

Astrofizyka Układów Planetarnych

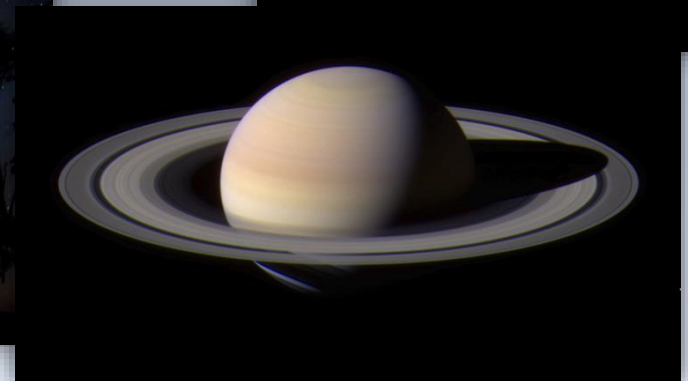
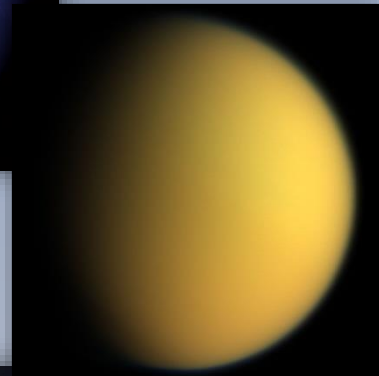
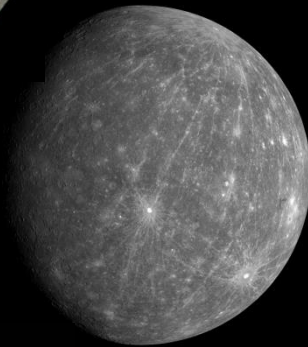
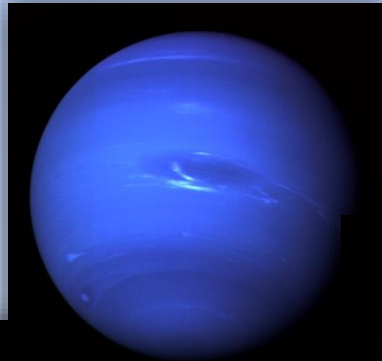
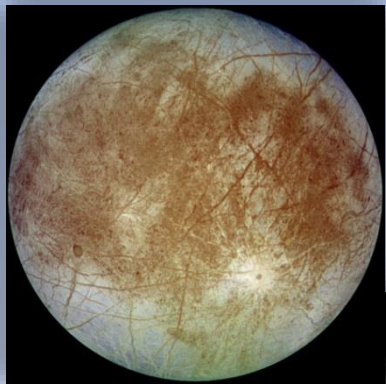
1

(WSZECH)ŚWIAT
UKŁADÓW PLANETARNYCH

Układ Słoneczny (planetarny) – co to jest?

układy planetarne – największa koncentracja różnorodności we Wszechświecie

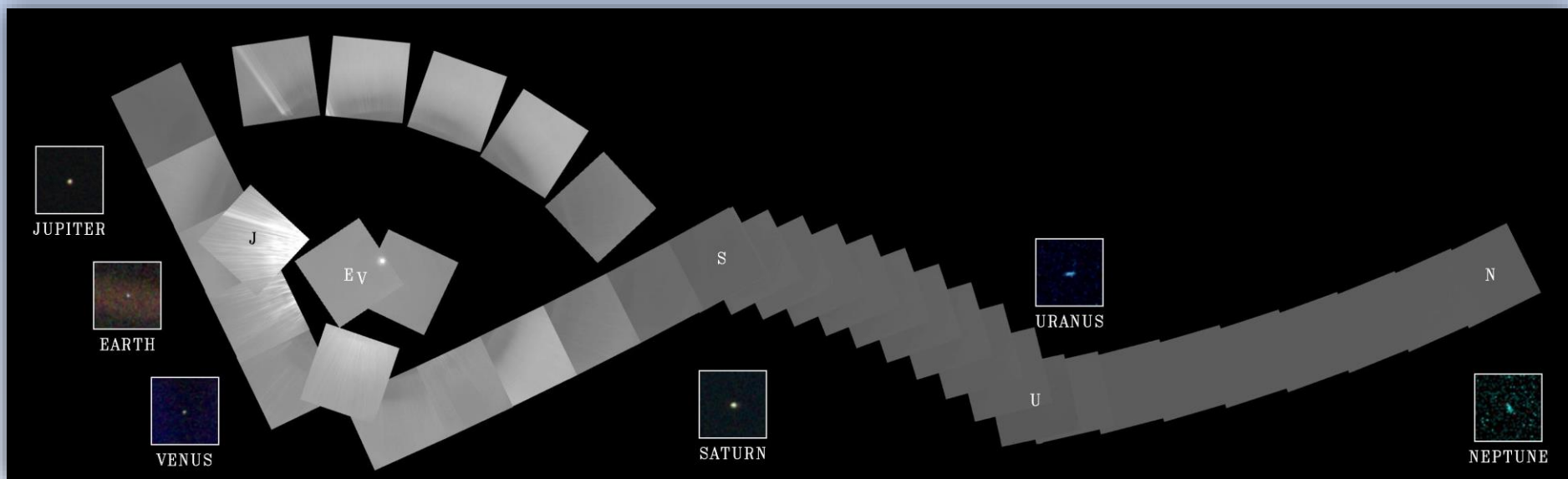
ten sam budulec + takie same prawa fizyki = różnorodność światów



Układ Słoneczny (planetarny) – co to jest?

Spojrzenie z zewnątrz:

1. **masa:** **Układ Słoneczny = Słońce + drobiazg** (99.8% masy całości)
2. **jasność:** **Układ Słoneczny = Słońce + drobiazg** (4×10^8 x jasność Jowisza)
3. **moment pędu:** **Układ Słoneczny = planety + drobiazg** (98% m.p. całości)
4. **typ materii:** **plazma** (Słońce, wiatr słoneczny), **materia molekularna** (planety, drobniejsze ciała)
5. **wydzielanie energii:** **synteza termojądrowa** (Słońce), **rozpad promieniotwórczy, energia grawitacyjna** (planety, drobniejsze ciała)



Mozaika zdjęć pokazująca Układ Słoneczny z odległości 6.5 mld km (Voyager 1, 1990)

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

Układ planetarny składa się z planet i...

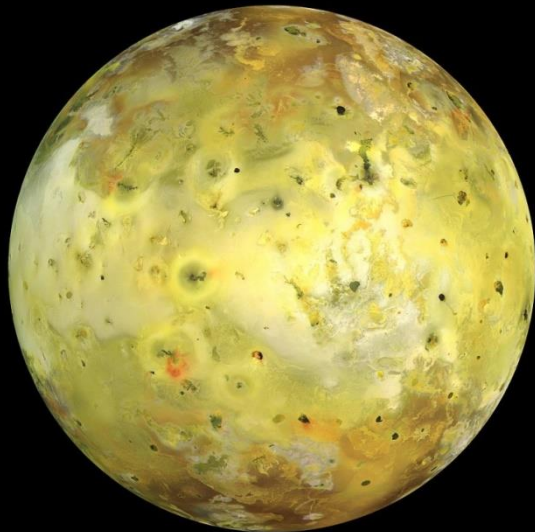
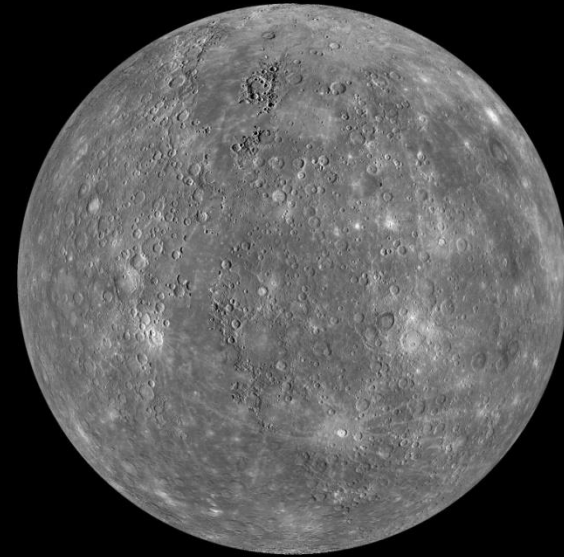
...ale co to jest planeta?

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

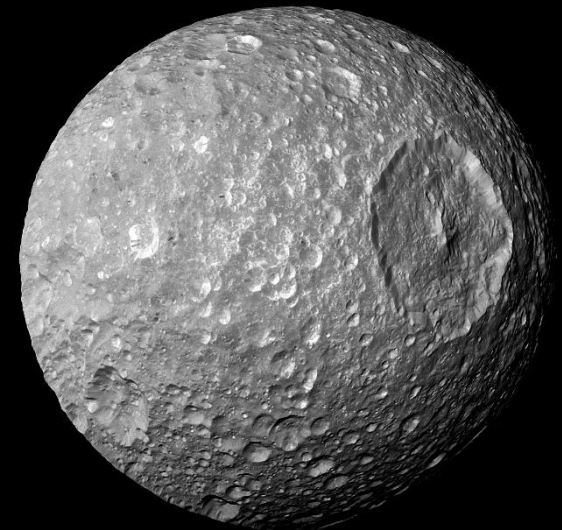


3 planety, 1 księżyc

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety



3 księżyce, 1 planeta



Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

Układ planetarny składa się z planet i ... (*ale co to jest planeta?*)

- starożytność – XVII w.

asteres planetai (błądzące gwiazdy) – obiekty nie będące gwiazdami stałymi, zmieniające swoje położenie na niebie.

obiekty zaliczane: **Merkury, Wenus, Mars, Jowisz, Saturn, (Ziemia, Księżyc, Słońce)**

- XVIII w. – XX w.

pomimo nowych odkryć, brak nowej definicji planety

obiekty zaliczane: **Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz, Saturn, Uran, Neptun, Pluton, Ceres, Westa, ...**

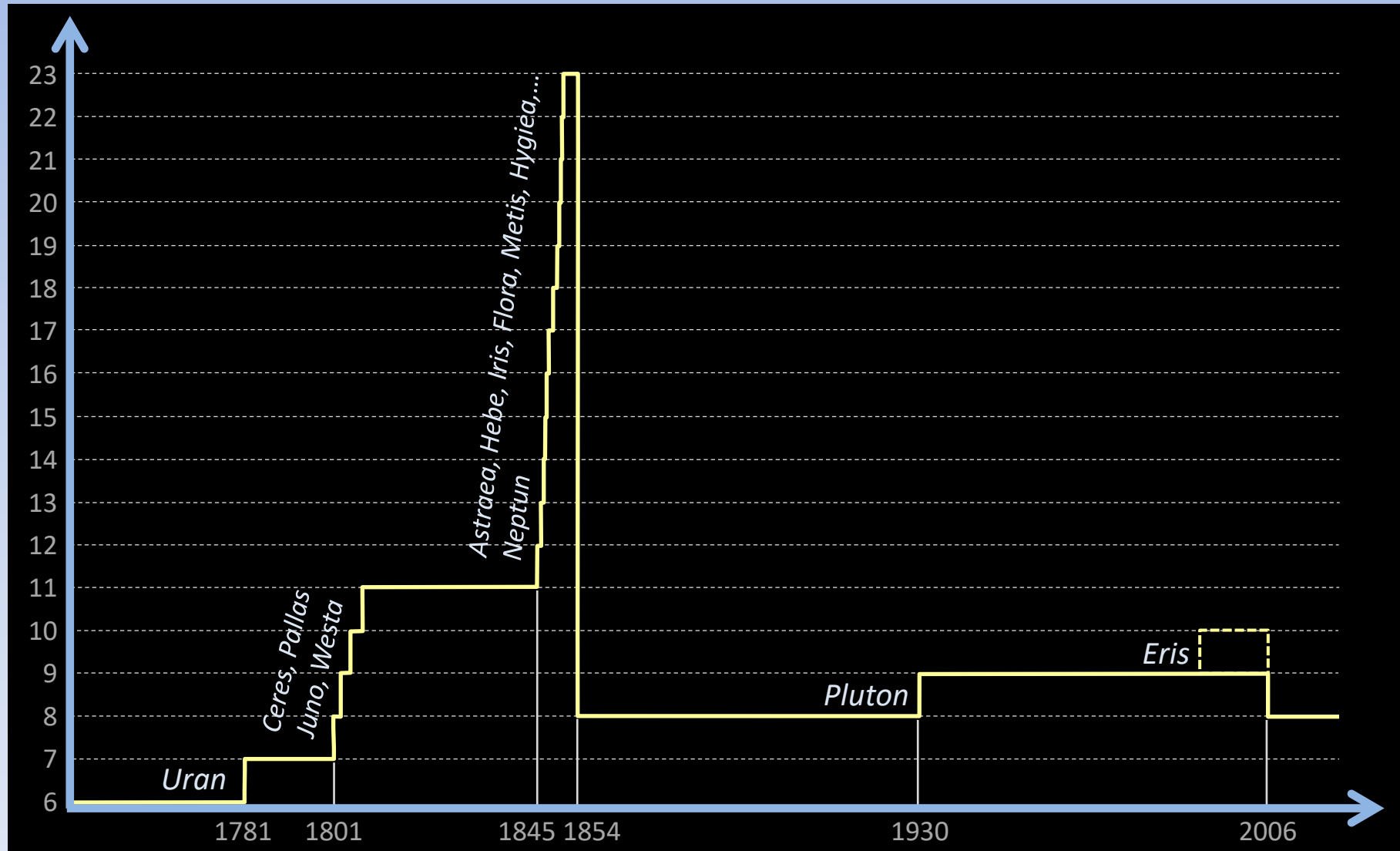
- XXI w.

odkrycia kolejnych obiektów transneptunowych i planet pozasłonecznych zmuszają do jasnego określenia co to jest planeta

decyzję podjęto **24.08.2006** w czasie **IAU 26th General Assembly** (Praha, Republika Czeska)

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

Liczba planet w Układzie Słonecznym



Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

Kryteriów sporo, jednak wiele z nich zawodzi. Przynajmniej w pojedynkę.

kryterium	problemy
<i>ruch względem gwiazd</i>	dopuszcza wszystkie obiekty Układu Słonecznego włącznie z kometami, planetoidami i sondami
<i>obecność satelitów</i>	odrzuca Merkurego, Wenus może zależeć od czasu
<i>obecność atmosfery</i>	praktycznie odrzuca Merkurego problem z określeniem minimalnej atmosfery
<i>obecność pola magnetycznego</i>	odrzuca Wenus
<i>ruch po orbicie bliskiej kołowej</i>	odrzuca Merkurego problem z określeniem dopuszczalnego maksimum
<i>orbita wokół gwiazdy</i>	dopuszcza nawet drobne obiekty odrzuca obiekty wyrzucone z układu planetarnego
<i>odbija więcej energii niż wytwarza</i>	odrzuca planety olbrzymy odrzuca młode gorące planety

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

definicja planety według IAU (dla Układu Słonecznego)

planeta to ciało niebieskie, które:

- a) znajduje się na orbicie wokół Słońca
- b) ma wystarczającą masę, aby jego siła grawitacji przekraczała siły sztywności tego ciała, prowadząc do osiągnięcia kształtu odpowiadającego równowadze hydrostatycznej
- c) oczyściło sąsiedztwo swojej orbity

planeta karłowata to ciało niebieskie, które:

- a) znajduje się na orbicie wokół Słońca
- b) ma wystarczającą masę, aby jego siła grawitacji przekraczała siły sztywności tego ciała, prowadząc do osiągnięcia kształtu odpowiadającego równowadze hydrostatycznej
- c) nie oczyściło sąsiedztwa swojej orbity
- d) nie jest satelitą

Pozostałe obiekty, z wyjątkiem księżyców i pierścieni, nazywane są **małymi ciałami Układu Słonecznego**.

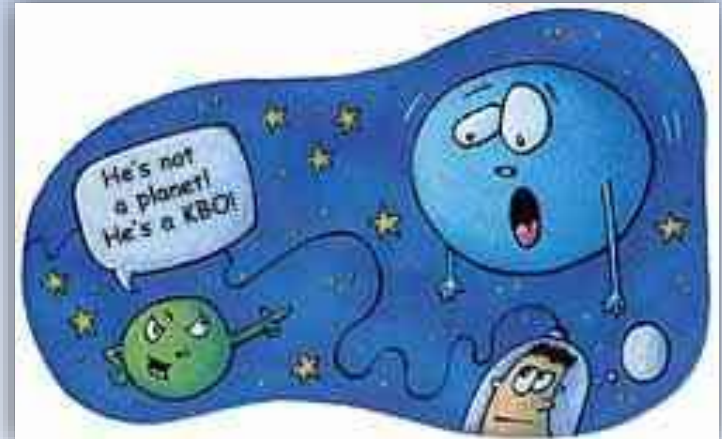
Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

główny (medialny) skutek nowej definicji planety

Pluton nie jest planetą



Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety



Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety



You've Been Plutoed!

To "pluto" is to demote or devalue someone or something.

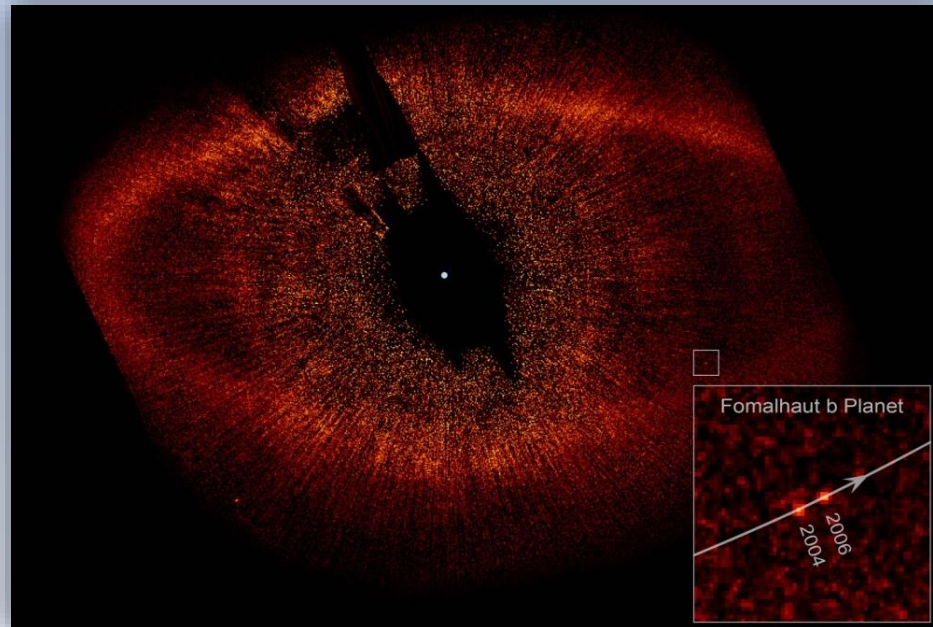
"Plutoed" was chosen 2006's Word of the Year by the American Dialect Society at its annual meeting Friday.

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

Ogólna definicja planety nie została sformułowana, ale rozsądnym byłoby połączenie definicji IAU dla Układu Słonecznego z definicją Grupy Roboczej ds. Planet Pozasłonecznych IAU.

planeta to ciało niebieskie, które:

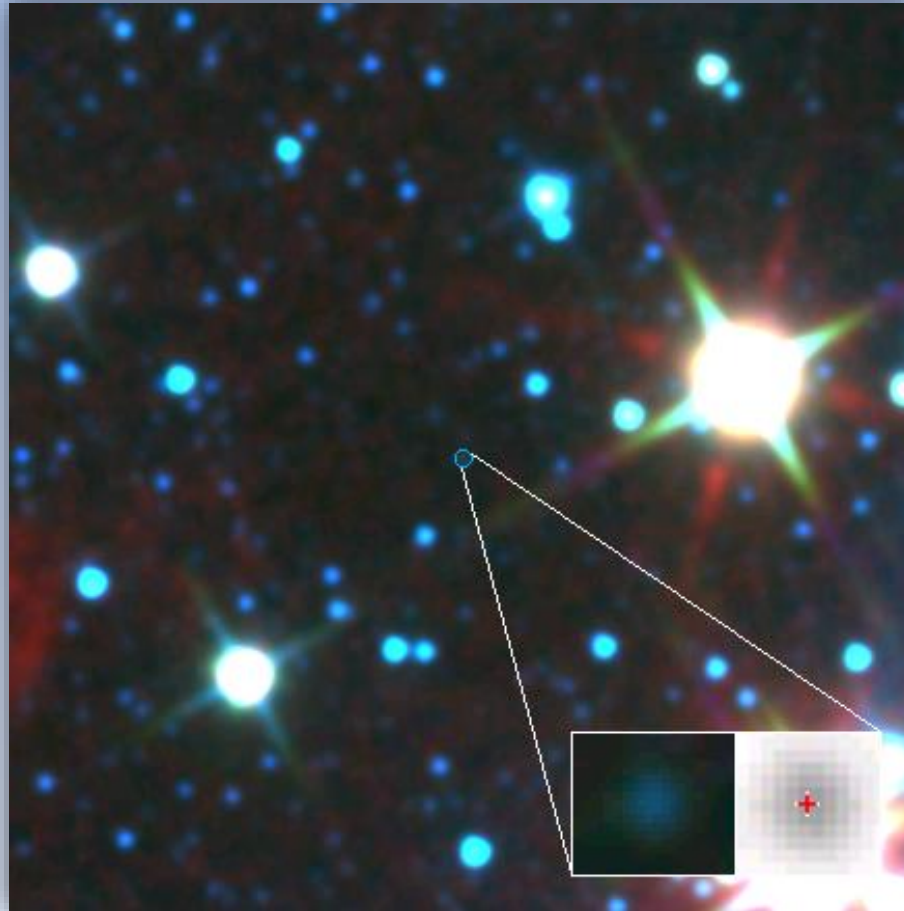
- a) znajduje się na orbicie wokół gwiazdy lub pozostałości po gwiazdzie
- b) ma masę mniejszą niż masa graniczna wymagana dla reakcji termojądrowej z udziałem deuteru (około $13 M_J$)
- c) ma wystarczającą masę, aby jego siła grawitacji przekraczała siły sztywności tego ciała, prowadząc do osiągnięcia kształtu odpowiadającego równowadze hydrostatycznej
- d) oczyściło sąsiedztwo swojej orbity



Dagon (Fomalhaut b) – planeta która chyba jednak nie istnieje. Obraz z HST.

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

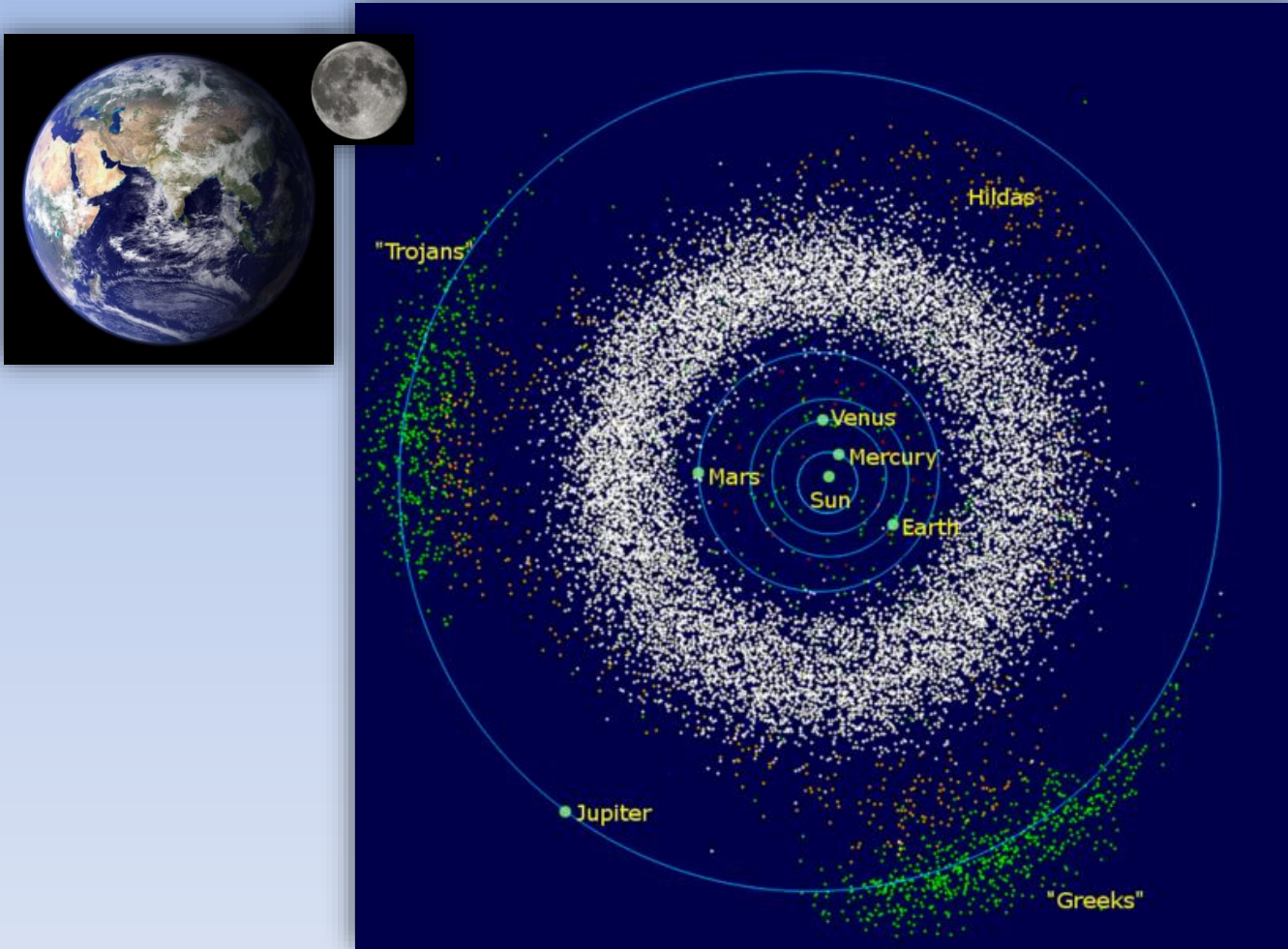
A planety bez gwiazd?



Cha 110913-773444 – brązowy podkarzeł czy planeta swobodna?

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

co znaczy określenie „*oczyściło sąsiedztwo swojej orbity*” w definicji planety?



Czy planety skaliste mogą nosić miano planet?
Ich otoczenie nie jest „oczyszczone”.
Ziemia ma dużego satelitę.

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

co znaczy określenie „*oczyściło sąsiedztwo swojej orbity*” w definicji planety?

Jakościowo:

grawitacyjna dominacja, brak obiektów o porównywalnych rozmiarach (z wyjątkiem własnych satelitów i innych obiektów będących pod kontrolą grawitacyjną)

Ilościowo:

wartość parametru Λ większa od 1

Parametr Λ opisuje „sprawność” ciała w pozbywaniu się innych obiektów z własnej orbity (Stern i Levison, 2002):

$$\Lambda = T/\tau = kM^2/P$$

T – czas Hubble’a, τ – charakterystyczny czas usuwania innych obiektów, k – stała, M , P – masa i okres orbitalny ciała usuwającego

wartość dyskryminatora planetarnego μ przekraczająca 100

Dyskryminator planetarny μ jest ilorazem masy ciała głównego M do sumarycznej masy obiektów w otoczeniu własnej orbity m (krzyżowanie się orbit; okresy obiegu podobne co do rzędu wielkości, ale brak rezonasu) (Soter, 2006):

$$\mu = M/m$$

W zamyśle parametr ten podaje czy ciało obiegające gwiazdę jest końcowym produktem akrecji w dysku protoplanetarnym.

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

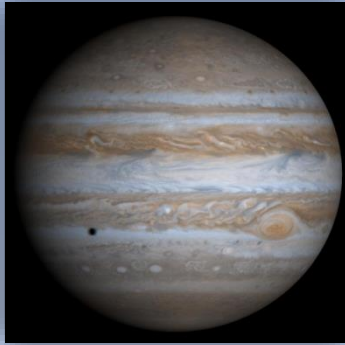
co znaczy określenie „*oczyściło sąsiedztwo swojej orbity*” w definicji planety?

obiekt	masa (M_z)	parameter Λ	dyskryminator planetarny μ	klasyfikacja
Mercury	0.055	1.95×10^3	9.1×10^4	planeta
Venus	0.815	1.66×10^5	1.35×10^6	planeta
Earth	1.000	1.53×10^5	1.7×10^6	planeta
Mars	0.107	9.42×10^2	5.1×10^3	planeta
Ceres	0.00015	8.32×10^{-4}	0.33	planeta karłowata
Jupiter	317.7	1.30×10^9	6.25×10^5	planeta
Saturn	95.2	4.68×10^7	1.9×10^5	planeta
Uranus	14.5	3.84×10^5	2.9×10^4	planeta
Neptune	17.1	2.73×10^5	2.4×10^4	planeta
Pluto	0.00218	2.95×10^{-3}	0.08	planeta karłowata
Haumea	0.00066	2.41×10^{-4}	0.02	planeta karłowata
Makemake	0.0007	2.22×10^{-4}	0.02	planeta karłowata
Eris	0.0028	2.15×10^{-3}	0.10	planeta karłowata

Układ Słoneczny – przegląd

planety olbrzymy (jowiszowe)

gazowe olbrzymy



Jowisz

$M = 318M_Z$, $R = 11R_Z$,
główne składniki: H, He



Saturn

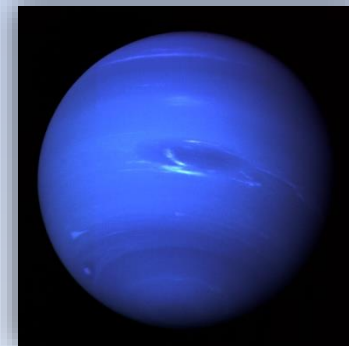
$M = 95M_Z$, $R = 9R_Z$,
główne składniki: H, He

lodowe olbrzymy



Uran

$M = 15M_Z$, $R = 4R_Z$,
główne składniki: H_2O , NH_3 , CH_4



Neptun

$M = 17M_Z$, $R = 4R_Z$,
główne składniki: H_2O , NH_3 , CH_4

Układ Słoneczny – przegląd

planety skaliste (ziemskie)

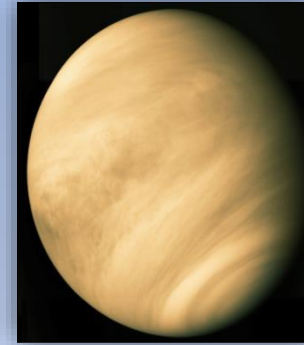
duże planety skaliste



Ziemia

$$M = 1M_Z, R = 1R_Z,$$

główne składniki: skały (krzemiany), metale

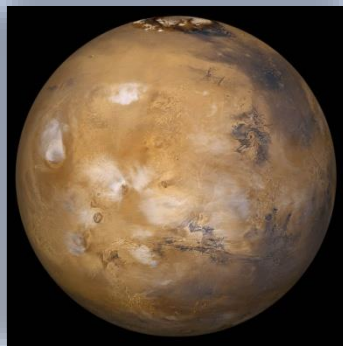


Wenus

$$M = 0.82M_Z, R = 0.95R_Z,$$

główne składniki: skały (krzemiany), metale

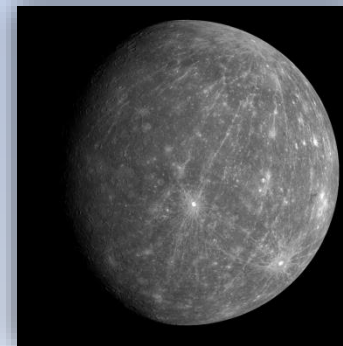
małe planety skaliste



Mars

$$M = 0.11M_Z, R = 0.53R_Z,$$

główne składniki: skały (krzemiany), metale



Merkury

$$M = 0.06M_Z, R = 0.38R_Z,$$

główne składniki: skały (krzemiany), metale

Układ Słoneczny – przegląd

planety karłowate (oficjalne)

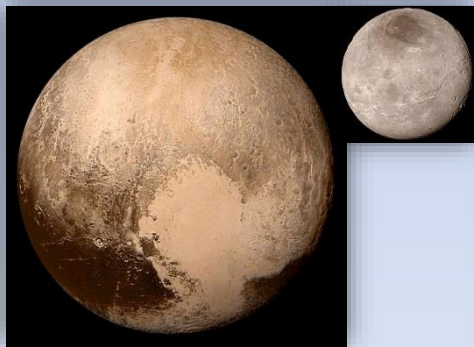
pas planetoid



Ceres

$M = 1.50 \times 10^{-4} M_Z$, $R = 0.074 R_Z$
główne składniki: skały, lód

obiekty transneptunowe



Pluton

$M = 2.18 \times 10^{-3} M_Z$, $R = 0.18 R_Z$
główne składniki: skały, lód



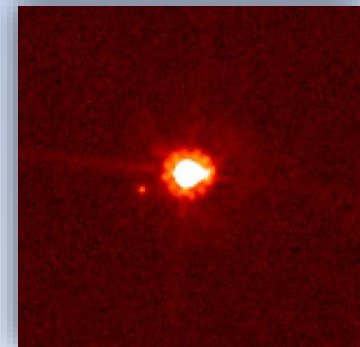
Haumea

$M = 6.6 \times 10^{-4} M_Z$, $R = 0.10 R_Z$
główne składniki: skały, lód



Makemake

$M = 5 \times 10^{-4} M_Z$, $R = 0.12 R_Z$
główne składniki: skały, lód



Eris

$M = 2.80 \times 10^{-3} M_Z$, $R = 0.18 R_Z$
główne składniki: skały, lód

Układ Słoneczny – przegląd

małe ciała:

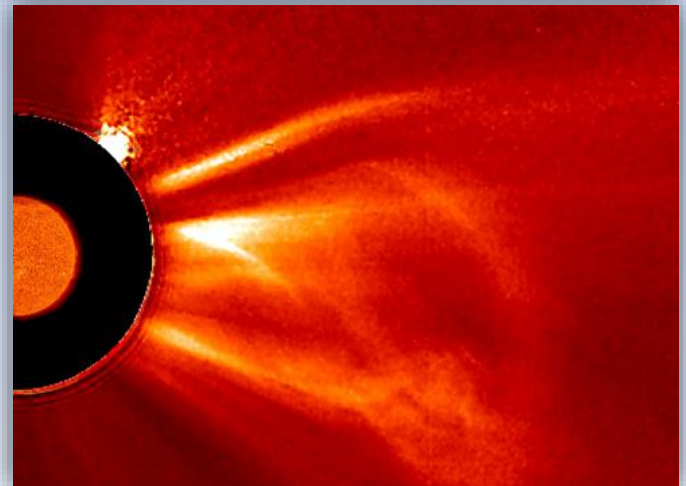
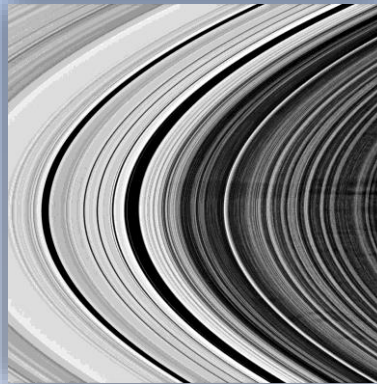
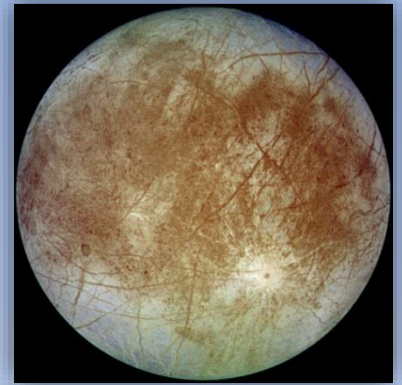
- planetoidy
- meteoroidy

księżyce

pierścienie

pył i gaz międzyplanetarny

pola magnetyczne

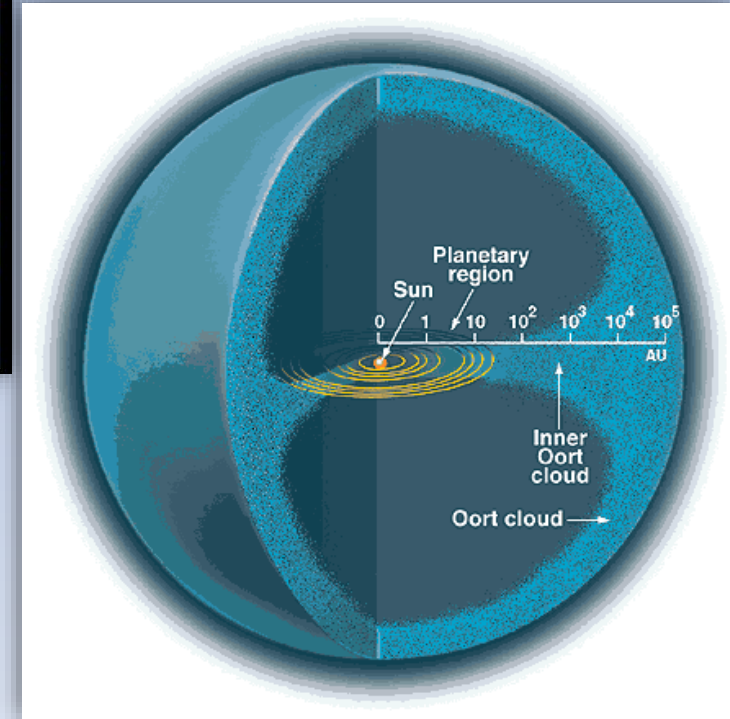
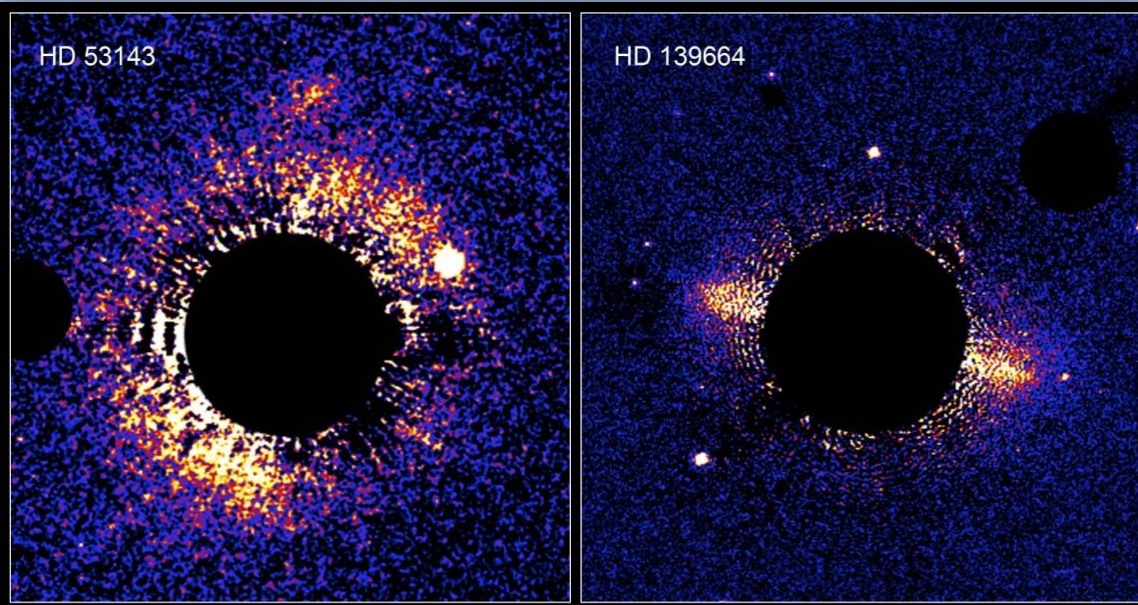


Układ Słoneczny – przegląd

granice układu słonecznego

obiekty transneptunowe

pas Kuipera (klasyczny, rezonancyjny), dysk rozproszony, dysk odłączony: 30 – (?) 1000 AU

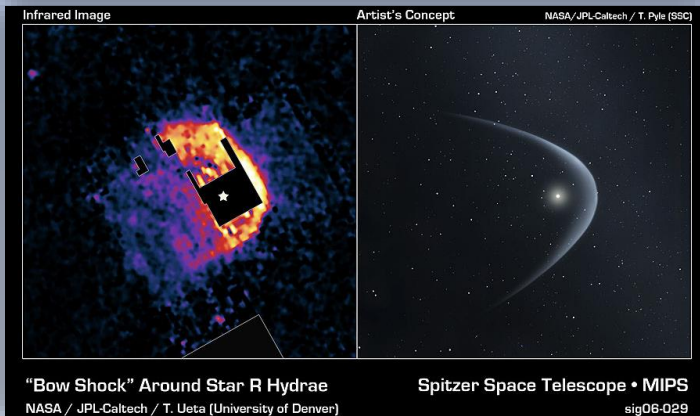


obłok Öpika-Oorta

wewnętrzny i zewnętrzny (oszacowania): 2000 – 50000 AU (100000 AU)

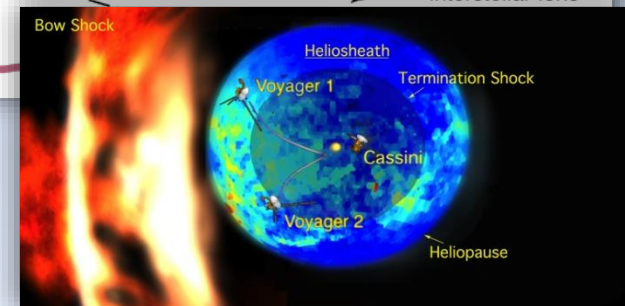
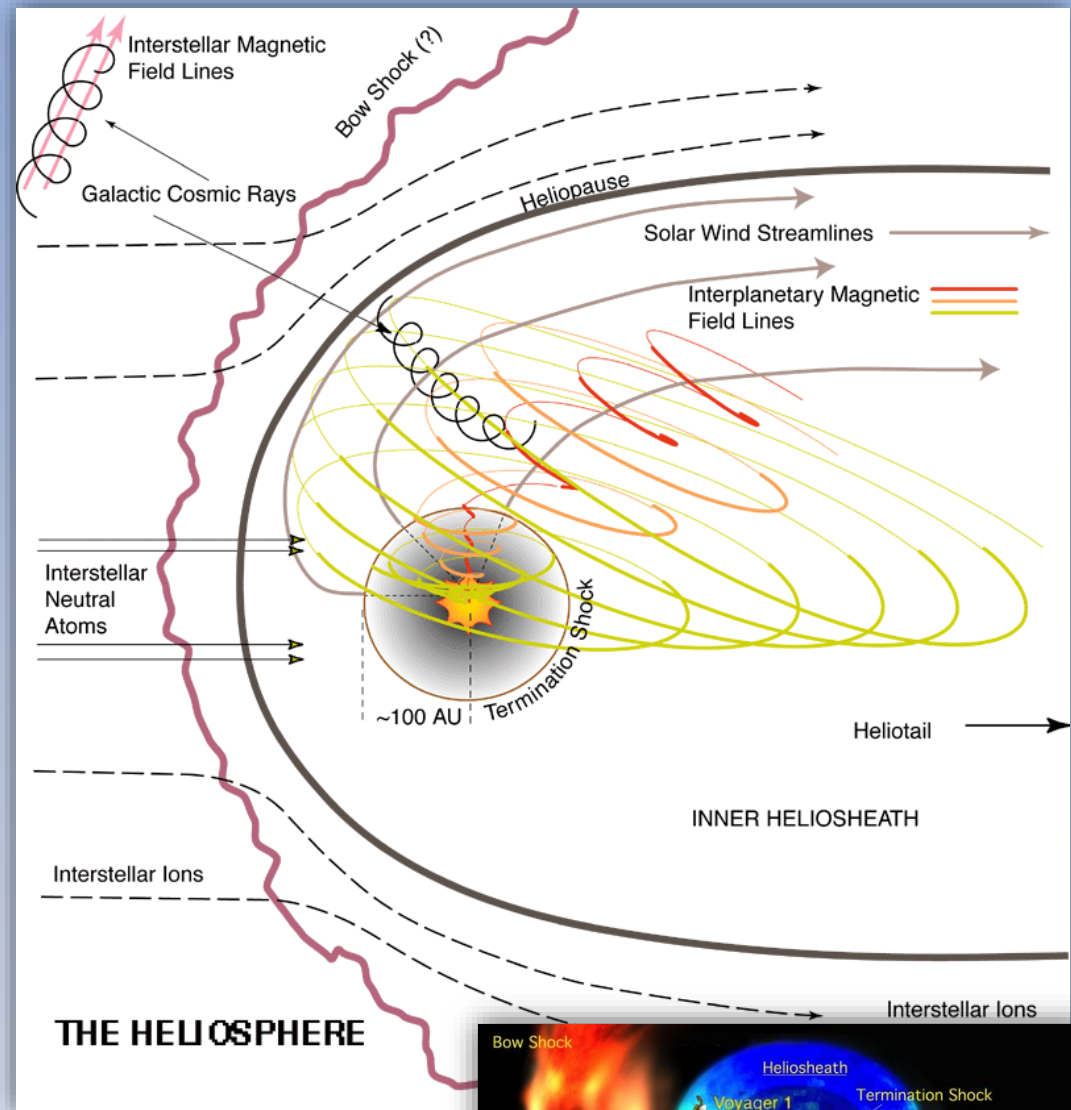
Układ Słoneczny – przegląd

granice układu słonecznego

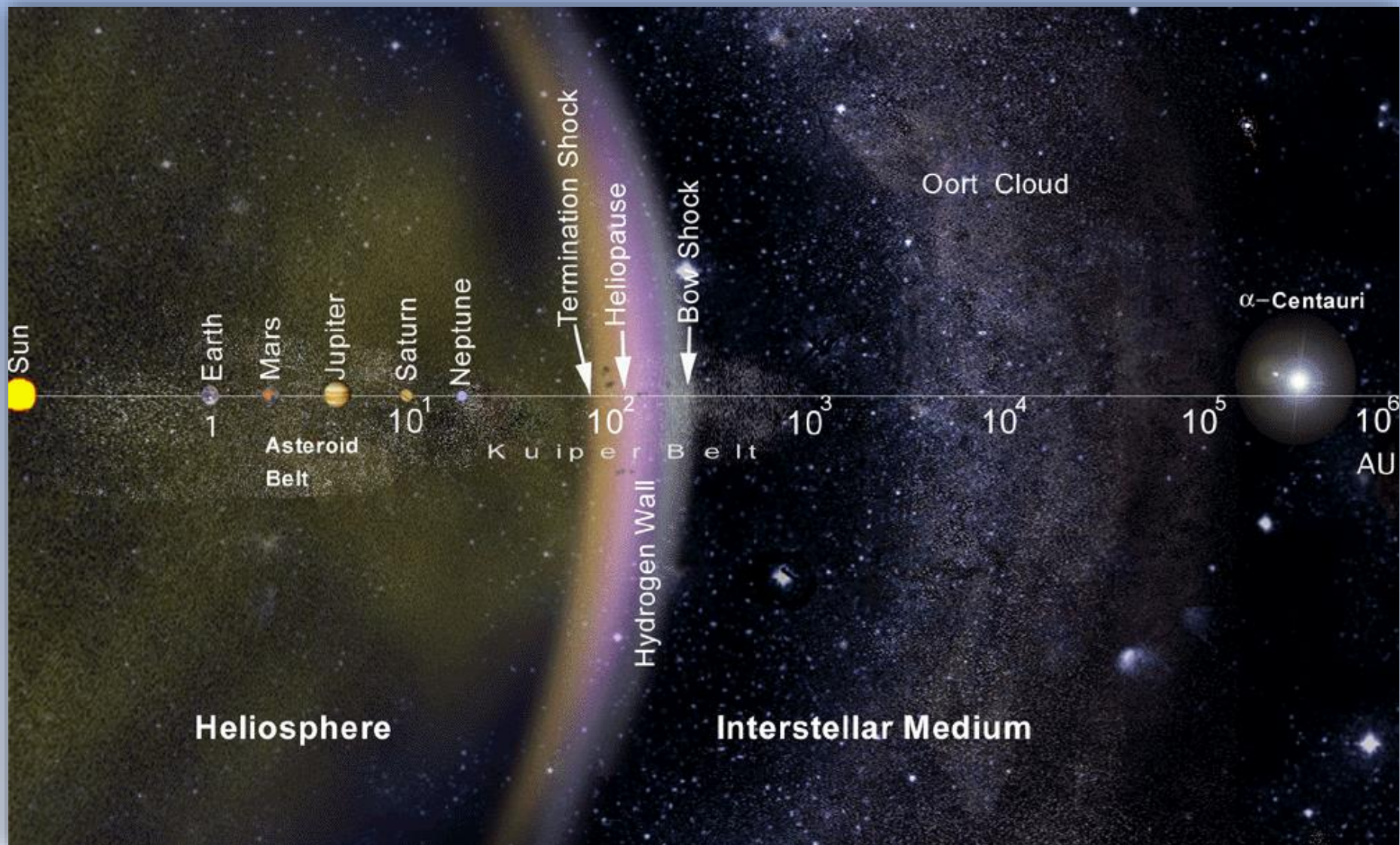


heliosfera

- końcowa fala uderzeniowa (termination shock): 75 – 90 AU (Voyager 1,2)
- heliopauza (heliopause): 120 (Voyager 1,2)
- łukowa fala uderzeniowa (bow shock): 230 AU (?)



Układ Słoneczny – przegląd



Układ Słoneczny – właściwości obiektów



Co możemy dostać z obserwacji i jak je wykonać?

Układ Słoneczny – właściwości obiektów

Skąd wiemy to, co wiemy:

- pomiary z powierzchni Ziemi, orbity okołoziemskiej
- pomiary z sond i lądowników

Co wiemy z obserwacji:

- orbita
- masa i jej rozkład
- rozmiar
- obrót i jego kierunek
- kształt
- temperatura
- pole magnetyczne
- skład chemiczny i struktura powierzchni
- skład chemiczny i struktura atmosfery



cień łazika Opportunity

Dodając do cech obserwowanych porcję fizyki i modeli teoretycznych otrzymamy:

- skład chemiczny całego ciała
- jego budowę wewnętrzną

Układ Słoneczny – właściwości obiektów

orbita:

- ruch ciał w układzie planetarnym opisują prawa Keplera, które wynikają z dynamiki i grawitacji newtonowskiej;
- orbita keplerowska definiuje 6 parametrów:
 - *mimośród (e), półoś wielka orbity (a), inklinacja (i), długość węzła wstępującego (Ω), długość perycentrum (ϖ), anomalia prawdziwa (f)*lub
 - *współrzędne xyz i 3 składowe wektora prędkości;*
- wszystkie planety i planetoidy okrążają Słońce w tym samym kierunku i w prawie tej samej płaszczyźnie; podobnie jest w przypadku orbit większości dużych księżyców względem planet macierzystych;
- płaskość układu planetarnego jest obserwacyjnym dowodem na to, że powstał on z dysku

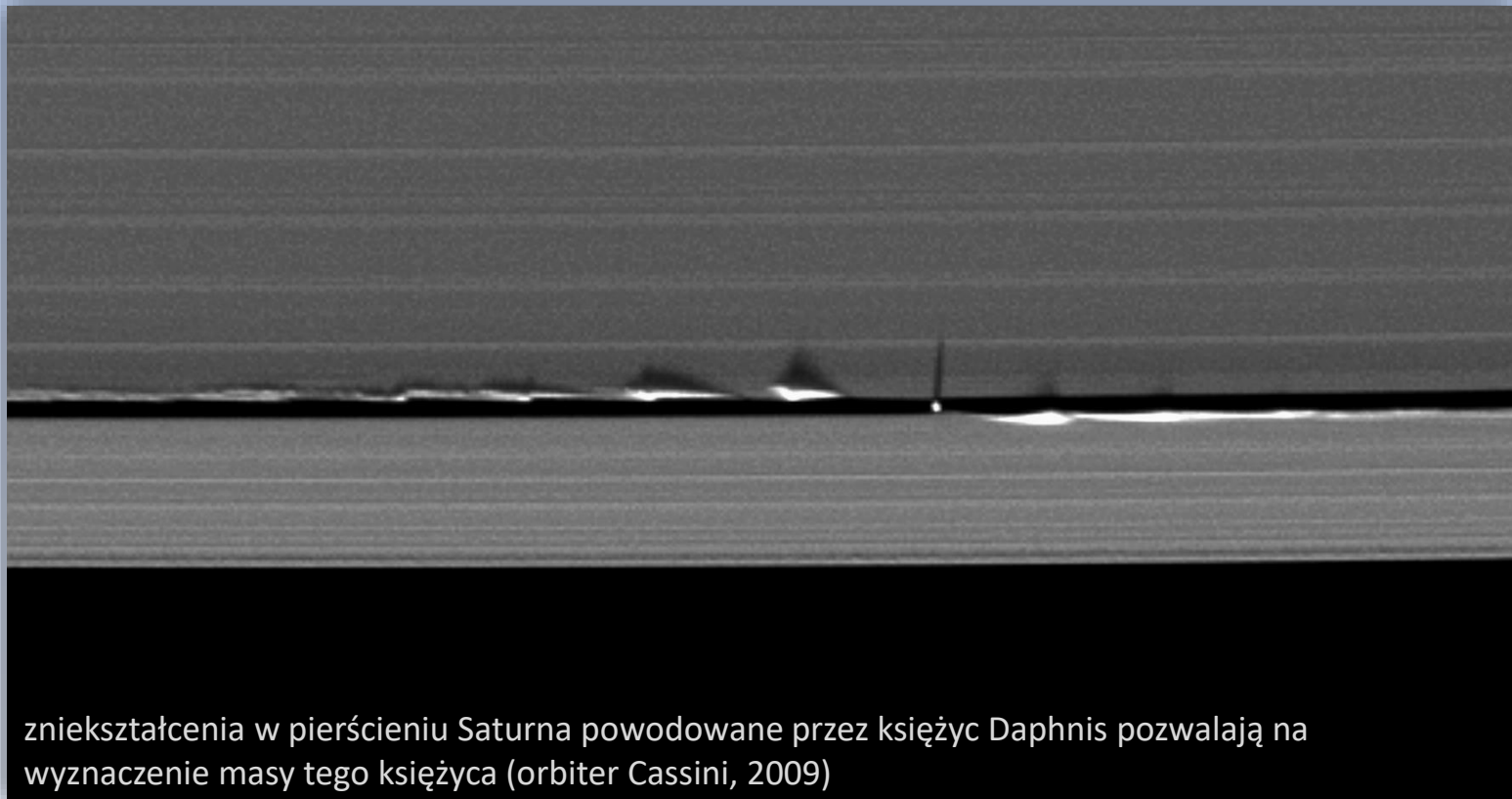


Układ Słoneczny – właściwości obiektów

masa

masę ciała poznamy po sile grawitacji, którą działa ono na:

- własne księżyce;
- na inne obiekty okrążające to samo centrum grawitacji (Słońce, planetę, ...);
- sondy międzyplanetarne (przelatujące, orbitery);
- drobne ciała budujące pierścienie planetarne (księżycy pasterskie Saturna)



zniekształcenia w pierścieniu Saturna powodowane przez księżyc Daphnis pozwalają na wyznaczenie masy tego księżycy (orbiter Cassini, 2009)

Układ Słoneczny – właściwości obiektów

rozmiar

Rozmiar obiektu możemy określić:

- znając jego rozmiary kątowe i odległość;
- obserwując zakrywanie przez niego gwiazd;
- mierząc odbite od niego fale radiowe (otrzymamy też kształt);
- używając triangulacji z wykorzystaniem orbitera i lądownika;
- mierząc ilość odbitego przez nie światła (musimy znać albedo).

Rozmiar i masa ciała daje nam:

- **średnią gęstość**, która niesie ogólną informację o budowie wewnętrznej tego ciała
- **prędkość ucieczki**, która decyduje o możliwości utrzymania atmosfery



zakrycie Regulusa przez planetoidę 166 Rhodope



radarowy obraz planetoidy 4179 Toutatis

Układ Słoneczny – właściwości obiektów

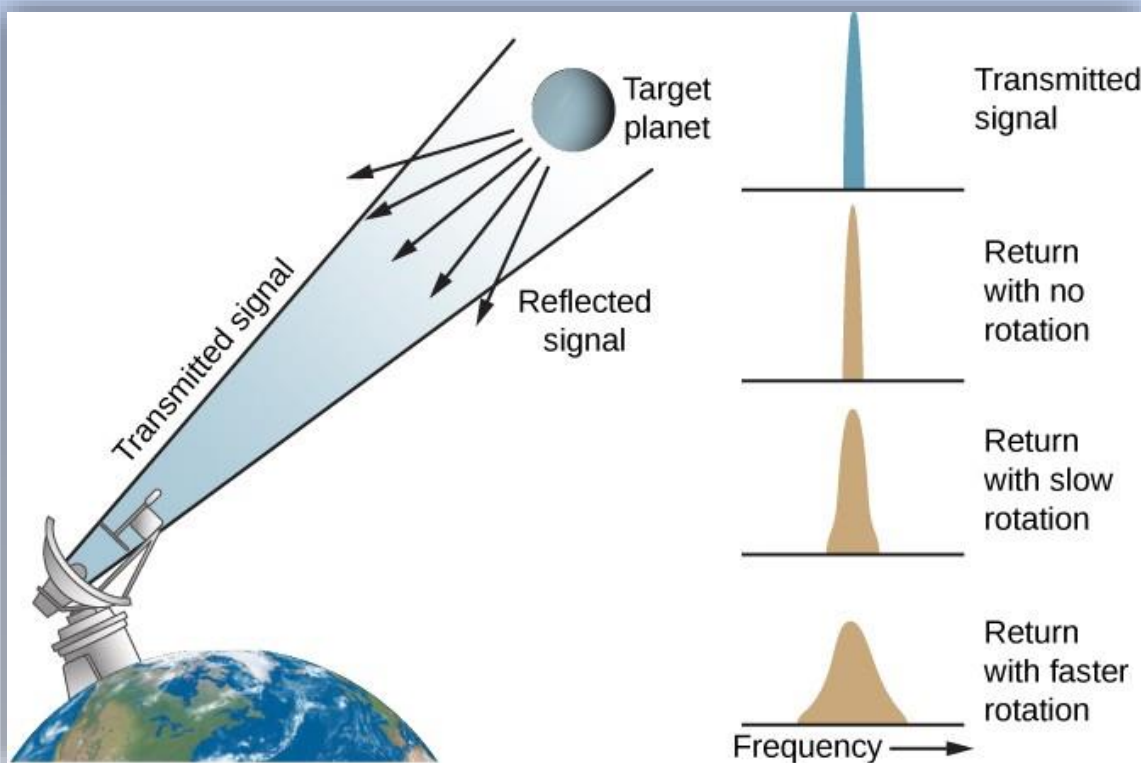
obrót

Tempo obrotu ciała możemy wyznaczyć obserwując:

- utwory na jego powierzchni
- okresowe zmiany jego jasności
- okresowe zmiany sygnału radiowego – źródło: jony uwięzione w magnetosferze
- przesunięcie dopplerowskie biernie (światło widzialne) lub aktywnie (radar)

Z obserwacji wynika, że:

- okresy obrotu obiektów wynoszą od kilku godzin do wielu dni;
- kierunek obrotu może być prosty lub wsteczny



Układ Słoneczny – właściwości obiektów

kształt

Kształt ciała zależy od masy, budowy wewnętrznej, rotacji i pływów:

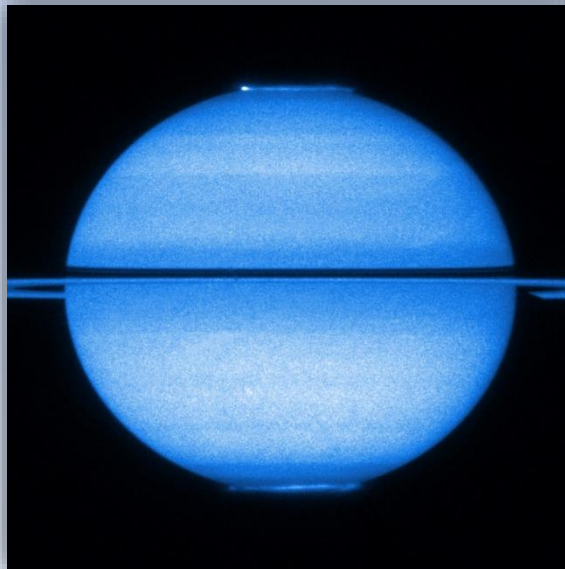
- własna grawitacja dąży do osiągnięcia min. energii potencjalnej (kulistość);
- wytrzymałość materiałów budulcowych utrzymuje nieregularności kształtu;
- rotacja prowadzi do spłaszczenia ciała ($\varepsilon = (R_r - R_b)/R_r$)

Kształt kulisty pojawia się dla obiektów o średnicy większej niż około 400-900 km

Kształt ciała możemy określić w następujący sposób:

- obrazowanie
- obserwacja zakryć gwiazd
- pomiary odbitych fal radiowych
- analiza krzywych blasku

Saturn – wyraźnie widoczne
spłaszczenie rotacyjne



IDA – typowy mały obiekt o
nieregularnych kształtach

Układ Słoneczny – właściwości obiektów

temperatura

Temperatura równowagowa ciała wynika z równowagi między energią pochłanianą (światło słoneczne) a wypromieniowaną z powrotem w przestrzeń. Odchylenia o tej temperatury powodują:

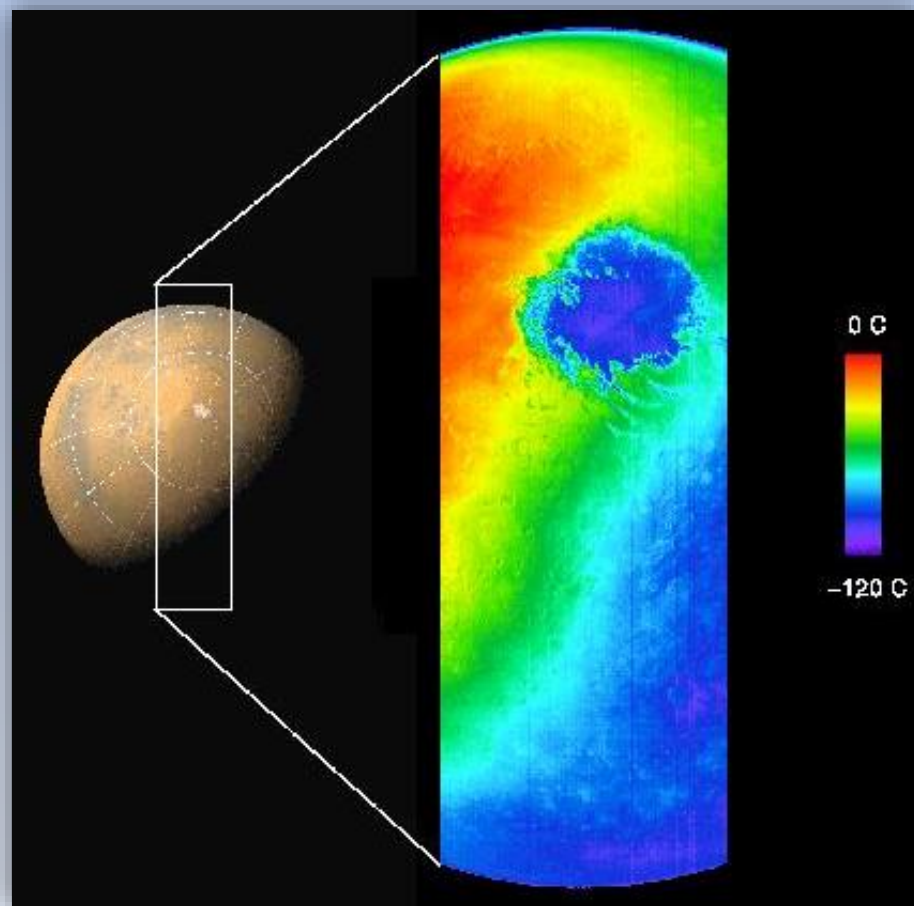
- wewnętrzne źródła energii;
- obecność atmosfery (efekt cieplarniany)

Rzeczywista temperatura na powierzchni ciała podlega też zmianom dobowym, rocznym i zależy od miejsca.

Temperaturę ciała możemy określić w następujący sposób:

- pomiar na miejscu (lądowniki)
- analiza emitowanego widma (podczerwień)

Mars – obraz termiczny fragmentu półkuli południowej (Mars Odyssey). Szczegółowy opis: photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03461



Układ Słoneczny – właściwości obiektów

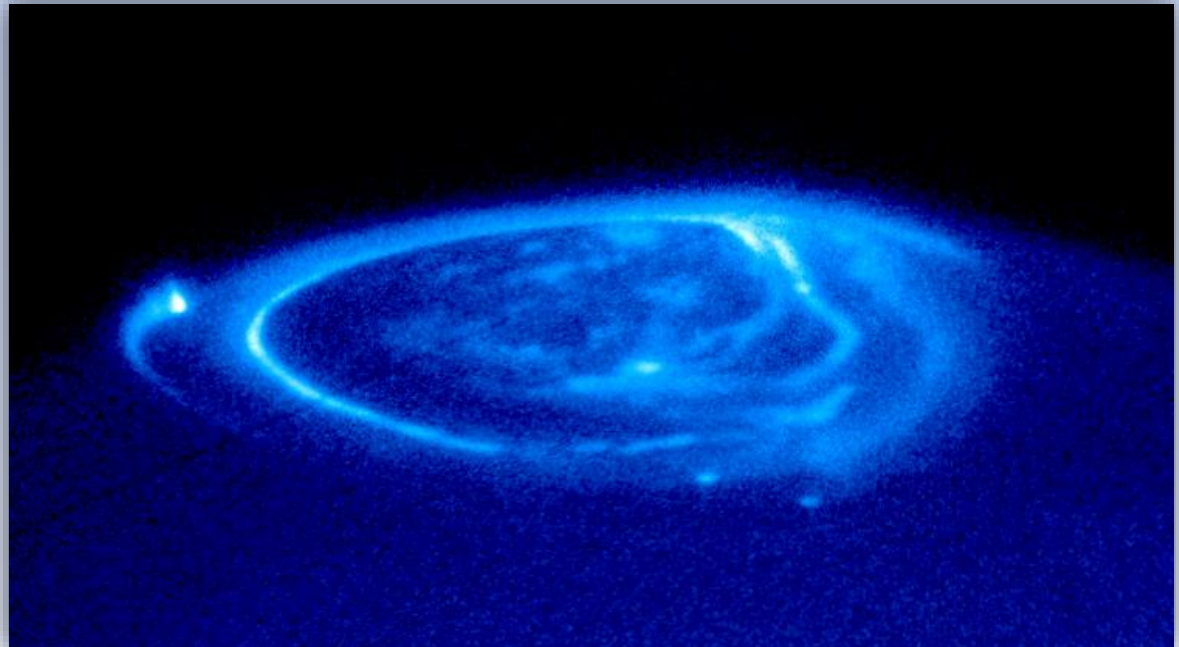
pole magnetyczne

Pola magnetyczne obiektów mogą być:

- generowane w ich wnętrzach (dynamo) [planety olbrzymy, Ziemia, Merkury, Ganimedes]
- utrwalone w skałach (magnetyzacja szczątkowa) [Mars, Księżyc]
- wytwarzane przez interakcję atmosfery (jonosfery) z wiatrem słonecznym [Wenus]

Pole magnetyczne możemy wykryć poprzez:

- pomiar na miejscu (sondy, orbitery)
- detekcję fal radiowych emitowanych przez jony uwięzione w magnetosferze
- obserwację zórz polarnych



Zorza polarna na Jowiszu (obraz w UV, HST)

Układ Słoneczny – właściwości obiektów

skład chemiczny powierzchni

Dane na temat składu chemicznego powierzchni otrzymujemy z:

- analizy widm (światło odbite, emisja własna, echo radarowe)
- badania próbek gruntu (meteoryty, pobranie próbek, lądowniki)

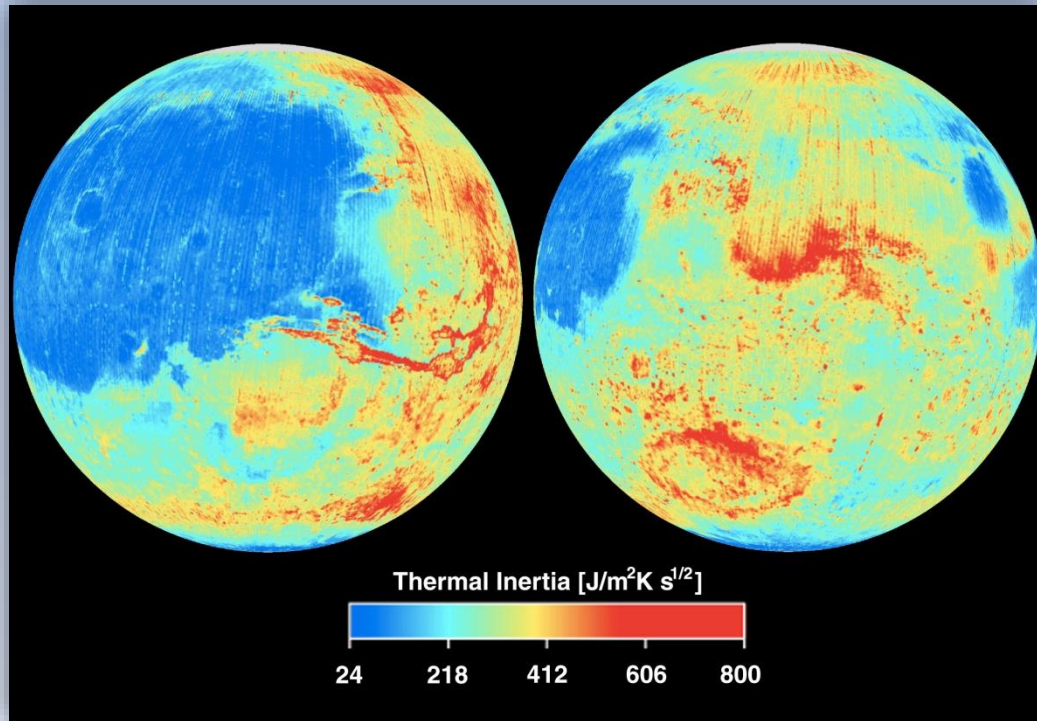


lądownik Phoenix na Marsie

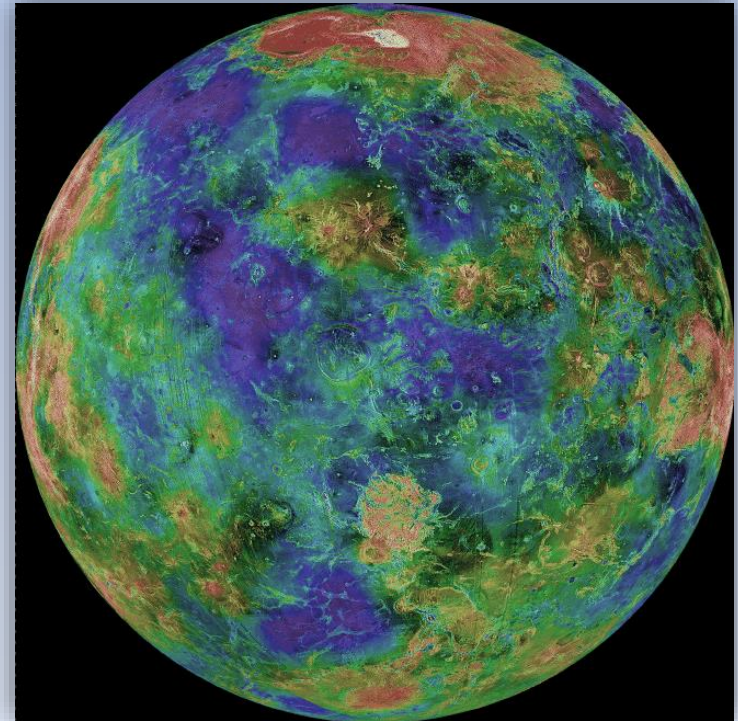
Układ Słoneczny – właściwości obiektów

struktura powierzchni

- wielkoskalową strukturę powierzchni (góry, kratery) znamy na podstawie obrazów (obrazowanie bierne lub aktywne)
- drobnoskalową strukturę powierzchni (rozmiar materiału) możemy zbadać za pomocą lądowników lub metodami pośrednimi takimi jak analiza bezwładności cieplnej lub efektu opozycji



mapa bezwładności termicznej powierzchni Marsa (orbiter MGS)
en.wikipedia.org/wiki/Martian_surface#Thermal_Inertia



hipsometryczna radarowa mapa Wenus
(orbiter Magellan)

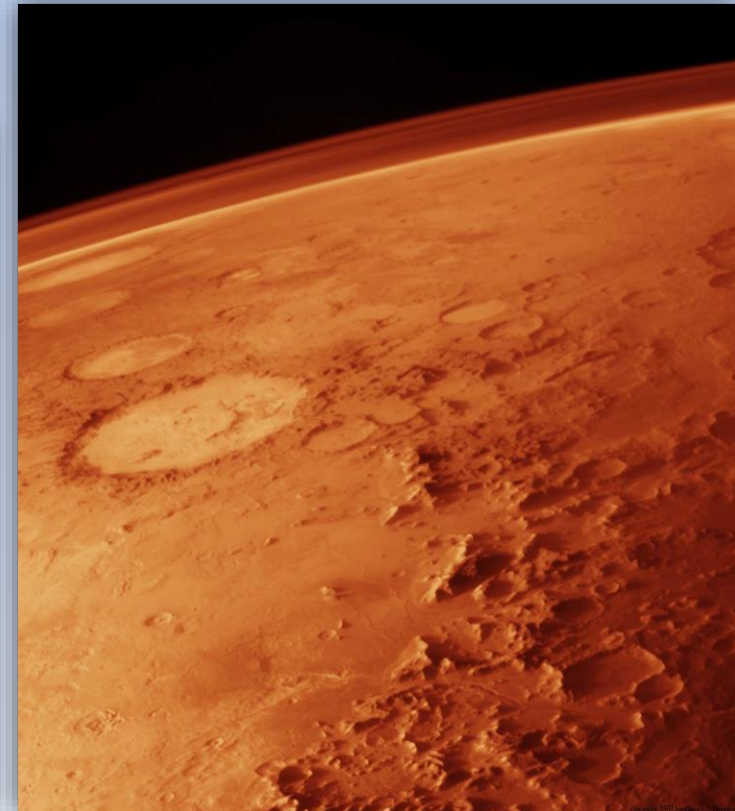
Układ Słoneczny – właściwości obiektów

atmosfera

Większość planet i niektóre księżyce posiadają znaczące atmosfery. Różnorodność jest duża, od ogromnej atmosfery H-He Jowisza, poprzez Ziemską atmosferę zawierającą tlen, po rzadką atmosferę Marsa.

Strukturę i skład atmosfery badamy wykorzystując:

- pomiar na miejscu (lądowniki)
- analizę widmową
- zakrycia gwiazd



Tytan i Mars – atmosfera

Układ Słoneczny – właściwości obiektów

wnętrze

Struktura wewnętrzna i skład chemiczny całości obiektu nie są dostępne dla bezpośrednich obserwacji (z wyjątkiem meteorytów). Informacji o tych cechach dostarczają nam obserwowane właściwości obiektu, np.:

skład chemiczny

- masa i rozmiar (*śr. gęstość*), skład powierzchniowy, odległość od Słońca (*różnice w składzie chemicznym dysku protoplanetarnego*)

struktura wewnętrzna

- pole grawitacyjne i rotacja (*stopień koncentracji masy ku centrum*)
- fale sejsmiczne (Ziemia, Księżyc, Mars)
- utwory wulkaniczne, tektonika płyt
- emisja energii z własnego źródła
- odkształcenia wywołane pływami (księżyce)
- obecność silnego pola magnetycznego i jego konfiguracja

