

# Неизвестная популяция двойных астероидов, открытая с помощью кратеров на Марсе

Dmitrii Vavilov<sup>1,2</sup>, Benoit Carry<sup>1</sup>, Anthony Lagain<sup>3</sup>, Anthony Guimpier<sup>4</sup>, Susan Conway<sup>4</sup>, Hadrien Devillepoix<sup>3</sup>, Sylvain Bouley<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Observatoire de la Côte d'Azur, Universite Côte d'Azur, CNRS

<sup>2</sup>Institute of Applied Astronomy Russian Academy of Sciences

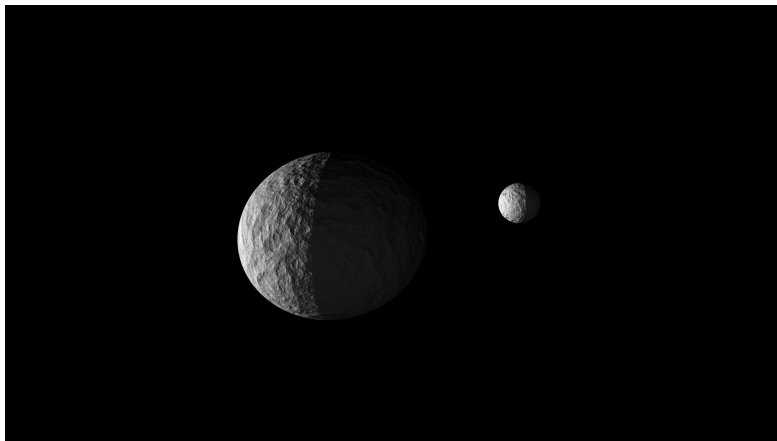
<sup>3</sup>School of Earth and Planetary Science, Curtin University

<sup>4</sup>Laboratoire de Planetologie et Geodynamique, Universite de Nantes, CNRS

<sup>5</sup>GEOPS-Geosciences Paris Sud, Universite Paris-Sud, CNRS

27 апреля, 2022

# Двойные астероиды



link

# Двойные астероиды

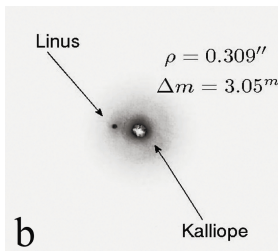
## Большие двойные

Основной компонент  $\gtrsim 100$  km  
 $\approx 2\text{-}3\%$  от кол-ва астероидов

Образование:

- столкновения (маленький спутник)
- изначальное (равные компоненты)

Наблюдаются на изображениях в телескоп



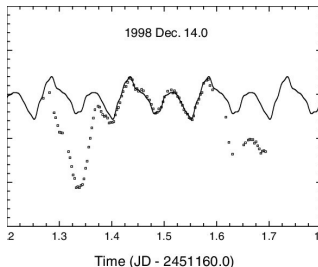
## Маленькие двойные

Основной компонент  $\lesssim 10$  km  
 $\approx 15\%$  от кол-ва астероидов

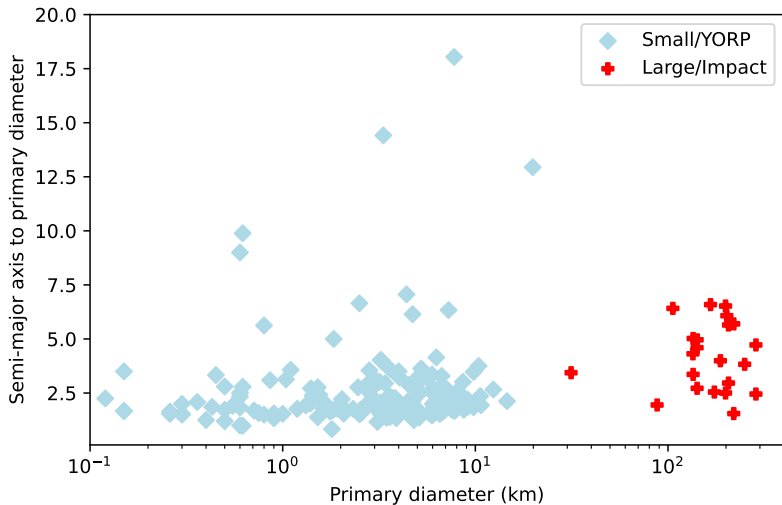
Created by:

YORP раскрутка + выбросы +  
реконфигурация

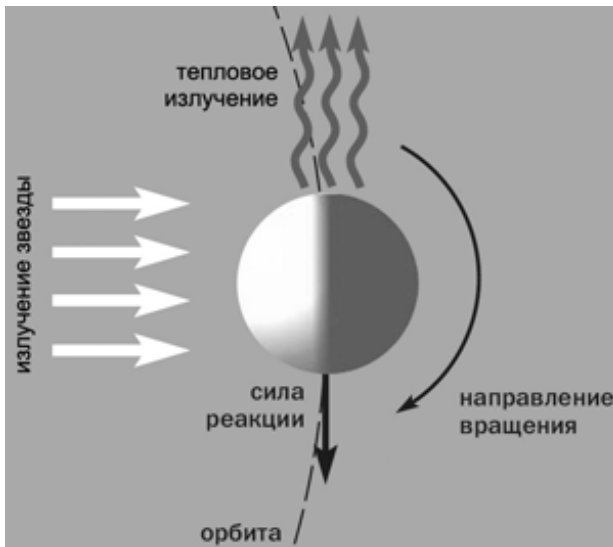
Наблюдаются через обработку  
световых кривых



# Двойные астероиды

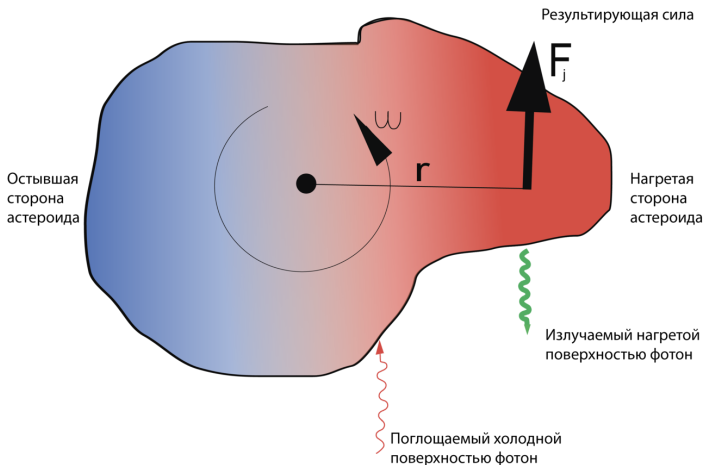


# Эффект Ярковского



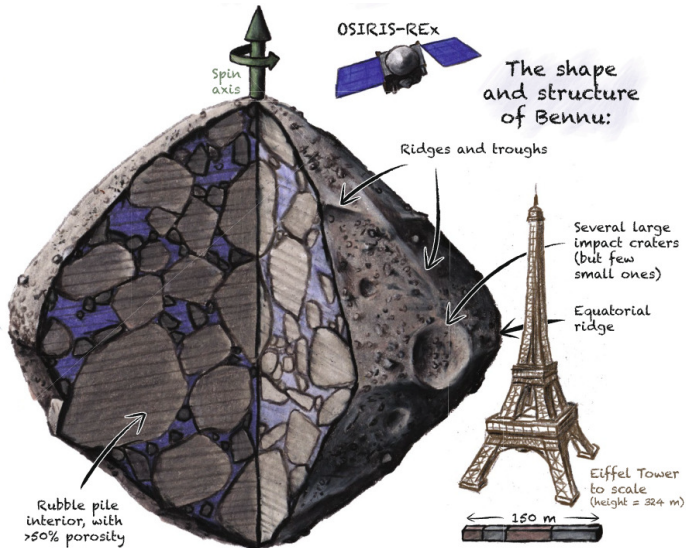
[https://www.gazeta.ru/science/2008/07/10\\_a\\_2778860.shtml](https://www.gazeta.ru/science/2008/07/10_a_2778860.shtml)

# YORP (Ярковского — О'Кифа — Радзиевского — Пэддэка) эффект



Автор: Rinby - Собственная работа, GFDL 1.2+, [link]

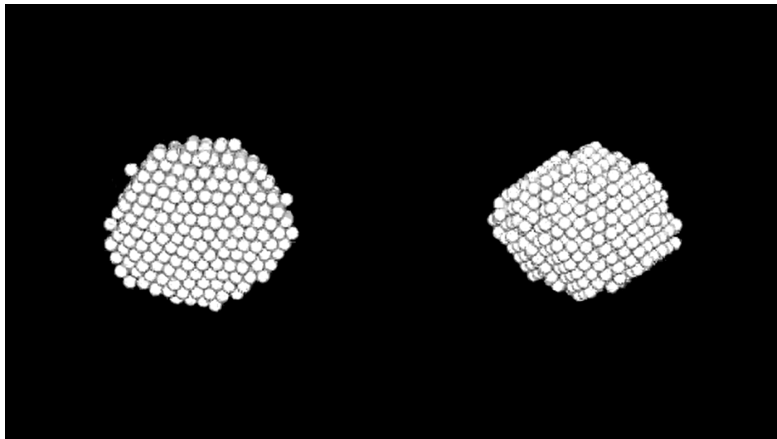
# Строение астероида



Near-Earth asteroid  
(101955) Bennu  
(dimensions: 564 m x 536 m x 498 m)

Source: J.T. Keane, Nature Geosci.  
DOI:10.1038/s41561-019-0342-6

# YORP spin-up and reconfiguration





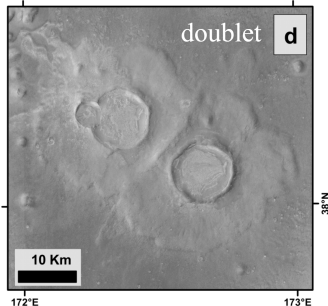
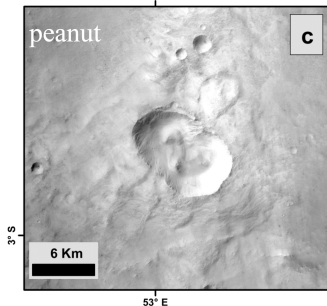
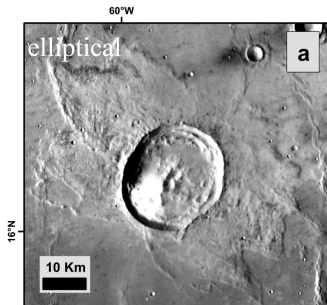
# Немного о маленьких двойных астероидах

- Их  $\approx 15\%$  от общего числа астероидов размером более 300 м.
- Основной компонент  $\lesssim 10$  km.
- Отношение диаметров компонентов около 0.3.
- Большая полуось к диаметру главного компонента около 4.
- Плоскость вращения компонент близка к гелиоцентрической плоскости.
- Скорость вращения главного компонента близка к барьерной.
- Открываются и наблюдаются в основном с помощью наблюдения световых кривых.

# Crater

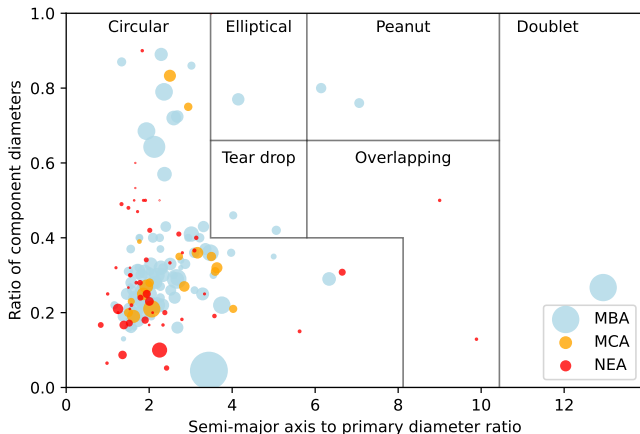


# Типы двойных кратеров



# Почему 15% двойных астероидов и не 15% двойных кратеров

- Miljković et al. (2013) объяснила это



- Многие из кратеров на Марсе в ее базе данных были ориентированы Север-Юг, а не Восток-Запад.

- Было найдено 31,778 кратеров на Марсе, размером более 4 км в диаметре и расположенные между  $50^\circ$  широтами.

- Было найдено 31,778 кратеров на Марсе, размером более 4 км в диаметре и расположенные между 50° широтами.
- Мы нашли 150 кратеров, оставленных двойными астероидами.

Типа кратера	Количество (% от всех)
Doublet	28 (0.088%)
Peanuts	44 (0.138%)
Overlapping	17 (0.053%)
Tear	23 (0.072%)
Elliptical	13 (0.041%)
Всего	125 (0.393%)

Еще 25 были найдены, правда по классификации Miljković et al. они относятся к круговым, хотя двойная структура заметна

- Было найдено 31,778 кратеров на Марсе, размером более 4 км в диаметре и расположенные между 50° широтами.
- Мы нашли 150 кратеров, оставленных двойными астероидами.

Типа кратера	Количество (% от всех)
Doublet	28 (0.088%)
Peanuts	44 (0.138%)
Overlapping	17 (0.053%)
Tear	23 (0.072%)
Elliptical	13 (0.041%)
Всего	125 (0.393%)

Еще 25 были найдены, правда по классификации Miljković et al. они относятся к круговым, хотя двойная структура заметна

- Приблизительно 20% из найденных кратеров широкие (расстояние между компонентами астероида > 10 диаметров главного компонента)

Collins et al. (2005):

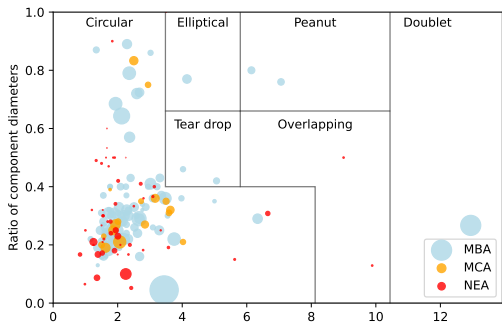
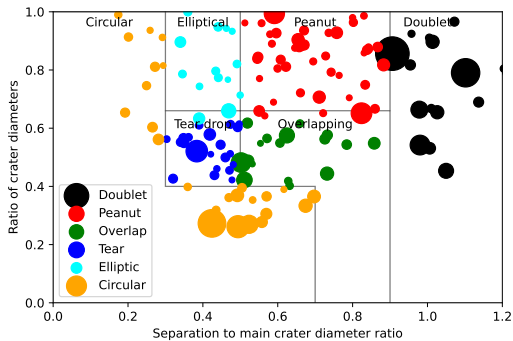
$$D_t = 1.161 \left( \frac{\rho_i}{\rho_t} \right)^{\frac{1}{3}} L^{0.78} v_i^{0.44} g^{-0.22} \sin^{\frac{1}{3}}(\theta) \quad (1)$$

где  $D_t$  диаметр транзитного кратера,  $\rho_i$  и  $\rho_t$  плотности снаряда (взятая как  $1.9 \text{ g/cm}^3$ , плотность астероида Itokawa, типичная для малых астероидов Fujiwara et al. 2006; Carry 2012), и поверхности Марса ( $3.0 \text{ g/cm}^3$ , Archinal et al. 2018),  $L$  размер снаряда,  $v_i$  скорость столкновения у поверхности,  $g$  гравитационная постоянная Марса, и  $\theta$  угол столкновения ( $45^\circ$ ).

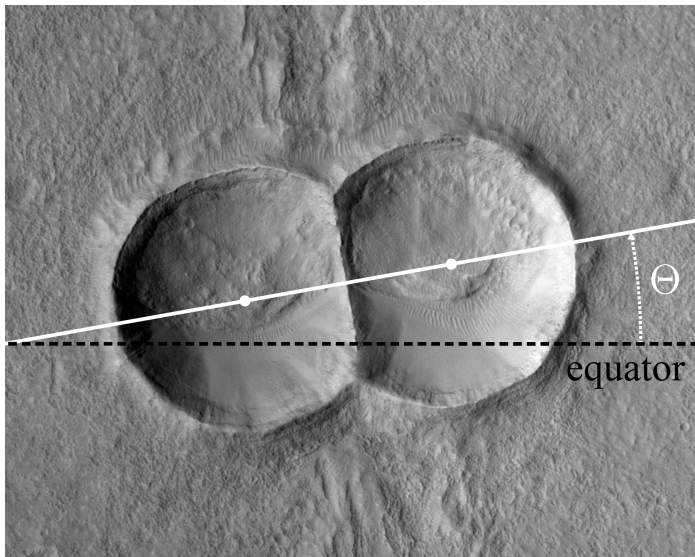
Размер кратеров, которые были найдены, находятся в пределах  $1.5 \text{ km} < D_m < 40.5 \text{ km}$

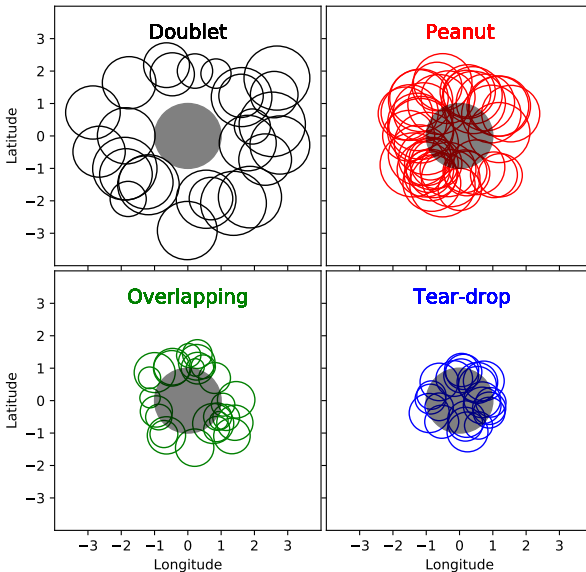
Что дает размеры астероидов между 70 m and 3.8 km.

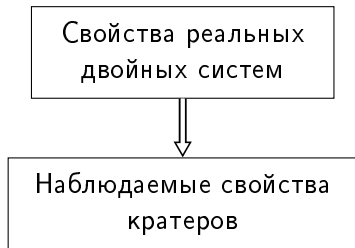




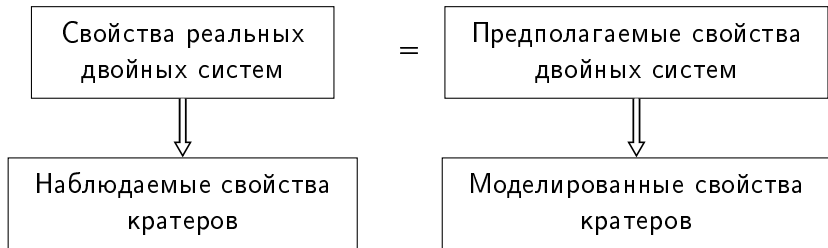
# Что мы измеряем?

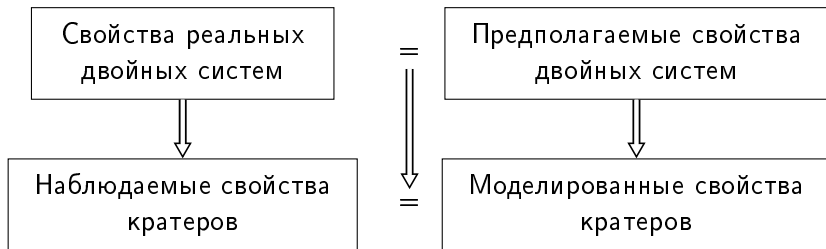


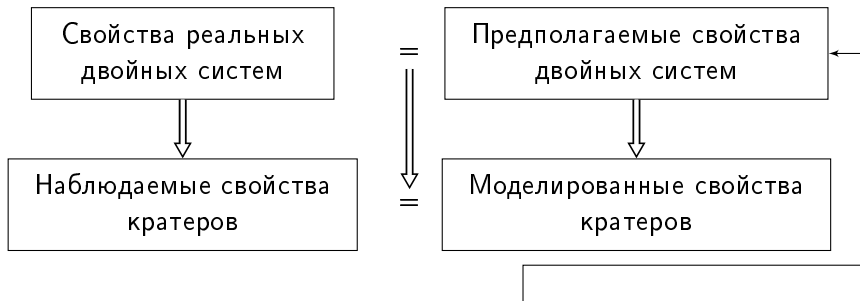












Используем наблюдаемые свойства 'малых' двойных астероидов, которые в основном получены через наблюдения световых кривых



Чтобы получить свойства моделированных кратеров мы:

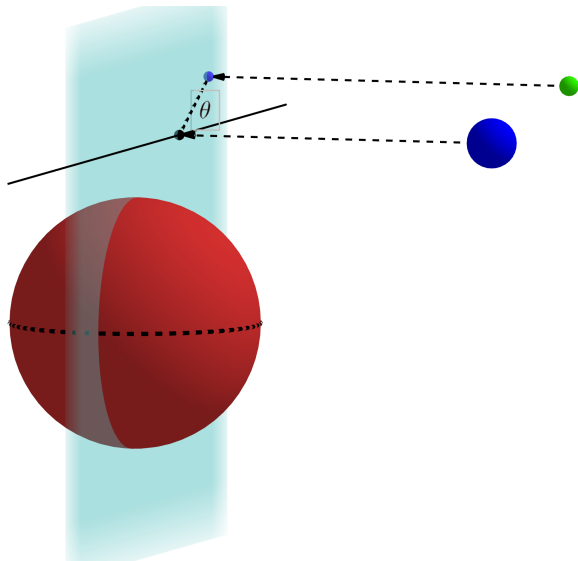
- Рассматриваем все известные астероиды с Mars MOID  $< 0.05$  au.
- Предполагаем, что они все двойные.

Чтобы получить свойства моделированных кратеров мы:

- Рассматриваем все известные астероиды с Mars MOID  $< 0.05$  au.
- Предполагаем, что они все двойные.
- Предполагаем, что орбита компонентов вокруг друг друга лежит в той же плоскости, что и гелиоцентрическая орбита.
- Предполагаем круговую совместную орбиту.

Чтобы получить свойства моделированных кратеров мы:

- Рассматриваем все известные астероиды с Mars MOID  $< 0.05$  au.
- Предполагаем, что они все двойные.
- Предполагаем, что орбита компонентов вокруг друг друга лежит в той же плоскости, что и гелиоцентрическая орбита.
- Предполагаем круговую совместную орбиту.
- Каждую двойную систему мы помещаем в точку MOID.
- Перебираем все возможные взаимные положения компонент
- Положения компонент проектируем на плоскость цели
- Вычисляем угол  $\theta$ .

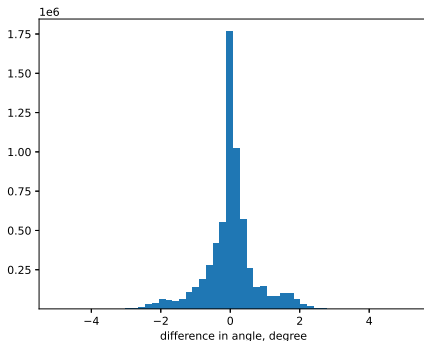


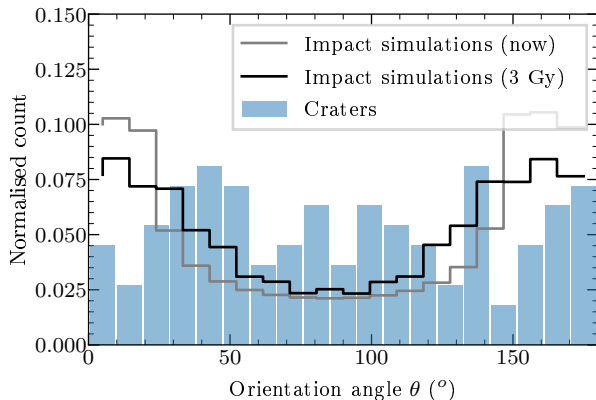
# А это корректно?

- 1 Гравитация Марса может изменить взаимную орбиту компонент
- 2 Угол  $\theta$  может отличаться в разных точках столкновения с Марсом

Сравнение 'простого' подхода с аккуратным

- Гравитация Марса не изменяет наклон и расстояние между компонентами.





Тест Колмогорова-Смирнова:

p-value для текущего наклона Марса 0.01%

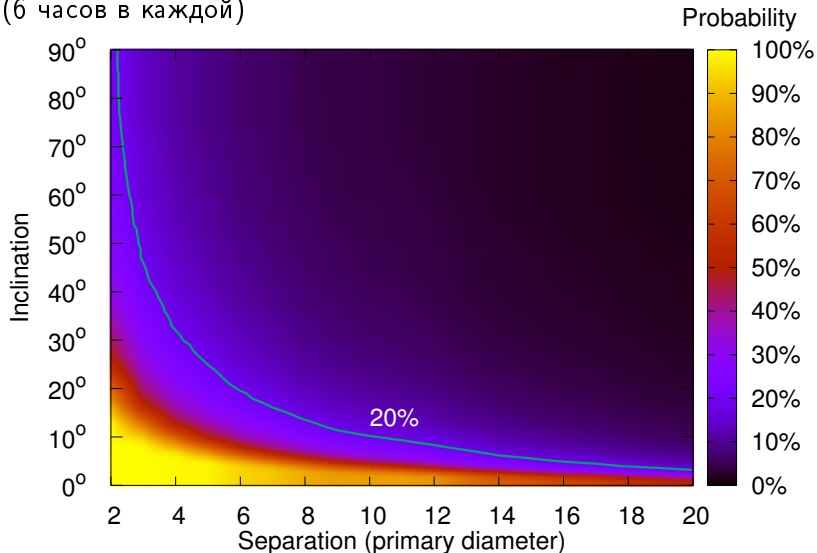
p-value для суммарного наклона Марса 1.8%

Мы нашли популяцию двойных астероидов со следующими свойствами:

- Большое расстояние между компонентами.
- Приблизительно одинакового размера компоненты.
- По-видимому, изотропное распределение наклона взаимной орбиты.

# Почему мы их не видим?

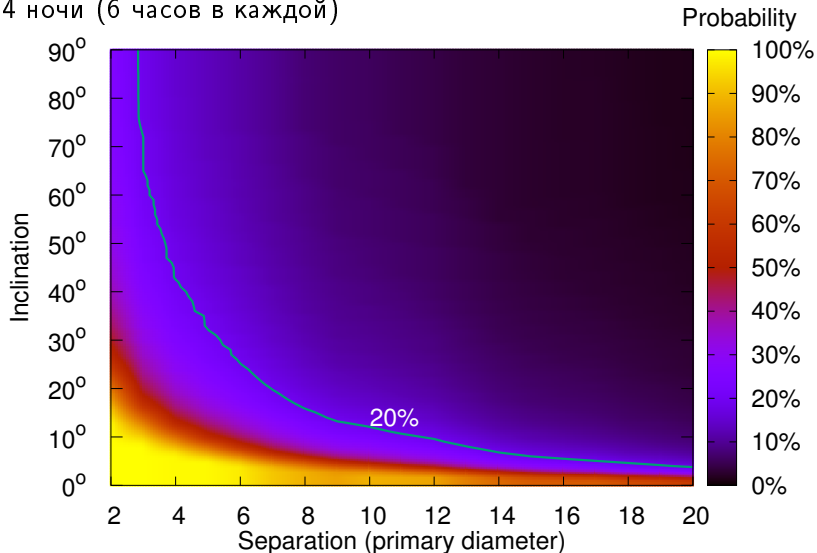
Вероятность обнаружить, наблюдая в течении 8 ночей подряд (6 часов в каждой)





# Можно ли улучшить наблюдательную программу?

Наблюдая в течении 4 ночей подряд и затем через 1 месяц еще 4 ночи (6 часов в каждой)



# Радарные наблюдения?

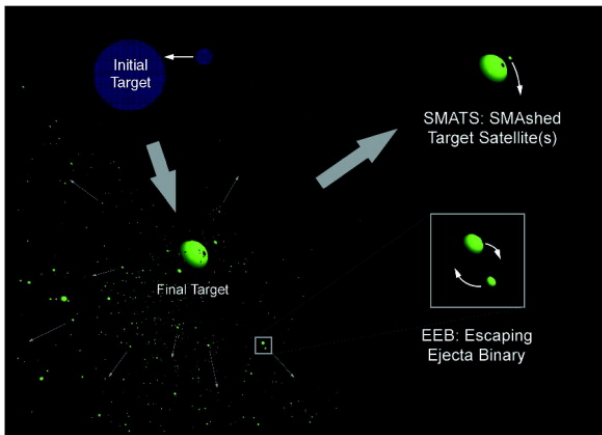
- Ответственны за больше половины открытий двойных астероидов, сближающихся с Землей.
- Не имеют проблем, если наклон взаимной орбиты большой.
- Могут наблюдать только на небольшом расстоянии от Земли, т.е. околоземные объекты.
- Околоземные астероиды, в основном, пришли из внутренней части главного пояса через резонанс  $\nu_6$  (Bottke et al. 2002; Granvik et al. 2017), куда попали с помощью эффекта Ярковского (Vokrouhlický et al. 2015).
- Как результат популяция ОЗО состоит из астероидов, с близким к перпендикулярным осям вращения и ретроградным вращением (La Spina et al. 2004).
- Таким образом большинство околоземных объектов уже ориентированы таким образом, чтобы создать двойной астероид через YORP spin-up эффект.

Есть несколько наблюдаемых объектов, которые являются кандидатами в такие широкие двойные астероиды.

(1509) Esclangona, (3749) Balam, (4674) Pauling, (22899) 1999 TO14, (17246) 2000 GL7, (317) Roxane.

- Расстояния  $> 20$  радиусов главного компонента.
- Быстрое вращение обоих компонент.

## Escaping Ejecta Binaries (*Dudra et.al 2004*)



Почему быстро вращаются?

- YORP spin-up (Jacobson and Scheeres 2011)  
Но тогда наклон взаимной орбиты должен быть близок к нулю.
- Сближения двойного астероида с планетами (Fang and Margot 2012).  
Однако некоторые из кандидатов были найдены в зоне, где нет сближений с планетами.
- Binary YORP эффект (Jacobson et al. 2014).  
Может объяснить большое расстояние, быструю скорость вращения, близкие размеры, нахождение в разных областях (где нет планет), однако не может объяснить видимое, близкое к случайному, углы наклона взаимных орбит.

- 1 Неявно найдена популяция малых двойных астероидов со следующими свойствами:
  - Большое расстояние между компонентами.
  - Близкие размеры компонент.
  - По-видимому, случайное распределение углов наклонов взаимных орбит.
- 2 Эта популяция не похожа на те двойные астероиды, которые мы привыкли видеть.
- 3 Их очень сложно наблюдать.
- 4 Есть несколько предложенных механизмов образования таких систем, но они не могут объяснить все свойства.

**Таблица:** Values of the different parameters used in the numerical integrations (see text).

	Considered values	Unit
$V$	5, 10, 15	(km/s)
$M_1$	$10^9, 10^{10}, 10^{11}, 10^{12}, 10^{13}, 10^{14}, 10^{15}, 10^{16}$	kg
$\gamma$	1,2,4,6,8,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100	%
$T$	12, 24, 36, 48, 240	h
$p$	-0.9, -0.5, 0, 0.5, 0.9	$R_{\text{target}}$
$i$	0, 45, 90	$^\circ$