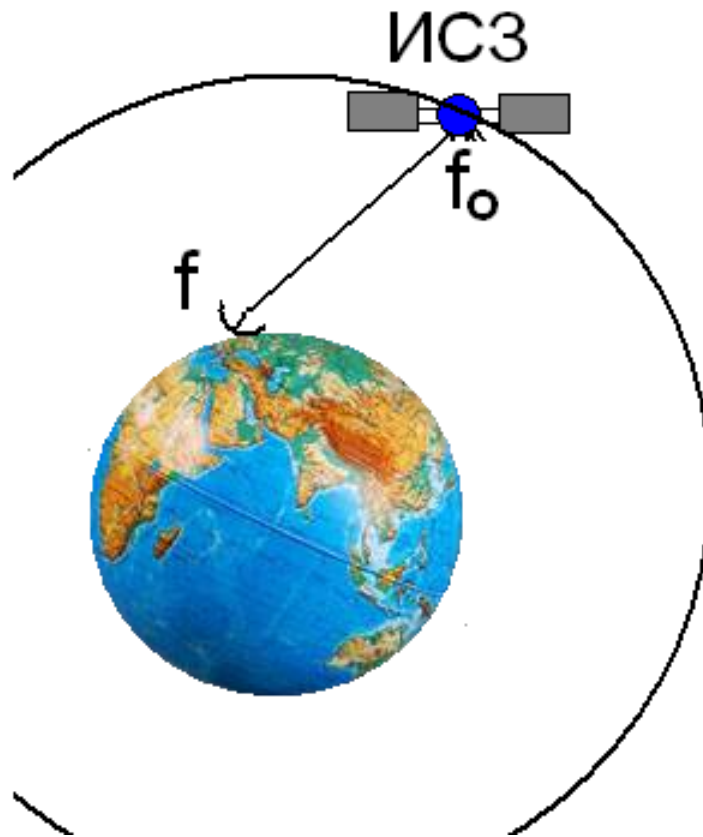
Лазерные и радиотехнические дальномерные измерения.



$$\xi = \Delta \tau \text{ (время «старт-возврат» импульса)}$$

# Методы наблюдений тел Солнечной системы

Радиотехнические доплеровские наблюдения.

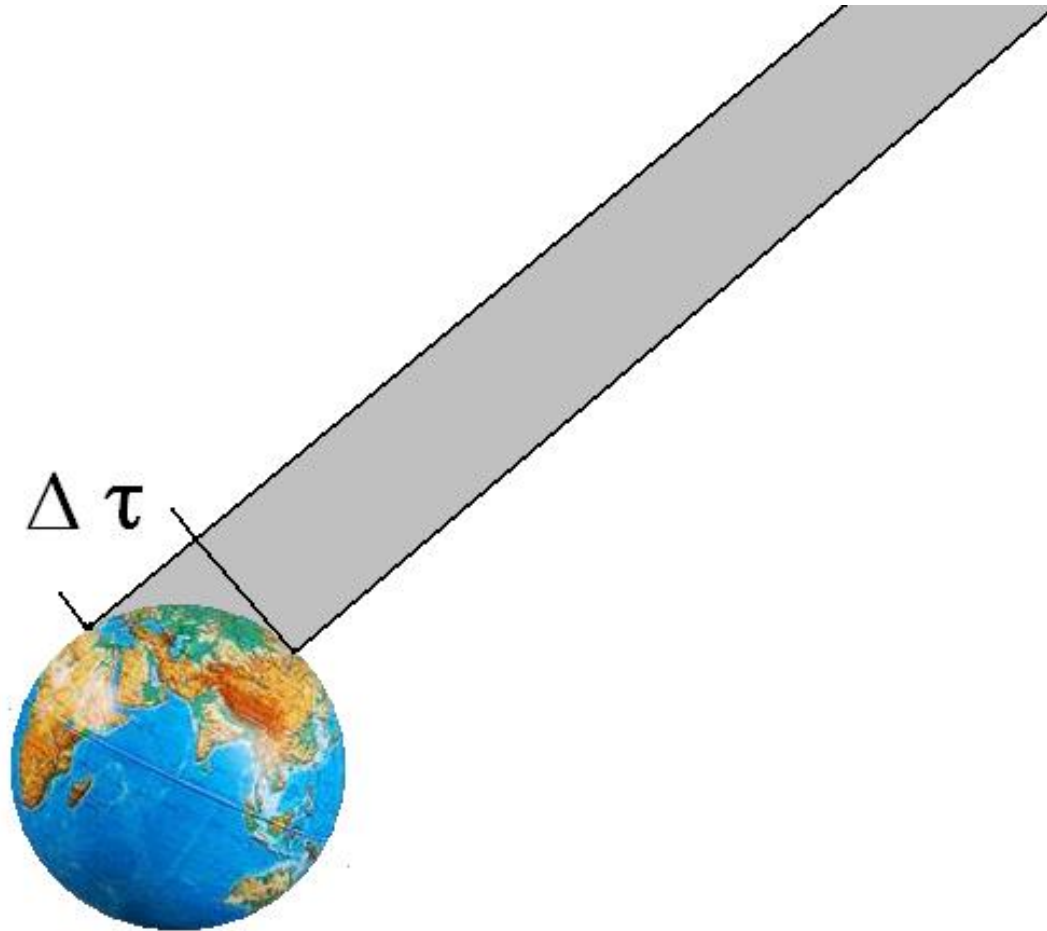


$$f - f_0 = \Delta f = f_0 \frac{v}{c}$$

$\xi = \Delta f$  (сдвиг частоты принимаемого сигнала)

# Методы наблюдений тел Солнечной системы

## Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой.

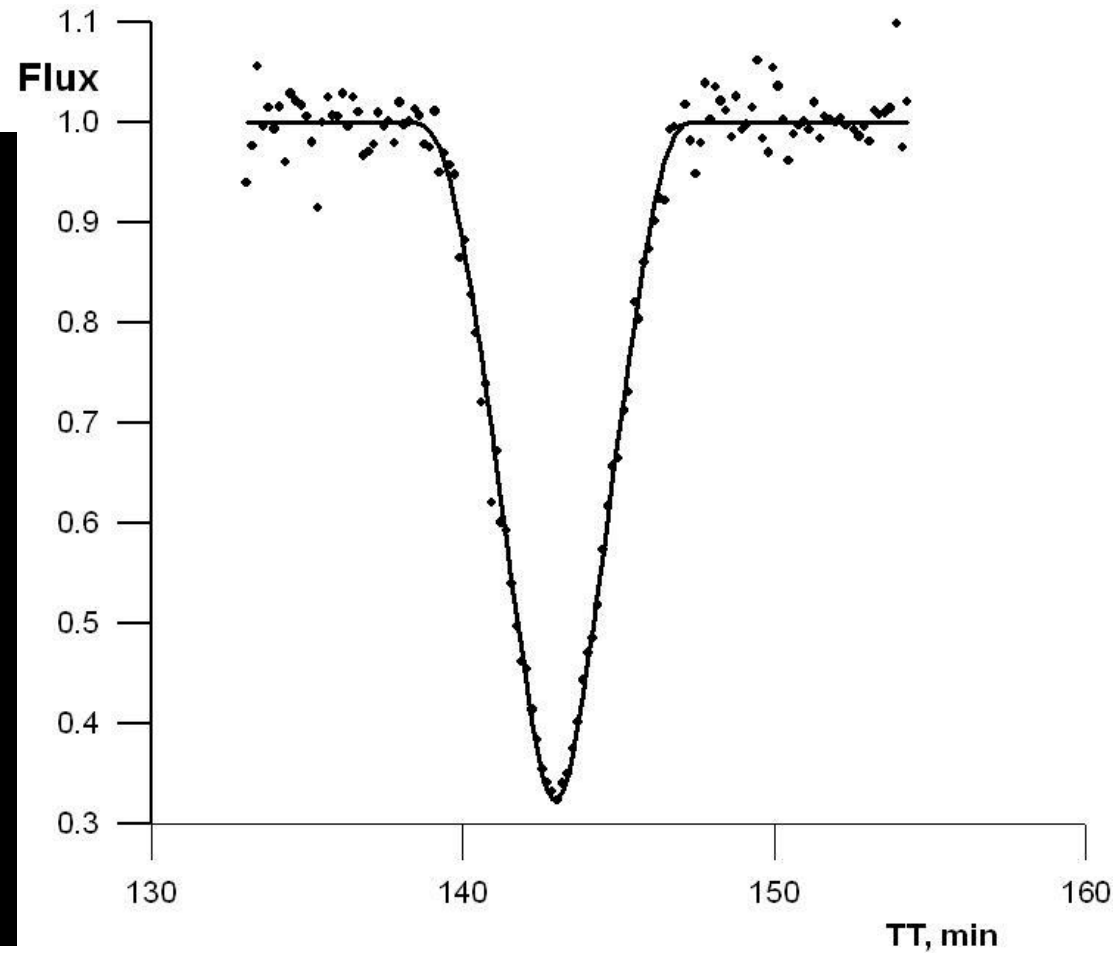
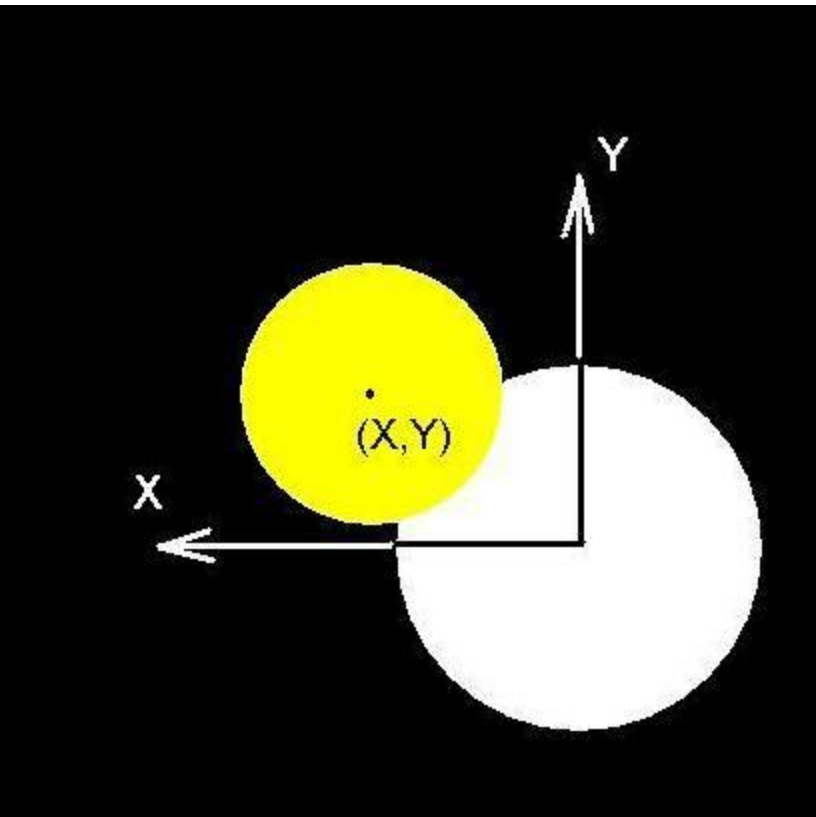


$$\xi = \Delta \tau \text{ (сдвиг сигнала по времени)}$$

# Методы наблюдений тел Солнечной системы

Косвенные наблюдения положений небесных тел.

## Взаимные покрытия и затмения спутников планет



$$\xi = \Delta m \quad (\text{спад звездной величины})$$

# План доклада

Состав и размеры Солнечной системы

Силы взаимодействия в Солнечной системе

Основные задачи динамики Солнечной системы

Методы наблюдений тел Солнечной системы

**Методы построения модели Солнечной системы**

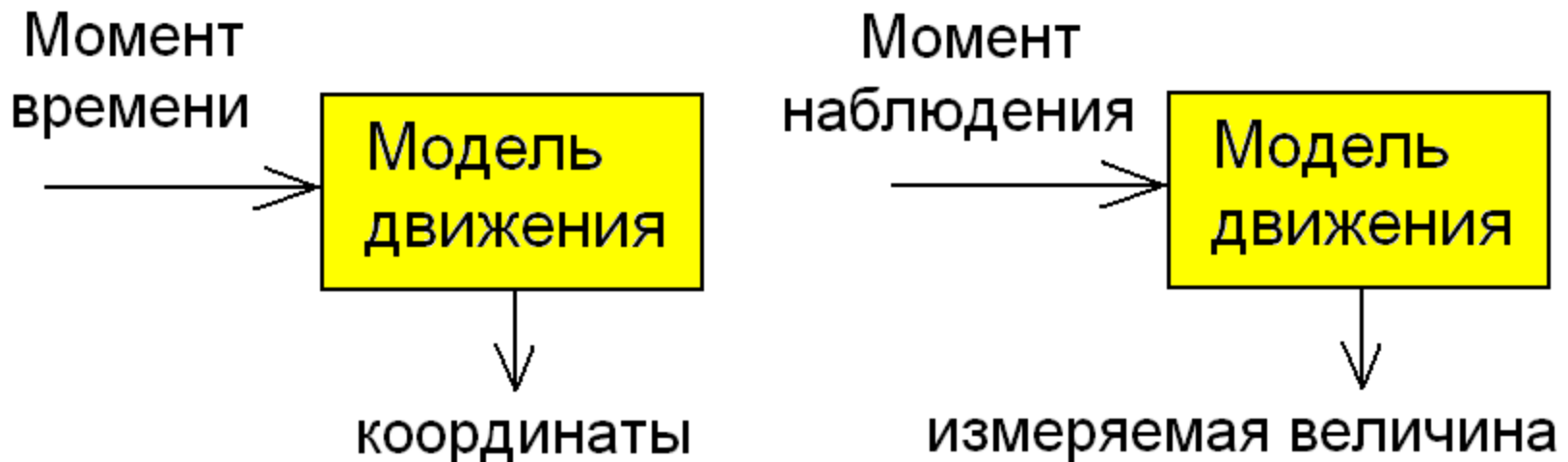
Особенности задач динамики Солнечной системы

Специальные задачи динамики Солнечной системы

Источники данных о движении тел Солнечной системы

# Методы построения модели Солнечной системы

Модель движения небесного тела -- это процедура, позволяющая на любой заданный момент времени определить координаты небесного тела или получить значение какой-либо величины, измеряемой в процессе наблюдений.



**Именно модель движения концентрирует все наши знания о динамике небесного тела, включая все имеющиеся наблюдения, и именно модель нужна в практических приложениях.**

# Методы построения модели Солнечной системы

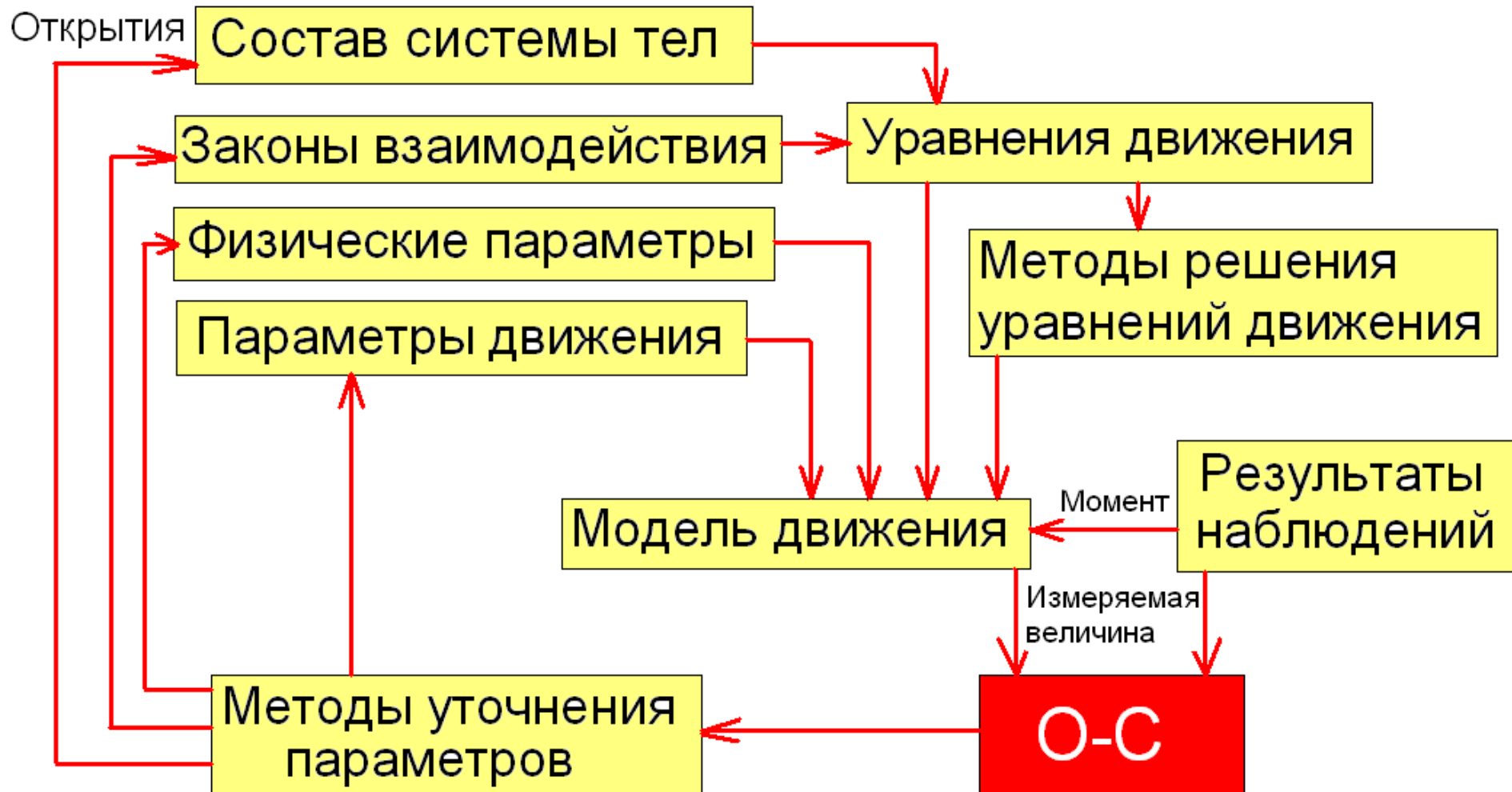
Идея:

1. Строим модель движения
2. Обеспечиваем ее максимальную близость к действительности (наблюдениям)
3. Пользуемся моделью для решения научных и практических задач

Альтернативы нет, мы вынуждены так делать.



# Методы построения модели Солнечной системы



# План доклада

Состав и размеры Солнечной системы

Силы взаимодействия в Солнечной системе

Основные задачи динамики Солнечной системы

Методы наблюдений тел Солнечной системы

Методы построения модели Солнечной системы

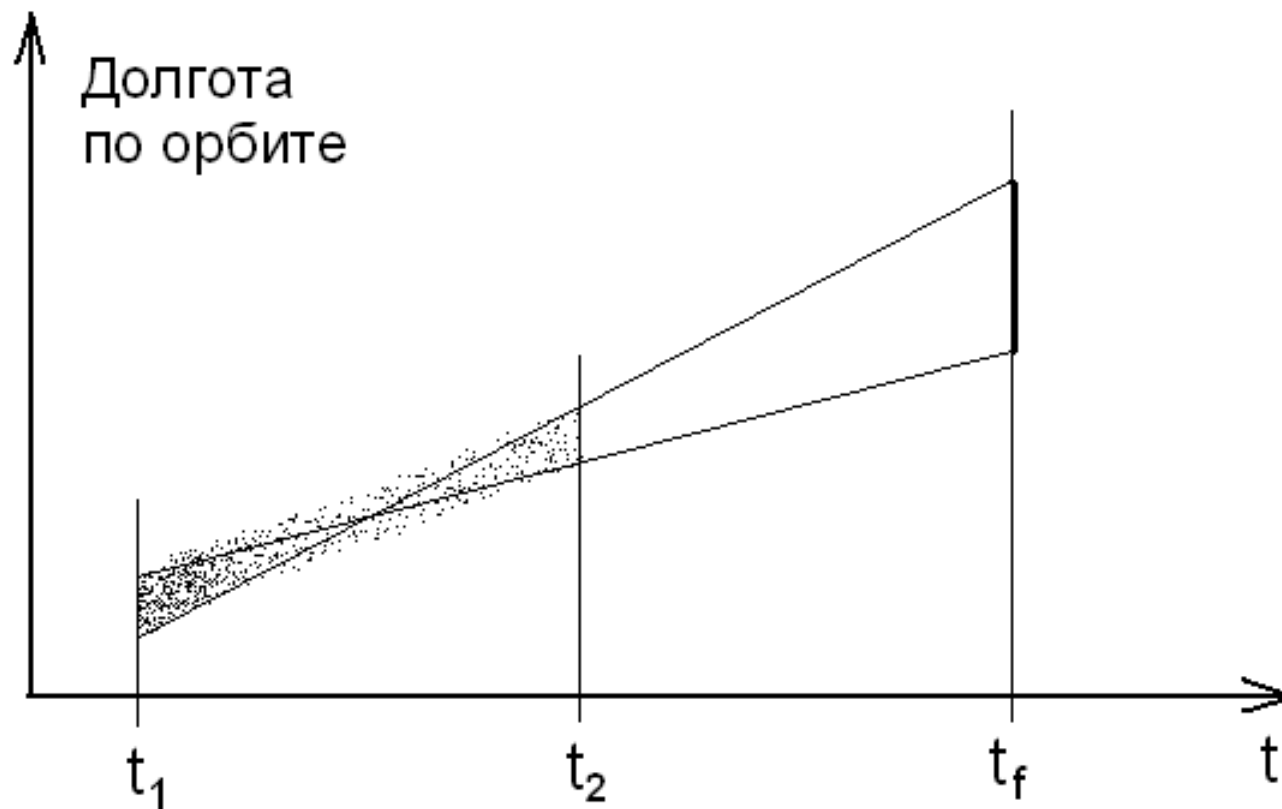
**Особенности задач динамики Солнечной системы**

Специальные задачи динамики Солнечной системы

Источники данных о движении тел Солнечной системы

# Особенности задач динамики Солнечной системы

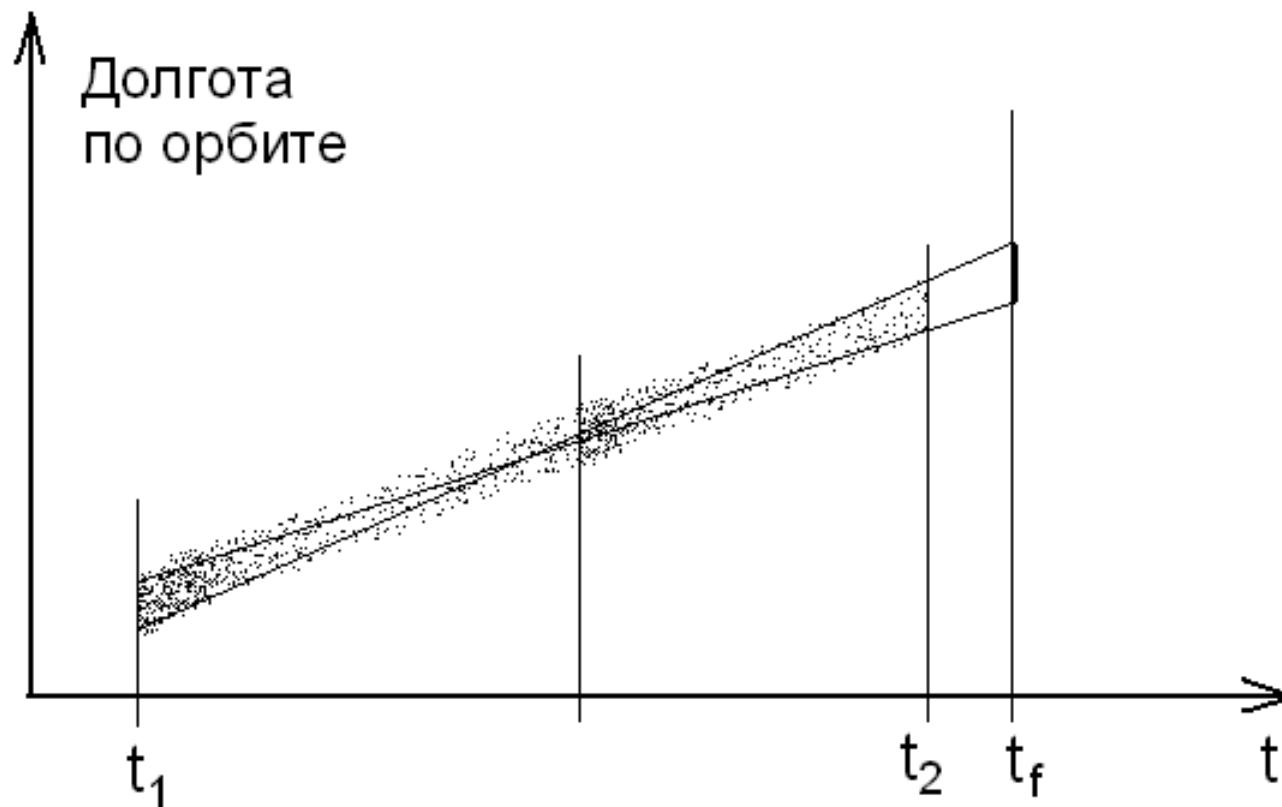
Связь интервала наблюдений и ошибки эфемериды



$$\sigma_{\lambda}(t_f) = \sigma_{\lambda} (t_f - t_2) = \frac{\sigma_{\lambda}}{t_2 - t_1} (t_f - t_2).$$

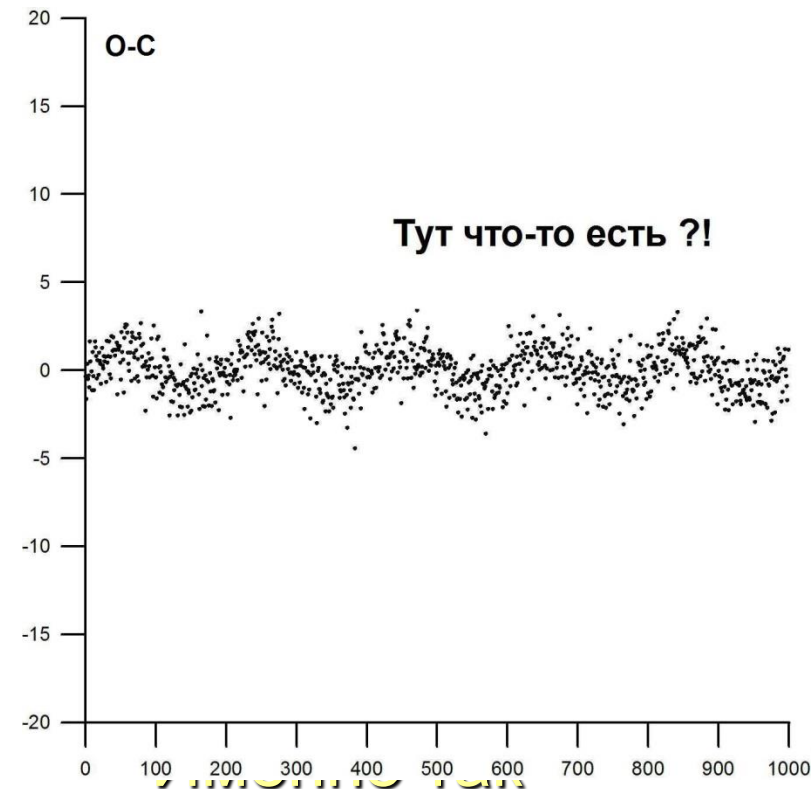
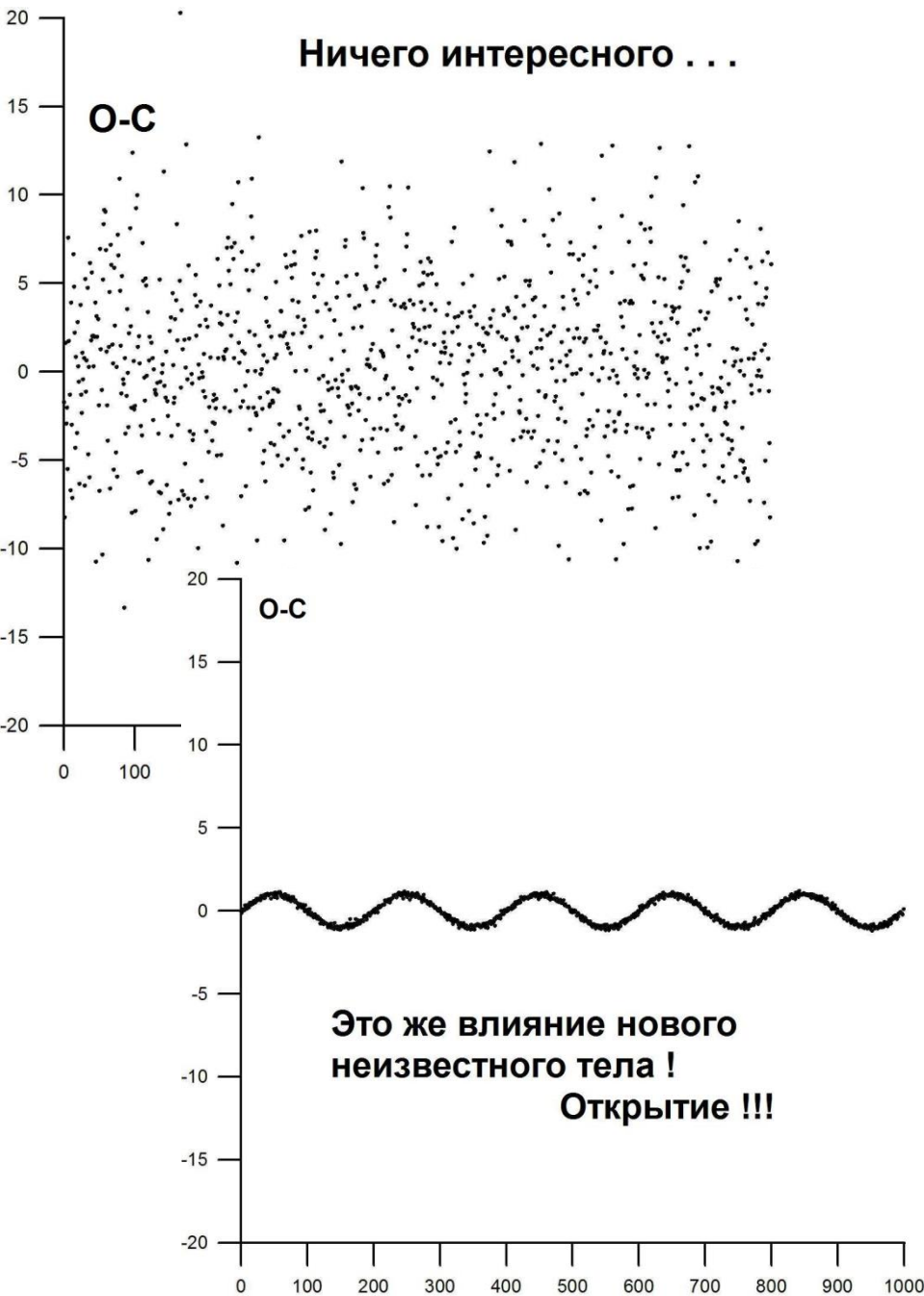
# Особенности задач динамики Солнечной системы

## Связь интервала наблюдений и ошибки эфемериды



$$\sigma_{\lambda}(t_f) = \sigma_{\lambda} (t_f - t_2) = \frac{\sigma_{\lambda}}{t_2 - t_1} (t_f - t_2).$$

# Необходимо повышение точности наблюдений !

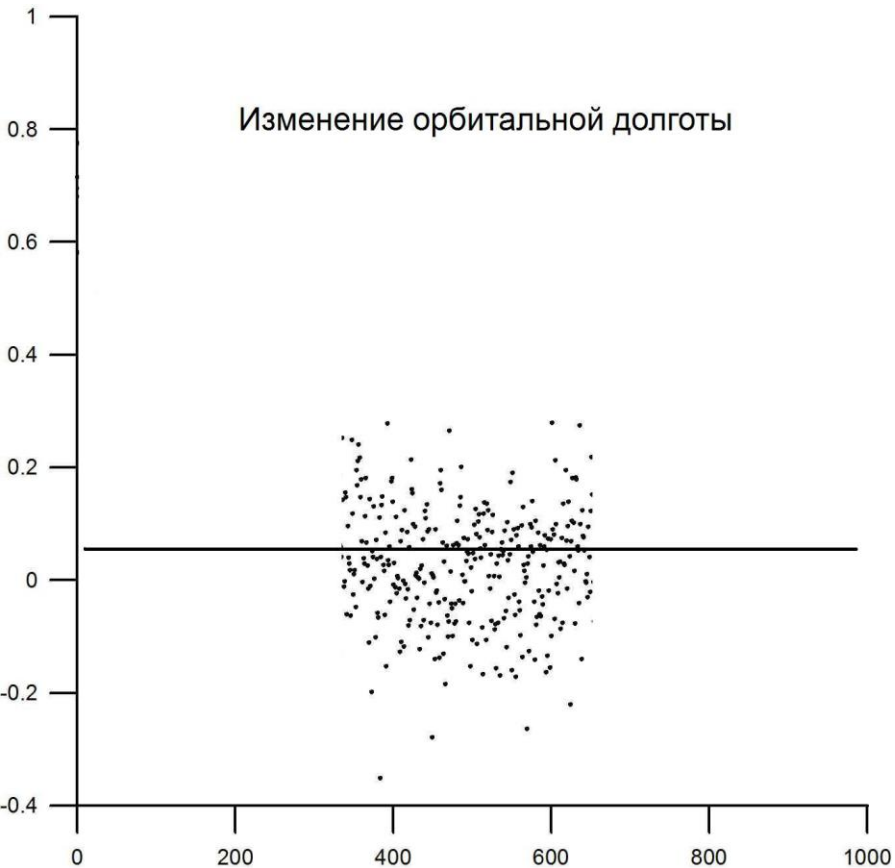


**Леверье открыл Нептун!**

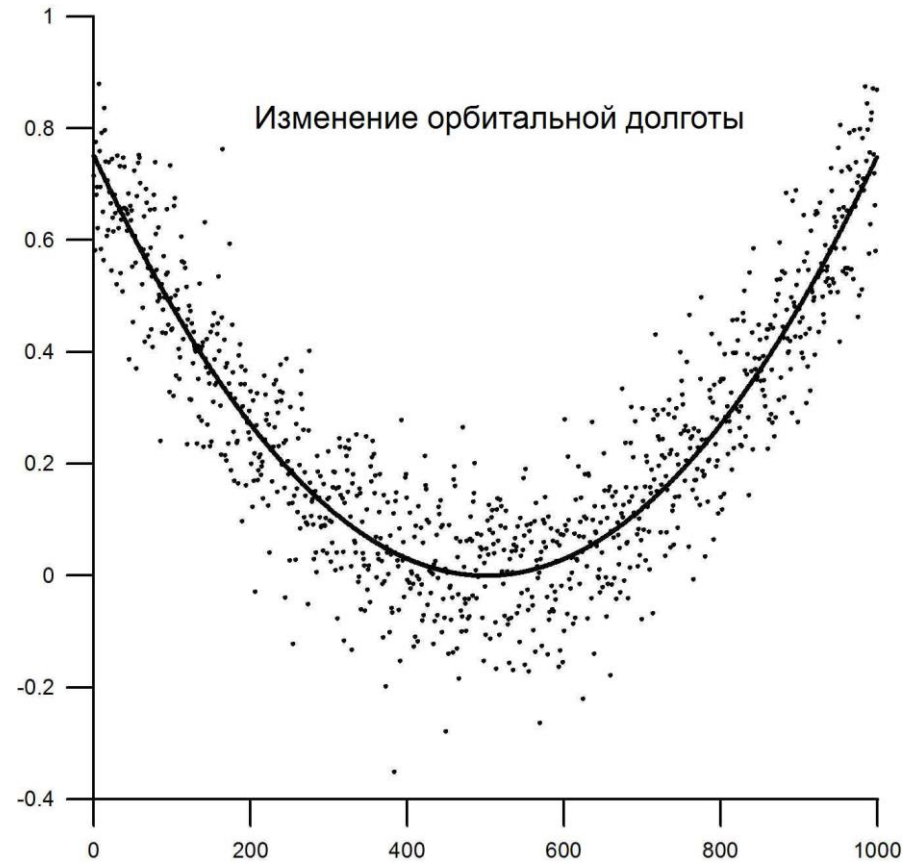
**Другие результаты:  
определение масс  
спутников и плотности  
вещества.**

**Из чего же они сделаны ?**

# Необходимо увеличение интервала наблюдений !



- диссипация энергии  
есть,  
но ее не видно



- налицо диссипация  
энергии — приливы —  
вязкость вещества.

Из чего же они сделаны,  
спутники ?

# План доклада

Состав и размеры Солнечной системы

Силы взаимодействия в Солнечной системе

Основные задачи динамики Солнечной системы

Методы наблюдений тел Солнечной системы

Методы построения модели Солнечной системы

Особенности задач динамики Солнечной системы

**Специальные задачи динамики Солнечной системы**

Источники данных о движении тел Солнечной системы

# Специальные задачи динамики Солнечной системы

**Координатно-временное обеспечение наземных и космических навигационных служб.**

Модели движения Луны и планет, модель вращения Земли служат основой для координатно-временного обеспечения навигационных служб и некоторых производственных процессов.

До изобретения атомных часов небесная механика обеспечивала единственный надежный способ отсчета времени.

Координатно-временное обеспечение навигационных служб напрямую зависит от модели движения тел Солнечной системы.

Связь шкал времени зависит от расположения тел в Солнечной системе, свойств их движения.

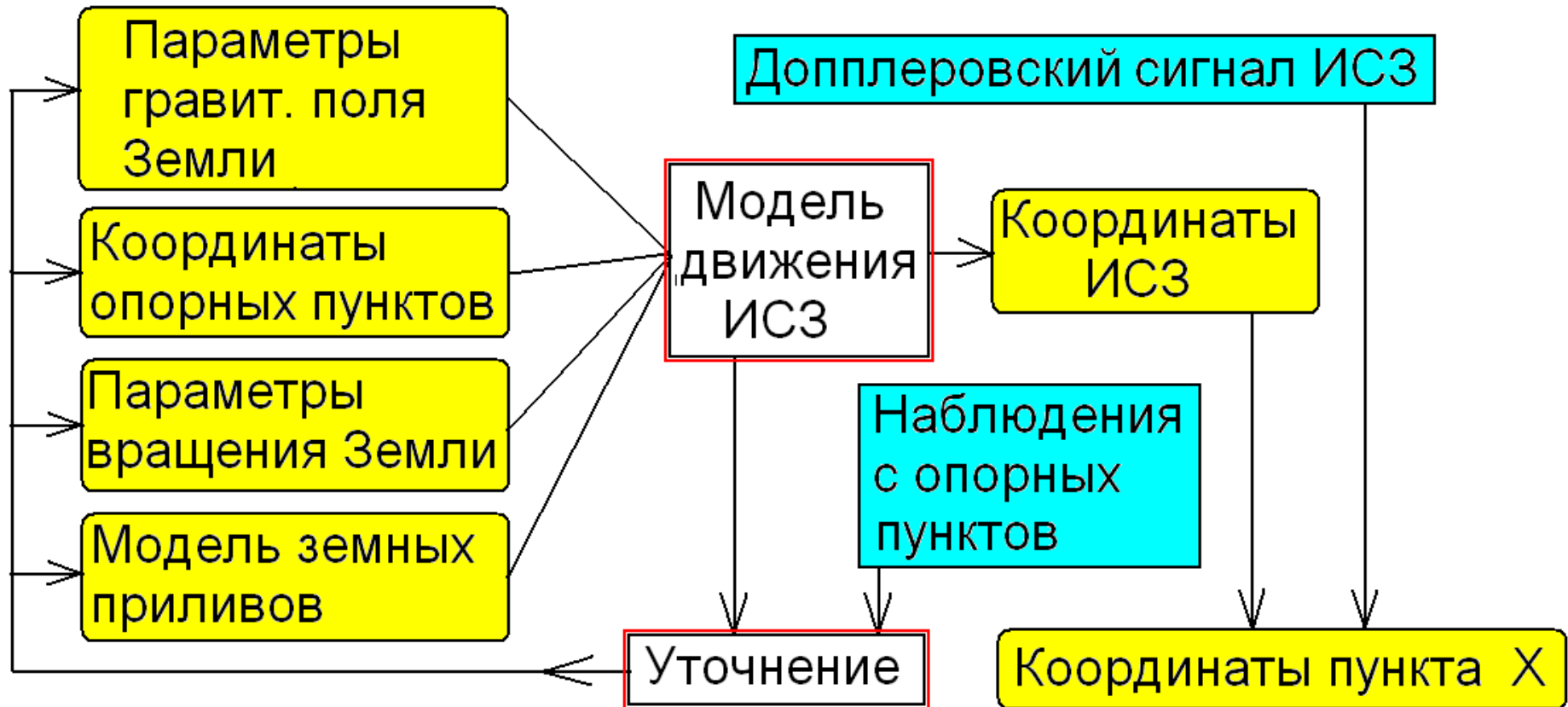


# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Использование искусственных спутников Земли

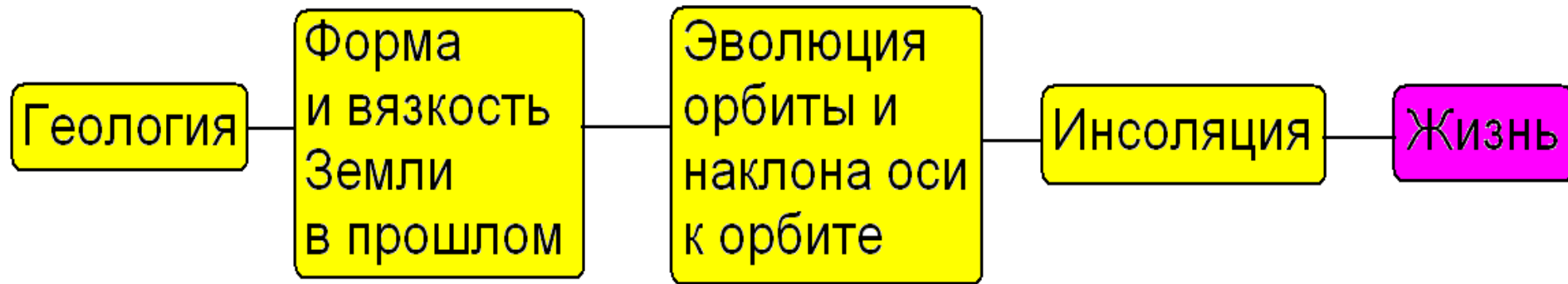
ИСЗ – носители приборов для наблюдений земной поверхности, а также носители устройств, обеспечивающих глобальную радиосвязь.

На основе теории движения ИСЗ работают спутниковые навигационные системы GPS, и ГЛОНАСС.



# Специальные задачи динамики Солнечной системы

Поведение Солнечной системы на десятках миллионов лет.



Для Марса изменения угла наклона оси вращения к плоскости орбиты имеют почти хаотический характер в больших пределах. Совершенно случайно в настоящее время он имеет значение 25 град.

Жак Ляскар построил модель вращения Земли для случая, если бы у нее не было спутника, Луны.

Результат - угол наклона оси вращения Земли к плоскости орбиты на интервале 30 млн лет изменялся также хаотично и в больших пределах, как и у Марса.

Существование жизни на Земле обязано присутствию Луны !









# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Определение масс далеких спутников планет

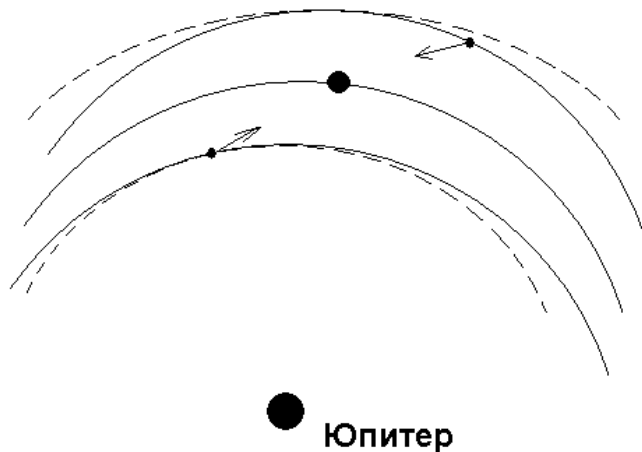
Из наблюдений - только **яркость**

Из яркости + **гипотеза** об альбедо - **размер**

Из размера + **гипотеза** о плотности – **масса**

Гравитационный параметр

Гималии (спутник Юпитера)  $Gm = 0.45 \text{ км}^3/\text{с}^2$



По астрометрическим наблюдениям других спутников с учетом притяжения Гималией

$Gm = 0.28 \pm 0.04 \text{ км}^3/\text{с}^2$

(Емельянов, 2005)

Впервые сделано для далеких спутников планет



# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Загадка орбитального ускорения спутницы Юпитера Ио

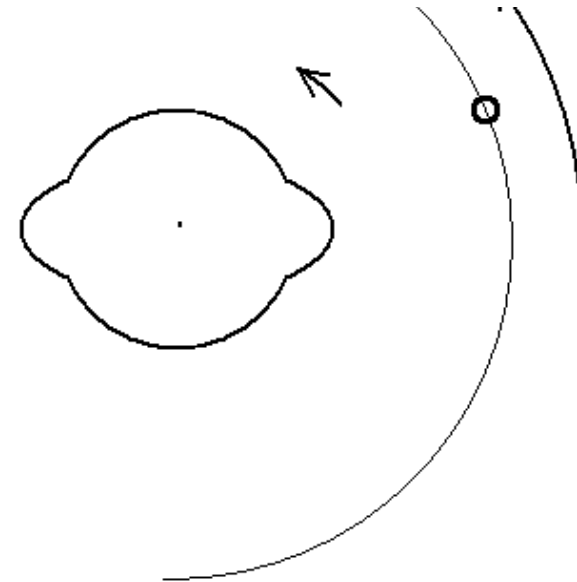
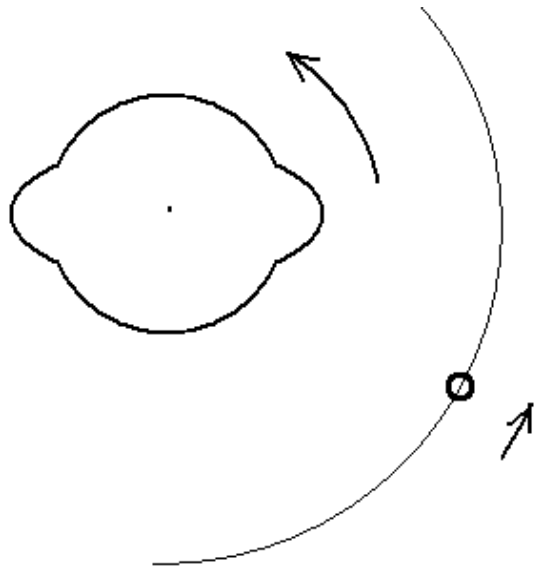
Тела г

В про

слегка

слегка

Юпитер вращается быстрее, чем Ио,  
орбитальная угловая скорость Ио должна  
уменьшаться.  
Но она увеличивается !



Приливы увеличивают энергию  
спутника,  
размер орбиты увеличивается,  
угловая скорость уменьшается.

Приливы уменьшают энергию  
спутника,  
размер орбиты уменьшается,  
угловая скорость увеличивается.

# Специальные задачи динамики Солнечной системы

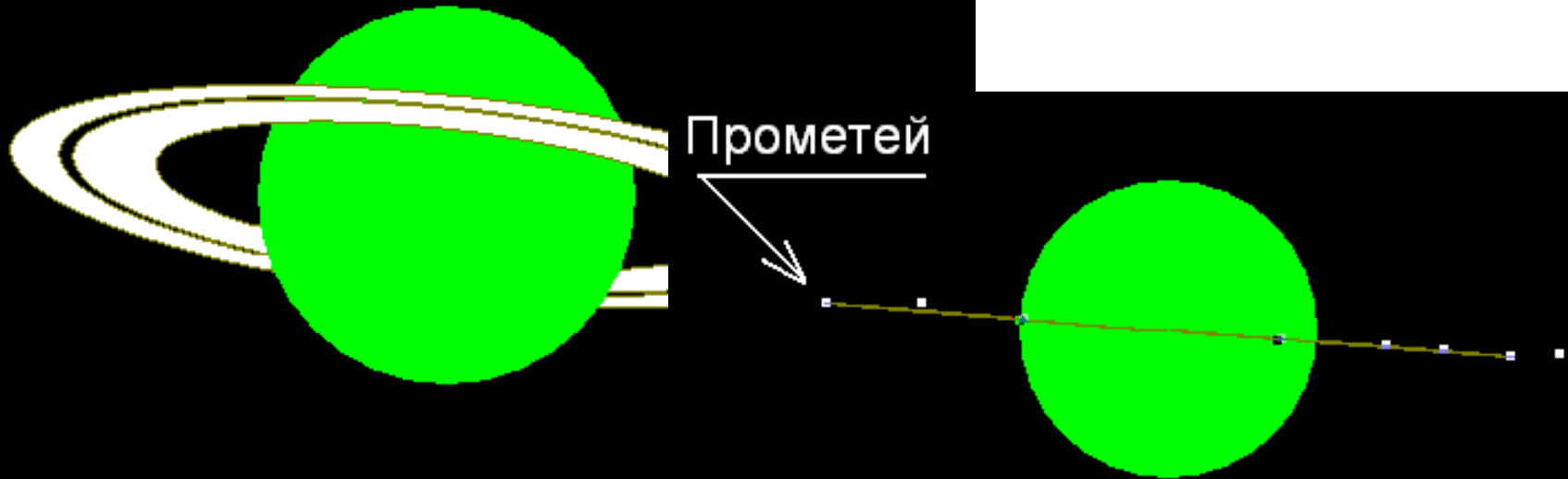
## Опоздание Прометей

Прометей был открыт в 1980 г. (Вояджер-1) и был виден с Земли.

Прометей движется вокруг Сатурна по краю его кольца,

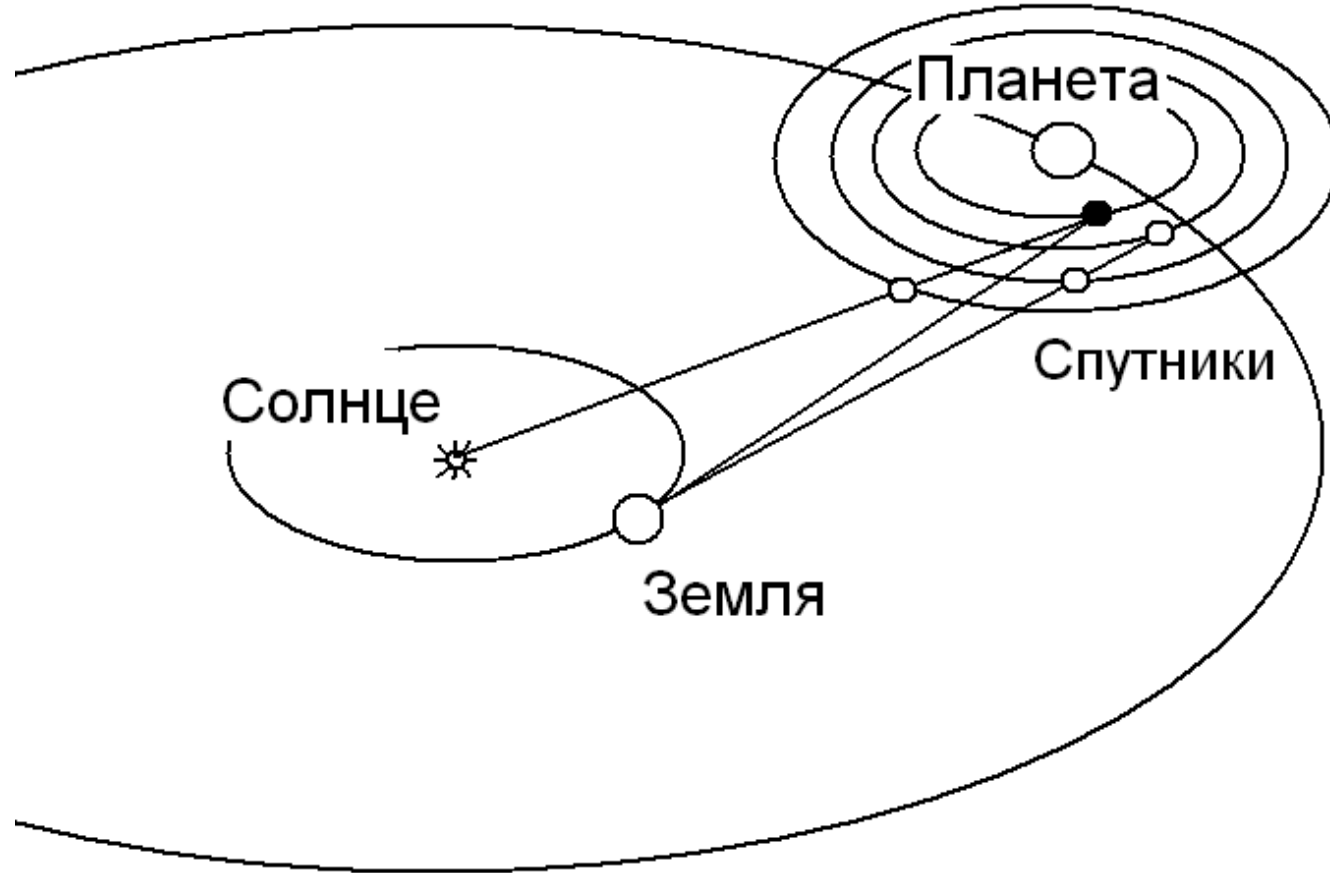
Виден он с Земли только в короткие периоды (две-три недели), когда кольцо Сатурна ориентируется к нам ребром. В 1990 г. была определена орбита.

Когда спустя годы во время видимого исчезновения кольца в 1995 году Прометей увидели с Земли, его планетоцентрическая долгота оказалась на 19 градусов меньше предвычисленной. Однако среднее движение осталось прежним. Прометей «опоздал».



# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Взаимные покрытия и затмения спутников планет

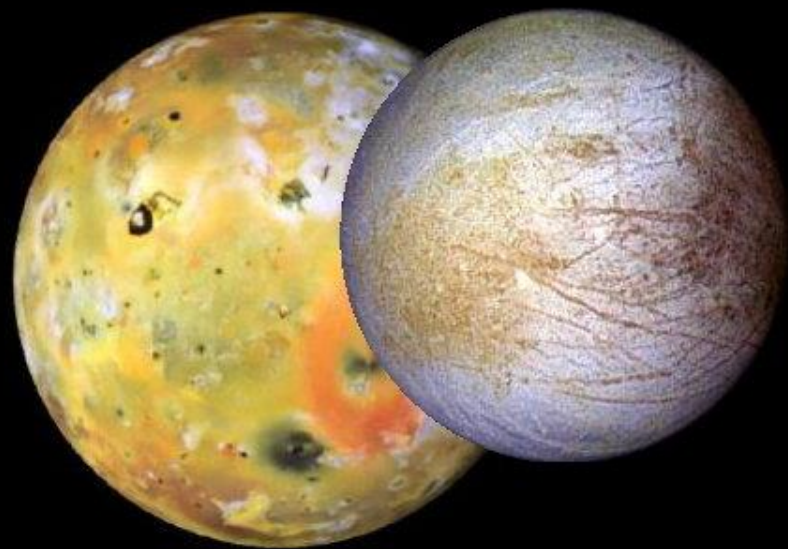










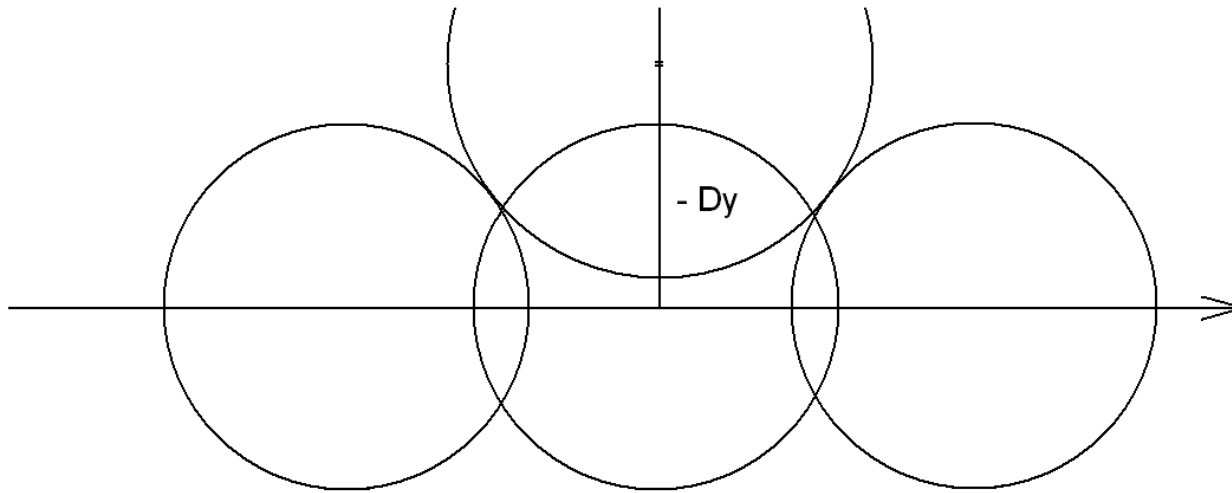




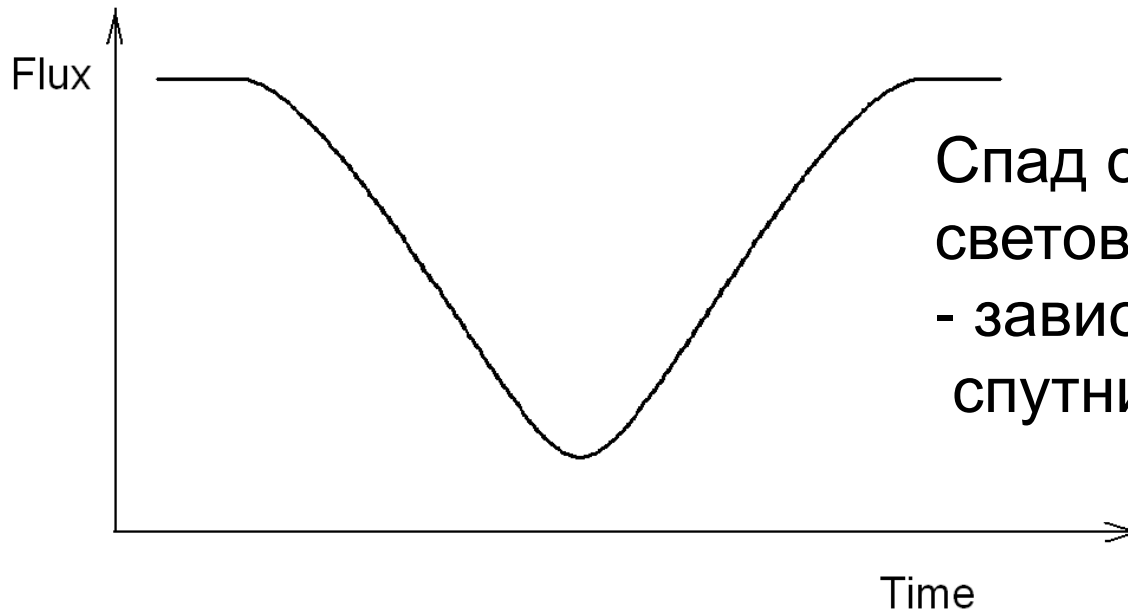


# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Взаимное покрытие спутников планет



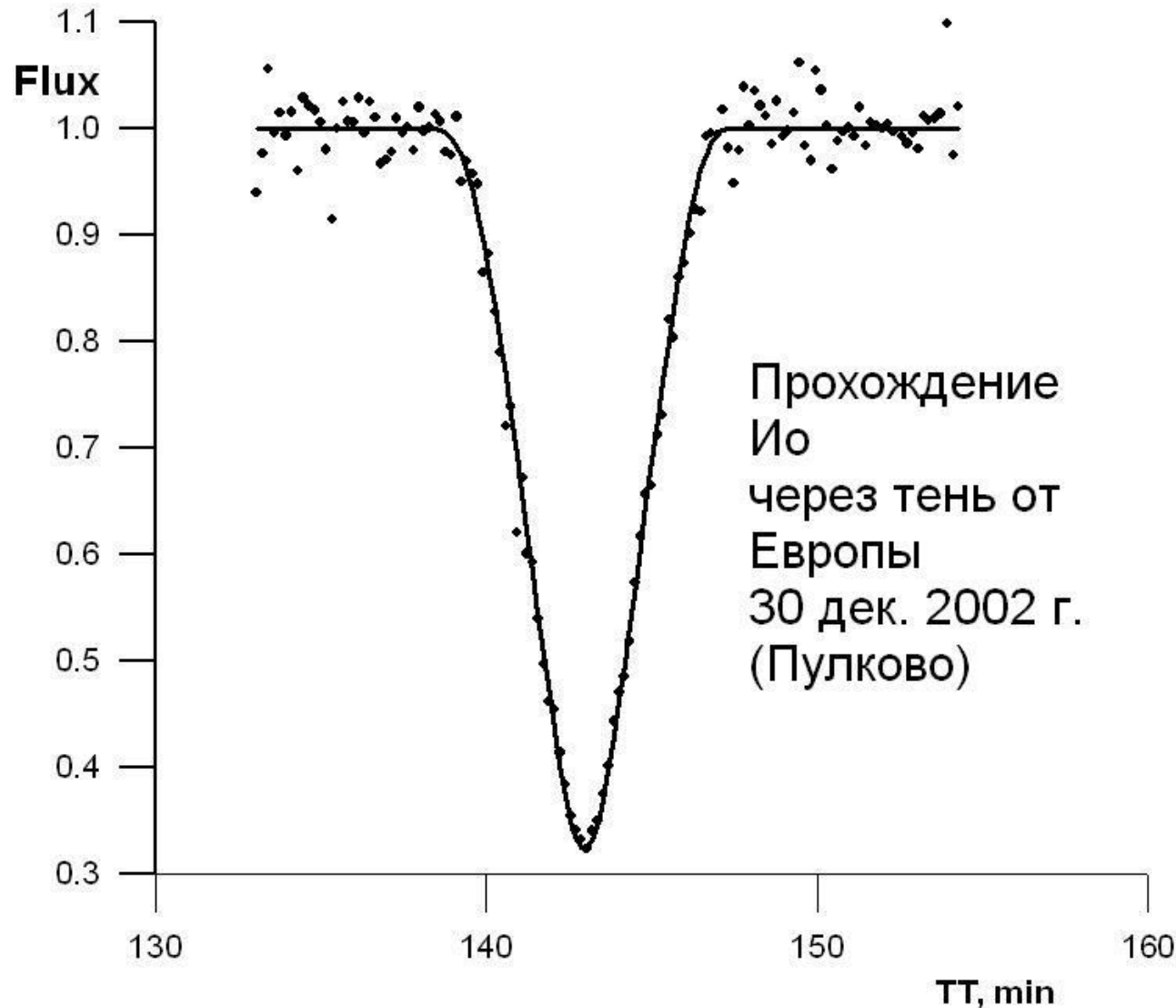
Видимое  
прохождение  
диска одного  
спутника  
по диску другого



Спад суммарного  
светового потока  
- зависит от координат  
спутников

# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Взаимные покрытия и затмения спутников планет



Точность  
астрометрических  
наблюдений  
60 – 120 mas

Точность  
по фотометрии  
взаимных  
явлений  
**10 – 40 mas**



# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Взаимные покрытия и затмения спутников планет

Периоды явлений длительностью в 6 – 9 месяцев повторяются через пол-оборота планеты вокруг Солнца.

Спутники Юпитера : 1997, 2003, 2009, ...

Спутники Сатурна: 1995, 2009, ...

Спутники Урана : 1965, 2007, ...

Длительность каждого явления 5 – 20 минут.

Происходят от 1 до 10 явлений в неделю.

Каждое явление наблюдаемо только на 30% обсерваторий.

## Регулярно проводятся международные кампании фотометрических наблюдений взаимных явлений.

Обработка результатов (получение астрометрических данных)

1995 г. – Акснес (Норвегия), Нуаэль (Франция), Емельянов,

1997 г. – Вазундхара (Индия), Емельянов

2003 г. – Емельянов, 2009 г. – Емельянов,

2015 г. – Емельянов

# План доклада

Состав и размеры Солнечной системы

Силы взаимодействия в Солнечной системе

Основные задачи динамики Солнечной системы

Методы наблюдений тел Солнечной системы

Методы построения модели Солнечной системы

Особенности задач динамики Солнечной системы

Специальные задачи динамики Солнечной системы

**Новые данные о движении тел Солнечной системы**

Где найти данные о движении тел Солнечной системы

## **Новые данные о движении тел Солнечной системы**

- Создана высокоточная модель движения больших планет**
- Закаталогизированы все наблюдавшиеся с Солнечной системе тела, более 700 000, астероиды и спутники планет (определены орбиты, сделан прогноз движения)**
- Уточнены массы больших планет и ряда малых тел**
- Определена форма больших планет и ряда малых тел (спутников и астероидов)**
- Определены параметры вязкости больших планет**
- Открыто свойство вязкости тел некоторых спутников**
- Создан каталог тел, опасно сближающихся с Землей, на период более 100 лет, сделан прогноз движения.**
- Построены модели вращения Земли и Луны**
- Определены параметры гравитационного поля Земли**
- Изучены загадки в Солнечной системе – загадок нет**
- Спроектированы новые космические миссии.**
- Потеряны 12 спутников Юпитера, ранее открытые.**

# План доклада

Состав и размеры Солнечной системы

Силы взаимодействия в Солнечной системе

Основные задачи динамики Солнечной системы

Методы наблюдений тел Солнечной системы

Методы построения модели Солнечной системы

Особенности задач динамики Солнечной системы

Специальные задачи динамики Солнечной системы

Новые данные о движении тел Солнечной системы

**Где найти данные о движении тел Солнечной системы**

# Где найти данные о движении тел Солнечной системы

## Основные Научные центры по разработке моделей движения тел Солнечной системы и эфемерид

### **Jet Propulsion Laboratory (NASA, USA)**

- планеты, астероиды, кометы, спутники планет, вращение Земли и Луны

(<http://www.jpl.nasa.gov/>)

### **Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (Paris, France)** – планеты, спутники планет

([www.imcce.fr](http://www.imcce.fr))

### **Minor Planet Center (USA)** - астероиды, кометы,

Полный набор сведений, включая эфемериды

(<http://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>)

### **Институт прикладной астрономии (С.-Петербург)**

– планеты, вращение Луны

(<http://iaaras.ru/>)

**Государственный астрономический институт  
им. П.К.Штернберга МГУ**

Отдел небесной механики

**Построены оригинальные модели движения всех (107)  
далеких спутников планет (Емельянов, 2004)**

- численное интегрирование уравнений движения
- уточнение параметров движения на основе всех опубликованных в мире наблюдений
- эфемериды, предоставляемые на web-страницах через интернет.
- регулярное обновление по мере появления новых наблюдений и открытия новых спутников

Служба  
естественных  
спутников планет

Домашние  
страницы

[English](#) [Français](#)

Небесная  
механика



[Гос. астрон.  
институт им.  
Штернберга](#)

[Московский  
университет](#)



Другие  
страницы

[Астрономическое  
отделение  
Физфака МГУ](#)

[Физический факультет  
МГУ](#)

[Российский фонд  
фундаментальных  
исследований](#)

[Российская академия](#)

| Служба естественных спутников планет              | Service de satellites naturels                           | Natural satellites service                         |
|---|--|--|
| Русский Russian Russe                             | En français  | In English   |
| <a href="#">Базы данных</a><br>IAU/IMCCE/ГАИШ МГУ | <a href="#">Bases de données (NSDC)</a><br>UAI/IMCCE/SAI | <a href="#">Data bases (NSDC)</a><br>IAU/IMCCE/SAI |
| <a href="#">Эфемериды</a><br>ГАИШ МГУ/IMCCE       | <a href="#">Ephémérides</a><br>IMCCE/SAI                 | <a href="#">Ephemerides</a><br>IMCCE/SAI           |

Служба поддерживается и сопровождается совместно:

- Институтом небесной механики и вычисления эфемерид (IMCCE), Париж, Франция
- Отделом небесной механики ГАИШ МГУ

Cette service est entretenu en collaboration par :

- Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (IMCCE), Paris, France
- Institut d'Astronomie Sternberg (SAI), Université Moscou, Russie

Service is maintained in collaboration by :

- Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (IMCCE), Paris, France
- Sternberg Astronomical Institute (SAI), Moscou University, Russia

Вариант службы на сайте  
Института небесной  
механики и вычисления  
эфемерид (IMCCE),  
Париж, Франция  
Version sur le site de /  
Variante on the site of :  
Institut de Mécanique  
Céleste et de Calcul des  
Ephémérides (IMCCE)

| Service de satellites naturels                           | Natural satellites service                         |
|--|--|
| En français  | In English   |
| <a href="#">Bases de données (NSDC)</a><br>UAI/IMCCE/SAI | <a href="#">Data bases (NSDC)</a><br>IAU/IMCCE/SAI |
| <a href="#">Ephémérides</a><br>IMCCE/SAI                 | <a href="#">Ephemerides</a><br>IMCCE/SAI           |

См. также [Справочник по естественным спутникам планет](#) Уральской В.С.



[Служба  
естественных  
спутников планет](#)

**Домашние  
страницы**

[English](#) [Français](#)

[Небесная  
механика](#)

77



[Гос. астрон.  
институт им.  
Штернберга](#)

[Московский  
университет](#)



**Другие  
страницы**

[Астрономическое  
отделение  
Физфака МГУ](#)

[Физический факультет  
МГУ](#)

[Российский фонд  
фундаментальных  
исследований](#)

[Российская академия](#)

Добро пожаловать  
в Центр данных естественных спутников планет  
Welcome to the Natural Satellites Data Center service

Служба обеспечивает данными по всем спутникам планет (кроме Луны)  
This service provides data on Natural Planetary Satellites (except the Moon)

[Français](#) | [English](#)

► Предлагаются следующие базы данных :

- [Наблюдения](#) | [Представление](#) | [Описание](#)
- [Библиография](#)
- [Физические параметры](#)

[Авторы](#)

► См. также [ЭФЕМЕРИДЫ](#)

Ссылки на другие сайты, связанные с естественными спутниками планет :

- [IAU Working Group on Natural Planetary Satellites](#)
- [IAU Commission 20](#)
- [IAU MPC](#)

[Другие сайты](#)





[Служба естественных спутников планет](#)

**Домашние страницы**

[English](#) [Français](#)

[Небесная механика](#)

77



[Гос. астрон. институт им. Штернберга](#)

[Московский университет](#)



**Другие страницы**

[Астрономическое отделение Физфака МГУ](#)

[Физический факультет МГУ](#)

[Российский фонд фундаментальных исследований](#)

[Российская академия наук](#)

[Наблюдения](#)

[Эфемериды](#)

[Библиография](#)

[Параметры](#)

[Ссылки в интернете](#)

## Служба естественных спутников планет. Эфемериды MULTI-SAT.

[Français](#) | [English](#)

[Базы данных](#)

### Эфемериды с постоянным шагом по времени

[Марс](#)

[Юпитер<sub>i</sub>](#)

[Юпитер<sub>o</sub>](#)

[Сатурн](#)

[Уран](#)

[Нептун](#)

[Плутон](#)

### Эфемериды для таблицы моментов и (O-C) для наблюдений

[Марс](#)

[Юпитер<sub>i</sub>](#)

[Юпитер<sub>o</sub>](#)

[Сатурн](#)

[Уран](#)

[Нептун](#)

[Плутон](#)

### Картинка видимой конфигурации системы спутников

[Марс](#)

[Юпитер<sub>i</sub>](#)

[Юпитер<sub>o</sub>](#)

[Сатурн](#)

[Уран](#)

[Нептун](#)

[Плутон](#)

- [Поиск моментов максимальной элонгации спутников](#)
- [Поиск взаимных покрытий и затмений спутников и затмений планетой](#)

[| Что это такое? |](#)

[| Инструкции |](#)

[| Номенклатура спутников |](#)

[| Авторы](#)

### Специальные эфемериды :

- Эфемериды взаимных покрытий и затмений спутников [Юпитера](#) , [Сатурна](#) и [Урана](#) (в 2006-2010)
- Эфемериды специальных наблюдений соорбитальных спутников [Сатурна](#) в инфракрасном свете (на английском языке)

**Конец доклада**



**Спасибо за внимание**

## Дополнительные сведения

**Основные Научные центры по разработке моделей движения тел Солнечной системы и эфемерид**

**Jet Propulsion Laboratory (NASA, USA)**

- планеты, астероиды, кометы, спутники планет

**Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (Paris, France)** – планеты, спутники планет

**Minor Planet Center (USA)** - астероиды, кометы

**Институт прикладной астрономии (С.-Петербург)**

– планеты

**Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга МГУ** – спутники планет



# Основные задачи динамики Солнечной системы

## Устойчивость Солнечной системы

Триста лет упорной работы так и не увенчались желанным результатом.

Солнечная система может быть устойчива, а может быть и нет. Но если она и неустойчива, то распадается чрезвычайно медленно (Лагранж, Пуассон, Меффруа).

Взаимные наклоны орбит больших планет и их эксцентриситеты изменяются мало и медленно, если мало изменяются большие полуоси орбит (Лаплас).

В резонанс небесные тела могут попасть только в итоге долгой эволюции планетных систем.

По близости орбиты к резонансной можно оценить возраст небесного тела.

# Методы наблюдений тел Солнечной системы

Для динамики небесных тел нужны их координаты  $x, y, z$   
и компоненты скорости  $V_x, V_y, V_z$

При наблюдениях никогда не измеряются  
координаты.

Координаты - это **абстрактные** величины.

В процессе наблюдений измеряются

**реальные** «измеряемые величины»  $\xi$

- некоторые функции, зависящие от координат  
и компонент скорости.



# Особенности задач динамики Солнечной системы

**Свойства наблюдений небесных тел для задач небесной механики.**

Для построения модели движения любого небесного тела всегда стараются использовать набор всех существующих в мире наблюдений, начиная с момента открытия этого небесного тела.

Продолжение наблюдений небесных тел (в том числе наземных) даже прежней точностью оказывается полезным.

Преимущества одних наблюдений по сравнению с другими определяются не только их точностью, но также длиной интервала времени, на котором они выполнены.

Любые новые наблюдения, даже более точные, почти всегда используются только как дополнение к уже существующей базе данных.

# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Использование искусственных спутников Земли

Модель  
движения  
ИСЗ

- проблемы :

Торможение в верхних слоях атмосферы.

Проблема в том, что плотность атмосферы зависит от координат и от времени совершенно непредсказуемым образом.

Давление света от Солнца. Нужно знать ориентацию спутника.

Проблема возникает в моменты, когда спутник выходит из тени. Система ориентации начинает "судорожно" искать Солнце. В эти моменты ориентация спутника, освещенного Солнцем, непредсказуема.

# Специальные задачи динамики Солнечной системы

Поведение Солнечной системы на десятках миллионов лет.

**Лаплас, Лагранж** : эксцентриситеты и наклоны орбит испытывают лишь небольшие колебания с периодами от десятков тысяч до 2 млн лет.

**Жак Ласкар (Париж)** : Решение (методами численного интегрирования) совместной системы уравнений орбитального и вращательного движения планет с учетом их формы и вязко-упругих свойств на интервале времени до 100 млн лет в прошлое.

**Результаты:** Эксцентриситеты орбит испытывают небольшие колебания относительно их нынешних значений.

Для Земли получается удивительная стабильность угла наклона оси вращения к плоскости орбиты вблизи значения 23 град.



# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Определение масс астероидов

### Зачем это нужно :

- Массы астероидов, как часть информации о происхождении и эволюции Солнечной системы
- Точность теории движения Марса ограничивается неопределенностью масс астероидов

### Что имеем :

- Первое определение массы астероида Веста в 1968 г.
- Только для 20-ти астероидов определены массы к настоящему времени

### Как определять массы :

- По наблюдениям движения спутников астероидов  
– *это возможно только для нескольких небольших астероидов, имеющих спутники.*
- По наблюдениям отклонений траекторий астероидов из-за их взаимного притяжения  
– более перспективно.

# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Определение масс астероидов

### В чем проблемы :

- Нужны наблюдения с точностью 0.05 сек. дуги
- Эффект взаимных возмущений должен накопиться.

### Следствия:

- необходимо использовать старые наблюдения (менее точные)
- нужно продолжать наблюдения как можно дольше

### Очевидные особенности :

- Нужны наблюдения определенных астероидов в определенные отрезки времени продолжительностью около 1 месяца.
- Эти эпохи наблюдений для каждого астероида разделены временем в несколько лет ( 3 – 20 лет).
- Чем больше полный интервал наблюдений, тем лучше.
- Космические телескопы *не могут охватить* большие интервалы времени.

# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Определение масс астероидов

### Выводы :

- Нужно обязательно комбинировать высокоточные космические наблюдения с наземными наблюдениями:
  - высокую точность космических наблюдений
  - с большим интервалом наземных наблюдений
- Нужны эфемериды : в какой месяц какие астероиды наблюдать
- Нужна международная программа наблюдений

## Поиск двойных астероидов

### Зачем это нужно :

- это поможет в понимании происхождения семейств астероидов
- это поможет в понимании влияния  
столкновительных эффектов на эволюцию астероидов
- это даст новые знания морфологии и физических  
характеристик астероидов, в частности, их массы, плотность  
и физический состав

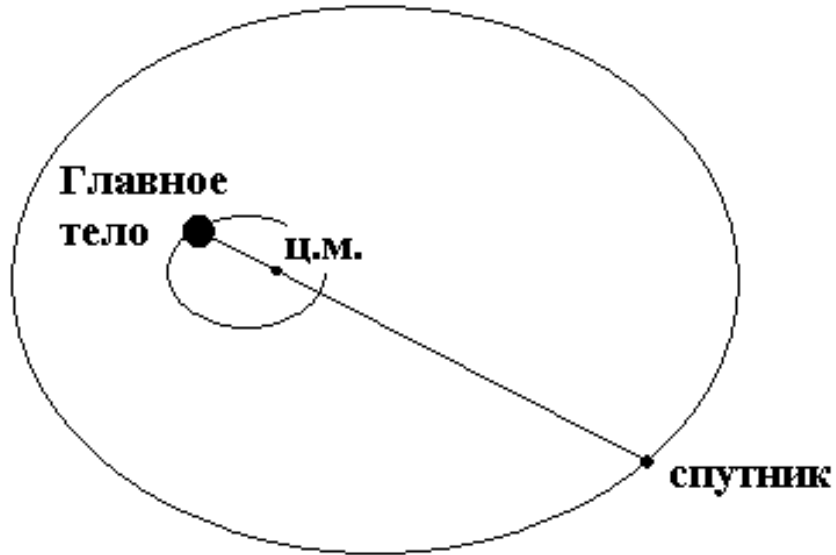
### Способы детектирования двойственности :

- по наблюдениям кривых блеска – *маловероятно!*
- по наблюдениям покрытий звезд астероидами – *редко!*
- по наблюдениям с космических аппаратов – *дорого!*

# Специальные задачи динамики Солнечной системы

## Поиск двойных астероидов

Предложен новый способ детектирования спутника у астероида (Thuillot W. 2003)



Метод основан на эффекте колебаний изображения большего тела из-за орбитального движения спутника

**Спутник невидим (слишком мал)**

**Главное тело колеблется (дрожит)**

**Предложение – применить спектральный анализ зависимости координат от времени, чтобы детектировать этот сигнал.**

## Поиск двойных астероидов

### Для этого нужно:

- хорошее отношение сигнал / шум
- хорошее качество астрометрических наблюдений
- хорошее покрытие явления наблюдениями по времени

### Как это делать:

Искать периодический сигнал в величинах “О-С” Фурье анализом.

Необходимо вовлечение большего числа обсерваторий для обеспечения более продолжительных и более плотных по времени наблюдений.

**Нужна работа по международной программе !**