

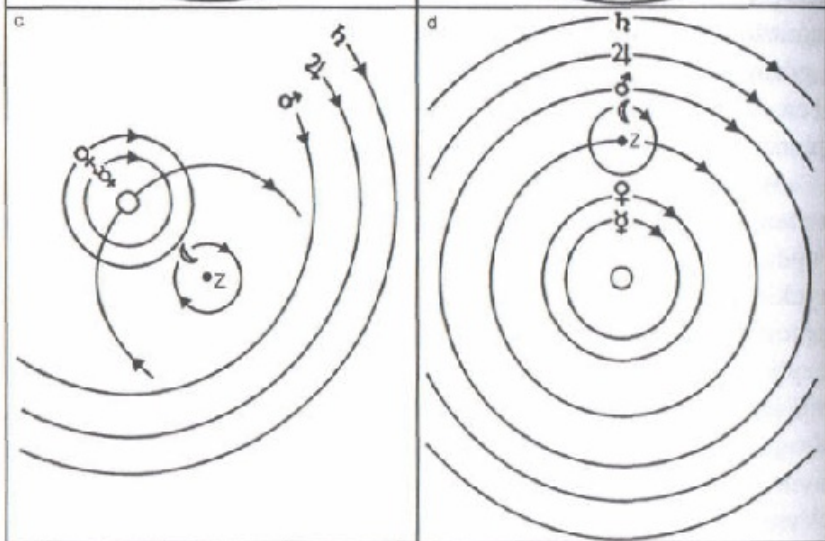
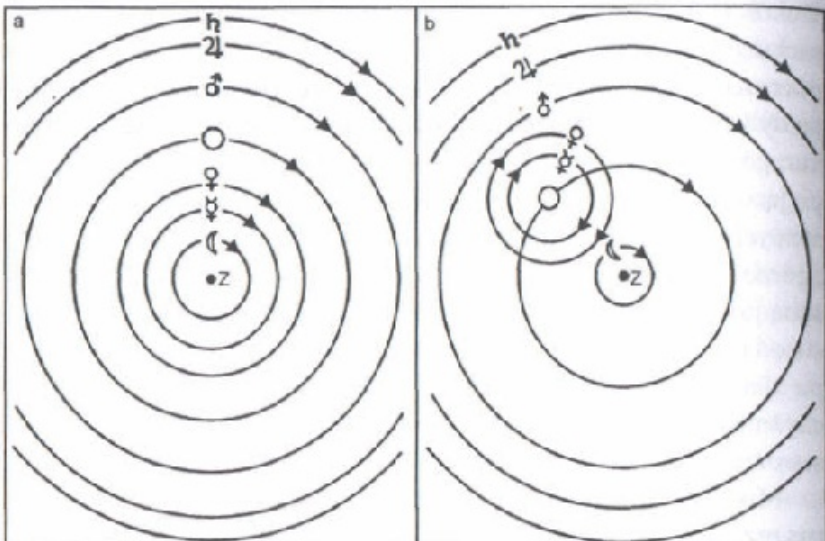
2. Układ Słoneczny

- Układ Kopernika - dowody
- Planety, planety karłowate
- Pas Planetoid
- Pas Kuipera
- Obłok Oorta

Planety wg starożytnych

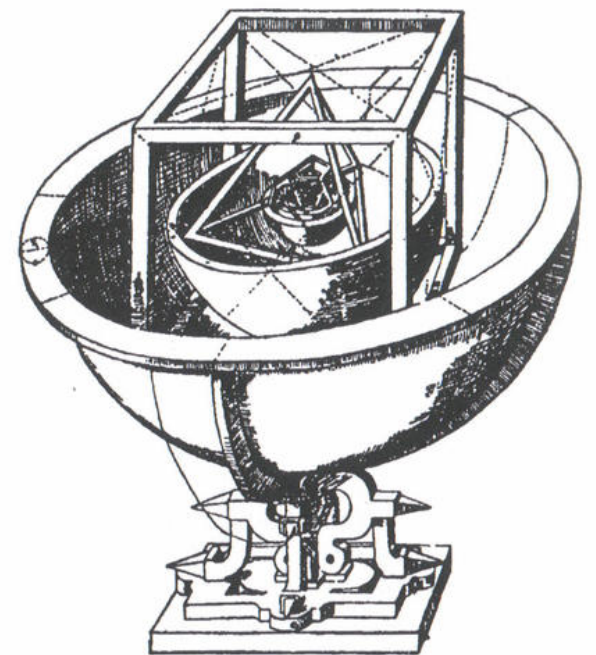
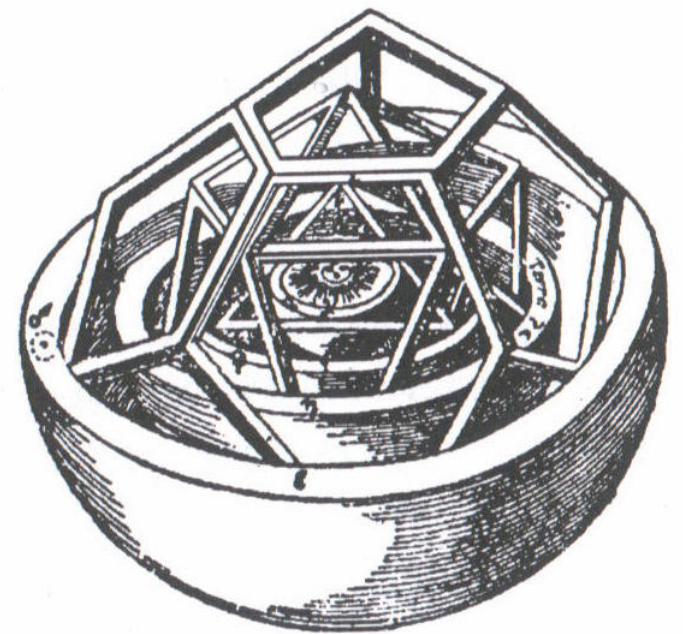


Z greckiego: dosłownie „wędrowiec”, w znaczeniu astronomicznym ciało zmieniające swoje położenie względem *gwiazd stałych*. Takich (widocznych gołym okiem) obiektów jest siedem (Księżyc, Merkury, Wenus, Słońce, Mars, Jowisz i Saturn).



| | | | |
|----------|-----------|----------|-----------|
| ○ Słońce | ☾ Księżyc | ⊕ Ziemia | ☿ Merkury |
| ♀ Wenus | ♂ Mars | ♃ Jowisz | ♄ Saturn |

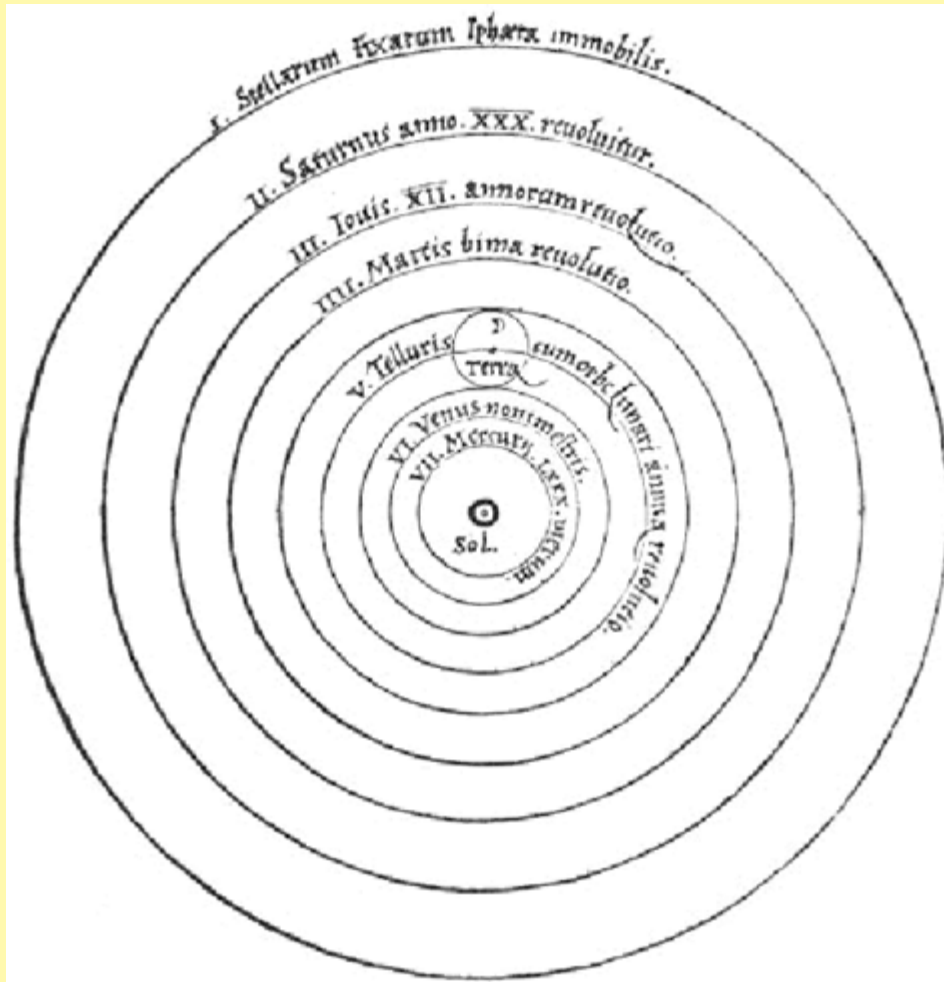
Ryc. 1. (a) Klasyczny system geocentryczny, (b) „egipski” system Heraklejdesa, (c) system Tychona de Brahe (i Heraklejdesa?), (d) system heliocentryczny Arystarcha



Teoria Kopernika

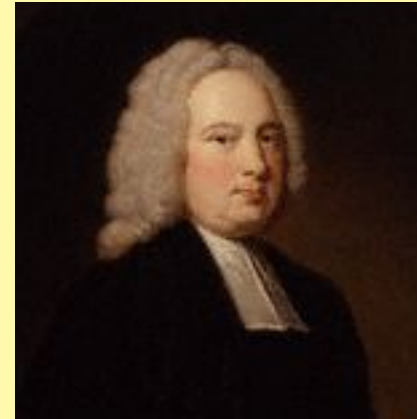
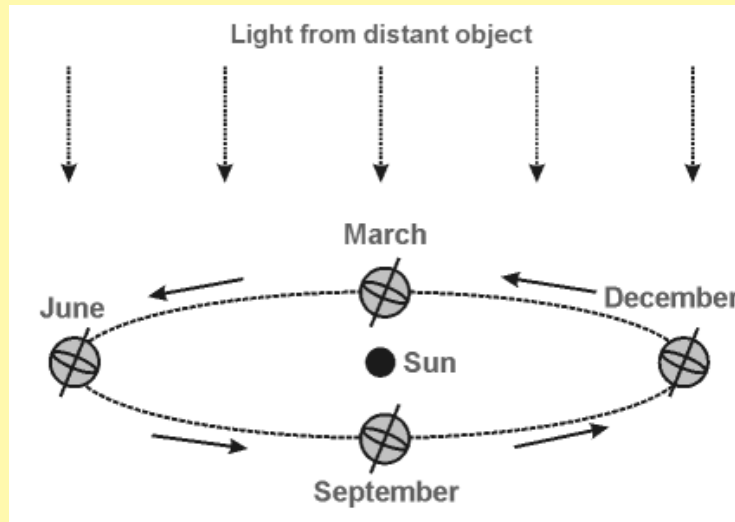
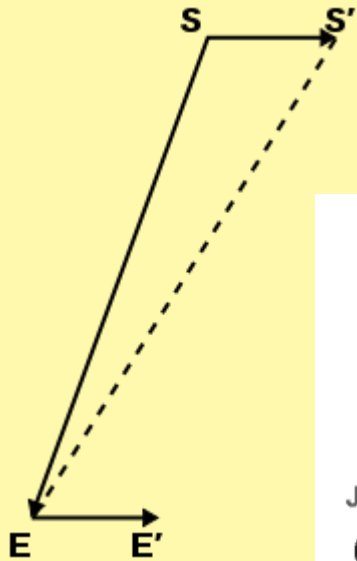


Mikołaj Kopernik (1473-1544)

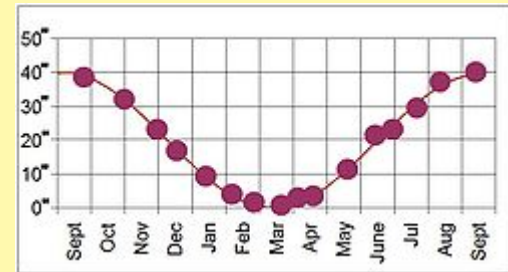


Klasyczne dowody teorii Kopernika

Aberracja: James Bradley 1725
(ruchy g Draconis)

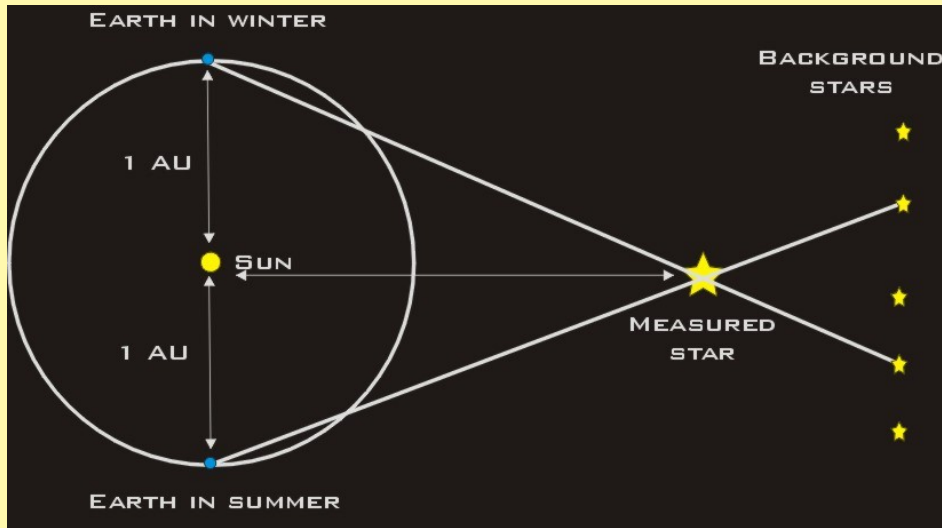


James Bradley (1693-1762),
Astronomer Royal



Klasyczne dowody teorii Kopernika

Paralaksa: F.W. Bessel, 1838
(odległość do 61 Cyg)



Prawa Keplera

- I. Orbity planet są elipsami; Słońce znajduje się w jednym z ognisk
- II. Każda z planet zakreśla równe pola w równych odstępach czasu
- III. Kwadraty okresów obiegu planet są proporcjonalne do sześciątów wielkich półosi ich orbit

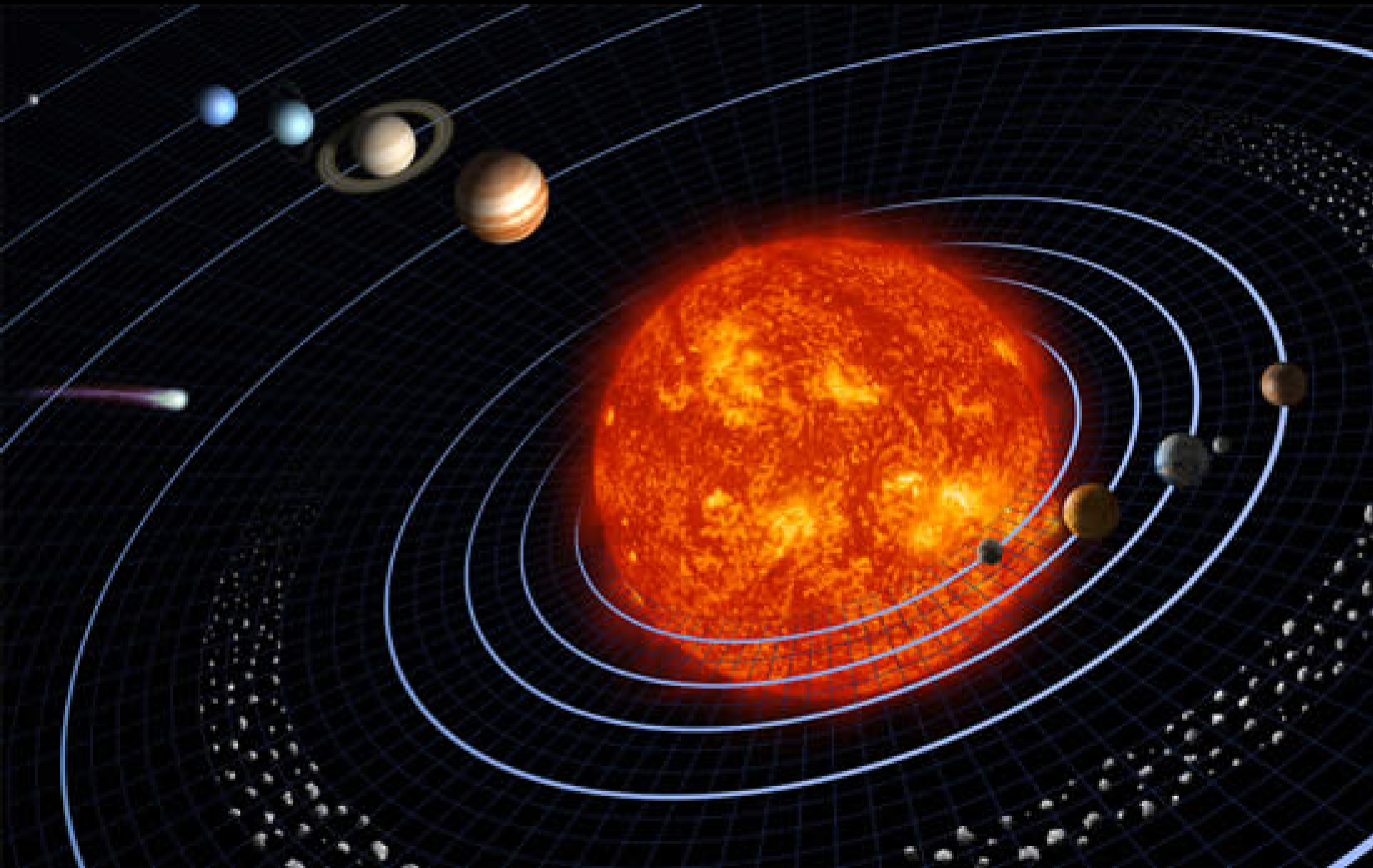


Johannes Kepler (1571-1630)

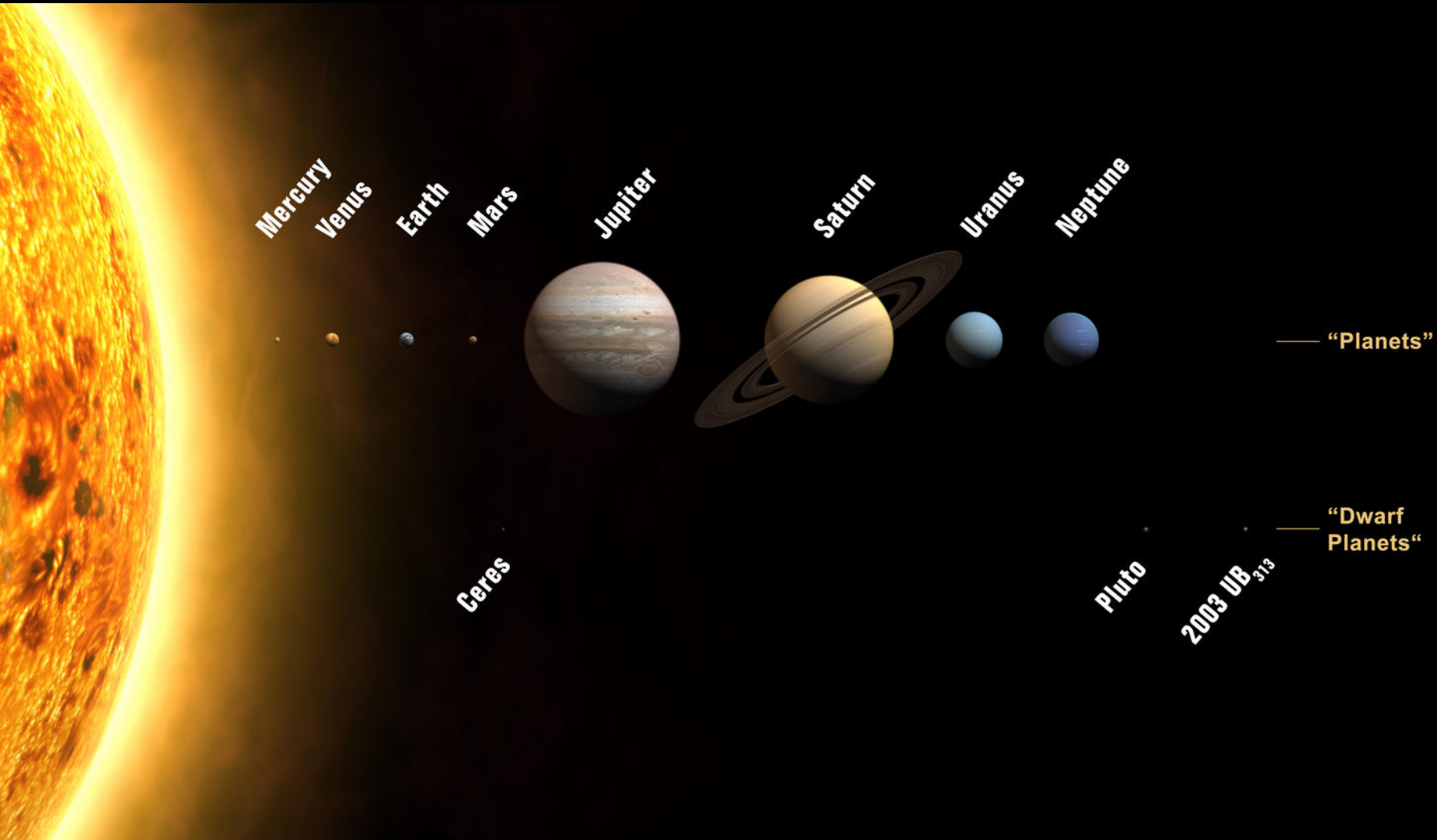
Planety odkryte w „nowożytności”

- Uran: Herschel 1781 (kometa?) Wcześniej bywał obserwowany i traktowany jako gwiazda
- Neptun: Galle 1846 (Leverrier: wskazówki teoretyczne)
- (Pluton: Tombaugh 1930 – planeta karłowata)
- (Ceres: Piazzi 1801 – planeta karłowata)

Planety (do 2006 r)



Planety (po 2006 r)



Planety (po 2006 r)

- Planety i planety karłowate:

- Orbity wokół Słońca

- Kształt ~kulisty (\longleftrightarrow grawitacja ważniejsza od sił ciała sztywnego)

- Nie są satelitami

- Różnica:

- Planety **mają** grawitacyjny wpływ na otoczenie swojej orbity (“czyszczenie”)

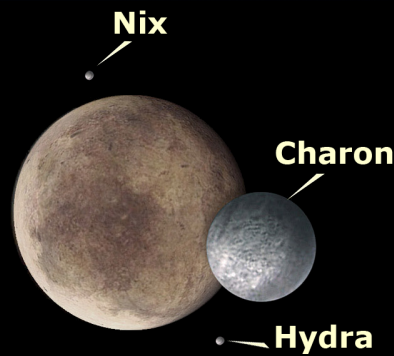
- A planety karłowate **nie**

Planety karłowate (po 2006 r)

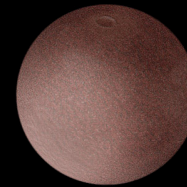
Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)



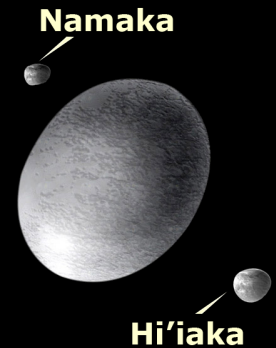
Eris



Pluto



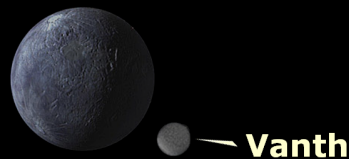
Makemake



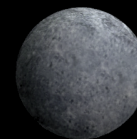
Haumea



Sedna



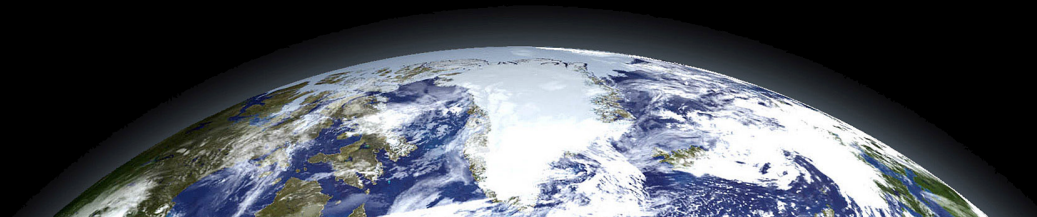
Orcus



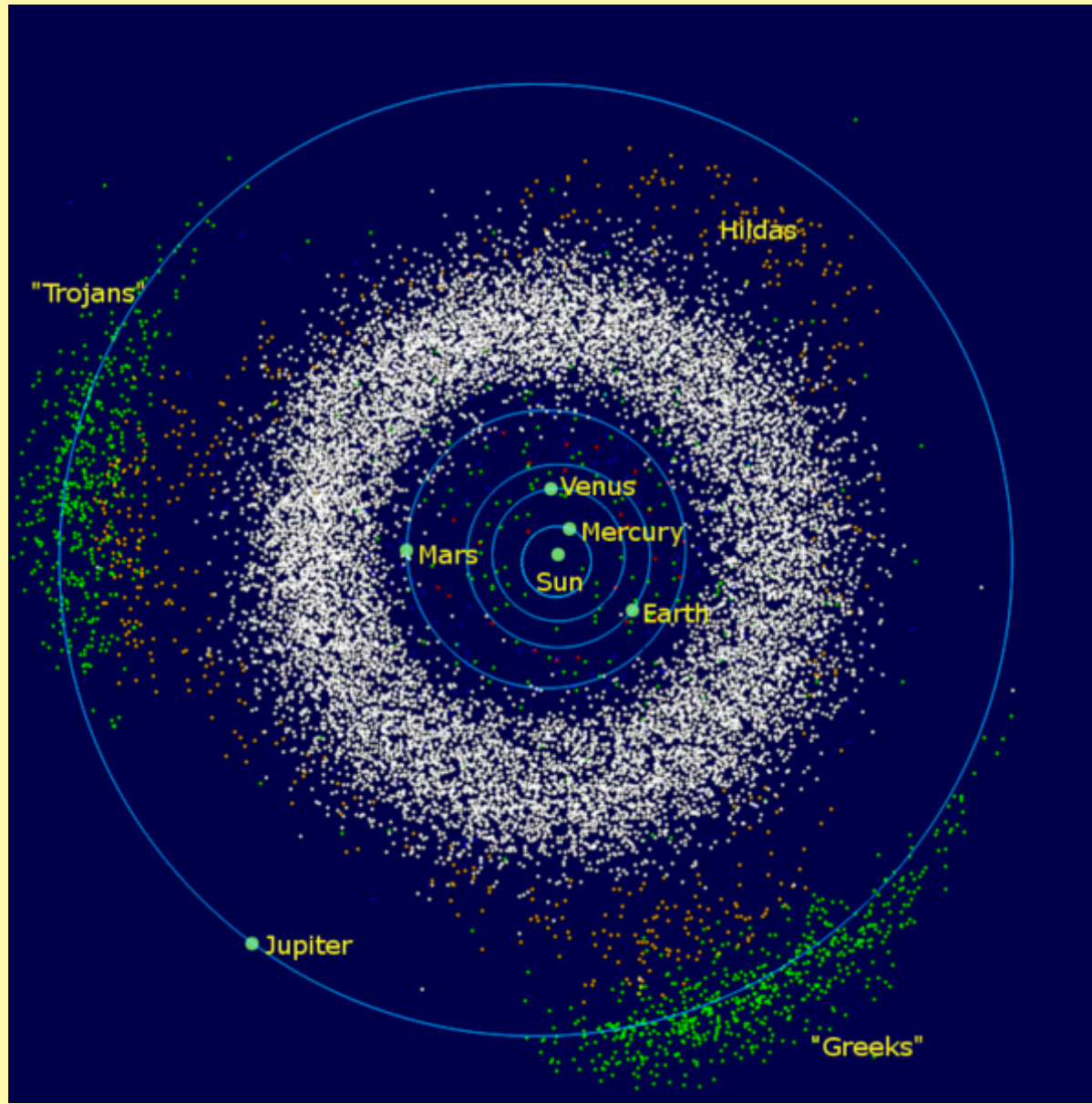
2007 OR₁₀



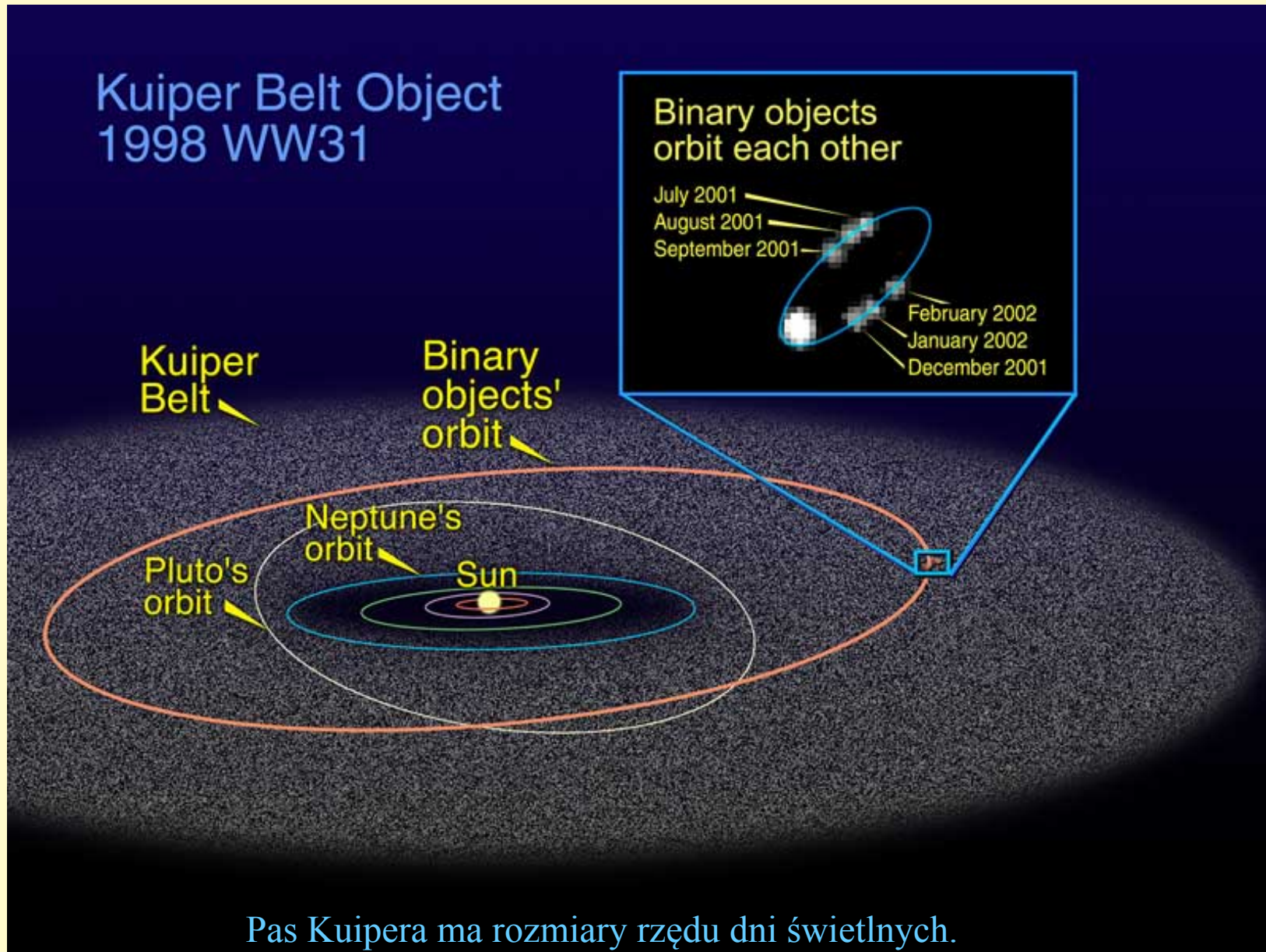
Quaoar



Pas Planetoid



Pas Kuipera

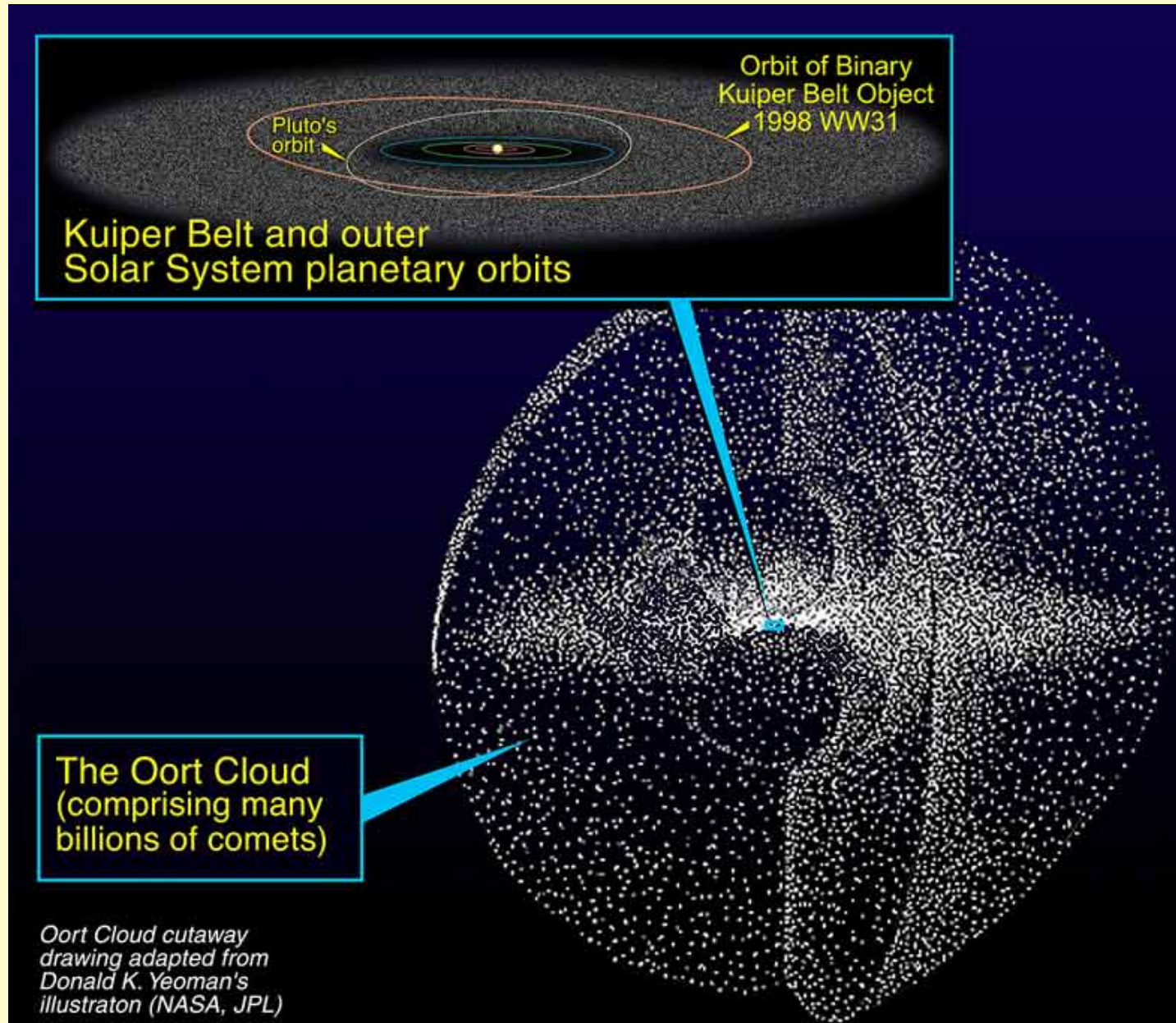


Pas Kuipera ma rozmiary rzędu dni świetlnych.

Obłok Oorta

Średnica
Obłoku Oorta
jest rzędu
miesiący
światlnych.

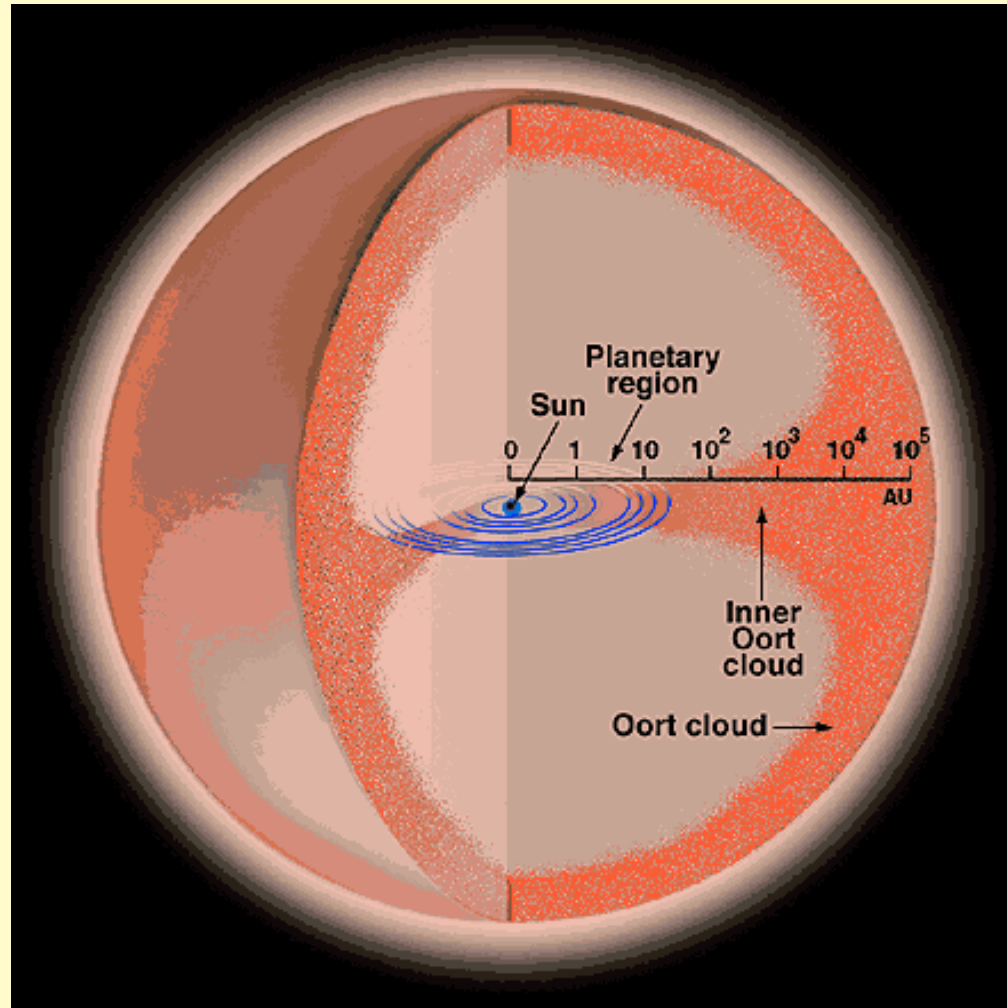
(Obłok Oorta
nie jest
bezpośrednio
obserwowany)



Obłok Oorta

Średnica
Obłoku Oorta
jest rzędu
miesiący
światlnych.

(Obłok Oorta
nie jest
bezpośrednio
obserwowany)



Słońce

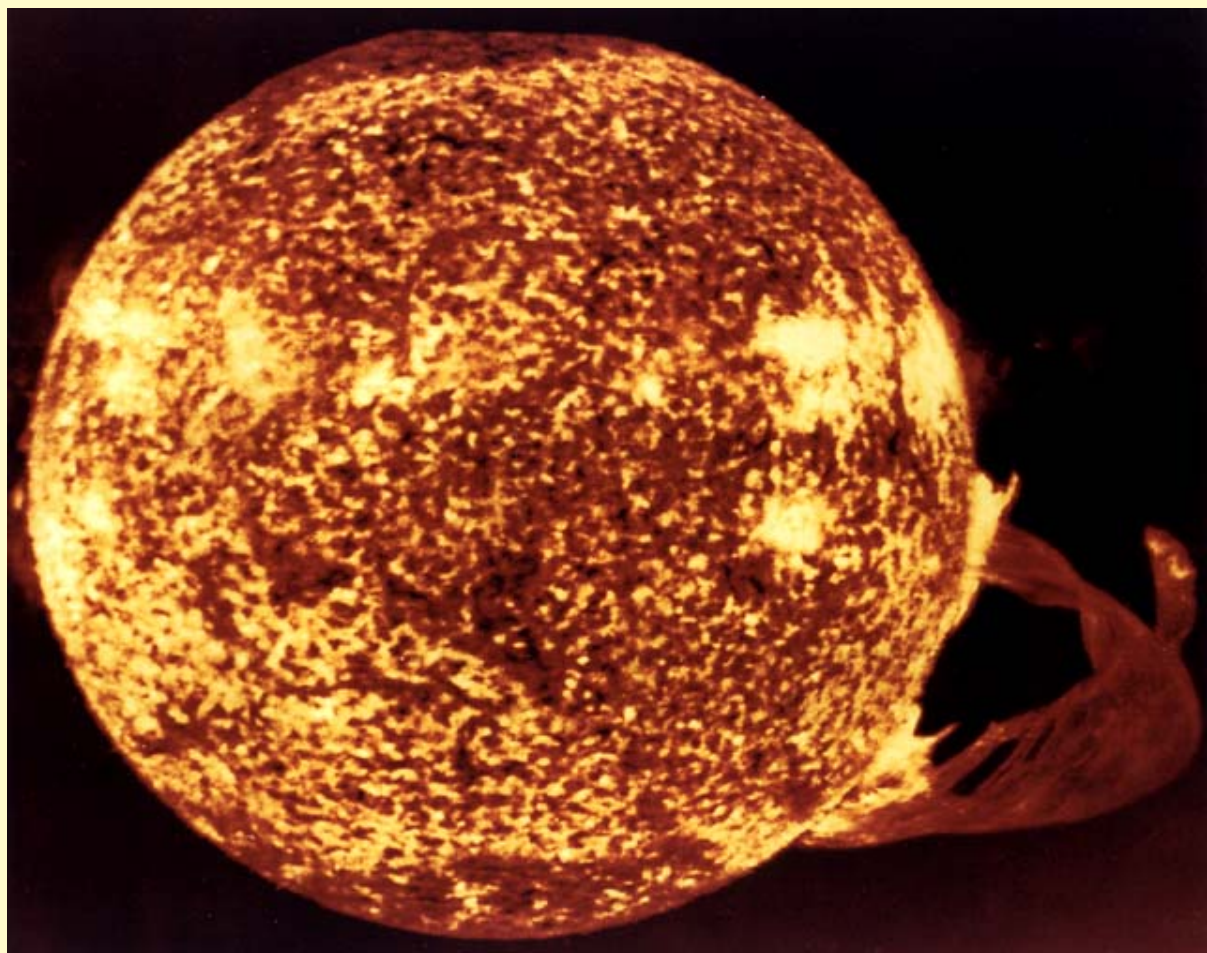
$D=1,4$ mln km

$M=332\,946$ [mas Ziemi]
 $= 2 \cdot 10^{30}$ kg

$T=5\,800$ K
(powierzchnia)

$T=15$ mln K (centrum)

$L=4 \cdot 10^{26}$ W



Energia ze Słońca

$$L=4*10^{26} \text{ W} \quad F=1400\text{W/m}^2$$

Moc „dostępna” kuli ziemskiej: $1.8*10^{17} \text{ W}$

(2005)

Obecna łączna moc urządzeń energetycznych zainstalowanych na świecie wynosi blisko **13 terawatów** ($1.3*10^{13} \text{ W}$). Ale to nie wystarczy. Do 2050 roku światowe zużycie energii podwoi się, a pod koniec wieku będzie trzy razy większe niż dziś, nawet jeśli nauczymy się oszczędzać energię ...

1 człowiek 2000kcal/dobę – to średnio 97W

$6*10^9$ ludzi: moc ok. $5.8*10^{11} \text{ W}$

Energia ze Słońca



2007: największa elektrownia słoneczna (Portugalia)

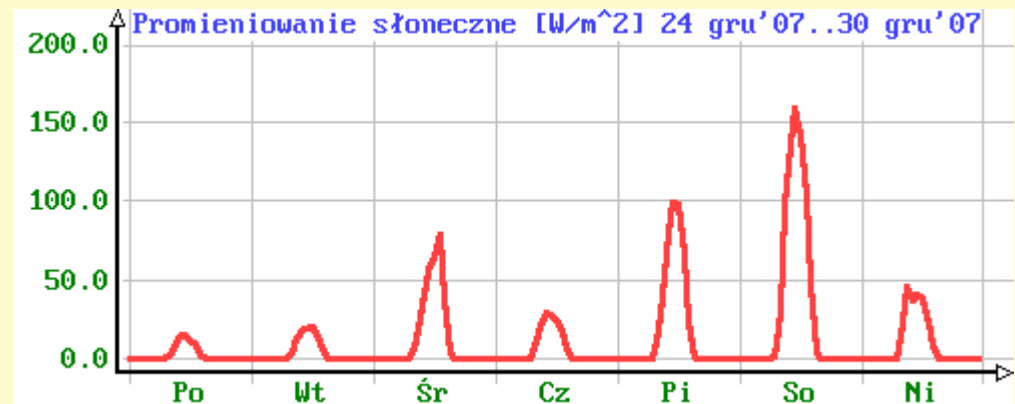
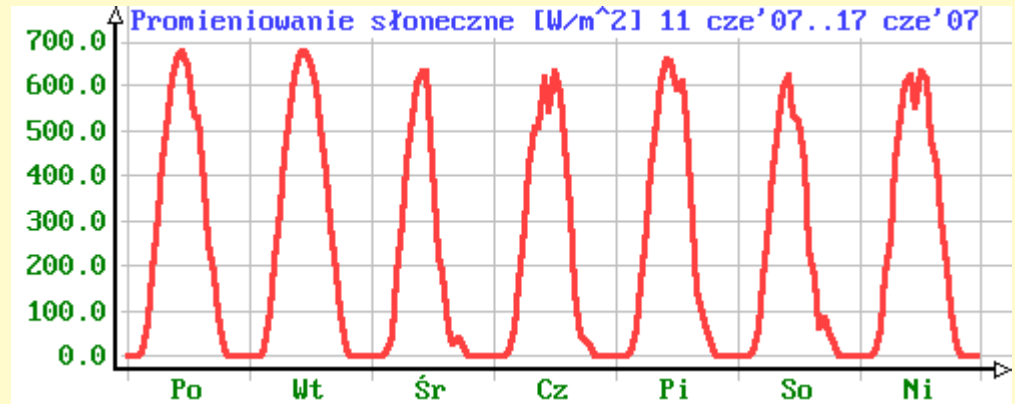
GW (30.III): 61 mln euro, 60 ha, moc 11MW – to 11000 kWh/h

$11000 \text{ kWh/h} * 12\text{h} * 365\text{d} = 48 \text{ mln kWh/rok} = 9 \text{ mln zł/rok}$ (bez “dystrybucji”)

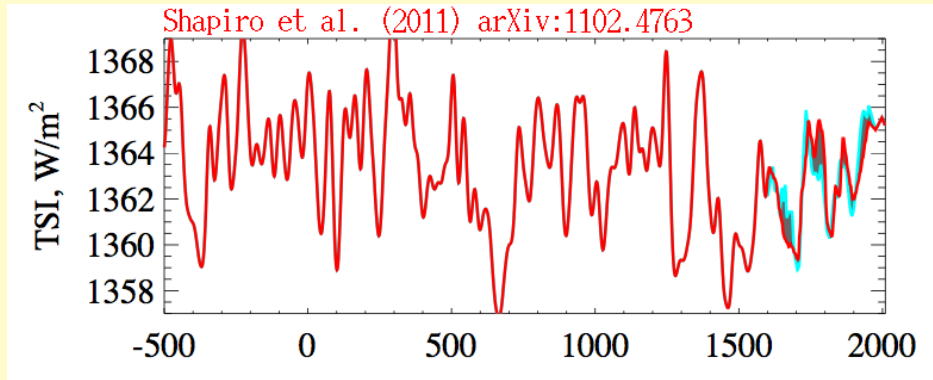
Pory roku

Wykresy obok: mierzona w Ursusie moc promieniowania Słońca przypadająca na jeden metr kwadratowy powierzchni Ziemi w 3 tygodniu czerwca i ostatnim tygodniu grudnia 2007. (przez chmury!)

<http://www.meteo.waw.pl/>

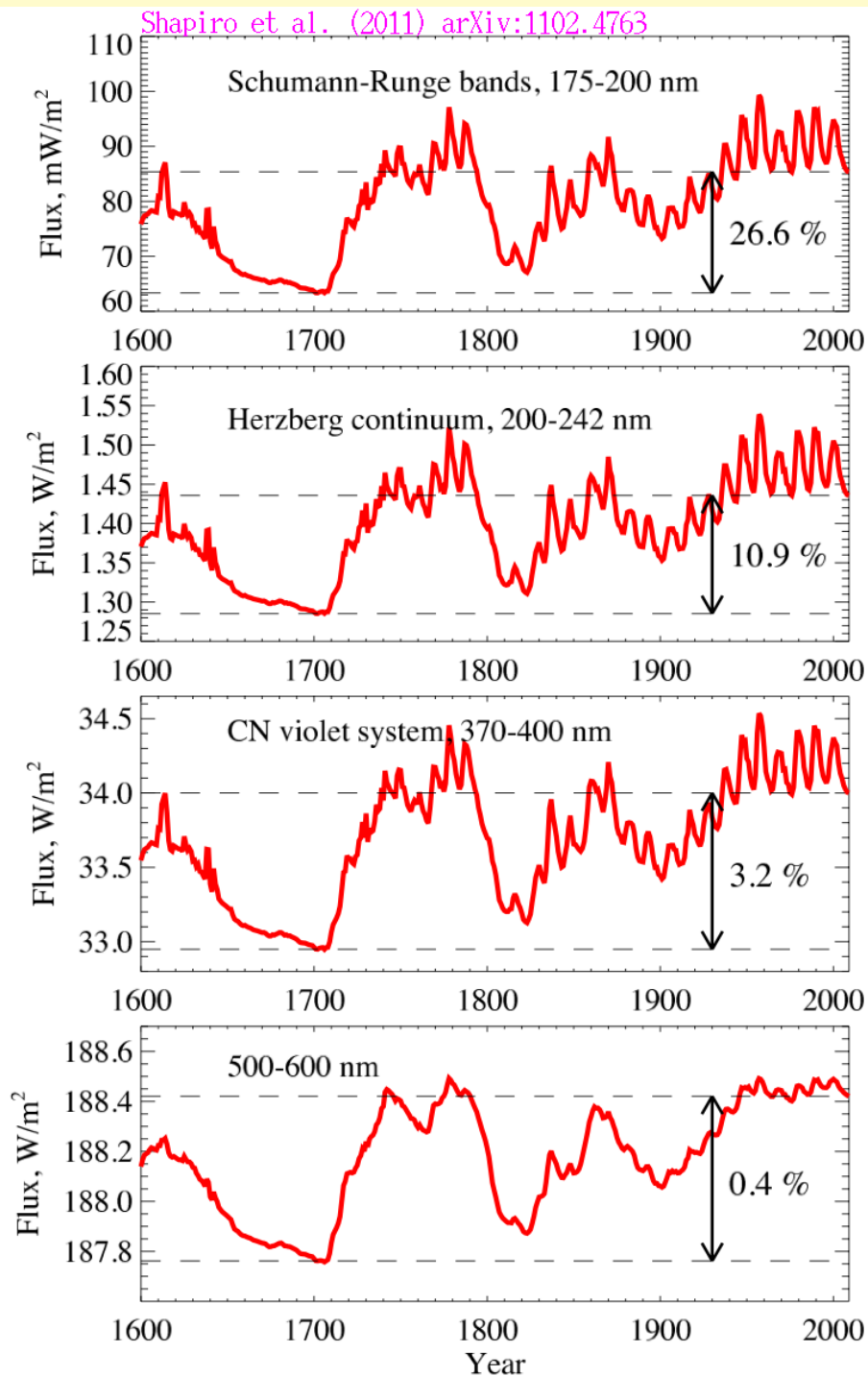


Klimat?



Wykresy: całkowity i pokazany w
wybranych zakresach strumień
energii słonecznej docierający do
Ziemi.

(Korelacje z liczbą plam na Słońcu od
1610; stosunki izotopów w słojach
drzew lub lodzie Grenlandii od 7000
pne. Aktywność Słońca wpływa na
magnetosferę, która „chroni” przed
prom. kosmicznym.)



Klimat poza Ziemią?

Traktujemy Słońce i planetę (księżyc) jak doskonale czarne kule, promieniujące zgodnie z prawem Stefana - Boltzmana

Zakładamy b. duże przewodnictwo cieplne planety (\rightarrow stała temperatura powierzchni)

W stanie stacjonarnym moc pochłaniana (L^+) przez planetę i moc wypromieniwana (L^-) są równe. Prowadzi to do zależności obok.

(W rzeczywistości obecność atmosfer/łodu bardzo komplikuje to uproszczone oszacowanie)

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$$

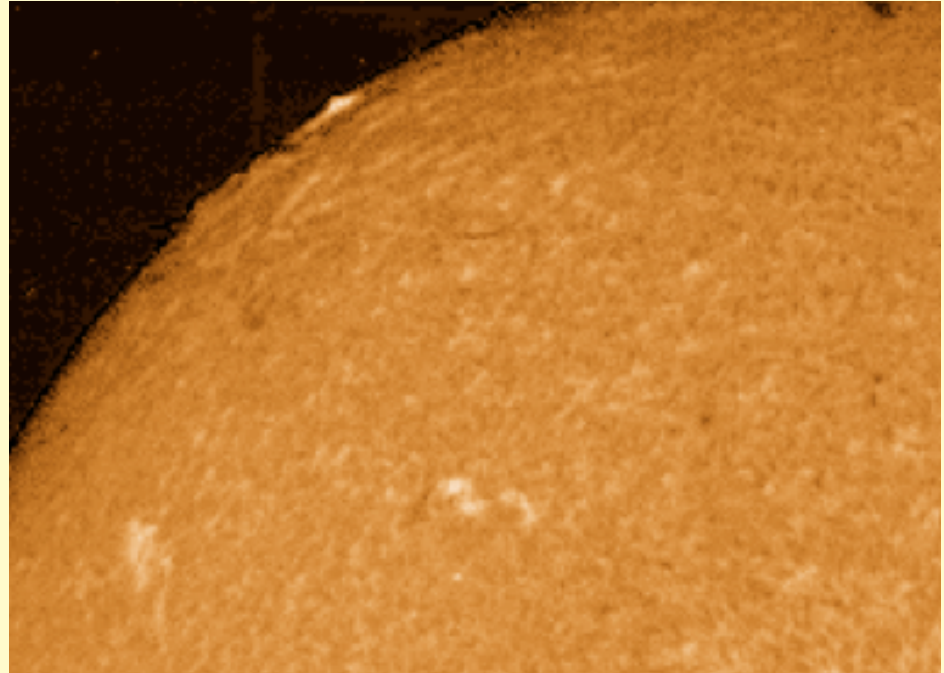
$$F_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{4\pi d^2}$$

$$L^+ = \pi R_p^2 F_{\odot}$$

$$L^- = 4\pi R_p^2 \sigma T_p^4$$

$$\Rightarrow T_p = \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2d}} T_{\odot}$$

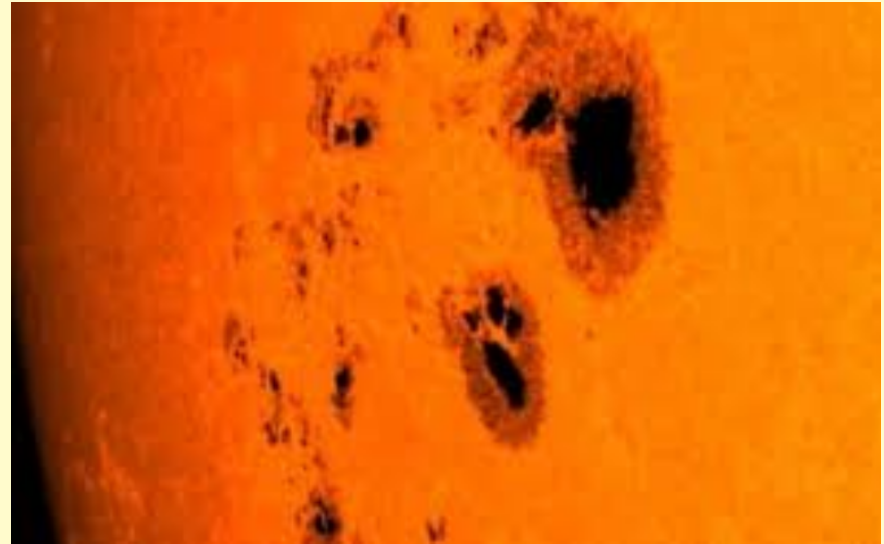
Słońce



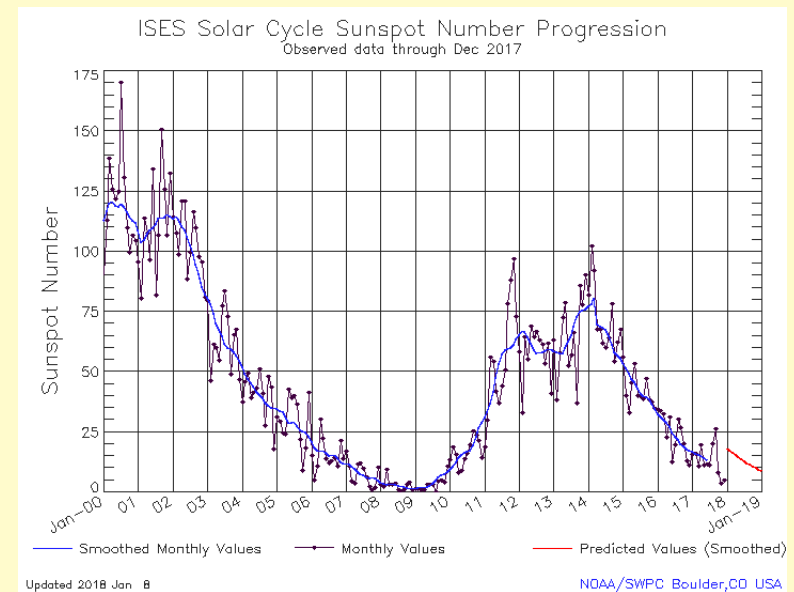
Ziarnistość powierzchni → konwekcja

Słońce

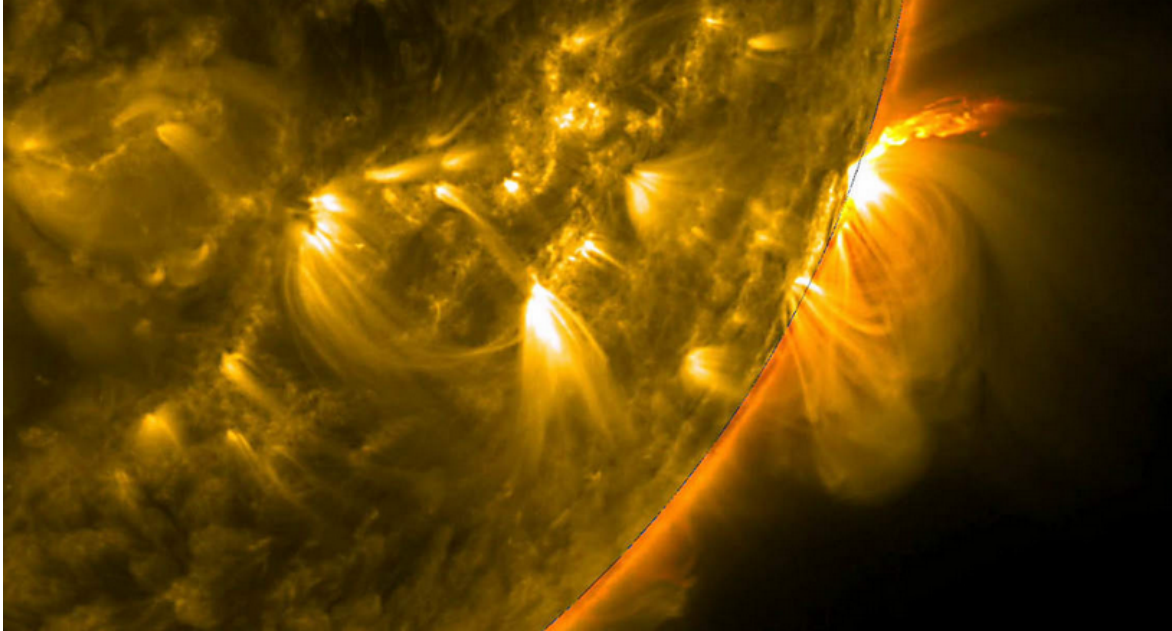
Plamy: silniejsze pole magnetyczne → słabsza konwekcja → niższa temperatura gazu (ale: fale magnetohydrodynamiczne)



Aktywność Słońca jest cykliczna



Słońce

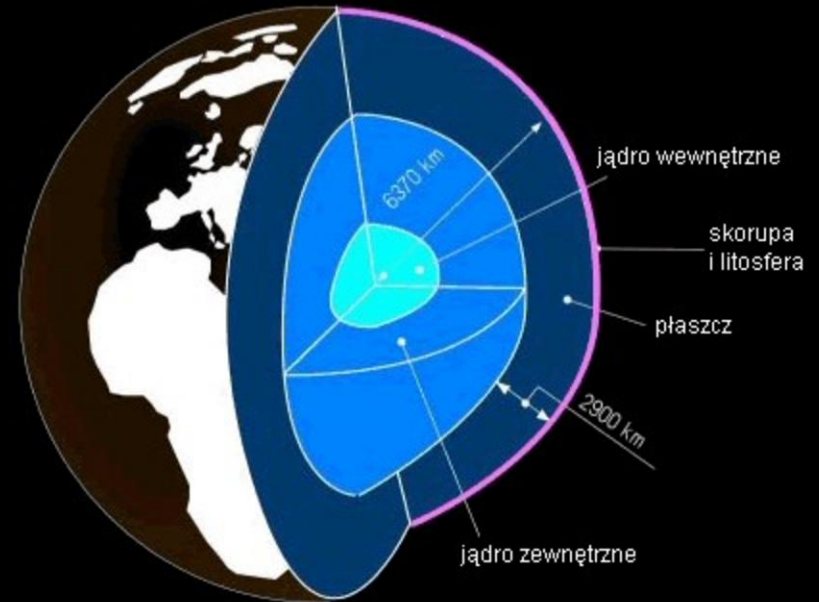


Rozbłyski – efekt wydzielenia dużej ilości energii, wcześniej zmagazynowanej w postaci pól magnetycznych, w związku z aktywnością Słońca („anihilacja pola”)

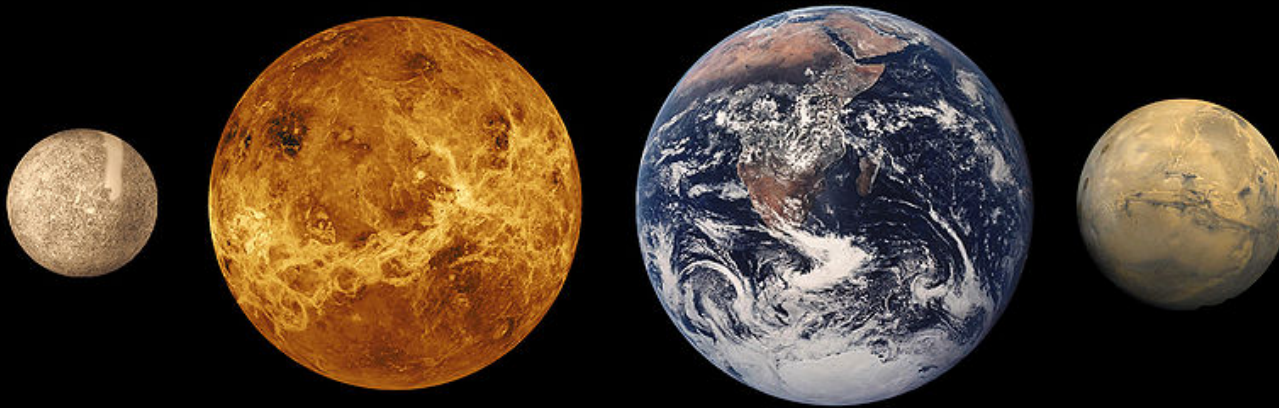
Wiatr słoneczny (plazma z korony słonecznej) docierający do jonosfery z prędkością kilkuset km/s, gwałtowne wyrzuty masy i rozbłyski wpływają na pogodę kosmiczną (zmienność natężenia zjawisk nawięcej o czynnik 1000)

Planety wewnętrzne

- Relatywnie małe
- Twarde skorupy
- Duża gęstość
- Płaszcz: izolacja cieplna (skały)
- Jądro Fe-Ni

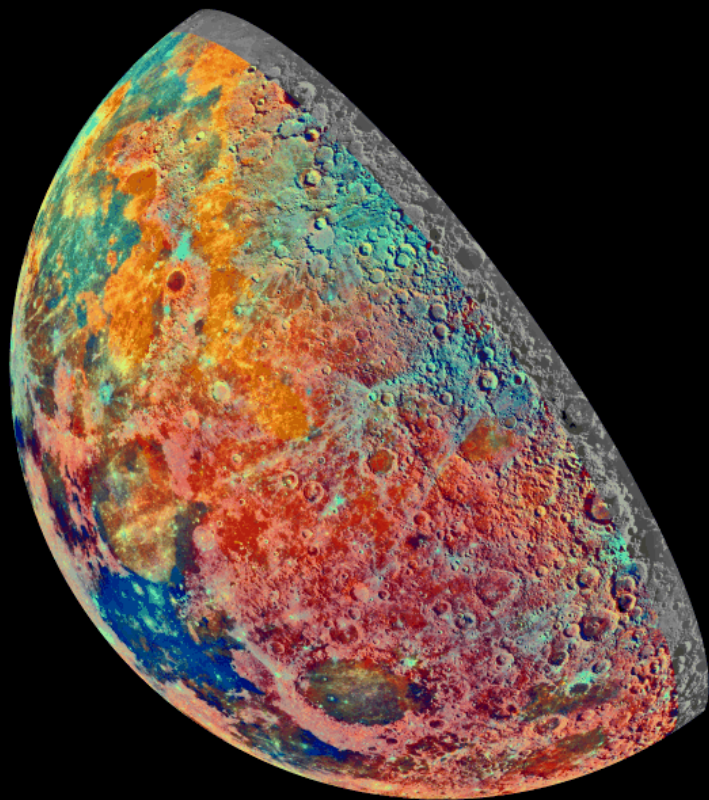


Planety wewnętrzne

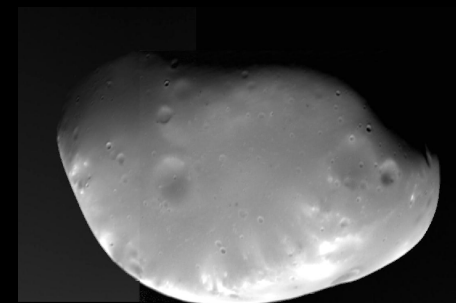
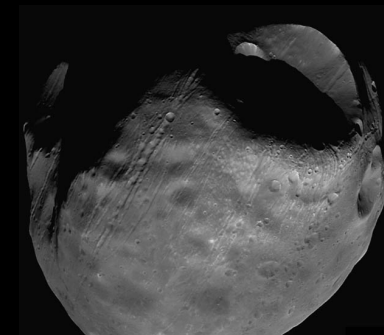


| | Merkury | Wenus | Ziemia | Mars |
|---------|---------|--------|--------|--------|
| m | 0.055 | 0.815 | 1 | 0.107 |
| D | 4878 | 12104 | 12756 | 6787 |
| a | 0.39 | 0.72 | 1 | 1.52 |
| e | 0.20 | 0.0068 | 0.0167 | 0.0934 |
| rho | 5.43 | 5.25 | 5.52 | 3.93 |
| atmosf. | nie | CO2 | N2+O2 | CO2 |
| księżyc | 0 | 0 | 1 | 2 |
| pierśc. | nie | nie | nie | nie |

Księżyce planet wewnętrznych

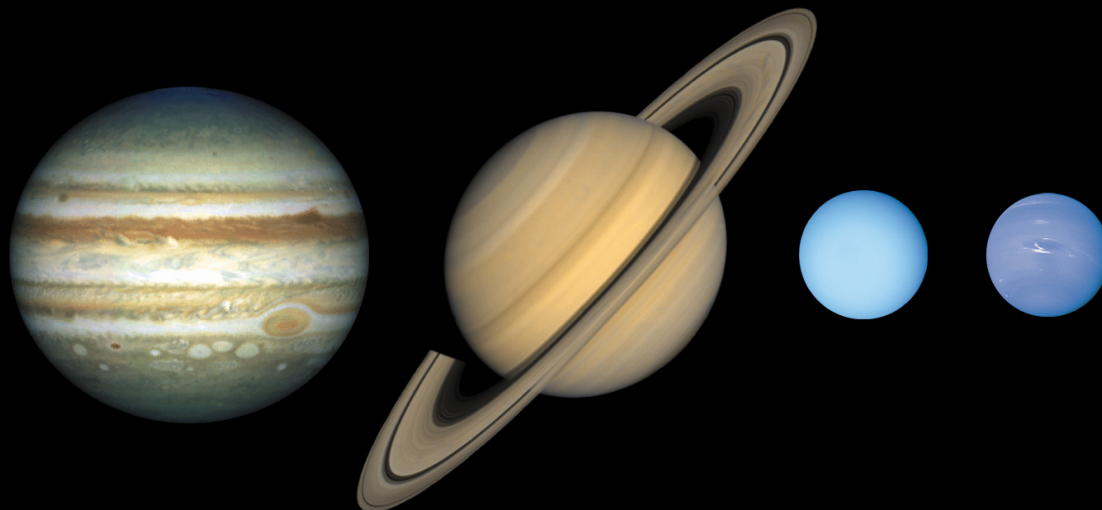


Ziemia – Księżyc podwójna planeta?



Phobos (22 km)
i Deimos (13 km)

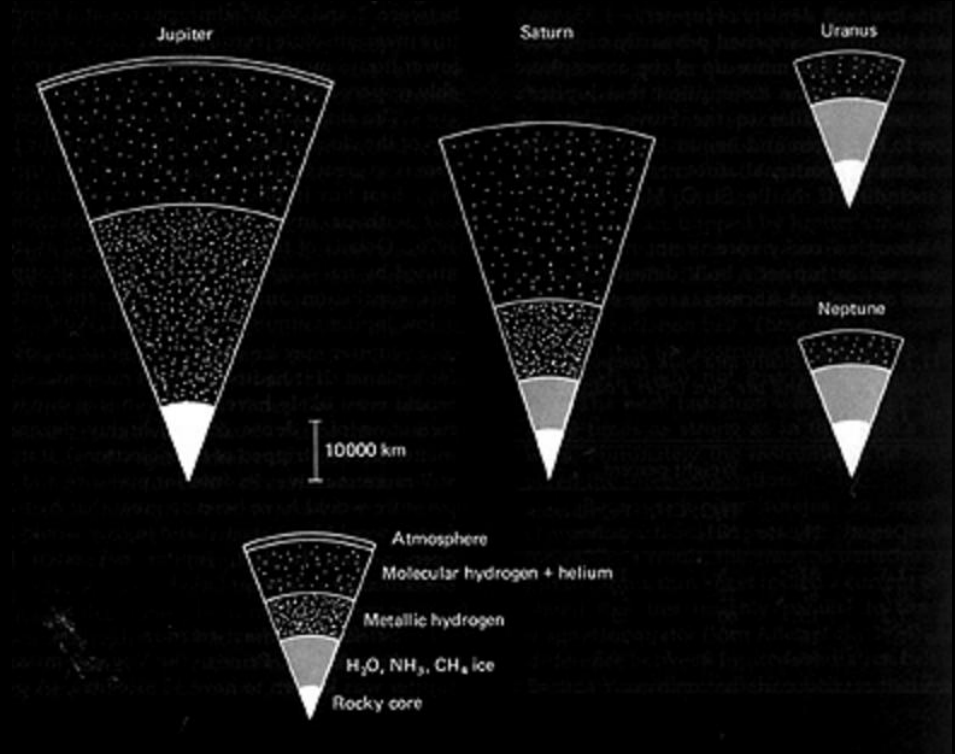
Planety zewnętrzne



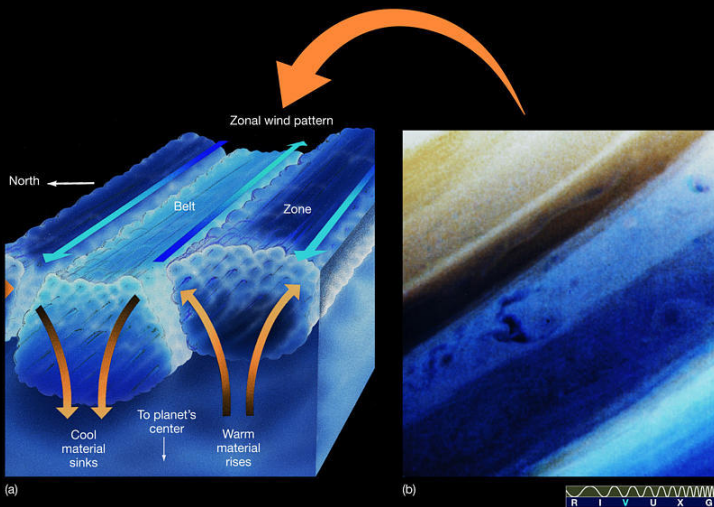
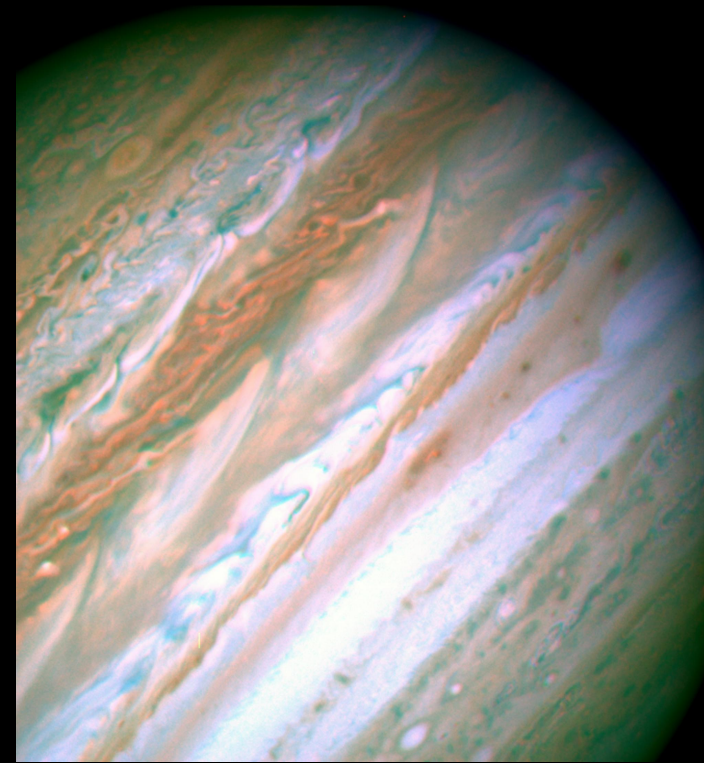
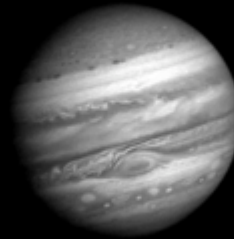
| | Jowisz | Saturn | Uran | Neptun |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| m | 318 | 95 | 15 | 17 |
| D | 142800 | 120000 | 51118 | 49528 |
| a | 5.20 | 9.54 | 19.18 | 30.06 |
| e | 0.0483 | 0.0560 | 0.0461 | 0.0097 |
| rho | 1.33 | 0.71 | 1.24 | 1.67 |
| atmosf. | H2+He | H2+He | H2+He | H2+He |
| księżyc | 63 | 62 | 27 | 13 |
| pierśc. | tak | tak | tak | tak |

Planety zewnętrzne

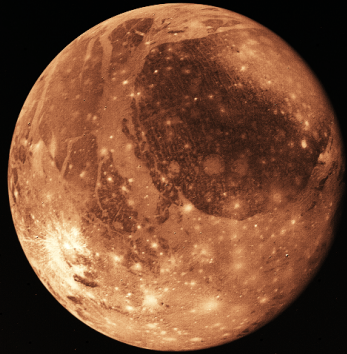
- Duże
- Brak sztywnej powierzchni
- Gęstości ~ 1
- Wydajny transport ciepła
- Jądro skalne
- Atmosfery!



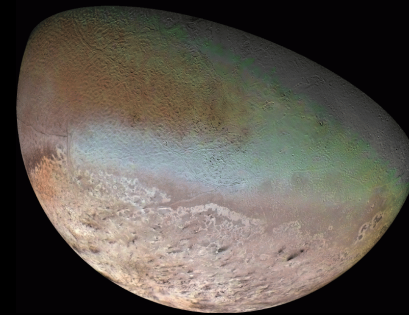
Jowisz - atmosfera



Księżyce planet zewnętrznych (przykłady)



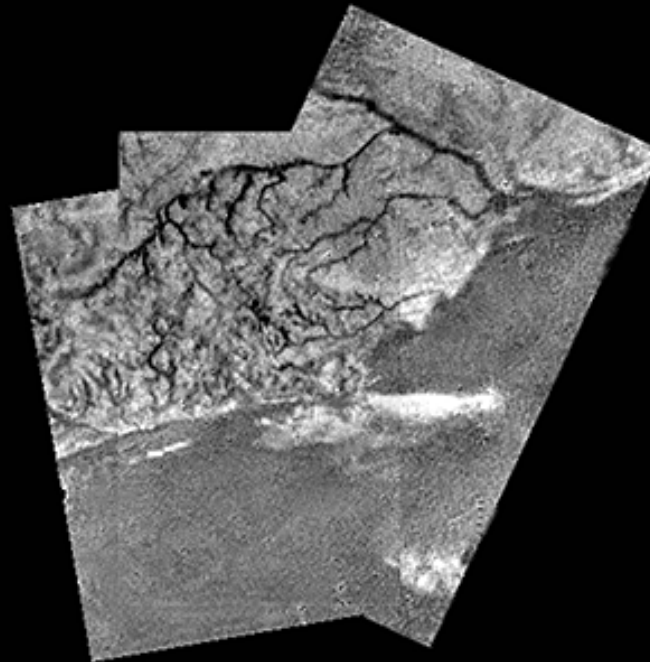
Ganimedes
(Jowisz)
D=5262 km



Triton
(Neptun)
2705 km

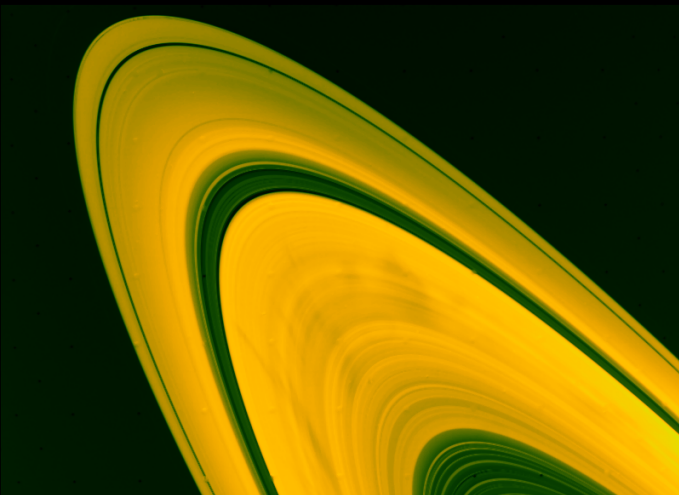


Io (Jowisz)
wulkany
P=1.8d

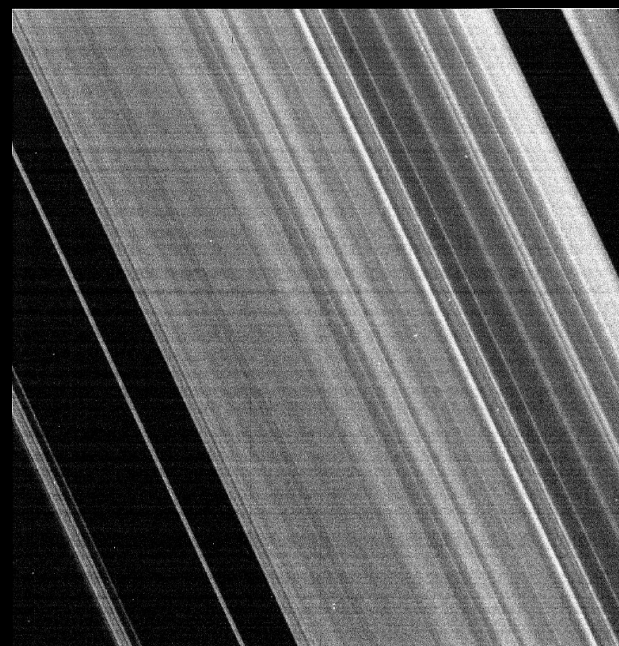


Tytan (Saturn)
z bliska
Szczegóły terenu

Saturn - pierścienie



Saturn



HST · WFPC2
December 1, 1994

PR94-53 · ST ScI OPO · December 1994 · R. Beebe (NMSU), NASA

12/13/94 zgl

Pierścienie gazowych olbrzymów

Przyspieszenie pływowe w odległości R od masy M działające na „krople” o promieniu r

$$a_t = \frac{2GM}{R^3}r$$

Przyspieszenie grawitacyjne na pow. kropli o masie m

$$g = \frac{Gm}{r^2}$$

Przybliżony warunek rozerwania kropli ($a_t > g$):

$$\frac{2M}{R^3} > \frac{m}{r^3}$$

Jesli $\rho_{\text{planeta}} = \rho_{\text{kropla}}$

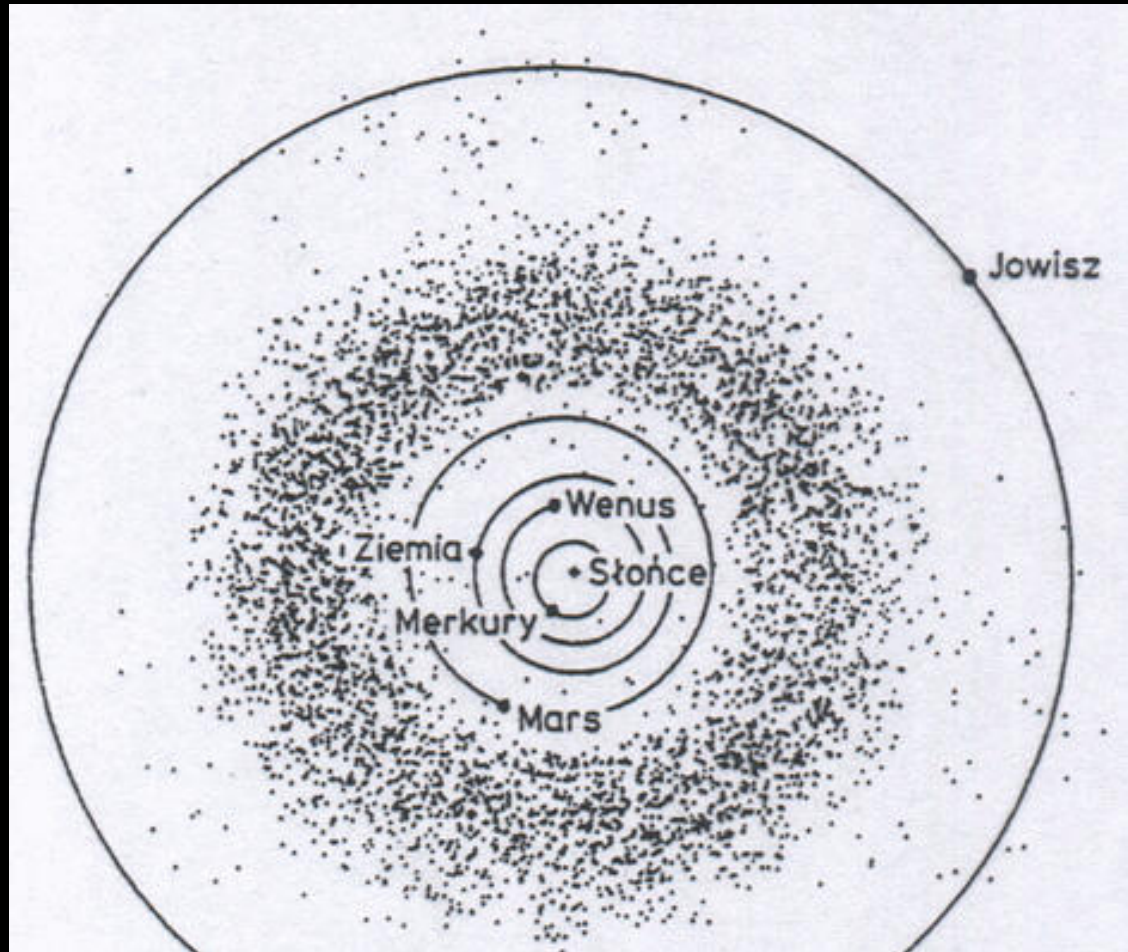
$$R_t = 2^{1/3}R_p = 1.26R_p \quad \text{Roche :} \quad R_t = 2.44R_p$$

Idea: planeta rozerwała niewielkie ciało (księżyc?) i z tego materiału – kamieni i brudnego lodu - powstały pierścienie. Problem: co miałyby doprowadzić do zbliżenia. Z drugiej strony: pierścienie występują wewnątrz promienia pływowego.

Pas planetoid

Duże planetoidy grupują się głównie pomiędzy orbitami Marsa i Jowisza

Największe mają średnice ok. 1000 km. Kilkaset przekracza 200 km. Towarzyszy im wiele mniejszych obiektów.

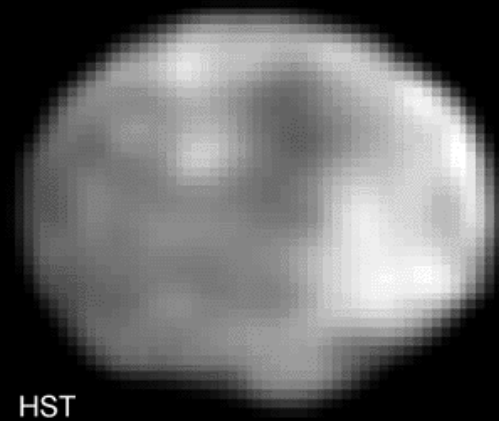


Vesta

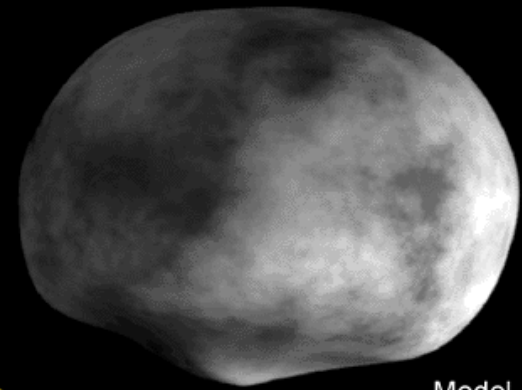
$a=353$ mln km

$D=500$ km

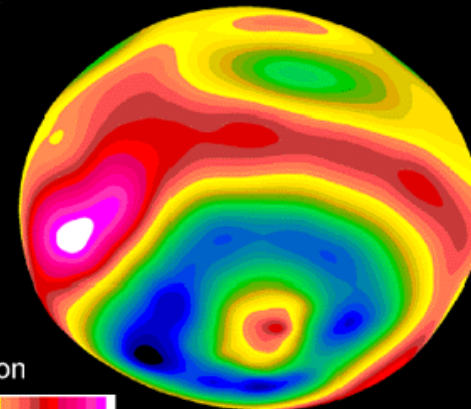
Planetoidy



HST



Model



Elevation



-12km

+12km

Asteroid Vesta

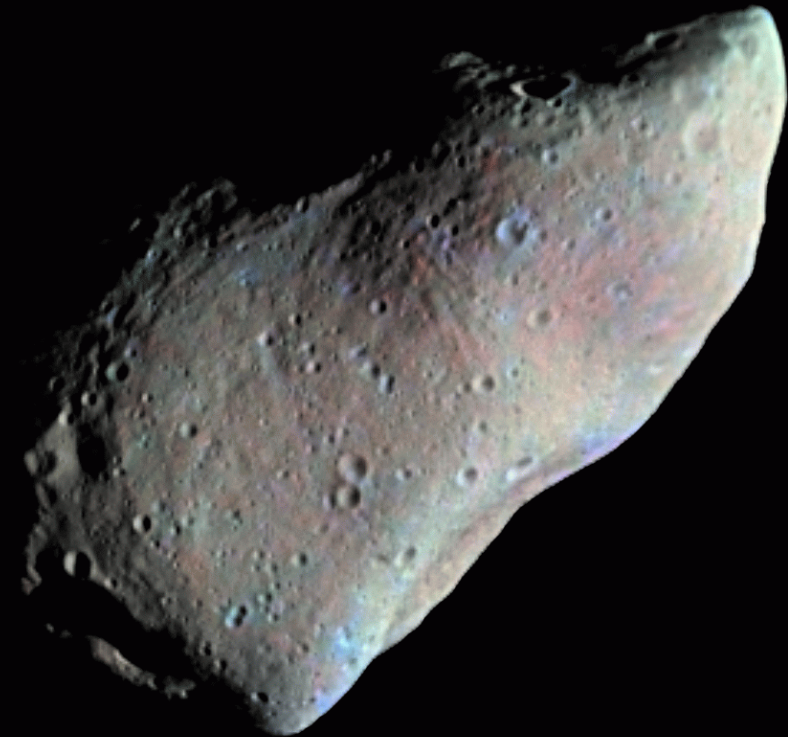
PRC97-27 • ST ScI OPO • September 4, 1997

P. Thomas (Cornell University), B. Zellner (Georgia Southern University) and NASA

HST • WFPC2

Planetoidy

Eros, Ida i Daktyl oraz Gaspra – przykłady niewielkich obiektów, które obserwowano z bliska



Efekt Jarkowskiego

Na ruch małych ciał wpływ mają różnice temperatury na powierzchni

Jeśli ruch obrotowy i orbitalny mają ten sam zwrot, “tylna” względem ruchu po orbicie powierzchnia ciała jest gorętsza. Różnica pędu wyrzucanych “do tyłu” i “do przodu” fotonów przyspiesza ruch ciała

Opisane tu zjawisko to efekt Jarkowskiego

$$F = \frac{dp}{dt}$$

$$F = \int \sin \theta d\theta \int d\phi R_p^2 \frac{\sigma(T_+^4 - T_-^4)}{c} \cos \theta$$

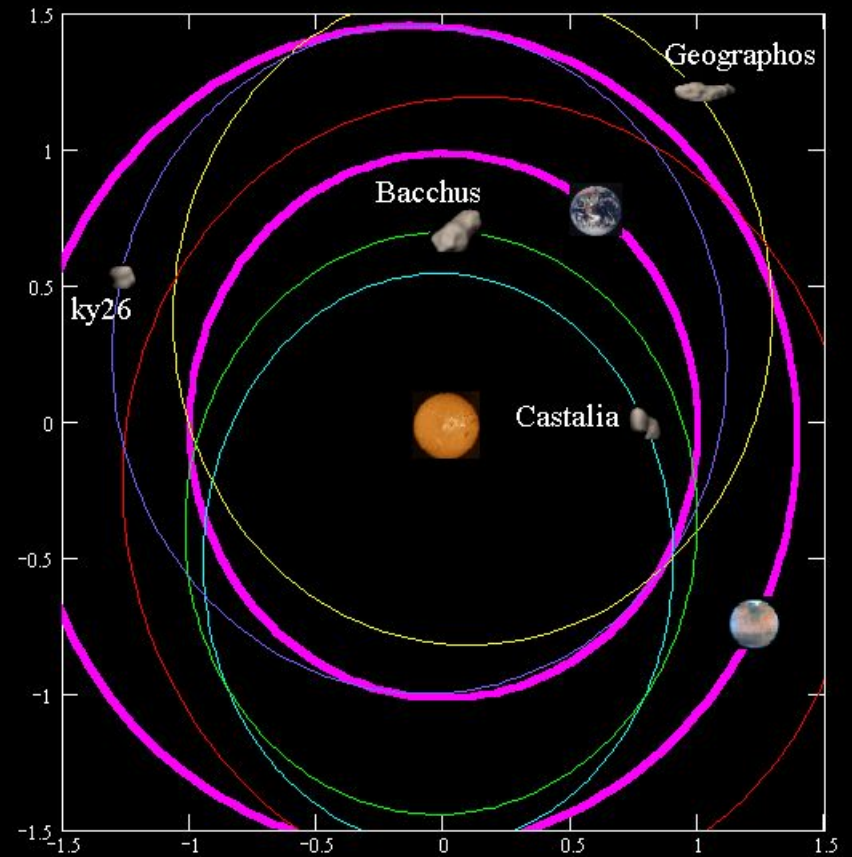
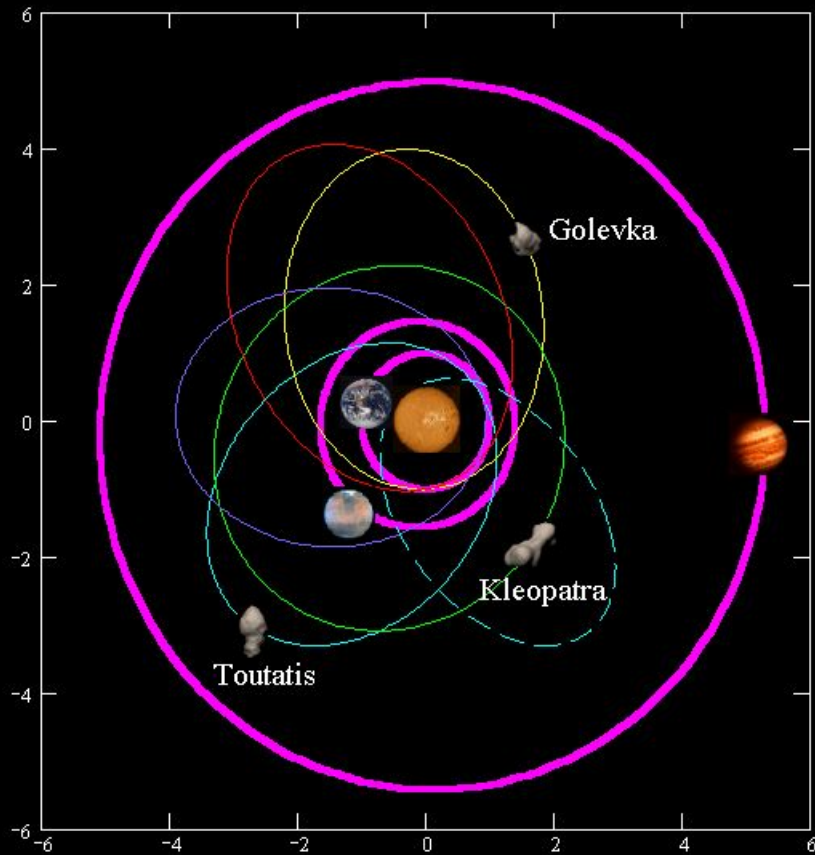
$$F = \frac{4\pi R_p^2 \sigma T_p^4 \Delta T}{c T_p} = \frac{1 R_p^2 L_\odot \Delta T}{4 d^2 c T_p}$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{3 L_\odot / c \Delta T}{16\pi \rho d^2 R_p T_p}$$

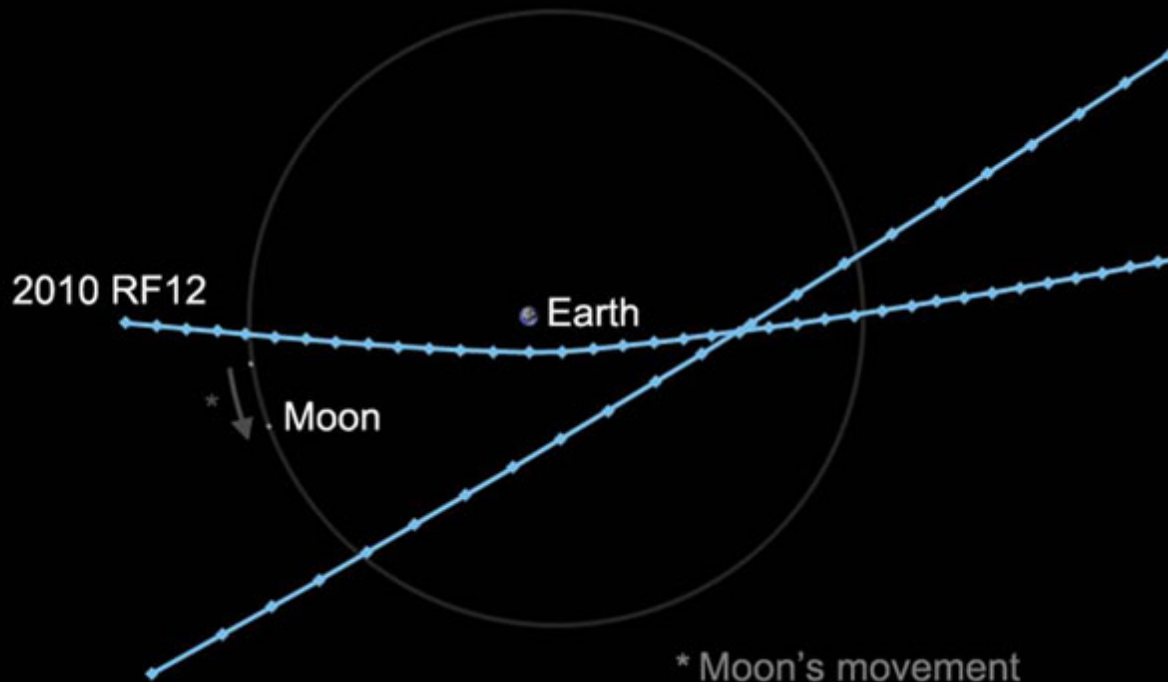
$$a \approx 10^{-10} \frac{m}{s^2} \left(\frac{2AU}{d}\right)^2 \left(\frac{1m}{R_p}\right) \left(\frac{\rho_{H_2O}}{\rho}\right) \left(\frac{\Delta T/T_p}{0.1}\right)$$

$$a * 10^6 y \approx 3 \frac{km}{s} () () () ()$$

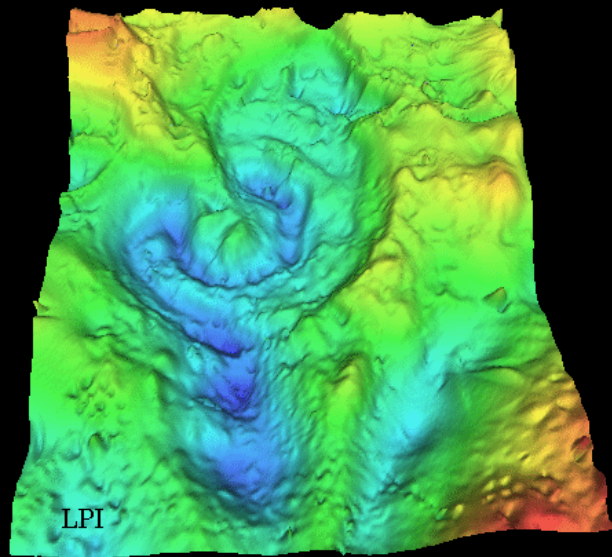
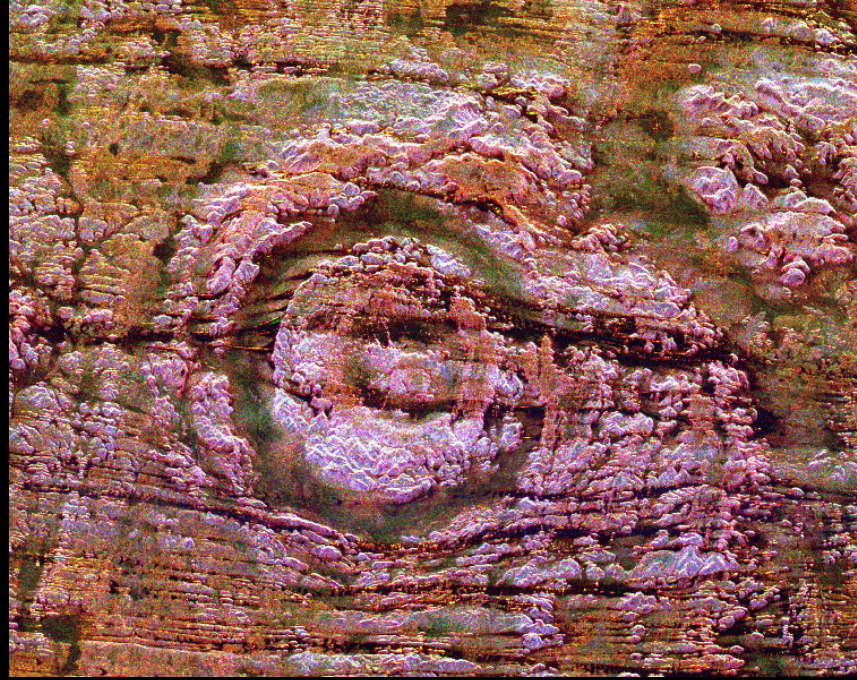
Planetoidy niebezpieczne



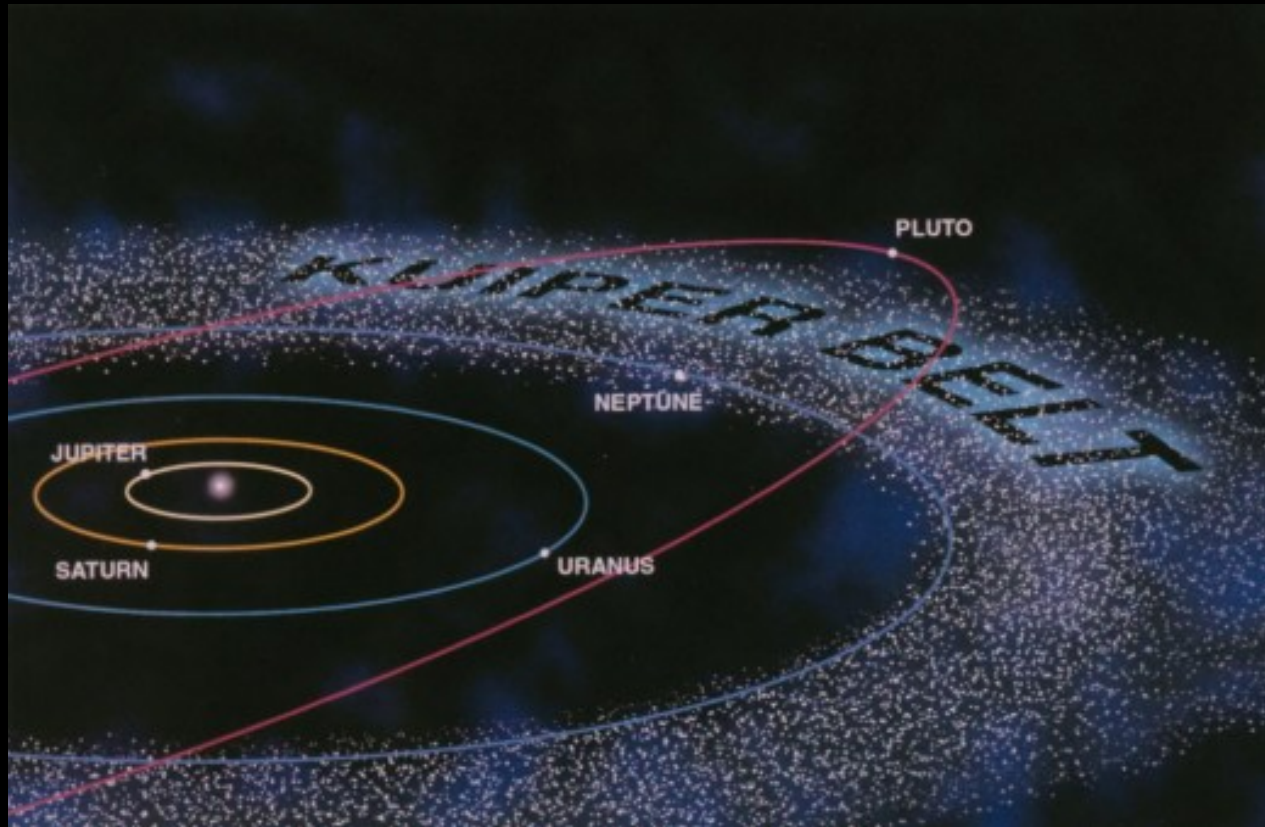
Planetoidy niebezpieczne



Przykład: 08.09.2010 dwie planetoidy o średnicach 10 – 20 m minęły Ziemię w odległości mniejszej niż odległość do Księżyca. Odkryto je 3 dni wcześniej. Tego typu obiektów jest ok. 50 mln, a takie przejścia występują co kilka dni. Raz na ~10 lat dochodzi do wejścia w atmosferę Ziemi.

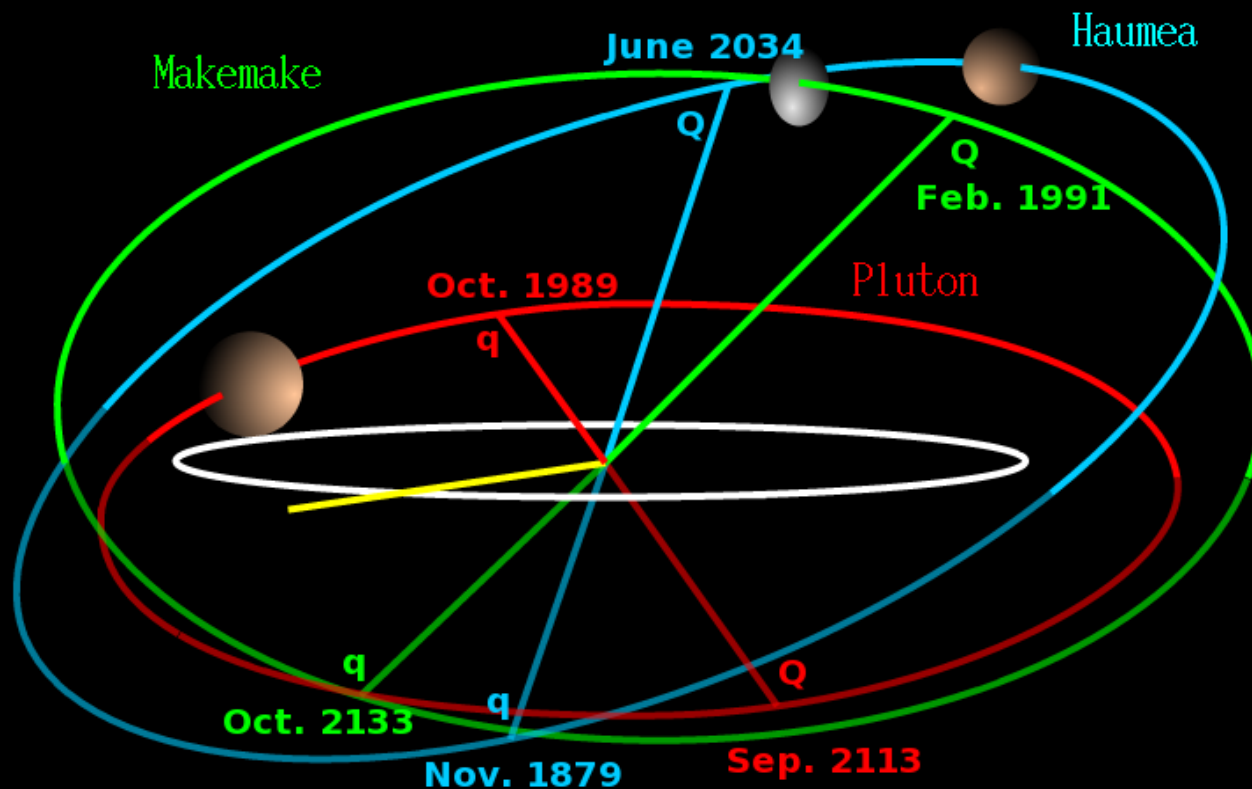


Pas Kuipera



Pas Kuipera 30 – 50 AU;

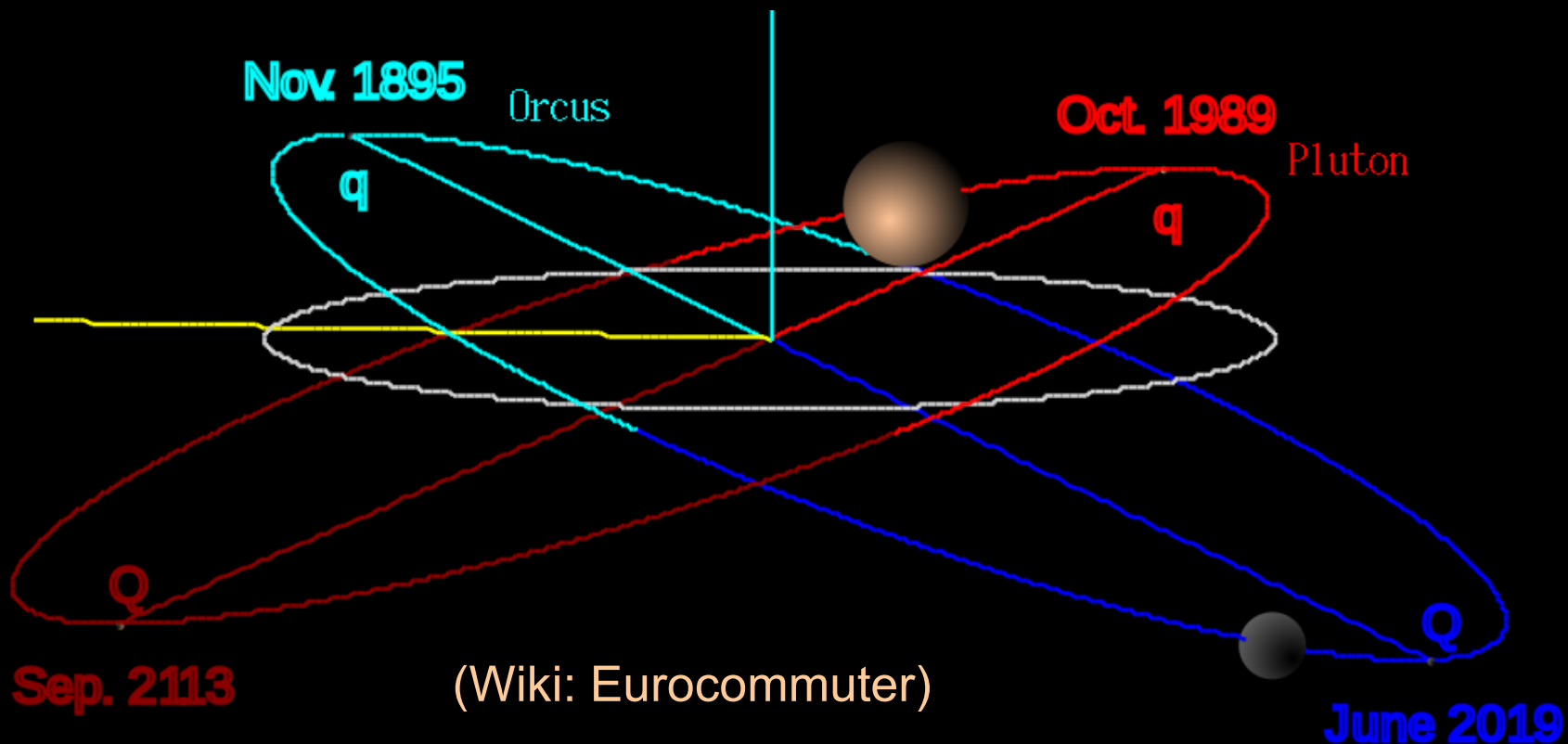
Różne obiekty Pasa Kuipera



(Wiki: Orionist, NASA, JPL)

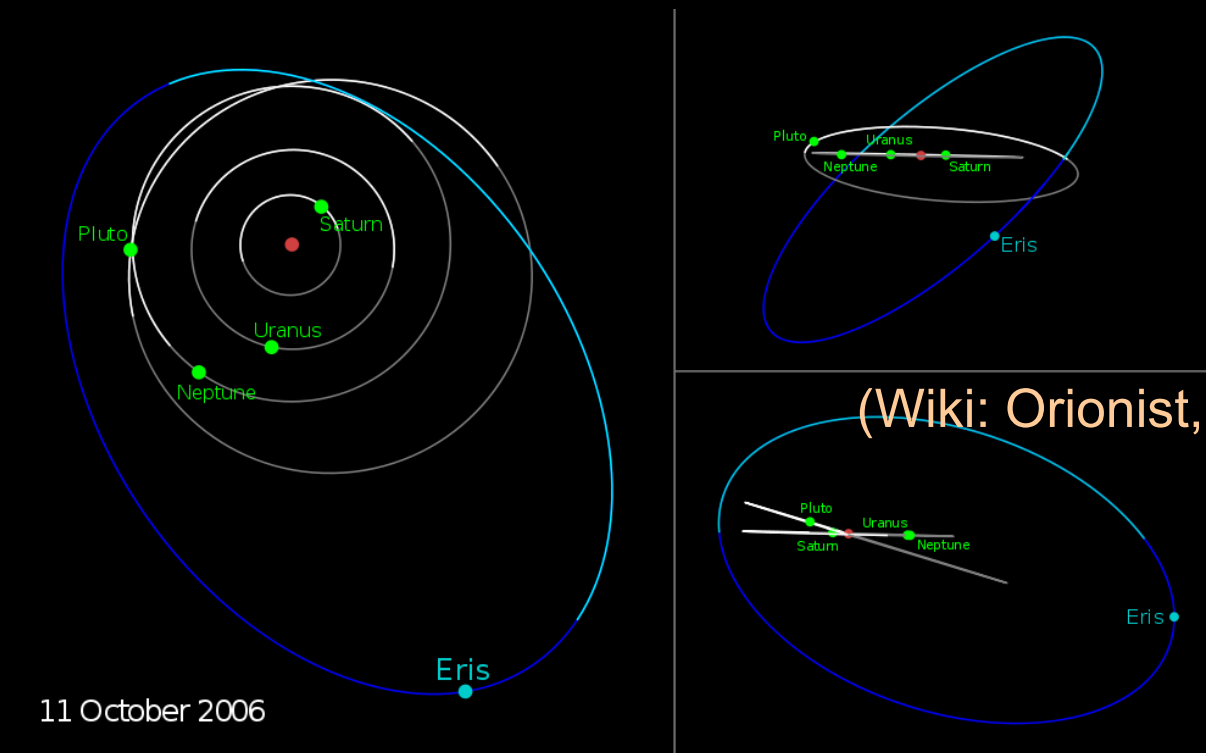
Makemake i Haumea to „klasyczne” obiekty Pasa Kuipera. Ich orbity są nieznacznie eliptyczne i mają wielkie półosie w przedziale $40 < a < 47$ AU. Nie zbliżają się do Neptuna na tyle, by mógł on znacząco zaburzać ich ruch; dzięki temu ich orbity są stabilne.

Różne obiekty Pasa Kuipera



Orcus to „rezonansowy” obiekt Pasa Kuipera. Jego orbita jest bardzo podobna do orbity Plutona – oba są w rezonansie 2:3 z Neptunem, tzn jeden obieg Słońca trwa w ich przypadku dokładnie 1,5 raza dłużej niż dla Neptuna. To powoduje, że zaburzenia ze strony Neptuna w kolejnych okresach orbitalnych znoszą się, a ruch jest stabilny.

Różne obiekty Pasa Kuipera



Orbit of Eris
(136199 Eris)

Perihelion: 37.77 AU

Aphelion: 97.56 AU

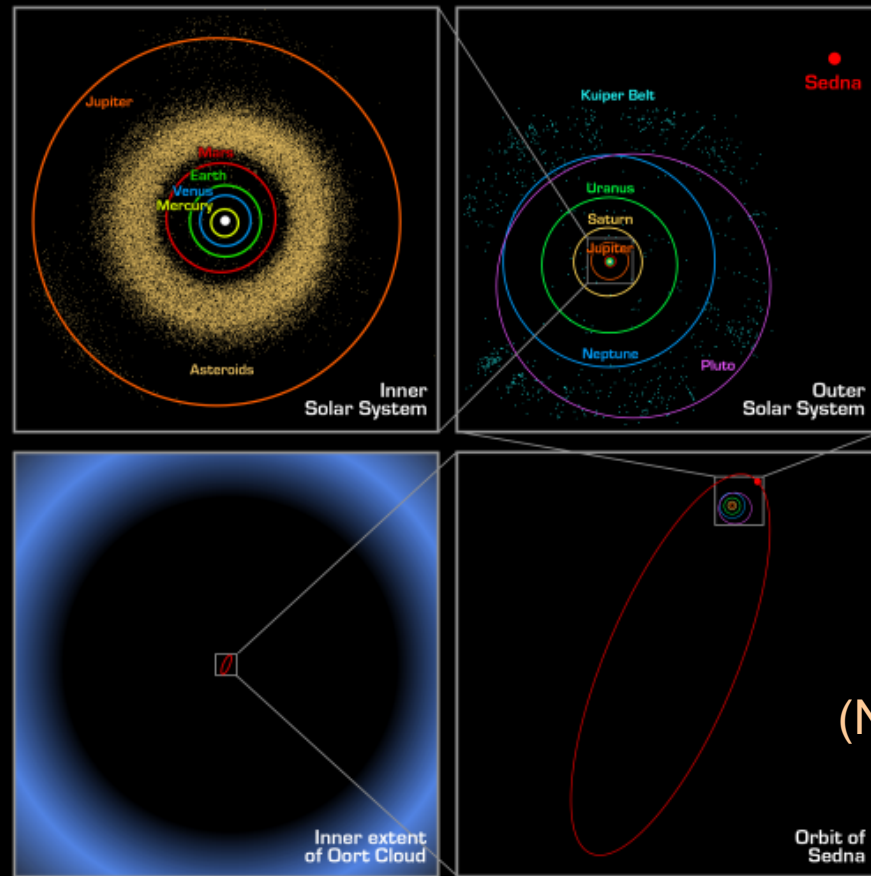
Orbital period: 557 years

Eccentricity: 0.44

Inclination: 44°

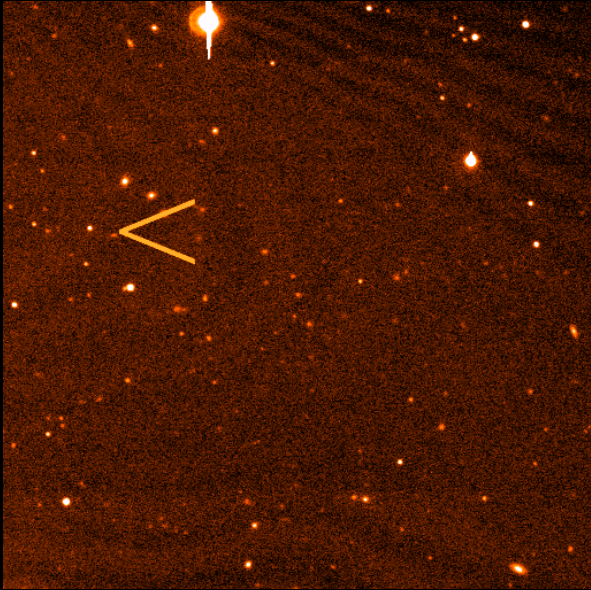
Eris to „rozproszony” obiekt Pasa Kuipera. Jej orbita jest znacząco wydłużona i nachylona do ekliptyki. Jest to zapewne skumulowany efekt zakłóceń ze strony Neptuna. Orbitsy tego typu, o periheliach bliskich 30 AU (wielkość orbity Neptuna) ulegają systematycznemu wydłużeniu, co prowadzi do oddalania się krążących po nich obiektów. Być może tego typu mechanizm wytworzył we wcześniejszej fazie ewolucji Obłok Oorta.

Różne obiekty Pasa Kuipera

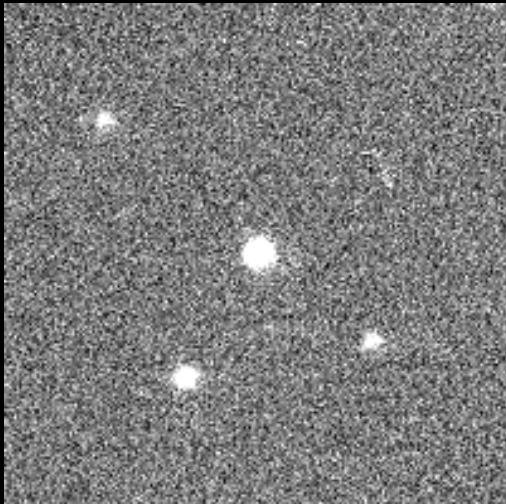


Sedna to obiekt „odłączony” od Pasa Kuipera. Jej perihelium > 40 AU wyklucza wpływ Neptuna, a obecne zbliżenie jest wyjątkowe: okres tej planety karłowatej jest rzędu 10 tys. lat i większość czasu spędza ona w dużo większych odległościach.

Pas Kuipera: poszukiwanie



2003 UB313 (Eris)



2010 HE79

Wszystkie ciała Układu Słonecznego „szybko” zmieniają swoje położenie na niebie względem obiektów odległych (np Księżyc ~ 12 stopni/dobę). Dla obiektów Pasa Kuipera może to być ~ 1 minuta łuku na dobę.

Pas Kuipera: poszukiwanie

- Rozmiary kątowe Plutona $\sim 0,1$ sek łuku \implies obraz punktowy (HST: niewielka, kilkuelementowa plamka) Niemożliwe obrazowanie planet karłowatych Pasa Kuipera
- Pluton średnio $V \sim 15$ mag (< 14 w perihelium) Obiekty 10 razy mniejsze odbijałyby 100 razy mniej światła $\implies V \sim 20$ mag To nie jest bariera dla średnich (\sim metrowych) teleskopów
- Ruch własny obiektów Pasa Kuipera, rzędu paru sekund łuku na godzinę też jest łatwy do detekcji pod warunkiem, że znajdą się w polu widzenia teleskopu
- Efektywne wykrywanie wymaga więc przyrządu o dużym polu widzenia mogącego jednocześnie rejestrować pozycje wielu obiektów

OCKS: OGLE Carnegie Kuiper belt Survey

| Nazwa | a | e | P | i | H | opis |
|------------|-------|-------|-------------|------|---------|--------------------------------------|
| 2010 KZ39 | 46.41 | 0.003 | 316 lat | 25.6 | 3.9 mag | „klasyczny" |
| 2010 JK124 | 44.18 | 0.088 | 294 lata | 15.0 | 5.4 mag | „klasyczny" |
| 2010 JJ124 | 86.18 | 0.738 | 800 lat | 39.3 | 6.6 mag | „rozproszony" |
| 2010 HE79 | 44.76 | 0.218 | 299 lat | 14.5 | 5.1 mag | „klasyczny" |
| 2010 EK139 | 69.35 | 0.532 | 578 lat | 29.5 | 3.8 mag | „rozproszony" ~1000 km ??? |
| 2010 EL139 | 37.88 | 0.020 | 233 lata | 23.3 | 5.2 mag | „rezonans 3:2 ?" |
| 2010 FX86 | 44.01 | 0.064 | 292 lata | 25.3 | 4.3 mag | „klasyczny" |

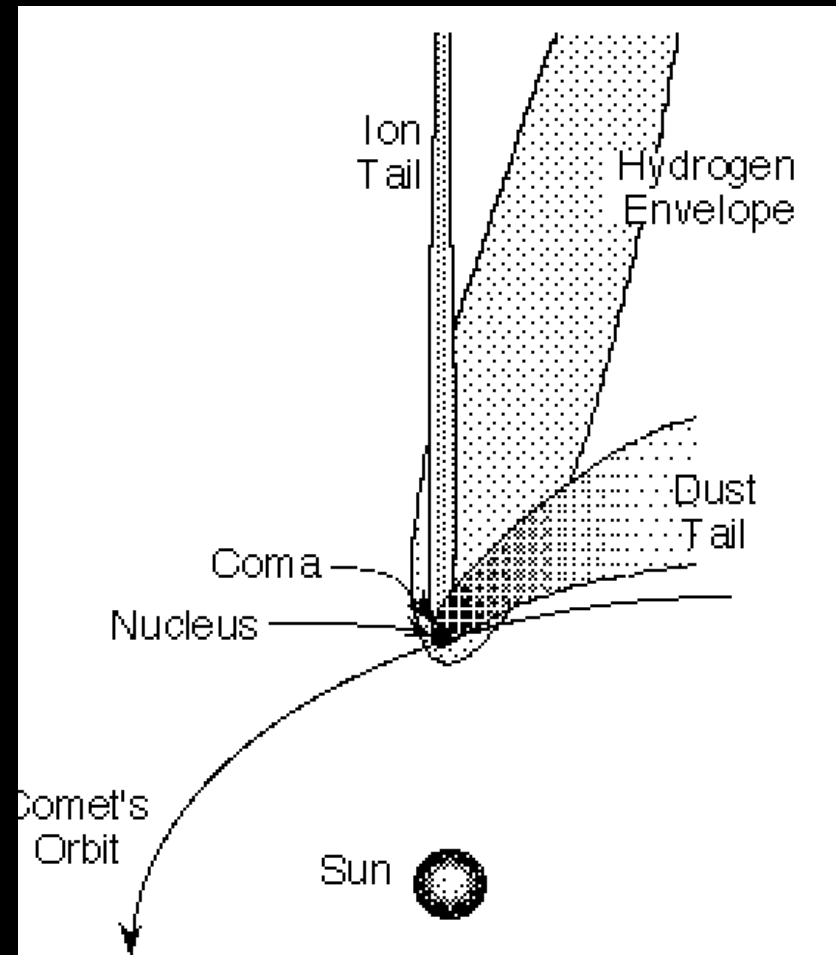
Wstępne wartości parametrów orbit 7 obiektów Pasa Kuipera wykrytych przy współpracy Zespołu OGLE (The Optical Gravitational Lensing Experiment) z Obserwatorium UW z Department of the Terrestrial Magnetism of the Carnegie Institution of Washington. (Carnegie Institution jest też właścicielem Obserwatorium Las Campanas.)

Zjawisko komety



Komety

- orbity silnie eliptyczne
- zestalone lotne substancje „brudna góra lodowa”
- pod wpływem promieniowania Słońca zjawisko komety
- „zużycie” → rozpad → ciała meteorowe na orbicie

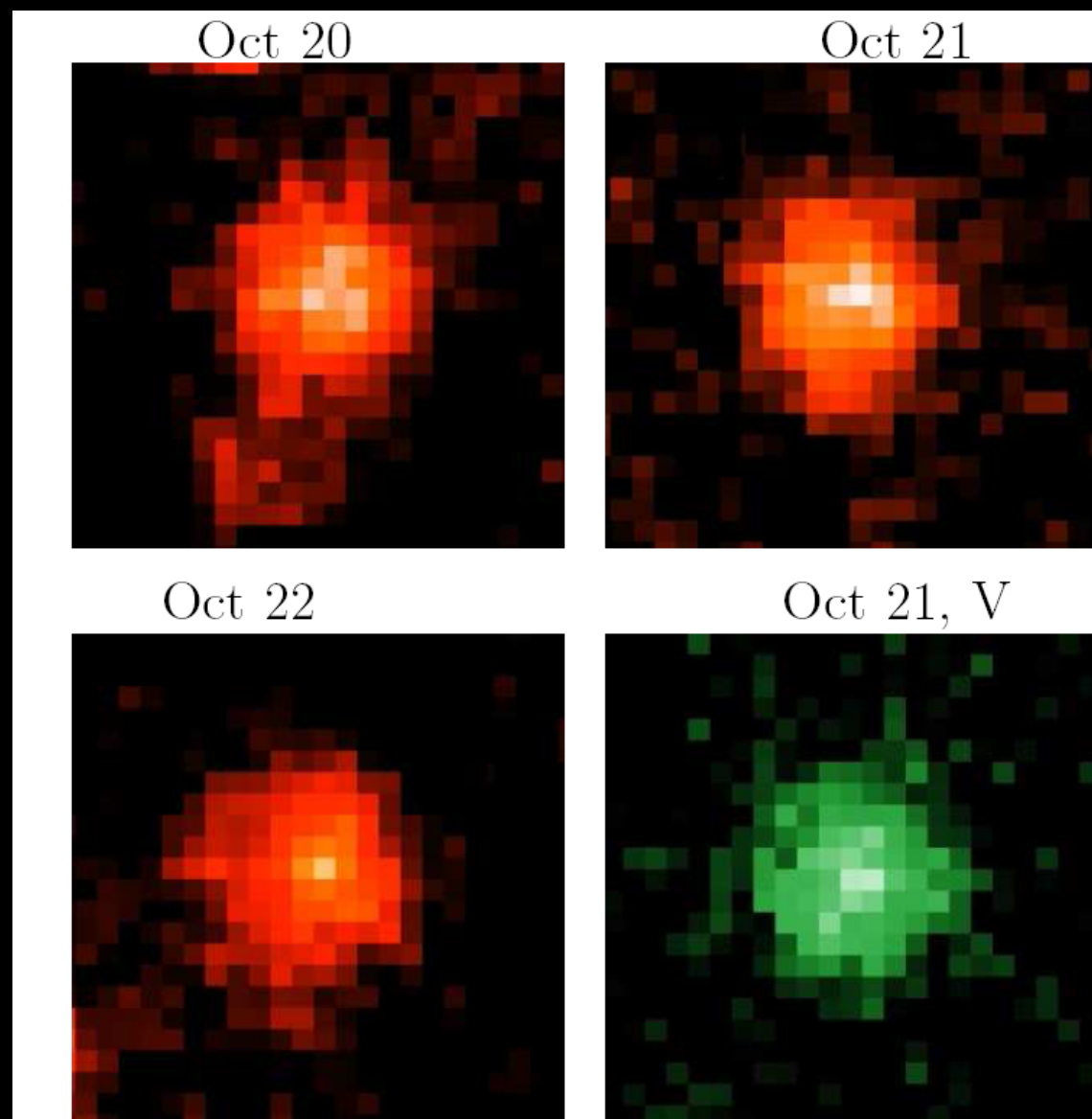


przykłady



Komety Westa i Halleya

przykłady

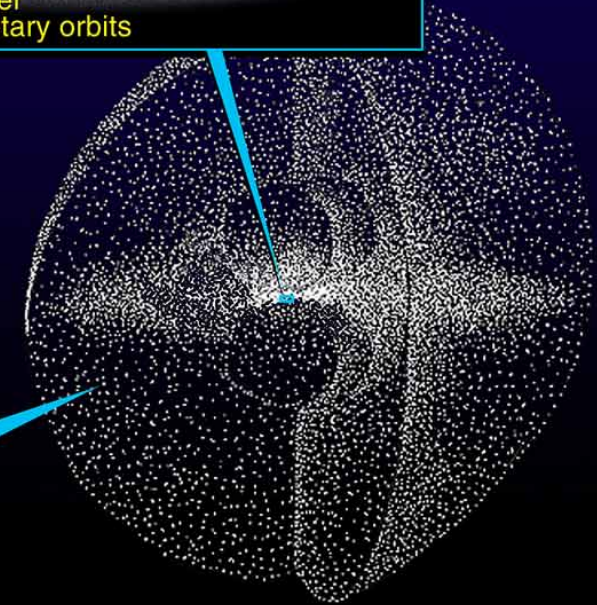
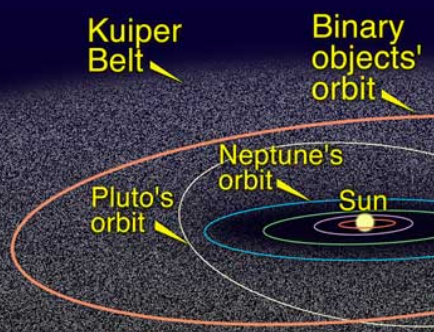
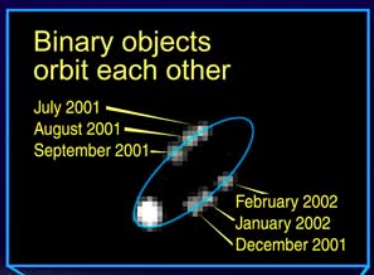


Kometa Hale'a-Boppa jesienią 2007, w odległości 26 AU od Słońca, 11 lat po przejściu przez perihelium (0.9 AU). Średnica 180 km, efektywna pow. 4300 km².

Pochodzenie ?



Kuiper Belt Object 1998 WW31



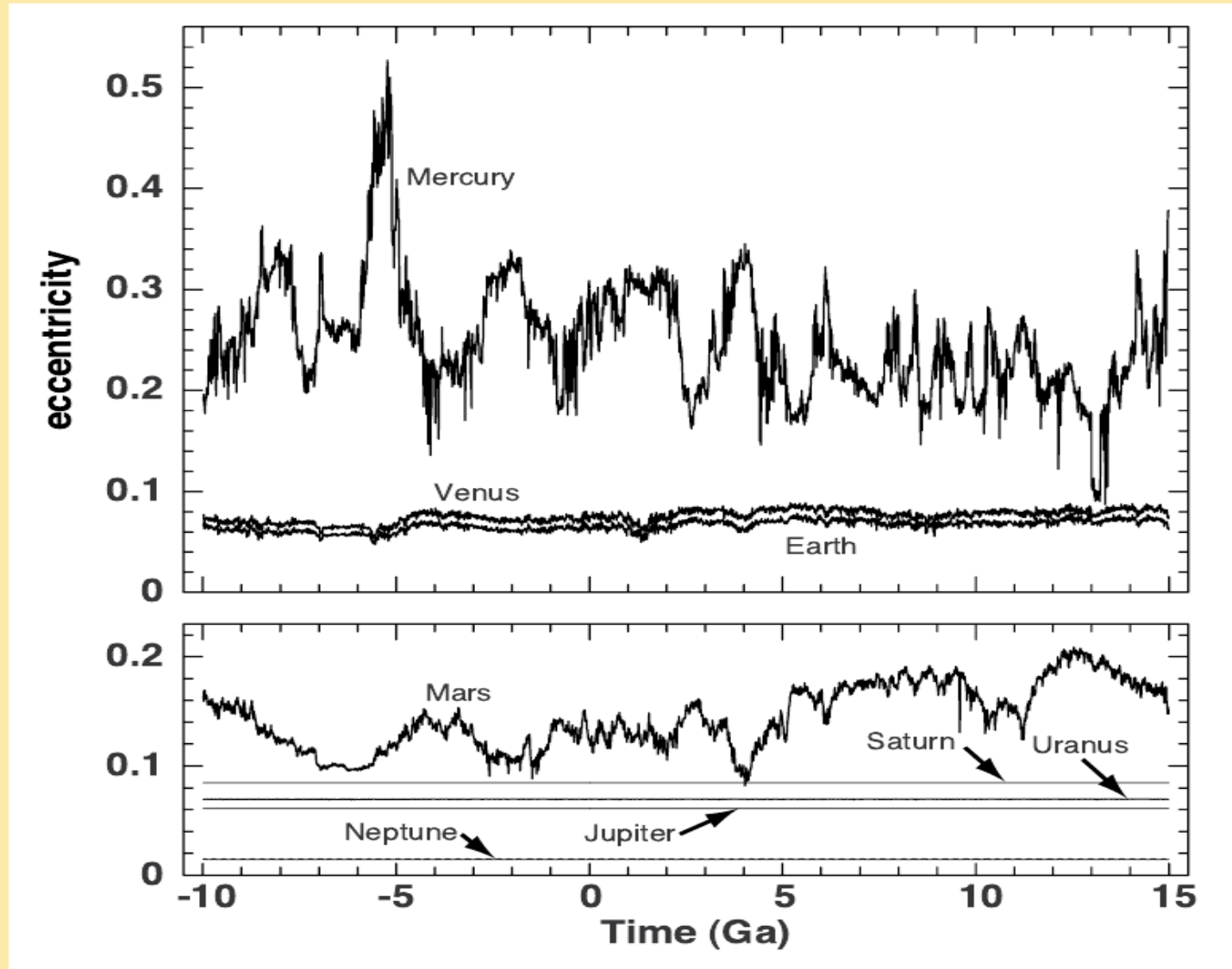
Pas Kuipera i Obłok Oorta

Także: Pas Planetoid

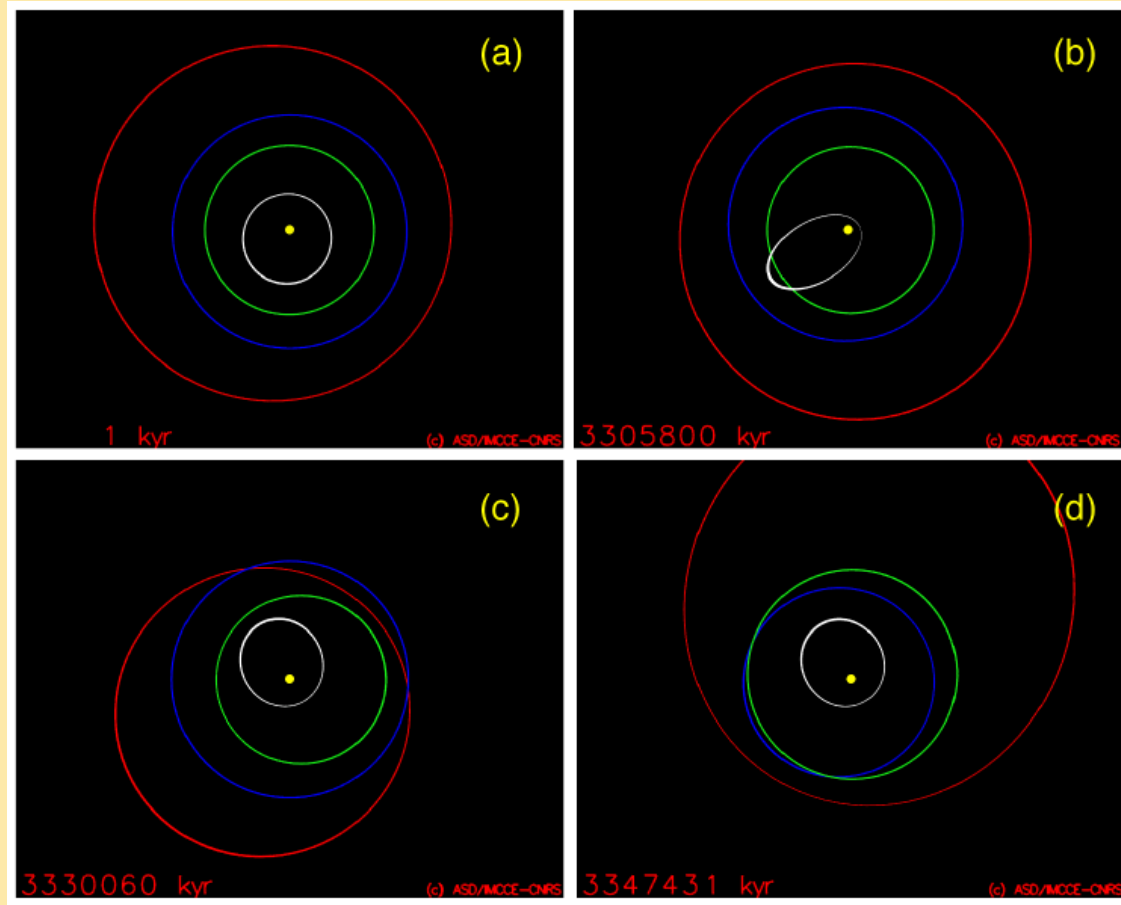
Stabilność Układu Słonecznego ?

- Klasyczne pytanie
- Laplace, Lagrange, Poisson (w niskim rzędzie perturbacji) pokazują, że tak (np. $a = \text{const}$ dla każdej z planet)
- Poincare wątpi, nie wykluczając dowodu przeciwnej tezy w przyszłości
- Kołmogorow, Arnold, Moser: chaos
- Komputery + wyrafinowane metody numeryczne dają następującą odpowiedź [Laskar (2012) arXiv:1209.5996]

Stabilność Układu Słonecznego ?



Stabilność Układu Słonecznego ?



To przykład destabilizacji Układu “za” ~3,3 mld lat. Rozważano 2500 przypadków (warunków początkowych); w 1% dochodziło do katastrof powyższego typu. Gdyby pominąć poprawki relatywistyczne, p-stwo destabilizacji podwyższa się do 60% (!).