

АСТЕРОИДЫ

Определения

Астероид (до 2006 года синоним — **малая планета**) — относительно небольшое небесное тело Солнечной системы, движущееся по орбите вокруг Солнца. Астероиды значительно уступают по массе и размерам планетам, имеют неправильную форму и не имеют атмосферы, хотя при этом и у них могут быть спутники. Входят в категорию малых тел Солнечной системы. Точное определение термина «астероид» до сих пор не установилось.

Главный параметр, по которому проводится классификация, — размер тела. Астероидами считаются тела с диаметром более 30 м, тела меньшего размера называют метеороидами.

Малая планета (или планетоид) — небесное тело, движущееся по орбите вокруг Солнца и не классифицированное ни как планета ни как комета.

К малым планетам относятся карликовые планеты и астероиды, а не входят в их число кометы и тела с диаметром менее 30 м — метеороиды. Термин не является официальным, в отличие от терминов «планета», «карликовая планета» и «малые тела Солнечной системы». Само же понятие «малая планета» включает в себя карликовые планеты, астероиды, кентавры и различные транснептуновые объекты. Каталогизацией таких объектов занимается [Центр малых планет](#), и, открыто 120907 таких объектов.

Планеты отличаются большими размерами и сферической формой. Но есть и ещё один признак – планеты доминируют на своих орбитах. Действительно, вблизи орбиты Юпитера, Земли, Меркурия и прочих планет нет ни одного относительно массивного тела, также вращающегося вокруг Солнца. Если какое-либо тело занимает орбиту планеты, то оно под воздействием ее гравитации либо упадет на планету, либо станет ее естественным спутником.

Орбиты же астероидов могут проходить очень близко друг к другу, пересекаться. А минимальное расстояние между астероидами, найденное нами, составляет примерно в 1000 км (два тела с диаметрами до 10 км)

Карликовых планет

По определению Международного астрономического союза, карликовые планеты – это небесные тела сферической формы, вращающиеся вокруг Солнца. Их «карликовость» объясняется малой массой и отсутствием гравитационной доминанты. Последнее означает, что на орбите такого объекта постоянно присутствуют мелкие небесные тела. Плутон, так и Эрида, Хаумеа и Макемаке, Церера.

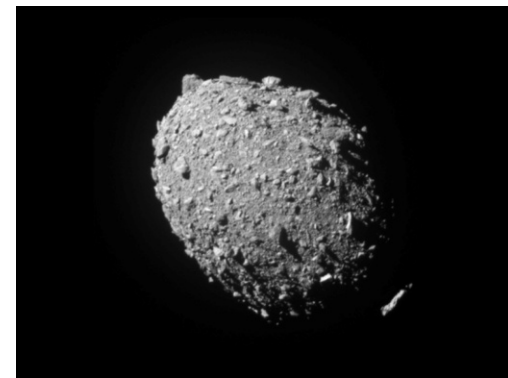
Можно выделить несколько групп вопросов

1. Разделение по 'внешнему виду': одиночные астероиды, кратные, с пылевыми кольцами, активные астероиды.
2. Динамика орбит: наблюдения, параметры орбит, разнообразие орбит, разделение на группы
3. Физика астероидов: размеры, вращение, состав
4. Происхождение и эволюция
5. Исследование с помощью космических аппаратов

Кометы проявляют активность
Особенности орбит: $T_j < 3.08$
 $N > 4\ 000$

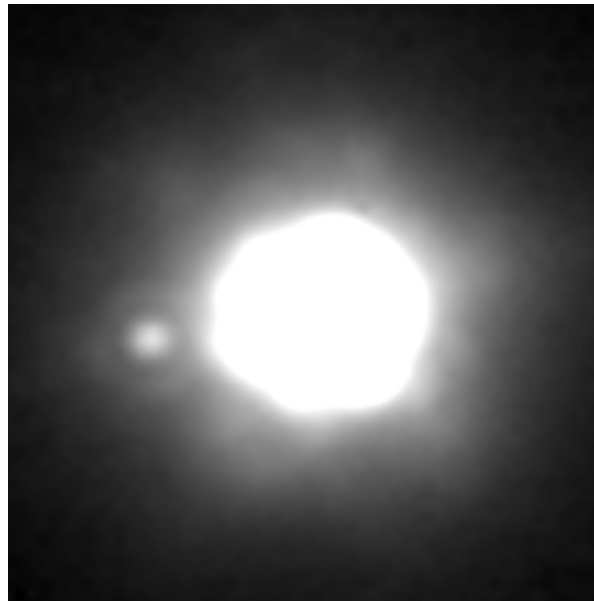
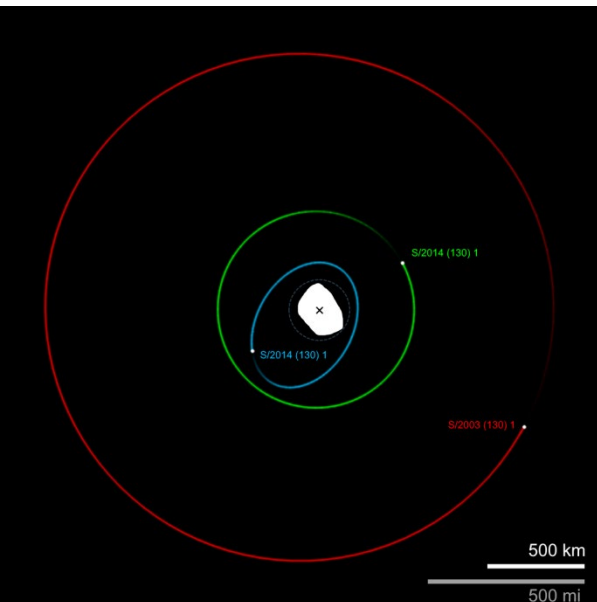


Астероиды – твердые, каменные, инертные,
безатмосферные тела
Особенности орбит: $T_j > 3.08$
 $N > 1\ 200\ 000$



Кратные астероиды

- 495 астероидов и ТНО являются кратными:
479 – 1 спутник, 14 – 2 спутника, 1 – 3 спутника, 1 (Плутон) – 5 спутников.
- 130 Электра (199 км) – 3 спутника - 6, 2 и 1.5 км на расстоянии 1300, 498 и 345 км
- 762 Пулкова (137 км) – спутник 15 км на расстоянии 800 км
- 243 Ида (32 км) – спутник 1.4 км (КА Галилео)



Методы исследований астероидов, направленные на поиск у них спутников:

- оптический - прямые оптические наблюдения с помощью космических и наземных телескопов с адаптивной оптикой;

Оптический метод является самым очевидным, однако оптические наблюдения позволяют выявлять небольшое количество спутников, имеющих достаточно крупные размеры относительно астероида, и находящихся на значительном расстоянии от него.

- радиолокационный - с помощью космических и наземных радиотелескопов;

Недостаток радиолокационного метода заключается в малом радиусе действия. С увеличением расстояния до исследуемого объекта точность данных существенно снижается.

- фотометрический – анализ световых кривых (звездная величина – время)

- покрытие звезд астероидами - крупный спутник, значительное расстояние между телами

- пролет КА

Исследования с помощью КА являются наиболее точными благодаря близкому расстоянию.

Происхождение спутников

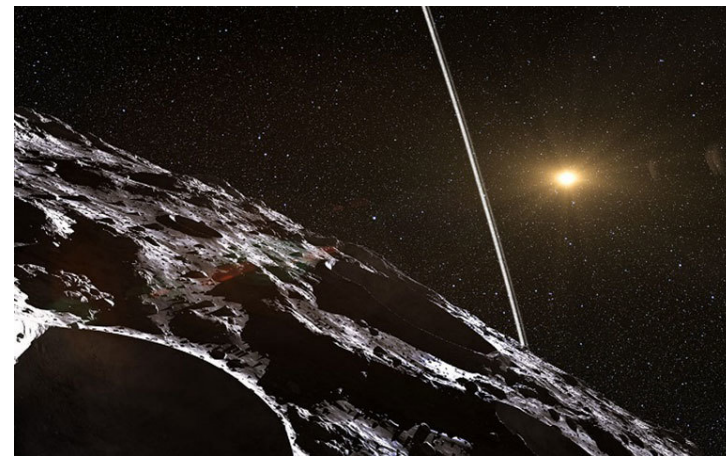
1. Спутники могут быть остаточным продуктом столкновения астероида с иным объектом.
2. Захват малого объекта более крупным.
3. Спутники у астероидов сформировались на начальной стадии эволюции Солнечной системы.

Кольца у астероидов

Кольца есть у Юпитера – Плутона, у астероидов Харикло и Хирона, карликовых планет Хаумеи и Квавара, а также гипотетически, у спутника Сатурна Реи.

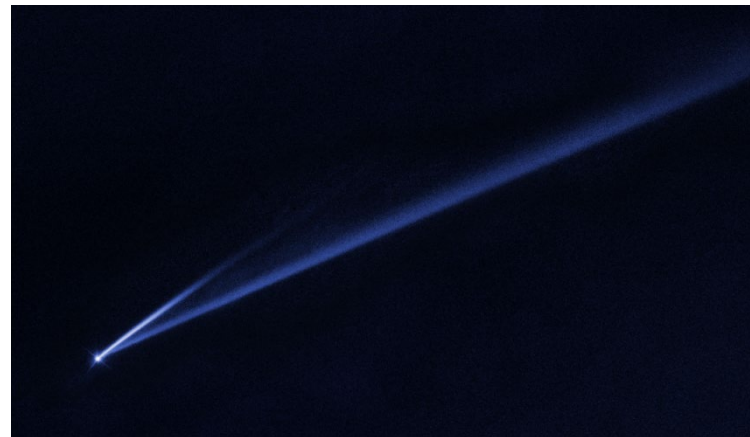
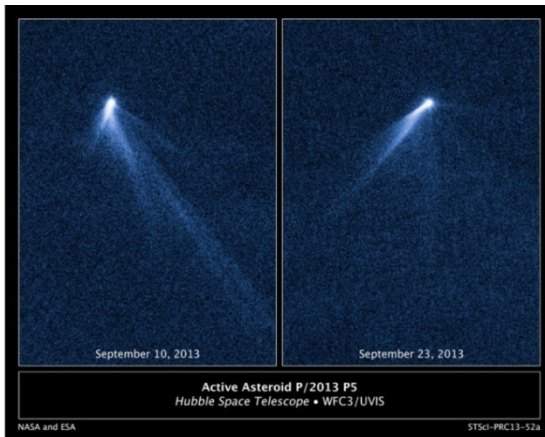
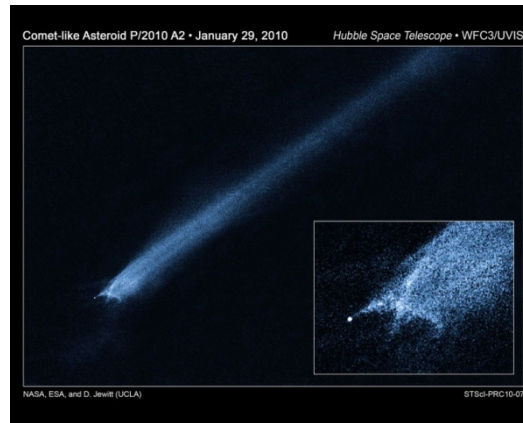
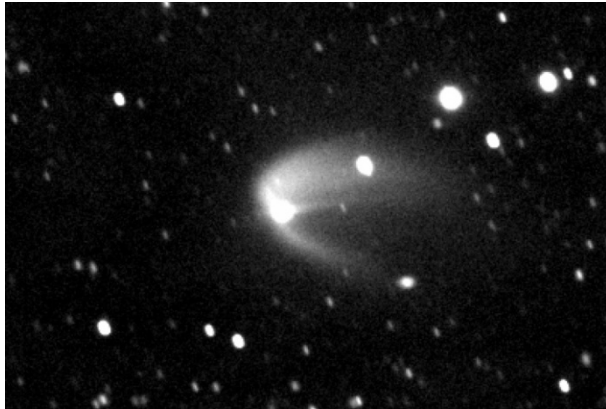
Плотное кольцо открыто у транснептунового объекта (50000) Кварар.

Покрытие звезды UCAC4 248 – 108672 кентавром (10199) Харикло ($d=250\text{км}$) в 2013 г. позволило установить, что у Харикло есть 2 кольца, шириной около 7 км и 3 км и на расстоянии 9 км друг от друга. Радиусы колец 396 и 405 км. Харикло является одним из наименьших объектов, у которых были открыты кольца.



Активные астероиды

- Малые тела на астероидных орбитах, но с непериодическими и не связанными с положениями на орбите проявлениями активности (комы, хвосты, вспышки яркости). Несколько десятков. Двойные обозначения.
- Причины – столкновения, наличие льдов под поверхностью, вращательная неустойчивость, разрушение слабо связанных фрагментов тела (модель 'rubble pile' – куча щебня)



Дамоклоиды

- Малые тела солнечной системы, имеющие орбиты, аналогичные орбитам комет по параметрам (большой эксцентриситет и наклон к плоскости эклиптики), но не проявляющие кометной активности в виде комы или кометного хвоста. Несколько сотен.
- Название дамоклоиды получили по имени первого представителя класса — астероида (5335) Дамокл.

Наблюдения. Орбиты.

Позиционные наблюдения (фотопластинки, ПЗС-наблюдения) – определение координат (альфа, дельта) и наблюдаемой звездной величины в некоторый момент времени. Наземные и с КА.

Радарные наблюдения (запаздывание и доплеровский сдвиг частоты)

Получено наблюдение – отправка в Центр малых планет (The International Astronomical Union Minor Planet Center – MPC)- проверка на принадлежность к имеющимся в каталогах малым телам

- 1) принадлежит, с соответствующей идентификацией заносится в каталог наблюдений этого тела и далее включается в процедуру уточнения орбитальных параметров
- 2) не принадлежит, присвоение обозначения и занесение в каталог новых объектов. Определение предварительной орбиты, если наблюдений ≥ 3 , в этом случае тело получает статус нумерованного астероида.
- 3) Если есть наблюдения тела на достаточно большой дуге, то нумерованное малое тело получает постоянный номер и становится нумерованным.
- 4) Для тел с постоянным номером первооткрыватель имеет право предложить имя, которое утверждается Комитетом по наименованию малых тел. Есть определенные правила для этой процедуры.

В результате - в MPC поддерживаются **каталоги** наблюдений малых тел и параметров их орбит и наблюдений, по которым орбиты пока посчитать невозможно. Эти наблюдения являются важным резервом при уточнении параметров орбит, позволяя в отдельных случаях увеличить интервал наблюдений.

Каталоги пополняются и обновляются ежемесячно.

Особенности этого этапа

1. Технические – большие массивы данных.
2. Вычислительные – численное интегрирование уравнений движения, адекватность модели движения требуемой точности.
3. Определение предварительных орбит по малому числу наблюдений и на коротких интервалах – это важно, для того, чтобы не потерять объект с течением времени.
4. Работа с наблюдениями разной точности, отнесенными к различным системам координат (звездным каталогам). Преодоление систематических и случайных ошибок.

Составляющие модель движения зависят от задачи

Стандартно учитываются гравитационные возмущения от планет.

Барицентр системы Земля-Луна или отдельный учет

Карликовые планеты

Астероиды - проверка необходимости учета

Негравитационные возмущения

Световое давление

зависит от:

расстояния от Солнца

размера астероида

характеристики поверхности

Эффект Ярковского, для тел, с $D < 20-30$ км

суточный и сезонный эффекты, изменяющие параметры орбиты

YORP – изменяет скорость вращения

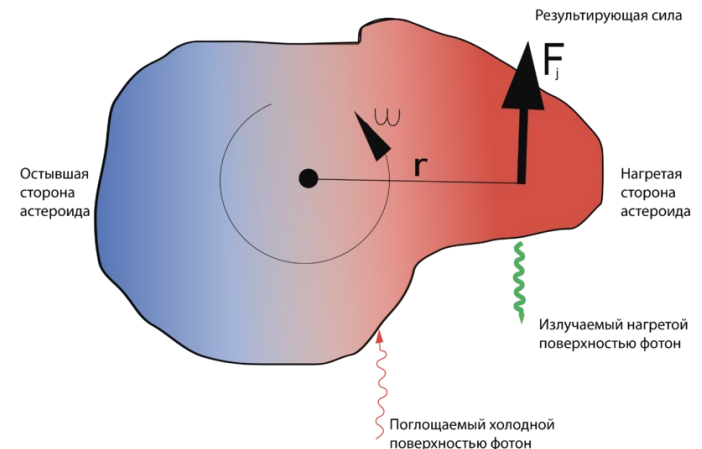
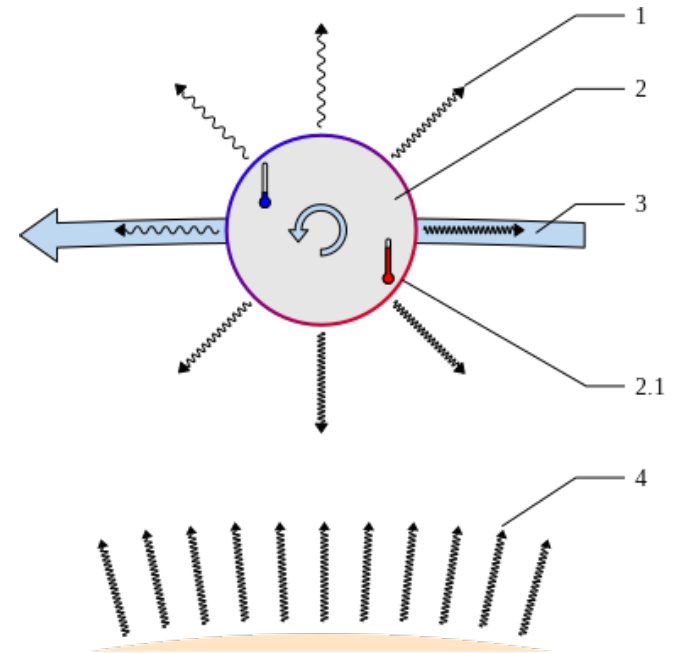
Эффект Ярковского зависит от следующих переменных и параметров:

- расстояние до Солнца,
- наклон оси вращения астероида,
- размер астероида (средний диаметр D),
- форма астероида,
- масса,
- плотность,
- тепловые свойства (тепловая инерция),
- угловая скорость вращения ω .

Полный учет практически невозможен из-за незнания большинства параметров, необходимы упрощения => определяется само ускорение.

Изменение большой полуоси – км за оборот.
Следствия.

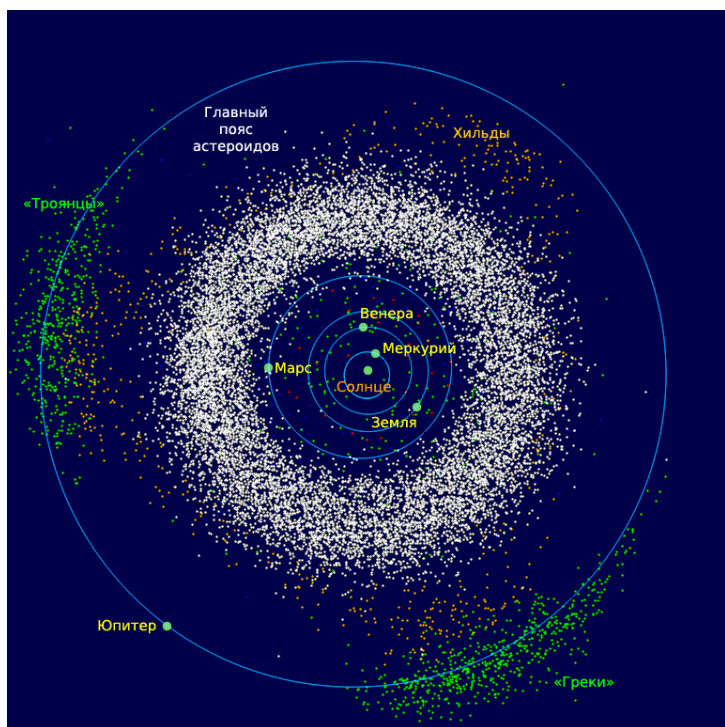
YORP - увеличение скорости вращения для (54509)
на $(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ градуса в день.
Следствия.



Орбиты

Астероиды объединяют в группы на основе параметров их орбит. Это значения больших полуосей (среднее расстояние от Солнца), эксцентриситетов и наклонов плоскостей орбит.

1. Астероиды, сближающиеся с Землей.
2. Главный пояс – между Марсом и Юпитером

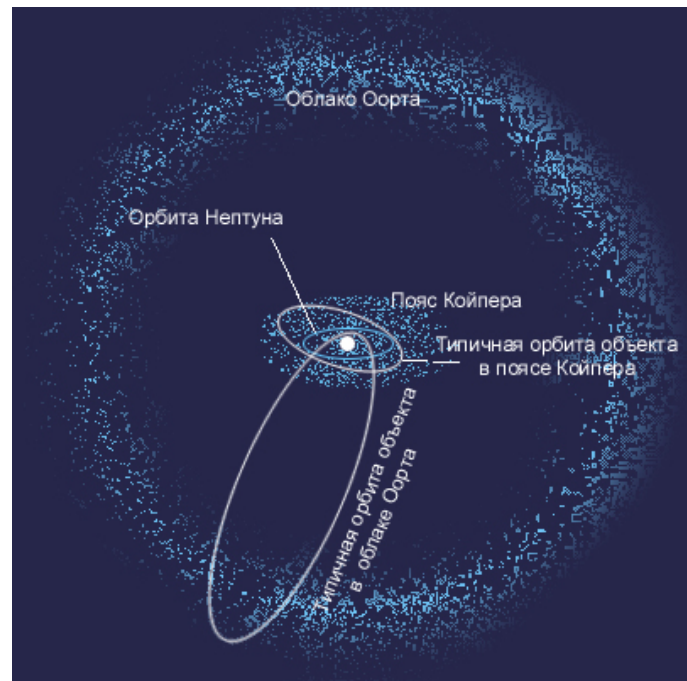
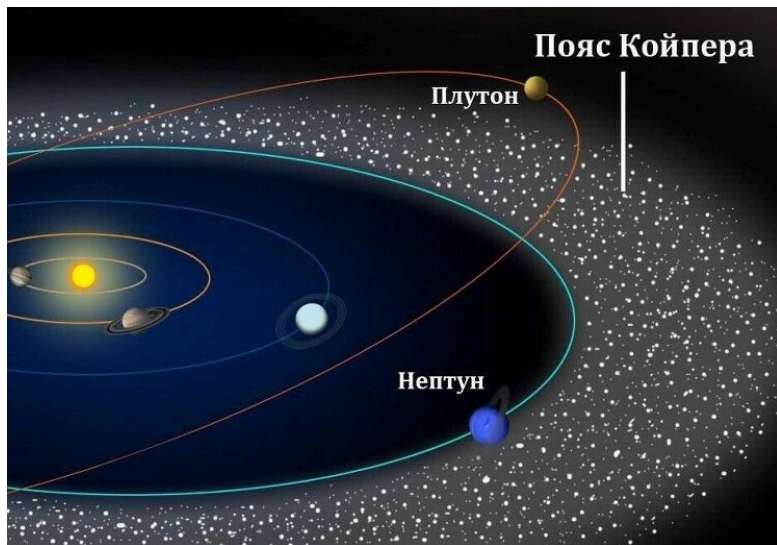


В Главном поясе выделяют области внутреннюю, среднюю и внешнюю.

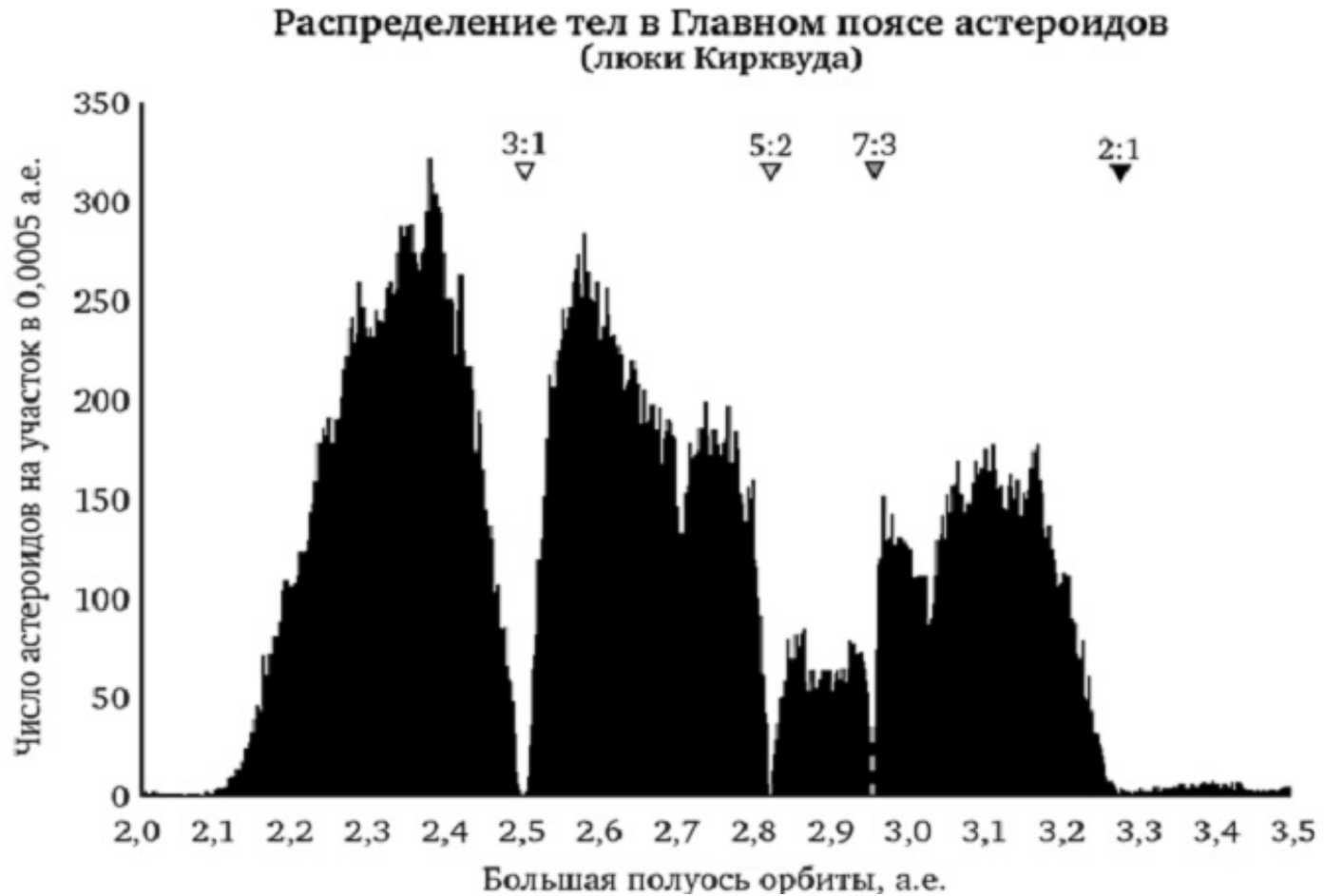
Троянские астероиды — группы астероидов, которые движутся в окрестностях одной из двух точек Лагранжа L4 или L5 системы Солнце—Юпитер. Эти астероиды находятся в резонансе с Юпитером 1:1 и располагаются примерно в 60° впереди (L4) — это греки — или позади (L5) Юпитера — троянцы.

Вторым по численности троянских астероидов является Нептун, у которого открыто девять таких тел, четыре найдено у Марса, и два были обнаружены у Земли.

- Кентавры - между Главным поясом и поясом Койпера.
- Пояс Койпера – за орбитой Нептуна



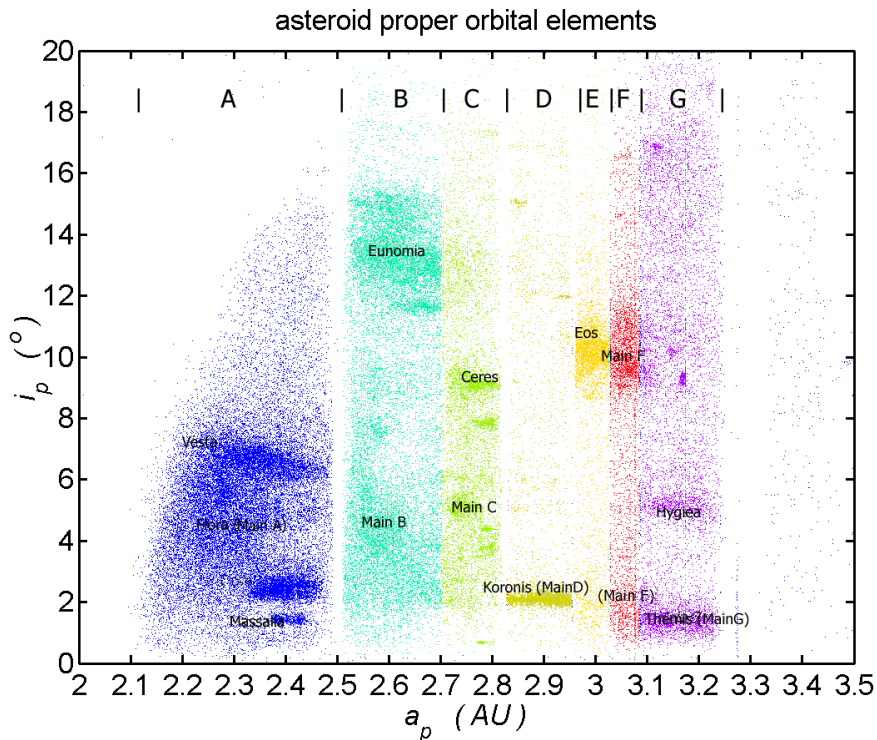
Элементы орбит – большая полуось, эксцентриситет и наклон



Структура Главного пояса

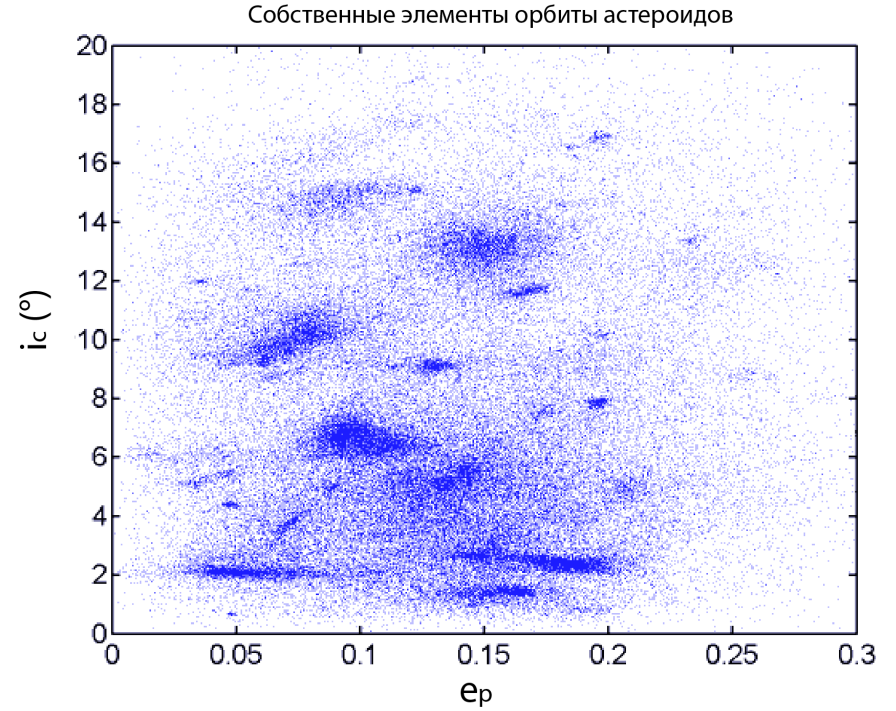
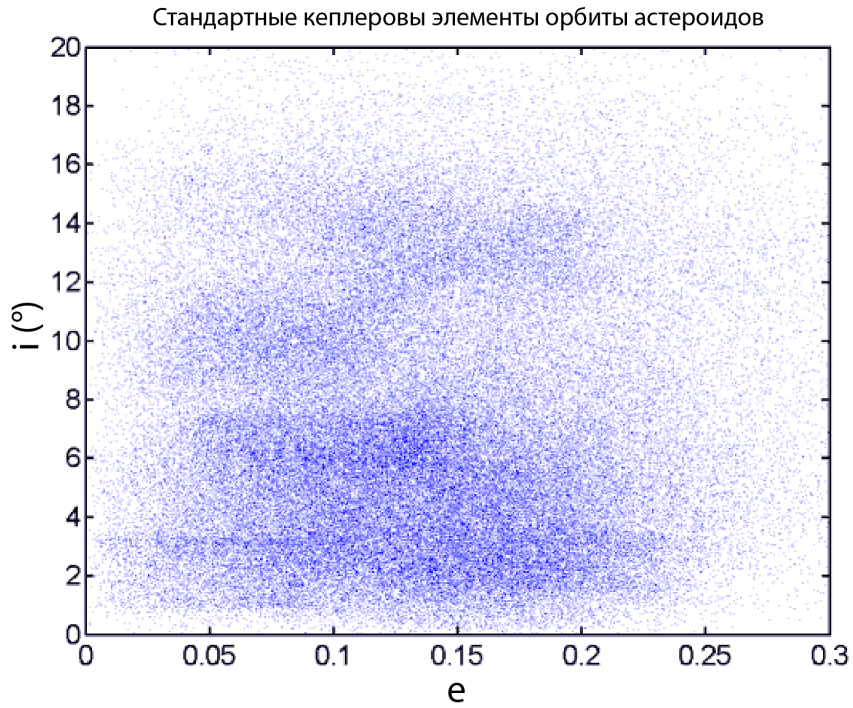
- Щели (люки) Кирквуда — это области в поясе астероидов, в которых практически отсутствуют астероиды из-за резонансного действия Юпитера. Во время каждого сближения астероида с Юпитером, астероид испытывает определённое гравитационное воздействие со стороны планеты. А если речь идёт об орбитальном резонансе (соотношении периодов обращений), то такие сближения происходят регулярно. В результате, гравитационные воздействия происходят со строгой периодичностью и с каждым разом усиливают друг друга, как бы раскачивая астероид на его орбите, что в конце концов приводит к переходу астероида на новую, зачастую сильно вытянутую, орбиту. В результате некоторые значения больших полуосей почти не встречаются среди астероидов. Эти области обозначаются на графике соотношением периодов обращения астероида и Юпитера.
- Таких щелей существует достаточно много, но наиболее крупными являются резонансы 3:1 и 5:2, именно они и являются условными границами, разделяющими пояс астероидов на три части, которые несколько различаются между собой по составу и структуре.

- **Семейство астероидов** — это группа астероидов, которые имеют примерно одинаковые значения собственных элементов орбит - a , e , i . Астероиды, входящие в состав семейства, как правило, являются фрагментами столкнувшихся в прошлом более крупных астероидов, разрушившихся в результате этого столкновения.
- Существуют различные способы вычисления собственных элементов на основе наблюдаемых величин. Для этого сначала составляется модель сил,



действующих на исследуемое тело, производится усреднение элементов орбиты по времени, чтобы избавиться от влияния короткопериодических возмущений, а затем производится вычисление остальных возмущений и вычитание вынужденных элементов из оскулирующих

Оскулирующие элементы и собственные элементы



- Японский астроном К.Хираяма (1874—1943) впервые оценил собственные элементы орбит астероидов и первым в 1918 году выявил пять самых крупных семейств, образовавшихся в результате распада более крупного астероида. Эти пять семейств называют семействами Хираяма (Корониды, Эос, Фемиды, Флоры, Марии).
- Семейства предположительно являются фрагментами столкнувшихся и разрушившихся впоследствии крупных астероидов, причем основное тело может сохраниться или нет.
- Так как астероиды семейства образуются из одного родительского тела, как правило, они все имеют одинаковый состав. Это является дополнительной информацией для выделения семейств.
В случае разрушения обоих тел состав может быть сложным.

- Предварительные оценки возраста различных семейств дают разброс от нескольких миллионов до несколько миллиардов лет. Т.е. срок жизни астероидных семейств составляет порядка одного миллиарда лет и раньше таких семейств могло быть гораздо больше.
- Существует две основные причины распада астероидного семейства: постепенное рассеивание орбит астероидов из-за возмущающего действия гравитации Юпитера и столкновения астероидов между собой, дробление их на более мелкие фрагменты, эффект Ярковского. Отсутствие мелких астероидов является основным критерием определения возраста астероидных семейств. По-видимому, старые семейства потеряли почти все свои мелкие и средние астероиды и состоят лишь из самых крупных астероидов.
- Одним из доказательств большой распространённости семейств в прошлом являются результаты химического анализа железных метеоритов. Они показывают, что когда-то существовали, по крайней мере, от 50 до 100 крупных астероидов, в которых произошла дифференциация недр и которые, будучи разрушенными, послужили источником таких метеоритов.

В настоящее время выделено 81 семейство в Главном поясе и 1 – в поясе Койпера. Самое многочисленное, Флоры, насчитывает более 7000 членов.

Наиболее эффективными алгоритмами являются

«метод иерархической кластеризации», который ищет астероиды с небольшим расстоянием между собой или до основного астероида,

и «метод вейвлет-анализа», который строит диаграмму распределения плотности астероидов и находит концентрации на этой диаграмме

Физика параметры астероидов

Размер тела, масса, плотность –важнейшие характеристики.

Первые измерения диаметров были достаточно приблизительными

Современные способы определения размеров астероидов включают в себя методы [поляриметрии](#), [радиолокационный](#), [спекл-интерферометрии](#), [транзитный](#) и [тепловой радиометрии](#)

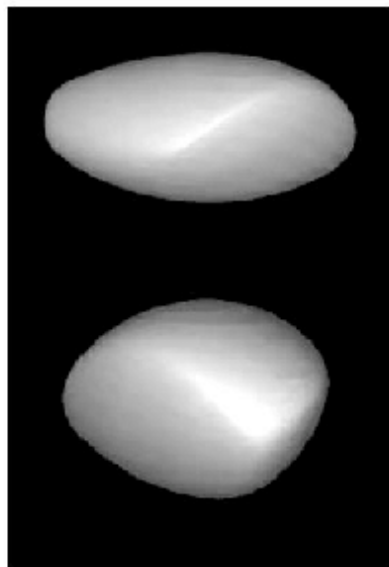
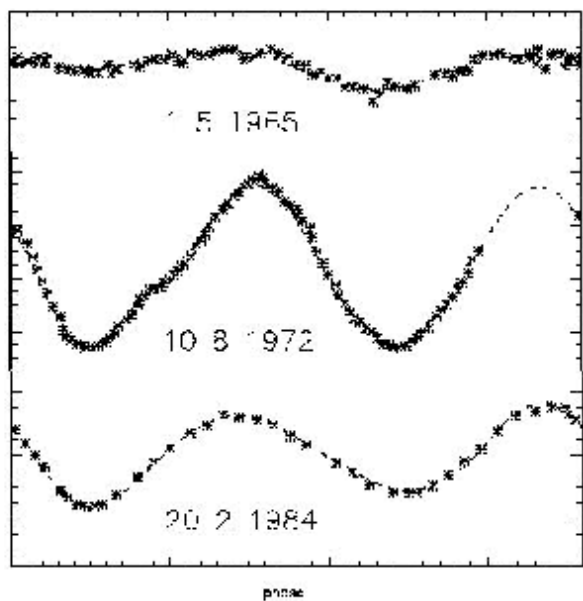
Одним из наиболее простых и качественных является [транзитный](#) метод – покрытие звезды астероидом.

Метод поляриметрии заключается в определении размера на основании яркости астероида. Необходимо знание альбедо, которое также определяется - чем меньше яркость астероида, то есть чем меньше он отражает солнечной радиации в видимом диапазоне, тем больше он её поглощает и, нагреваясь, излучает её затем в виде тепла в инфракрасном диапазоне.

Метод поляриметрии может быть также использован для определения формы астероида путём регистрации изменения его блеска в процессе вращения, как и для определения периода этого вращения, а также для выявления крупных структур на поверхности.

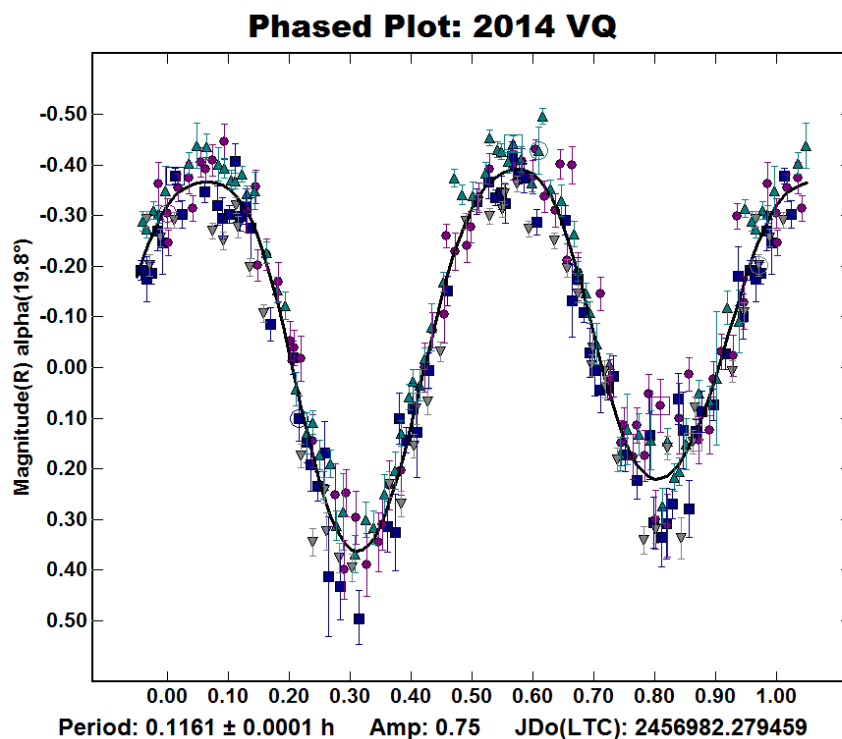
Кроме того, результаты, полученные с помощью инфракрасных телескопов, используются для определения размеров методом тепловой радиометрии.

Метод поляриметрии может быть также использован для определения формы астероида путём регистрации изменения его блеска (световых кривых) в процессе вращения, как и для определения периода этого вращения, а также для выявления крупных структур на поверхности.



Kaasalainen et al. Icarus 159 (2002)

The shape model of 3 Juno, shown at equatorial viewing/illumination geometry, with rotational phases 90° apart.



Массы астероидов

- Астрофизический
Значения плотности (как правило, поверхностных слоев) и размеры.
Необходимо значение альбедо.
- Динамический метод – оценка по гравитационным возмущениям совместно с уточнением параметров орбит
 1. Два астероида
 2. Астероид и космический аппарат
 3. Двойной астероид
- Для реализации п.1 необходима большая подготовительная работа – поиск достаточно тесных сближений между астероидами. Сначала оценка с использованием значений MOID, затем поиск реальных сближений.
Необходимы наблюдения по обе стороны от тесного сближения.
(Мы получили минимальное расстояние ~ 1000 км между двумя 10-км астероидами)

2. Массы астероидов определялись по оказанным ими возмущениям на КА вблизи Марса и других планет. Эта процедура была включена в рассмотрение при построении динамических эфемерид DE, ERA, INPOP.

При пролетах КА вблизи астероидов по изменениям траектории КА.

3. Двойной астероид

3-ий закон Кеплера позволяет оценить массу системы, если известны период и большая полуось

$$P^2 = 4 \pi^2 a^3 / (G(M+m))$$

Сравнение точностей ...

На данный момент выделено 3 основных класса астероидов, в зависимости от химического состава метеоритов:

- [Класс C](#) — на основе метеоритов с высоким содержанием углерода
- [Класс S](#) — на основе каменных метеоритов
- [Класс M](#) — на основе железных метеоритов

Существуют астероиды и других, более специфических классов, но их содержание в поясе крайне незначительно.

В отличие от нескольких астероидов с измеренной плотностью, плотность остальных астероидов является предполагаемой. Расчёты показывают средние плотности для астероидов C, S, и M класса соответственно 1.38, 2.71, и 5.32 г/см³

Средняя плотность Земли – 5.52 г/см³, горных пород земной коры 2.8 г/см³

Углеродистые астероиды класса C, названные так из-за большого процента простейших углеродных соединений в их составе, являются наиболее распространёнными объектами в главном поясе, на них приходится 75% всех астероидов, особенно большая их концентрация характерна для внешних областей пояса.

Эти астероиды имеют слегка красноватый оттенок и очень низкое альбедо (между 0,03 и 0,0938), т.е. отражают очень мало солнечного света и их труднее обнаружить.

Их спектры соответствуют спектру вещества, из которого формировалась Солнечная система, за исключением летучих элементов. По составу они очень близки к углеродистым хондритным метеоритам, которые находят на Земле.

Вторым по распространённости спектральным классом среди астероидов главного пояса является класс S, который объединяет силикатные астероиды внутренней части пояса, располагающиеся до расстояния 2,5 а. е. от Солнца. Спектральный анализ этих астероидов выявил наличие в их поверхности различных силикатов и некоторых металлов (железо и магний), но практически полное отсутствие каких-либо углеродных соединений. Это указывает на то, что породы за время существования этих астероидов претерпели значительные изменения, возможно, в связи с частичным плавлением и дифференциацией. Они имеют довольно высокое альbedo (между 0,10 и 0,2238) и составляют 17% от всех астероидов.

Металлические астероиды класса M, богатые никелем и железом, составляют 10% от всех астероидов пояса и имеют умеренно большое альbedo (между 0,1 и 0,1838). Они расположены преимущественно в центральных областях пояса на расстоянии 2,7 а. е. от Солнца и могут быть фрагментами металлических ядер крупных планетезималей, существовавших на заре формирования Солнечной системы и разрушенных при взаимных столкновениях.

- Как оказалось, в отличие от земных горных пород вещество астероидов в целом выглядит значительно более простым и даже примитивным. Это говорит о том, что физические и химические процессы в нем были не такими разнообразными и сложными, как в недрах планет земной группы. Тогда как на Земле сейчас надежно выделено около 4000 минеральных видов, на астероидах их может быть всего несколько сотен. Об этом можно судить хотя бы по количеству минеральных видов (около 300), найденных в метеоритах — обломках астероидов.
- Большое разнообразие минералов на Земле возникло потому, что наша планета, по сравнению с астероидами, формировалась значительно ближе к Солнцу, а значит, и при более высокой температуре, стимулирующей химические реакции. Существенную роль сыграла и большая масса нашей планеты.

Количество астероидов заметно уменьшается с ростом их размеров и в целом соответствует степенному закону.

D (км)	0.1	0.3	0.5	1	3	5	10	30	50	100	200	300	500	900
N	25	4	2	.75	200	90	10	1.1	600	200	30	5	3	1
	x 1 000 000				x 1000									

Методы исследования астероидов

Наши представления об астероидах пока ограничены весьма общими знаниями о веществе, покрывающем их поверхность. Они основаны на нескольких источниках информации: наземных телескопических наблюдениях в оптическом диапазоне, радиолокационных измерениях, детальных изображениях поверхности нескольких тел, переданных космическими зондами, а также на результатах анализа земных пород и найденных на Земле метеоритов, которые считаются осколками астероидов, ядер комет и поверхностей планет земной группы.

Массовое изучение поверхности малых тел основано на характеристиках отраженного ими солнечного света. В соответствии с формой спектра отраженного света астероиды делят на несколько спектральных типов или классов. Это позволяет разделить огромное количество малых тел на несколько групп с приблизительно одинаковым типом поверхности и даже оценить химико-минералогический состав их вещества. В последнее время возникла необходимость введения подклассов и более мелкого деления спектральных типов для характеристики особенностей отдельных групп астероидов.

Дистанционные оценки состава вещества. Астероиды делят на группы по схожести цвета (его измеряют на небольших телескопах, фотографируя астероиды через светофильтры) или даже по форме спектра (для тусклых астероидов спектральные данные получить сложно — нужны большие телескопы). Затем в каждой группе выводят средние показатели цвета или характеристики спектра и сравнивают их с аналогичными величинами для земных горных пород и минералов, а также для метеоритов из научных коллекций. Подбирая «образцы-аналоги» с похожими цветовыми и спектральными характеристиками, считают, что в первом приближении их химический и минеральный состав соответствует веществу астероидов данного типа.

Фотометрия, спектрофотометрия и поляриметрия – традиционные оптические методы дистанционных исследований твердых небесных тел (ТНТ), как правило, безатмосферных. При наличии у ТНТ даже разреженной атмосферы данные, полученные с применением указанных методов, подвергаются значительным искажениям.

Фотометрия и поляриметрия наиболее эффективны при изучении физических параметров ТНТ (от микро до макромасштаба), а спектрофотометрия (или спектроскопия), позволяет осуществить качественную, а иногда и количественную, оценку состава вещества этих тел.

Первая чисто спектральная классификация астероидов Дэвида Толена была выполнена по данным об отражательной способности примерно 600 астероидов, полученных при их 8-цветном обзоре с помощью последовательных измерений светового потока от каждого объекта в 8 светофильтрах, и позволила сразу выделить 14 спектральных классов этих тел .

С помощью спектральных классификаций Толена и Бас-Бинзела удалось установить соответствие основных особенностей спектров отражения астероидов с их предполагаемой минералогией, и значит, с температурой и другими физико-химическими параметрами условий формирования их родительских тел в ранней Солнечной системе.

Это также позволило изучить строение Главного пояса астероидов по составу вещества

Происхождение и эволюция

Предполагается, что в Солнечной системе может находиться от 1,1 до 1,9 миллиона объектов, имеющих размеры более 1 км.

Считается, что планетезимали в поясе астероидов эволюционировали так же, как и в других областях солнечной туманности до того времени, пока Юпитер не достиг своей текущей массы, после чего вследствие орбитальных резонансов с Юпитером из пояса было выброшено более 99 % планетезималей.

Моделирование показывает, что астероиды диаметром более 120 км образовались в результате аккреции в раннюю эпоху, в то время как меньшие тела являются осколками от столкновений между астероидами во время или после рассеивания изначального пояса гравитацией Юпитера.

Церера и Веста приобрели достаточно большой размер для гравитационной дифференциации, при которой тяжёлые металлы погрузились к ядру, а кора сформировалась из более лёгких скальных пород.

Галилео — 18 октября 1989 года. Пролёт мимо астероидов Гаспра и Ида.



Находясь в поясе астероидов, «Галилео» сблизился с астероидом Гаспра (до 1600 км) и послал на Землю первые снимки, сделанные с близкого расстояния. Возраст 500 млн лет.

Около года спустя «Галилео» прошёл мимо астероида Ида и обнаружил у него спутник, названный Дактилем. Орбиту спутника определить не удалось, но оценена плотность Иды, 2.5 г см^3 , участки поверхности разного цвета и состава.

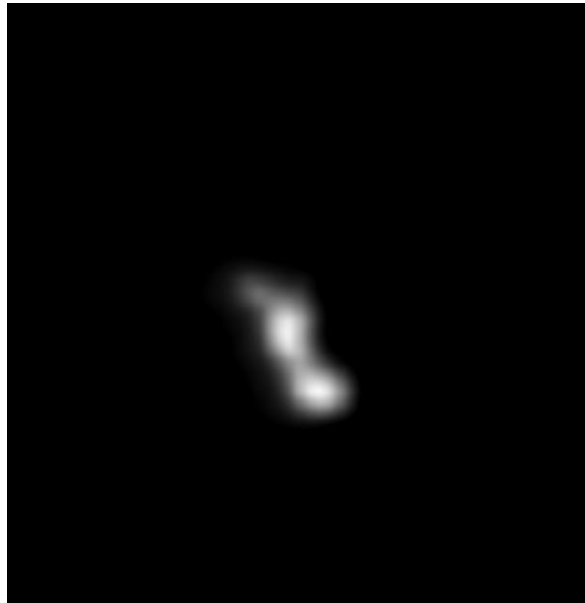
[NEAR Shoemaker](#) — [17 февраля 1996 года](#). Стал первым искусственным спутником астероида, и первым искусственным объектом, совершившим посадку на астероид. По пути к [Эросу](#) аппарат исследовал астероид [Матильда](#). «NEAR Shoemaker» в целом проработал немногим более пяти лет, в том числе около одного года на орбите Эроса.



Достигнув Эроса, аппарат NEAR Shoemaker смог передать большое количество данных об этом астероиде. Этим аппаратом было передано более тысячи изображений поверхности астероида, а также измерены его основные физические параметры. Отклонения во время пролёта аппарата рядом с астероидом позволили оценить его гравитацию, и массу, а также уточнить его размеры. Около 1 млрд лет назад в результате падения на Эрос крупного метеорита образовался кратер.

Матильда – сближение до 1212 км. Крупные кратеры (20 км), оценена плотность в 1.3 г см^3 . Предположении о наличии пустот внутри.

[Deep Space 1](#) — [24 октября 1998 года](#). Цель миссии — испытание новейших узлов КА, после успешного выполнения начал выполнение дополнительных задач: сближение с астероидом [Брайль](#) и [кометой Борелли](#).



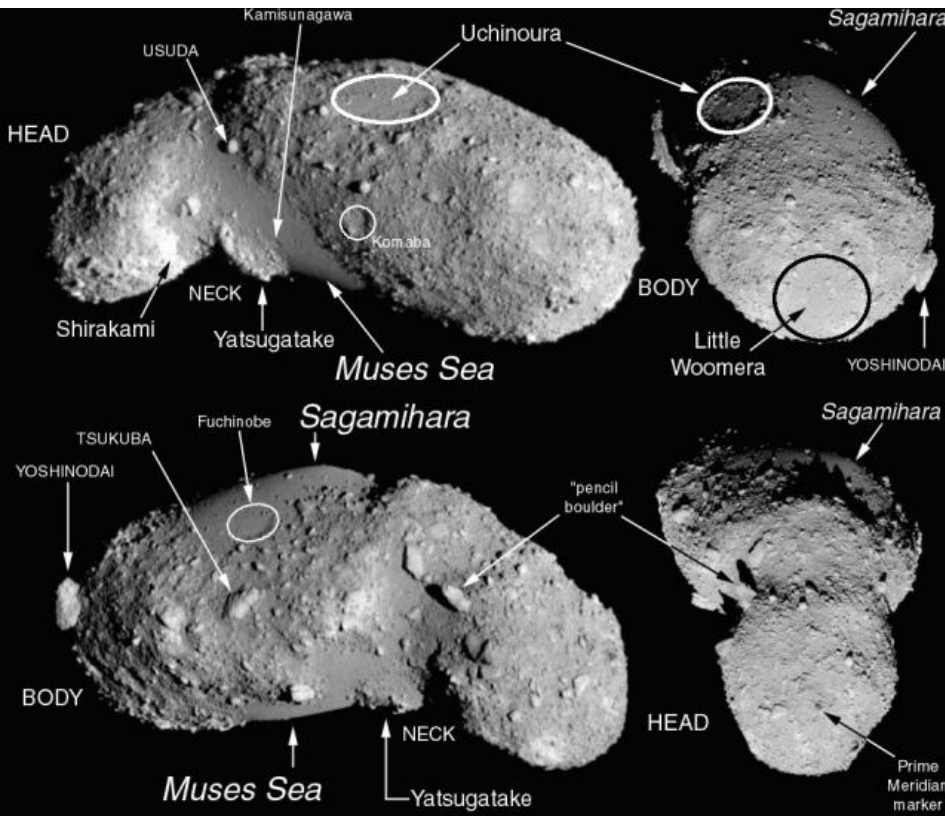
Минимальное расстояние составило ~ 26 км, но аппаратура начала работу только с ~ 14000 км.

[Стардаст](#) — [7 февраля 1999 года](#). Пролёт мимо астероида [Аннафранк](#).



Сближение (до 3079 км) с астероидом позволило уточнить размеры астероида, которые составили 6,6 x 5,0 x 3,4 км, и его форму, Обнаружено несколько крупных кратеров, а также оценено альбедо (0,18-0,24).

Хаябуса — 9 мая 2003 года. Исследование астероида Итокава и возвращение образцов с астероида.

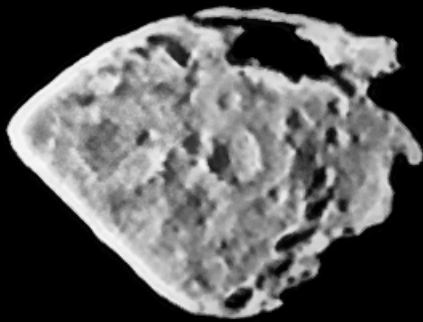


На Итокаве обнаружено более десяти ярко выраженных ударных структур круговой формы. Одной из крупнейших является *Малая Вумера* диаметром около 50 метров. Большинство кратеров малого размера заполнены пылью и по внешнему виду напоминают «пруды», обнаруженные на поверхности Эроса. Главной особенностью Итокавы является наличие очень большого количества камней и валунов. Всего было выявлено более 1000 валунов размерами больше 5 метров, а максимальный размер некоторых глыб достигает ~50 метров.

Образец грунта был взят со второй попытки.

В нем обнаружены следы воды и вземных органических веществ. Итокава сформировался в поясе астероидов из груды перемешивающихся космических обломков предыдущего, более крупного астероида. Грунт содержит водяной лед с относительно низким содержанием дейтерия, что характерно для космических тел из внутренней части Солнечной системы.

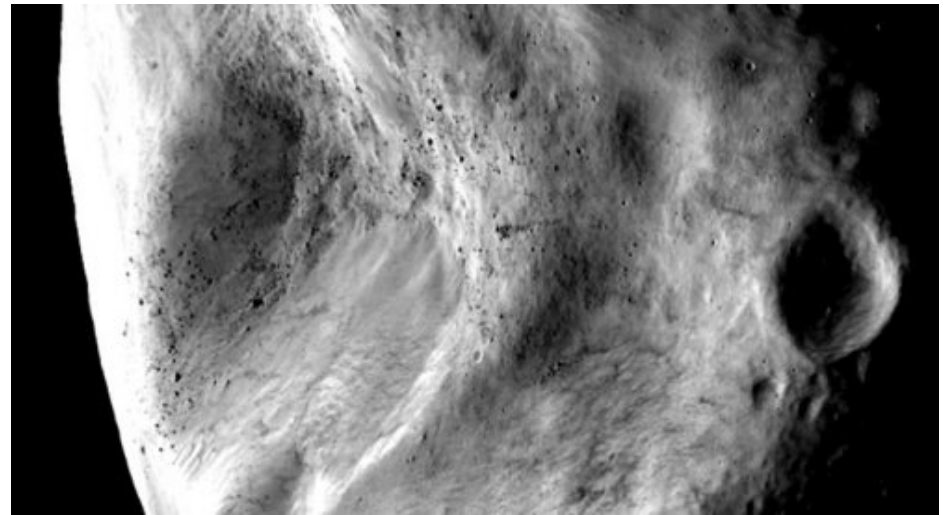
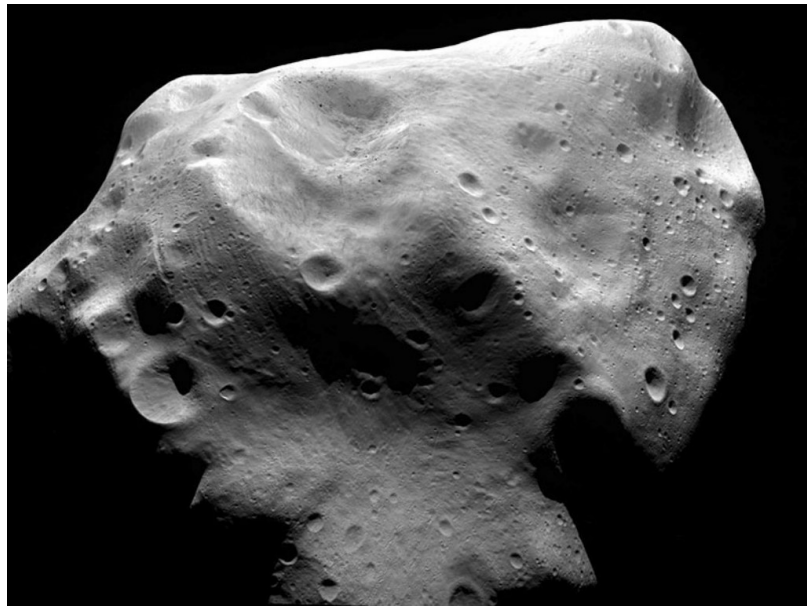
Розетта — 2 марта 2004 года. Пролёт мимо астероидов
Штейнс и Лютеция.



Во время навигационной кампании усилия астрономов были сконцентрированы на характеристиках орбитального и вращательного движения астероида, а также на определении его формы и плотности. Однако по мере сокращения дистанции (до 800 км) все больше внимания уделялось свойствам поверхности астероида и ее деталям, а также химическому и минералогическому составу. Кроме того, ученых интересовал возраст астероида и влияние солнечного ветра на его поверхность.

Программа не выполнена полностью из-за сбоя в работе одной из камер.

Обнаружены крупные кратеры (до 2х км). 23 кратера с D до 200 м и цепочка из 7ми мелких кратеров, возможно от метеорного потока.



Было получено 462 снимка в 21 спектральном диапазоне (узкие, и широкие диапазоны, перекрывающие интервал длин волн от 0,24 до 1 мкм). С помощью спектрометра VIRTIS, установленного на зонде, наблюдения проводились не только в видимой, но и в ближней инфракрасной области спектра. Также проводились измерения магнитного поля и плазмы вблизи астероида.

Получены значения массы и плотности => значительные неоднородности состава. Астероид во многом интересен наличием огромного кратера под названием Массалия, диаметром в 61 км, столкновение с телом в 8 км. Наличие на астероиде кратера такого размера свидетельствует о том, что его следует рассматривать как планетезималь, которая так и не превратилась в более крупное небесное тело, но смогла дожить до завершения активных процессов формирования планет в ранней Солнечной системе

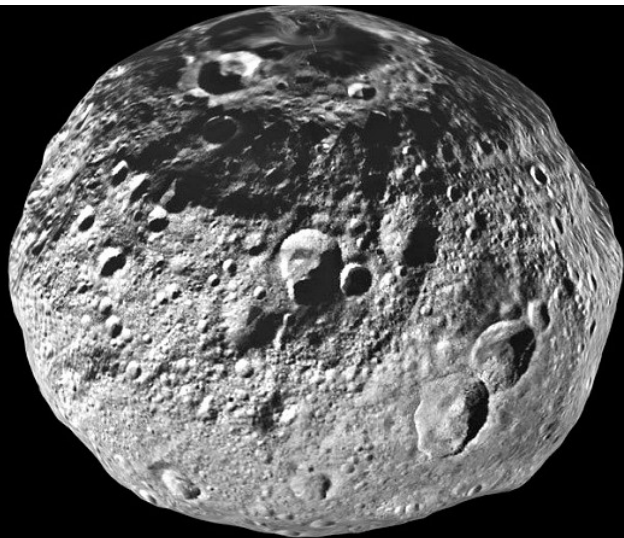
Чанъэ-2 — 1 октября 2010 года. Пролёт мимо астероида Таутатис.



В 2012 г. китайская станция «Чанъэ-2» прошла на расстоянии всего 3,2 км от астероида. Сделанные аппаратом снимки помогли уточнить его размеры и форму. Получены снимки поверхности астероида с разрешением 10 м.

Возможно, астероид контактно двойной

[Dawn](#) — [27 сентября 2007 года](#). В 2011 году аппарат достиг Весты и перешёл на её орбиту. С 12 августа 2012 года аппарат продолжил полёт к Церере и вышел на её орбиту в марте 2015 года. Совершил 2450 оборотов вокруг Весты и Цереры.

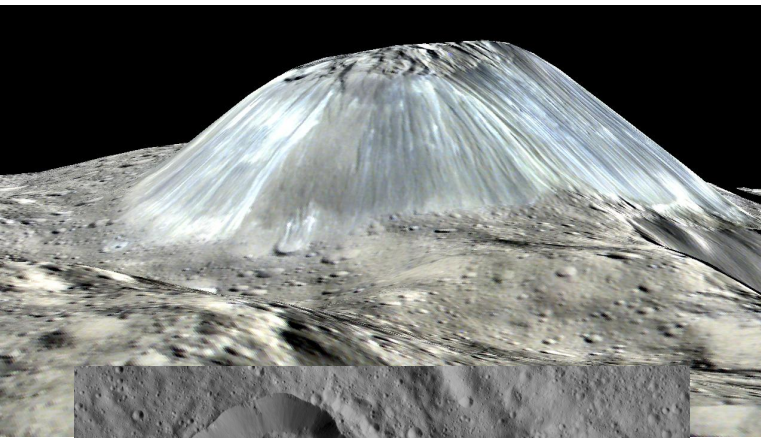


На основании измерений массы, формы, объёма и вращательных параметров Весты с помощью фотосъёмки и радиозондирования уточнены размеры Весты а также получено точное распределение гравитационного поля, свидетельствующее о ранней дифференциации. 4,56 млрд лет назад образовалось крупное (радиус 107 - 113 км) железного ядра, подобно тому, как это происходило у планет земной группы.

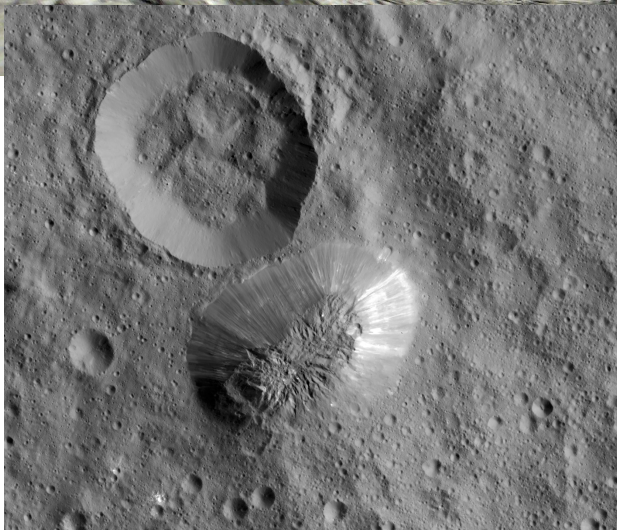
Данные, полученные «Dawn», выявили чрезвычайно разнообразную морфологию поверхности Весты: обнаружены впадины, хребты, утесы, холмы и очень большая гора. Зарегистрирована сильная дихотомия, то есть принципиальная разница между северным и южным полушариями. Северное старше и сильнее изрыто кратерами, тогда как южное более яркое и гладкое, имеет базальтовую природу и как минимум вдвое моложе северного: его возраст оценивается в 1-2 млрд лет, тогда как у самых старых элементов рельефа Севера — ненамного меньше 4 млрд лет

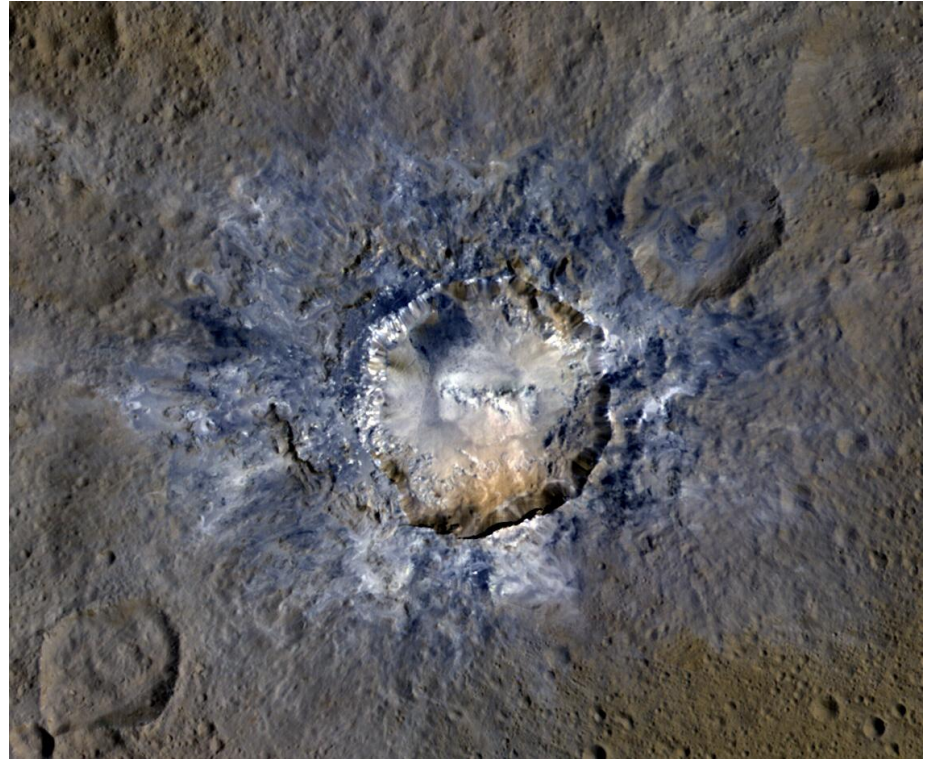
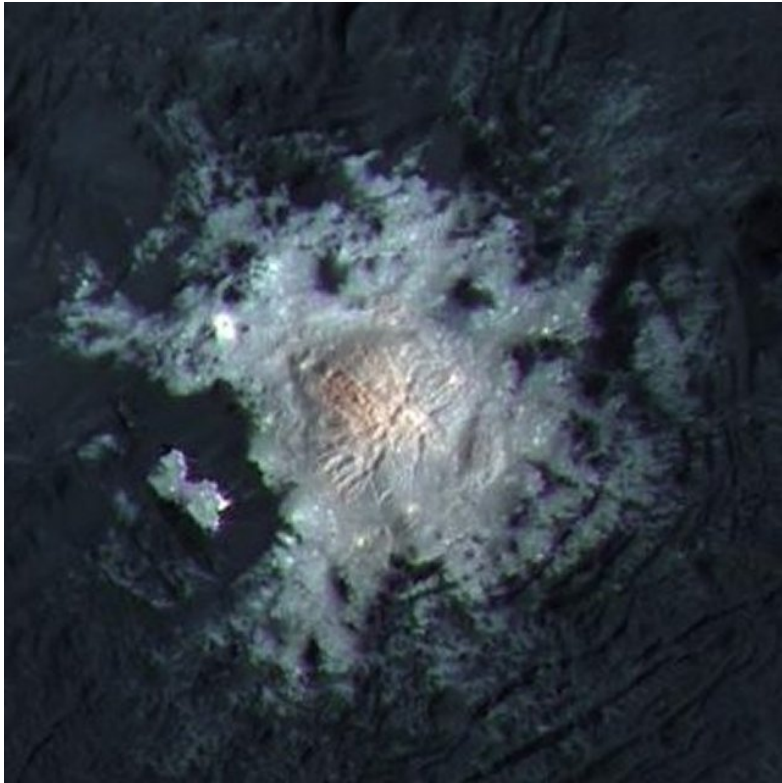


Данные КА позволили уточнить массу и размер Цереры. Была составлена гравитационная карта Цереры и получено множество детальных снимков ее поверхности. Кроме того, исследователи нашли на Церере ледяной вулкан, следы органических веществ, необычные горы, кратеры, ледники и оползни, а также яркие белые пятна, состав которых долгое время не удавалось установить.



Ахуна – криовулкан, высота 4-4.5 км. Борозды на склонах – следы валунов. Гора состоит из льда, поднявшегося из недр планеты в ходе серии холодных криовулканических извержений. Её строение свидетельствует о наличии в недрах Цереры соленой воды в жидком состоянии. Ахуна является антиподом крупнейшего кратера Цереры Керван. Существует версия, что Ахуну породила ударная волна от столкновения, создавшего Керван, сфокусировавшаяся на противоположной стороне Цереры





Новые горизонты — 19 января 2006 г. Пролет объекта пояса Койпера (486958) Аррокот 1 января 2019 года. Этот астероид стал самым удаленным объектом в Солнечной системе (43,4 а. е. от Солнца), который исследовал КА



The Formation of Ultima Thule

NASA
1 January 2019

About 4.5 billion years ago

A rotating cloud of small, icy bodies starts to coalesce.

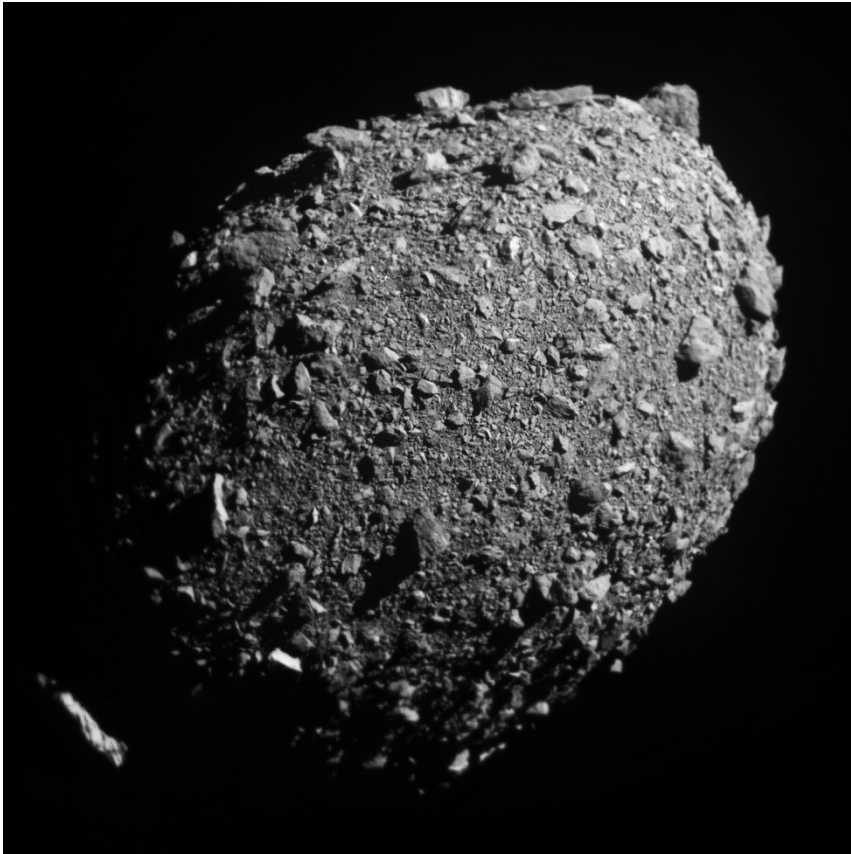
Eventually two larger bodies remain: Ultima and Thule.

Ultima and Thule slowly spiral closer until they touch, forming the bi-lobed object we still see today.

NASA / JHUAPL / SwRI / James Tuttle Keane

January 2, 2018 Press Conference 16

[DART](#) — 24 ноября 2021 года. Оценка возможности изменения орбиты астероида Диморф, спутника астероида (65803) Дидим в результате столкновения с космическим аппаратом. В соответствии с программой эксперимента, столкнулся с астероидом 26 сентября 2022 года, (как-то ?) изменив параметры его орбиты.



До удара Диморф совершал оборот вокруг Дидима за 11 часов 55 минут, а после — за 11 часов 23 минуты.

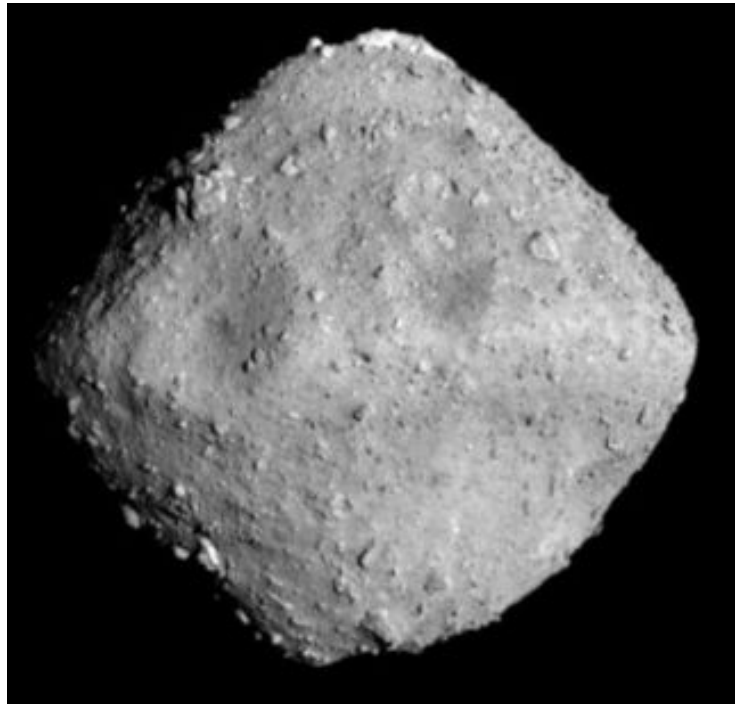
Текущие миссии

[Хаябуса-2](#) — 3 декабря 2014 года. Вышел на орбиту астероида [Рюгу](#) в июле 2018 года, произвёл несколько заборов грунта, в ноябре 2019 года сошёл с орбиты и направился к Земле, в декабре 2020 года пробы грунта доставлены на Землю. В рамках расширенной миссии планируется пролёт астероида [2001 CC21](#) в 2026 году и исследование астероида [1998 KY26](#) с орбиты начиная с 2031 года.

[OSIRIS-REx](#) — 8 сентября 2016 года. Забор грунта астероида [Бенну](#) произведен в октябре 2020 года, возвращение на Землю ожидается в сентябре 2023 года. После этого планируется исследование астероида [\(99942\) Апофис](#) в 2029 году.

[Lucy](#) — 16 октября 2021 года. Исследование пяти троянских астероидов Юпитера и одного астероида главного пояса.

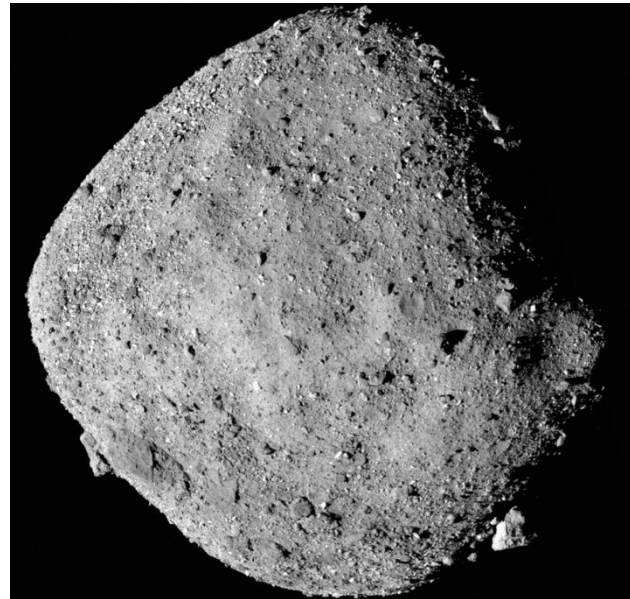
[Хаябуса-2](#) — 3 декабря 2014 года. Вышел на орбиту астероида Рюгу в июле 2018 года, произвёл несколько заборов грунта, в ноябре 2019 года сошёл с орбиты и направился к Земле, в декабре 2020 года пробы грунта доставлены на Землю. В рамках расширенной миссии планируется пролёт астероида 2001CC21 в 2026 году и исследование астероида 1998KY96 с орбиты начиная с 2031 года.



Поверхность Рюгу очень молода, её возраст оценивается примерно в 9 миллионов лет. При среднем диаметре астероида 920 метров на нём обнаружено 77 кратеров и 4400 крупных валунов. Самый большой валун имеет размер 160 × 120 × 70 метров и слишком велик, чтобы его происхождение можно было объяснить выбросом из метеоритного кратера. Вероятно, астероид был сформирован в результате распада более крупного тела.

Доставлено 5.4 г вещества. Его изучение показало, что на Рюгу есть водосодержащие минералы с элементами кислорода и водорода

[OSIRIS-REx](#) — 8 сентября 2016 года. Забор грунта астероида Бенну произведен в октябре 2020 года, возвращение на Землю ожидается в сентябре 2023 года.



[Lucy](#) — 16 октября 2021 года. Исследование пяти троянских астероидов Юпитера и одного астероида главного пояса.

Планируемые миссии

[Psyche](#) — 10 октября 2023 года. Исследование астероида [\(16\) Психея](#) с орбиты.

[Hera](#) — 2024 год. Исследование астероида (65803) Дидим.

[DESTINY](#) — 2024 год. Исследование астероида [\(3200\) Фаэтон](#)

[Тяньвэнь-2](#) — 2025 год. Исследование и возврат грунта квазиспутника Земли [\(469219\) Камоалева](#) (ранее 2016 HO₃), после этого перелёт к комете [311P/PANSTARRS](#)

M-Argo — 2024—2025 годы. Для исследования небольшого (около 100 м в диаметре) околоземного астероида. Точная цель будет определена позднее.

[Janus](#) — дата пуска не определена. Два малых аппарата для исследования двойных околоземных астероидов, предварительные цели: [1991 VH](#) и [1996 FG3](#).

Вопросы?