

# Физические характеристики карликовых планет

Уральская В.С.  
Государственный астрономический  
институт им. П.К.Штернберга

[ural@sai.msu.ru](mailto:ural@sai.msu.ru)



# Причины, приведшие к изменению статуса Плутона

1. Плутон не вписывался в общую картину образования Солнечной системы, согласно которой твердые и менее массивные планеты образовались ближе к Солнцу, а газовые гиганты сформировались из планетезималий в более далеких окрестностях Солнечной системы
2. Плутон движется не в плоскости движения всех классических планет, его орбита имеет значительный наклон к плоскости эклиптики
3. Плутон в своем движении вокруг Солнца иногда находится ближе к Солнцу, чем Нептун (например, с 1979 по 1999 г.), т.е. в проекции на плоскость эклиптики эти орбиты пересекаются, хотя в действительности этого не происходит из-за большого наклона орбиты Плутона к эклиптике.

В конце 20-го века ситуация существенно изменилась

1. За орбитой Нептуна открыт второй пояс ледяных тел – пояс Койпера или так называемые транснептуновые объекты
2. Открыто множество объектов, движущихся на орбитах, подобных орбите Плутона, т.е. в резонансе 2:3 с Нептуном, но меньших размеров, так называемые Плутино.
3. Открыт объект, по размеру превышающий Плутон – Эрида

Рабочая группа Международного Астрономического Союза (IAU Working Group: "Definition of a Planet"), возглавляемая И.Уильямсом (Iwan Williams).

Открытая полемика в Интернете

# Определения (МАС, 2006)

■ "Классическая планета" - это небесное тело, которое

- (a) обращается вокруг Солнца,
- (b) имеет достаточную массу, для того, чтобы самогравитация превосходила твердотельные силы и тело могло принять гидростатически равновесную (близкую к сферической) форму и
- (c) очищает окрестности своей орбиты (т.е. рядом с планетой нет других сравнимых с ней тел)

Планеты земной группы – Меркурий, Венера, Земля, Марс  
Газовые гиганты – Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун

■ "Карликовая планета" – небесное тело, которое

- (a) обращается вокруг Солнца,
- (b) имеет достаточную массу, для того, чтобы самогравитация превосходила твердотельные силы и тело могло принять гидростатически равновесную (близкую к сферической) форму,
- (c) не очищает окрестности своей орбиты и
- (d) не является спутником (планеты).

Карликовые планеты Церера, Плутон, Эрида

■ Все остальные объекты, обращающиеся вокруг Солнца, охватываются понятием "Малые тела Солнечной системы".

Астероиды, кометы, почти все транснептуновые объекты, исключая спутники планет

# (1) Церера (Ceres)

Открыта 1 янв.1801г. Пьяцци (Piazzi)  
Была названа планетой, удовлетворяла  
правилу Тициуса-Бодде  $r=0.4+0.3 \times 2^n$  (а.е.)  
где  $n=0$  – Венера,  $n=1$  – Земля,  
 $n=2$  – Марс,  $n=3$  – Церера,  $n=4$  Юпитер,...

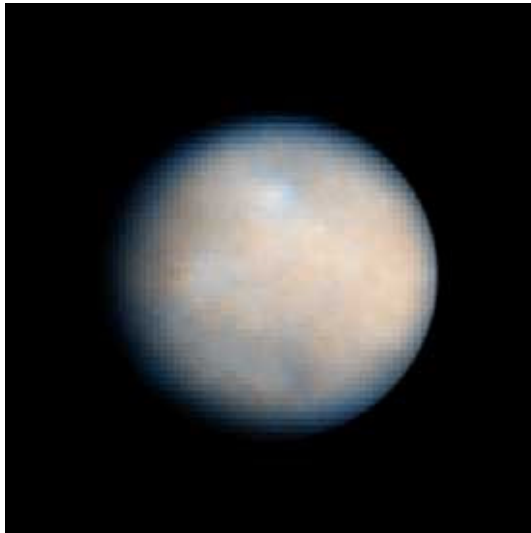
Объект Главного астероидного пояса

Была причислена – к астероидам

В 2006 г. – к карликовым планетам

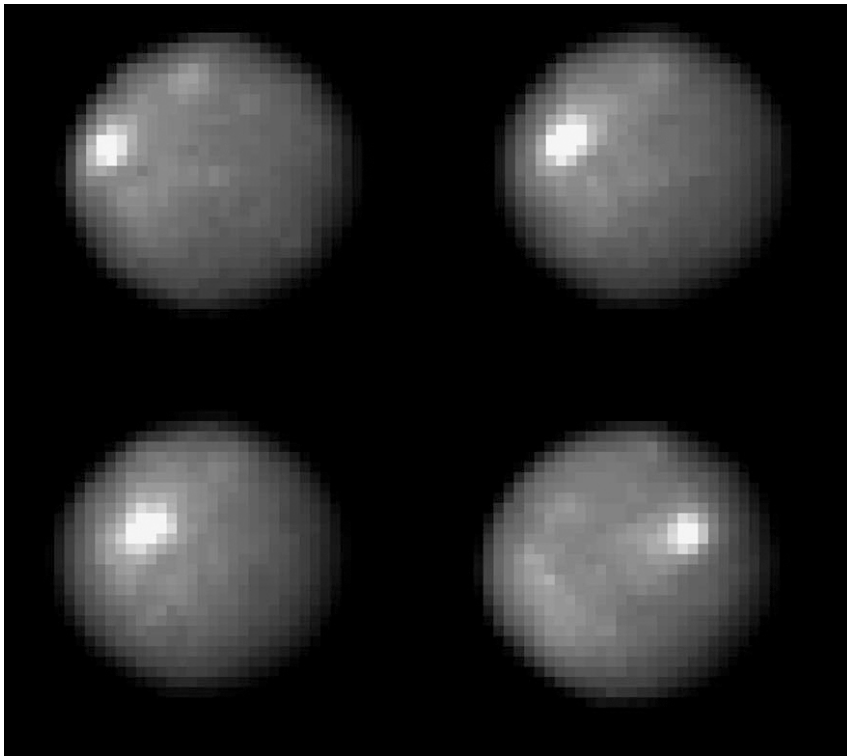
- $a = 2.77$  а.е.,  $e = 0.08$ ,  $i = 10^\circ.6$
- $q = 2.5$  а.е.,  $Q = 3$  а.е.
- Период 4.6 лет

О физических свойствах мало известно –  
состав поверхности и подповерхностных  
слоев, свойства реголита и степень  
дифференциации



Инфракрасное изображение  
(Keck Observatory)

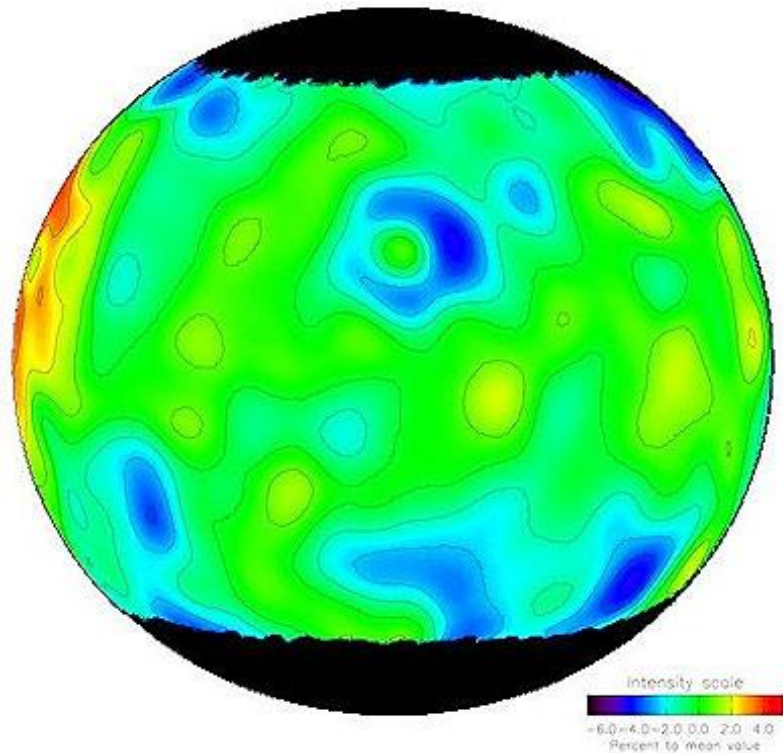
# Физические свойства Цереры



Изображение в ультрафиолете HST (1995) показало темное пятно. Эту особенность назвали Пиаци, которая повидимому является кратером. Однако в дальнейшем он не был обнаружен

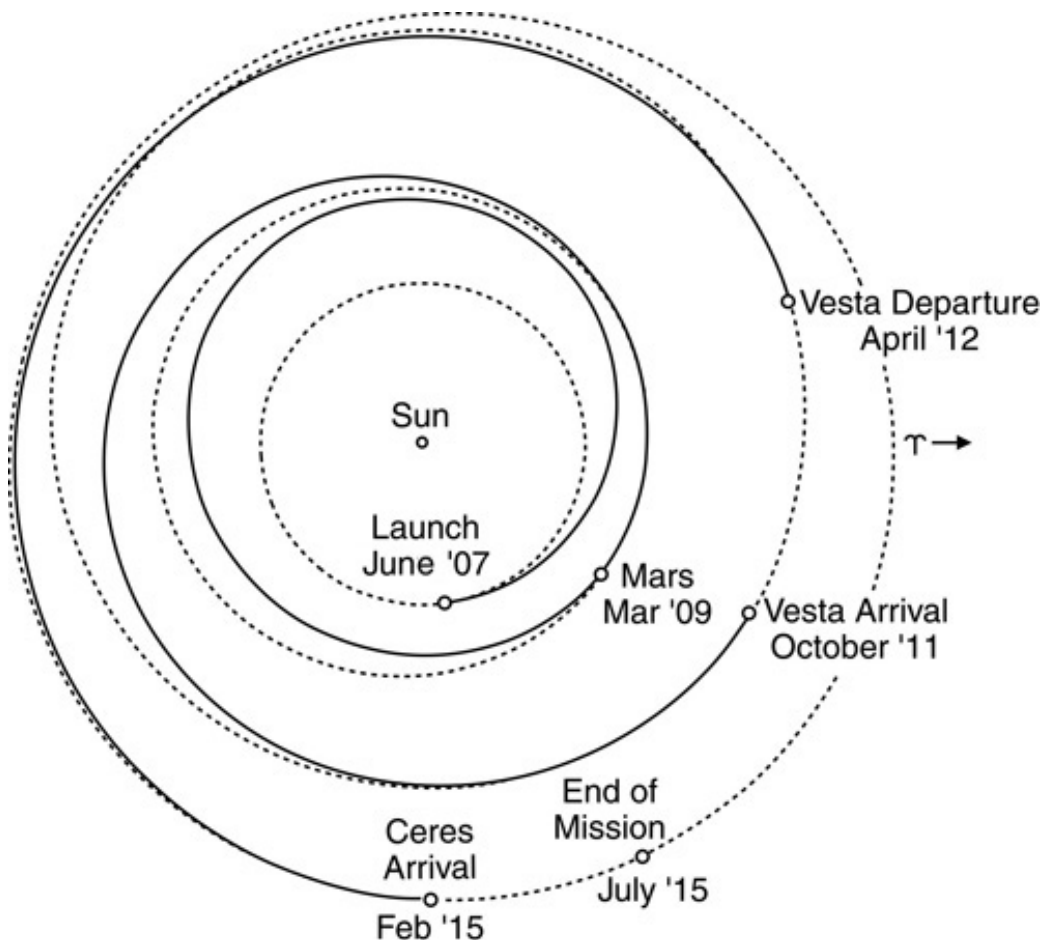
- Почти сферическая форма
- Состояние гидростатического равновесия
- Размеры 975×909 км, плотность 2.08г/см<sup>3</sup>
- Альbedo 0.13
- Температура на поверхности от 167 до 239 К
- Масса  $9.5 \times 10^{20}$ кг – 1/3 массы Главного пояса  $(3.0 \pm 0.2) \times 10^{21}$
- Внутреннее строение – каменное ядро и ледяная мантия толщиной 60-120 км содержит 200 млн.куб.км воды, т.е. пресной воды больше земной
- Изображения космического телескопа Хаббла (HST) показали два темных пятна, повидимому – кратеры, одно с загадочно яркой областью, природа которой неизвестна

# Карта альбедо в инфракрасном диапазоне



- На телескопе Кека получена карта отражающей поверхности (альбедо) в ближнем ИК-диапазоне.
- Различимы географические объекты размером от 40 до 160 км в поперечнике.
- Отражающая способность изменяется в пределах 12%.
- Повидимому, эти различия обусловлены и наличием сложного рельефа, и неоднородным химическим составом пород поверхности Цереры.
- Направление оси вращения (на эпоху 2000 года) —  $287^\circ$  прямого восхождения и  $69^\circ$  склонения (точность  $\pm 5^\circ$ ).
- Поверхность Цереры считалась почти плоской, на самом деле имеет весьма разнообразный и сложный рельеф.

# Миссия «Рассвет» (Mission Dawn)



- NASA планировало полет к двум объектам Главного пояса – Церере и Весте
- Запуск июнь 2007 г.
- Гравитационный маневр у Марса в 2009 г.
- Веста - 2011 г.
- Церера - 2015 г.

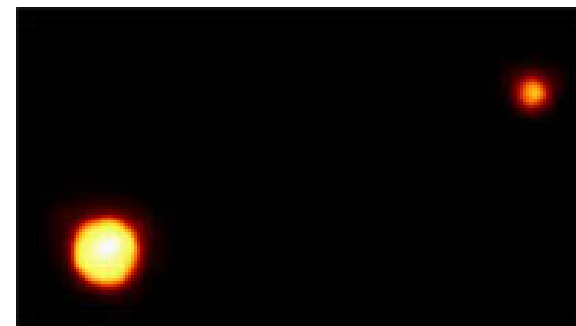
Сейчас NASA объявило об отмене этой миссии из-за финансовых трудностей и технических проблем

Наблюдения Цереры на Большом телескопе Южной Европейской обсерватории в Чили VLT (Very Large Telescope) планируются в ноябре 2007 г.

# Двойная планета Плутон - Харон

МАС установил принципиальное отличие **двойной планеты** от системы **планета-спутник**

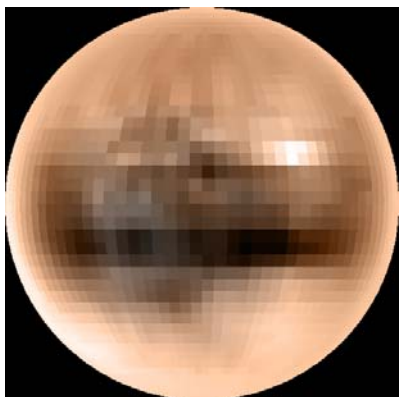
- В **двойной планете** центр масс системы находится в открытом космосе (Плутон – Харон)
- В системе **планета–спутник** внутри планеты (Земля – Луна)



	Плутон	Харон
Большая полуось	39.5294 (а.е.)	19 640 км
Эксцентриситет	0.2482	0.00
Наклон орбиты (град)	17.148 (к эклиптике)	98.1 (к экватору Земли)
Орбитальный период	248.54 (лет)	6.387259 (сут)
Период вращения	6.38725 (сут)	6.38725 (сут)
Диаметр	2306 км	1250 км



# Физические свойства Плутона



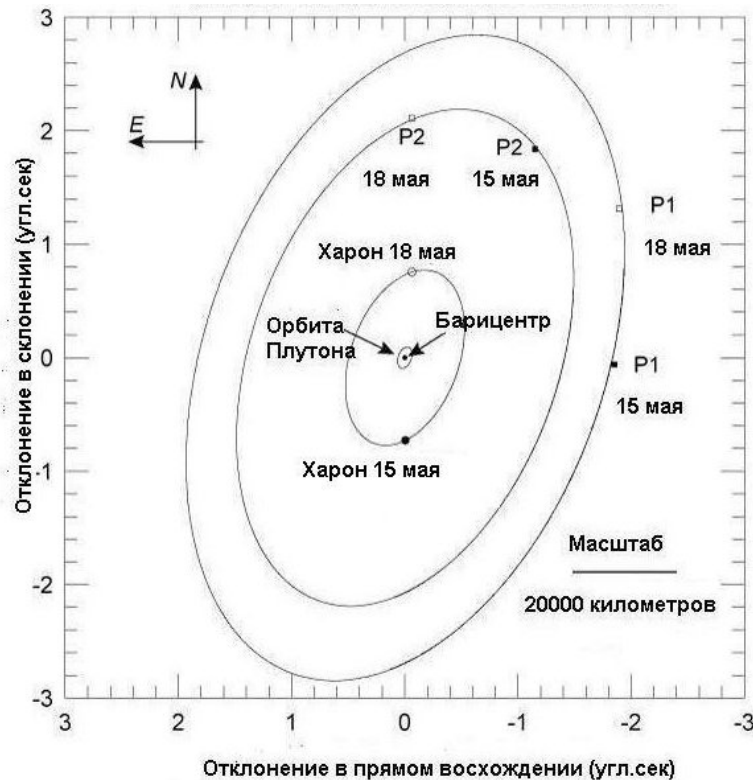
- Температура на поверхности от  $-220$  до  $-240^{\circ}\text{C}$ .
- Поверхность покрыта льдом из замороженного азота с небольшим количеством метана. В некоторых районах на поверхность выходит водяной лед и даже немного льда монооксида углерода (угарного газа).
- Желтовато-розоватый оттенок придают оседающие из атмосферы частички сложных органических соединений, образующиеся из атомов

углерода, азота, водорода и кислорода под воздействием солнечного света.

- Сильные перепады яркости. Визуальное геометрическое альbedo от 0.49 до 0.66.
- О внутреннем строении – по низкой средней плотности  $1,7 \text{ г/см}^3$  – Плутон состоит на  $1/3$  из каменных горных пород и на  $2/3$  из водяного льда.
- Каменное ядро диаметром  $1\ 500 \text{ км}$  окружено слоем водяного льда толщиной  $400 \text{ км}$ .
- Атмосфера обнаружена в 1988 г. Состоит из азота с примесью метана и угарного газа. Давление ничтожное  $0,3$  паскаля.
- Слабое гравитационное поле не в состоянии удерживать атмосферу, и она постоянно улетучивается в космос, на ее место приходят новые молекулы, испаряющиеся с ледяной поверхности, т.е. для Плутона характерна «кометная» природа атмосферы
- Самые большие изменения в атмосфере связаны с сезонами. В зимний период – замораживание атмосферы. Увеличение температуры азотного льда на поверхности планеты всего на  $2^{\circ}$  приводит к возрастанию массы атмосферы в 2 раза. «Летний» период сохранится и в 2015 г., когда КА «Новые горизонты» приблизится к Плутону.

# Спутники Плутона

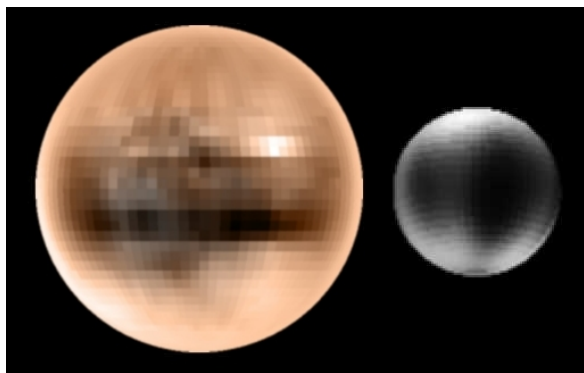
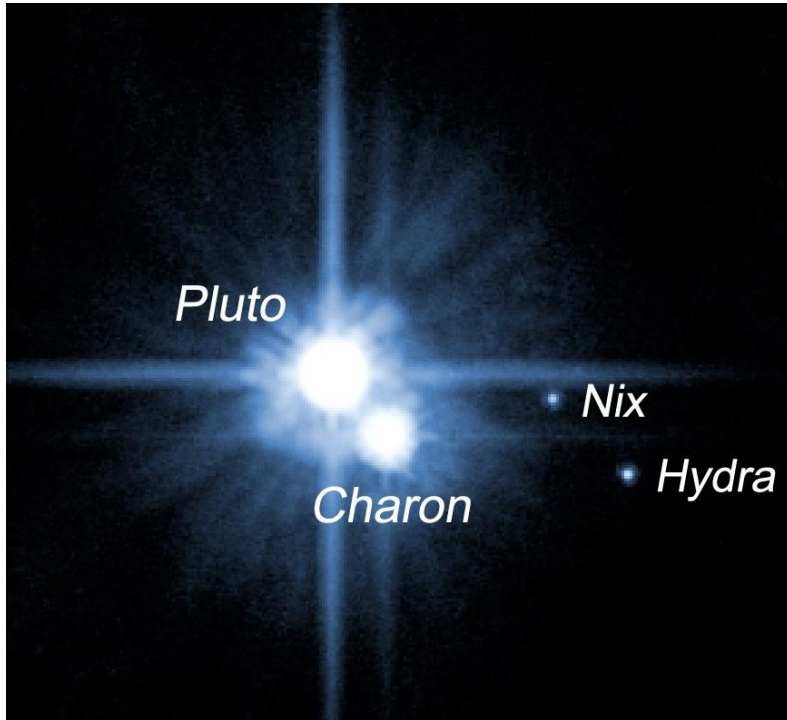
Малые спутники открыты в 2005 г. на космическом телескопе Хаббла



Спутник	Период (сут)	Большая полуось (км)	Эксцен.	Наклон (град)
<b>P1 Харон(Charon)</b>	<b>6.3872</b>	<b>19 571.4</b>	<b>0.00000</b>	<b>96.14</b>
<b>P2 (S/2005 P2) Никта (Nix )</b>	<b>24.8562</b>	<b>48 675</b>	<b>0.0023</b>	<b>96.18</b>
<b>P3 (S/2005 P1) Гидра (Hydra)</b>	<b>38.2065</b>	<b>64 780</b>	<b>0.0052</b>	<b>96.36</b>

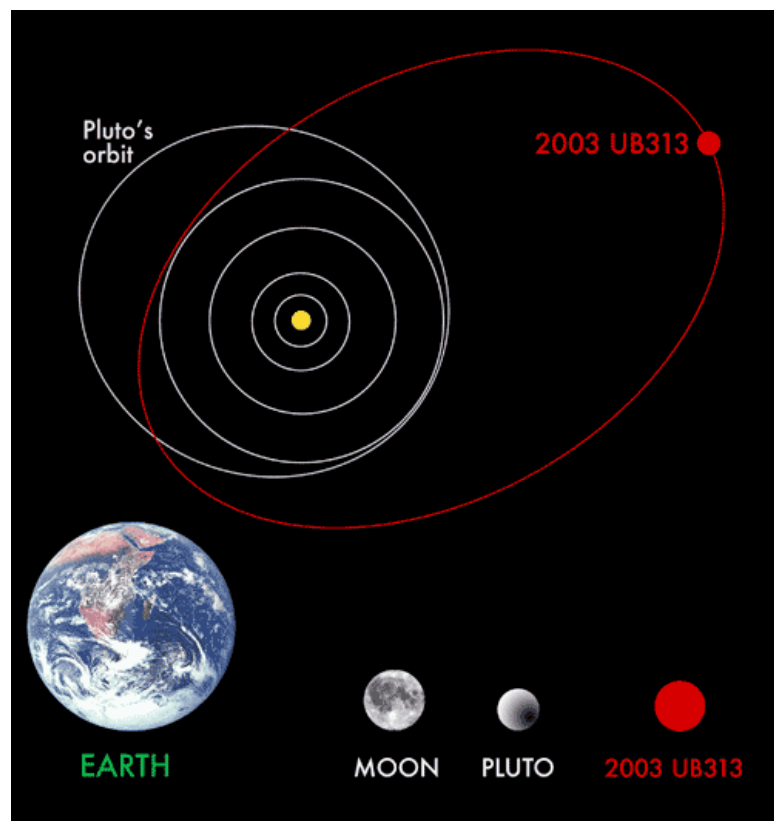
Компланарные орбиты. Соизмеримость орбитальных периодов 6 : 4 : 1  
(P3 : P2 : P харон)

# Мультипланетная система Плутона



- Харон покрыт водным льдом, а не метаново-азотным, как Плутон
- Спутники нейтрально серые как Харон, не имеют фотометрических вариаций, по видимому сферической формы ( $D_{PII} = 170$  км,  $D_{PIII} = 110$  км).
- Предполагается общее происхождение системы гигантским столкновением с прото-Плутоном, в результате которого Харон получил эксцентрическую орбиту.
- В дальнейшем приливное взаимодействие привело к резонансным, компланарным и почти круговым орбитам Харона, Никты и Гидры, а также синхронизации вращения Харона с орбитальным движением и с вращением Плутона.

# Карликовая планета (136199) Эрида (Eris) 2003 UB313

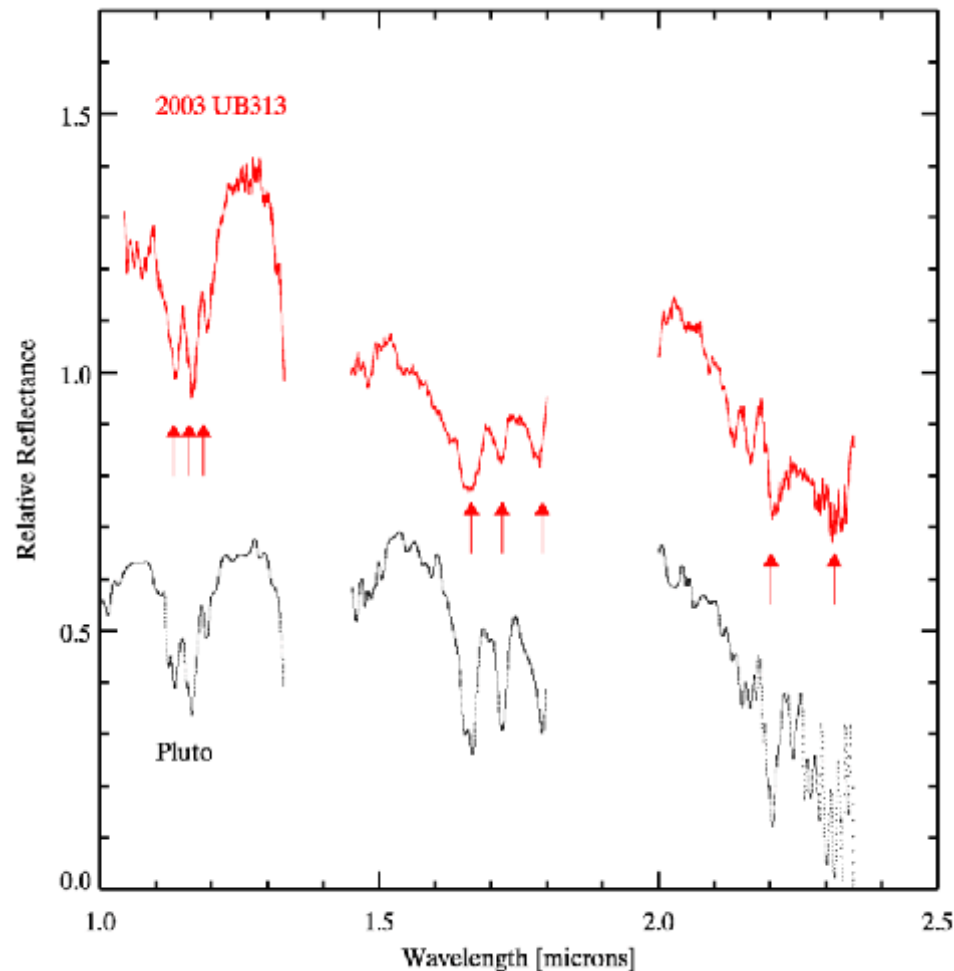


Видимая фотометрия на 1.3-м SMARTS телескопе и инфракрасная фотометрия (Gemini North Observatory) показали очень высокую отражательную способность

Период 560 лет  
 $a = 67.66$  а.е.,  $e = 0.44$   
Открыт в афелии 97 а.е.  
Перигелий 37.8 а.е.  
Достигнет перигелия в 2257г.  
Очень большой наклон  $44^\circ.2$   
Объект рассеянного пояса  
(Scattered-belt object)

Космический телескоп Хаббла уточнил геометрическое альbedo и размер Эриды. Отражательная способность из-за замерзшего метана составляет  $0.85 \pm 0.07$ . Размер Эриды превышает диаметр Плутона только на 5% и составляет примерно  $(2400 \pm 100)$  км (диаметр Плутона 2306 км)

# Спектры в инфракрасной области Эриды и Плутона



- Эрида в значительной степени подобна Плутому.
- **В спектре доминируют линии абсорбции метана** (стрелками указаны особенности, свойственные метановому льду)
- Поверхность объекта покрыта твердым замерзшим метаном и представляет собой смесь камня и льда.
- Метан обнаружен только на Плуtone, Эриде и Тритоне и не свойственен другим объектам пояса Койпера

# Физические свойства Эриды

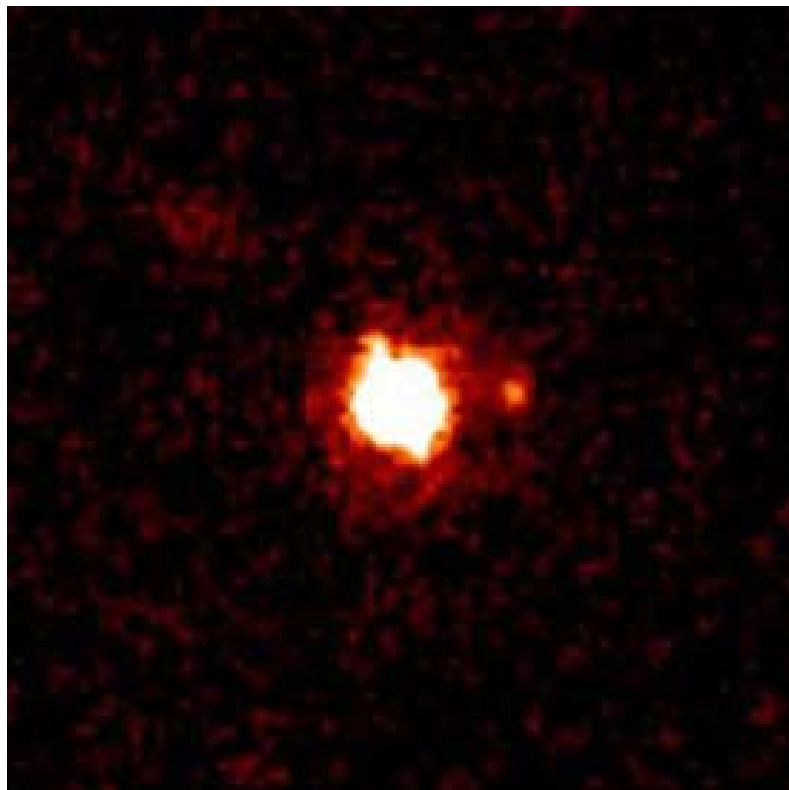


- В ближней инфракрасной области присутствуют линии азота  $N_2$  и угарного газа  $CO$ , свойственные Плутону
- Линии углекислого газа  $CO_2$ , присутствующие на Тритоне
- Основное отличие в видимой части спектра - поверхность Плутона в среднем красная, в то время как Эрида почти серая

**Различие объясняется тем, что Эрида на расстоянии в 3 раза большем, чем Плутон (97 а.е.) более холодна, и метановый лед более однородно покрывает поверхность. Поэтому альbedo более однородно по поверхности и выше, чем у Плутона**

Открытие объекта представляет более низкотемпературную лабораторию для изучения явлений, свойственных Плутону – замораживание атмосферы, химию льда, фазовые переходы азота. Температурные вариации от афелия (97 а.е.) к перигелию (37.8 а.е.) даже более экстремальны, чем у Плутона

# Спутник Эриды S/2005 (2003 UB313)1 Дисномия (Dysnomia)



М.Браун (Калиф. технолог. ин-т) Keck II телескоп

“Laser Guide Star Adaptive Optics” system

Спутник слабее на  $(4.43 \pm 0.05)$  mag основного тела, т.е.

в 60 раз слабее основного тела

**Большая полуось 36 000 км**

**Эксцентриситет 0?**

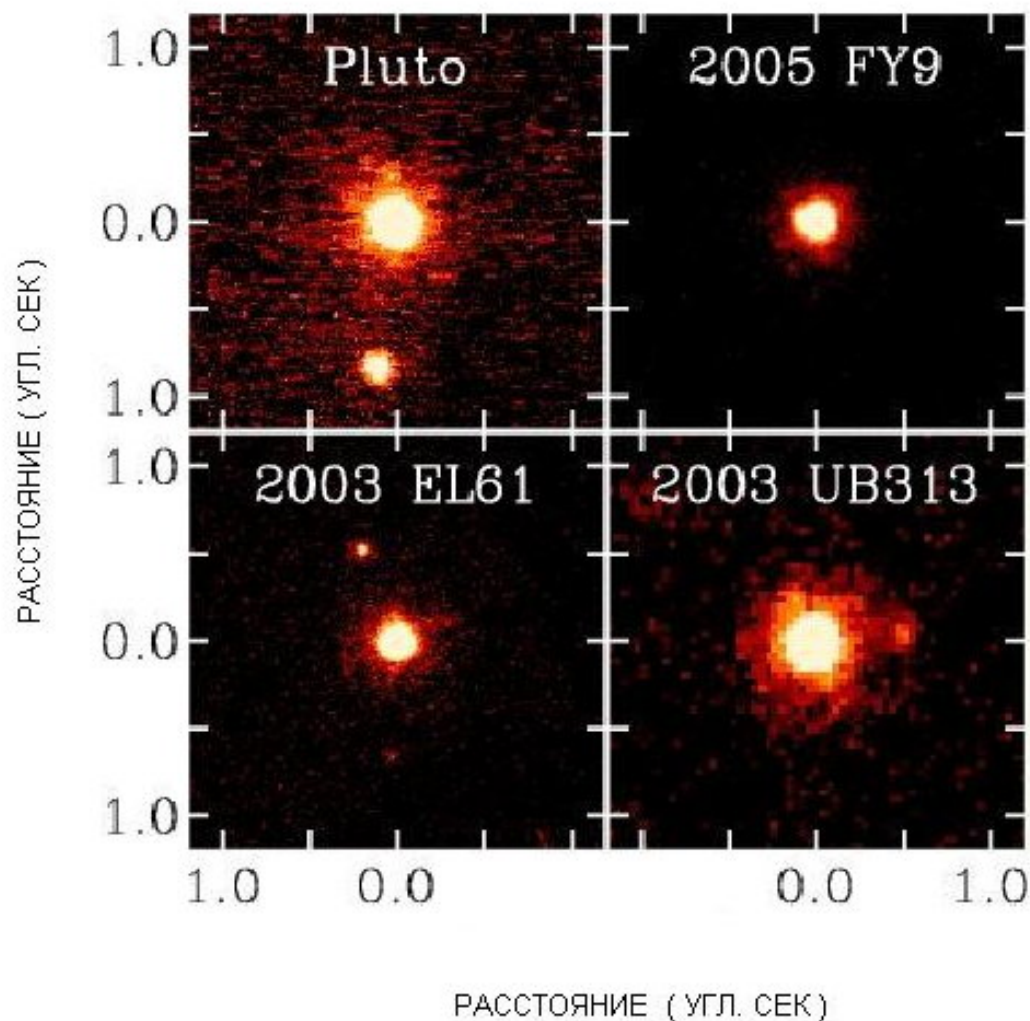
**Орбитальный период (P) ~ 14 сут**

**Наклон неизв.**

**Средний диаметр 300 - 400 км**

# Самые большие транснептунные объекты

Плутон – карликовая планета



На телескопе Кека  
получены изображения самых  
крупных транснептунных объектов

Три из четырех имеют спутники

Эрида –  
карликовая  
планета



# Кандидат в карликовые планеты 2005 FY9



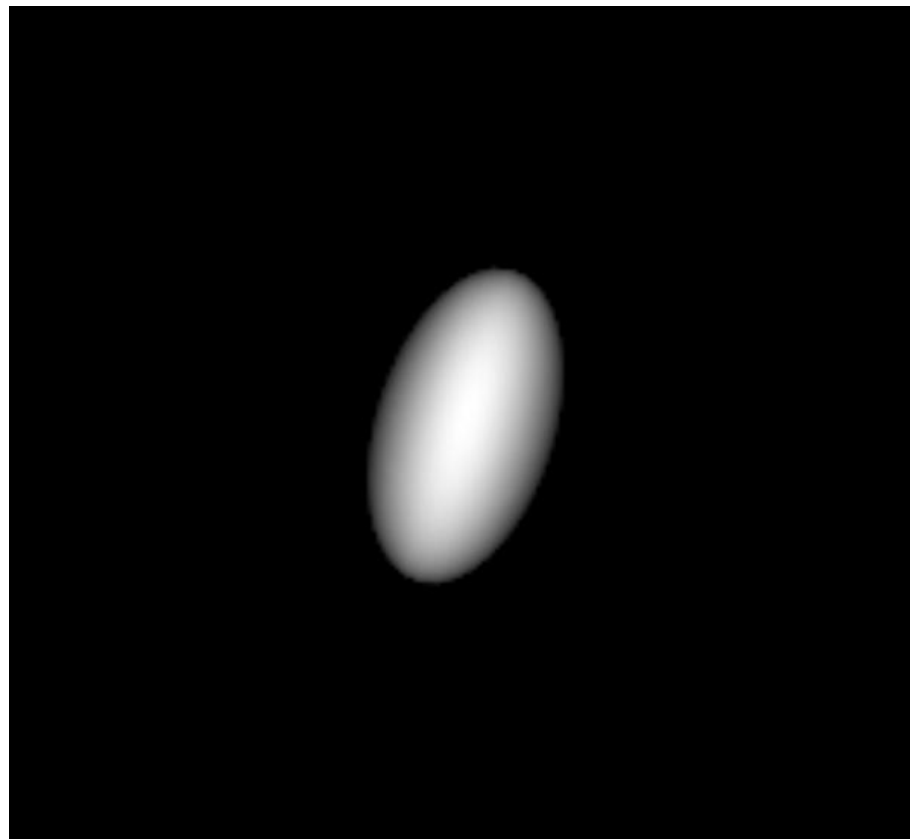
- $P = 308$  лет
- $a = 45.64$  а.е.,  $e = 0.15$ ,  $i = 29^\circ$
- Классический объект пояса Койпера
  
- Размер 1500 км при альбедо Плутона
- Спектр подобен Плутону
- Доминируют линии твердого метана, причем линии метанового льда сильнее, чем у Плутона
- Красный цвет указывает на присутствие органических молекул
- Присутствие азота и угарного газа
- Возможна атмосфера, сравнимая с атмосферой Плутона

Возможный кандидат в карликовые планеты

# Странный объект 2003 EL61

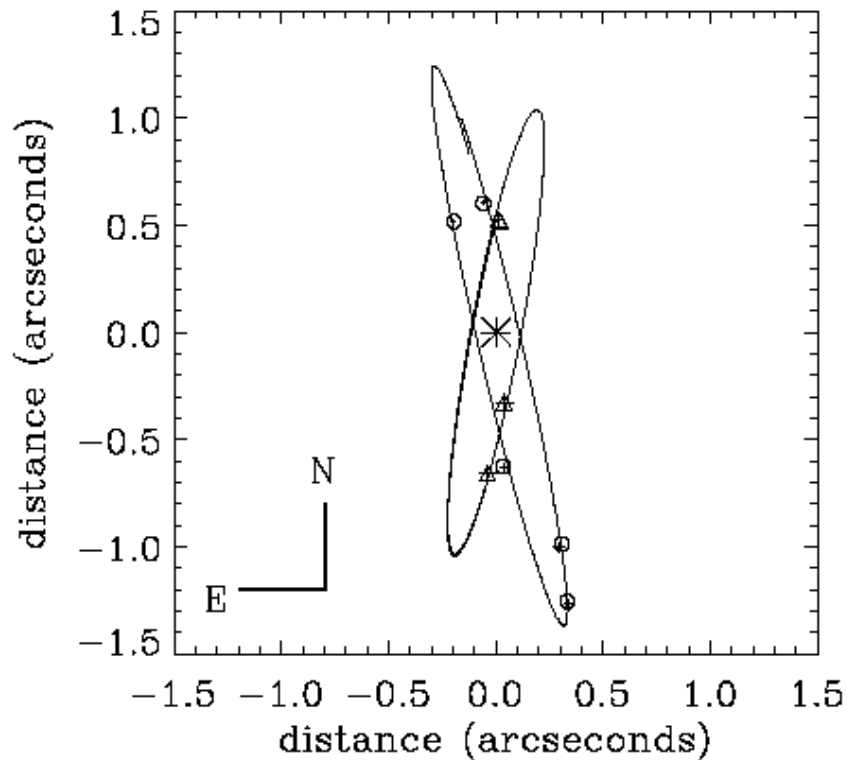
Классический объект пояса Койпера

- Открыт на расстоянии  $R = 51$  а.е.
- Орбита  $a = 43.3$  а.е.,  $e = 0.19$ ,  
 $i = 28^\circ.2$
- Большие флуктуации яркости –  
из-за особенностей поверхности или  
вытянутой формы
- Альbedo неизвестно,  $> 0.6$
- Эллипсообразное тело  
1960 × 1518 × 996 км или  
2500 × 1080 × 860 км
- *Самое быстрое вращение для тел  
больших 100 км с периодом  $P = 3.9$   
часа*
- В спектре присутствуют сильные  
линии водяного льда, свойственные  
Харону, а также линии метана



*Не имеет сферической формы*

# Спутники 2003 EL61



	<b>S/2005 (136108) 1</b>	<b>S/2005 (136108) 2</b>
Большая полуось	49 500 км	39 300 км
Эксцентри- ситет	0.050	0.0
Период(сут)	(49.12 ± 0.03)	(34.7 ± 0.1)
Наклон	234°.8 ± 0°.3	39° ± 6° относительно орбиты S1

По движению спутников определена масса системы  
28% от массы системы Плутона

Спутник S1 на 3.3 маг слабее основного тела

Спутник S1 по массе 1% от массы системы

Взаимные затмения и покрытия основного тела и S1 происходили в 1999 г., след. – в 2138 г.

Диаметр  $D(S1) = 350$  км,  $D(S2) = 170$  км



# КА «Новые Горизонты» (New Horizons)

- Запущен в 2006 г., гравитационный маневр у Юпитера – в 2007 г., достигнет Плутона в 2015 г. Задачи:
- Изучить состав атмосферы Плутона и процессы в ней происходящие
- Геологические структуры Плутона и Харона и химический состав материала поверхности планеты и ее спутника
- Взаимодействие потока заряженных частиц, выброшенных Солнцем (солнечного ветра), с атмосферой Плутона и с какой скоростью атмосферные газы улетучиваются в космос.

Из-за большого расстояния до Земли радиопередача будет вестись медленно, чтобы слабые сигналы можно было выделить на фоне космических и земных шумов и расшифровать. Процесс передачи растянется на целых девять месяцев.

Полет через пояс Койпера может занять еще от трех до шести лет - изучение других тел – остатков древнейшего материала, сохранившегося со времени образования планет Солнечной системы.

Обработка научных данных в двух оперативных научных центрах — имени Томбо в Боулдере (Колорадо) и имени Кристи в Лореле (Мэриленд), названных в честь первооткрывателей Плутона и его спутника Харона.



# Карликовые планеты

	(1) Церера	(134340) Плутон	(136199) Эрида
	Главный пояс	Пояс Койпера	Рассеянный пояс
Диаметр (км)	975 - 909	2306	2400
Альбедо	0.13	0.6	0.85
Масса (кг)	$9.46 \times 10^{20}$	$1.32 \times 10^{22}$	$1.64 \times 10^{22}$
Большая полуось (а.е.)	2.77	39.5	67.67
Эксцентриситет	0.08	0.25	0.44
Перигелий-Афелий (а.е.)	2.55 - 3	30 - 50	37.8 - 97
Наклон (град)	10.59	17.14	44.19
Средняя температура (К)	167	40	30

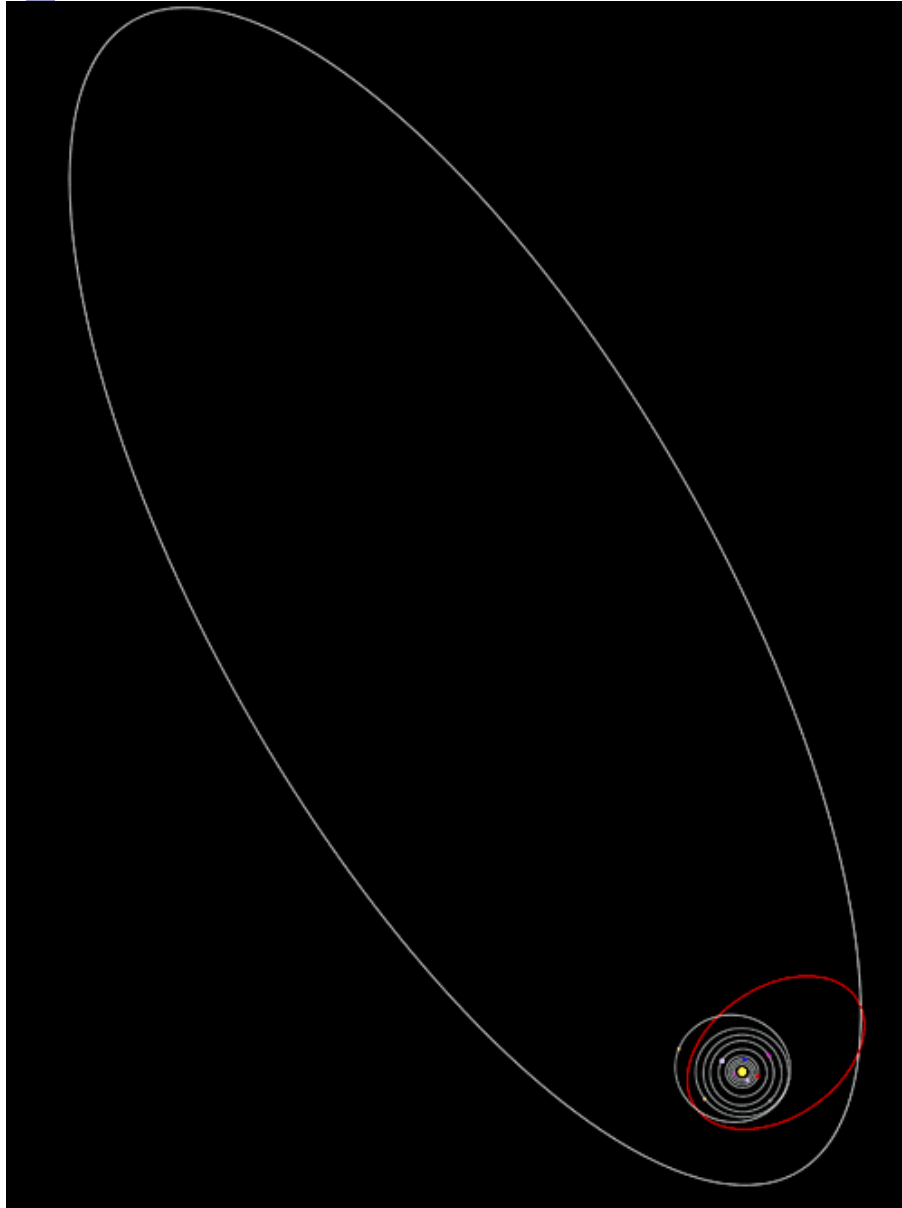
Общие свойства карликовых планет следуют из самого определения – тела обладают достаточной массой, чтобы тело могло принять гидростатически равновесную форму. Нижняя граница массы и размер тела не определены, но для трех указанных тел масса порядка ( $10^{21}$  -  $10^{22}$ ) кг, диаметр равен или более 1000 км.

Изучение процессов, которые могли привести к гидростатическому равновесию при разных условиях образования, освещенности, солнечного излучения и температур – выделяет эти объекты в один класс, число объектов которого может возрасти до 45 и более членов.

# Кандидаты в карликовые планеты (1000-км транснептунные объекты)

Объект	Абсолютная величина	Геометрическое альbedo	Диаметр	Тип орбиты
2005 FY9	-0.3	0.6	1250	Рассеянный пояс
2003 EL61	-0.26	0.6	1960-2500	Классический
Харон (Charon)	1.0	0.38	1250	Плутино
(90377) Седна (Sedna)	1.6	0.2	1500	Облако Оорта
(90482) Орк (Orcus)	2.2	0.12	1500	Плутино
(50000) Квавар (Quaoar)	2.6	0.12	1200 ± 200	Классический
(28978) Иксион (Ixion)	3.2	0.09	1650 ± 165	Плутино
(55565) 2002 AW197	3.2	0.1	890 ± 120	Рассеянный пояс
(20000) Варуна (Varuna)	3.7	0.07	900 ± 140	Классический

Классический объект пояса Койпера – почти круговые орбиты от 42 а.е. до 55 а.е.  
 Рассеянный пояс (вместе с Кентаврами) – орбиты от Юпитера далеко за Нептун  
 Плутино – резонанс 3:2 с Нептуном



## (136199) Эрида и (90377) Седна(Sedna)

$a = 480 \text{ а.е.}$ ,  $e = 0.84$ ,  $i = 12^\circ$ ,  $T = 10500 \text{ лет}$

$q = 76 \text{ а.е.}$ ,  $Q = 900 \text{ а.е.}$ ,  $D = 1500 \text{ км}$

Седна – объект внутренней части облака Оорта

Спектроскопические исследования инфракрасного света, отраженного от Седны, показали, что Седна очень непохожа на Плутон и Эриду.

Поверхность Седны не показала сильных спектральных линий водяного или метанового льда, Седна - одна из самых красных объектов Солнечной системы.

Седна по красноте в видимом свете более похожа на объект семейства Кентавров Фолюс (Pholus), орбита которого находится внутри орбиты Сатурна. Красный цвет Фолюса и Седны объясняется облучением льда, богатого органическими соединениями, ультрафиолетом и космическими лучами