

Первый межзвездный астероид Оумуамуа (1I-2017U1)



Бусарев В.В.

ГАИШ МГУ

Обстоятельства обнаружения

Объект 1I-2017U1 был обнаружен 19 октября 2017 г. с помощью телескопа Pan-STARRS1 (США) (автоматический телескоп с диаметром зеркала 1,8 метра и проникающей способностью до 22-й зв. величины) (Meech+, 2017), предназначенного для обнаружения новых астероидов и комет. По параметрам орбиты U1 (будем так его называть для простоты) астрономы поняли, что это необычный объект, – его движение не соответствовало известным телам Солнечной системы. Крайне большой эксцентриситет как во время прибытия, так и после (соответствующий гиперболической траектории) и высокая начальная скорость указывают на то, что астероид никогда не был связан гравитационно с Солнечной системой и с высокой вероятностью является межзвёздным объектом (Williams, 2017; Meech+, 2017).

Обстоятельства обнаружения

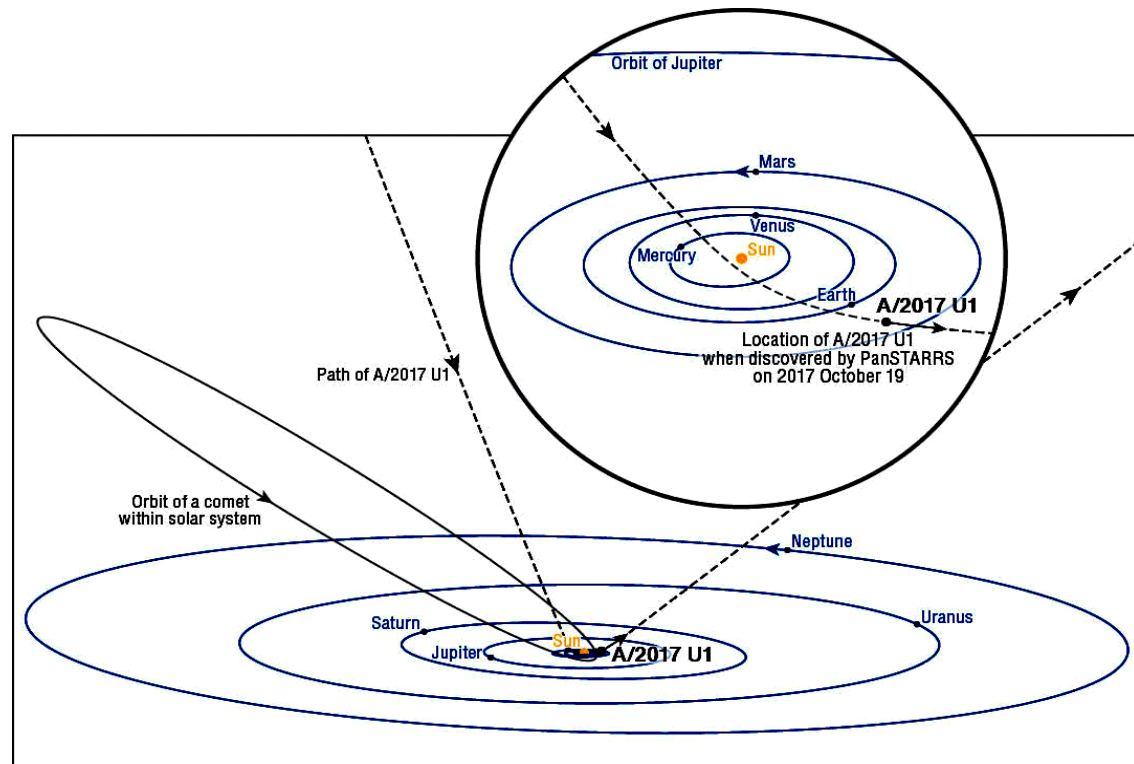
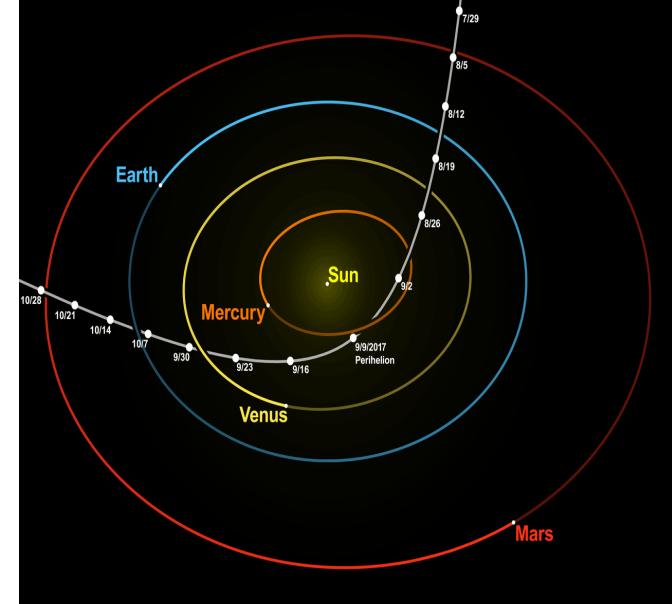
- Было рассчитано (данные JPL NASA), что U1 прошёл через перигелий 9 сентября 2017 года на расстоянии 0,256 а. е. от Солнца (или на 17 % ближе к Солнцу, чем минимальное расстояние Меркурия) со скоростью 87,7 км/с . 14 октября 2017 он прошел на расстоянии 0,1616 а. е. от Земли, т. е. за 5 дней до своего обнаружения.
- По параметрам орбиты U1 предположили, что он мог быть выброшен из звездной ассоциации созвездия Киля примерно 45 миллионов лет назад (Gaidos+, 2017). Однако сейчас эта звездная ассоциация расположена на небе достаточно далеко от созвездия Лиры – направления, с которого объект залетел в Солнечную систему.

Обнаружение, факты

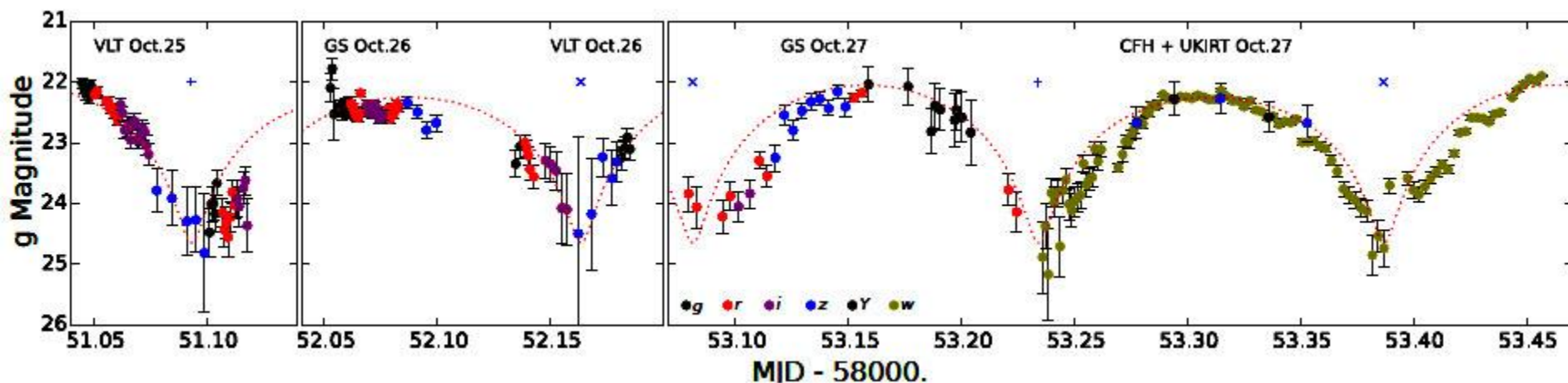
•Первый межзвездный объект, вошедший в Солнечную систему по гиперболической орбите с эксцентриситетом 1.188 ± 0.016 со стороны Северного полюса (со ср. скор. отн. Солнца 26.22 ± 0.08 км/с), был обнаружен при удалении 19 октября 2017 г. автомат. 1.8-м телескопом Pan-STARRS1 на Гавайских островах. Ему присвоили номер 1I/2017 U1 и дали имя собственное – Оумуамуа (Oumuamua) или «посланник» в переводе с гавайского.

•Как оказалось, этот объект прошел перигелий 9 сентября 2017 г. на расстоянии 0.254 ± 0.002 а. е. от Солнца, и теперь быстро уходит из Солнечной системы, достигнув гелиоцентрического расстояния более 3 а. е.

•Наблюдения Оумуамуа, которые успели провести на наземных телескопах, показывают, что он имеет крайне вытянутую, "ракетообразную" форму (~400 x 30 м) и розоватый цвет.



Кривая блеска Оумуамуа (U1)

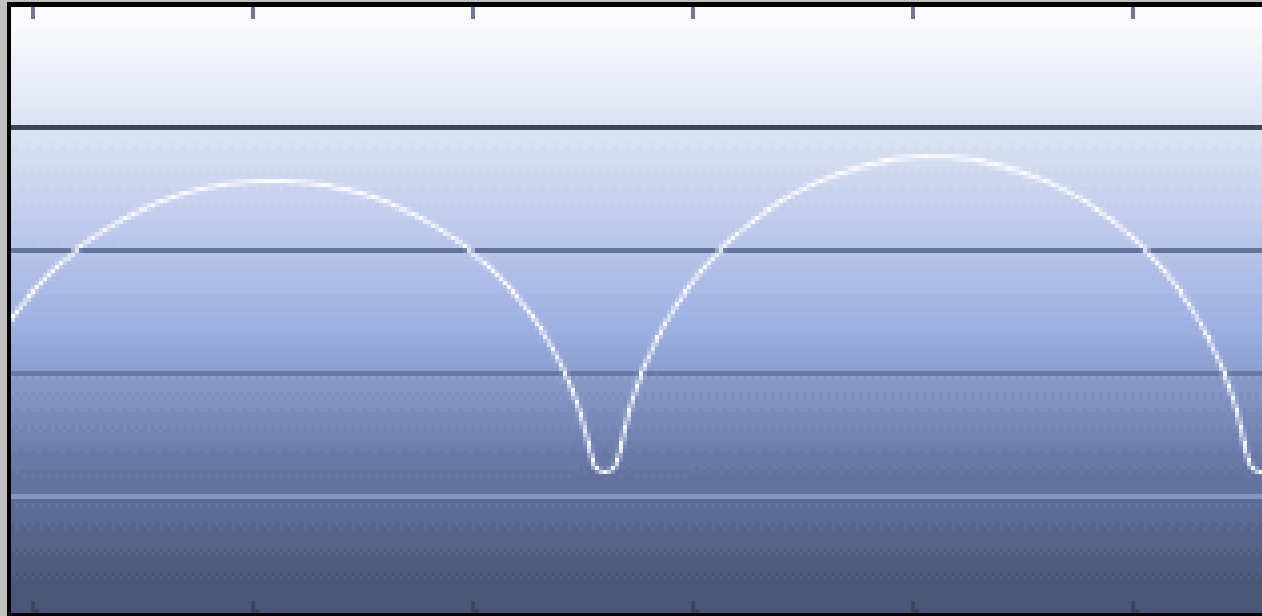


- **Оумуамуа (U1)** обнаружил странные свойства – сильные колебания блеска с амплитудой до **2.5 зв. величин**. Полагая, что колебания блеска обусловлены вращением астероида вокруг оси, астрономы пришли к выводу, что отношение его размеров по двум осям достигает 1:10 (**Meech+, 2017**). Такая большая вытянутость астероида необычна. Прочные трехосные эллипсоиды имеют максимум амплитуды кривой блеска не более **0.9 зв. величин**. Но после уточнения наблюдательных данных соотношение осей U1 было уменьшено до 1:5 (напр., Jewitt+, 2017).

Анимация вращения U1

Как был бы виден
астероид вблизи

Идеализированная кривая
блеска U1



Необычное вращение

- Попытки определить период вращения столкнулись с неожиданными трудностями. Разные авторы давали различные оценки периода вращения Оумуамуа – 8.26 ч, 7.34 ч и 6.9 ч. Оказалось, что ни один период вращения не может объяснить наблюдаемые колебания блеска этого астероида (**Fraser+, 2017**). Но кривую блеска можно описать, предположив, что астероид вращается сразу по двум осям, т.е. «кувыркается», и периоды вращения по этим осям составляют **7.4** и **7.94** часов. Феномен кувыркания уже наблюдался у некоторых небольших (размерами меньше 200 м) астероидов Солнечной системы. Как правило, он объясняется недавним столкновением или воздействием приливных сил при близких пролетах планет, или эффектом Ярковского.
- Оценки времени релаксации кувыркания для межзвездного астероида составляют до десяти млрд. лет. Скорее всего, Оумуамуа начал хаотически вращаться еще в собственной планетной системе, где он образовался и откуда был выброшен.

Спектральные наблюдения U1 на крупнейших телескопах

- 4.2-м телескоп на Ла-Пальма: 25 октября 2017 г. спектрограф выявил только оптически красное тело.
- 5.1-м Паломарский телескоп (Ye+, 2017): выявлено оптически серое тело.
- 8.2-м очень большой телескоп (VLT ESA): 27 окт. при использовании спектрографа X-shooter в сп. диапазоне 0,3-2,5 мкм были получены дискретные спектры отражения с разным наклоном (см. рисунки далее).
- Активные кометы обладают сильными молекулярными эмиссиями при (за счет колебательных электронных переходов в основное состояние при флуоресценции) на 0,38 мкм (CN) и 0,52 мкм (C₂). Но на полученных зашумленных спектрах Оумуамуа их не видно.
- На спектрах отражения астероидов в видимой и ближней ИК-областях в зависимости от минералогии этих тел могут быть заметные полосы поглощения. В частности, филлосиликаты (или гидратированные силикаты) порождают неглубокую, но широкую полосу поглощения с центром у 0,7 мкм. Высокотемпературные темноцветные минералы (чаще всего пироксены и оливины) вызывают значительную полосу поглощения в диапазоне от 0,75 до 1,1 мкм, с центром у 0,95 мкм. Но на спектрах отражения Оумуамуа такие полосы также отсутствовали.

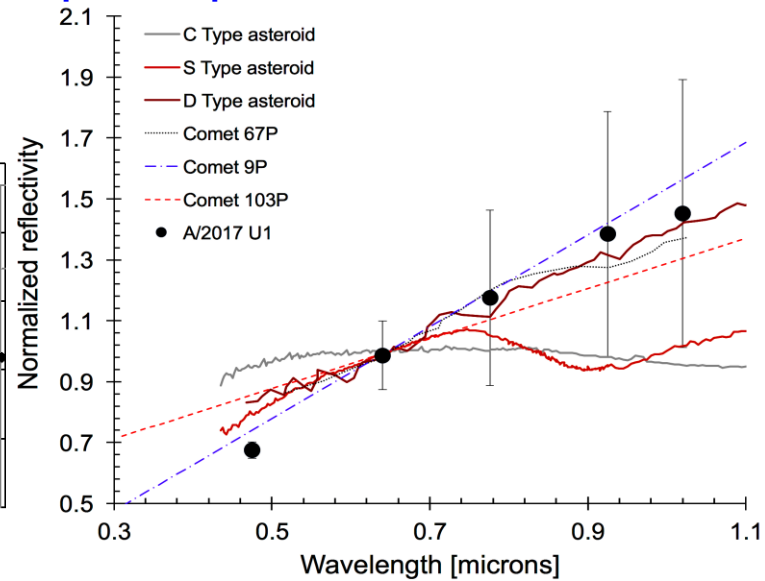
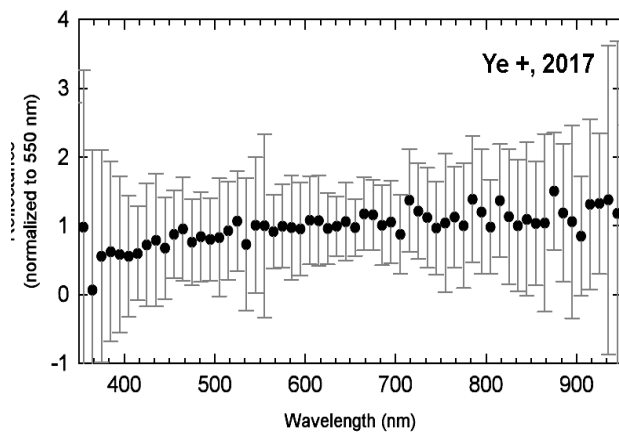
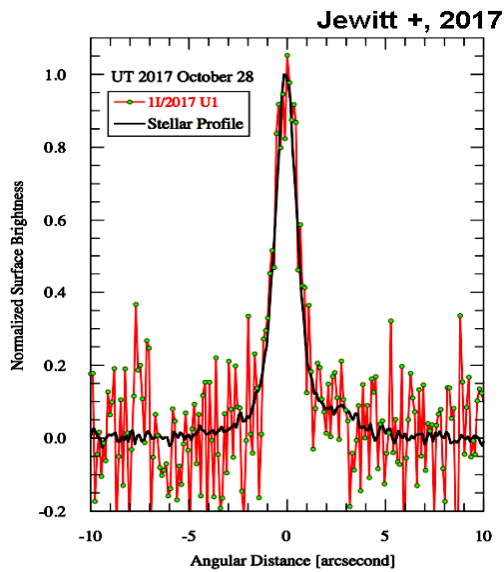
Отсутствие кометной активности и красноватый цвет

Вначале предполагали, что это комета. Но никаких признаков его кометной активности не было обнаружено.

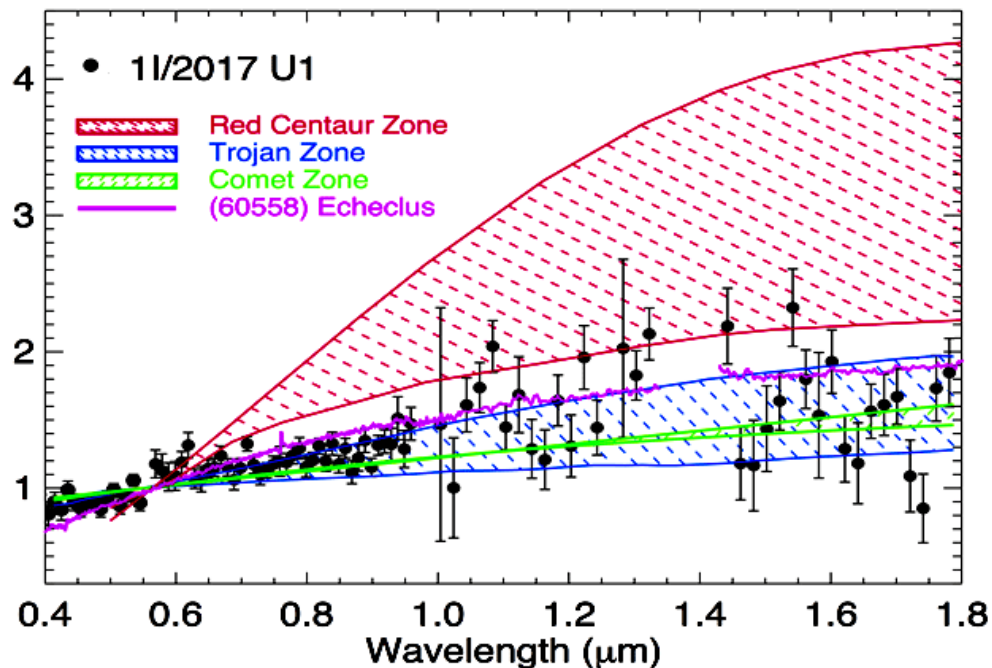
По одним данным, астероид имеет сильный красный оттенок, по другим – его тон в среднем близок к нейтральному (серому). Разные авторы сообщали о его переменном наклоне спектра – от нуля (серый цвет) до 25% на 100 нм (красный цвет). Анализ данных приводит к выводу, что на поверхности астероида есть сильные цветовые вариации: его фоновый цвет – серый (с наклоном спектра всего около 5% на 100 нм), но на нем есть большое красноватое пятно. Как известно, цветовые оттенки твердого вещества характеризуют его состав. Как следует из наших наблюдений и лаб. моделирования (напр., Meech+, 2017; Fraser+, 2017; Busarev +, 2015; Бусарев, 2016), подобные цветовые вариации свойственны астероидам периферии Главного пояса D- и P- типов (с низкотемпературной минералогией и повышенным содержанием органики), а также наблюдаются у объектов пояса Койпера, покрытых азотным, метановым и др. б. сложными по составу льдами и орг. соединениями, подвергнутых сильному радиационному воздействию.

Оумуамуа не проявлял никакой кометной активности: ↓

Спектр отражения Оумуамуа (Meech+, 2017; Ye+, 2017) и астероидов разных типов : ↓



Relative Reflectance



**Более детальное
спектральное
сравнение с другими
объектами**

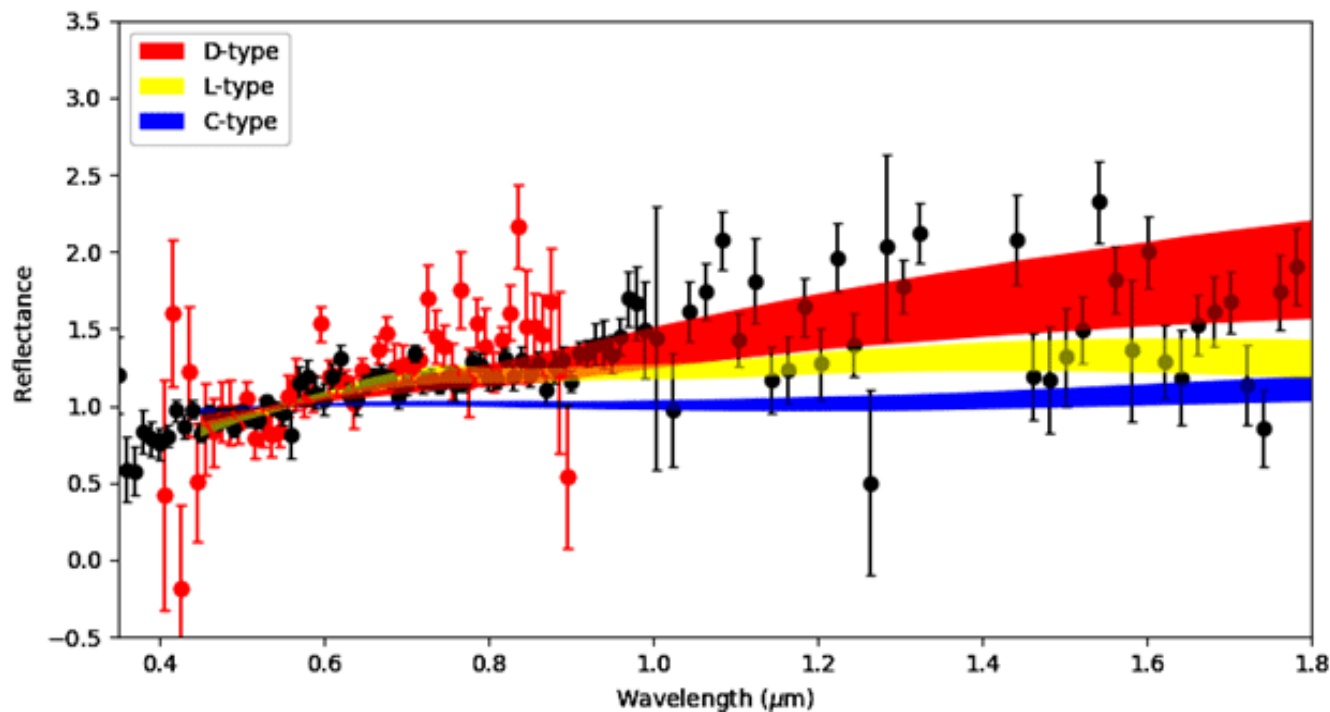
(Fitzsimmons+, 2017)

← ТНО И КОМЕТЫ

(60558 Эчеклус - кентавр)

Спектр отражения U1 (черные точки) наиболее близок к спектрам астероидов D-типа (красные точки)

АСТЕРОИДЫ →



Вероятное внутреннее строение

- Итак, по спектрам отражения U1 лучше всего согласуется с астероидами D-типа. Откуда следует, что на его поверхности может быть нелетучее органическое вещество типа керогена с примесью силикатов, высушенное при нагревании до нескольких сотен градусов по Цельсию (или выше) и подвергнутое сильному и длительному радиационному воздействию.

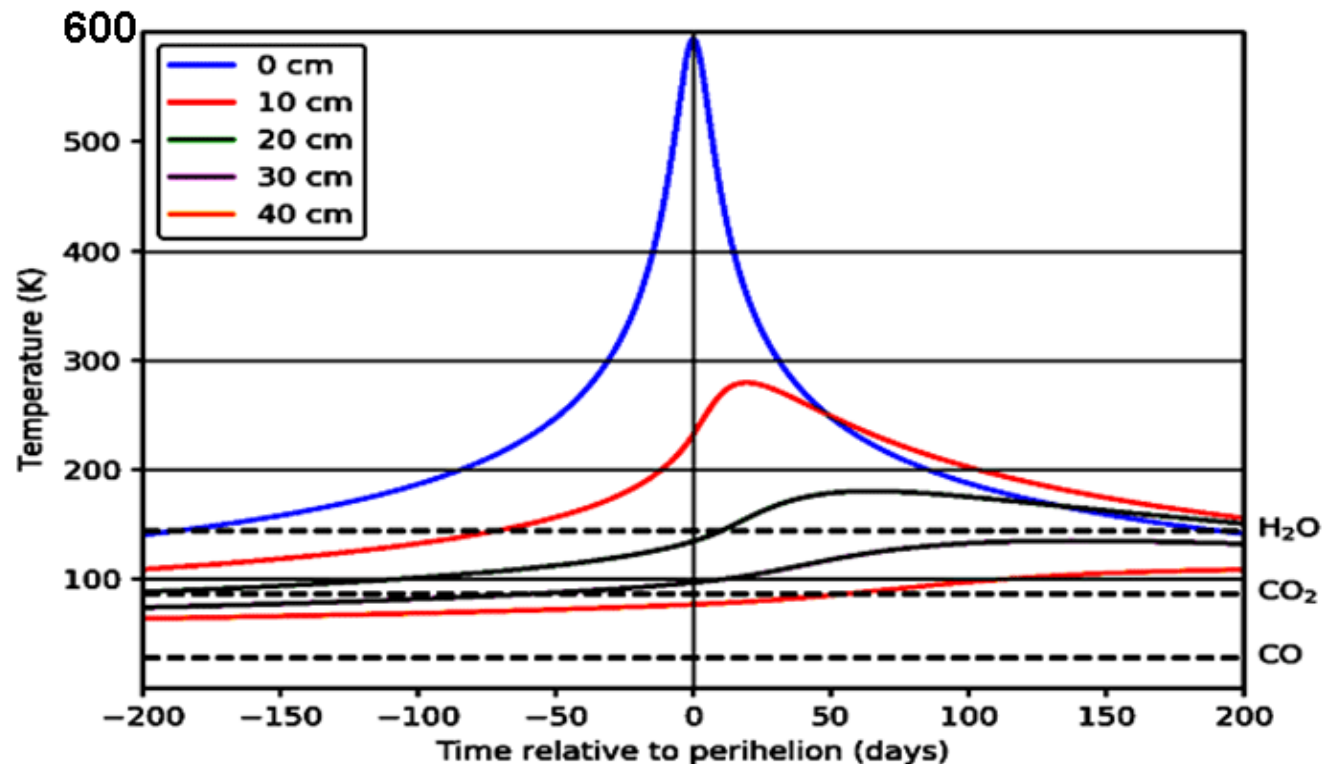
- Но, как показывает моделирование, при толщине слоя такого вещества более 40 см внутри U1 вполне может сохраняться лед.

- А с учетом небольших размеров этого тела (минимальная толщина ~ 20 м) оно вполне могло быть высушено еще при близких пролетах у своей звезды, еще до выброса в межзвездное пространство. При огромном числе открытых тесных экзопланетных систем у своих звезд это вполне реально.



Моделирование тепловых свойств Оумуамуа → и его вероятной внутренней структуры

Моделирование приповерхностной температуры U1 (от поверхности до глубины 40 см) по средним тепло-физическим параметрам астероидно-кометного вещества при прохождении перигелия у Солнца. Сплошные линии показывают температуру на различных глубинах относительно перигелия в днях. Показаны также минимальные температуры сублимации в вакууме для чистых льдов (пунктирные линии) (Fitzsimmons+, 2017).

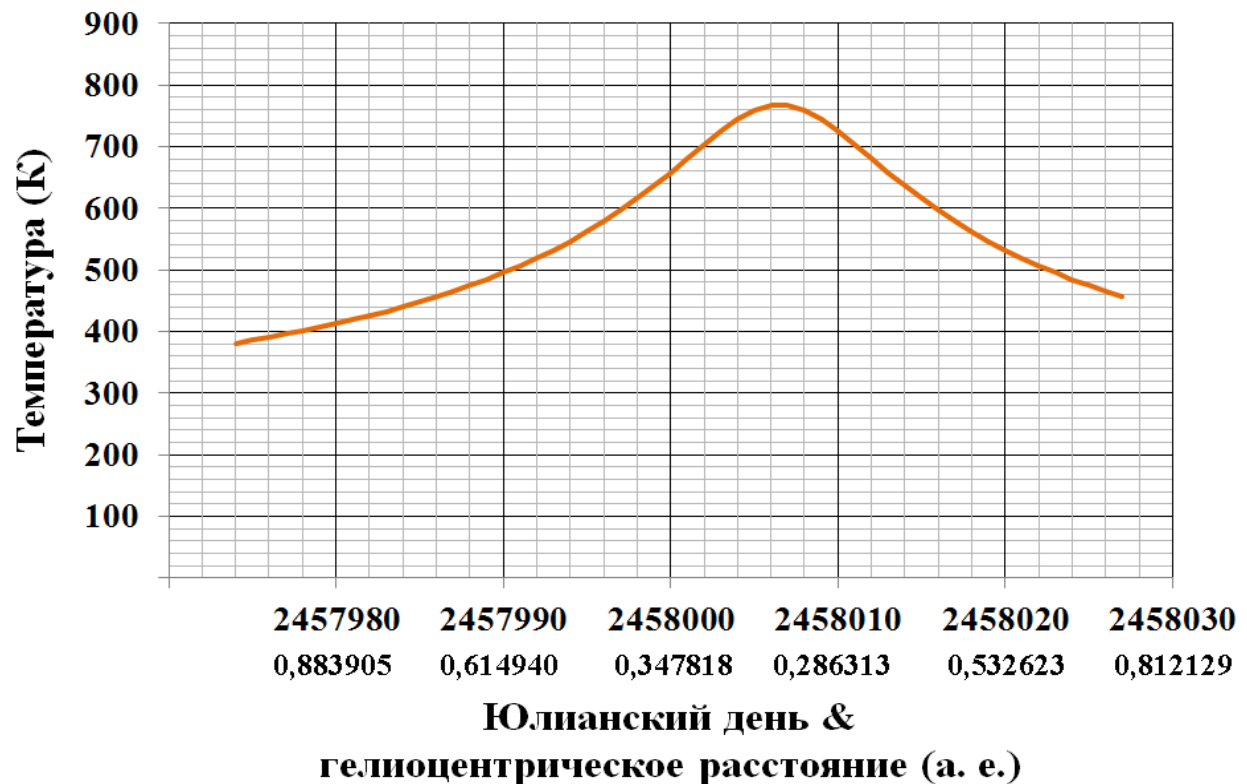


Моделирование изменения подсолнечной температуры на U1

- Мы провели более точный расчет подсолнечной температуры на поверхности U1 при его прохождении перигелия, используя среднее значение геометрического альбеда Троянцев Юпитера (0,056) (Ferna'ndez+, 2003), как наиболее соответствующее U1.

По сравнению с результатом расчета на предшествующем слайде значение температуры в этом случае на поверхности U1 оказывается примерно на 180 градусов выше.

Температура в подсолнечной точке U1



Какой внутренний состав U1 более вероятен?

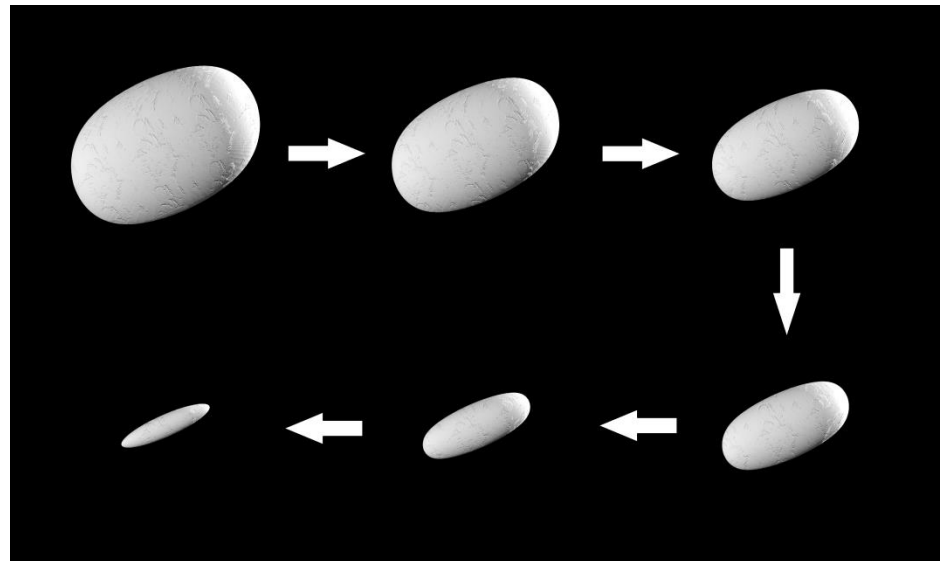
- Будет ли тело с внутренним ледяным ядром иметь прочность достаточную, чтобы противостоять вращательному центробежному разрушению?
- Предполагая низкую среднюю плотность $\leq 1000 \text{ кг/м}^3$, требуемая прочность U1 оценивается в диапазоне 0,5 до 3 Па (Meech+, 2017). Слабые материалы, такие как порошок талька, имеют прочность $\sim 10 \text{ Па}$, достаточную для поддержания структуры тела. Например, неактивная поверхность кометы 67P имела прочность на растяжение от 3 до 15 Па (Groussin+, 2015).
- Таким образом, при относительно регулярной форме и при его сравнительно медленном вращении U1 ($\sim 7\text{-}8 \text{ ч}$) его внутренний ледяной состав удовлетворяет критерию прочности.
- Но, учитывая возможность значительной ударной нагрузки (при большой скорости) и высокую вероятность столкновений U1 с более мелкими телами (за огромное время жизни и на огромном пройденном расстоянии), логично предположить, что у него – более прочный состав. Это может быть смесь органики и силикатов. Необычная удлиненная форма U1 также является признаком его высокой прочности.

Возможное происхождение

- Из-за небольших размеров Оумуамуа его трудно сравнивать с известными кометами, ядра которых примерно на порядок больше (Meech+, 2017).
- **Каково возможное происхождение Оумуамуа? По некоторым оценкам Облако Оорта может содержать в 200 – 10000 раз больше малых тел, чем Главный пояс астероидов. Поскольку подобные внешние "популяции" малых тел ледяного состава типичны для многих других планетных систем (как остатки их первичного материала в форме планетезималей или фрагментов более крупных родительских тел), то Оумуамуа может быть одним из таких объектов. Кроме того, последние результаты ИК-исследований пылевых дисков у нескольких десятков звезд Главной послед-ти с КА *Herschel* (NASA) показывают, что большинство таких дисков имеют 2-х-кольцевую структуру (что соответствует внутренней архитектуре Солнечной системы — т. е. два астероидных кольца) и широкий диапазон составов. Причем для внешнего кольца типичен смешанный состав лед/горные породы (Morales+, 2016).**

Предположения о возникновении странной формы U1 и о малочисленности подобных тел

• Необычная форма U1 и малое количество похожих на него объектов были объяснены сотрудниками ИПА РАН Д.Е. Вавиловым и Ю.Д. Медведевым (Vavilov, Medvedev, 2019) действием механизма интенсивной изотропной эрозии таких тел при прохождении с высокой скоростью (~десятков км/с) облаков межпланетной и межзвездной пыли.

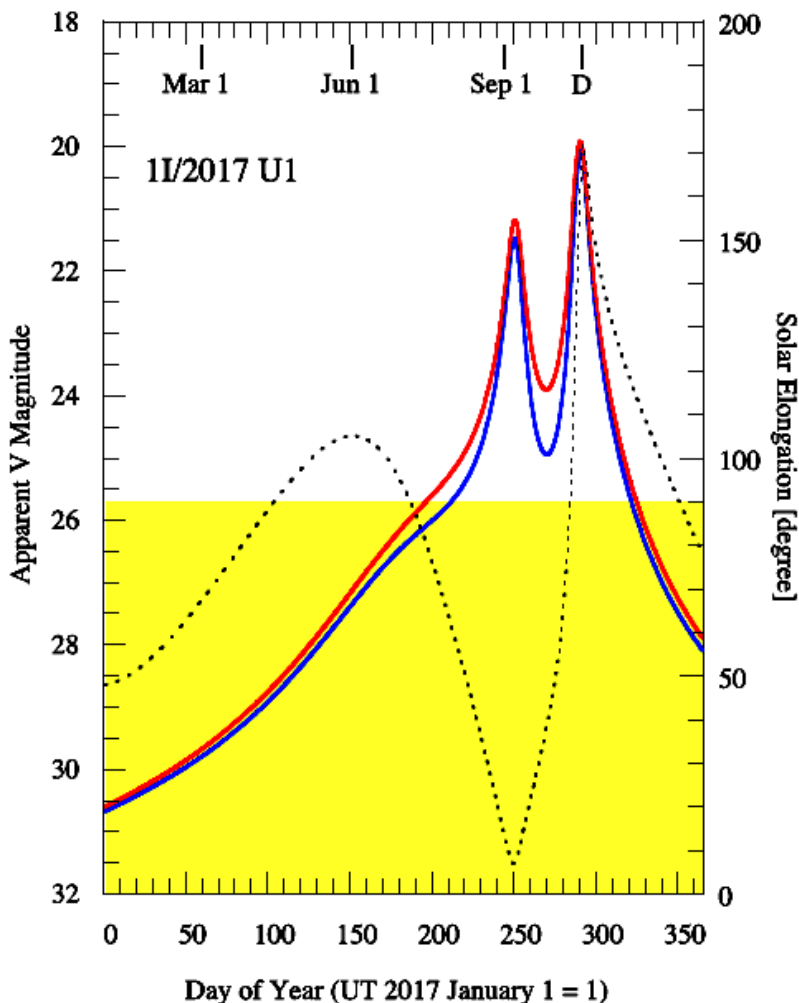


• U1 мог возникнуть как слегка удлинённый астероид $\sim 500 \times 300$ м. Эрозия поверхности, вызванная межзвездной пылевой бомбардировкой, должна была привести к увеличению соотношения его осей за время от 0,03 до 2 млрд. лет, чтобы он приобрел нынешнюю форму. Прохождение через пылевое облако с размером 10 пс и со средней плотностью зерен 10^{-23} г/см³ со скоростью 50 км/с повлияло бы на форму U1 аналогичный образом. Мелкие объекты с размером ок. 100 метров могут путешествовать в галактическом диске всего 30 лет, прежде чем они будут разрушены. Это, вероятно, объясняет крайне малое число межзвездных объектов, наблюдаемых на сегодняшний день.

Некоторые другие предположения

- Тщательное изучение траектории движения U1 по наземным и космическим данным позволило обнаружить у него значительное негравитационное ускорение (на уровне 30σ) (Michel+, 2017). Причем, эти авторы утверждают, что им удалось исключить из рассмотрения такие причины, как давление солнечного излучения, взаимодействие U1 с солнечным ветром при его сильной намагниченности, его торможение или ускорение межпланетной средой и, наконец, – смещение наблюдаемого фотоцентра тела в случае его немонолитной структуры. Единственной вероятной причиной ускорения U1 они считают кометоподобное выделение газов, хотя это и не было обнаружено.
- Другие же авторы показали, что выделение газов из U1 привело бы к быстрой эволюции его вращательного движения, а это не соответствует наблюдательным данным (Rafikov, 2018; Bialy, Loeb, 2018). В то же время, как показывают расчеты тех же авторов, негравитационное ускорение U1 может быть объяснено давлением солнечного излучения при условии, если этот объект является тонким, – с толщиной стенок всего около 1 мм (!).
- Интересно, что упомянутые авторы (Bialy, Loeb, 2018) завершают свою статью следующим выводом. Если световое давление оказывает влияние на U1, то он представляет новый класс тонких межзвездных тел, возникших естественным путем при неизвестном процессе в межзвездной среде или в протопланетном диске; в противном случае – он имеет искусственное происхождение.

Догнать и исследовать (амбициозные космические проекты)



(Jewitt +, 2017) ↑

- В начале 2018 г. был предложен проект Lyra: догоняющий космический аппарат (КА), ускоренный за счет гравитационного маневра (при очень близком прохождении аппарата у Солнца) в интервале времени 5-10 лет.
- Однако эта задача крайне сложна, в частности из-за высокой скорости астероида, которая в марте 2018 г. уже была больше, чем скорость любого современного КА. Рассматривались также более современные варианты использования солнечной, лазерной электрической и лазерной парусной силовой установки.
- Задача состояла в том, чтобы добраться до астероида в разумное время (и на приемлемом расстоянии от Земли), и суметь получить полезную научную информацию.
- Но никакой из подобных проектов так и не был осуществлен.

О возможностях обнаружения и изучения новых межзвездных объектов.

- Подобные небольшие тела могут попадать в Солнечную систему достаточно часто. Вероятно, что такие малые тела проходят внутри орбиты Земли несколько раз в год (от 2 до 12). Но возможности наземных телескопов пока недостаточны для их регистрации.
- Как показывают статистические оценки (Jewitt+, 2017), в Солнечной системе не далее орбиты Нептуна уже может быть до 10^4 таких межзвездных тел с размерами U1. Каждому из них потребуется ~10 лет для того чтобы пересечь внутреннюю область Солнечной системы до возвращения в межзвездное пространство.
- Поэтому возникает вопрос: а нужно ли догонять U1? Не лучше ли потратить деньги не на подобный амбициозный проект, а на развитие новых наблюдательных возможностей (новые обзоры или инструменты) поиска аналогичных объектов?

Вероятные межзвездные метеориты

На Земле рано или поздно могут быть найдены метеориты экзопланетного происхождения. Очевидно, их возраст должен заметно отличаться от возраста Солнечной системы. Абсолютный возраст метеоритов, как и земных горных пород, определяют радиоизотопными методами из которых наиб. употребительные - K-Ar, U-(Tr)-Pb, Rb-Sr и Mn-Cr- и нек. другие. Наибольший абсолютный возраст (4,56 млрд. лет) имеют углистые хондриты, точнее входящие в них кальций-алюминиевые включения (CAI) (напр., Connolly +, 2010).



Краткая справка:

Юрий Борисович Мильнер — выпускник физического факультета МГУ (теорфизика, 1985 г.). Он не состоялся как ученый, но построил успешный бизнес, инвестируя в такие интернет-проекты, как Facebook, Twitter, Zynga, Spotify и др. В настоящее время проживает в США. В 2012 году он был признан крупнейшим меценатом науки, основав ряд премий для ученых, совершивших значительные научные открытия, суммой в \$3 млн. каждая. На сегодняшний день это самая крупная научная премия в мире.

И, наконец, — поиск искусственных сигналов

- Появление первого межзвездного астероида вызвало большой шум в астрономии, планетной науке и в разных сообществах, включая SETI (в связи с необычной формой U1). В начале 1990-х правительство США приостановило гос. программу финансирования SETI, кот. перешло к част. инвесторам. Как известно, в 2015 г. Стивен Хокинг объявил о начале осуществления 10-летнего проекта SETI поиска разумной жизни во Вселенной на крупнейших радиотелескопах (РТ) (100-м РТ Green Bank в США, 64-м РТ Parks в Новом Южном Уэльсе в Австралии и др.) стоимостью 100 млн. долларов «Breakthrough Listen» на деньги российского предпринимателя Юрия Мильнера. Задачей этого проекта будет исследование 1 млн. звезд на Млечном пути, а также в 100 ближайших галактиках.
- Как раз на одном из этих РТ (100-м РТ Green Bank) был предпринят поиск сигналов искусственного происхождения от Оумуамуа, который ничего не дал.

Выводы

- Попадание экзопланетных объектов в околоземное пространство до этого казалось нереальным или крайне маловероятным.
- Но обнаружение U1 продемонстрировало возможность дистанционного изучения и даже потенциальной доставки на Землю конденсированного вещества других планетных систем для изучения в лабораторных условиях.
- Пока представления о составе вещества Оумуамуа являются противоречивыми. Весьма вероятно, что его необычная удлиненная форма, является признаком высокотемпературного состава и/или монолитной структуры с повышенной прочностью.
- Необходимы новые обзорные проекты и инструменты для поиска аналогичных объектов, которые уже могут быть в Солнечной системе.

Спасибо за внимание!