

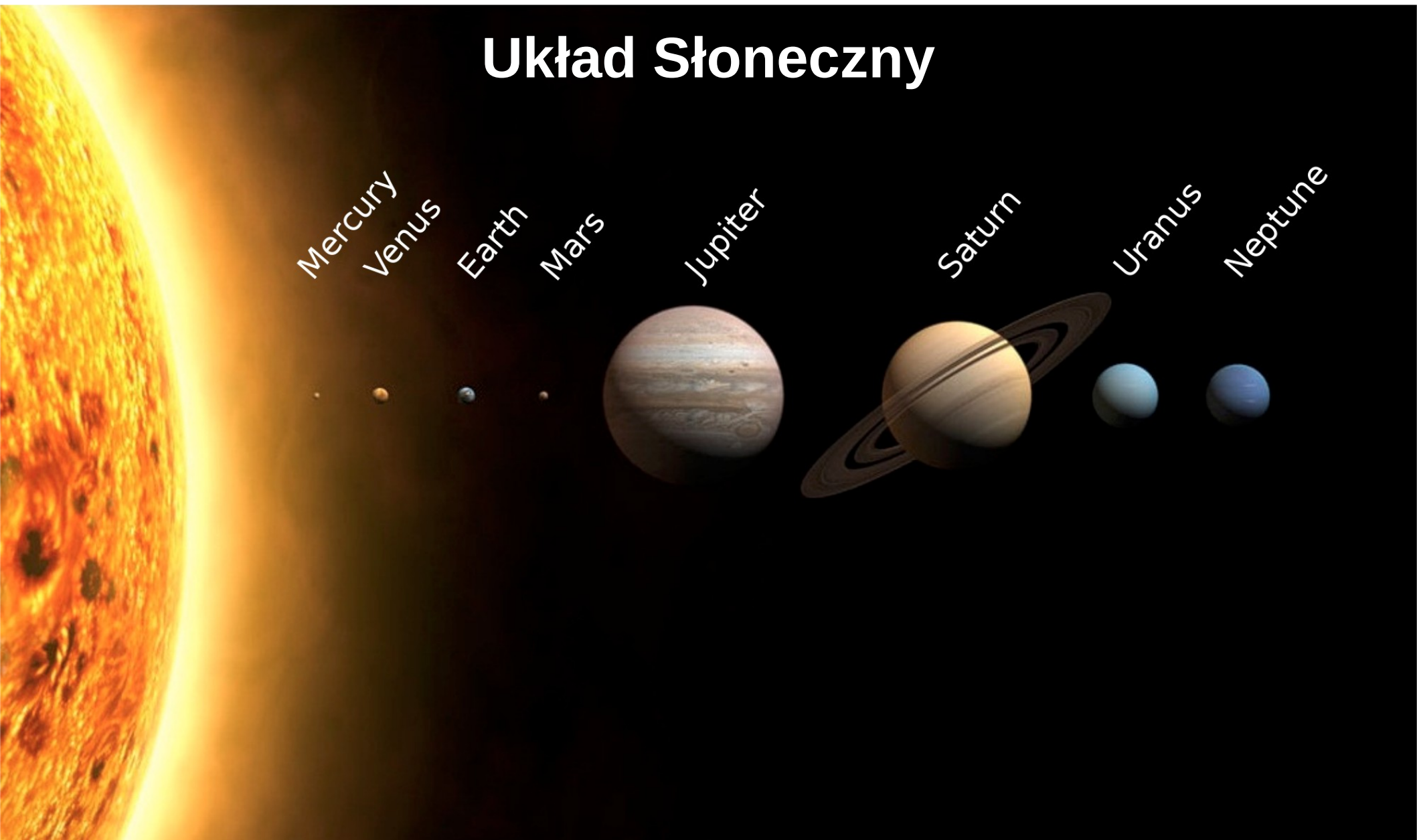
ASTRONOMIA WSPÓŁCZESNA

Krzysztof Kamiński
Instytut Obserwatorium Astronomiczne UAM

www.astro.amu.edu.pl

chrisk@amu.edu.pl

Układ Słoneczny



Porównanie rozmiarów największych ciał Układu Słonecznego
(bez zachowania skali odległości)

Układ Słoneczny

1. Układ planetarny
2. Słońce jako gwiazda
3. Planety i ich księżyce
4. Małe ciała Układu Słonecznego
5. Inne układy planetarne

Układ planetarny

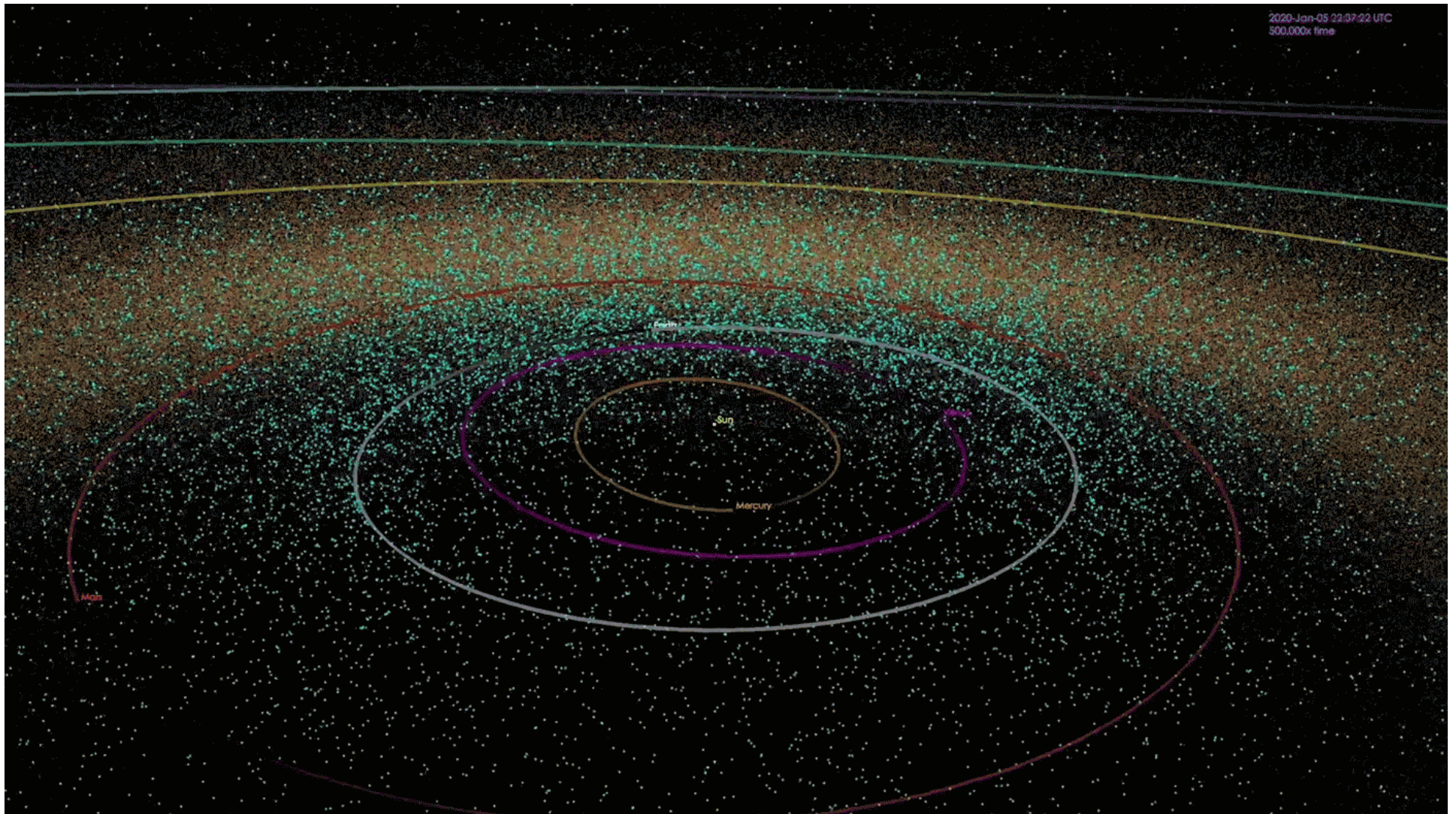
Jest to zespół ciał niebieskich, nie będących gwiazdami, związanych grawitacyjnie z gwiazdą centralną (lub niekiedy z układem gwiazd).

Do układu planetarnego oprócz gwiazd(y) centralnej zalicza się licząc od największych do najmniejszych:

- brązowe karły;
- planety z ich księżycami;
- planety karłowate;
- planetoidy;
- komety;
- meteoroidy;
- pył i gaz międzyplanetarny;
- wytwory gwiazd(y) centralnej takie jak wiatr gwiazdowy oraz jej magnetosfera.

Do lat 90-tych XX wieku znany był tylko jeden układ planetarny we Wszechświecie: Układ Słoneczny.

Układ Słoneczny



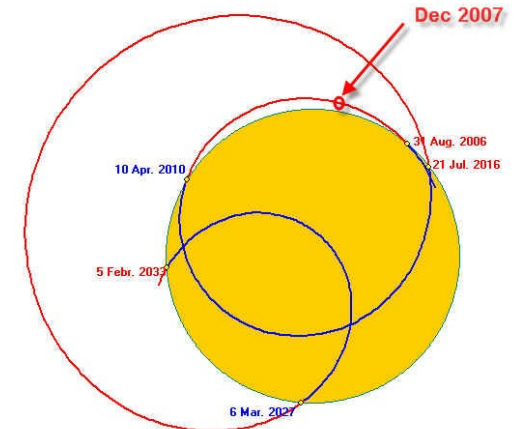
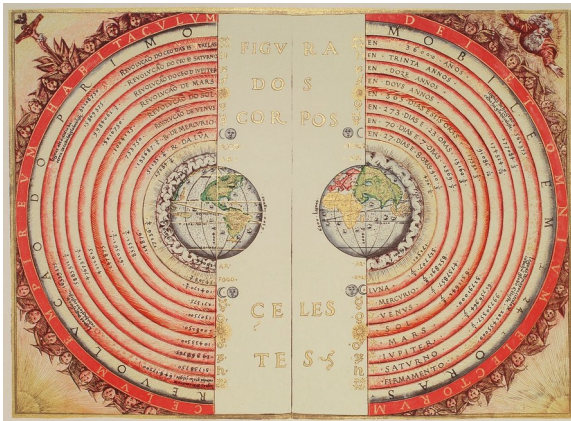
Wizualizacja ruchu Słońca, planet i planetoid z zachowaniem skali odległości, ale bez zachowania skali rozmiaru.

Układ Słoneczny

Kwestia środka Układu Słonecznego

Model geocentryczny – do XIVw dominujący model opisujący położenia niebieskich jako krążących wokół Ziemi.

Model heliocentryczny – od XIVw do Newtona dominujący model opisujący położenia ciał niebieskich jako krążących wokół Słońca.



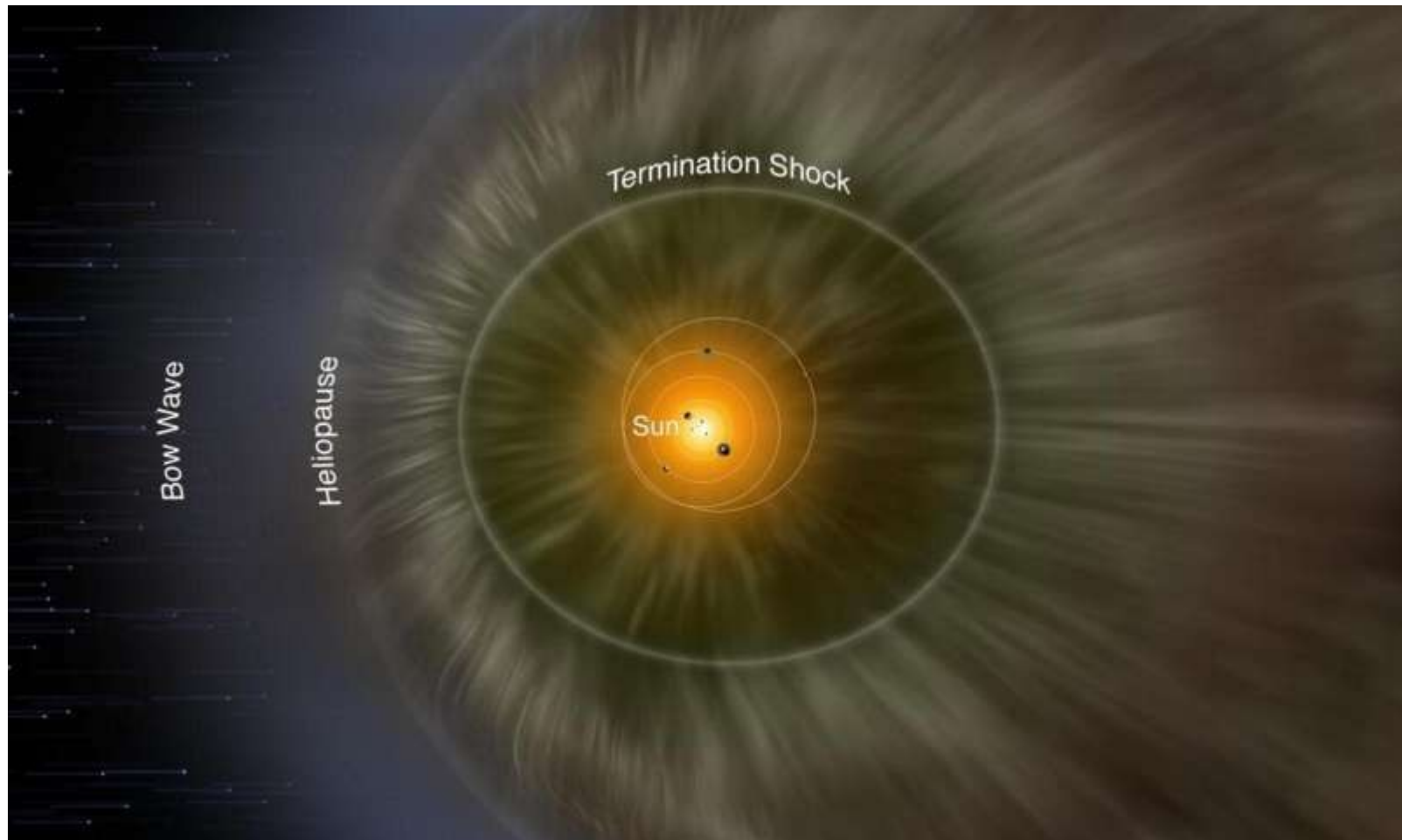
Wg fizyki newtonowskiej środek Układu Słonecznego jest w centrum masy wszystkich ciał układu, aktualnie wypada nieco poza Słońcem.

Wg współczesnej fizyki relatywistycznej środek Układu Słonecznego jest w całkowicie dowolnym miejscu i nie ma to żadnego znaczenia (poza wygodą astrofizyka i względami edukacyjnymi).

Układ Słoneczny

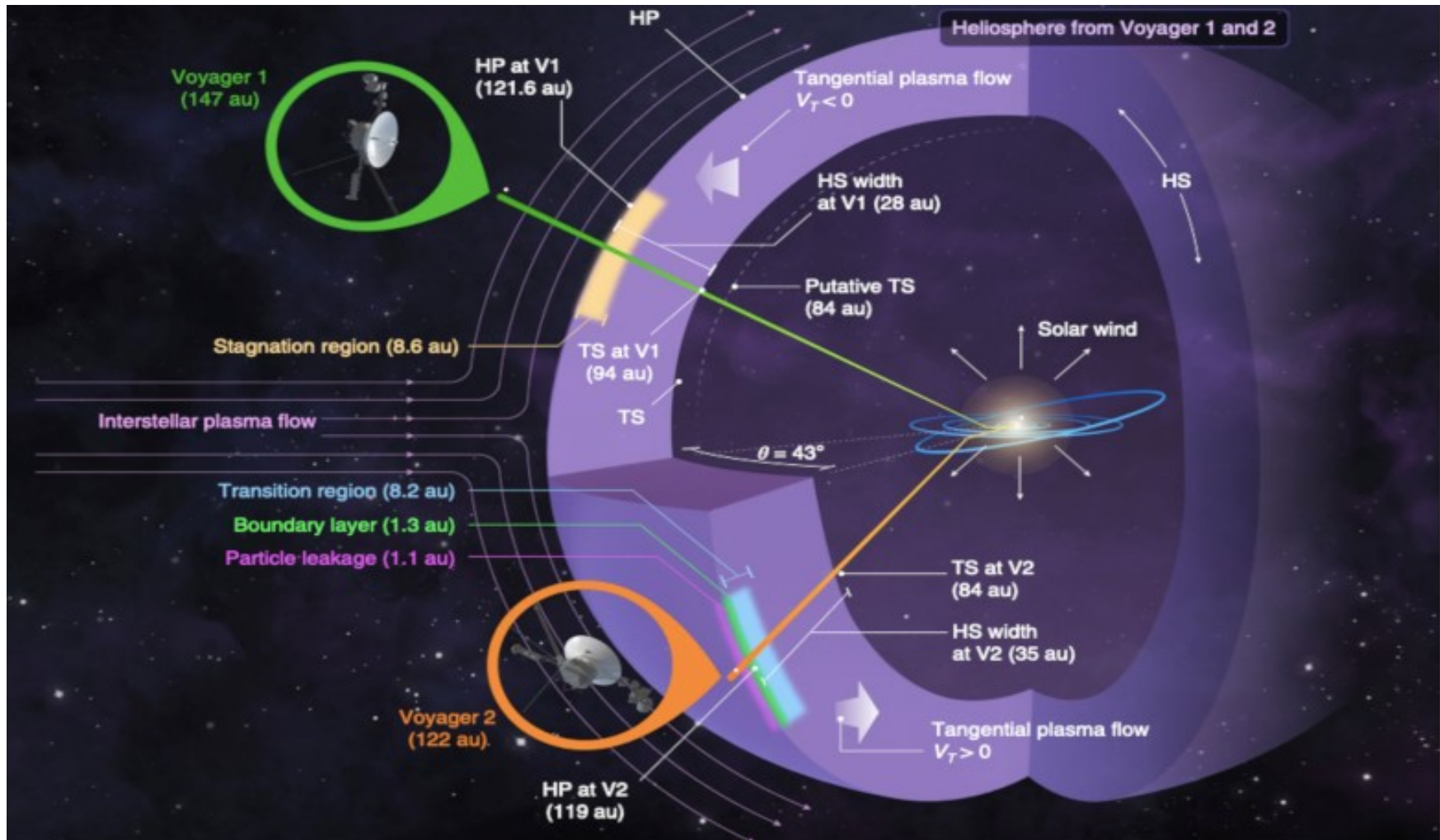
Granica Układu Słonecznego

Umowną granicą Układu Słonecznego jest heliopauza. Heliopauza jest „krawędzią” heliosfery – obszaru dominacji materii wiatru słonecznego nad materią międzygwiazdową



Układ Słoneczny

Granica Układu Słonecznego

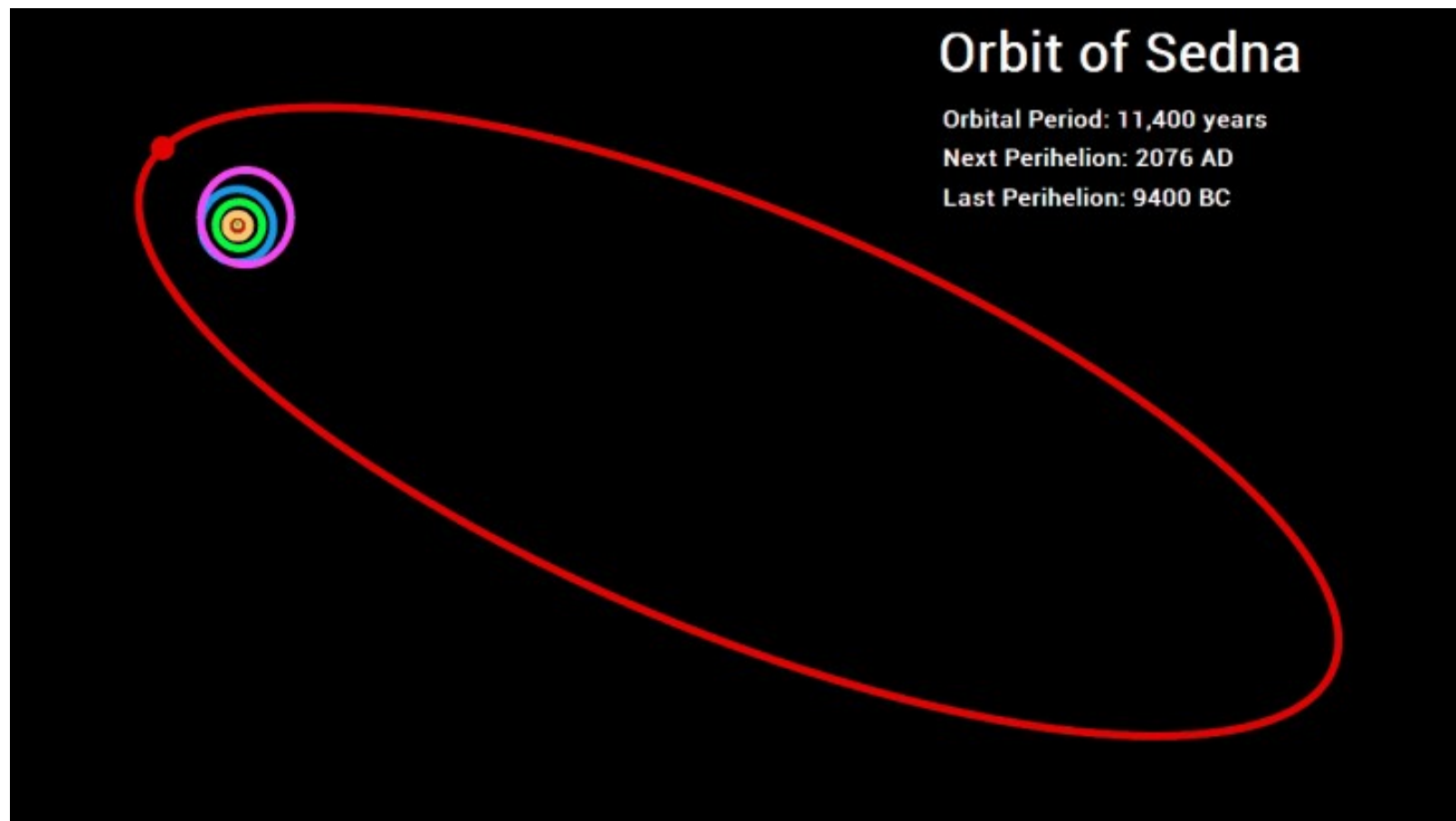


Dwie sondy kosmiczne przekroczyły umowną granicę Układu Słonecznego: Voyager 1 w roku 2012 i Voyager 2 w roku 2018.

Układ Słoneczny

Granica Układu Słonecznego

Jest bardzo wiele obiektów zaliczanych do Układu Słonecznego, które czasowo lub stale znajdują się poza heliopauzą.

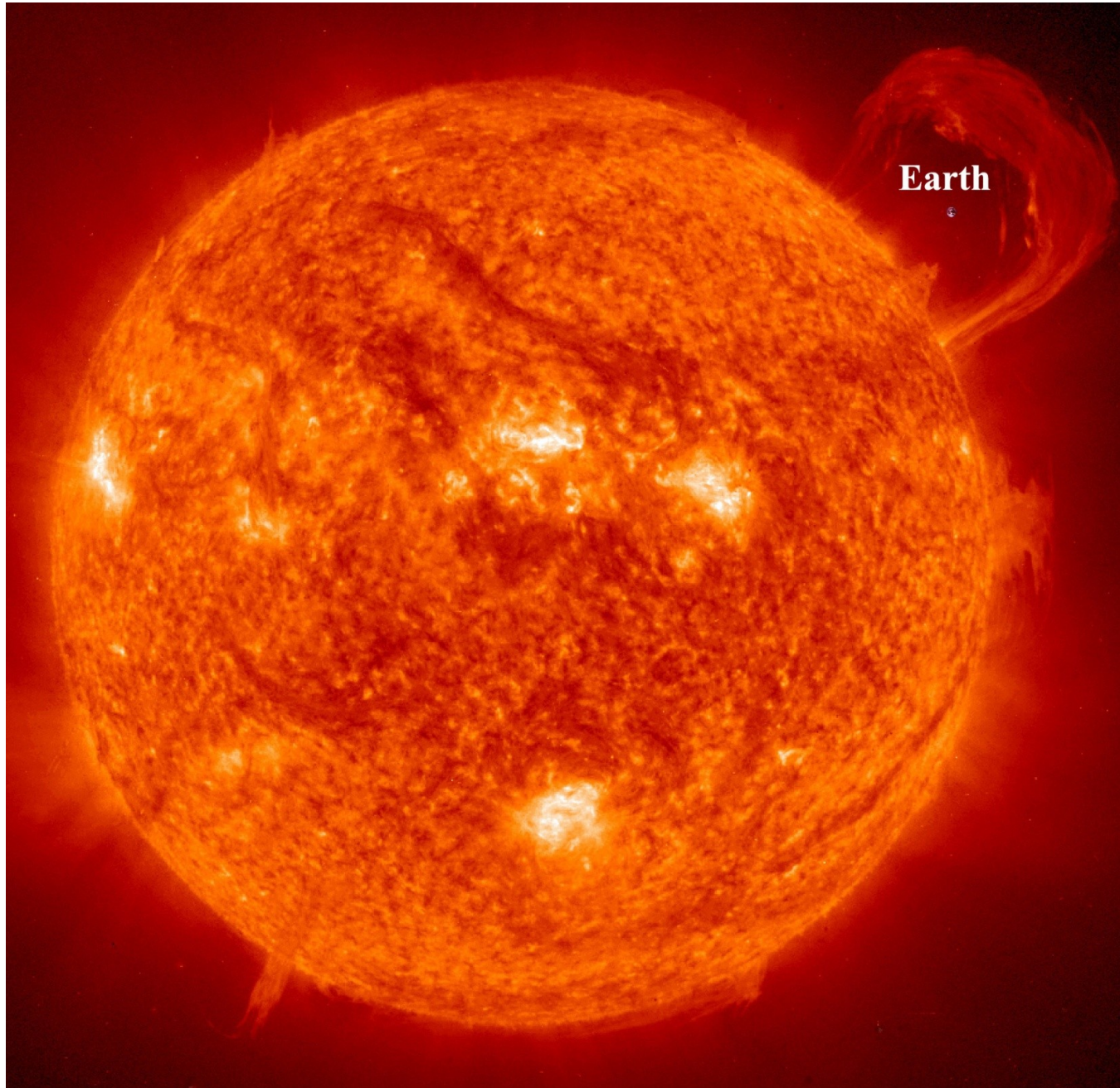


Orbita Sedny – obiektu z Pasa Kuipera – wykracza daleko poza heliopauzę.

Układ Słoneczny
Przegląd tematyczny

Słońce

Słońce



Zdjęcie Słońca z satelity SOHO na falach ultrafioletowych (2009)

Słońce

Średnica:

109x rozmiar Ziemi
10x rozmiar Jowisza
1.4 mln km

Masa:

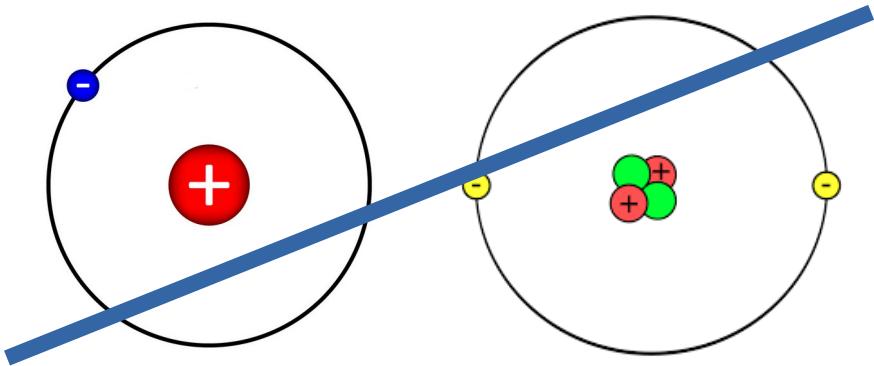
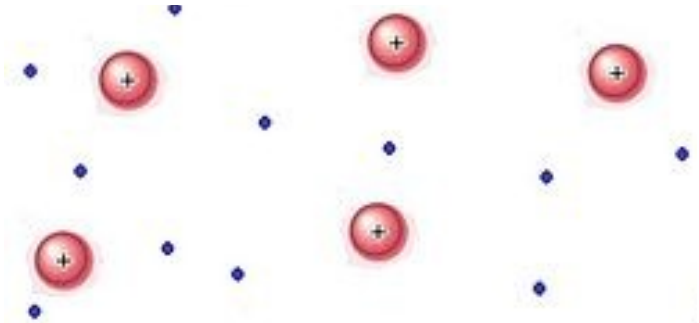
333000x masa Ziemi
1000x masa Jowisza
99.86% masy Układu Słonecznego
 $2 \cdot 10^{30}$ kg

Skład chemiczny:

73% H
25% He
1-2% inne, tzw. "metale"

Stan skupienia:

plazma (gaz zjonizowany)
elektrony oddzielone od jąder atomowych



Słońce

Słońce to gwiazda!

Nie wiadomo kto pierwszy wysunął takie przypuszczenie.

Syriusz – najjaśniejsza gwiazda nocnego nieba ma jasność obserwowaną ok. 6 kwadrylionów razy mniejszą niż Słońce.

Definicja gwiazdy:

1. kula plazmy (lub innego stanu materii);
2. utrzymująca się za pomocą własnej grawitacji (samograwitująca, podobnie jak np. Ziemia); zwykle w równowadze hydrostatycznej;
3. w której zachodzi lub zachodziła kiedyś produkcja energii w reakcjach syntezy termojądrowej;

Słońce

Synteza termojądrowa

Jeszcze 100 lat temu nikt nie wiedział dlaczego Słońce świeci, choć już zdawano sobie sprawę, że musi to być źródło energii wystarczającej na miliardy lat.

Podstawowym źródłem energii w gwiazdach podobnych do Słońca (karłach) jest synteza (fuzja) termojądrowa: łączenie lekkich jąder atomów w cięższe.



Suma mas po lewej stronie:
 $6.68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

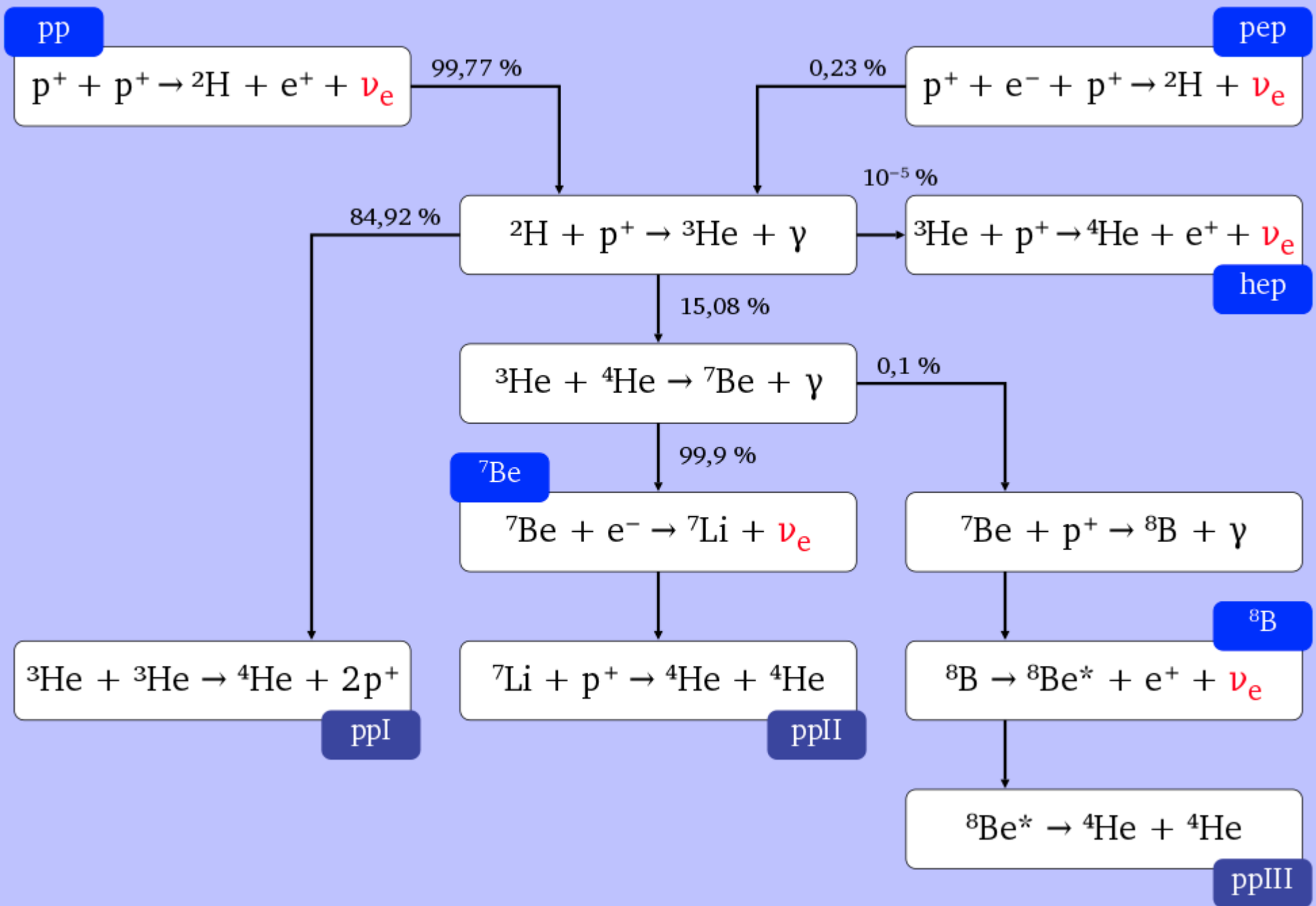
Suma mas po prawej stronie:
 $6.63 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Deficyt masy = uwolniona energia ($E=mc^2$) = wysoka prędkość cząstek
= liczne zderzenia i wysoka temperatura

W reakcji syntezy wodoru ok. 3% masy zamieniane jest w energię.

Słońce

Synteza termojądrowa



Słońce

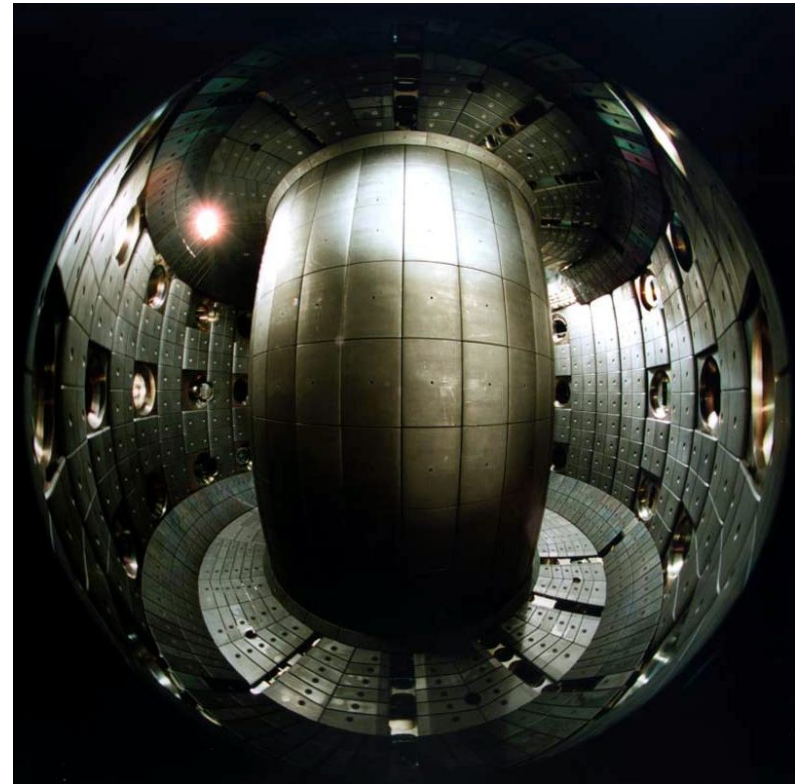
Synteza termojądrowa

Tempo syntezy termojądrowej jest proporcjonalne do temperatury w czwartej potęgze (cykl proton-proton), a więc bardzo szybko rośnie wraz ze wzrostem temperatury.

W warunkach ziemskich prowadzi to do reakcji łańcuchowej i potencjalnie potężnej eksplozji.



Najsilniejsza bomba termojądrowa w historii.

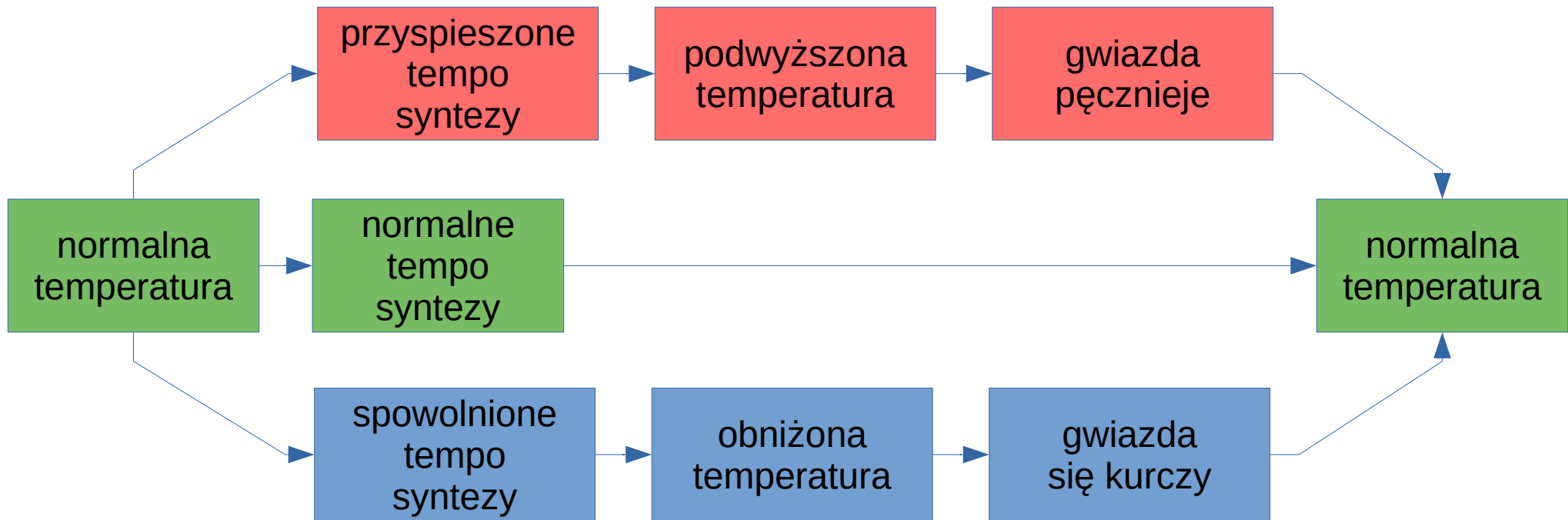


Reaktor eksperymentalny typu tokamak.

Słońce

Synteza termojądrowa

Gwiazdy (zazwyczaj) samoczynnie stabilizują tempo reakcji termojądrowych.



Samograwitujące kule gazu (w równowadze hydrostatycznej) mają niespotykaną własność – ujemne ciepło właściwe. Ich podgrzanie powoduje pęcznienie i w efekcie spadek temperatury!

Od tej zasady są wyjątki – gwiazdy zdegenerowane, eksplozje supernowych.

Słońce

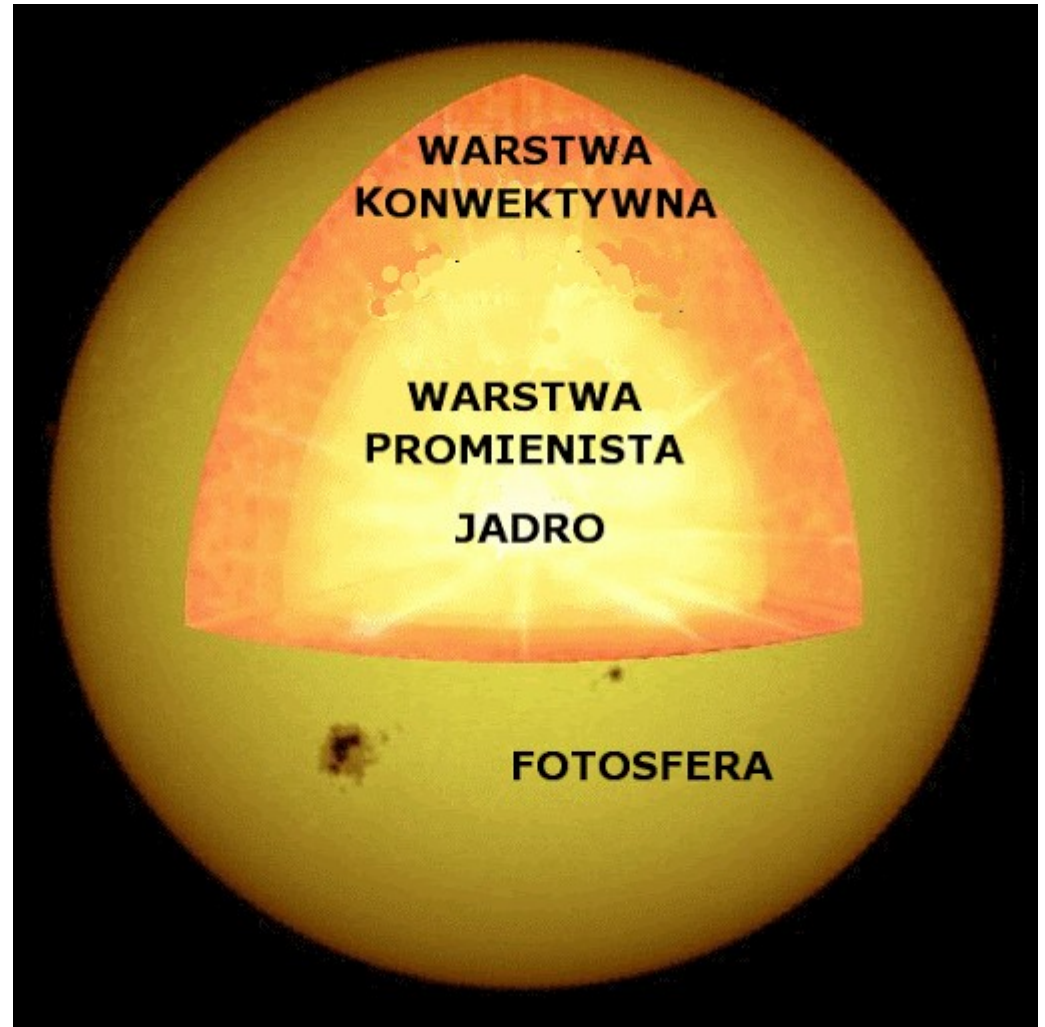
Budowa wnętrza

Reakcje syntezy zachodzą tylko w jądrze Słońca, które zawiera ok. 10% masy gwiazdy.

W warstwie promienistej następuje powolny transport energii z jądra na zewnątrz poprzez wysokoenergetyczne promieniowanie.

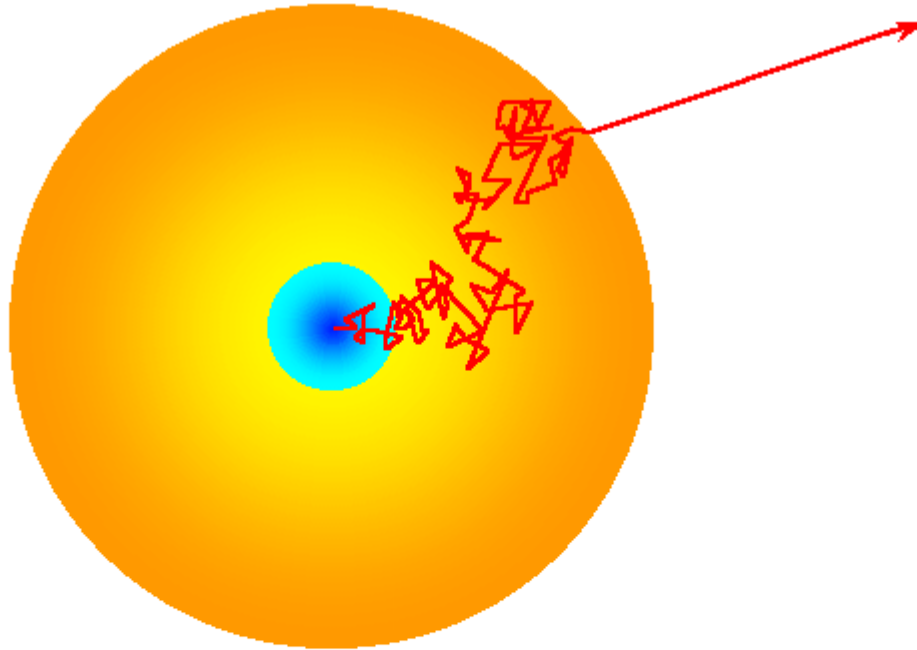
W warstwie konwektywnej materia jest tak nieprzezroczysta, że transport promienisty jest nieefektywny i uruchamia się transport przez konwekcję.

Warstwa konwektywna sięga umownej powierzchni Słońca, czyli fotosfery. Tu materia staje się tak przezroczysta, że promieniowanie swobodnie opuszcza gwiazdę. Fotosfera jest również uznawana za najniższą warstwę atmosfery Słońca.



Słońce

Transport energii



Foton wyprodukowany w jądrze Słońca potrzebuje kilkadziesiąt tysięcy lat na przedostanie się na jego powierzchnię, gdyż średnio co kilka cm zderza się z napotkaną cząstką, w wyniku czego jest pochłaniany i reemitowany w losowym kierunku.

W przeciwieństwie do fotonu, neutrino wyprodukowane w jądrze Słońca potrzebuje ok. 2s na przedostanie się na jego powierzchnię.

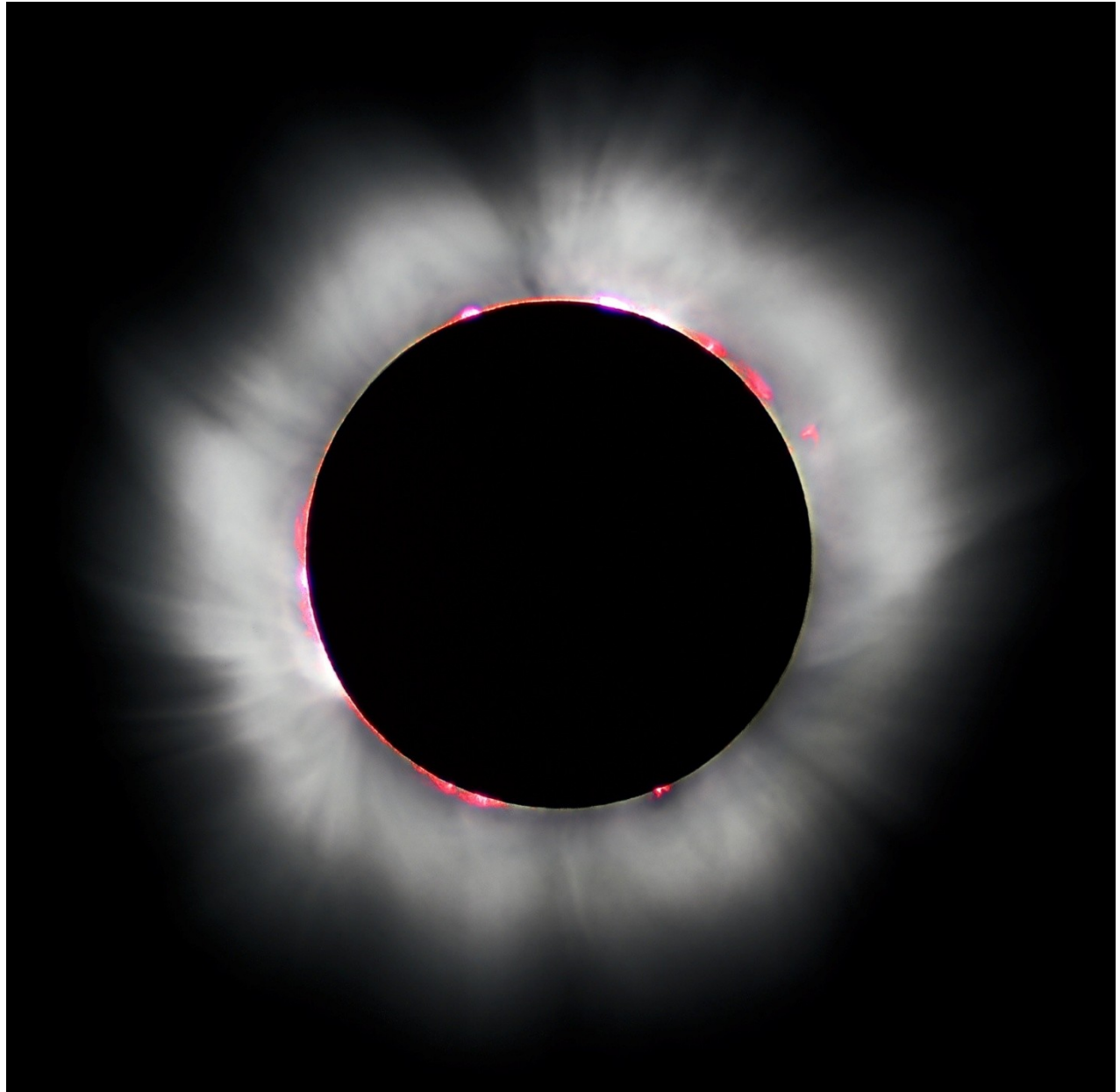
Słońce

Atmosfera i wiatr słoneczny

Kula słoneczna nie ma wyraźnej granicy i w sposób płynny rozciąga się w przestrzeń kosmiczną.

Ponad fotosferą wyróżnia się chromosferę (czerwone) i koronę słoneczną (szare na zdjęciu).

Z korony, z prędkościami 500-600 km/s uciekają w przestrzeń kosmiczną cząstki (głównie p i e⁻) tworząc tzw. wiatr słoneczny.



Zdjęcie Słońca wykonane podczas zaćmienia.

Słońce

Wiatr słoneczny – zorze polarne

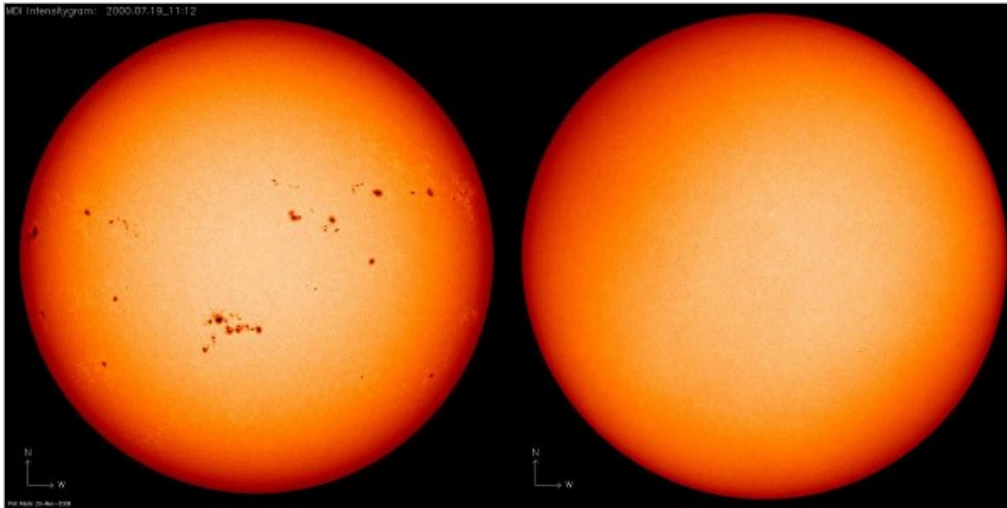
Zorze z ISS

Słońce

Aktywność słoneczna

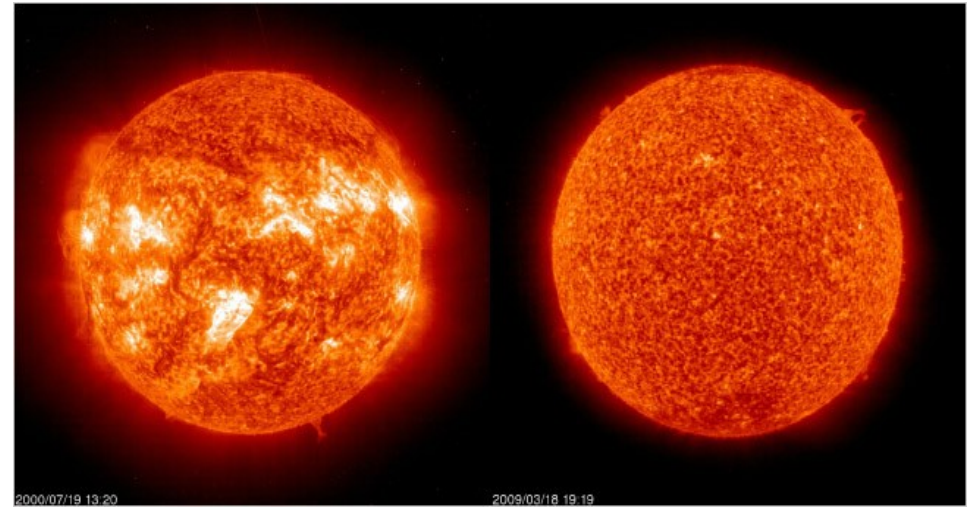
19 VII 2000

18 III 2008



19 VII 2000

18 III 2008

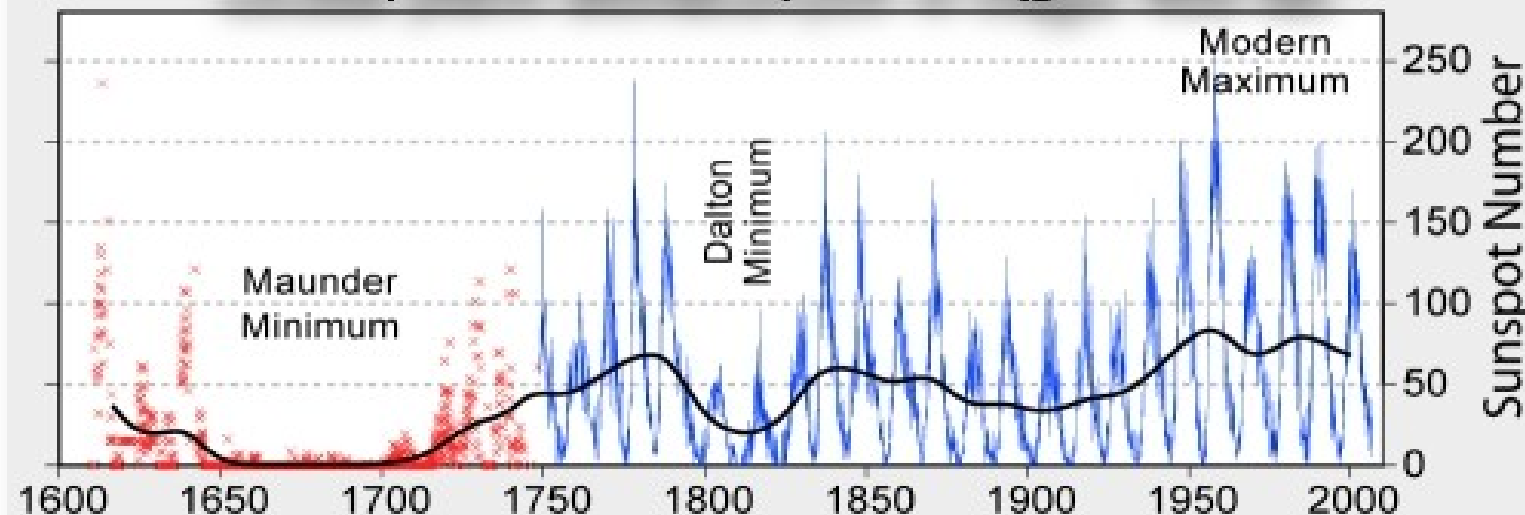


Słońce w promieniach widzialnych

Słońce w ultrafiolecie

Z lewych stron – wysoka aktywność Słońca, z prawych – wysoka.

Liczba plam słonecznych w ciągu 400 lat

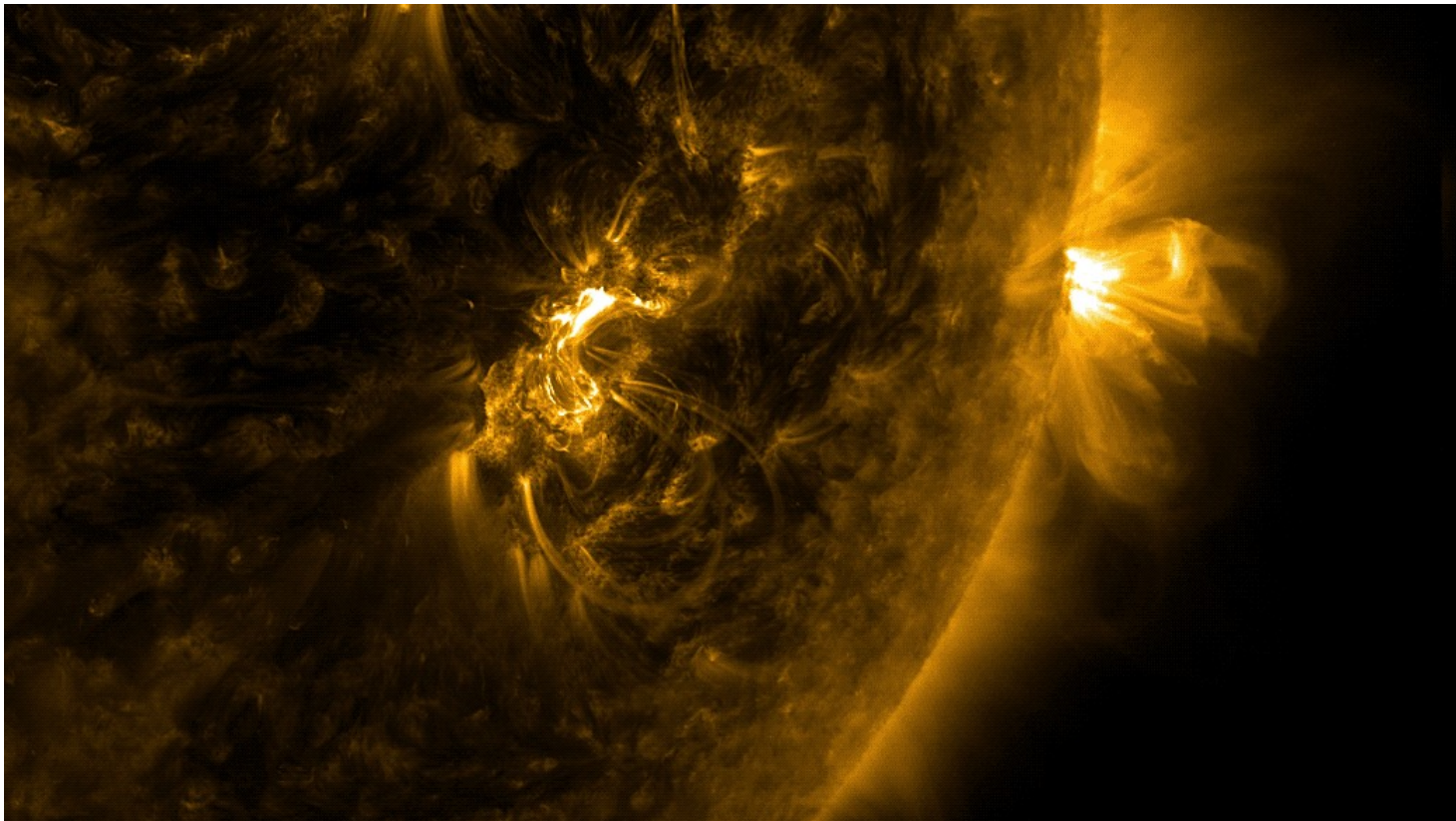


Słońce

Pogoda kosmiczna

Pogoda kosmiczna – dział heliofizyki zajmujący się wpływem Słońca na atmosferę i otoczenie Ziemi (oraz inne miejsca w US)

Liczba wysokoenergetycznych cząstek ze Słońca (wiatr słoneczny) zmienia się wraz z pojawianiem się rozbłysków lub koronalnych wyrzutów materii.



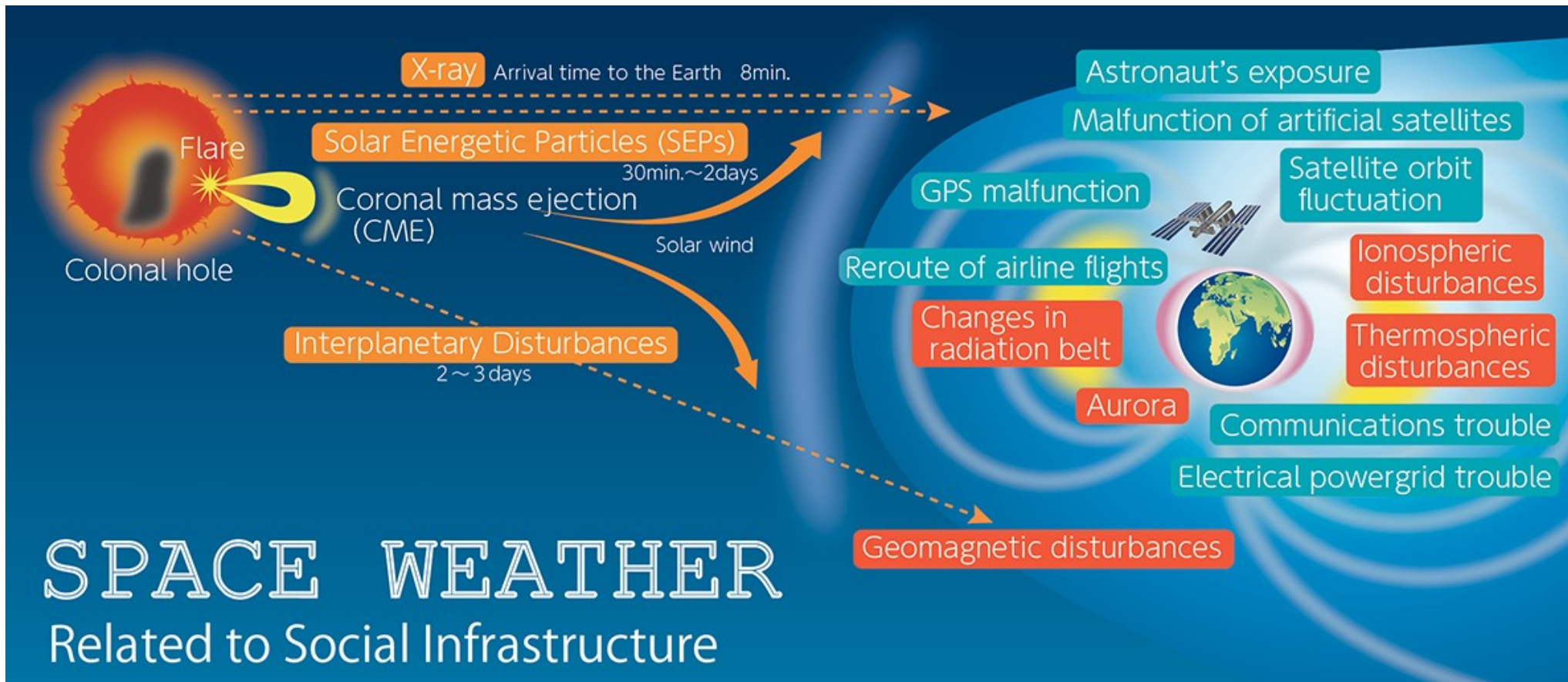
Rozbłysk słoneczny 2017-08-06

Słońce

Pogoda kosmiczna

Skutki zmiennej pogody kosmicznej:

- usterki sztucznych satelitów, problemy z łącznością radiową
- zmiany w górnych warstwach atmosfery Ziemi, zmiany orbit satelitów
- zorze polarne, awarie naziemnych sieci energetycznych



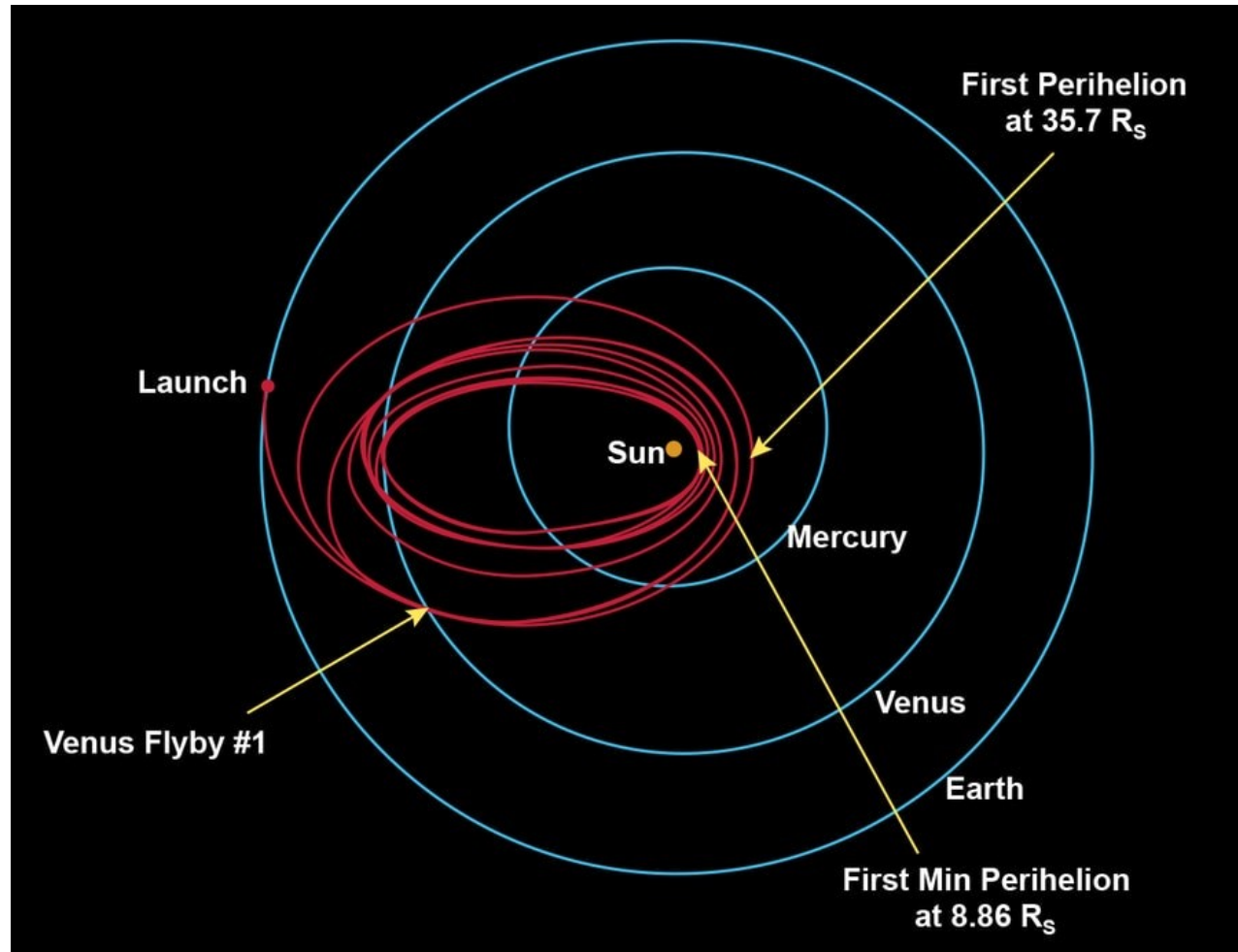
Przykład: burza geomagnetyczna 1989 – brak prądu w Quebecu

Słońce

Słoneczne sondy kosmiczne



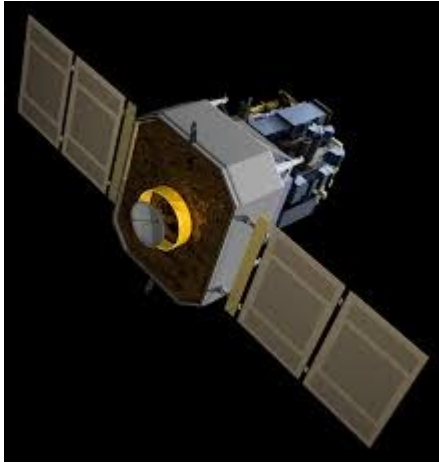
Parker Solar Probe



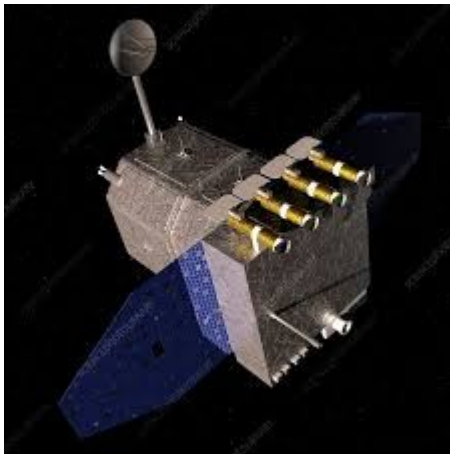
Trajektoria lotu sondy.

Słońce

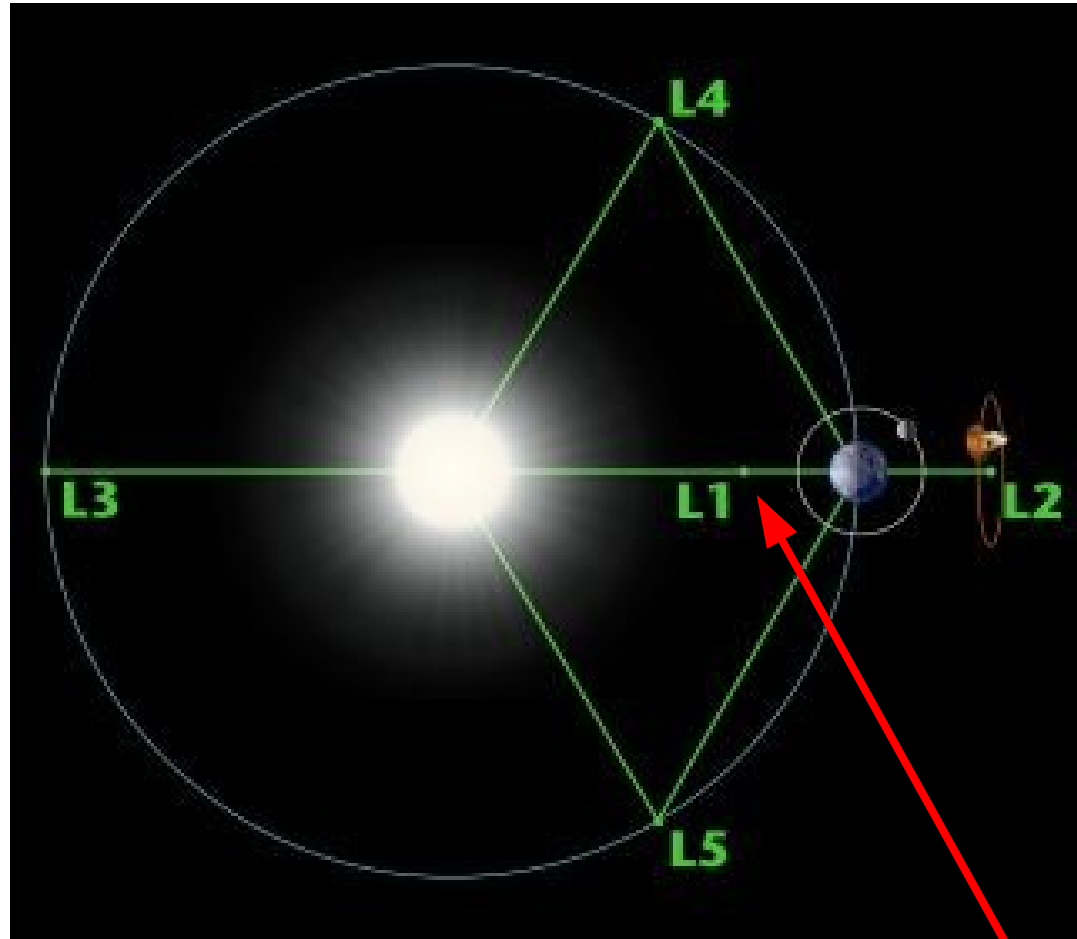
Słoneczne sondy kosmiczne



SOHO



SDO



Punkty równowagi grawitacyjnej Lagrange'a.
Sonda SOHO jest umieszczona w pobliżu punktu L1,
ok. 1.5 mln km od Ziemi.

Planety

Do roku 2006 nie istniała żadna oficjalna definicja planety, choć większość przyjmowała, że jest to ciało o rozmiarach co najmniej 1000km.

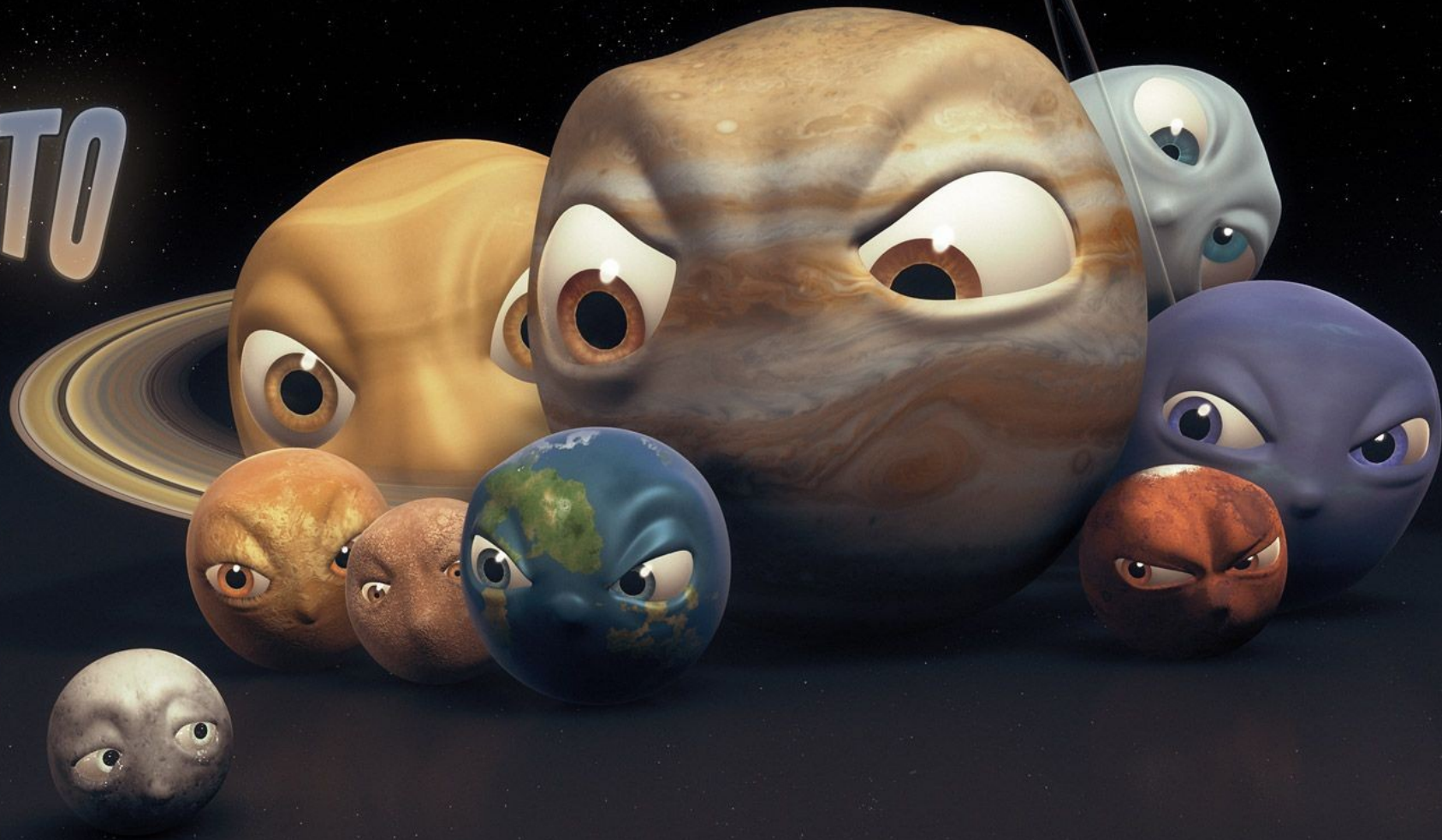
2006-08-26 Międzynarodowa Unia Astronomiczna przyjęła definicję planety.

Planeta to ciało, które:

1. Znajduje się na orbicie „wokół Słońca” (choć raczej powinno być wokół wspólnego środka masy układu planetarnego);
2. Posiada wystarczającą masę, aby pod wpływem własnej grawitacji uzyskać kształt prawie kulisty (a więc jest w równowadze hydrostatycznej);
3. Oczyszczyło sąsiedztwo swojej orbity z innych względnie dużych obiektów;

Planety

POOR
PLUTO



Po 75 latach od odkrycia Pluton został „zdegradowany”
z planety na planetę karłowatą.

Planety

Problemy tej definicji:

- jest ze swojej natury mało precyzyjna
- nie pozwala stwierdzić czy odkrywane ostatnio planety pozasłoneczne faktycznie są zgodnie z tą definicją planetami

Księżyce planet:

Nie krążą wokół Słońca.

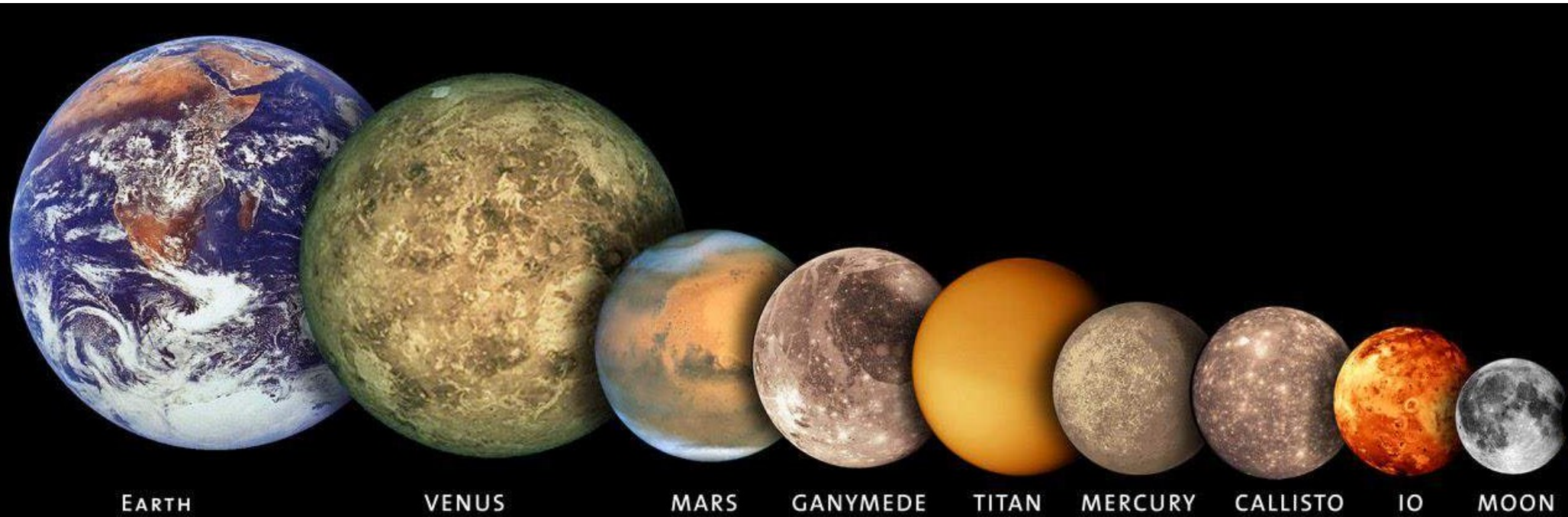
Planety karłowate:

Nie oczyściły swojej okolicy.

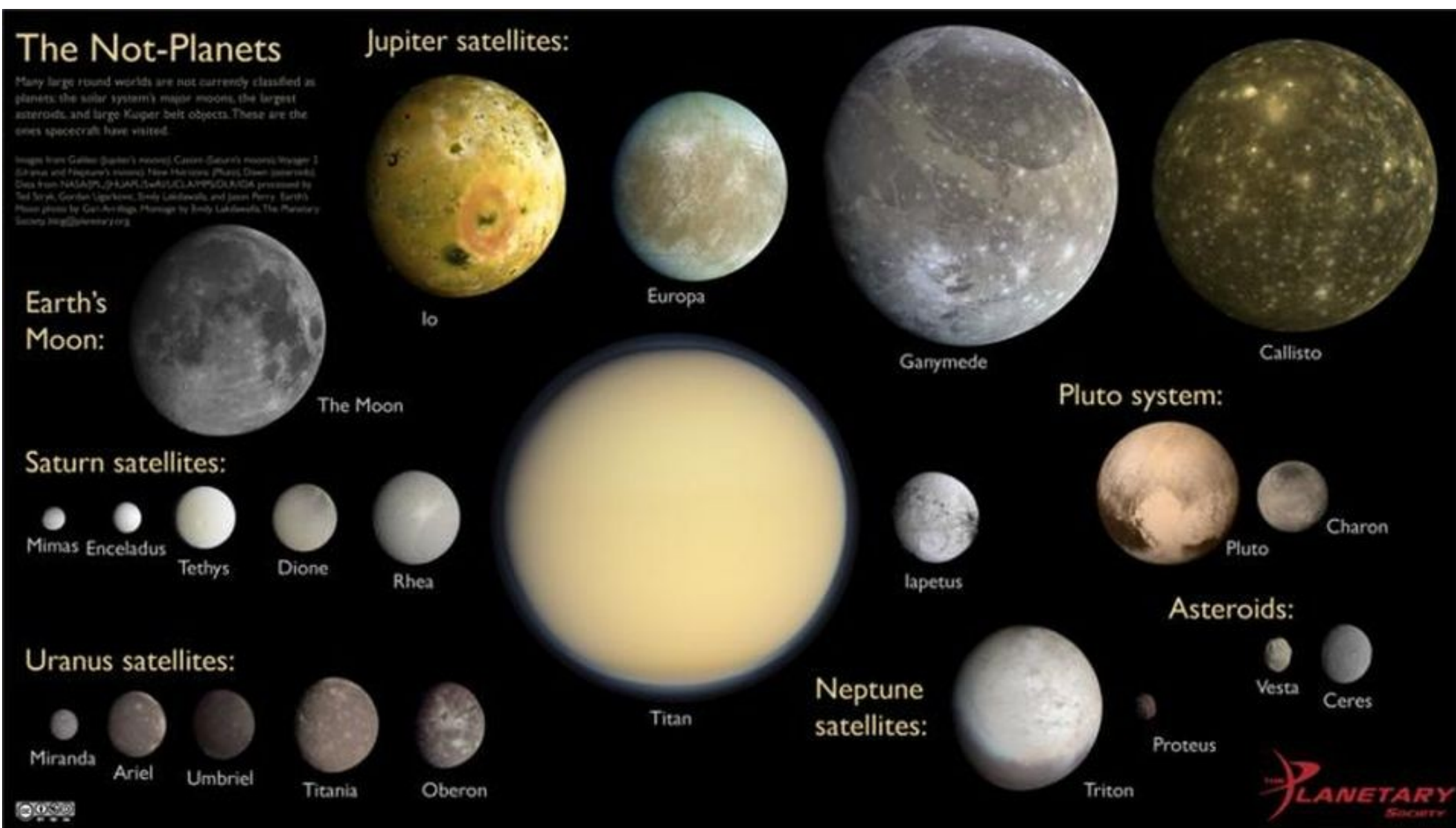
Małe ciała Układu Słonecznego:

Nie oczyściły swojej okolicy i nie są prawie kuliste.

Planety skaliste i największe nie-planety



Księżyce, planety karłowate i jedna planetoida

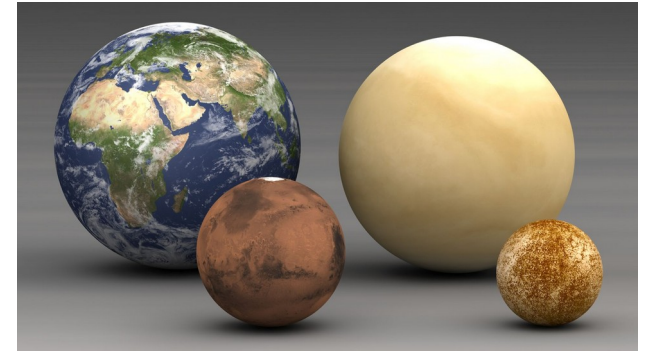


Planety

Rodzaje planet w Układzie Słonecznym

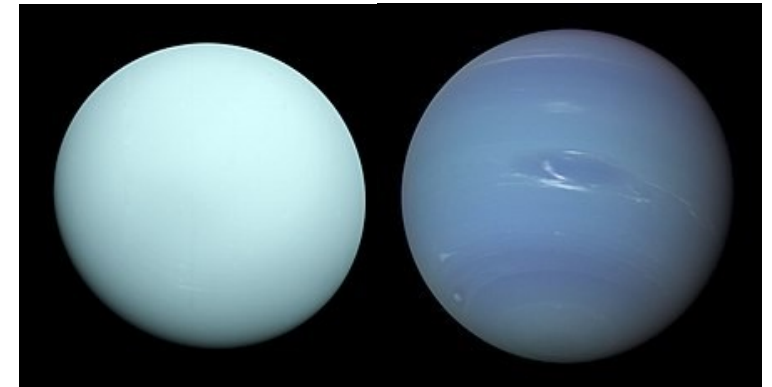
Planety skaliste

W Układzie Słonecznym: Merkury, Wenus, Ziemia i Mars.
Zbudowane głównie ze skał krzemowych i/lub metali.
Wysoka średnia gęstość ($3.9-5.5 \text{ g/cm}^3$)
oraz stosunkowo niewielki rozmiar (do rozmiaru Ziemi).



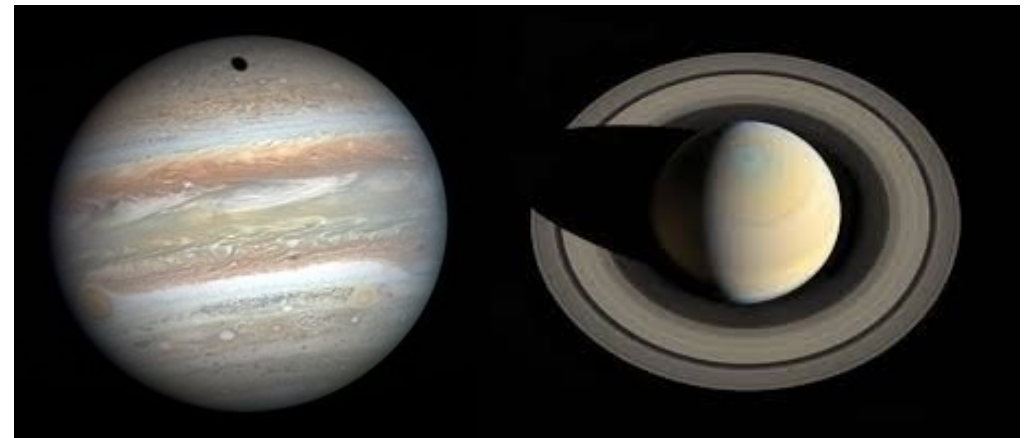
Planety olbrzymy lodowe

W Układzie Słonecznym: Uran i Neptun.
Zbudowane głównie z pierwiastków cięższych od H i He (tzw. „metali”), np. O, C, N, S,
w postaci: wody, metanu, amoniaku itp.
Niewielka gęstość ($1-2 \text{ g/cm}^3$),
rozmiar wyraźnie większy od Ziemi.



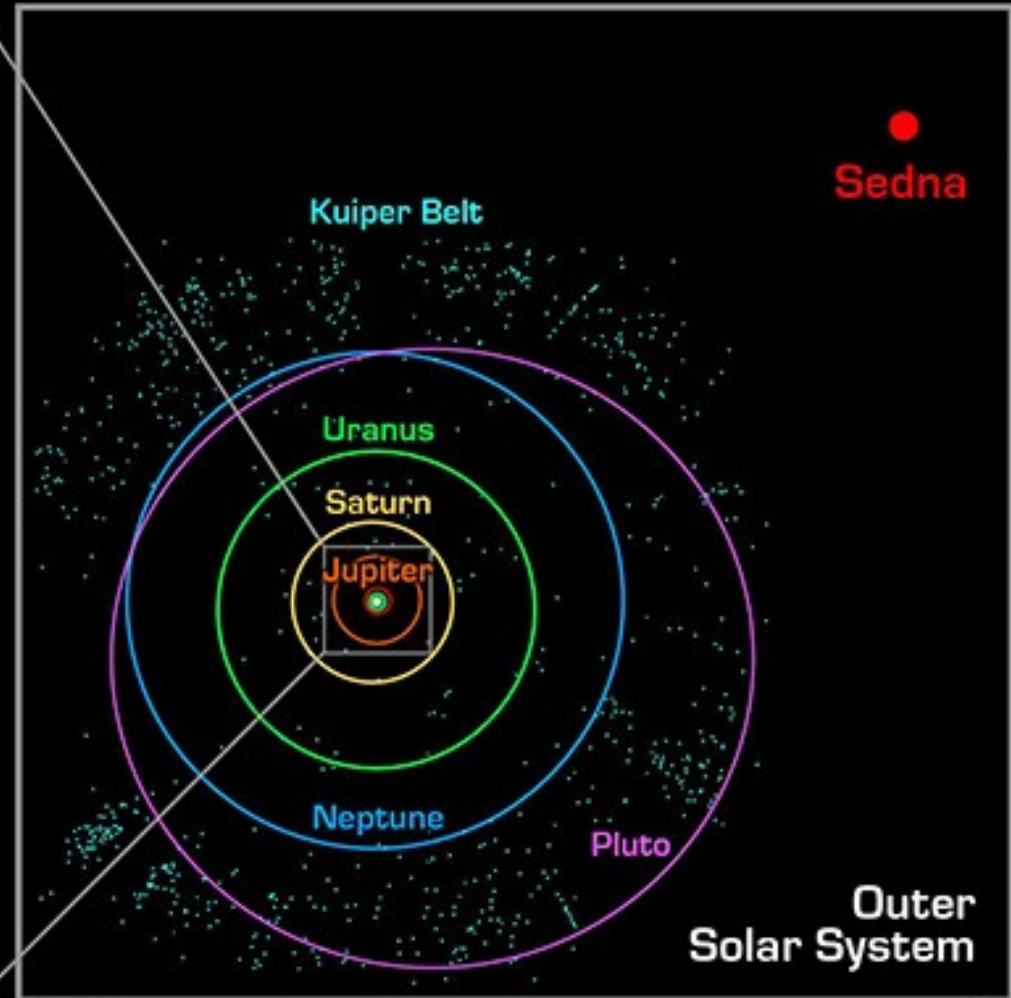
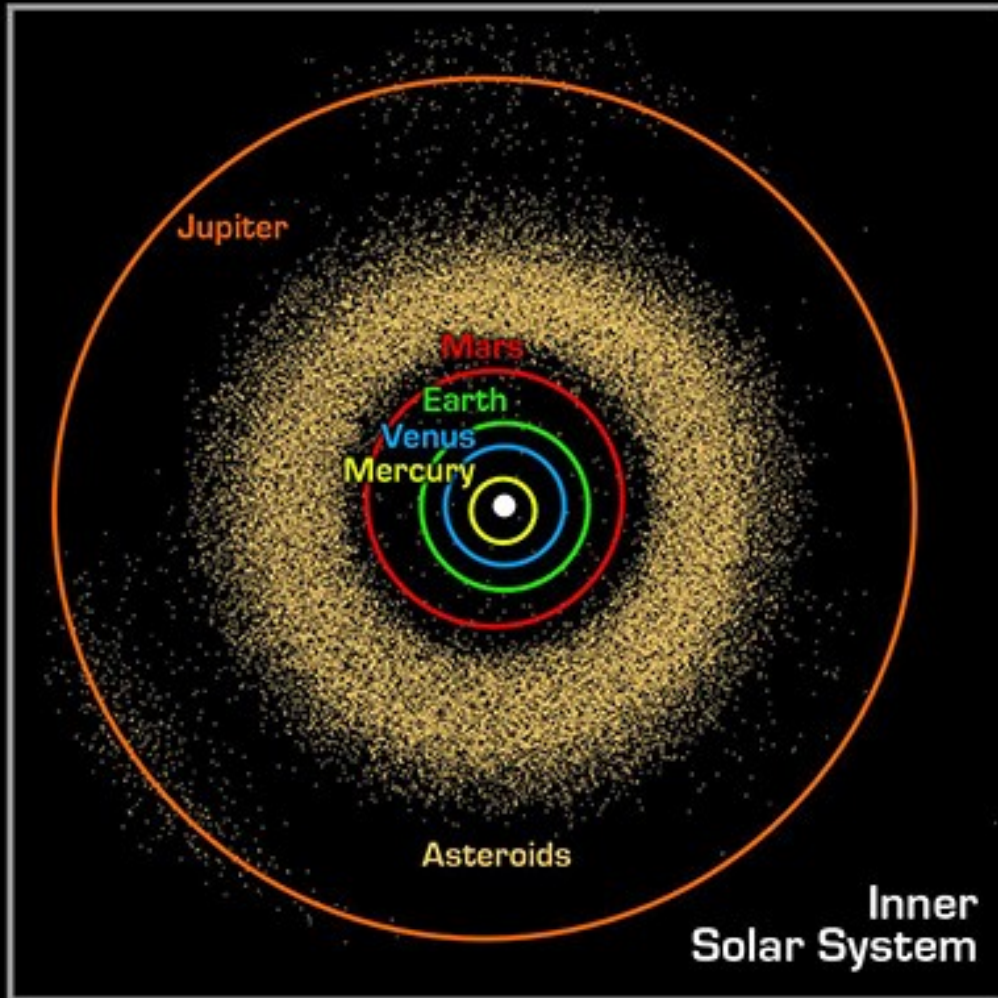
Planety olbrzymy gazowe

W Układzie Słonecznym: Jowisz i Saturn.
Zbudowane głównie z H i He.
Niewielka gęstość ($0.7-1.5 \text{ g/cm}^3$),
rozmiar wielokrotnie większy od Ziemi.



Planety

Orbity planet w Układzie Słonecznym

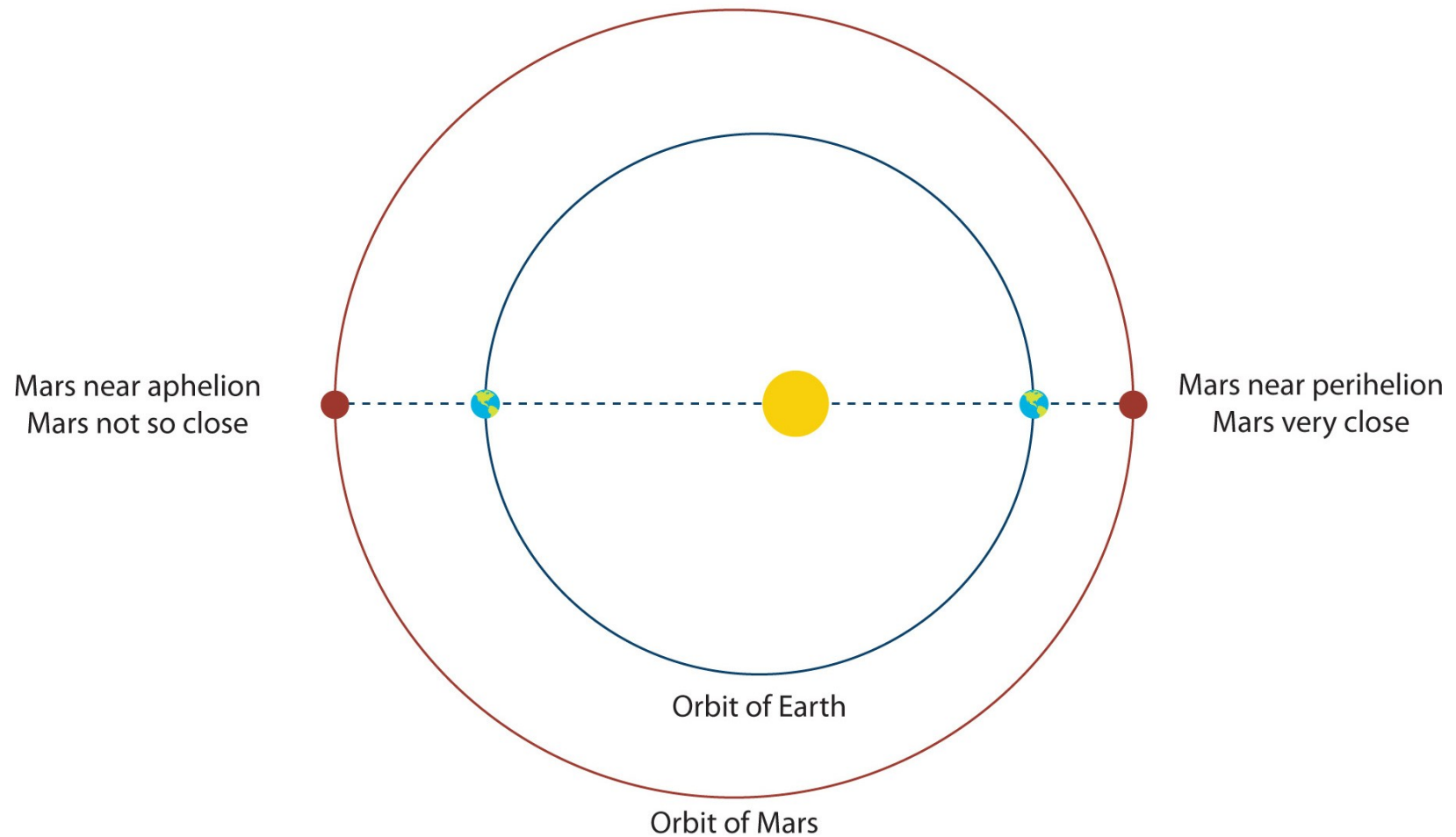


Wewnętrzny Układ Słoneczny
oraz Jowisz.

Zewnętrzny Układ Słoneczny.

Planety

Orbity planet w Układzie Słonecznym



Mimośród orbity Ziemi $e = 0.017$, orbity Marsa $e = 0.093$.

$$q_{\text{Ziemia}} = 147.5 \text{ mln km}, Q_{\text{Ziemia}} = 152 \text{ mln km.}$$

$$q_{\text{Mars}} = 206 \text{ mln km}, Q_{\text{Mars}} = 249 \text{ mln km.}$$

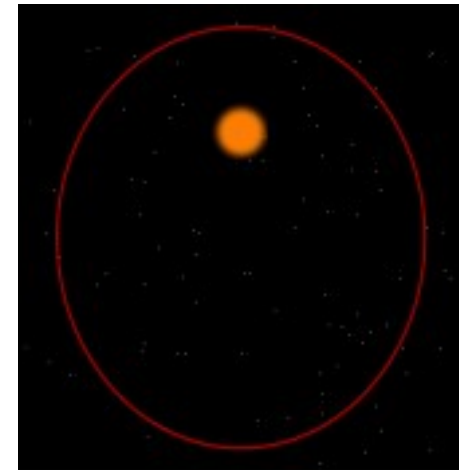
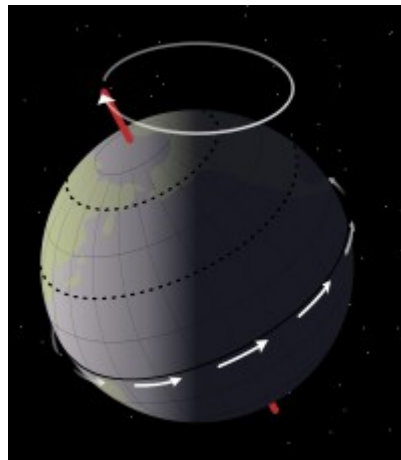
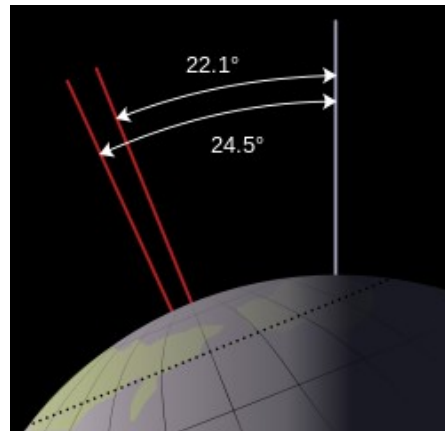
Odległość Ziemia-Mars: 56 - 101 mln km.

Planety

Astronomiczne czynniki zmian klimatu na Ziemi

Cykle Milankowicza

Zmiany natężenia oświetlenia słonecznego na półkuli północnej, spowodowane precesją i zmianami nachylenia osi obrotu Ziemi oraz zmianami mimośrodowości (spłaszczenia) orbity Ziemi.

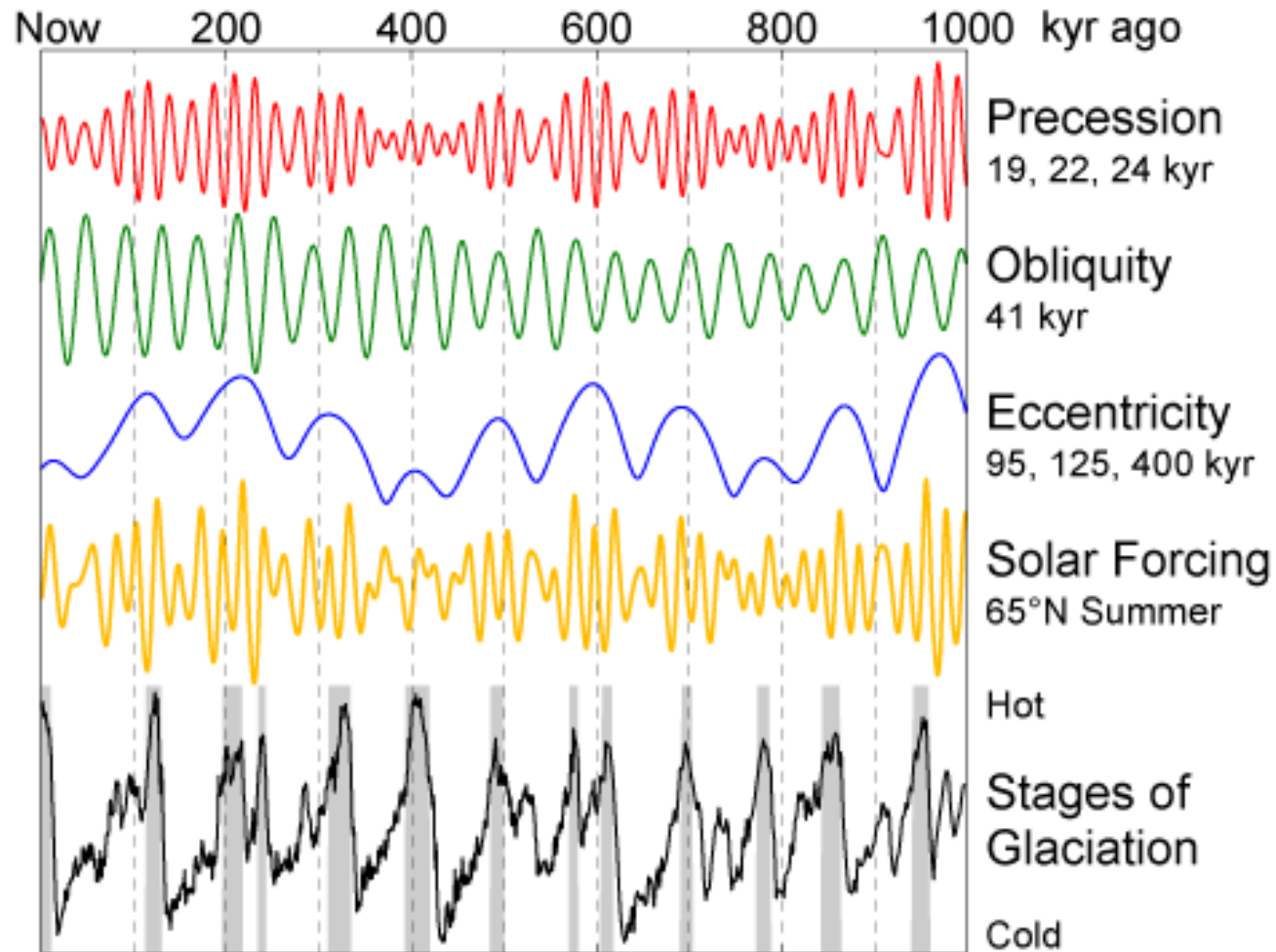


Dominujący cykl
zmian nachylenia osi:
ok. 41 tys. lat.

Dominujący cykl
zmian mimośrodowości orbity Ziemi:
ok. 100 tys. lat.

Planety

Astronomiczne czynniki zmian klimatu na Ziemi



W ciągu ostatniego miliona lat dominował trwający ok. 100 tys. lat cykl zlodowaceń.

Jest on wiązany ze zmianami mimośrodów orbity Ziemi.

We wcześniejszym okresie dominował trwający ok. 40 tys. lat cykl zlodowaceń.

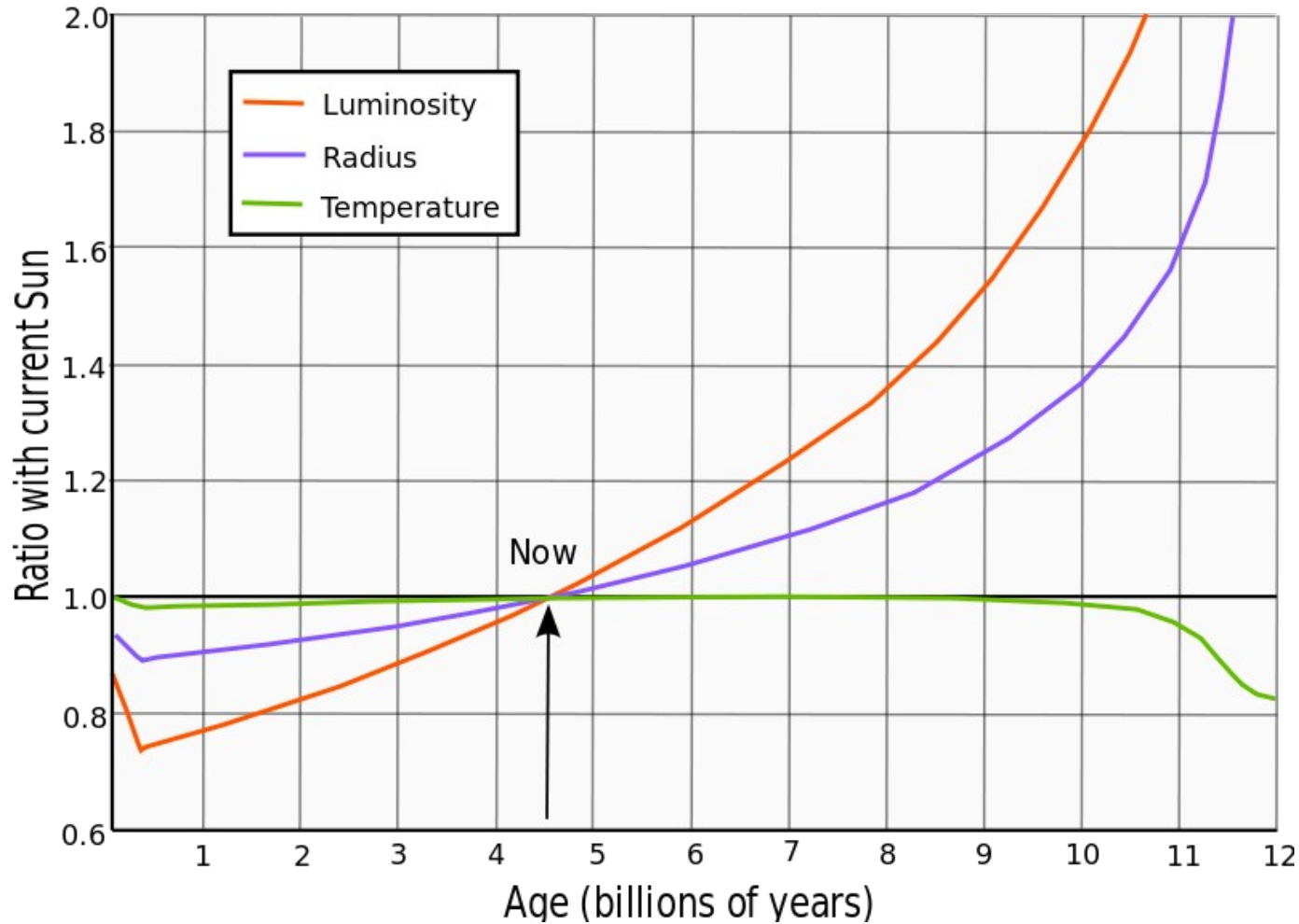
Jest on wiązany z okresem zmian nachylenia osi Ziemi.

Planety

Astronomiczne czynniki zmian klimatu na Ziemi

Ewolucja Słońca

Zmiany mocy promieniowania Słońca w trakcie jego „życia”.

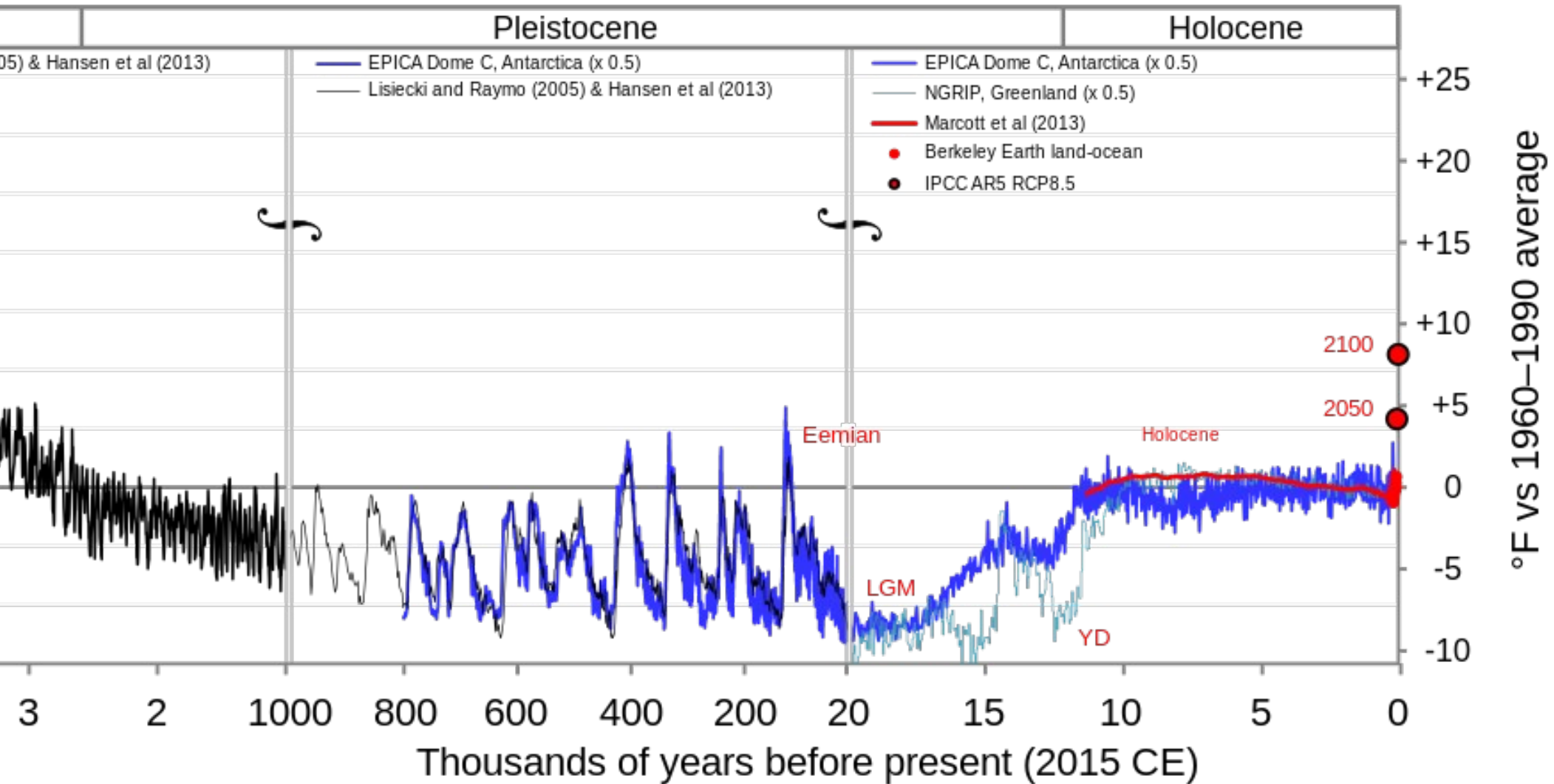


Paradoks młodego, słabego Słońca:
Jak od wielu mld lat mogły istnieć oceany na Ziemi?

Planety

Zmiany temperatury na powierzchni Ziemi

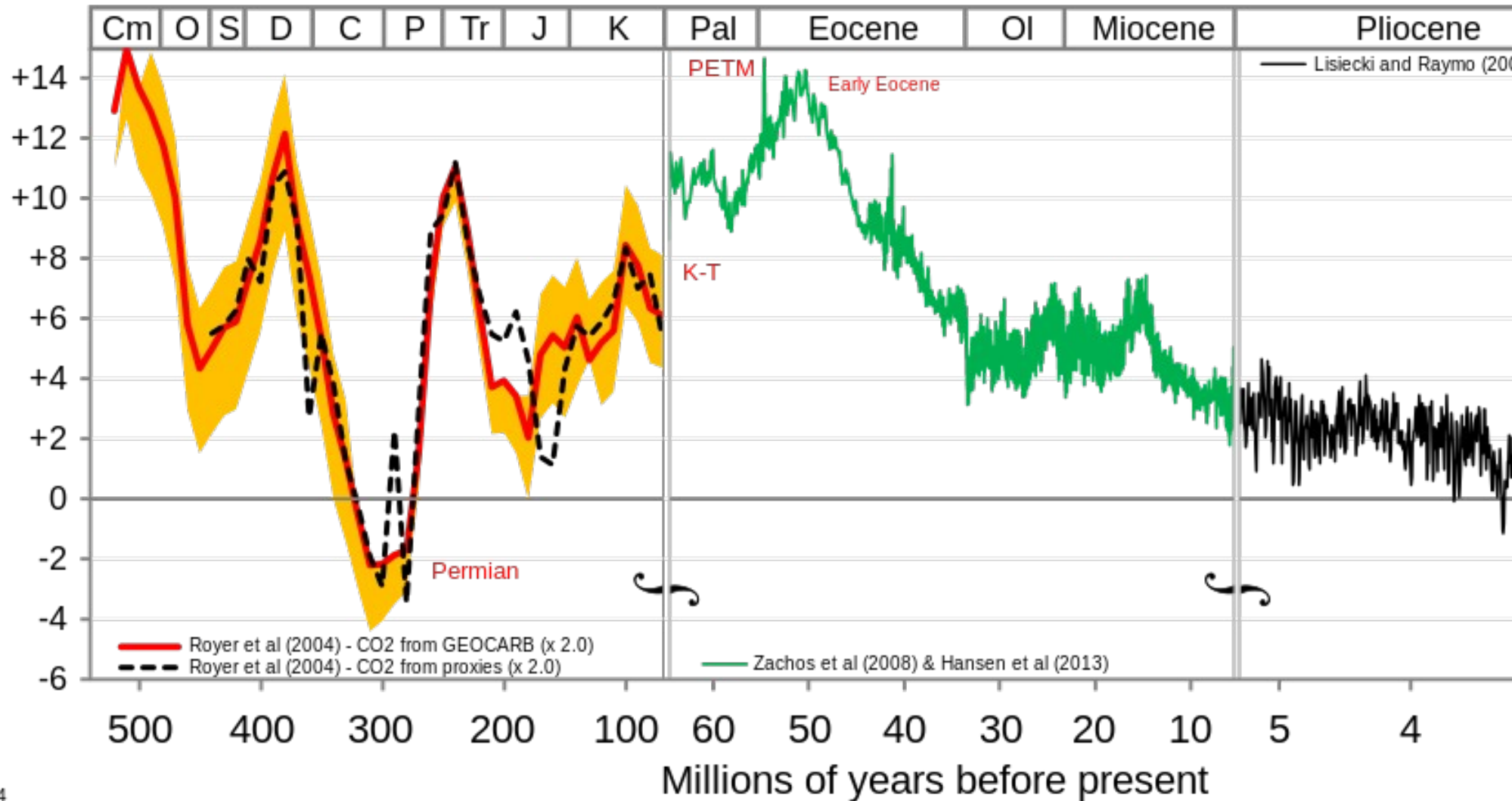
f Planet Earth



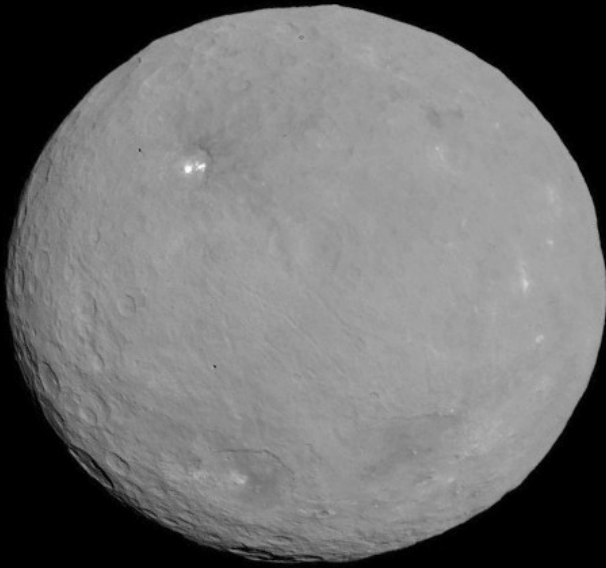
Planety

Zmiany temperatury na powierzchni Ziemi

Temperature of

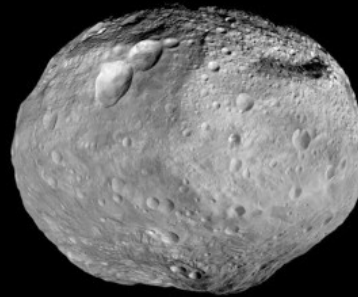


Planetoidy i planety karłowate
Jak zbudowane są planetoidy?



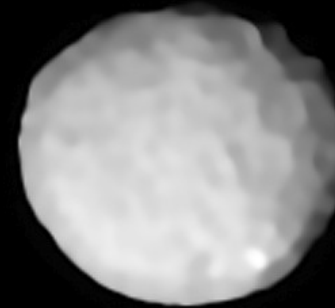
Ceres

939 km



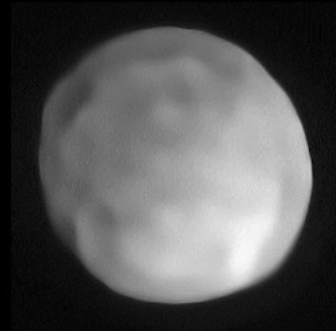
Vesta

525 km



Pallas

512 km



Hygiea

434 km

Planetoidy to nieregularne bryły skalne o rozmiarach od 1 metra do kilkuset km.

Planetoidy w wewnętrznym Układzie Słonecznym

Planetoidy zbliżające się do Ziemi (NEA)

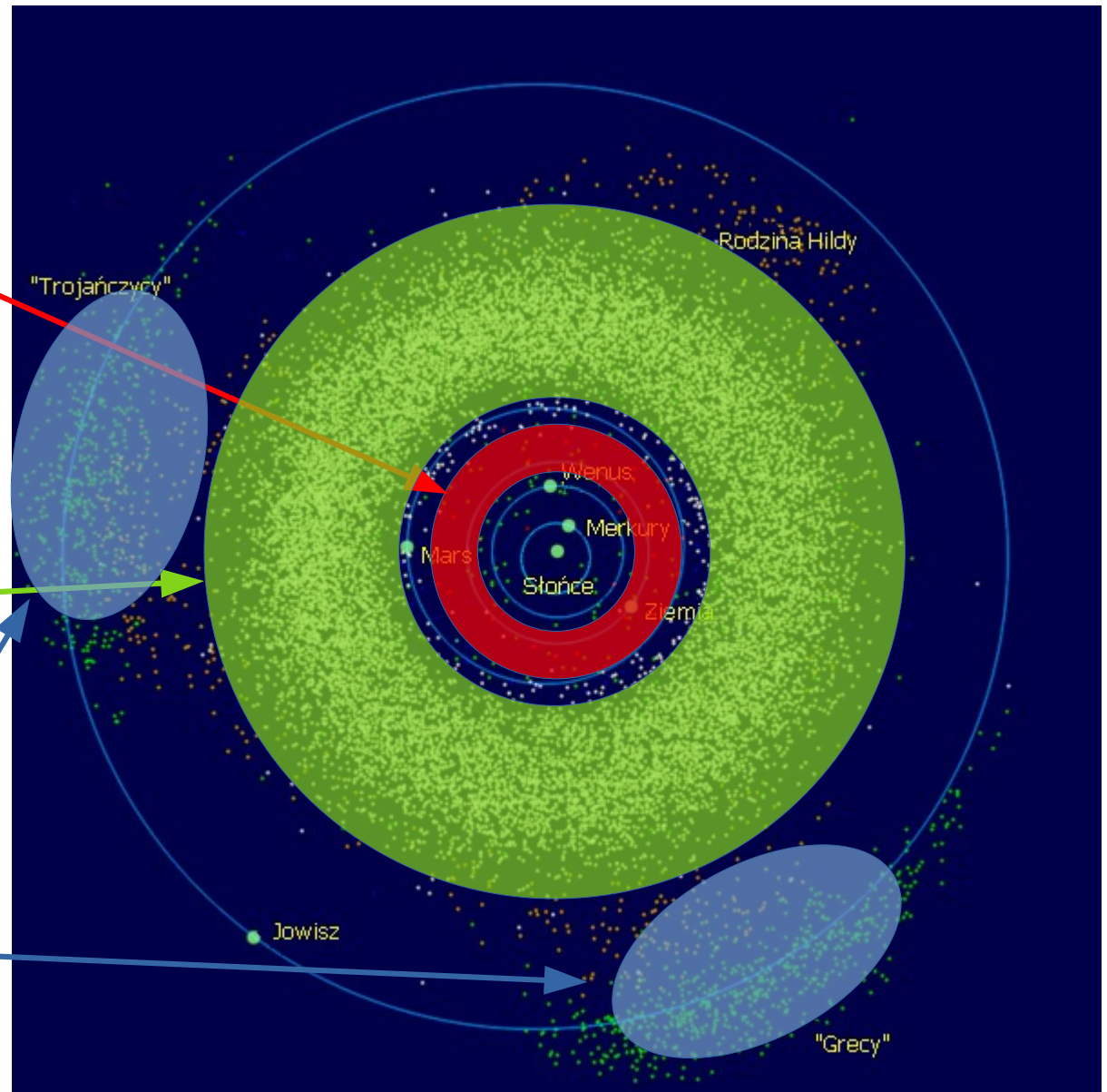
W pobliżu orbity Ziemi.

Główny pas planetoid

Między Marsem a Jowiszem.

Trojańczycy i Grecy

Stale na orbicie Jowisza.



Planetoidy w zewnętrznym Układzie Słonecznym

Centaury

Między Jowiszem
a Neptunem.

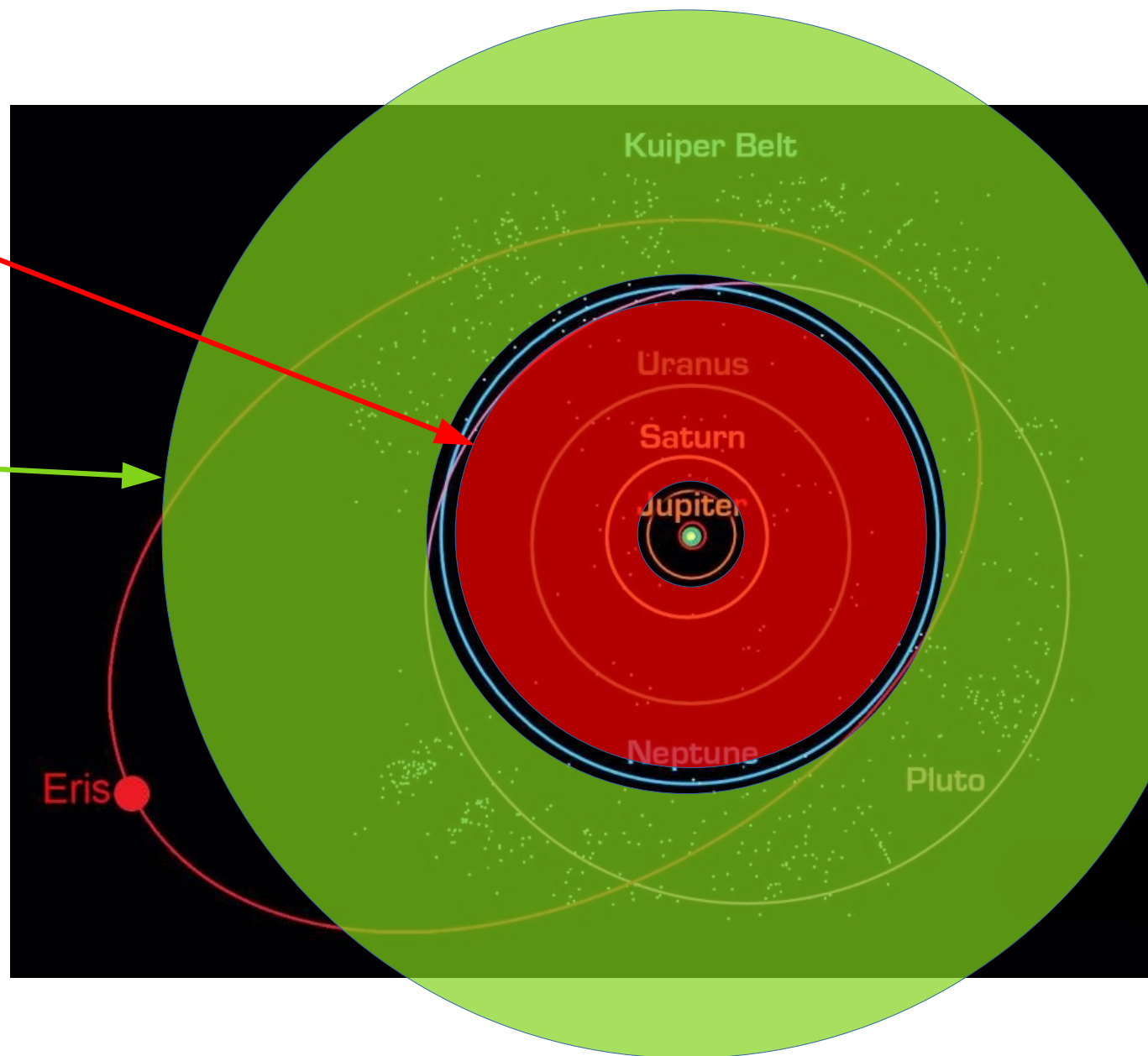
Obiekty pozaneptunowe (TNO)

W tym:

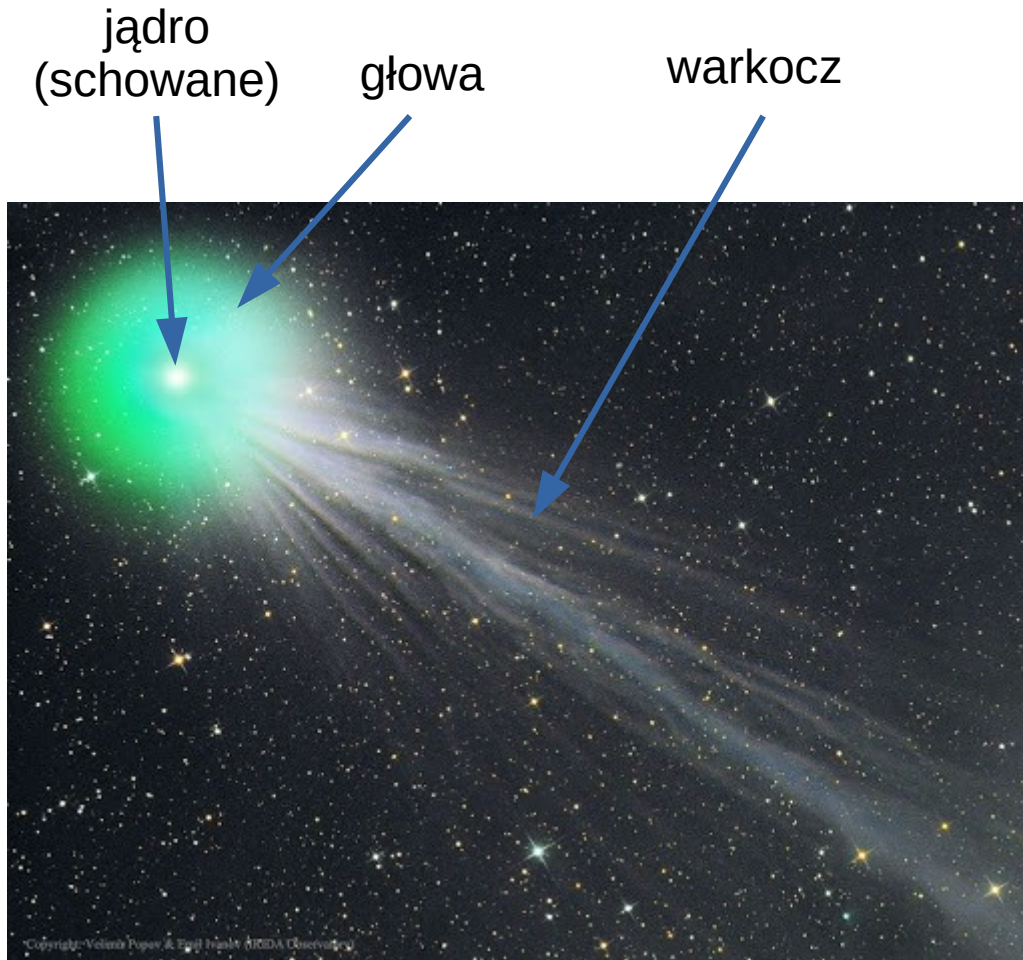
- pas Kuipera
- dysk rozproszony
- obiekty odłączone

Obłok Oorta (hipotetyczny)

Co najmniej od 1000 AU
(daleko poza rysunkiem)



Komety - budowa



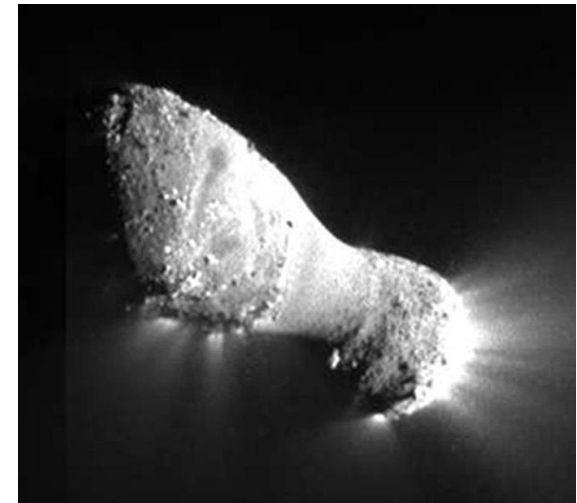
Kometa C/2014 Q2 Lovejoy

Jądro jest zbudowane z różnych skał i lodów.

Głowa i warkocz to gazowo-pyłowe obłoki, powstające z tego co odparuje lub odpadnie z jądra komety.

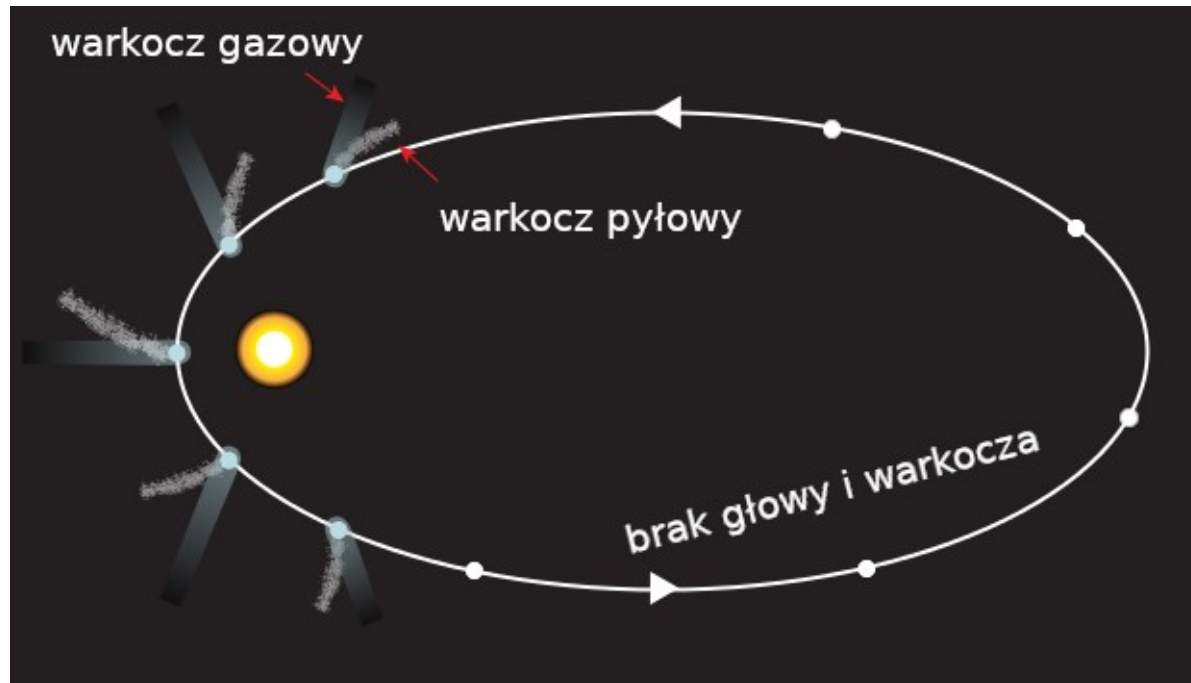


Pierwsze zdjęcie jądra komety Halleya 1986

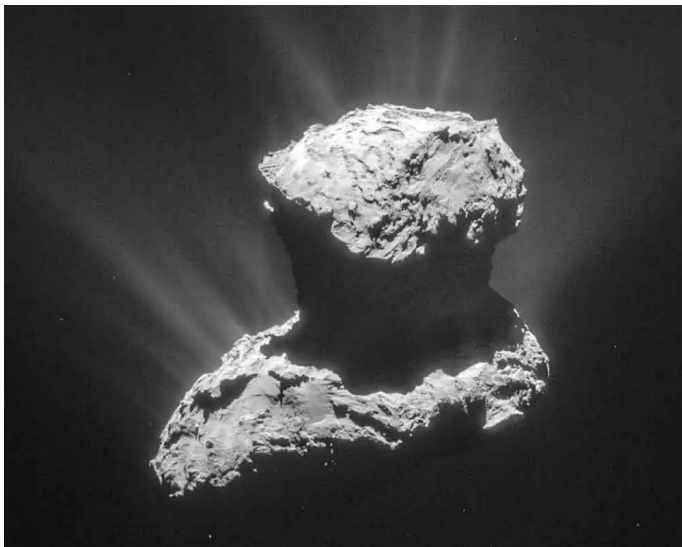


Kometa 103P/Hartley (2010)

Komety

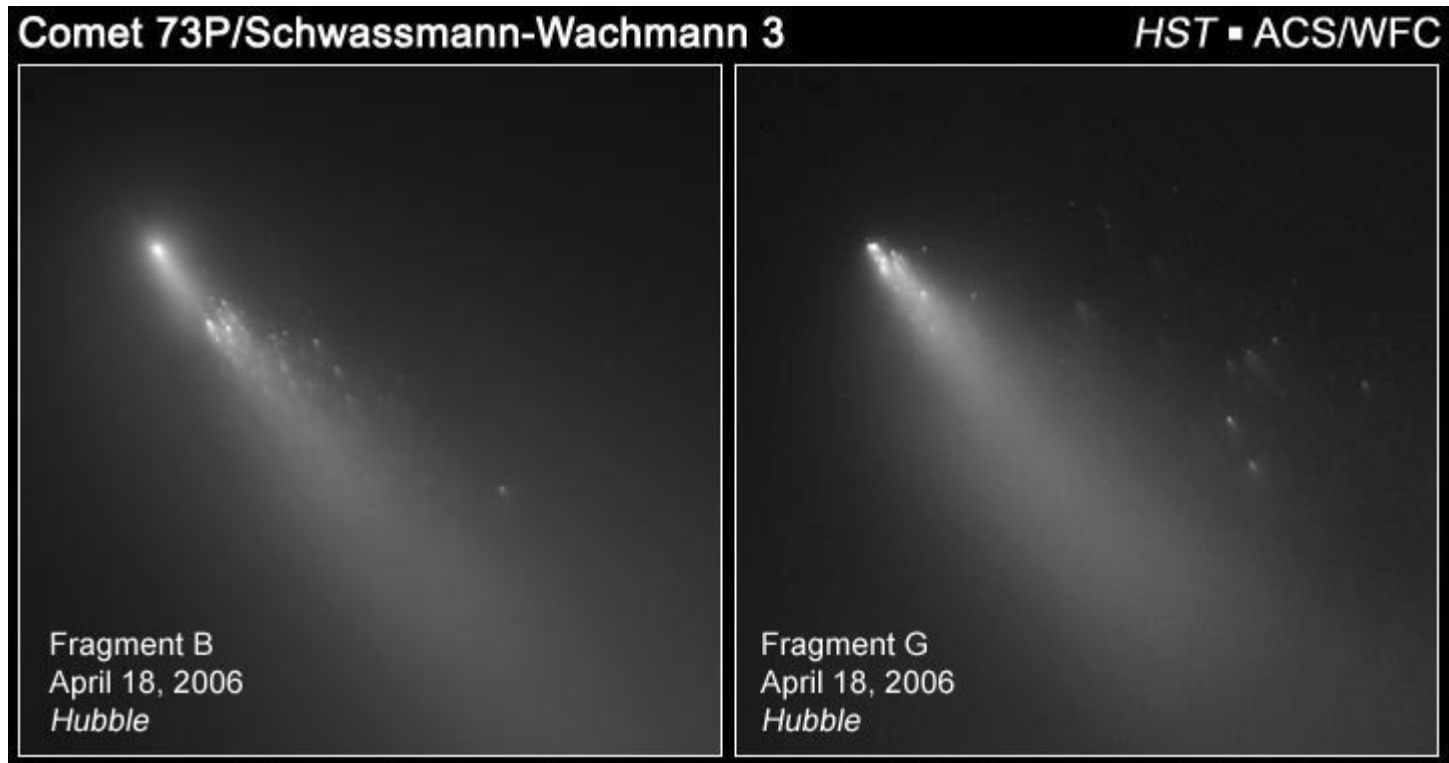


Głowa i warkocz komety pojawiają się jedynie gdy jądro komety zbliży się do Słońca.



Kometa 67P/Czuriumow-Gierasimienko (misja Rosetta, 2015)

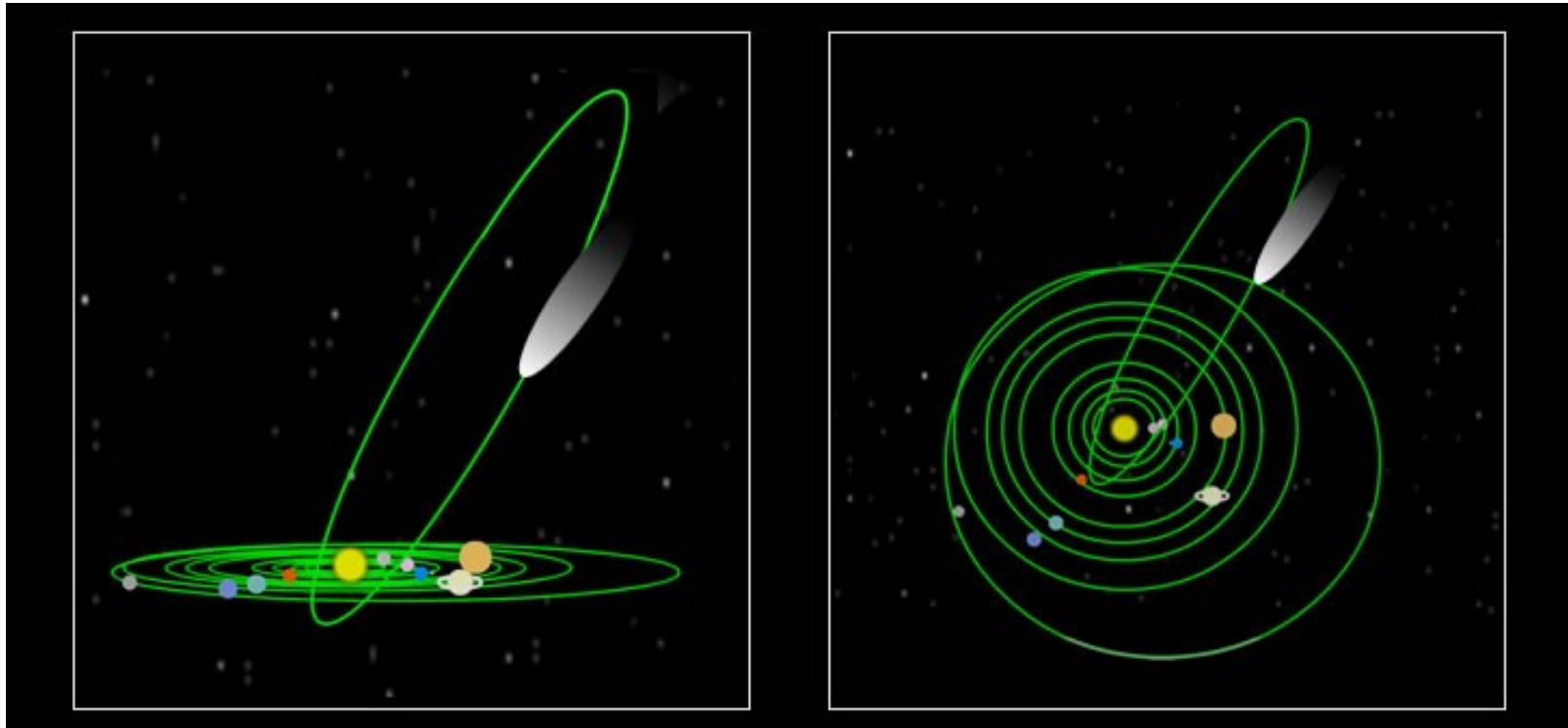
Czas życia komety



Kometa Shoemaker-Levy 9 (1994)

Komety - orbity

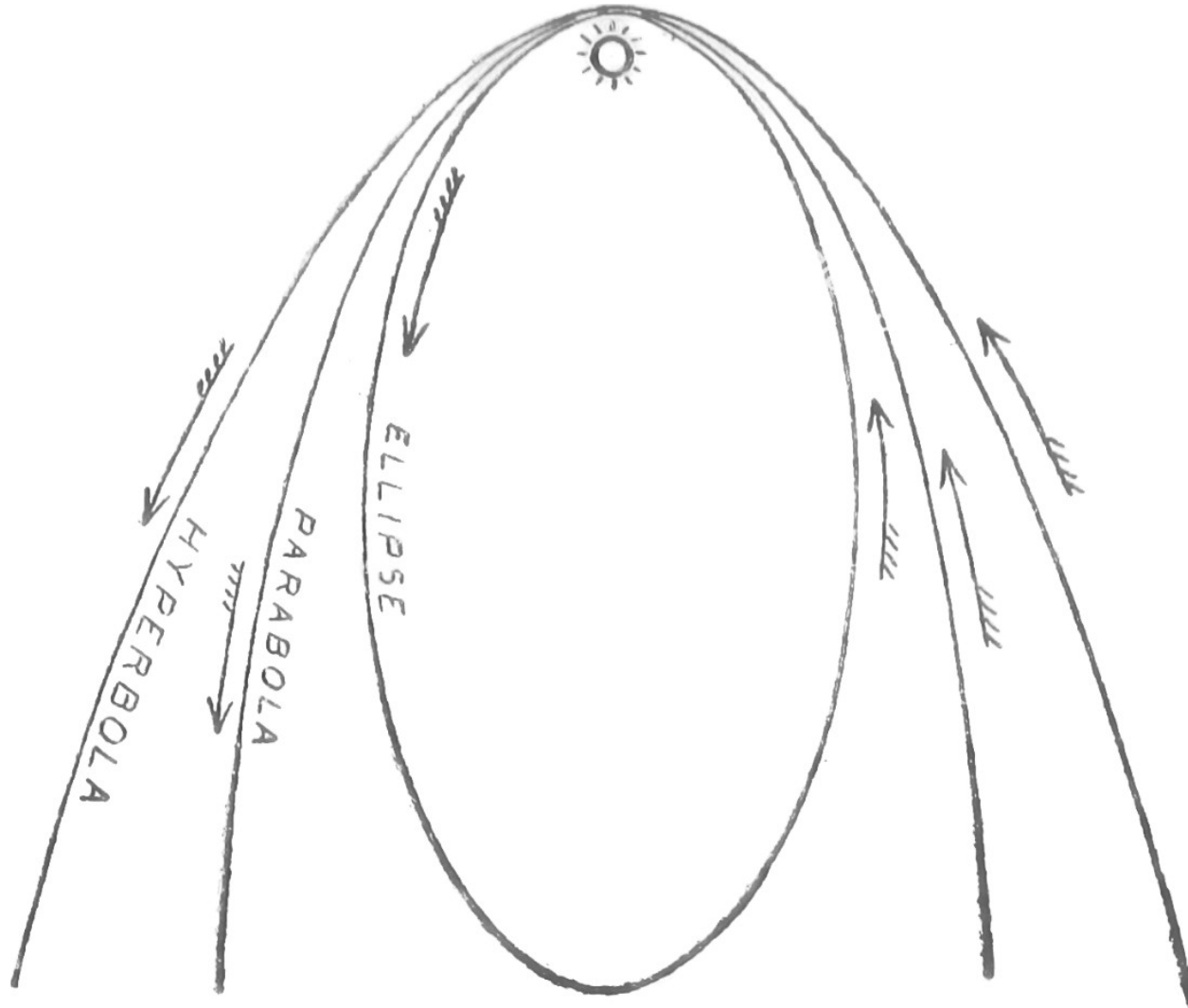
Mniejsza część komet znajduje się na wydłużonych orbitach eliptycznych, o okresach obiegu poniżej 200 lat.



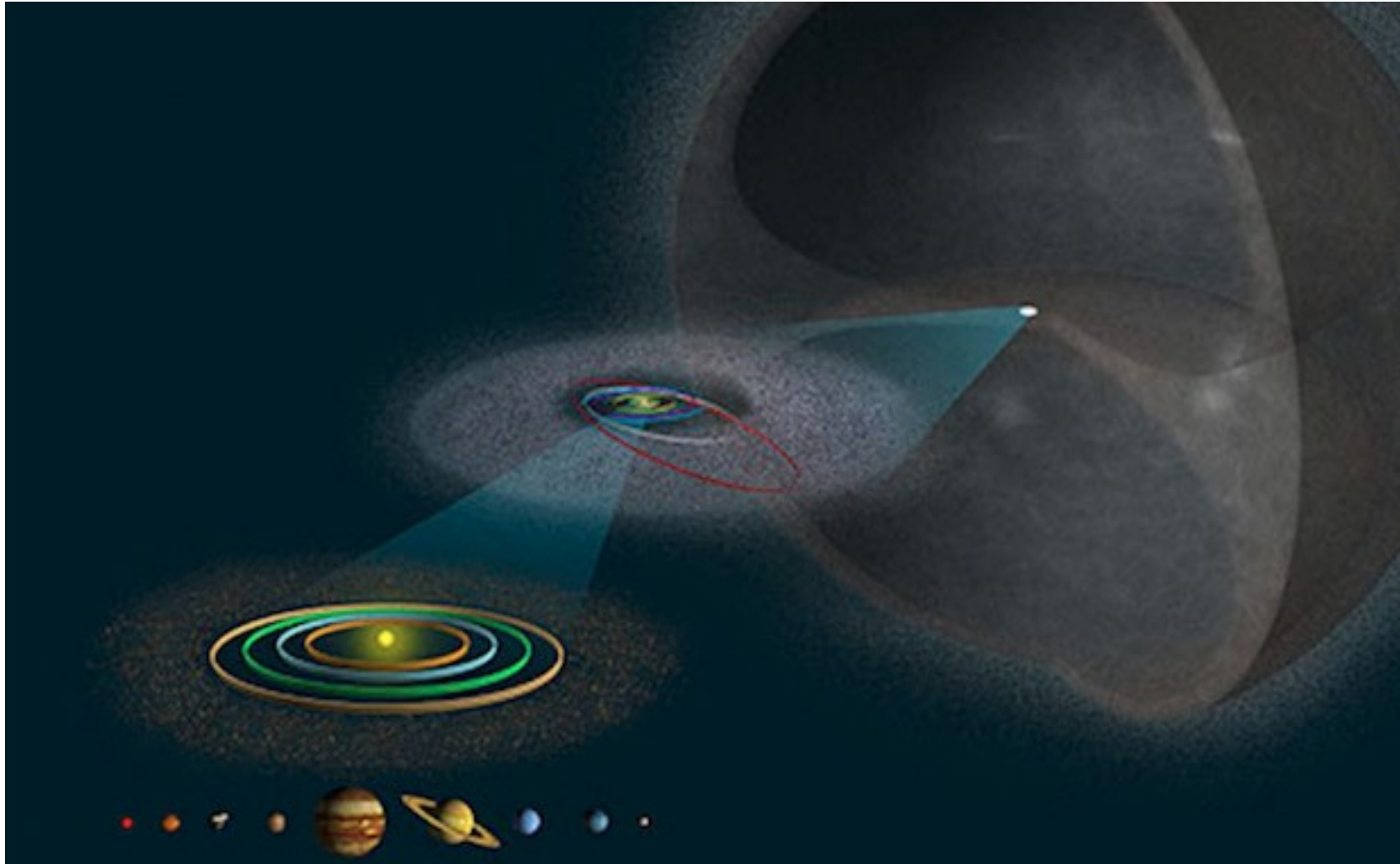
Płaszczyzny orbit kometarnych, w przeciwieństwie do większości innych obiektów w Układzie Słonecznym, są nachylone pod najróżniejszymi kątami do płaszczyzny orbity Ziemi.

Komety - orbity

Większość komet znajduje się na orbitach bardzo przypominających parabolę, ale nie ma pewności czy są to parabole czy ekstremalnie wydłużone elipsy.

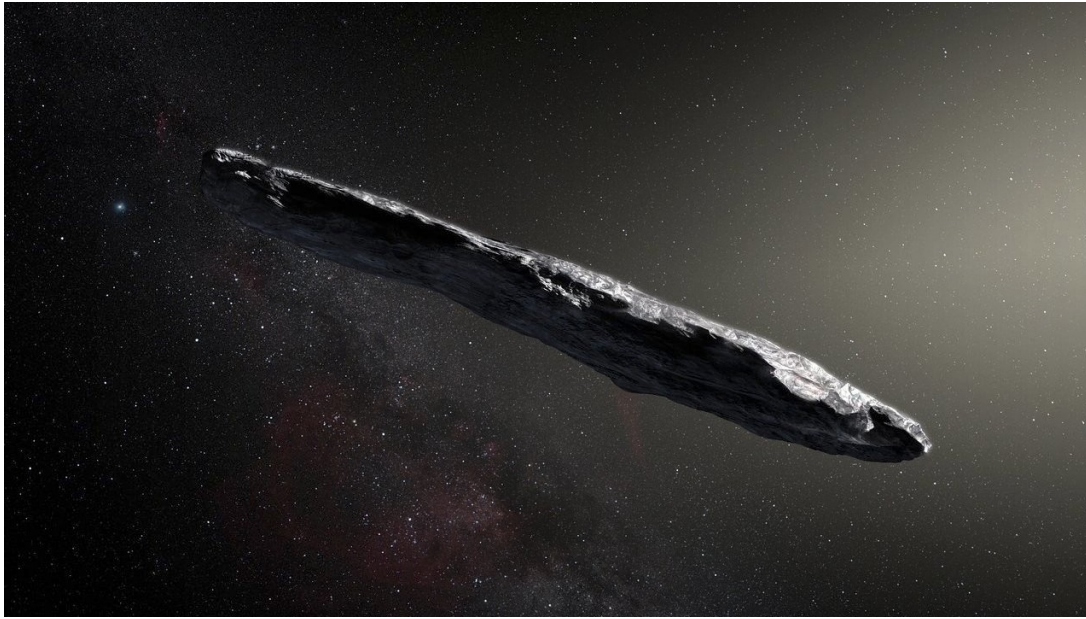


Komety - pochodzenie



W odległościach od ok. 1 do ok. 50 tys. AU istnieje hipotetyczny „obłok” Oorta. Jest to ogromne (w porównaniu do Układu Słonecznego) skupisko bilionów obiektów typu jądro kometarne o rozmiarach rzędu kilku km.

Planetoidy / komety spoza Układu Słonecznego

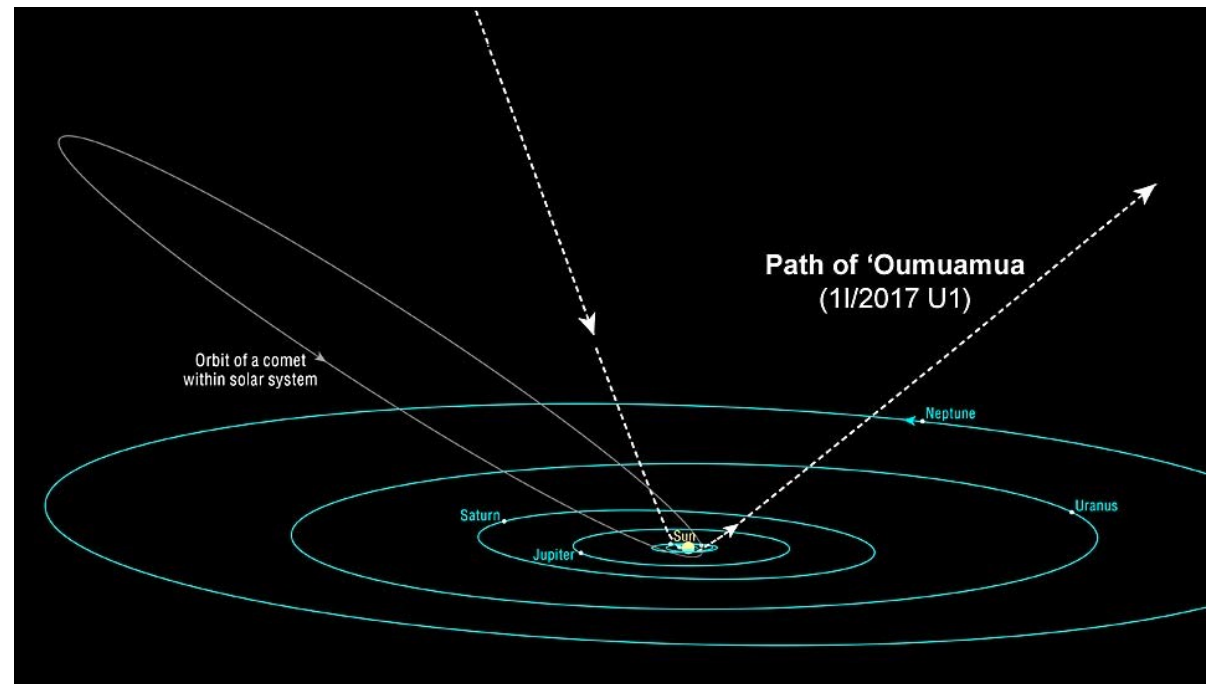


1I/2017 Oumuamua
popularna wizja artystyczna



Najlepsze realne zdjęcie

Pierwsza i jak dotychczas jedyna
planetoida pozasłoneczna.

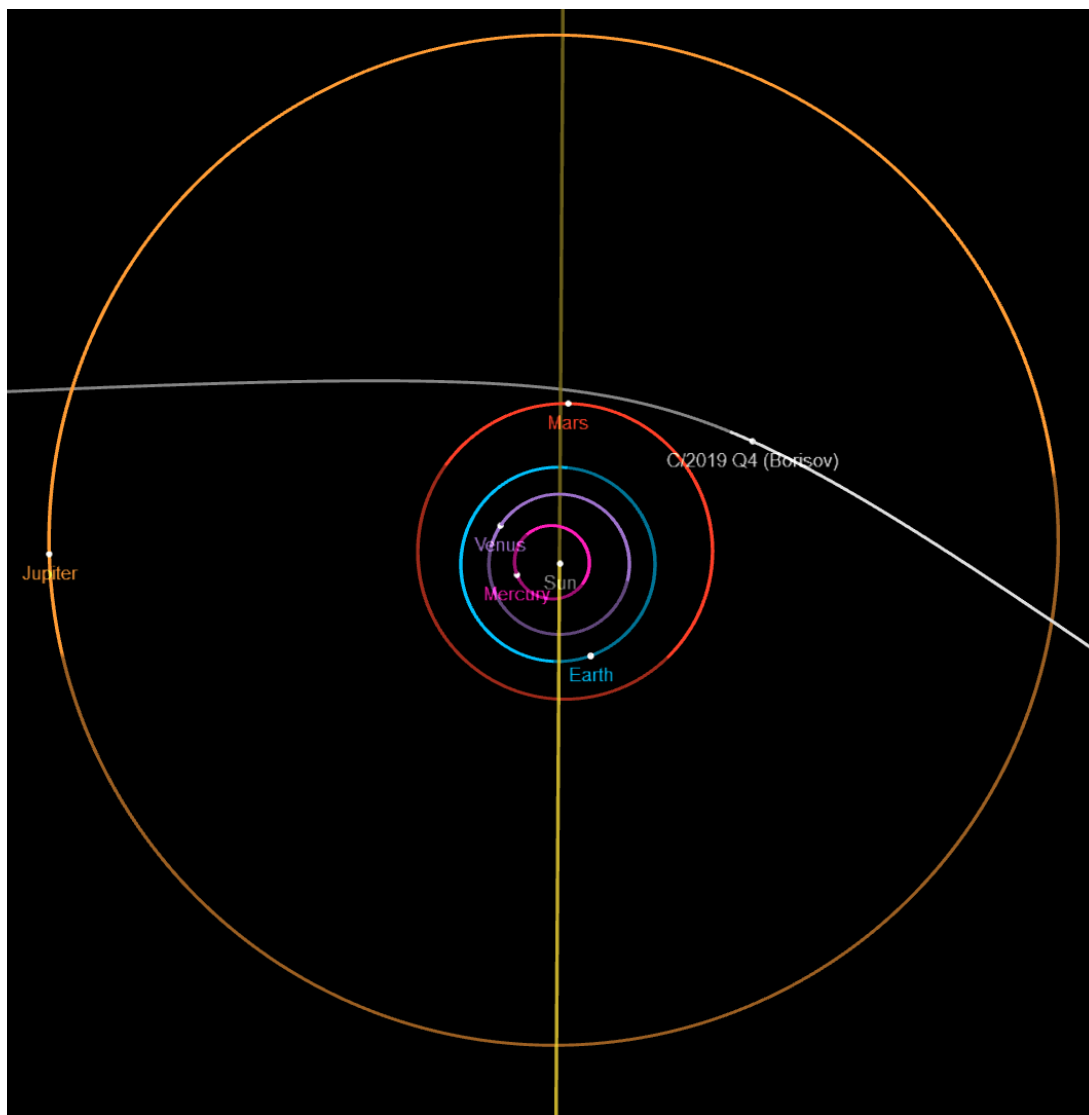


Planetoidy / komety spoza Układu Słonecznego



2I/Borisov (2019)

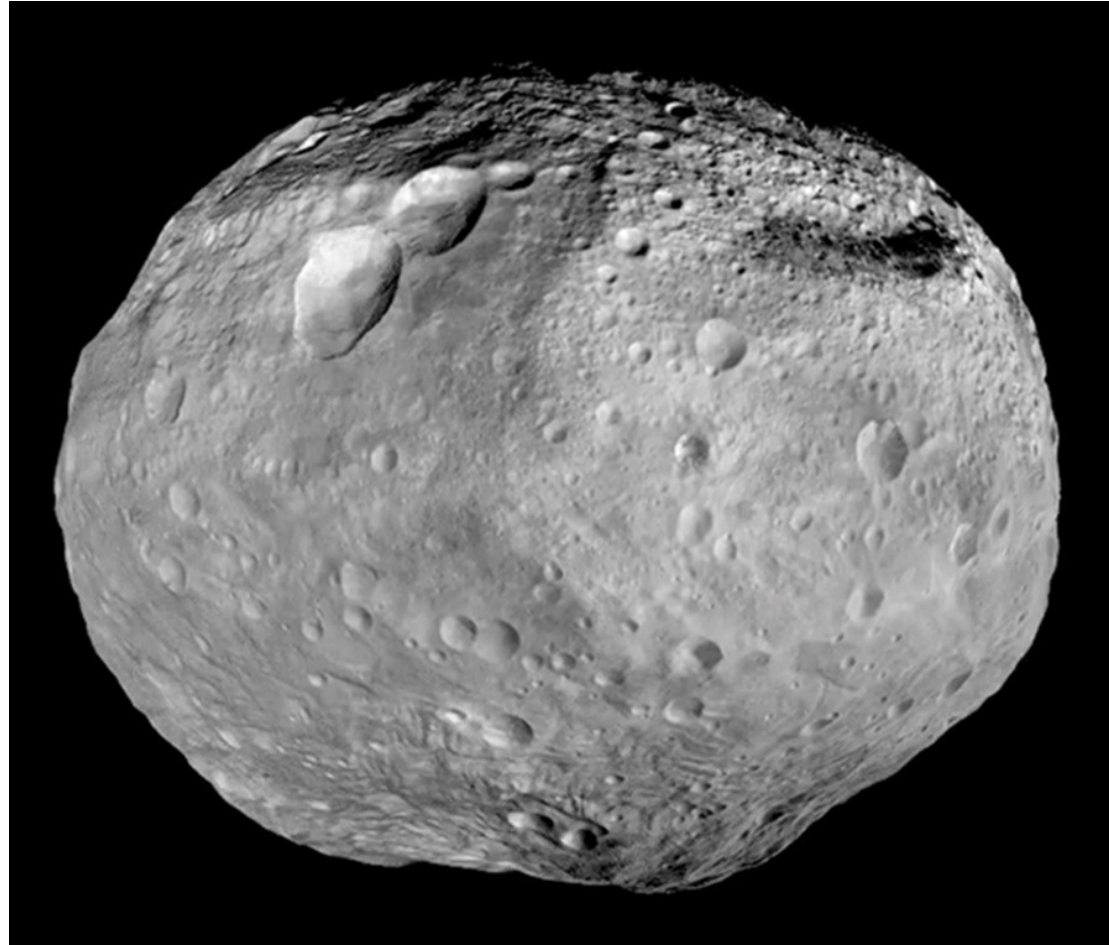
Pierwsza i jak dotychczas jedyna
kometa pozasłoneczna.



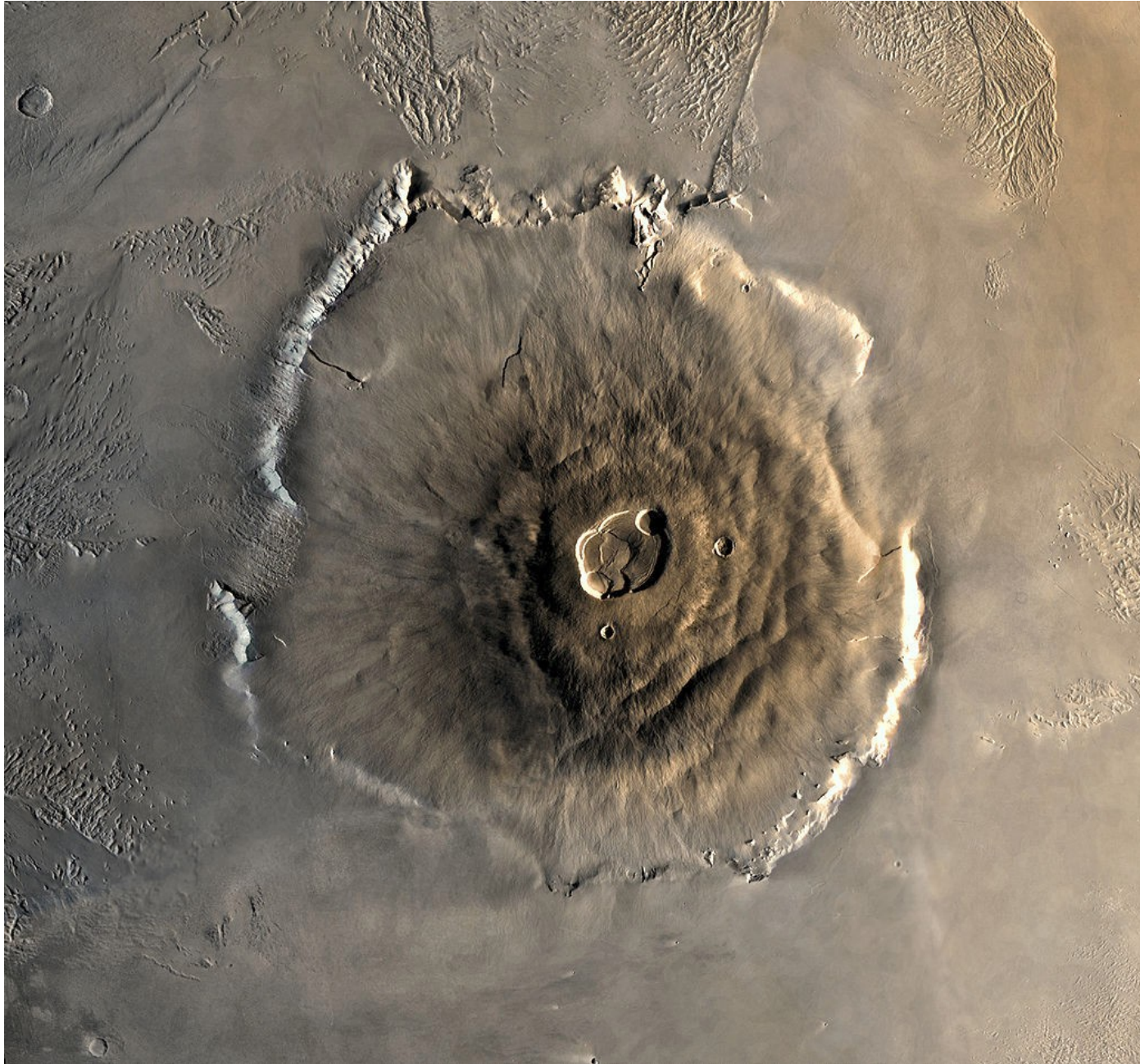
Rekordziści w Układzie Słonecznym

Największy księżyc planety	Ganimedes (Jowisz)
Największa planetoida	Westa (525km, pas główny planetoid)
Najgorętsza planeta	Wenus (średnio 462 °C)
Najchłodniejsza planeta	Uran (ok. -224 °C w tropopauzie)
Największa góra	Olimp (Mars)
Najsilniejszy wulkanizm	Io (księżyc Jowisza)
Planeta z największą liczbą księżyców	Saturn (aktualnie 82)
Największe pierścienie	Saturn
Największy krater	Utopia Planitia, średnica 3000km (Mars)
Najwięcej wody	Europa (księżyc Jowisza)
Największy cyklon	Wielka czerwona plama (Jowisz)
Największe burze piaskowe	Ogólnoplanetarne (Mars)

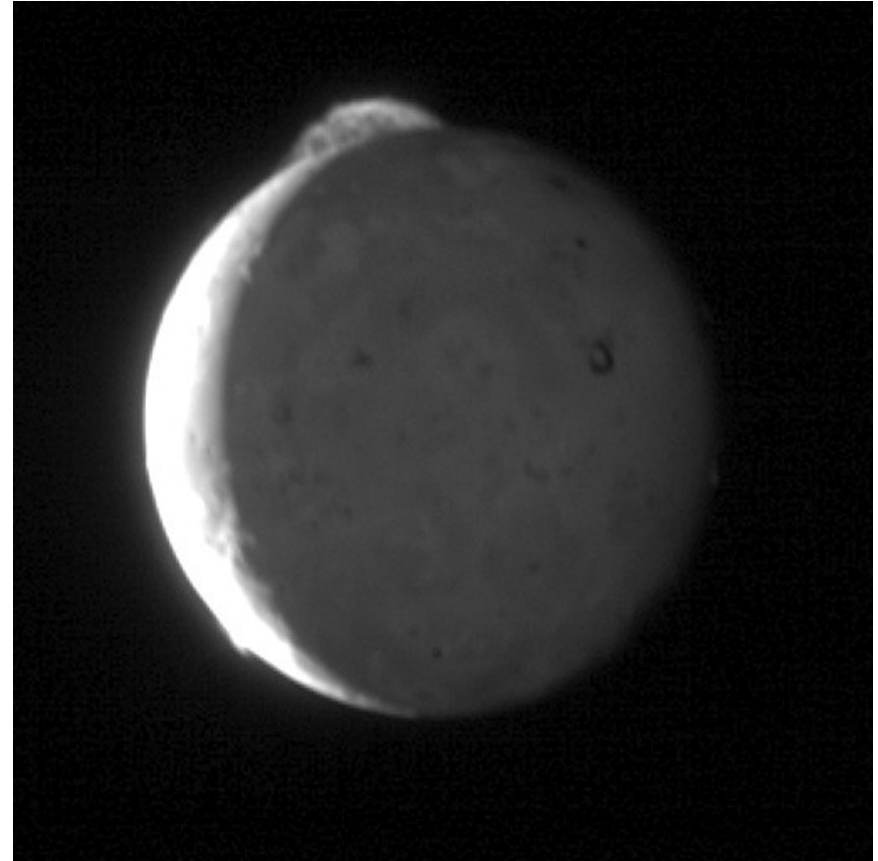
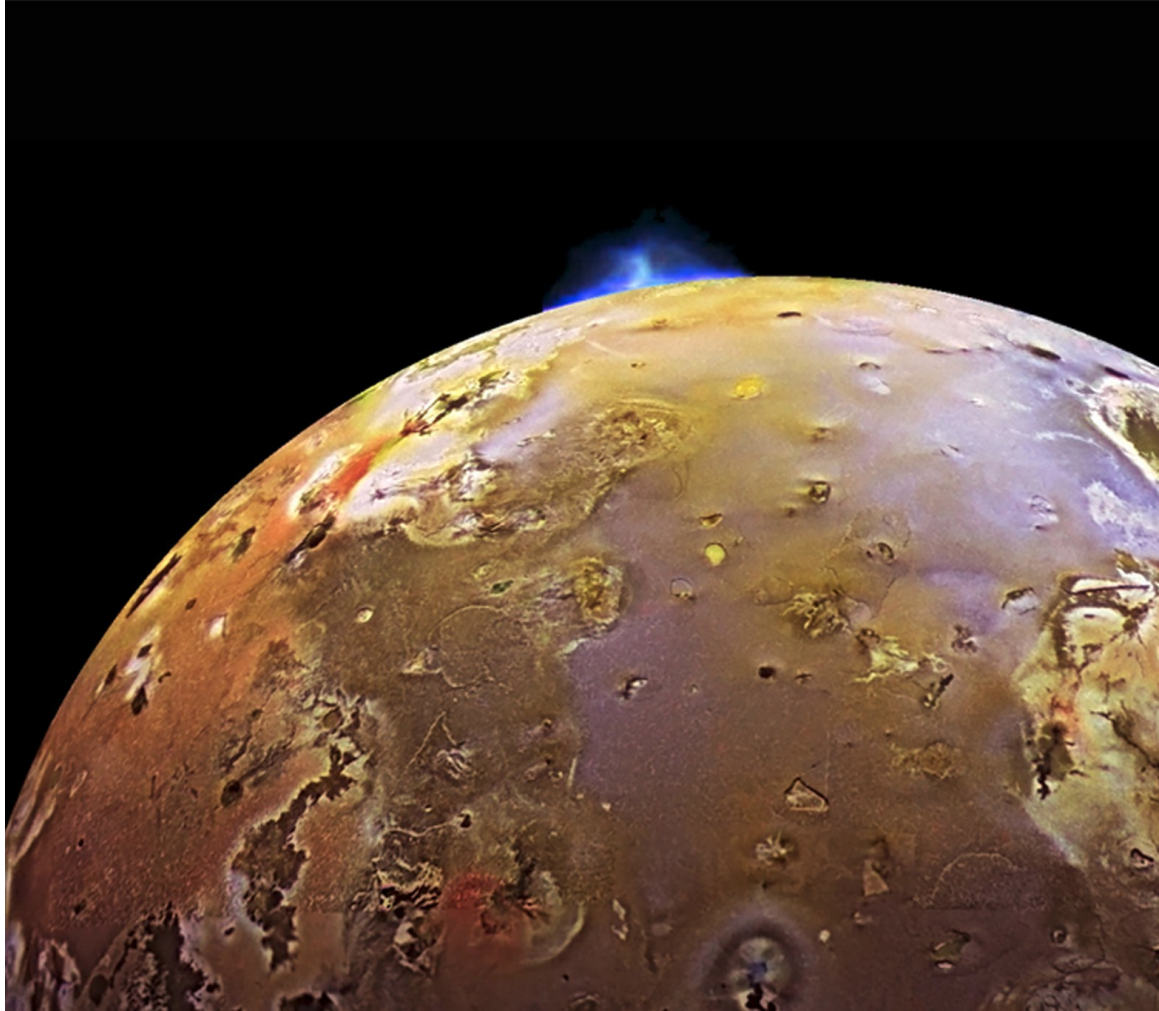
Rekordziści w Układzie Słonecznym



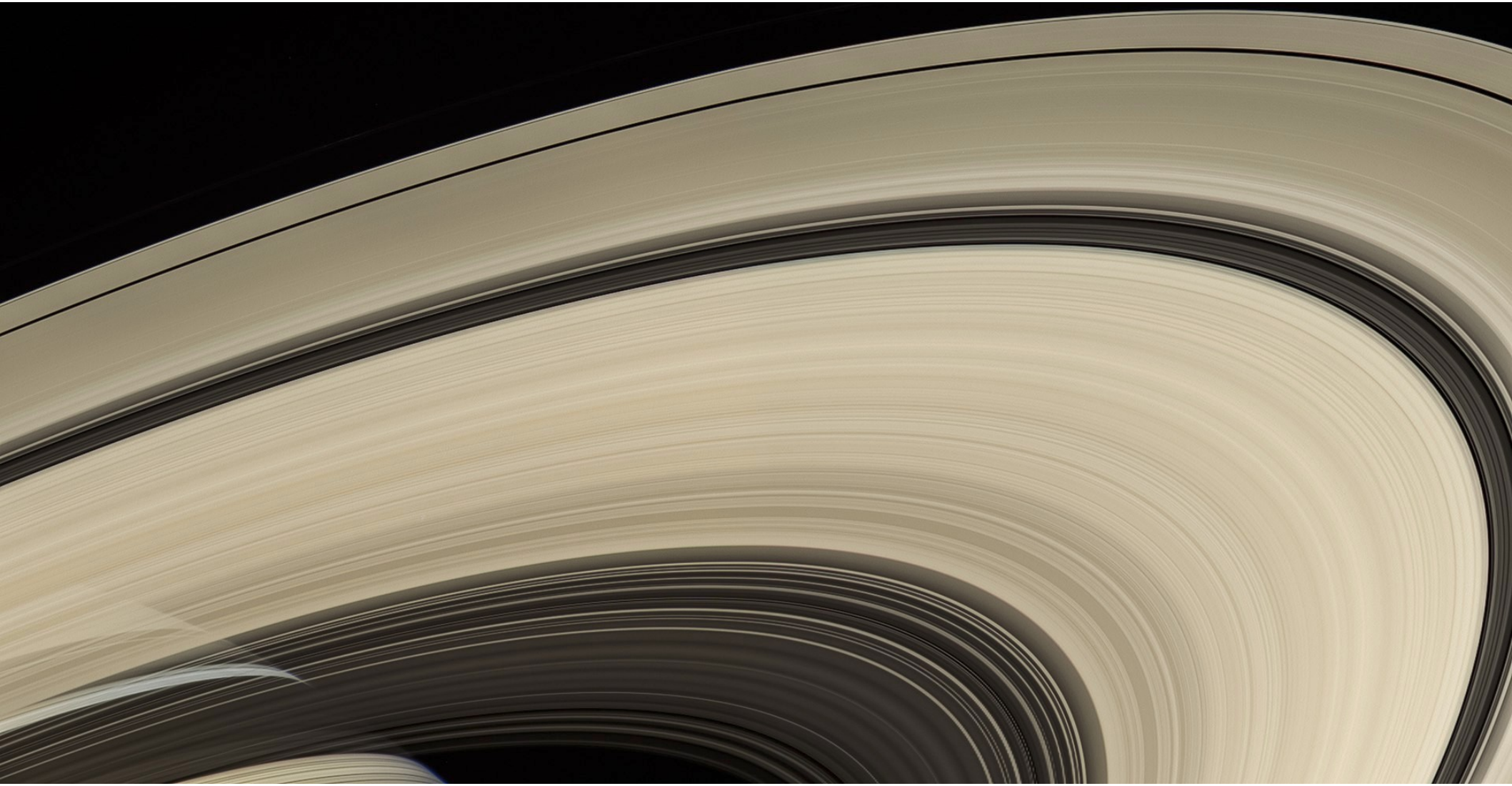
Rekordziści w Układzie Słonecznym



Rekordziści w Układzie Słonecznym



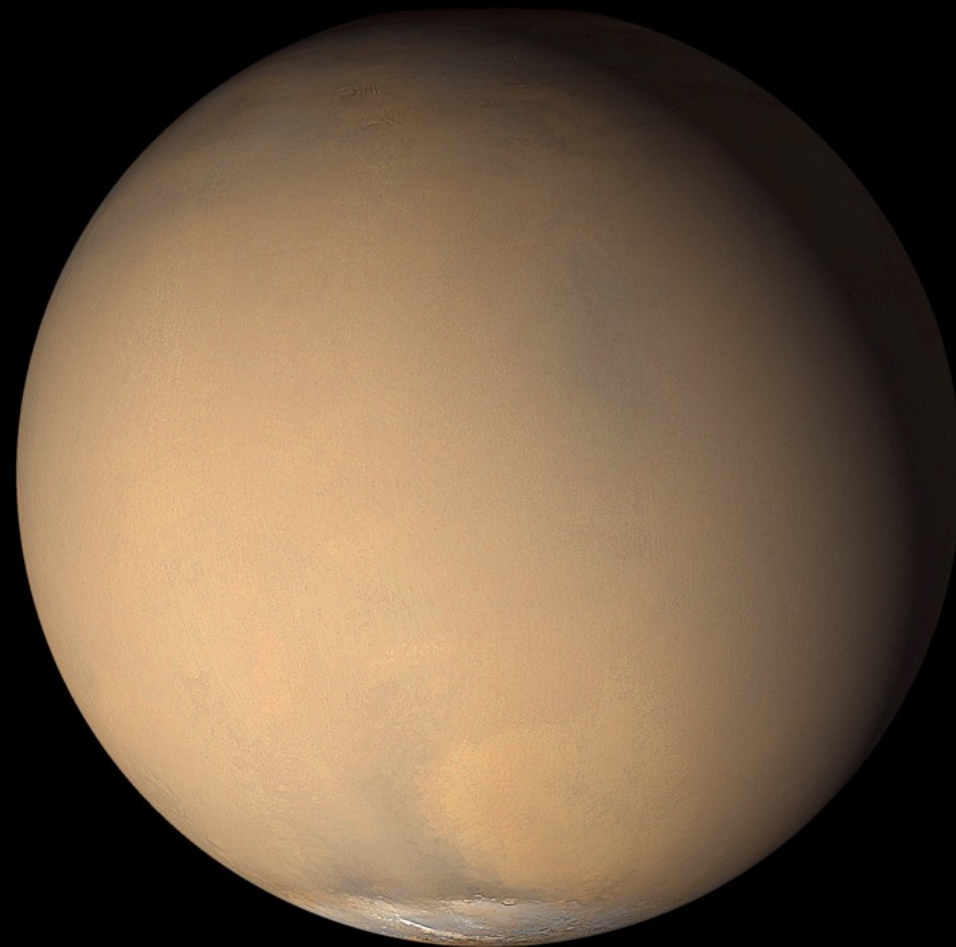
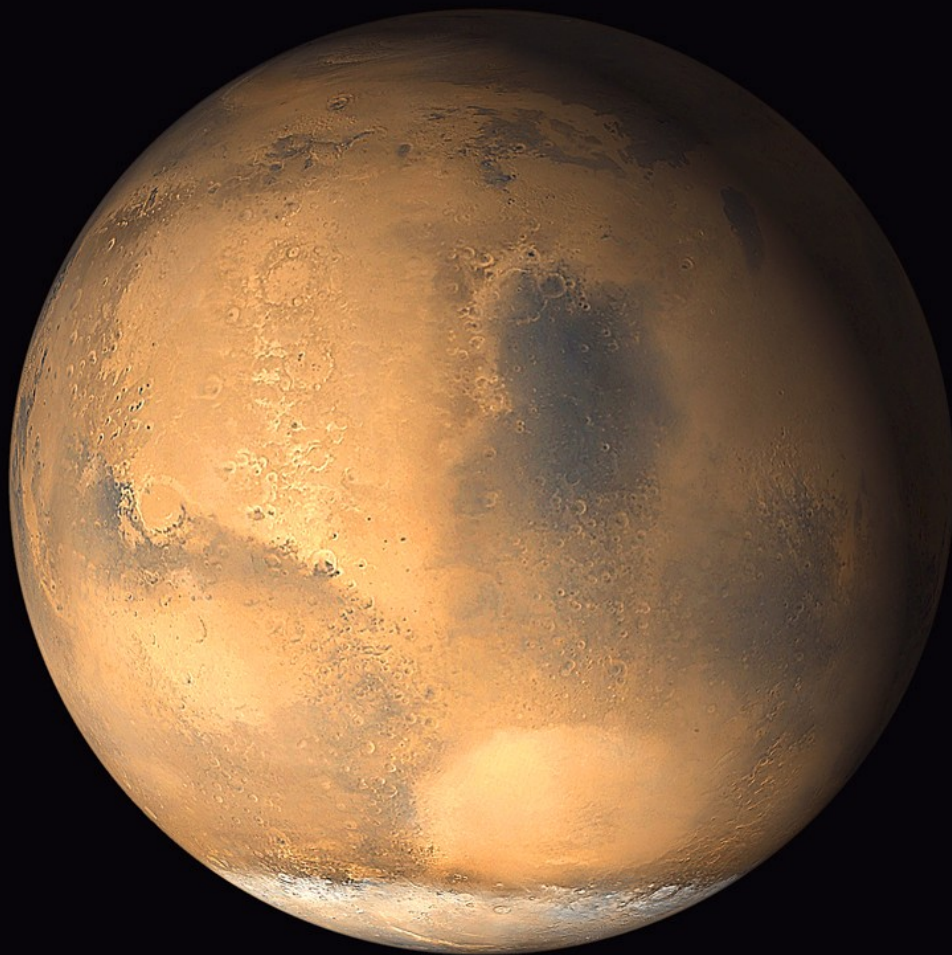
Rekordziści w Układzie Słonecznym



Rekordziści w Układzie Słonecznym



Rekordziści w Układzie Słonecznym



Burza piaskowa 2018

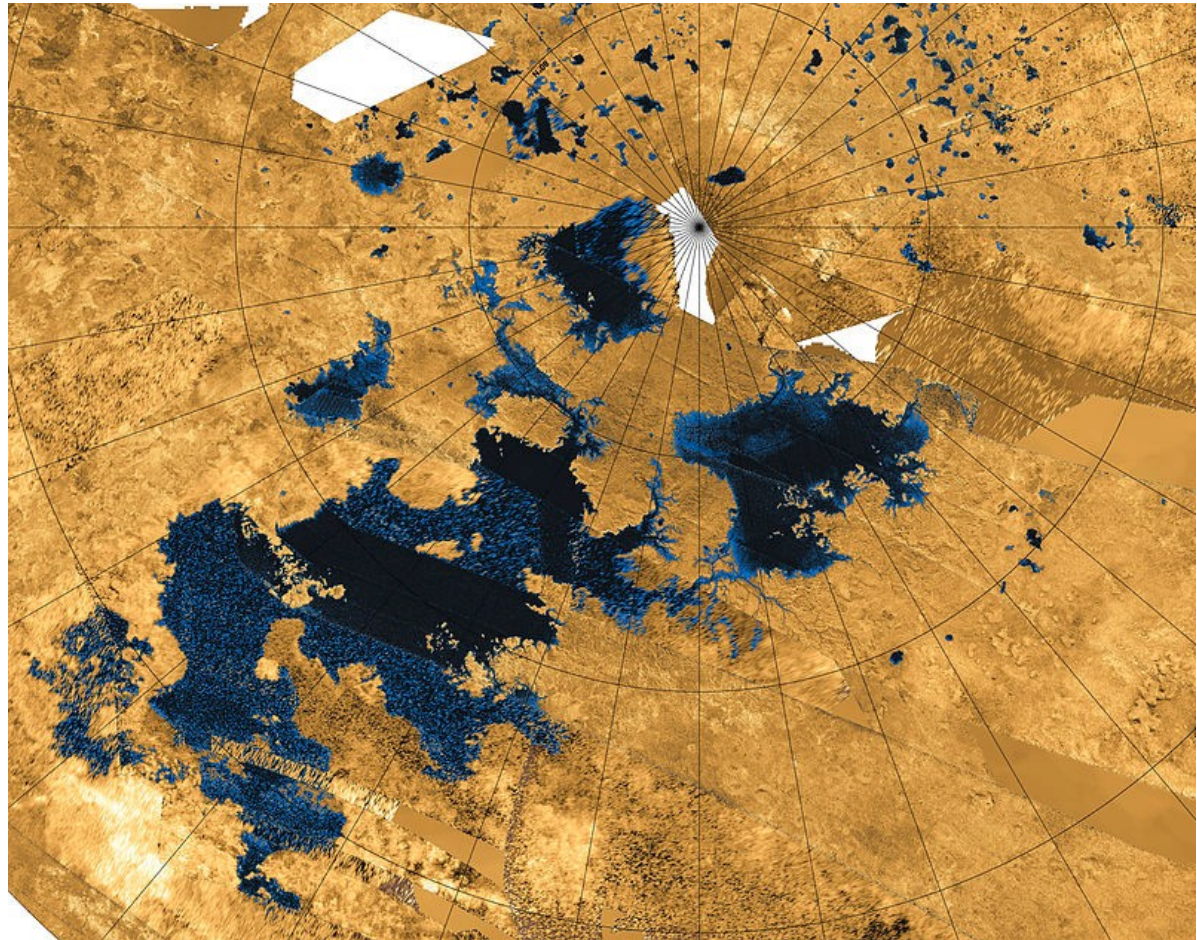
Życie pozaziemskie

W Układzie Słonecznym

Istnieje tylko jedno ciało z wodą na powierzchni:
Ziemia

Istnieje tylko jedno ciało (poza Ziemią) z ciecżą na powierzchni:
Tytan

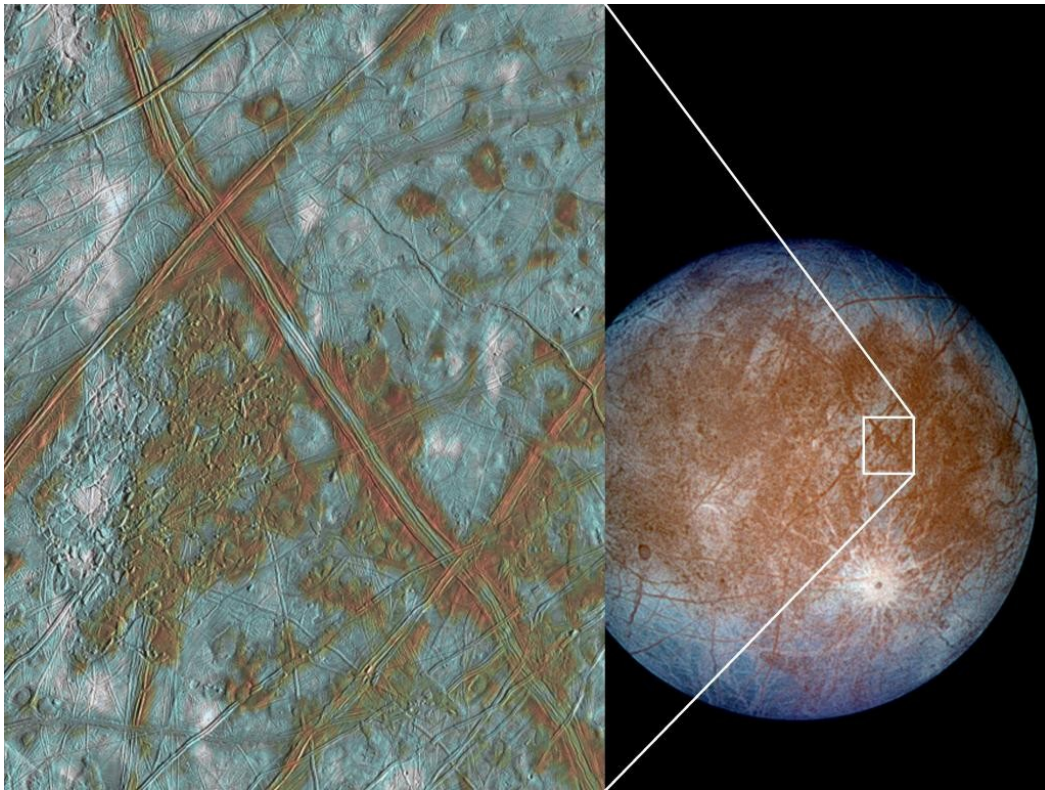
Mozaika obrazów
radarowych
(sztuczne kolory)
z sondy Cassini
z roku 2013.



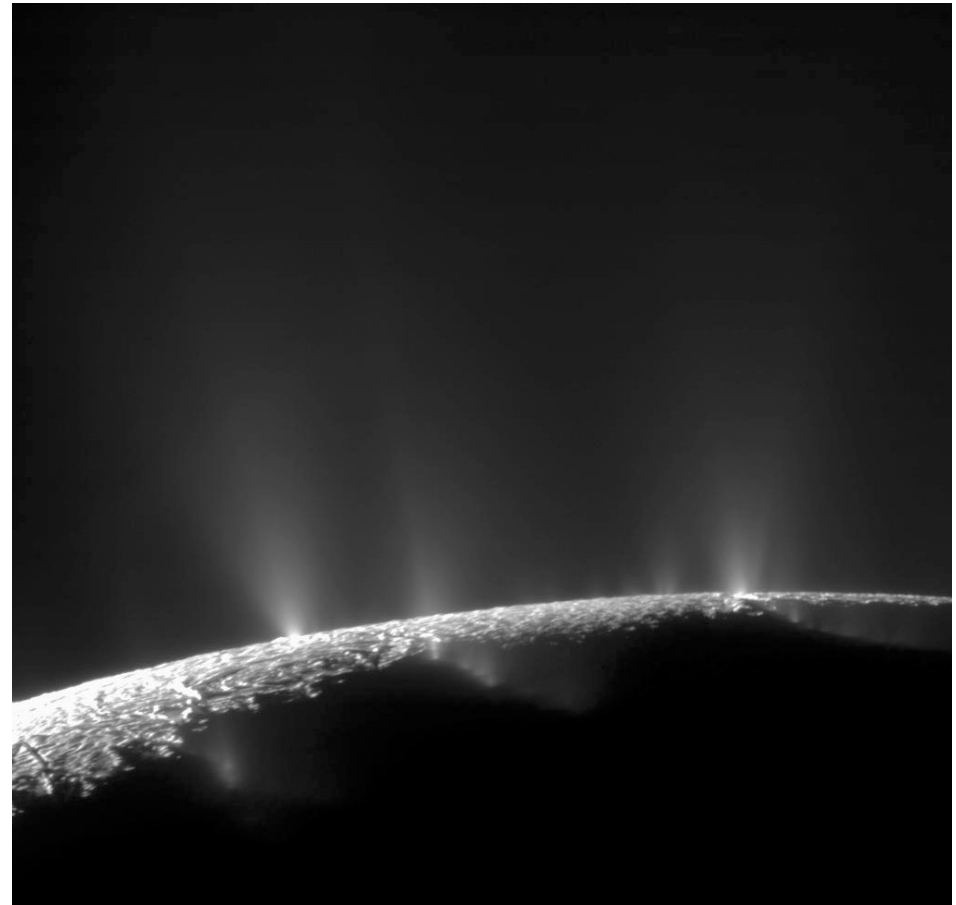
Życie pozaziemskie

W Układzie Słonecznym

Istnieje kilka ciał (poza Ziemią) które prawdopodobnie mają płynną wodę pod powierzchnią: Ziemia, Europa i inne księżyce Jowisza, Enceladus



Europa (Galileo, 1997)

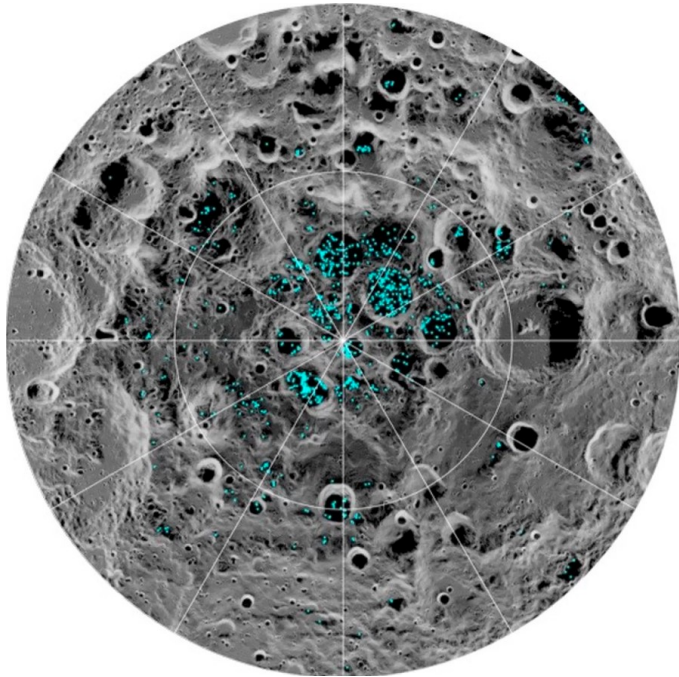


Enceladus (Cassini, 2010)

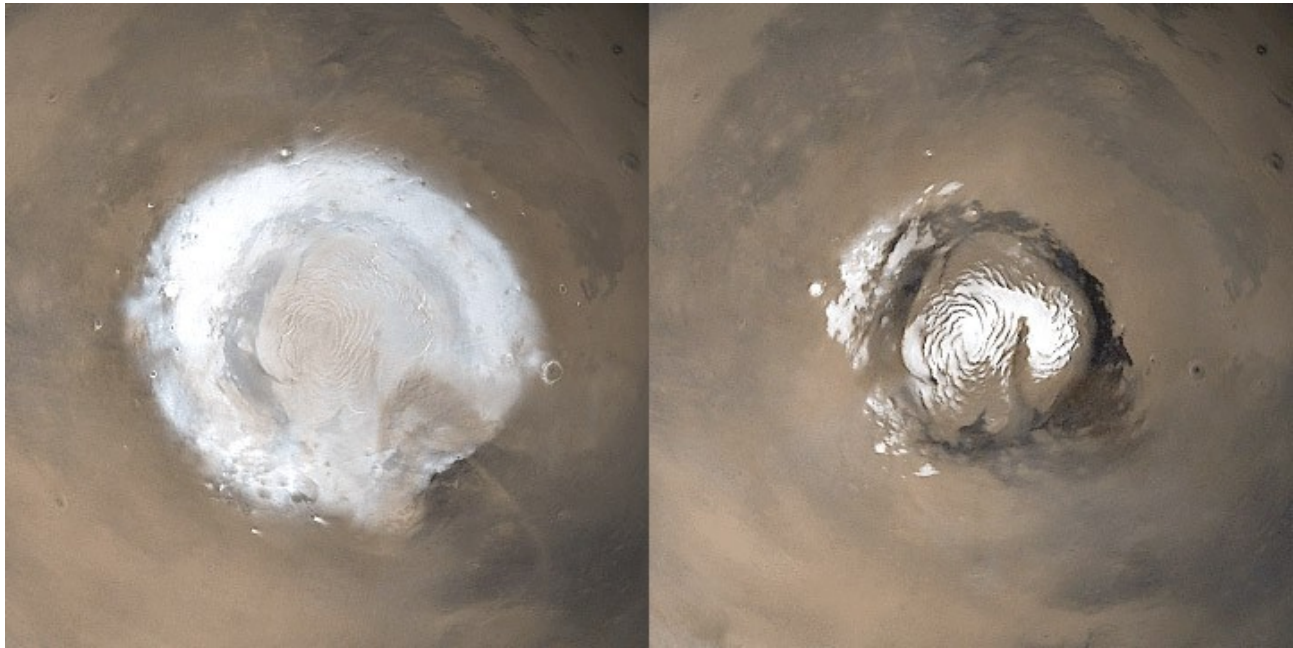
Życie pozaziemskie

W Układzie Słonecznym

Istnieje wiele ciał z wodą w stanie stałym:
ślady wody odkryto na Merkurym, Księżycu, Marsie, księżycach planet olbrzymów



Miejsca wykrycia śladów lodu
na Księżycu (Chandrayaan-1, 2008)



Sezonowe zmiany marsjańskiej czapy polarnej.

Życie pozaziemskie

W Układzie Słonecznym

Spekuluje się o wymarłych lub istniejących mikrobach na:

Merkurym, Wenus, Marsie, księżycach planet olbrzymów



Meteoryt ALH84001.



Obraz mikroskopowy fragmentu meteorytu (1996).

Inne układy planetarne

Odkrycie

1988 – gamma Cep – Bruce Campbell i in.
„A Search for Substellar Companions to Solar-type Stars”

1989 – HD 114762b – David Latham i in.
„The unseen companion of HD114762: a probable brown dwarf”

1991 – pulsar – Bailes i Lyne
„Long-Period Radial Velocity Variations in Three K Giants” – szybko odwołane

1992 – pulsar – Wolszczan i Frail – potwierdzone

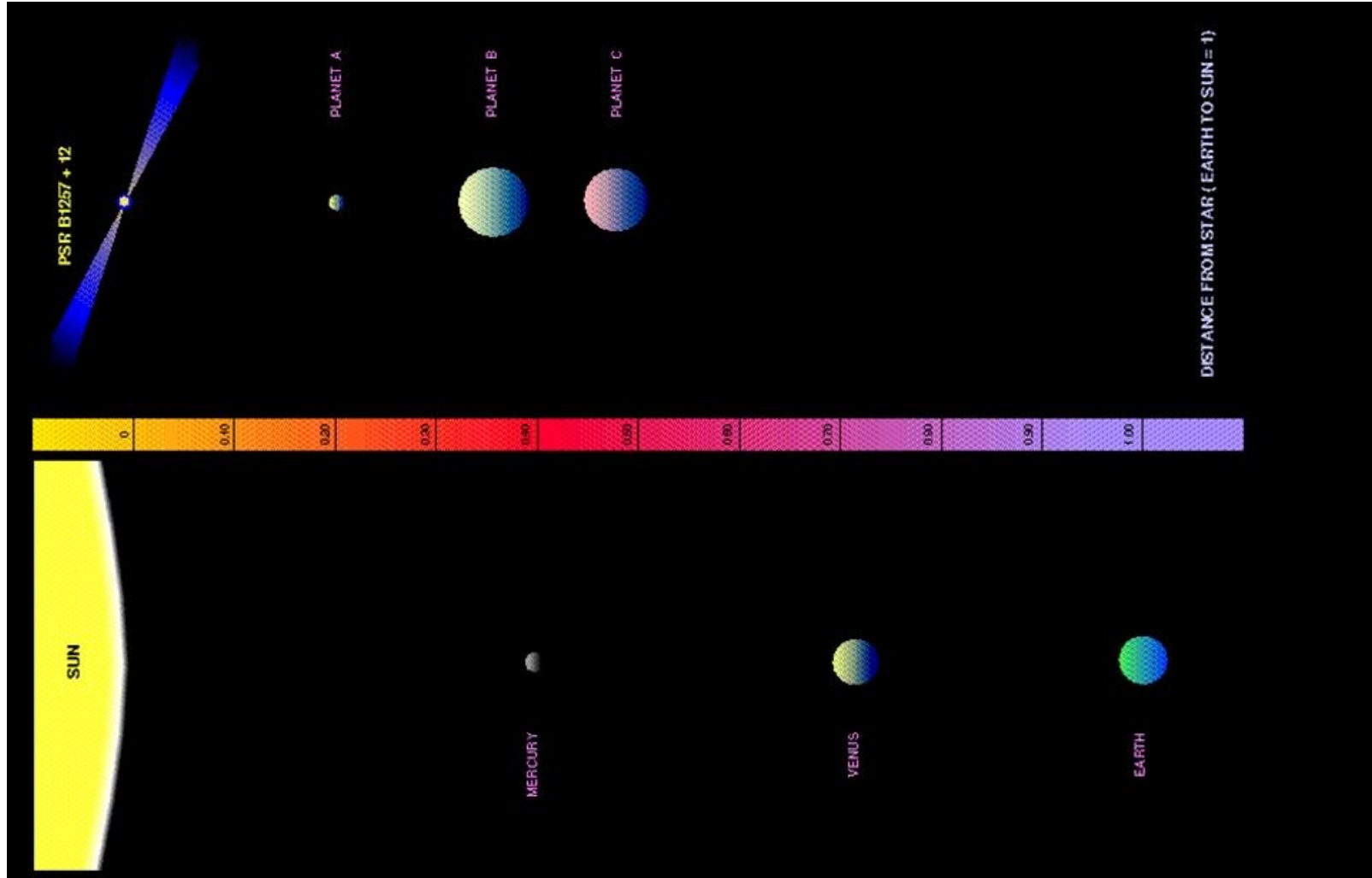
1993 – beta Gem – Hatzes i Cochran
„Long-Period Radial Velocity Variations in Three K Giants”

1995 – 51 Peg – Marcy i Butler – zaobserwowali ale nie zdolali przeanalizować

1995 – 51 Peg – Mayor i Queloz – Nobel 2019

Inne układy planetarne

Odkrycie



Pulsar PSR 1257+12



The Periodic Table of Exoplanets

Over 3800 Exoplanets

Number of Stellar Systems



Terrans Group

Giants Group

Miniterrans
(Mercury Size)

Subterrans
(Mars Size)

Terrans
(Earth Size)

Superterrans
(Super-Earths & Mini-Neptunes)

Neptunians
(Neptune Size)

Jovians
(Jupiter Size)

$10^{-5} - 0.1 M_E$ or $0.03 - 0.4 R_E$

$0.1 - 0.5 M_E$ or $0.4 - 0.8 R_E$

$0.5 - 5 M_E$ or $0.8 - 1.5 R_E$

$5 - 10 M_E$ or $1.5 - 2.5 R_E$

$10 - 50 M_E$ or $2.5 - 6.0 R_E$

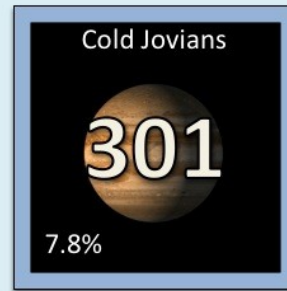
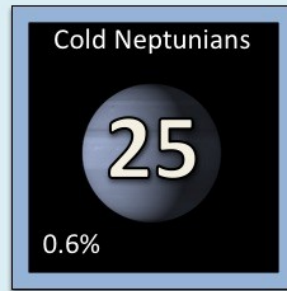
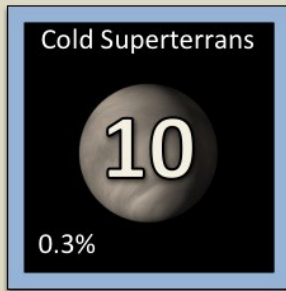
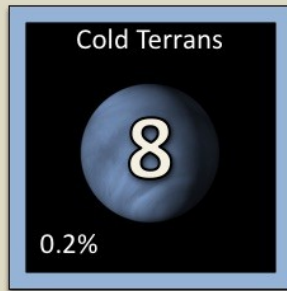
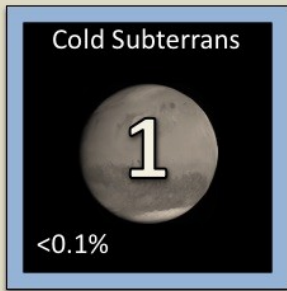
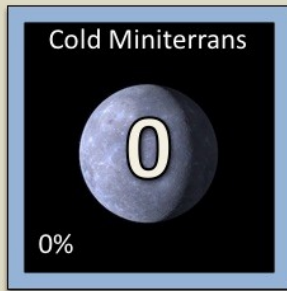
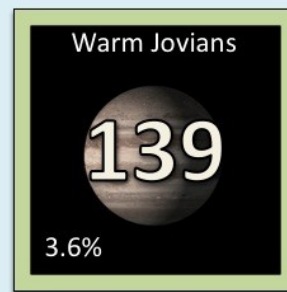
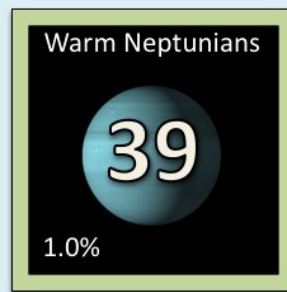
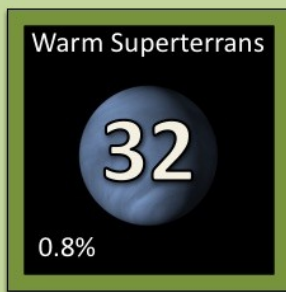
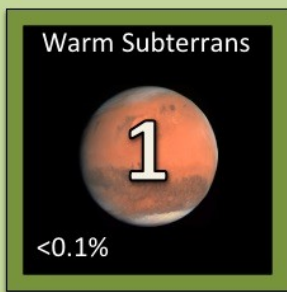
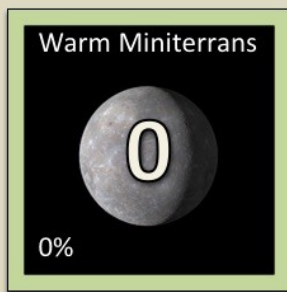
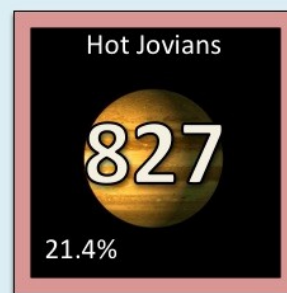
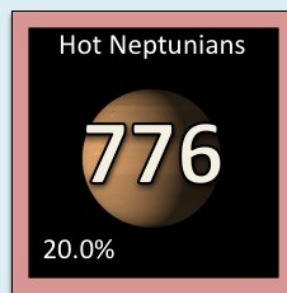
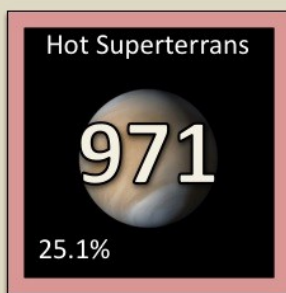
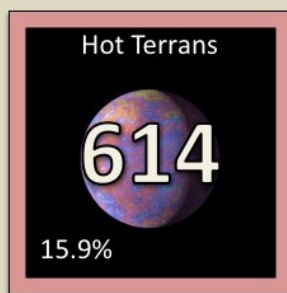
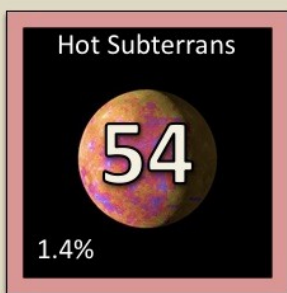
$> 50 M_E$ or $> 6 R_E$

Hot Zone

Warm 'Habitable' Zone

Cold Zone

Potentially Habitable



Życie pozaziemskie

Poza Układem Słonecznym

Równanie Drake'a – próba oszacowania ilości cywilizacji we Wszechświecie

$$N = (R_{\star} \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c) \cdot L$$

N - liczba cywilizacji pozaziemskich, z którymi ludzkość może się komunikować

R_{\star} - szybkość powstawania gwiazd w naszej Galaktyce

f_p - odsetek gwiazd, które mają planety

n_e - średnia liczba planet znajdujących się w ekosferze gwiazdy, tj. na których może powstać życie

f_l - odsetek planet w ekosferze, na których życie powstanie

f_i - odsetek planet zamieszkałych, na których życie rozwinie inteligencję (czyli stworzy cywilizację)

f_c - odsetek cywilizacji, które będą chciały komunikować się z ludzkością

L - średni czas istnienia takich cywilizacji

Ile wynosi N ?