

# Тема 1. Солнечная и внесолнечные планетные системы

**В.И. Шематович**

*Институт астрономии РАН*



# **Солнечная система: *содержание***

**Лекция 1 (2 часа): Основные характеристики планет Солнечной системы.**

**Лекция 2 (2 часа): Малые тела Солнечной системы. Спутники и кольца планет.**

***Лекция 3 (2 часа): Кометы и астероиды.***

**Лекция 4 (2 часа): Атмосферы планет и малых небесных тел.**

**Лекция 5 (2 часа): Экзопланеты.**

**Лекция 6 (2 часа): Атмосферы экзопланет. Зона обитаемости.**

# **Физика космоса: малые тела**

**Исследование малых тел в Солнечной системе связано с решением важнейших фундаментальных задач физики космоса и современной астрофизики:**

- Как образовалась Солнечная система?**
- Как возникла жизнь на Земле?**

**Содержание:**

- ❖ Малые тела – состав летучих и твердой фракции**
- ❖ Астрохимия -химическая сложность от до- и прото-звездных ядер молекулярных облаков до малых тел (астероидов и комет) в планетных системах**
- ❖ Первые результаты космических миссий к астероидам: Ryugu - КА JAXA Hayabusa2 и Bennu -NASA OSIRIS-REx**

# Физика космоса: астероиды

За последние три десятилетия наземные и космические наблюдения астероидов, в сочетании с теоретическими и вычислительными работами, изменили наше понимание малых АСЗ (диаметры  $< \sim 10$  км). Сейчас принято считать, что АСЗ с диаметрами  $> \sim 200$  м представляют собой «груды щебня»: гравитационно связанные, неконсолидированные фрагменты с очень низкой объемной прочностью на растяжение.

Собственно, исследование в космических миссиях астероидов Ryugu и Bennu определялось рядом причин:

- являются астероидами сближающимися с Землей;
- правильный размер  $> 200$  м и относительно невысокая скорость вращения;
- представляют собой оставшиеся фрагменты со времени бурного формирования Солнечной системы;
- они могут содержать ключи к происхождению жизни – органическое вещество;
- они могут содержать ценные материалы – редкие металлы и др.;
- ....

- Астероид Итокава, исследованный КА JAXA Hayabusa1 в 2003-2010 гг.
- Это астероид S-типа
- Возможный источник земной воды

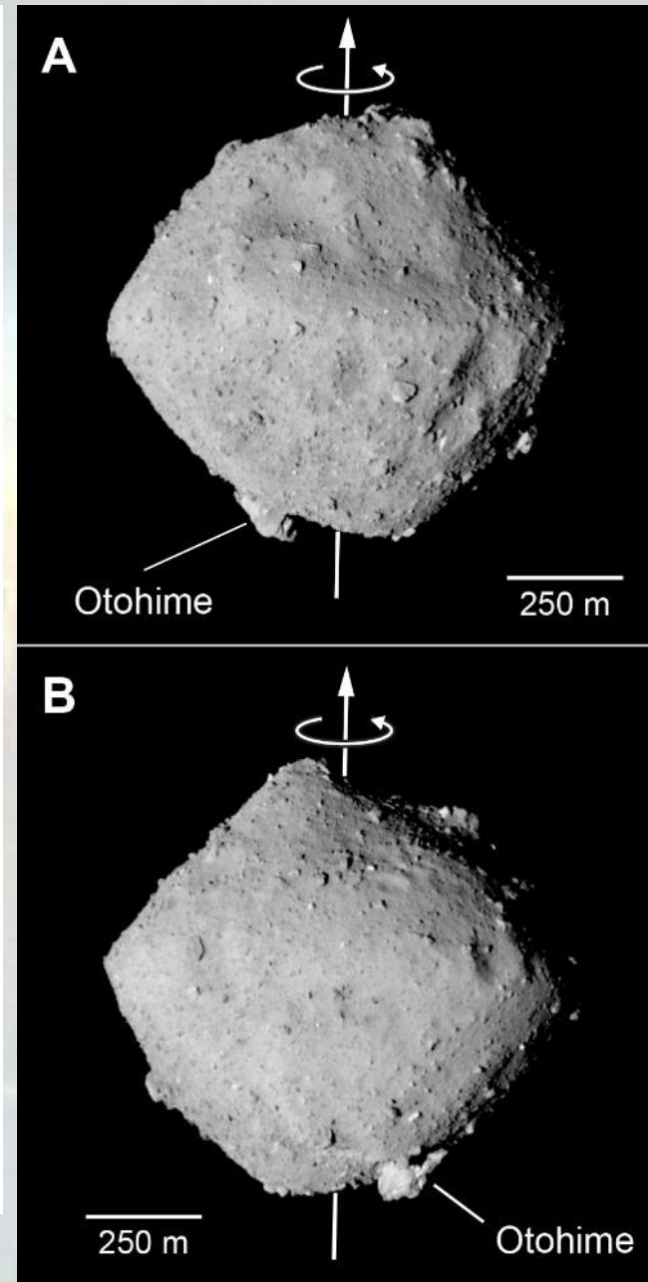


# Астероид Ryugu: JAXA Hayabusa2

Углеродсодержащие астероиды являются остатками осколочного диска после образования планет в солнечной туманности. Изучение их образования, эволюции и состава летучих дает информацию о процессах формирования планетезималей вблизи линии снега-границы между внутренней и внешней Солнечной системой. Углеродсодержащие астероиды, возможно, доставили воду и органическое вещество на раннюю Землю.

Цель космической миссии JAXA Hayabusa2 состоит в том, чтобы встретиться с астероидом Рюгу и исследовать эти вопросы посредством:

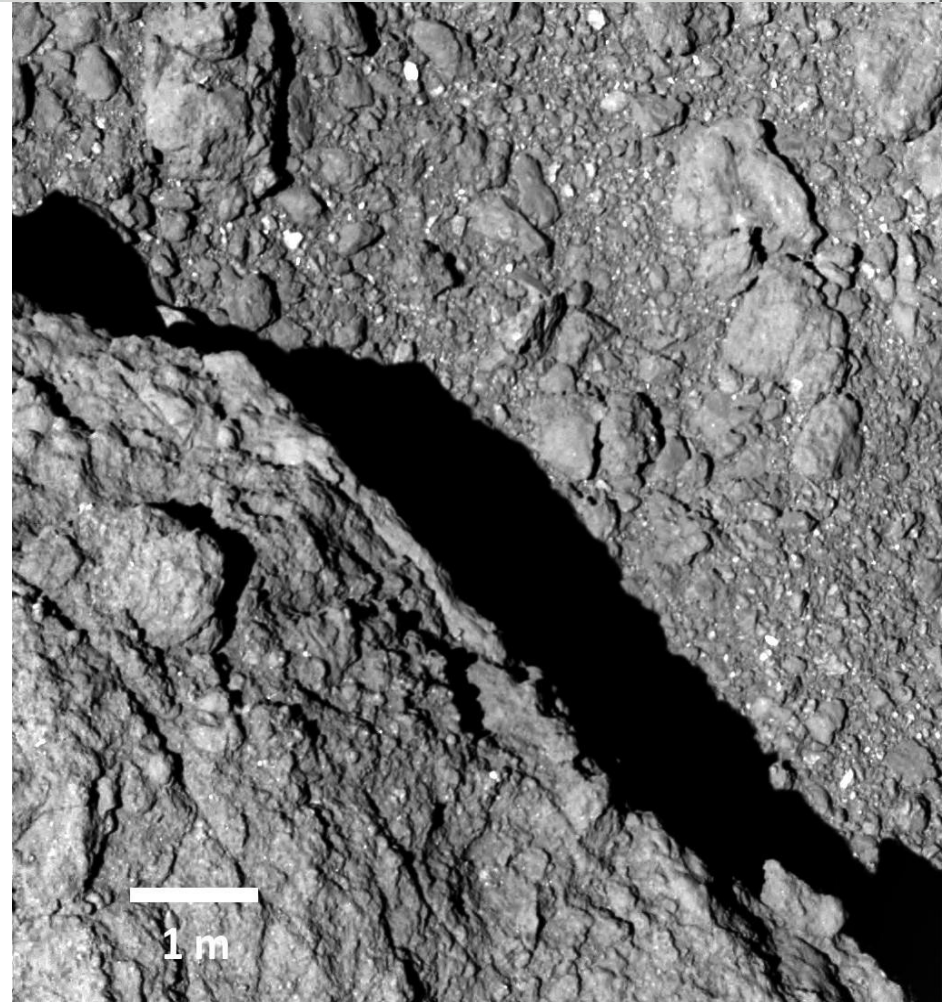
- дистанционного зондирования с КА;
- провести измерения на поверхности при помощи роверов и спускаемого модуля;
- выполнить эксперимент по искусственному удару и созданию кратера для забора вещества из подповерхностного слоя, не подверженного воздействию солнечного ветра;
- и провести анализ образцов, возвращенных на Землю.



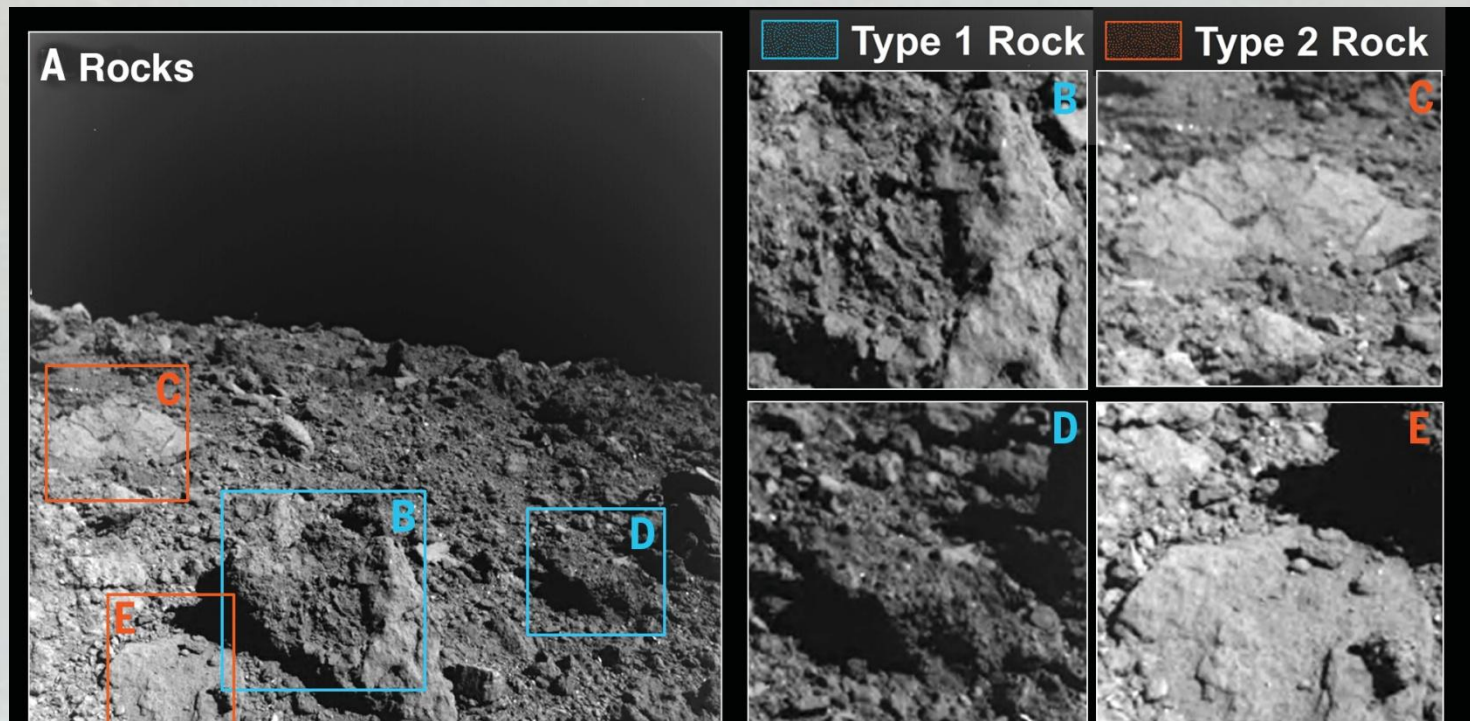
# Астероид Ryugu: JAXA Hayabusa2

КА JAXA Hayabusa2 прибыл к астероиду Рюгу 27 июня 2018 года. Его первые измерения показали, что Рюгу имеет экваториальный радиус  $502 \pm 2$  м, объемную плотность  $1,19 \pm 0,02$  г см<sup>-3</sup> и спектральные свойства, типичные для углистых астероидов типа Cb. Видимое геометрическое альbedo Рюгу составляет  $4,5 \pm 0,2\%$ , что делает его одним из самых темных объектов в Солнечной системе.

Рюгу— высокопористое тело, так как его объем должен быть более чем наполовину пустым пространством, при условии, что твердая фракция по плотности соответствует наименьшему значению среди углистых хондритов (2,42 г/см<sup>-3</sup>). Следовательно, Рюгу не является монолитным телом, а представляет собой связанную гравитационными силами «кучу щебня», подобно уже исследованному ранее астероиду Итокава.

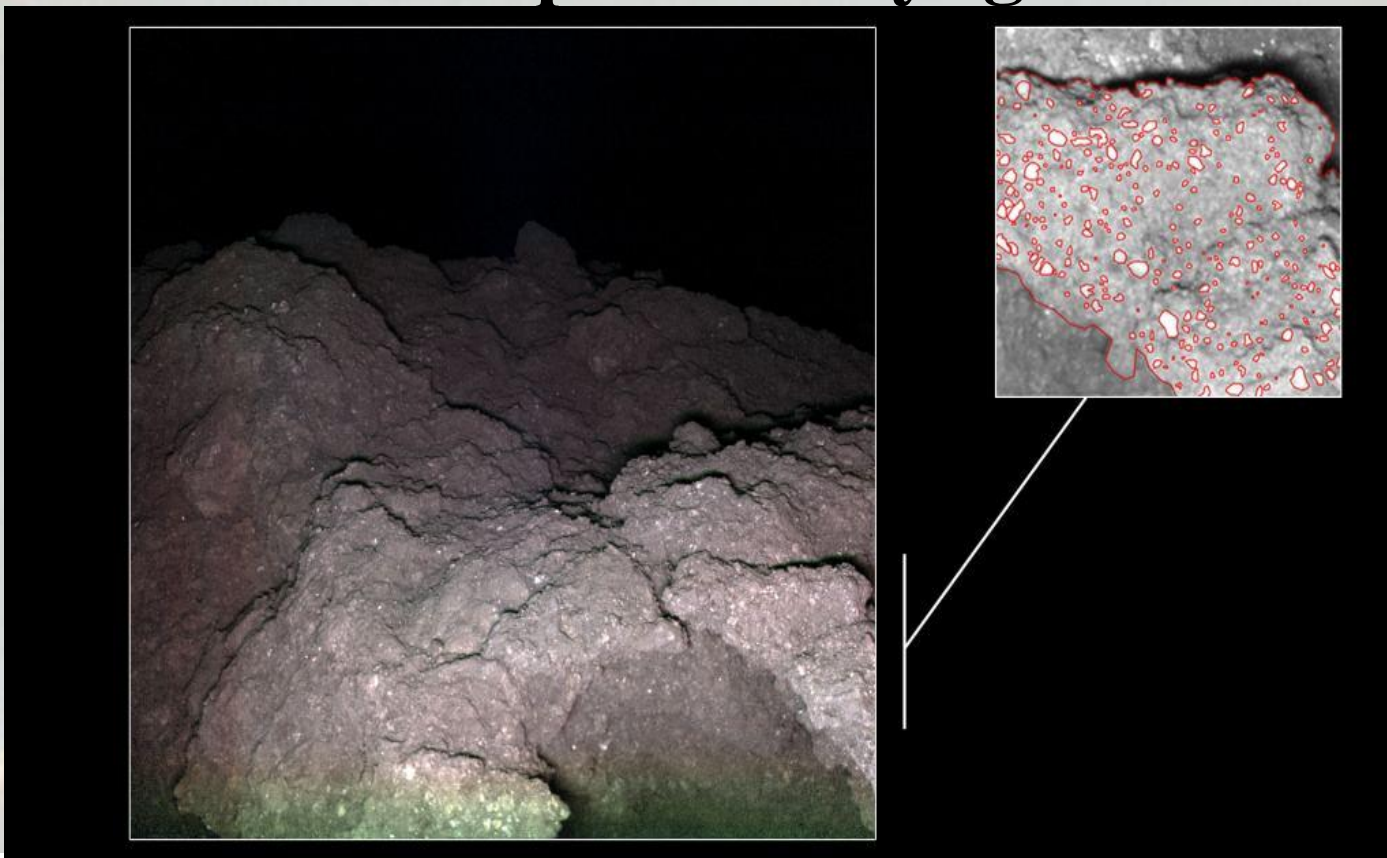


# Астероиды: Ryugu



Изображения посадочного модуля MASCOT показывают два типа камней, оба темные. Они отражают менее 4,5% солнечного света, подобно древесному углю. Поверхность покрыта дециметровыми и метровыми породами, без мелкозернистых пылевых отложений - реголита. Камни кажутся либо темными, с рассыпчатой поверхностью (тип 1), либо светлыми, с гладкими гранями и острыми краями (тип 2). Вероятно, астероид состоит из двух типов скал и валунов, и ничего больше. И эти два типа горных пород равномерно распределены на поверхности астероида. Это предполагает два возможных происхождения астероида.

# Астероиды: Ryugu

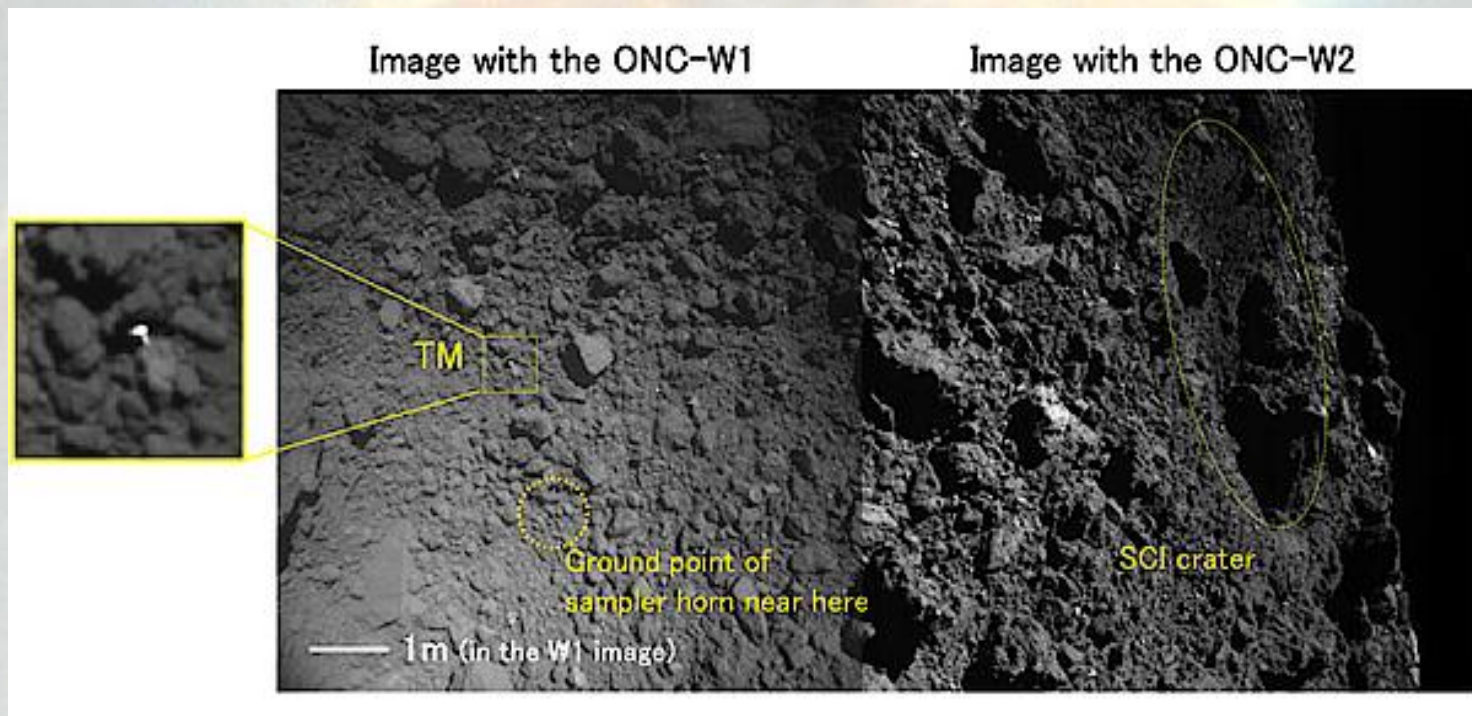


**Крупным планом изображения камней последнего типа показывают темную матрицу с мелкими, яркими, спектрально разными включениями, подразумевающими, что она не испытывала обширных изменений под воздействием воды. Включения кажутся похожими на таковые в метеоритах - углистых хондритах. Этот класс метеоритов относится к числу древнейших пород в Солнечной системе, и являются остатками от образования первых тел вокруг молодого Солнца. Они важны с научной точки зрения, потому что содержат ключи к происхождению Солнечной системы, которые почти невозможно найти на Земле.**

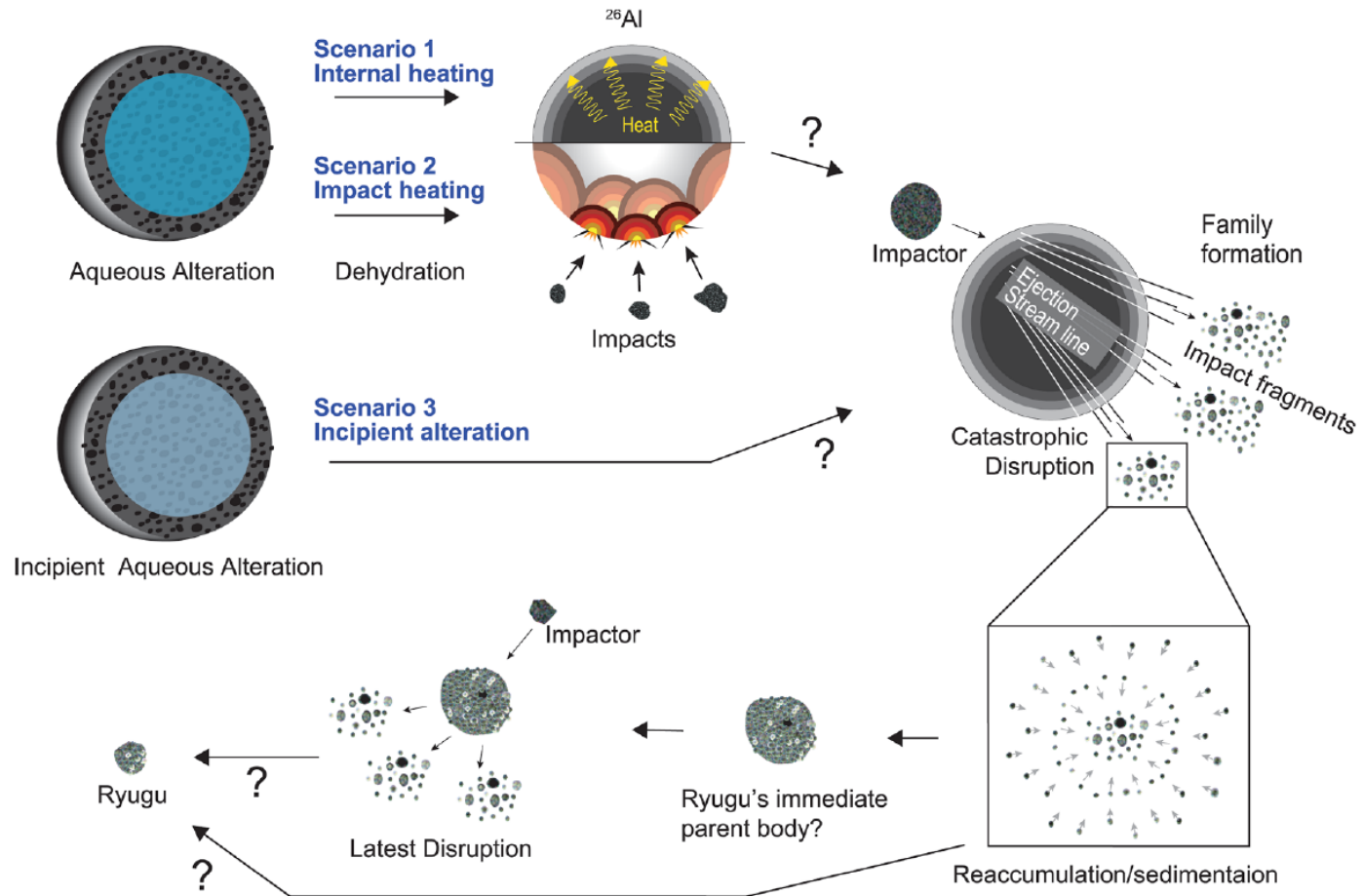


# Астероиды: Ryugu

Астероид Рюгу является грудой хрупких обломков (Fragile Rubble Pile), т.е., совокупностью многочисленных скальных блоков, гравитационно связанных, с низкой адгезионной прочностью и высокой объемной пористостью. Это соответствует гипотезе о том что все тела в Солнечной системе с размером  $\sim 1$  км являются грудями обломков (Walsh, ARA&A, 2018). Такие малые тела исходно образовались за счет ре-аккумуляции осколков, возникших при ударном разрушении родительских тел с размерами  $\sim 100$  км в главном поясе астероидов (Michel +, Science, 2001). Об этом говорит статистика камней на поверхности астероида, их количество с размерами от 20 м, указывает на то, что они не являются выбросами из ударных кратеров.



# Астероиды: Ryugu



**Рюгу мог образоваться в результате столкновения двух тел из разного вещества. В результате он бы распался, прежде чем фрагменты соединились под действием силы тяжести, чтобы сформировать новое тело, состоящее из двух различных типов горных пород. С другой стороны, Рюгу может быть остатком одного тела, внутренние зоны которого имеют различные условия по температуре и давлению, что приводит к образованию двух типов горных пород.**

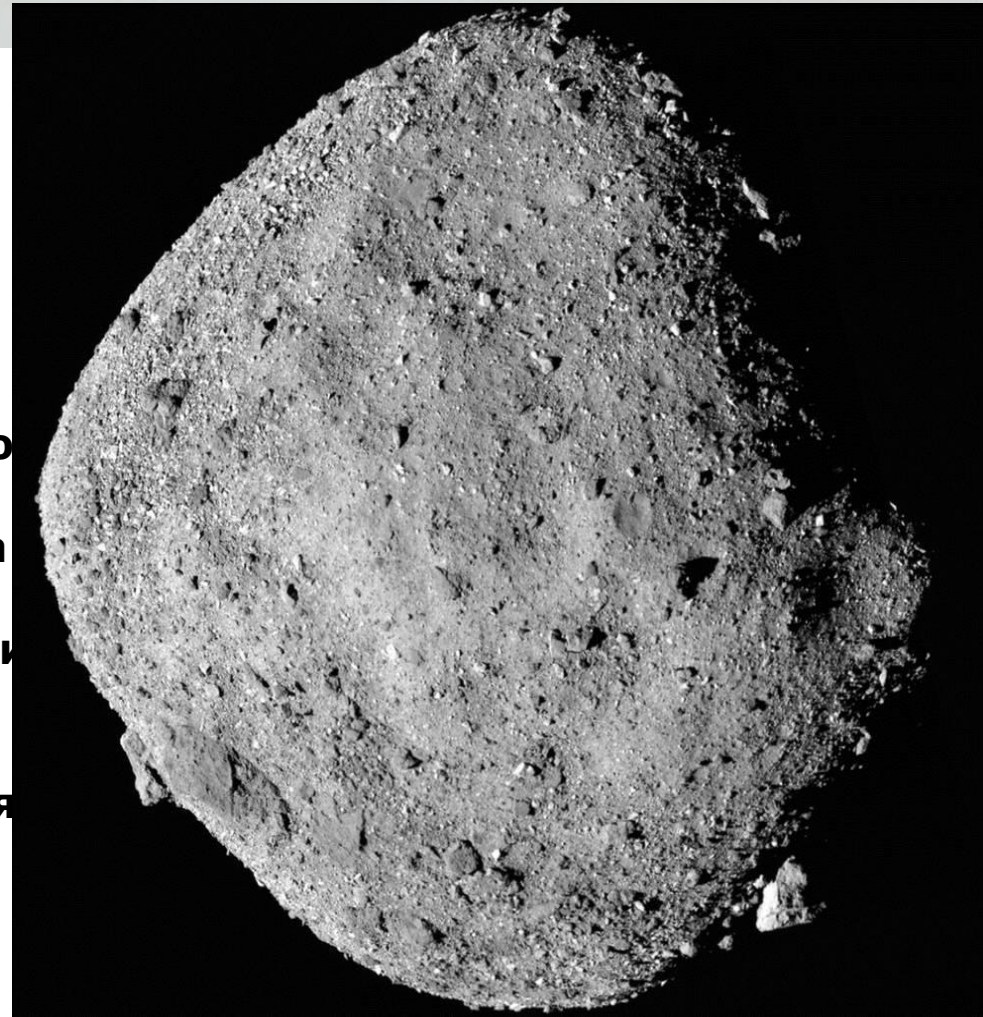
# Астероиды: Бенну

КА NASA's OSIRIS-REx (Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security-Regolith Explorer) прибыл к АСЗ астероиду (101955) Бенну 3 декабря 2018 года. Бенну входит в группу Аполлонов и относится к углеродным астероидам спектрального класса В. Считается, что богатые углеродом астероиды, такие как Бенну, могут быть ответственны за поставку сложных органических соединений, таких как аминокислоты, и воды на молодую Землю.

По плану научная программа миссии продлится около двух лет, за это время КА будет исследовать с орбиты состав поверхностного слоя астероида и его структуру, а также измерять

[эффект Ярковского](#), который может

влиять на орбиты околоземных астероидов. После изучения астероида OSIRIS-REx с помощью специального манипулятора соберет образец грунта. После сбора грунта, в марте 2021 года космический аппарат отправится обратно, ожидается, что OSIRIS-REx сбросит на Землю капсулу с грунтом в сентябре 2023 года.



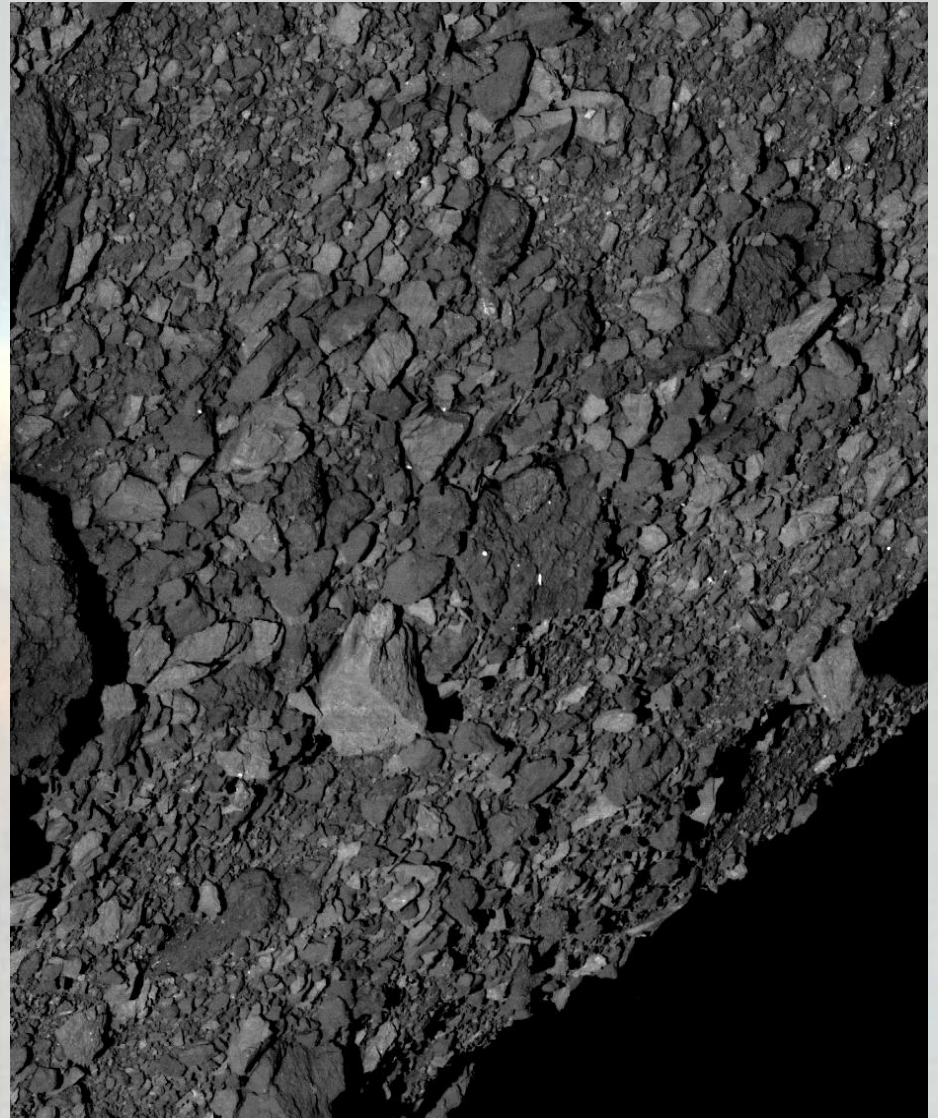
# Астероиды: Венну

Ранние измерения многочисленных крупных потенциальных ударных кратеров указывают на поверхность, возраст которой находится между 100 миллионами и 1 миллиардом лет, ожидаемая продолжительность жизни Бенну в качестве АСЗ. Наблюдается много валунов с трещинами, морфология которых предполагает влияние ударных или тепловых процессов в течение значительного промежутка времени с момента обнажения валунов на поверхности. Однако поверхность также показывает признаки более позднего массового движения: скопления валунов на топографических минимумах, дефицит малых кратеров и заполнение больших кратеров. Самые старые особенности, вероятно, записывают события со времени пребывания Бенну в главном поясе астероидов. Были обнаружены выбросы вещества с поверхности астероида.



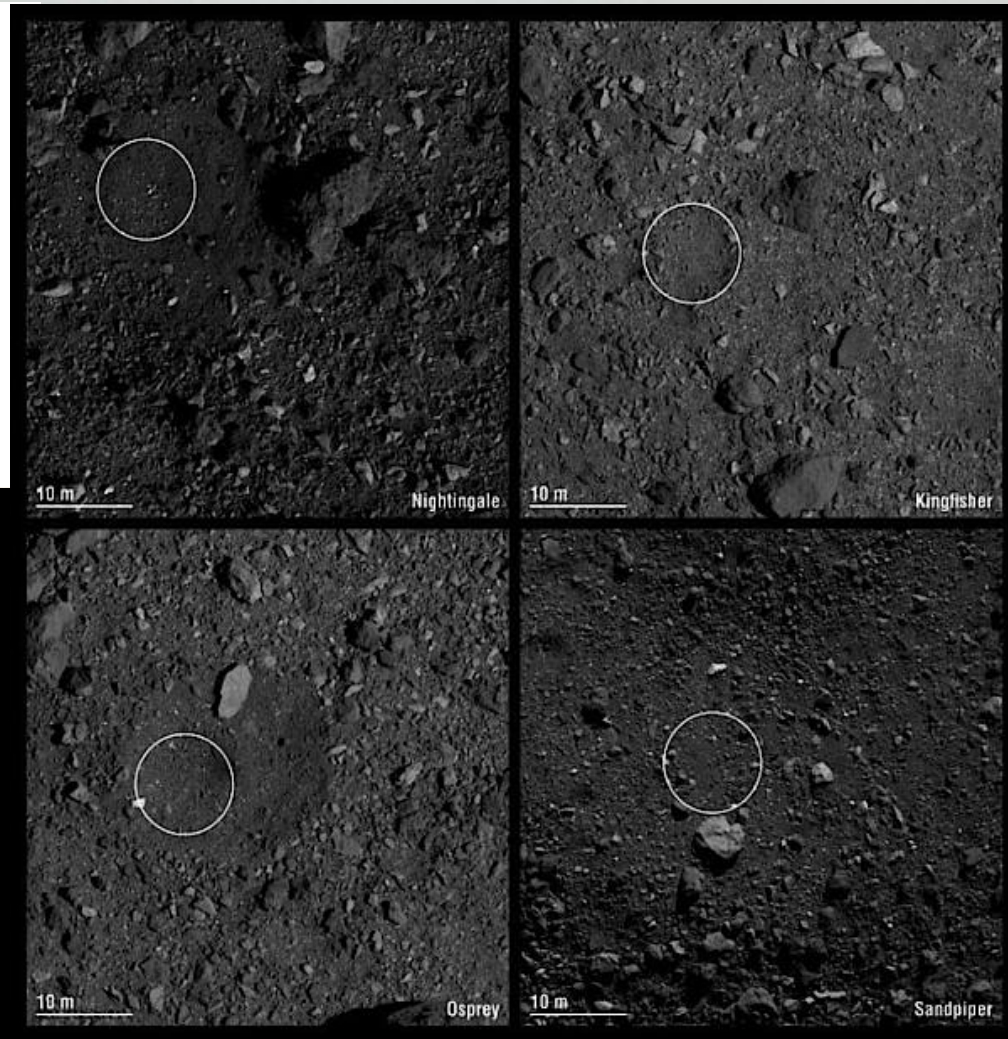
# Астероиды: Венну

**Измеренная плотность 1,190 г см<sup>-3</sup> и выведенный высокий объем пористости Бенну и отсутствие либо высоких поверхностных откосов, либо существенного топографического рельефа указывают на то, что Бенну представляет собой «грудку щебня». Плотность Бенну требует 25-50% макропористости, если он содержит вещество либо С (объемная плотность 1,57 г см<sup>-3</sup>) или SM (объемная плотность 2,20 г см<sup>-3</sup>) хондритов. Если также учитывать микропористость, присущую этим классам метеоритов, то общая пористость Бенну может достигать 60%.**

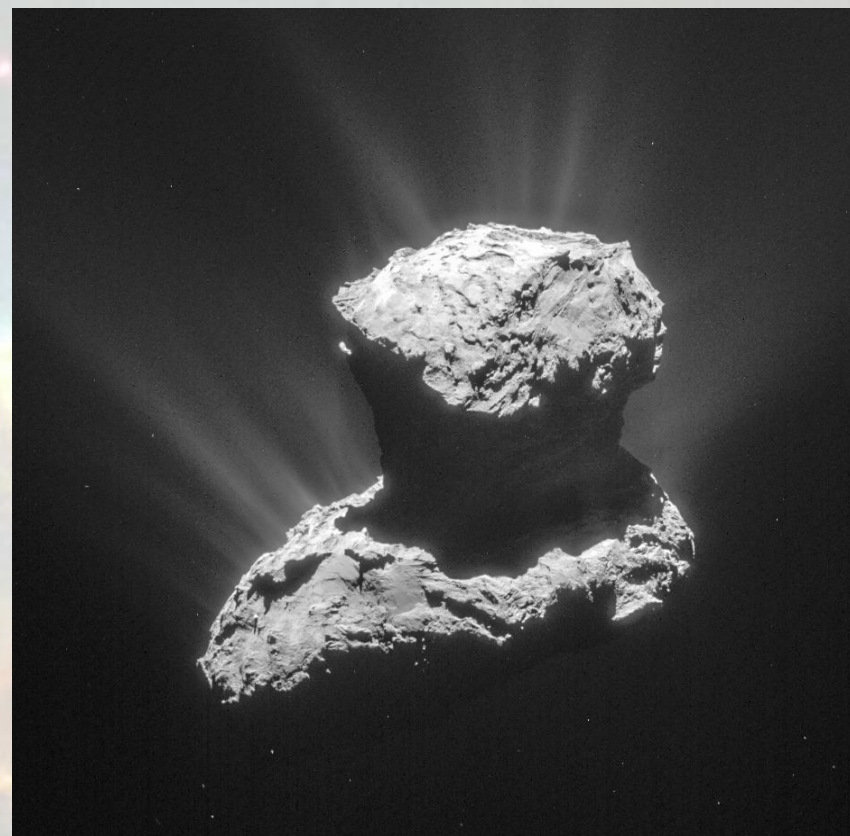
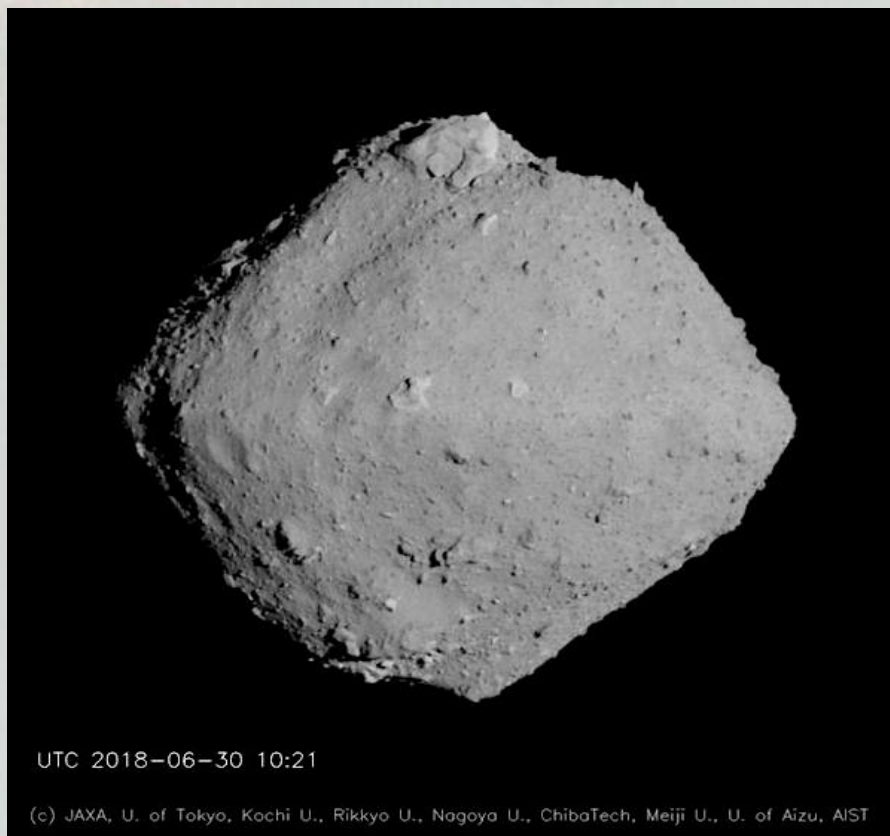


# Астероиды: Бенну

Команда КА OSIRIS-REx выбрала четыре возможных места для забора грунта с астероида Бенну, который должен состояться через год. Все они представляют собой небольшие области внутри кратеров и окончательный выбор должен состояться в декабре этого года, сообщается на сайте миссии.



# Малые тела как объекты астероидно-кометной опасности -АКО



**С точки зрения АКО:**

**– опасны. Гравитационно связанные «груды камней» - как изменить орбиту, как происходит разрушение при входе в атмосферу и т.д.**

**С точки зрения астробиологии: возможно являются источником воды и органики на Земле???!!!**

# Заключение

- **Представлены лишь первые результаты космических миссий JAXA Hayabusa2 и NASA OSIRIS-Rex к астероидам в Солнечной системе.**
- **Первые результаты этих миссий подтвердили наши представления о природе астероидов, а доставленные на Землю образцы вещества позволят уточнить космохимию астероидов.**
- **Дальнейшая обработка и интерпретация полученных данных и наблюдений позволят продвинуться на пути решения упомянутых выше фундаментальных проблем физики и химии космоса.**

Спасибо за внимание!