



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Наблюдаемые результаты эксперимента «DART» NASA и ESA и предварительные положения по их интерпретации

Кискин П.Е., Симоненко В.А., Гусев М.В., Шатов М.М.

XVII Международная конференция

«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»

19–23 мая 2025 г. Снежинск

Космические риски

В настоящее время в околоземном пространстве находится более 900 крупных астероидов километрового размера. Все они известны, за ними ведут регулярные наблюдения, ни один из астероидов этой группы пока не представляет опасность для нашей планеты.



Не так хорошо изучены малые астероиды.

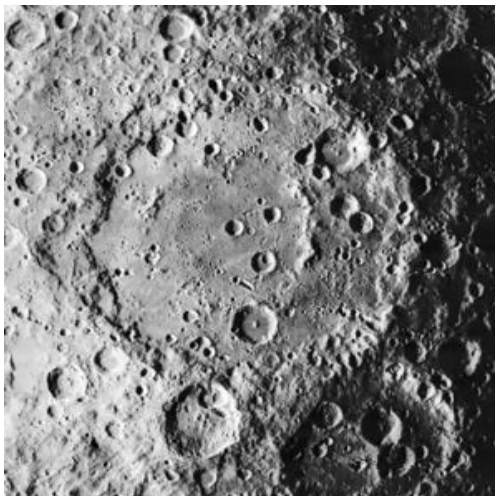
$L=140$ м ... 1 км — характерный размер;

$N>25000$ — количество в нашем ближайшем окружении;

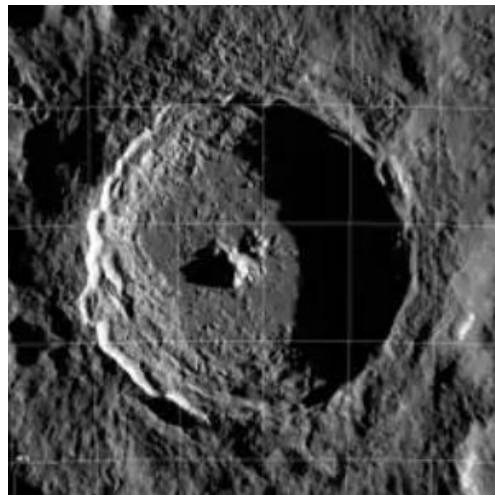
$T\approx 20000$ лет — периодичность столкновения подобных тел с Землей.

Масштабные космические события, отпечатанные на поверхности Земли, Луны, планетах земной группы, убедительно доказывают неизбежность последующих столкновений.

Кратер Королев на Луне

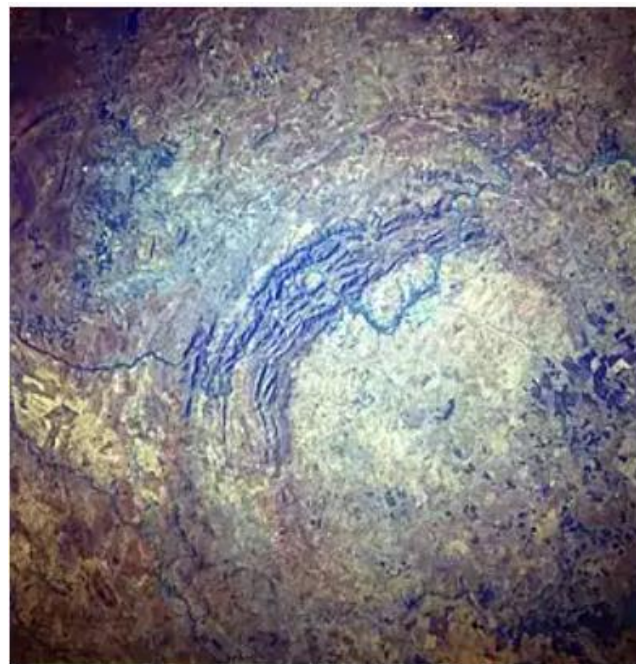


Кратер Тихо на Луне



Кратер Анджелика на Марсе

Ударная энергия при таких событиях исчисляется в Мт, Гт и даже Тт т.э. Единственный «плюс» по отношению к ядерным взрывам – отсутствие радиационного загрязнения.



Кратер Вредефорт, снимок со спутника

ЮАР, диаметр 250-300 км



Аризонский кратер

Миссия DART стала не первым экспериментом, в ходе которого космический аппарат целенаправленно «бомбардировал» поверхность небесного тела. Но целью этих двух экспериментов было не изменение траектории небесных тел, а анализ их физического и химического состава.

4 июля 2005 г. - «Дип Импакт»



Отстреливаемое ударное устройство «Smart Impactor» космического аппарата массой 370 кг на скорости 10 км/с столкнулось с ядром кометы Темпеля 1, вызвав выброс кометного вещества массой около 10 тыс. тонн, яркость кометы кратковременно увеличилась в 6 раз. Возник ударный кратер диаметром 100 м, глубиной 30 м.



Ядро кометы Темпеля



Астероид

5 апреля 2019 г. - японский аппарат «Хаябуса-2»

с высоты 500 м прозондировал ударным ядром массой 2 кг поверхность астероида Рюгу, соблап образцы породы и доставил на Землю



Задача космической защиты Земли от астероидов и комет без преувеличения является **цивилизационным вызовом** поистине планетарного масштаба.

Механика коррекции орбиты угрожающего тела

Импульсное воздействие

Непрерывное воздействие

Отработка принципов КЗЗ с помощью кинетического удара стало основной задачей миссии DART (Double Asteroid Redirection Test - «Испытание по перенаправлению двойного астероида»).



DART берет свое начало от нереализованного проекта ЕКА «Don Quijote» начала 2000-х. Идея заключалась в том, чтобы направить два космических корабля (ударник «Идальго», регистратор «Санчо») и изучить, как удар изменил траекторию движения астероида вокруг Солнца.



Характерная гелиоцентрическая скорость астероидов ≈ 30 км/с.

Измерение изменения скорости в несколько мм/с затруднительно.

Проект ЕКА был
закрыт.

Характерная орбитальная скорость спутников астероидов $\approx 10..100$ см/с.

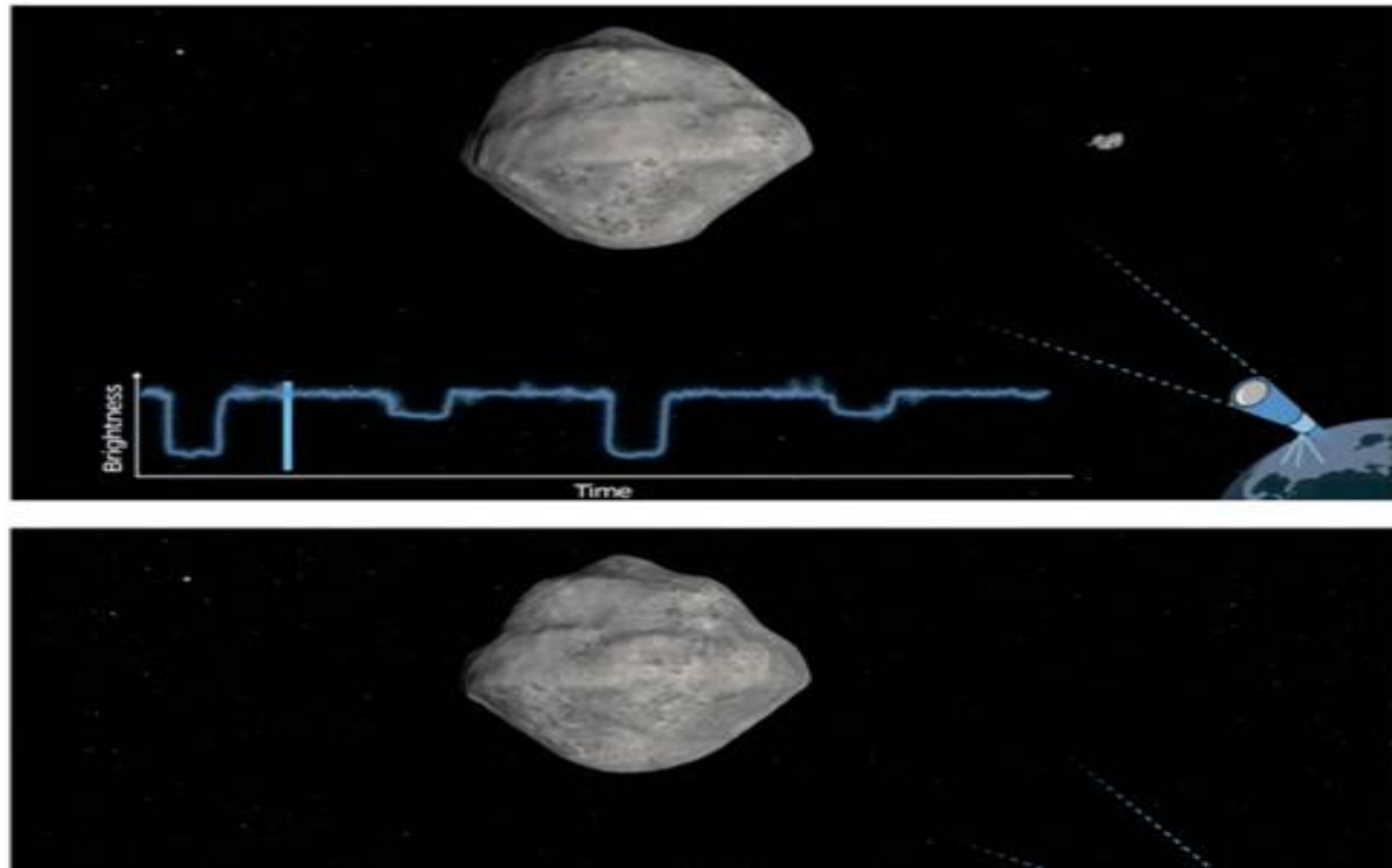
Изменения скорости в несколько мм/с определимы.

Наилучший способ определения воздействия — зафиксировать изменение орбитального периода «луны» астероида:

- Нет необходимости во 2-м космическом корабле для измерения отклонения;
- Наблюдения можно проводить с Земли с помощью наземных телескопов.

Оставалось лишь выбрать подходящий двойной астероид...

Астероид
Дидимос
диаметром 780 м
открыт в 1996 г,



Спутник Дидимоса был обнаружен 20 ноября 2003 года
чешским астрономом Петром Правецем

Двойная система астероидов Дидим-Диморф



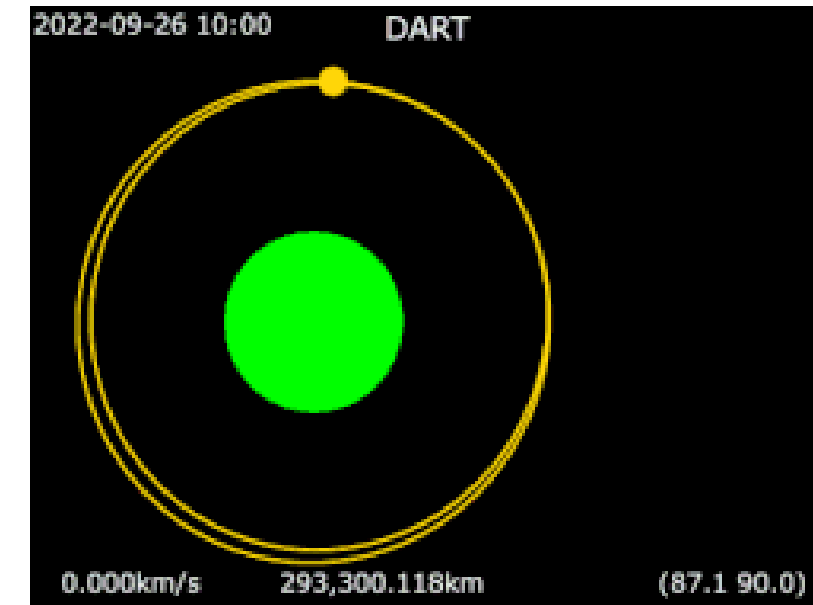
20 ноября 2003 года у
околоземного астероида S-класса
Дидим был обнаружен астероид-
спутник диаметром 170 м и
массой около 5 млн т,
впоследствии получивший
название Диморф.

Этот малый астероид стал
мишенью в миссии по
кинетическому отклонению
орбиты астероида в рамках
программы защиты Земли от
опасных космических объектов.





Ударный космический зонд («импактор»), запущенный космическим агентством NASA 24 ноября 2021 года, достиг поверхности Диморфа 26 сентября 2022 года.



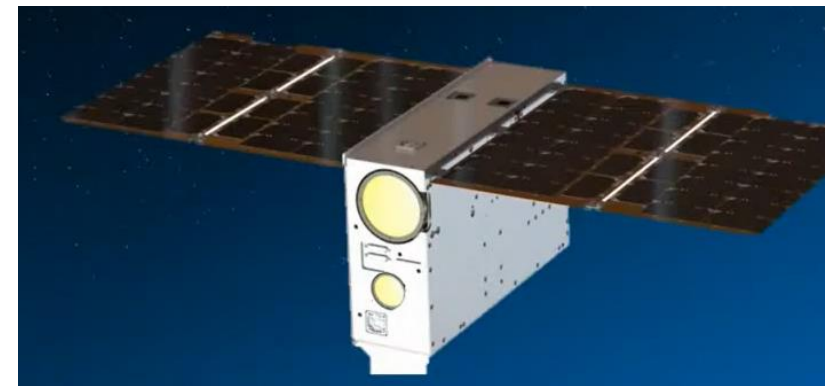
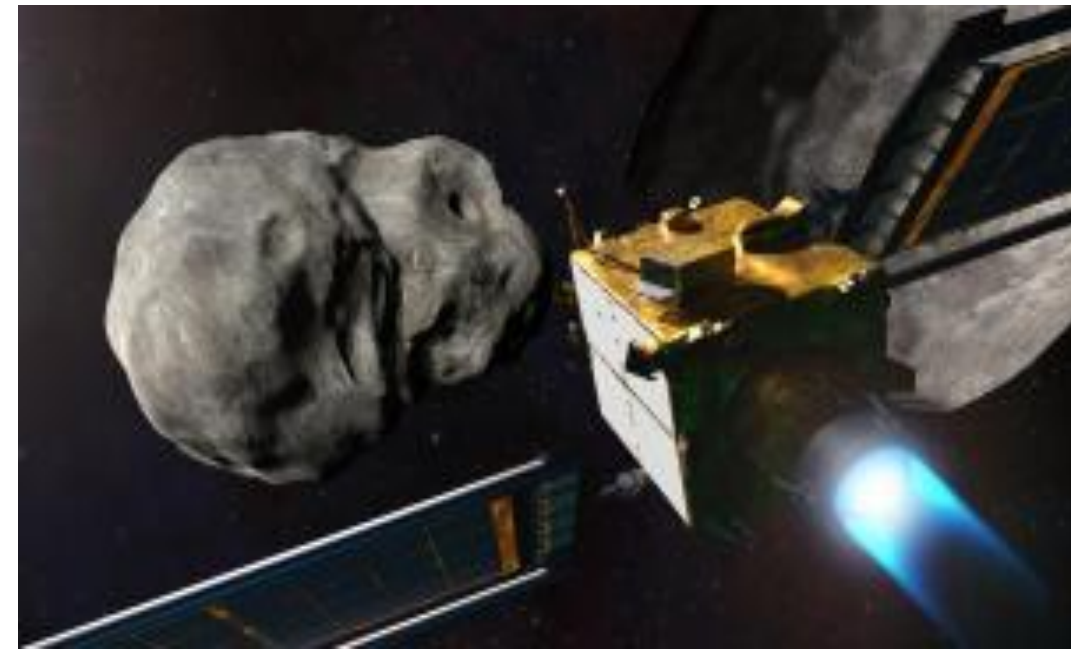
Конструкция КА

M=580 кг, габариты: 1.2x1.3x1.3 м.

Оборудование - навигационные датчики, бортовой компьютер, антенна для связи с Землей.

Основная двигательная установка (12 гидразиновых двигателей) для маневрирования + ксеноновый ионный двигатель NEXT-C (с целью проверки его работы в космосе).

Энергию для питания DART обеспечивали солнечные батареи, которые изначально были свернуты в рулон: они развернулись после отделения от ракеты-носителя.



Аппарат нес на себе итальянский кубсат LICIACube с двумя камерами.

[NASA's First Planetary Defense Test Mission.mp4](#)



Снимок астероидов за
2.5 минуты до удара



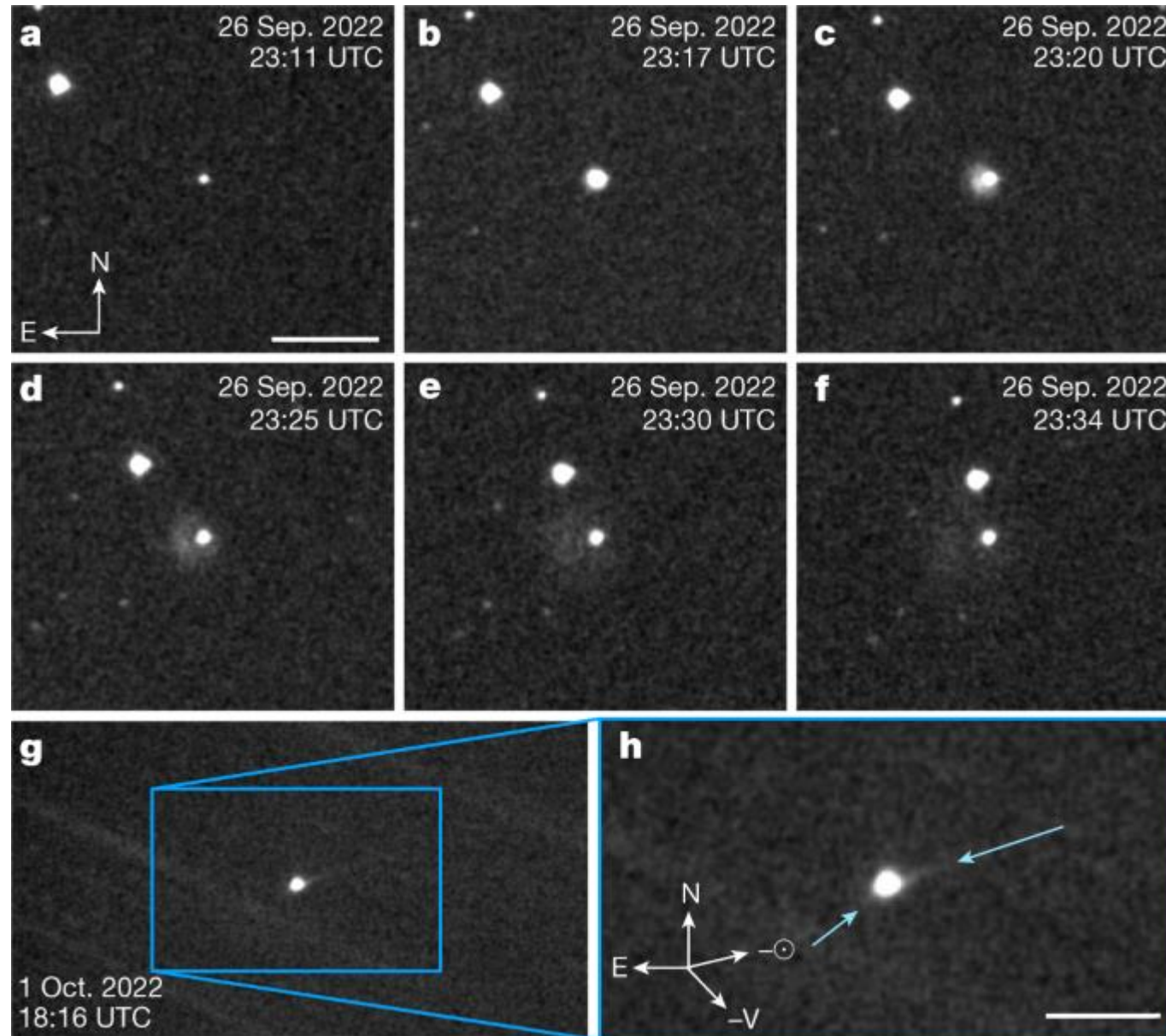
Снимок поверхности
Диморфа за 2 сек до удара



Диморф весь покрыт крупными валунами и выглядит как слабо сцементированная груда щебня, едва удерживаемая гравитацией.

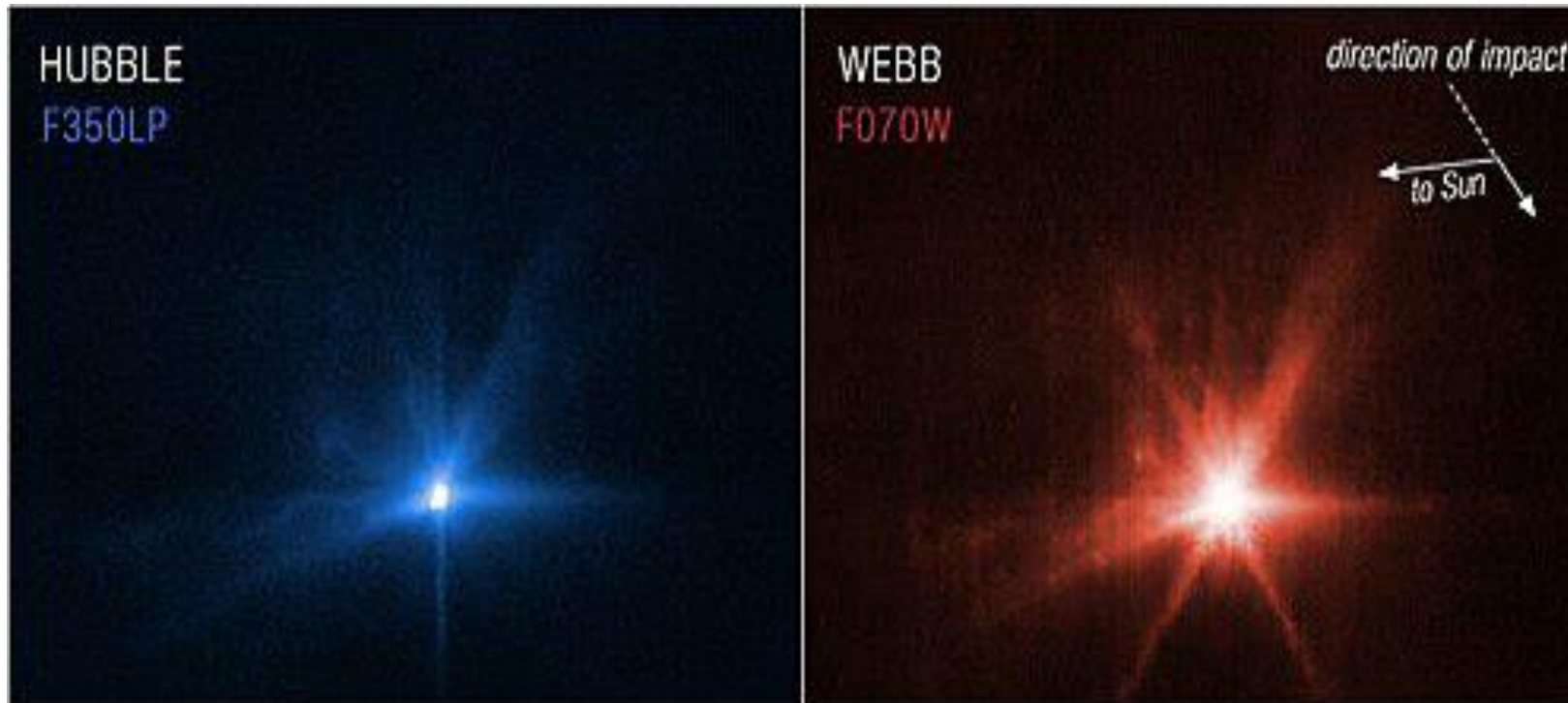


Момент удара, запечатленный телескопом астрономической обсерватории (ЮАР)

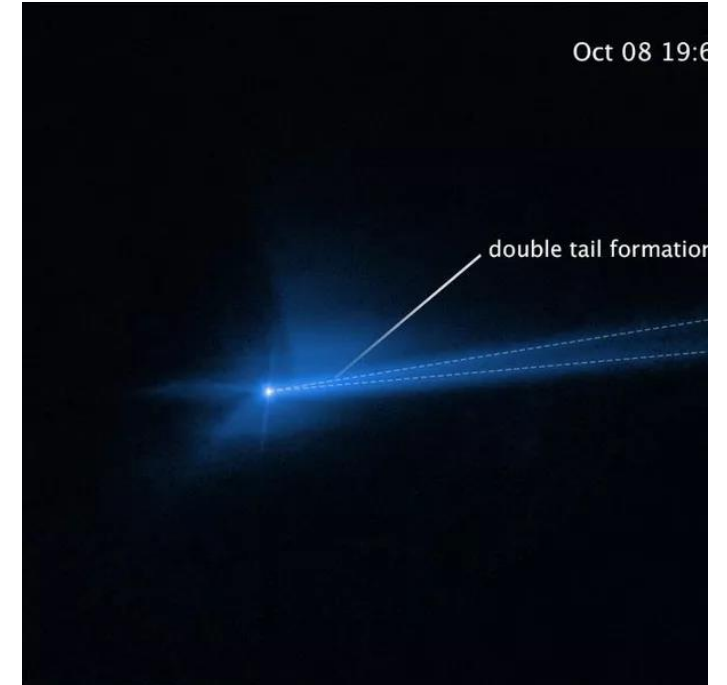




Момент столкновения
аппарата DART с астероидом
Диморф, зафиксированный
камерой спутника LICIACube



В результате удара произошло высвобождение астероидного материала, и у Диморфа появился кометоподобный след длиной $\approx 10\,000$ км из пыли и обломков астероида.



Стадии эволюции шлейфа выбросов:

- 1) формирование конуса
- 2) спиральный вихрь обломков, вытянутый вдоль орбиты астероида
- 3) кометообразный хвост пыли, формируемый давлением солнечного света

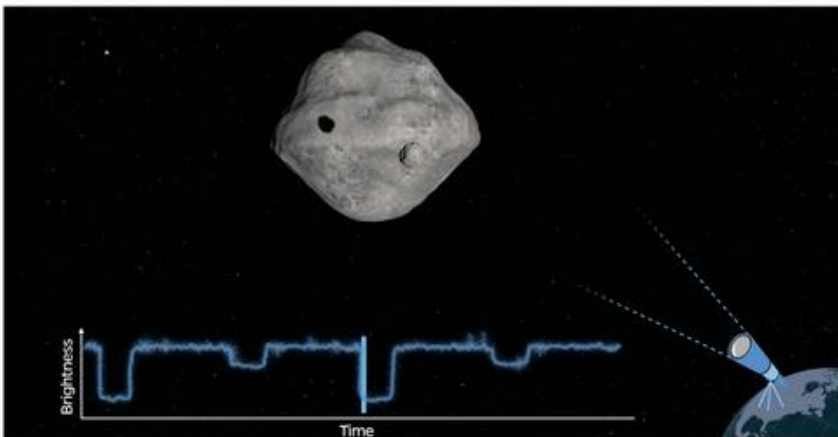
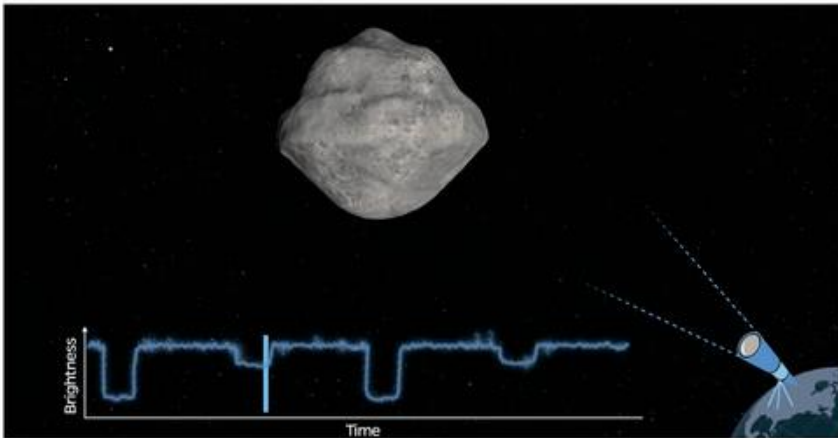
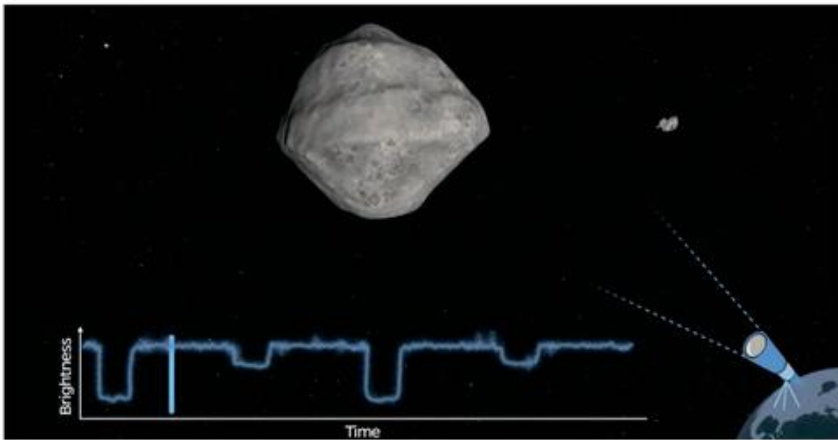
Колебания спектра зафиксировал инфракрасный телескоп НАСА на Гавайях. Сразу после удара астероид стал значительно **краснее (разогрев выброшенного облака пыли)**, а затем, через несколько часов, цвет изменился на **синий (в кратере, образовавшемся при ударе, обнажились внутренние слои астероида)**. Колебания спектра зафиксировал инфракрасный телескоп НАСА на Гавайях.

The Observatories at Mauna Kea



После удара яркость двойной системы внезапно увеличилась в 10 раз. Через три с лишним недели вернулась к стабильному значению. Его изменение по сравнению с первоначальным позволило определить, что астероид потерял от 0.3% до 0.5 % массы (**$0.004 \cdot 5$ млн т=20000 т**).

Определение периода вращения



До удара Диморф совершал оборот вокруг Дидима за 11 часов 55 минут, а после – за 11 часов 23 минуты. Таким образом, время его обращения сократилось примерно на 32 минуты вместо ожидаемых нескольких минут.

Изменение скорости астероида оказалось в 3.6 раз больше, чем предсказывает теоретический расчет для случая, когда выброс породы отсутствует.

Оценки «дефекта массы»



[Fabio Ferrari etc. Morphology of ejecta features from the impact on asteroid Dimorphos. **Nature, 2023**].

«Our findings suggest that Dimorphos is a very weak, rubble-pile asteroid, with an ejecta mass estimated to be in the range of $(1.1-5.5) \times 10^7 \text{ kg}$ ».

$$M_{\text{DART}} = 580$$

кг

$$M_{\text{EJECT}} = 20\,000\,000$$

кг

$$M_{\text{астероида}} = 5\,000\,000\,000$$

кг

Масса выброса определяется импульсом ударника и свойствами породы.

Эффективность кинетического воздействия на астероид

При ударе по астероиду зонд передает импульс, меняя его орбитальную скорость и траекторию. Для оценок можно выбрать случаи абсолютно неупругого и абсолютно упругого удара.

Изменение скорости Диморфа в предположении **абсолютно неупругого** соударения:

Изменение скорости Диморфа при **абсолютно упругом** соударении - в 2 раза больше (1.6 мм/с).

- линейная скорость вращения

Оценка периода орбитального вращения близка к фактическому значению до удара 11 ч 55 мин

— абс. неупр.

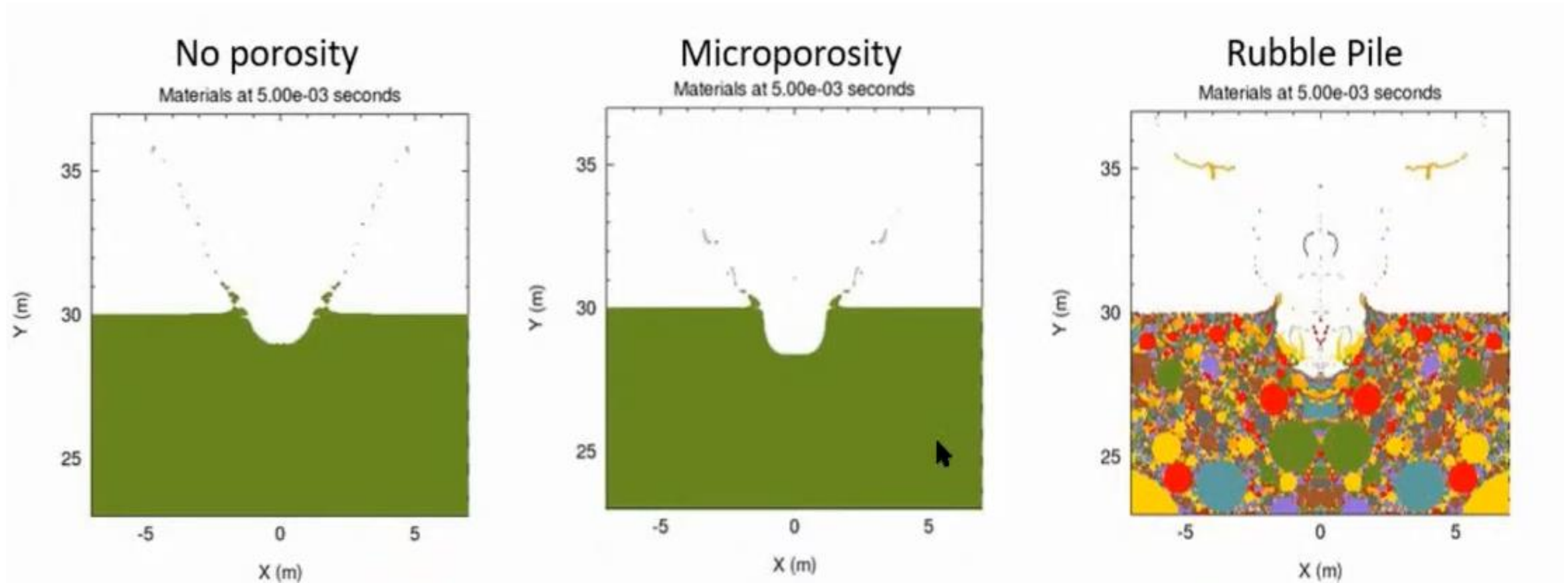
≈19 мин — абс.упр. <#>

Данные расчеты не учитывают тот факт, что удар спровоцировал выброс («plume») породы с поверхности астероида. Эта порода в соответствии с принципом реактивного движения дополнительно затормозила его. При этом соответствующее изменение скорости могло в несколько раз превышать величину, определенную из закона сохранения импульса: точное значение зависит от свойств породы на поверхности астероида.

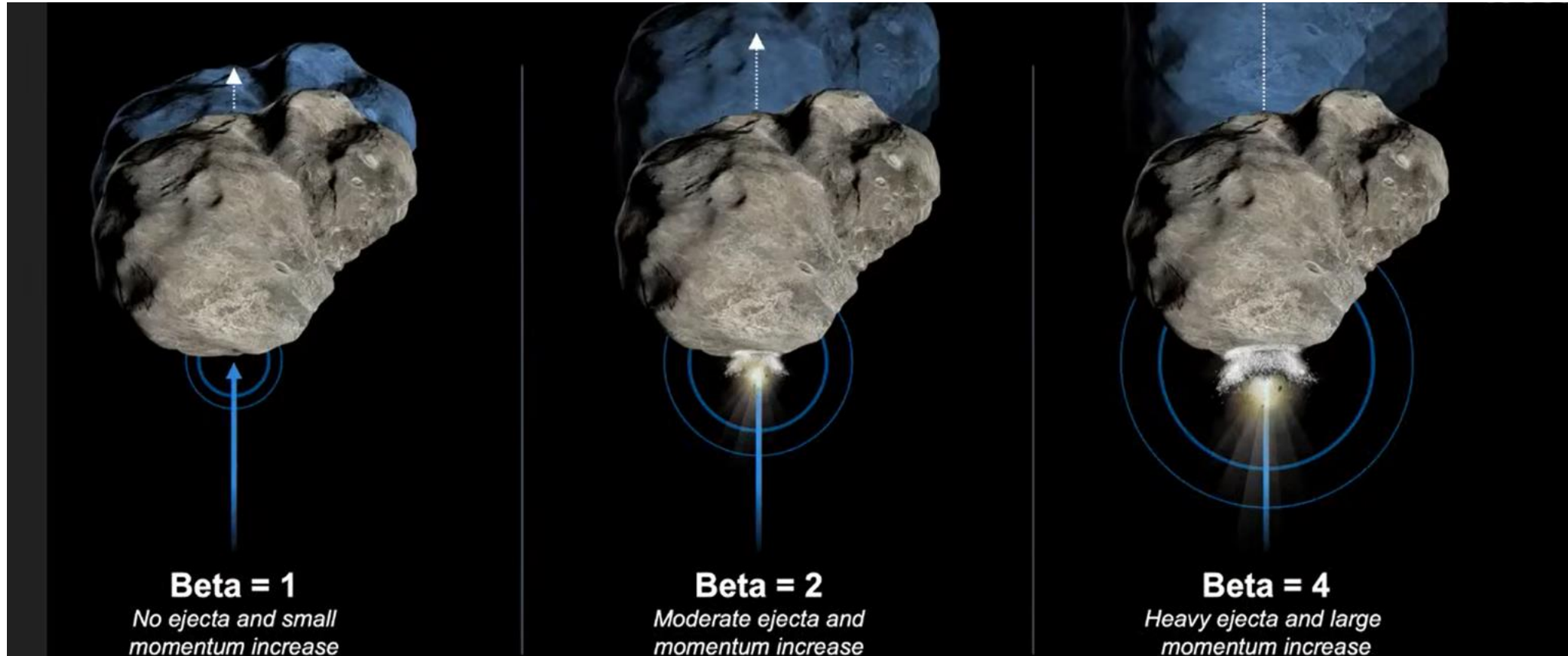
В результате приращение скорости $dV/V = \beta * m/M$.

Коэффициент β зависит от свойств астероида (структуры, несферичности), степени нецентральности удара.

Оценки результатов кинетического воздействия будут отличаться большим разбросом.



Fabio Ferrari etc. Morphology of ejecta features from the impact on asteroid Dimorphos. Nature communications, 2025.

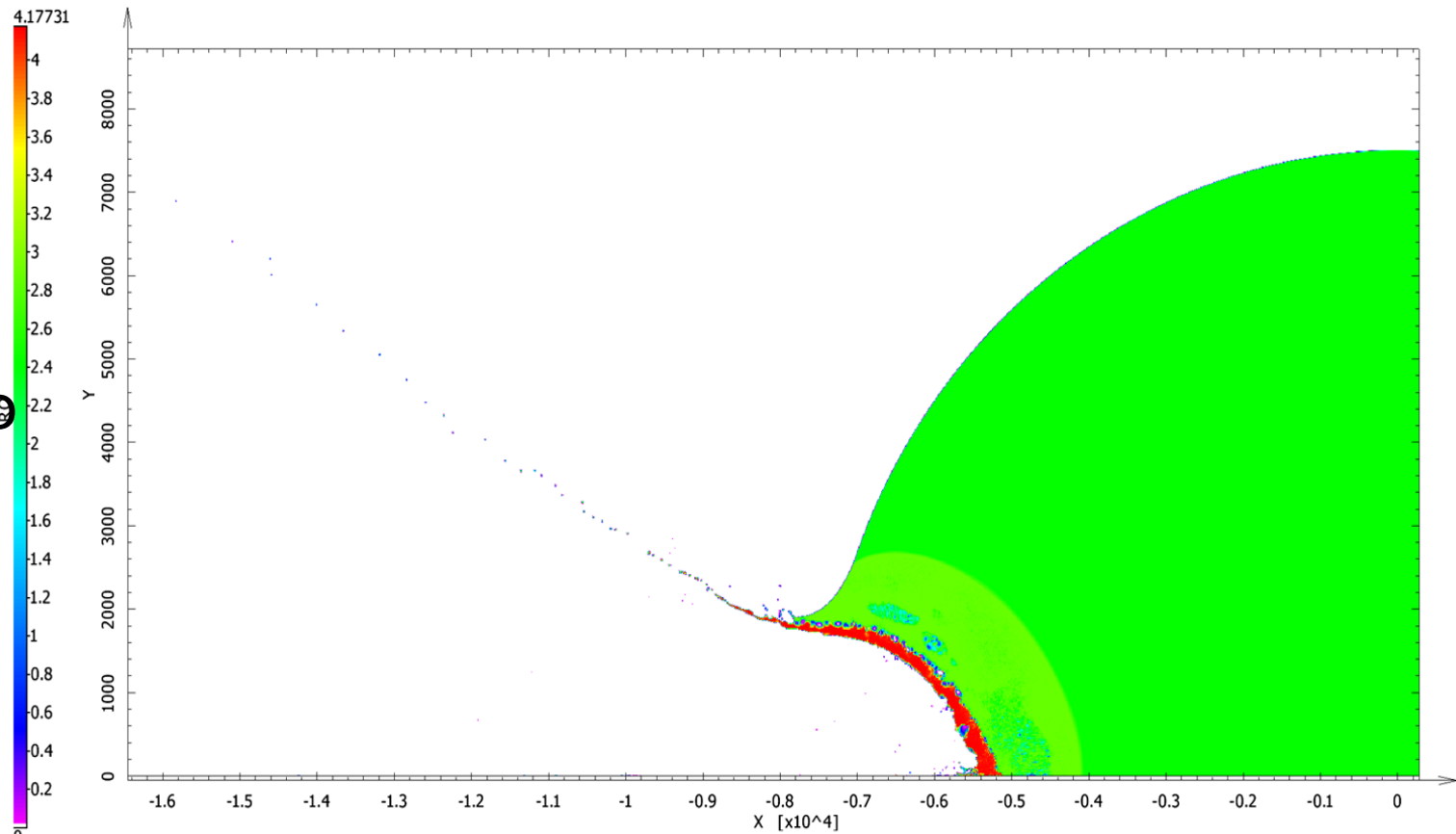


Нет выброса,
малое изменение импульса

малый выброс,
изменение импульса

Сильный выброс,
сильное изменение импульса

В расчете порода моделировалась пористым кварцем, задавалось многофазное уравнение состояния. В расчете получено полиморфное превращение кварц→стишовит (индикатор импактного события). Характерный диаметр кратера — **20...40 м** в зависимости от модели прочности.



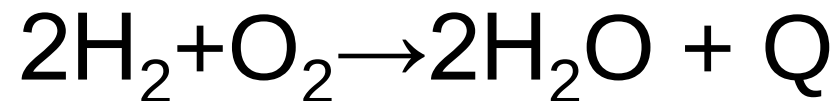
Результат двумерного моделирования

«Final estimated crater diameters from simulations past 100 ms range from **~15 m** for cases with the highest Y_d to **50–60 m** for cases with the lowest Y_d ». [The Planetary Science Journal. Dimorphos's Material Properties and Estimates of Crater Size from the DART Impact. Angela M. Stickle etc.]

В эксперименте DART возможно проявление детонационного эффекта Э.М.Дробышевского*.



Суть гипотезы состоит в следующем. Многие луноподобные тела за орбитой Марса имеют массивные (до 40-60% от полной массы) ледяные оболочки. Лед загрязнен различными включениями: силикатами, окислами и сульфидами металлов, углистыми веществами и органикой. При движении в замагниченной плазме солнечного ветра или магнитосфер планет-гигантов, таких как Юпитер, в ледяных оболочках подобных тел возбуждается электрический ток, ведущий к электролитическому разложению льда. Объемный электролиз под большим давлением приводит к накоплению во льдах в виде твердого раствора продуктов разложения. По оценкам, за $3 \cdot 10^8$ лет концентрация ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$) в толще льда может достигнуть $\sim 15\%$ по массе. Такая концентрация потенциально сильно взаимодействующих компонент может привести к тому, что под воздействием ударной волны достаточной интенсивности, обусловленной ударом о планету крупного метеорита, протекание реакции горения за фронтом УВ приведет к ее превращению в нормальную детонационную волну.



**Брагин А.А., Вронский А.В., Демьяновский С.В., Дробышевский Э.М., Коваленко Г.В., Симоненко В.А., Сучков В.А., Шнитко А.С. Численное моделирование взрыва планет с массивными ледяными оболочками. / Препринт РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997.*

Образцы астероида Итокава были собраны космическим зондом Хаябуса и доставлены на Землю в 2010 г.

На поверхности пылинок обнаружено достаточно большое количество молекул H_2O [Cheng Zhu etc. Regenerative water sources on surfaces of airless bodies. *Nature astronomy*, 2023.]. При увеличении этих частиц и их содержимого в масштабе, получилось бы **20 л воды / 1 м³**

камня. Наличие воды на данном астероиде оказалось для ученых большой неожиданностью - астероиды класса S, к которым относится Итокава, ранее никогда не рассматривались в качестве возможных носителей воды.

Большое количество воды присутствовало именно на тех частицах, которые находились под воздействием Солнца. Связано это с тем, что солнечный ветер содержит большое количество ионов водорода, которые постепенно оседали на поверхности астероида и проникали внутрь силикатного материала.

Диморф (S/2003 65803) относится к хондритам S-класса (силикаты).

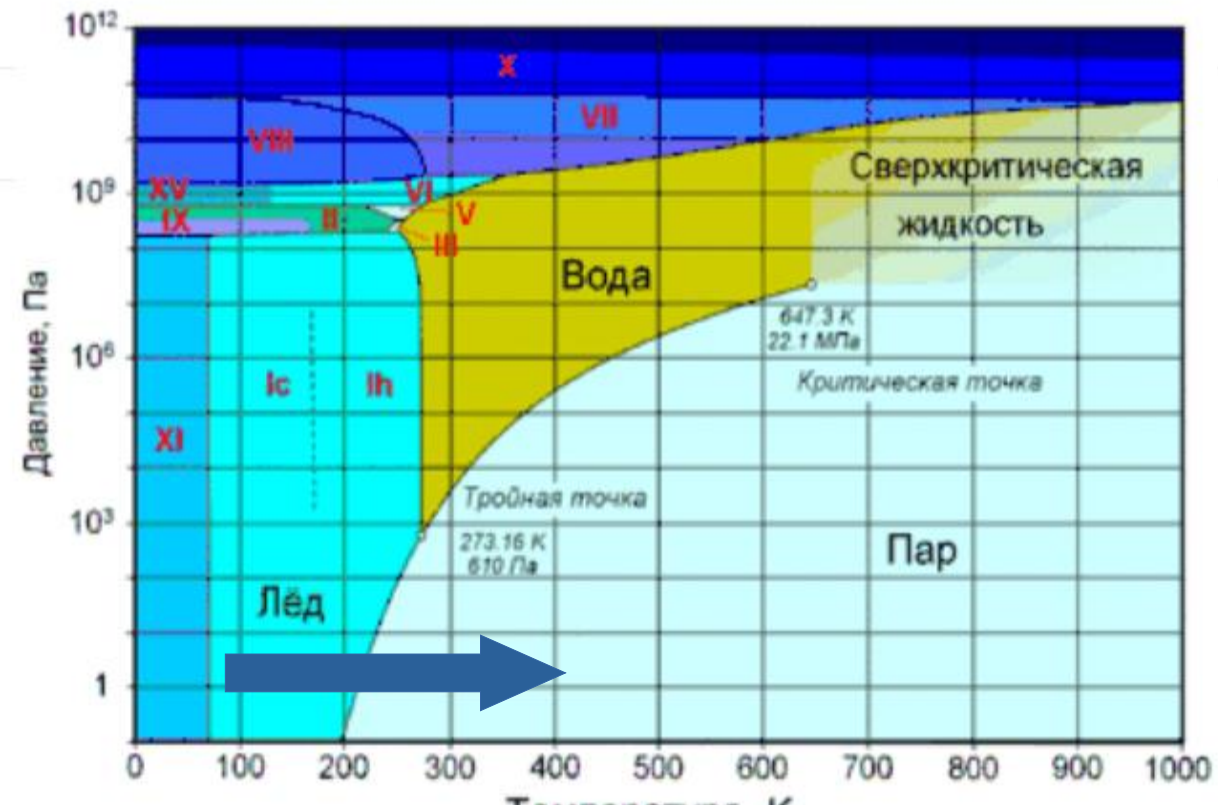
Возможно, реакция «сработала» с образованием мощного выброса с приповерхностного слоя и появлением дополнительной реактивного тормозного импульса. Однако детонация оказалась недостаточно сильной, чтобы себя развить (расходящаяся волна затухает).



Астероид Итокава с борта КА Хаябуса



Испарение льда в экстремальных условиях космоса происходит через процесс **сублимации**.

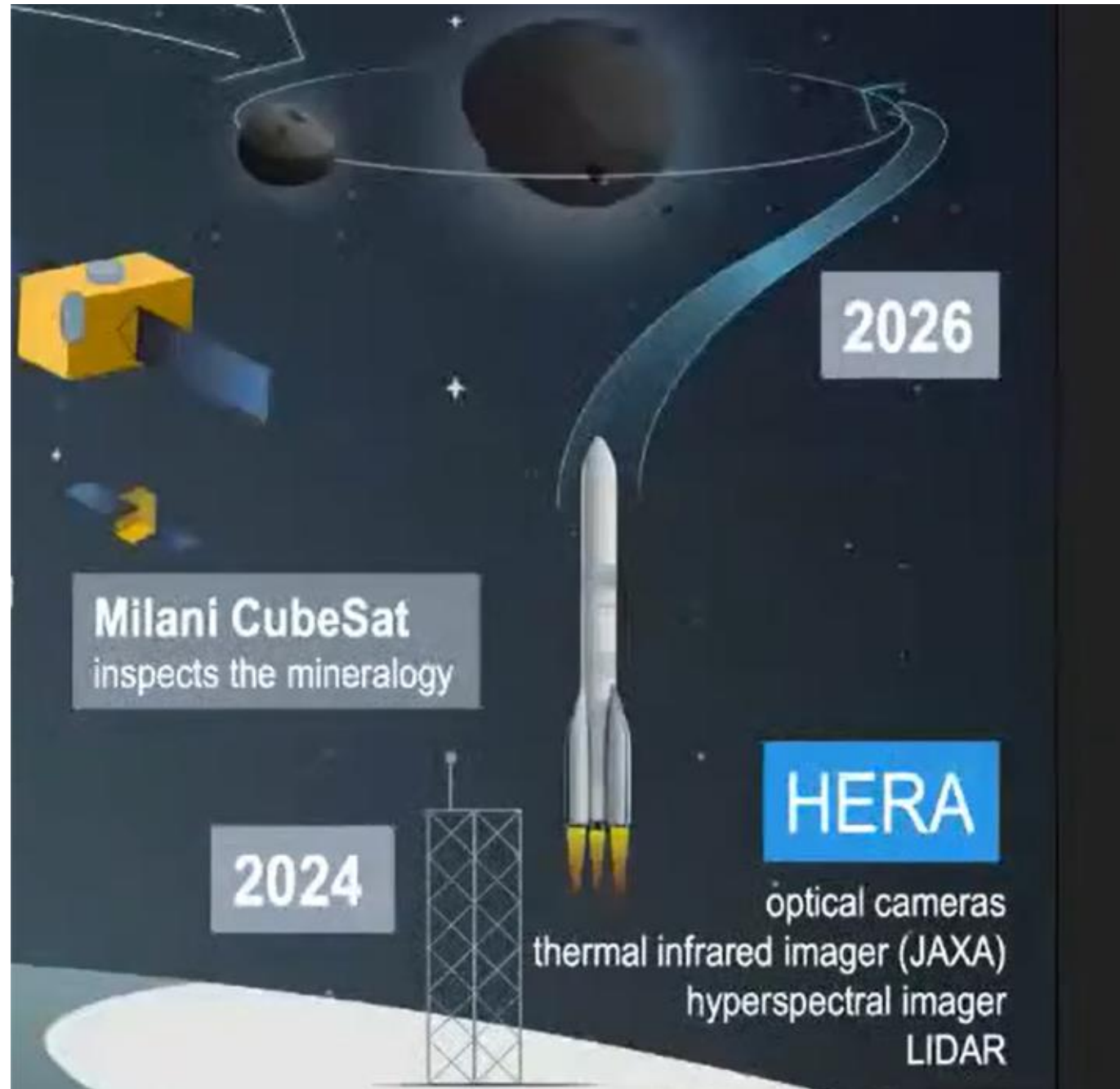


давление в межпланетном пространстве $\ll$ давления тройной точки воды $P \sim 611$ Па

Октябрь 2024 г. - к Дидиму
запущен КА «Гера» (Hera).

Он достигнет Дидима в 2026 г.

«Гера» проведет наблюдения
за орбитой Диморфа и его
поверхностью, получит сведения
о размере и геоморфологии
ударного кратера.



Спасибо за внимание!