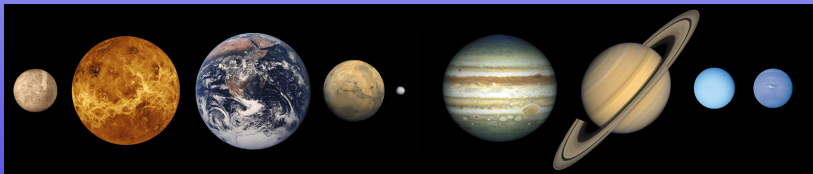


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

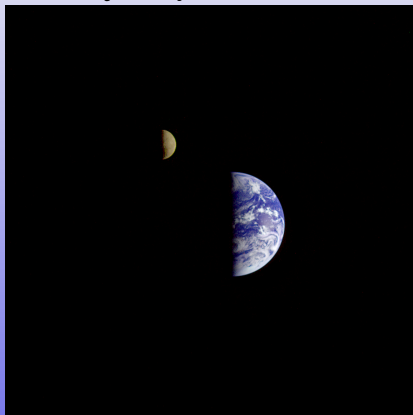
17 marca 2015



W Układzie Słonecznym spotykamy liczne przykłady mniej lub bardziej dokładnych **wymiernych** stosunków:

- 1 1:1 – okres orbitalny planetoid trojańskich i Jowisza w punktach L_4 , L_5 układu Jowisz-Słońce
- 2 1:1 – prędkość kątowna obrotu i częstość orbitalna Księżyca
- 3 2:3 – okres orbitalny Ziemi i Wenus
- 4 1:1 – obrót Plutona i Charona
- 5 1:2:4 – okresy orbit Io, Europy i Ganimedesa
- 6 2:3 – okresy Plutona i Neptuna
- 7 3:4 – orbity Hiperiona i Tytana
- 8 3:2 – okres obrotu i orbity Merkurego

Częściowy rezonans 1:1

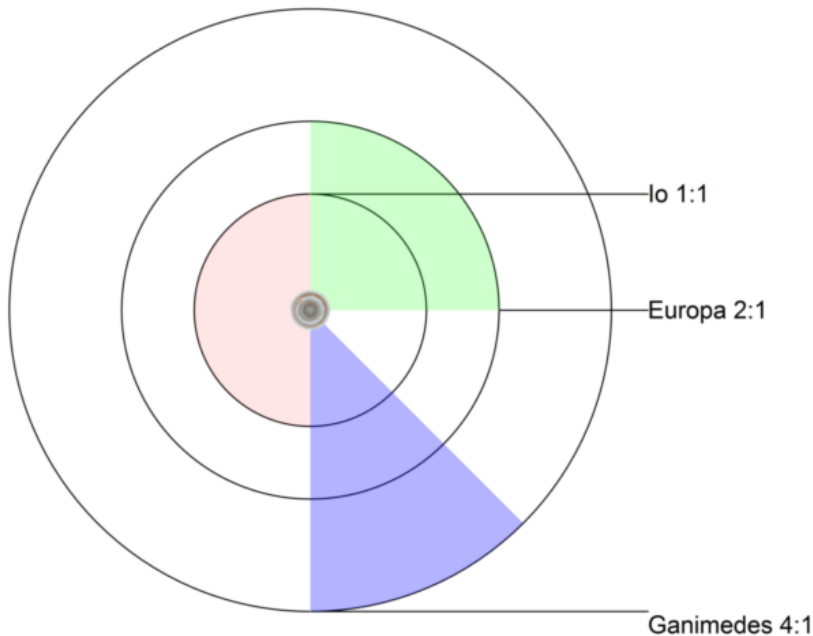


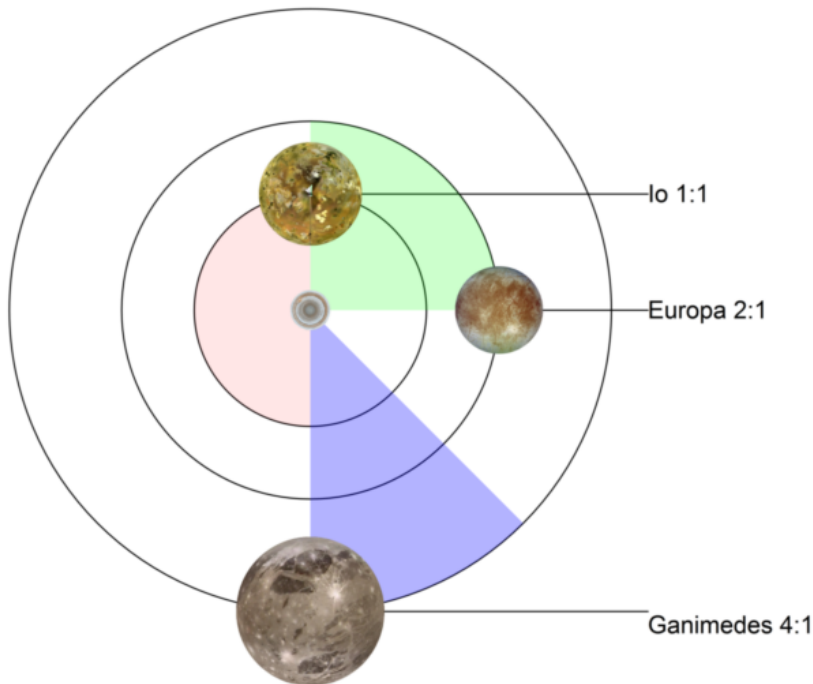
Ziemia - Księżyc

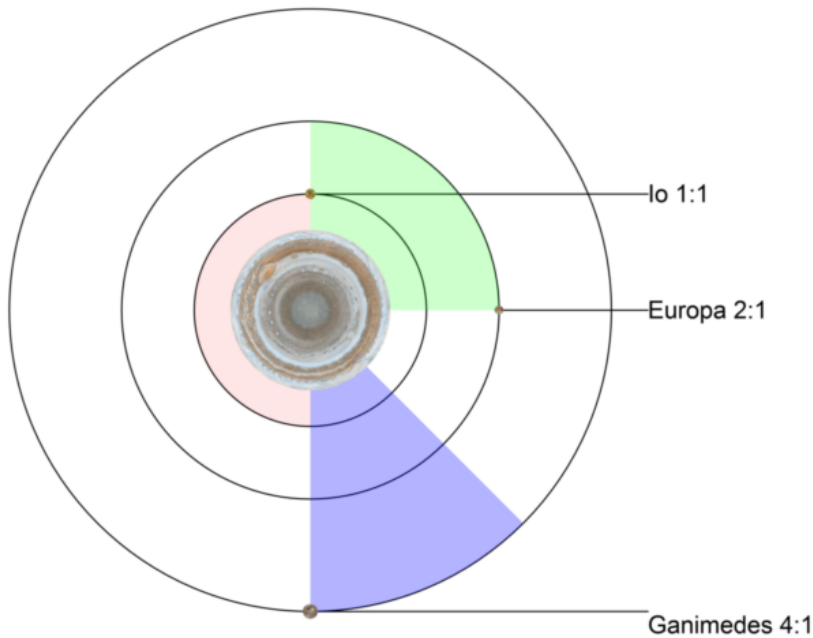
Pełny rezonans 1:1



Pluton - Charon





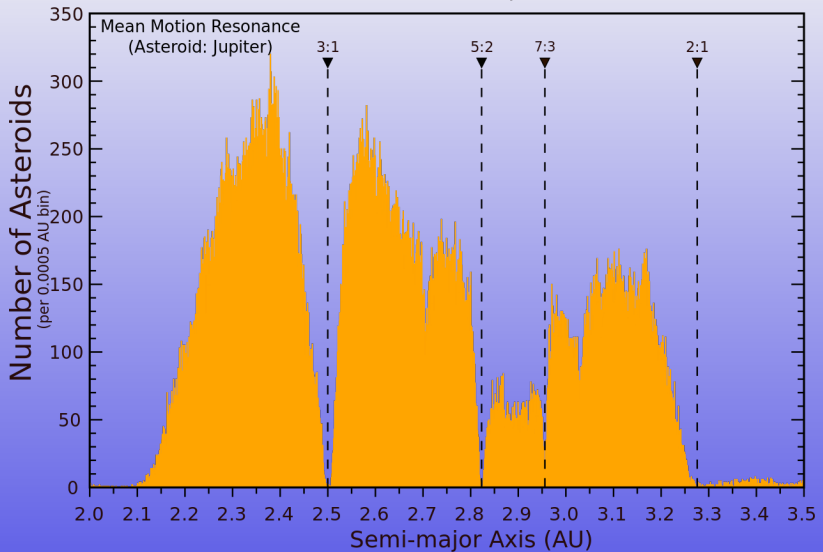


Pojęcie bieguna w przypadku rotacji synchronicznej

- większość obiektów ma dobrze określoną oś rotacji
- określenia **biegun północny/południowy** wynikają z nachylenia osi rotacji do tzw. płaszczyzny niezmienniczej Laplace'a (prostopadłej do całkowitego wektora momentu pędu Układu Słonecznego, zdominowanego przez Jowisza i pozostałe gazowe giganty)
- dla obiektów takich jak: planety karłowate, księżyce, komety itd. **biegun dodatni/ujemny** definiujemy zgodnie z regułą prawej dłoni
- w przypadku obrotu synchronicznego można zdefiniować półkule:
 - bliską / daleką w zależności, czy drugi składnik układu podwójnego jest w zenicie/nadirze
 - przednią/tylną w zależności od orientacji względem kierunku i zwrotu prędkości orbitalnego
- **bieguny magnetyczne** mogą być znacznie odchylone, np: dla Urana różnica wynosi około 60 stopni

Asteroid Main-Belt Distribution

Kirkwood Gaps



"Kirkwood Gaps" by based on plot by Alan Chamberlain, JPL/Caltech



Rezonans bez tłumienia: przypomnienie

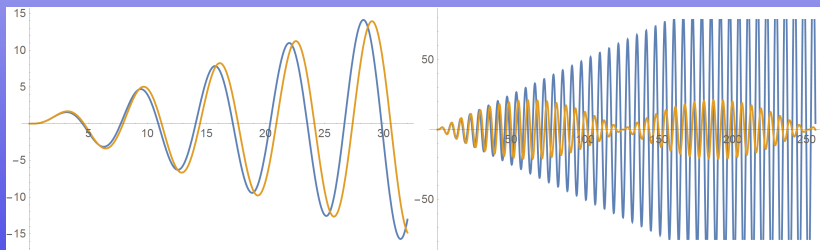
$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = A \sin \omega t, \quad x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

Rozwiązanie dla $\omega \neq \omega_0$: (dudnienia)

$$x(t) = \frac{A}{(\omega^2 - \omega_0^2)\omega_0} (\omega \sin(\omega_0 t) - \omega_0 \sin(\omega t))$$

oraz dla $\omega = \omega_0$: (liniowy/wiekowy wzrost amplitudy)

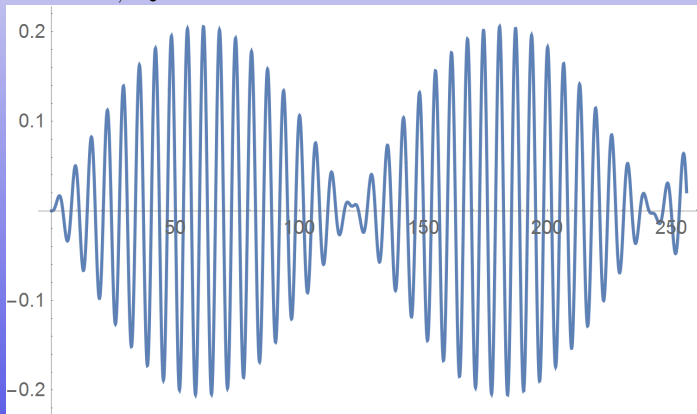
$$x(t) = \frac{A}{2\omega_0^2} (\sin(\omega t) - \omega t \cos(\omega t))$$



Rezonans nieliniowy bez tłumienia

$$\ddot{x} + \omega_0^2 \sin x = A \sin \omega t, \quad x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

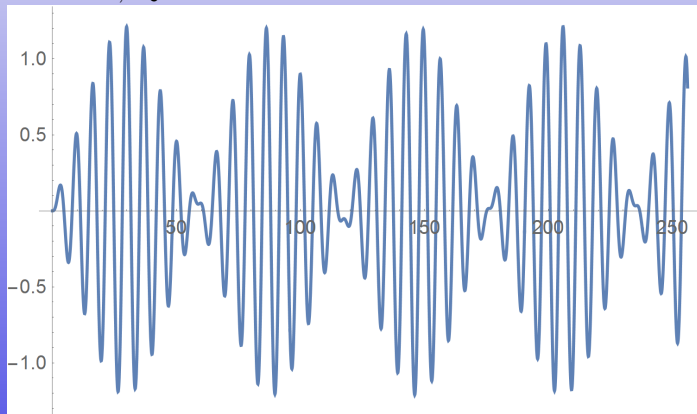
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.01$$



Rezonans nieliniowy bez tłumienia

$$\ddot{x} + \omega_0^2 \sin x = A \sin \omega t, \quad x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

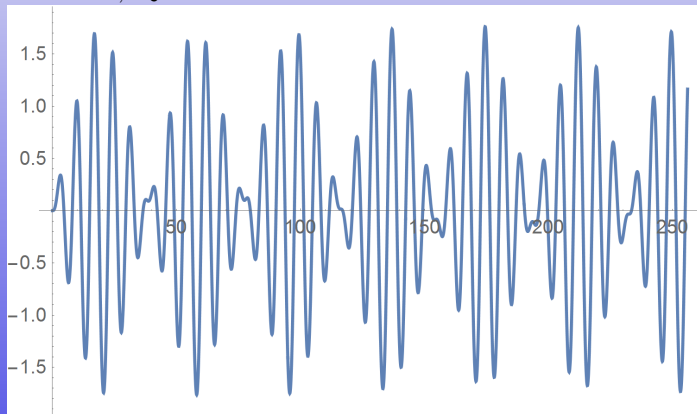
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.1$$



Rezonans nieliniowy bez tłumienia

$$\ddot{x} + \omega_0^2 \sin x = A \sin \omega t, \quad x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

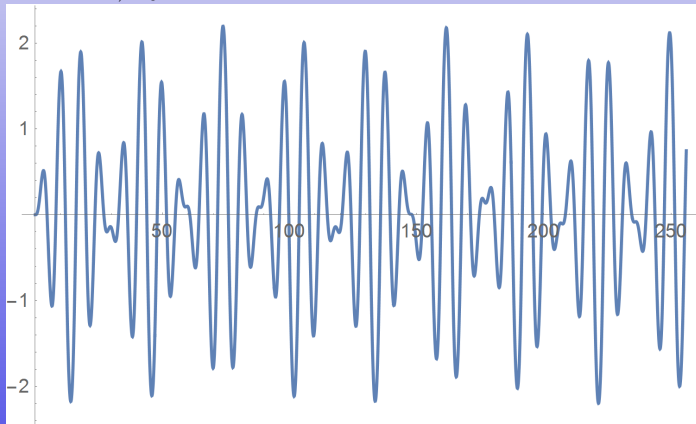
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.2$$



Rezonans nieliniowy bez tłumienia

$$\ddot{x} + \omega_0^2 \sin x = A \sin \omega t, \quad x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

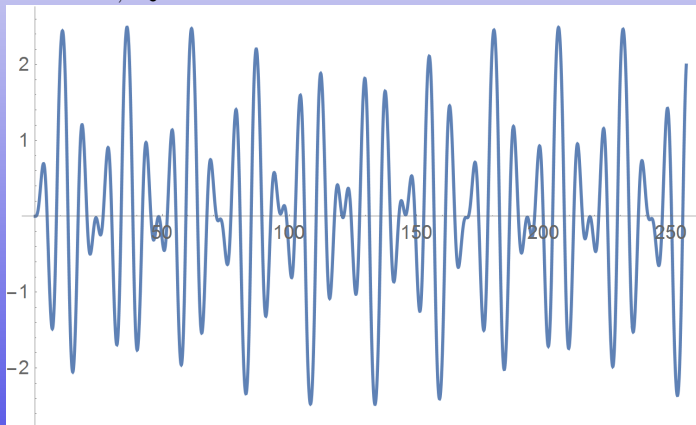
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.3$$



Rezonans nieliniowy bez tłumienia

$$\ddot{x} + \omega_0^2 \sin x = A \sin \omega t, \quad x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

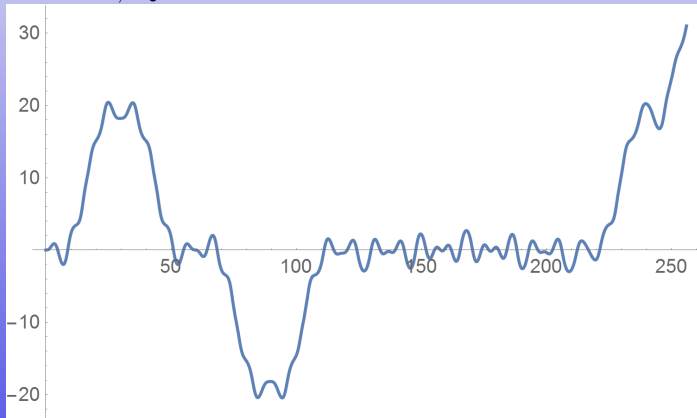
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.4$$



Rezonans nieliniowy bez tłumienia

$$\ddot{x} + \omega_0^2 \sin x = A \sin \omega t, \quad x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

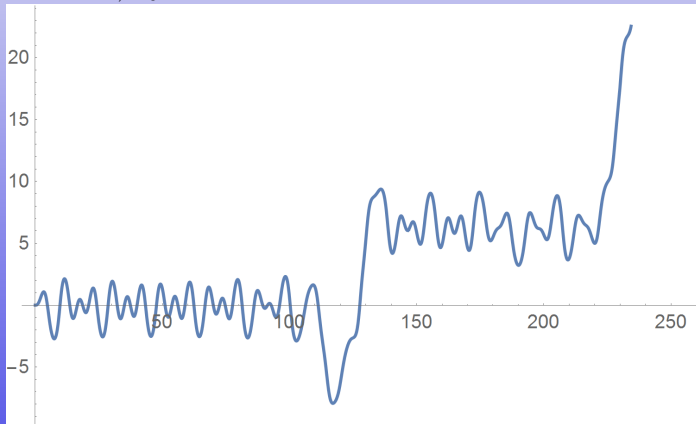
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.5$$



Rezonans nieliniowy bez tłumienia

$$\ddot{x} + \omega_0^2 \sin x = A \sin \omega t, \quad x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.6$$



- zachowanie w rezonansie liniowym zależy wyłącznie od częstości
- rezonans liniowy dla $\omega = \omega_0$ — amplituda rośnie w nieskończoność
- rezonans liniowy dla $\omega \simeq \omega_0$ — dudnienia / libracja
- w rezonansie nieliniowym istotna jest zarówno częstość jak i amplituda siły wymuszającej
- dla małych amplitud wymuszających zachowanie nie odbiega od rezonansu liniowego
- powyżej pewnej krytycznej amplitudy wymuszającej pojawia się chaos
- dla jeszcze większej rozwiązanie typowo dąży do nieskończoności

Rezonans w układzie N-ciał

- 1 część rezonansów orbitalnych wydaje się dziełem przypadku
- 2 niektóre działają stabilizująco, inne destruktywnie
- 3 „siła” rezonansu $n : m$ maleje ze wzrostem n i m
- 4 rezonans działa jak wymuszony, ale energia nie jest pompowana do układu z zewnątrz w zwykłym sensie: energia całego układu jest zachowana
- 5 cały czas aktywna dziedzina badań, szczególnie w kontekście układów egzoplanetarnych
- 6 nadal nie jest całkiem jasna sprawa stabilności Układu Słonecznego
- 7 gdzie są wyrzucone z milionów układów komety, planetoidy i planety ?

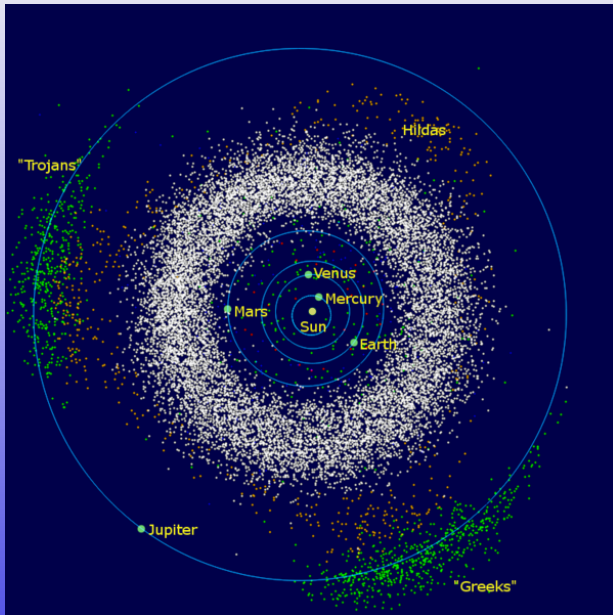
Reguła Titiusa-Bodego

$$a_n = \frac{4 + 3 \cdot 2^n}{10} [AU], \quad n = -\infty, 0, 1, \dots$$

Inna podobna formuła $a_n = 1.728^n$, która stosuje się także do księżyców Jowisza

- 1 standardowe wytłumaczenie:
 - w Układzie Słonecznym powstaje bardzo duża liczba ciał rozmieszczonych losowo
 - w toku ewolucji, niestabilności, rezonansów zajmują miejsca stabilne lub są wyrzucane poza Układ
 - pozostają planety w bezpiecznych odległościach, kilku promieni Hill'a i stabilnych rezonansach
- 2 struktura układów pozasłonecznych nie daje podstaw do twierdzenia o uniwersalności reguły Titiusa-Bodego
- 3 niemniej jednak używa się jej do szukania egzoplanet

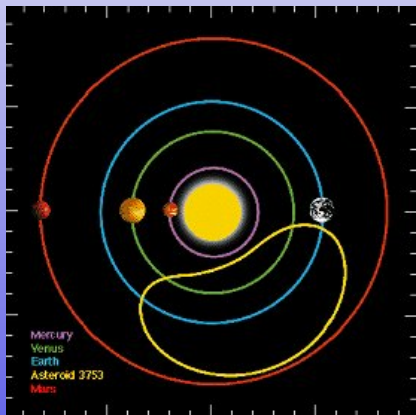
Planetoidy trojańskie



Dodatkowe „księżycy” Ziemi

Istnieją obiekty orbitujące z Ziemią w rezonansie 1:1

- 1 2010 TK₇ (L4)
- 2 3753 Cruithne (1:1)

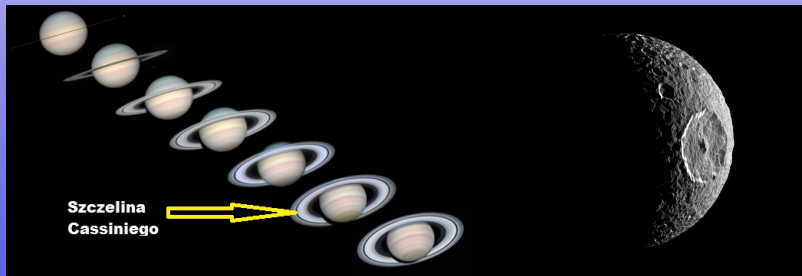


Obiekty te w celach propagandowo-marketingowych nazywane bywają księżycami Ziemi.

Pierścień Saturna

Najbardziej spektakularnym wizualnie przykładem struktury rezonansowej są pierścienie Saturna.

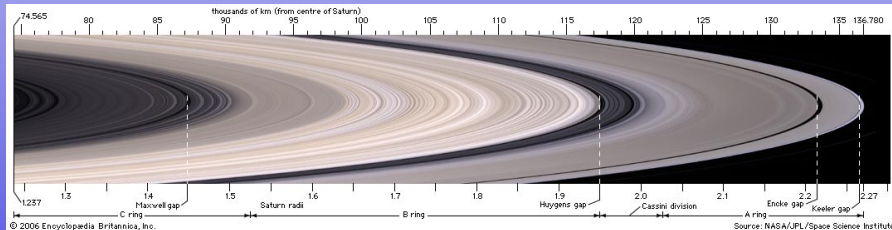
- szczelina Cassiniego — rezonans 1:2 z Mimasem
- przerwa Enckego — rezonans 1:1 z Pan-em
- krawędź pierścienia A — rezonans 7:6 z Janusem i Epimetheusem (orbita typu „podkowa”)



Pierścień Saturna

Najbardziej spektakularnym wizualnie przykładem struktury rezonansowej są pierścienie Saturna.

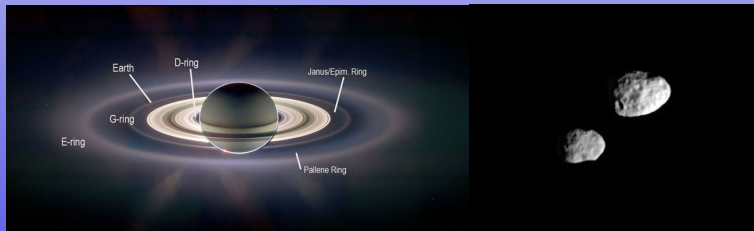
- szczelina Cassiniego — rezonans 1:2 z Mimasem
- przerwa Enckego — rezonans 1:1 z Pan-em
- krawędź pierścienia A — rezonans 7:6 z Janusem i Epimetheusem (orbita typu „podkowa”)



Pierścień Saturna

Najbardziej spektakularnym wizualnie przykładem struktury rezonansowej są pierścienie Saturna.

- szczelina Cassiniego — rezonans 1:2 z Mimasem
- przerwa Enckego — rezonans 1:1 z Pan-em
- krawędź pierścienia A — rezonans 7:6 z Janusem i Epimetheusem (orbita typu „podkowa”)



Wpływ zjawisk astrofizycznych na Ziemię

- zmiany klimatu
- wielkie wymierania
- rozwój nauki
- pogoda kosmiczna

- okresowe zaburzenia orbity (tzw. cykle Milankovica)
- ewolucja Słońca a Snowball Earth

Temperature planet

Założmy, że planeta absorbuje 100% promieniowania słonecznego, a następnie emituje je we wszystkich kierunkach jak ciało doskonale czarne:

$$P_{\text{abs}} = \frac{L_{\odot}}{4\pi d_{\oplus}^2} \pi R_{\oplus}^2, \quad L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$$

$$P_{\text{emit}} = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4$$

Po skróceniu otrzymujemy zależność pomiędzy temperaturą planety (Ziemi) a jej odległością od gwiazdy centralnej (Słońca):

$$2 \frac{d_{\oplus}}{R_{\odot}} = \left(\frac{T_{\odot}}{T_{\oplus}} \right)^2$$

Wynik zwykle podaje się jako rejon, w którym woda (H_2O) **może** występować w „stanie ciekłym” $273 \text{ K} < T_{\oplus} < 373 \text{ K}$:

$$0.55 \text{ AU} < d_{\oplus} < 1.05 \text{ AU}, \quad T_{\odot} = 5800 \text{ K}, R_{\odot} = 700000 \text{ km}$$

Ziemia ($d_{\oplus} = 1 \text{ AU}$) ledwo załapała się do tej strefy!

Temperature planet

Założmy, że planeta absorbuje 100% promieniowania słonecznego, a następnie emituje je we wszystkich kierunkach jak ciało doskonale czarne:

$$P_{\text{abs}} = \frac{L_{\odot}}{4\pi d_{\oplus}^2} \pi R_{\oplus}^2, \quad L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$$

$$P_{\text{emit}} = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4$$

Po skróceniu otrzymujemy zależność pomiędzy temperaturą planety (Ziemi) a jej odległością od gwiazdy centralnej (Słońca):

$$2 \frac{d_{\oplus}}{R_{\odot}} = \left(\frac{T_{\odot}}{T_{\oplus}} \right)^2$$

Wynik zwykle podaje się jako rejon, w którym metan (CH_4) **może** występować w „stanie ciekłym” $90 \text{ K} < T_{\text{r}} < 110 \text{ K}$:

$$6.5 \text{ AU} < d_{\text{r}} < 9.7 \text{ AU}, \quad T_{\odot} = 5800 \text{ K}, R_{\odot} = 700000 \text{ km}$$

Saturn ($d_{\text{r}} = 9.6 \text{ AU}$) ledwo załapał się do tej strefy!

Bardzo ważnym pojęciem modyfikującym przedstawione przed chwilą rozumowanie jest albedo, czyli współczynnik odbicia promieniowania przez obiekt astronomiczny.

- dla ciała doskonale czarnego albedo = 0
- dla idealnego lustra albedo = 1

Przykłady:	jądro komety	0.04
	asfalt	0.04
	Ziemia	0.3
	śnieg	0.80
	Wenus	0.90
	Eris	0.96
	Enceladus	0.99

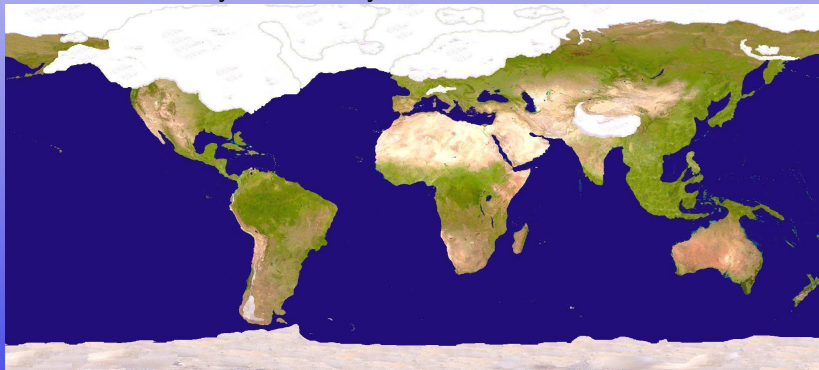
Używa się kilku definicji. Najważniejsze to albedo Bonda („energetyczne”; modelowanie klimatu) i albedo geometryczne („wizualne”; obserwacje).

Ostatnie maksimum zlodowacenia

Około 20 000 lat temu, z orbity ujrzelibyśmy szokujący obraz:

- 1 Ameryka Północna i Europa pokryte lądolodem o grubości kilku kilometrów
- 2 poziom oceanu niższy o 200 metrów
- 3 jeziora zaporowe, zmienione koryta rzek
- 4 inny klimat

Co dało tak drastyczne zmiany w bardzo krótkim czasie?



Ostatnie maksimum zlodowacenia

Około 20 000 lat temu, z orbity ujrzelibyśmy szokujący obraz:

- 1 Ameryka Północna i Europa pokryte lądolodem o grubości kilku kilometrów
- 2 poziom oceanu niższy o 200 metrów
- 3 jeziora zaporowe, zmienione koryta rzek
- 4 inny klimat

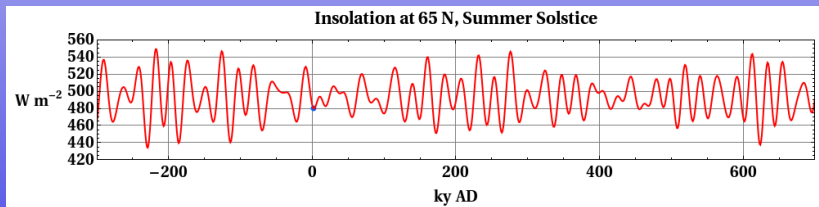
Co dało tak drastyczne zmiany w bardzo krótkim czasie?



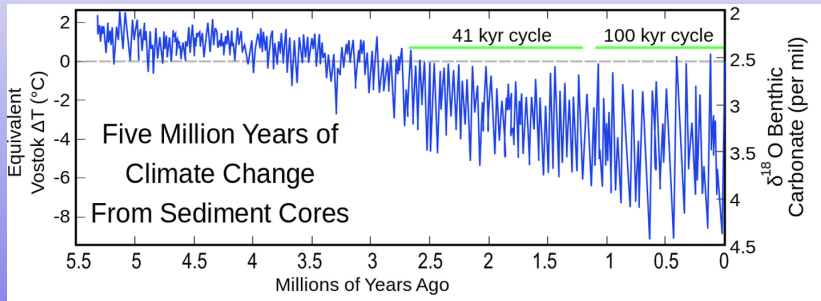
Cykle Milankovica

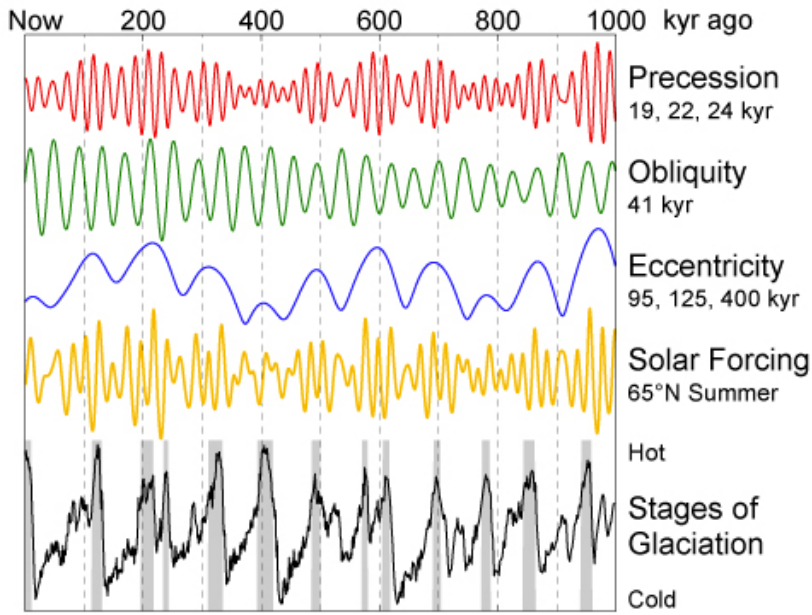
Elementy orbity Ziemi podlegają okresowym zmianom, wywołanym perturbacjami Jowisza, Saturna i innych planet:

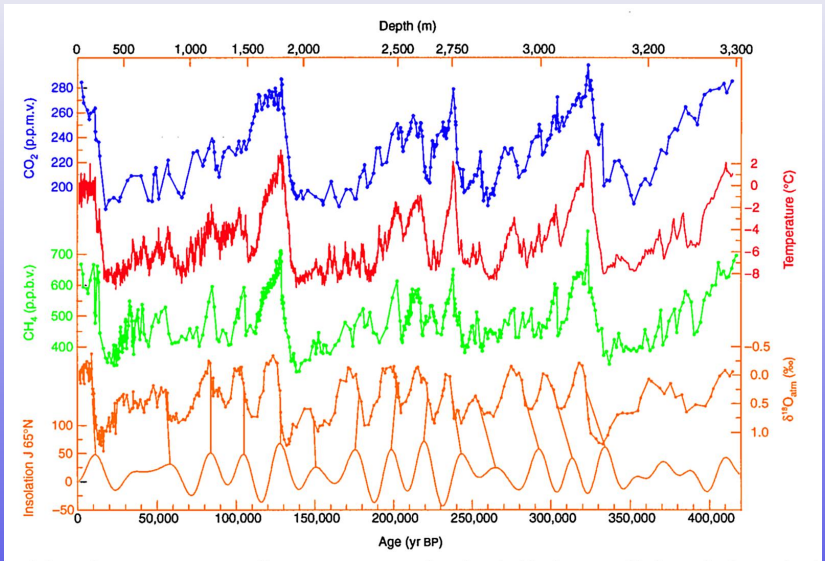
- 1 zmiana mimośrodów orbity w zakresie $0 \leq e < 0.05$ z okresem około 100 tysięcy lat (aktualnie: $e = 0.0167$)
- 2 precesja peryhelium z okresem około 23 000 lat (obecnie Ziemia jest w peryhelium 4 stycznia)
- 3 wahania nachylenia osi obrotu Ziemi z zakresie $21.5 < \alpha < 24.5$ z okresem 41 000 lat (obecnie $\alpha = 23.5^\circ$)
- 4 precesja osi obrotu Ziemi z okresem około 26 000 lat



<http://www.sciencecourseware.org/eec/GlobalWarming/Tutorials/Milankovitch/>







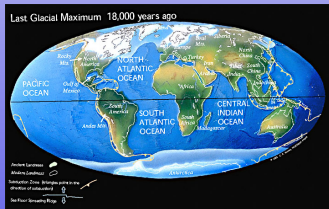
Stan „chłodni” i „cieplarni”

Ziemia oscyluje pomiędzy dwoma stanami stabilnymi:

- 1 stan chłodni (ang. *icehouse earth*)
- 2 stan szklarni (ang. *greenhouse earth*)

Chłodnia

lądolody na biegunach
niskie stężenie CO₂
20% historii



Cieplarnia

brak stałego zlodowacenia
wysokie stężenie CO₂
80% historii



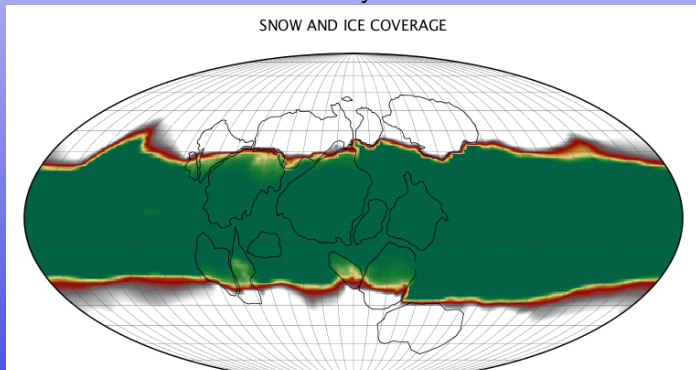
Obecnie Ziemia jest w stanie chłodni, w trakcie interglacjału.

Snowball Earth

Połączymy dwa fakty:

- 1 wzór na temperaturę Ziemi w zależności od odległości do Słońca
- 2 wzrost mocy promieniowania Słońca w tempie około 7% na 10^9 lat (miliard lat)

Kiedy w przeszłości Ziemia „wypada” ze strefy ciekłej wody $T = 0^\circ \text{C}$? Około 1-2 miliardy lat temu!



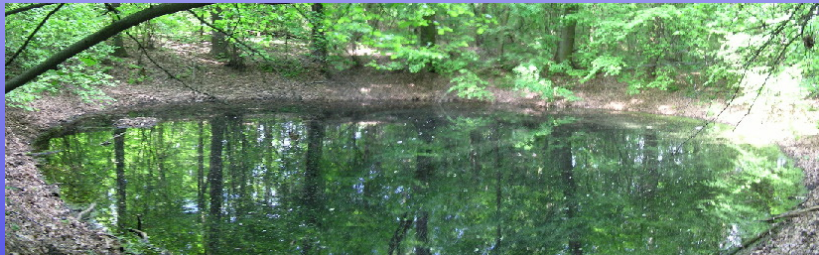
Wielkie wymierania

Gwałtowny spadek liczby gatunków w geologicznie krótkim czasie.
Najważniejsze z wielu:

- 1 wymieranie permskie, wyznaczające koniec ery palozoiku
- 2 wymieranie kreda/trzeciorzęd wyznaczające koniec ery mezozoziku

Wydarzenia te mają pozornie kwaziokresowy charakter z $T \sim 100$ milionów lat. Przyczyny „astrofizyczne”:

- wybuchy hipernowych/ rozbłyski gamma
- uderzenia meteorów i komet



Przykład krateru meteorytowego

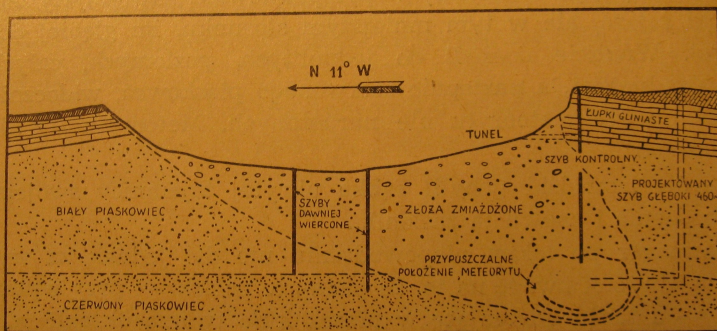
Adres: Meteor Crater Rd, AZ, USA



StreetView

Przykład krateru meteorytowego

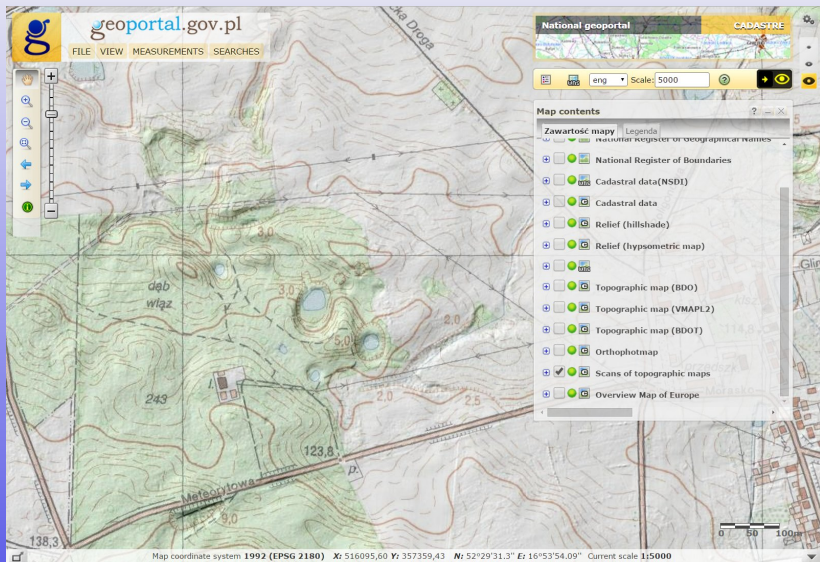
Adres: Meteor Crater Rd, AZ, USA



Rys. 57. Schematyczny przekrój Parowu Diabelskiego i miejsca przedsięwziętych w poszukiwaniu meteorytów wierceń.

StreetView

Polacy nie gęsi . . .



Morasko krater 3: fotosfera



Poznań, 16.11.2012. Na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu Adama Mickiewicza dokonano pomiaru masy największego znalezionej w Polsce meteorytu. Specjalna waga wskazała, że meteoryt z terenu rezerwatu Morasko, waży 261kg. (jk/jkm) PAP/Jakub Kaczmarczyk

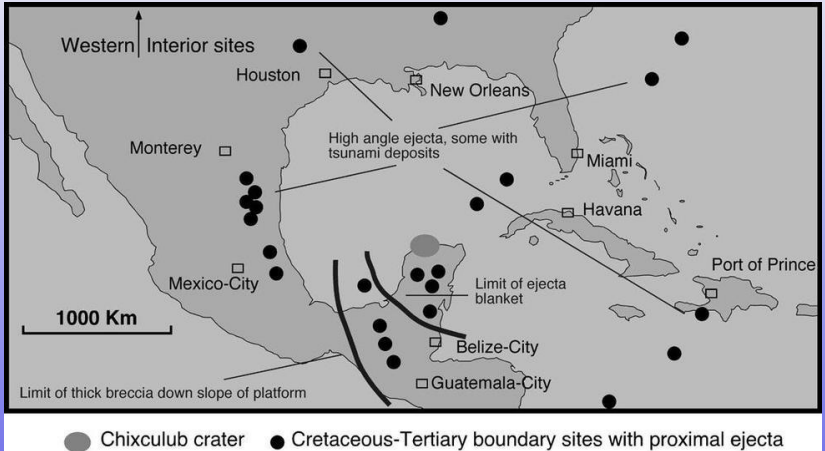


Morasko krater 3: fotosfera



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

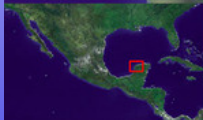
Chichen Itza Cenote



Chichen Itza Cenote



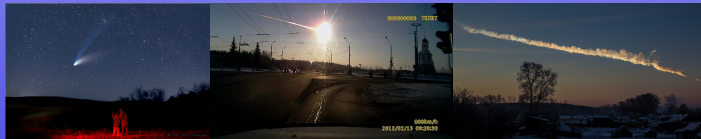
Each blue dot below represents a cenote such as the one to the left.



Chichen Itza Cenote



- złożony, ale regularny układ planetarny
- komety
 - ① Tycho wykazuje, że kometa jest 4x dalej niż Księżyc
 - ② Halley przewiduje powrót komety
- impakty, kratery, cenote
- zaćmienia (w najbliższy piątek 20 marca 2015 roku, maksimum około godz. 10:50)
- supernowe, nowe, gwiazdy zmienne
 - ① Algol, Mira — pierwsze gwiazdy zidentyfikowane jako zmienne
 - ② SN1604 — *De Stella Nova in pede serpentari*
 - ③ S And vel SN1885 — odkrycie galaktyk
 - ④ SN 1987A — pierwsze neutrino z obiektu pozasłonecznego



Najnowsze odkrycia na obrzeżach Układu Słonecznego wymusiły doprecyzowanie definicji planety. Wyrzucenie Plutona z grona planet jest symbolem zmiany.

Obecnie rozróżniamy:

- 1 planety [def: (1) na orbicie Słońca (2) kształt sferyczny (3) oczyszczenie orbity]
 - planety skaliste (Merkury, Wenus, Ziemia, Mars)
 - gazowe olbrzymy (Jowisz, Saturn, Uran, Neptun)
- 2 księżycy (Księżyc, Io, Europa, Tytan, ...)
- 3 planety karłowate (Ceres, Pluton, Eris, Makemake, ...)
- 4 małe ciała Układu Słonecznego
- 5 komety

Planets

Satellites (natural)

Dwarf planets

Minor planets

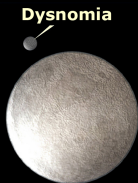
Trans-Neptunian objects

Plutoids

Small Solar System bodies

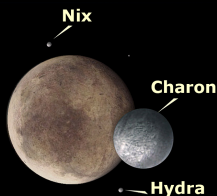
Comets

Największe znane obiekty transneptunowe



Dysnomia

Eris

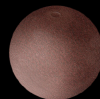


Nix

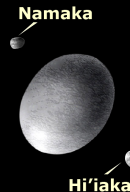
Charon

Hydra

Pluton



Makemake



Namaka

Hi'iaaka

Haumea



Sedna



2007 OR₁₀

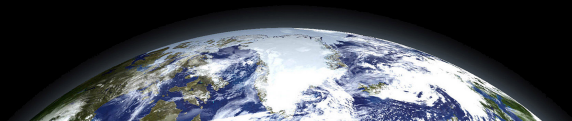
Weywot



Quaoar

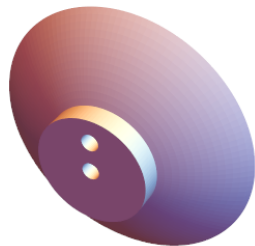
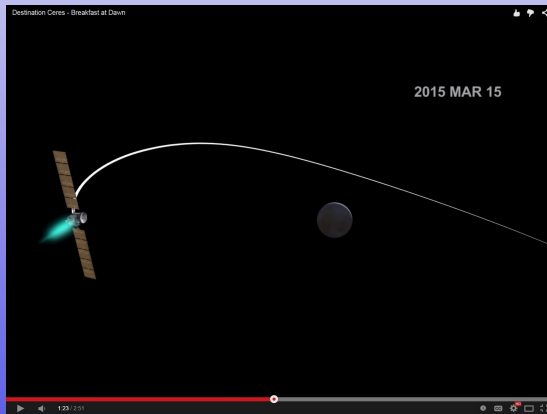


Vanth
Orkus



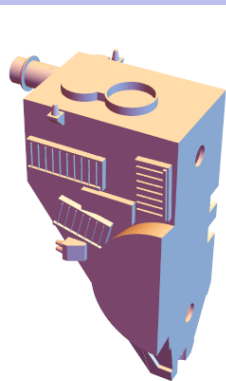
Proszę trzymać rękę na pulsie:

- 1 Dawn — misja do Ceres (6 marca weszła na orbitę!)
- 2 New Horizons — misja do Plutona (dotrze w ciągu 4 miesięcy!)



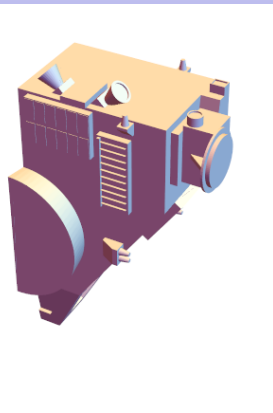
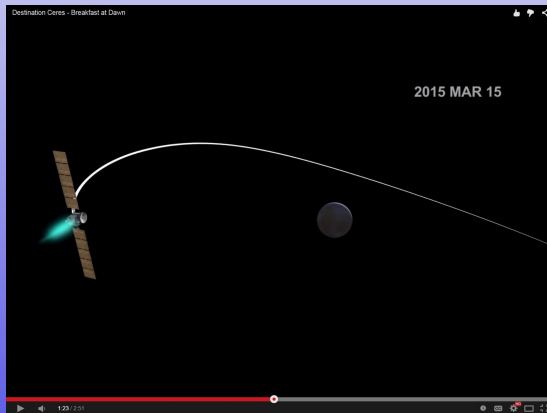
Proszę trzymać rękę na pulsie:

- 1 Dawn — misja do Ceres (6 marca weszła na orbitę!)
- 2 New Horizons — misja do Plutona (dotrze w ciągu 4 miesięcy!)



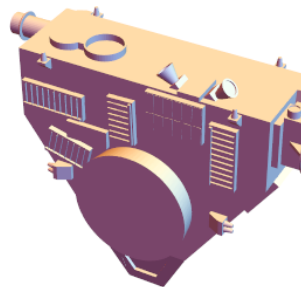
Proszę trzymać rękę na pulsie:

- 1 Dawn — misja do Ceres (6 marca weszła na orbitę!)
- 2 New Horizons — misja do Plutona (dotrze w ciągu 4 miesięcy!)



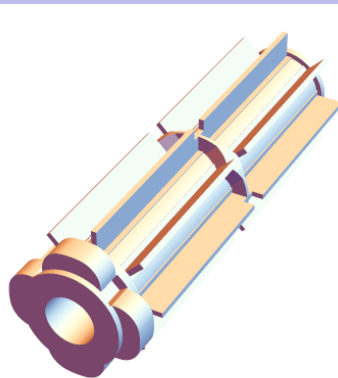
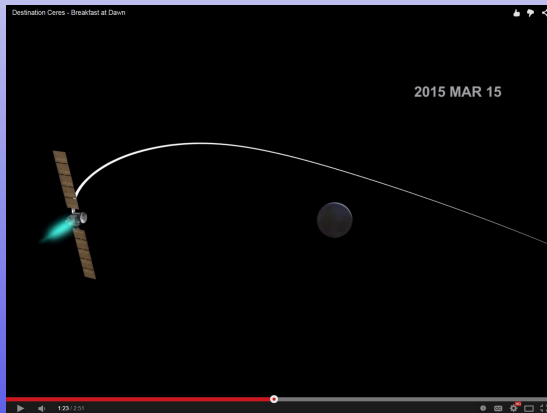
Proszę trzymać rękę na pulsie:

- 1 Dawn — misja do Ceres (6 marca weszła na orbitę!)
- 2 New Horizons — misja do Plutona (dotrze w ciągu 4 miesięcy!)



Proszę trzymać rękę na pulsie:

- 1 Dawn — misja do Ceres (6 marca weszła na orbitę!)
- 2 New Horizons — misja do Plutona (dotrze w ciągu 4 miesięcy!)



Pozasłoneczne układy planetarne i egzobiologia

Przez setki lat teorie dotyczące układów planetarnych cierpiały z istotnego powodu:

- Liczba znanych układów planetarnych $N = 1$
- Obecnie $N > 1195$ i stale rośnie

Na dzień dzisiejszy katalog egzoplanet
<http://exoplanet.eu/catalog/> obejmuje:

- 1195 układów planetarnych
- 1897 planet
- 487 układów z więcej niż jedną planetą
- około 200 kolejnych niepotwierdzonych planet

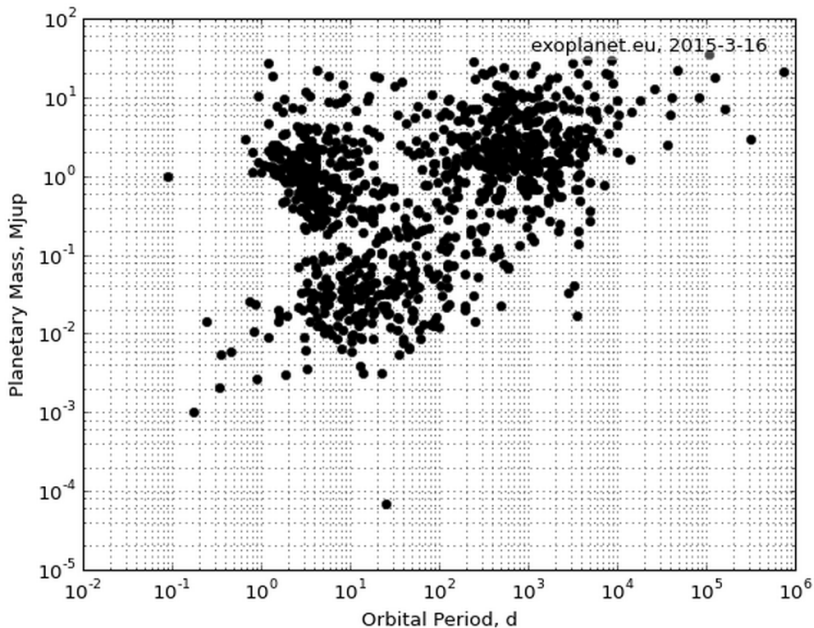
Przez setki lat teorie dotyczące układów planetarnych cierpiały z istotnego powodu:

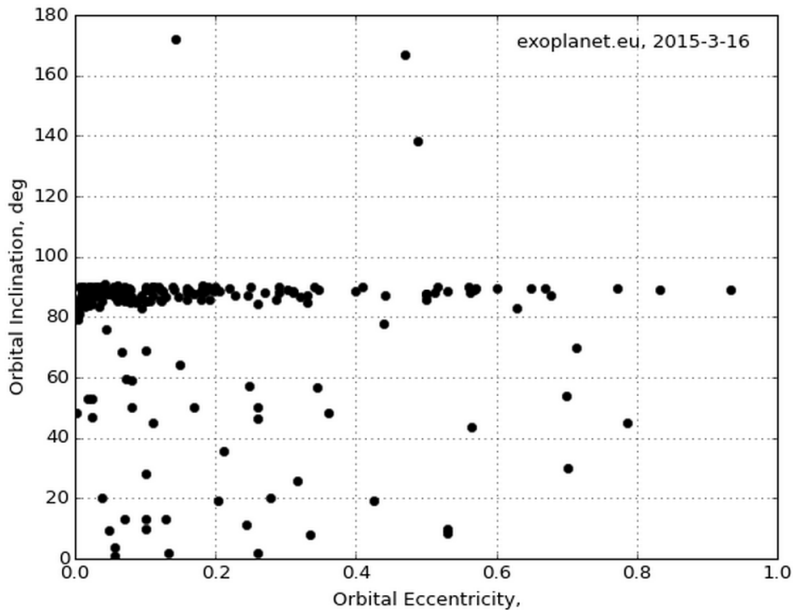
- Liczba znanych układów planetarnych $N = 1$
- Obecnie $N > 1195$ i stale rośnie

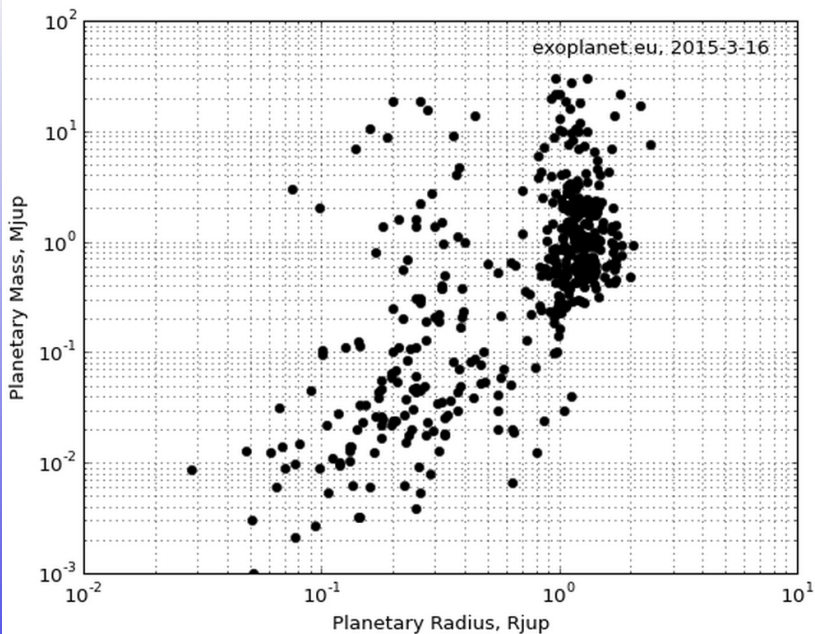
Na dzień dzisiejszy katalog egzoplanet
<http://exoplanet.eu/catalog/> obejmuje:

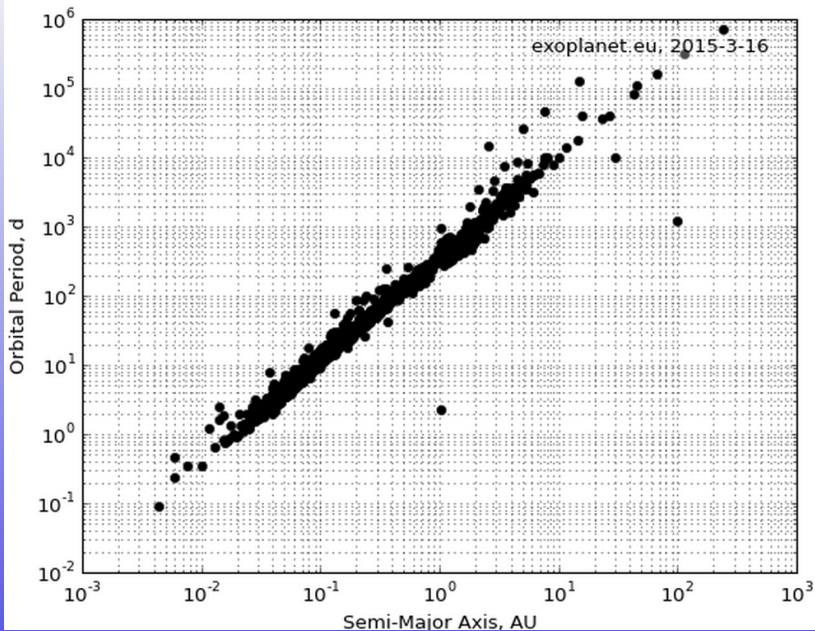
- 1195 układów planetarnych
- 1897 planet
- 487 układów z więcej niż jedną planetą
- około 200 kolejnych niepotwierdzonych planet

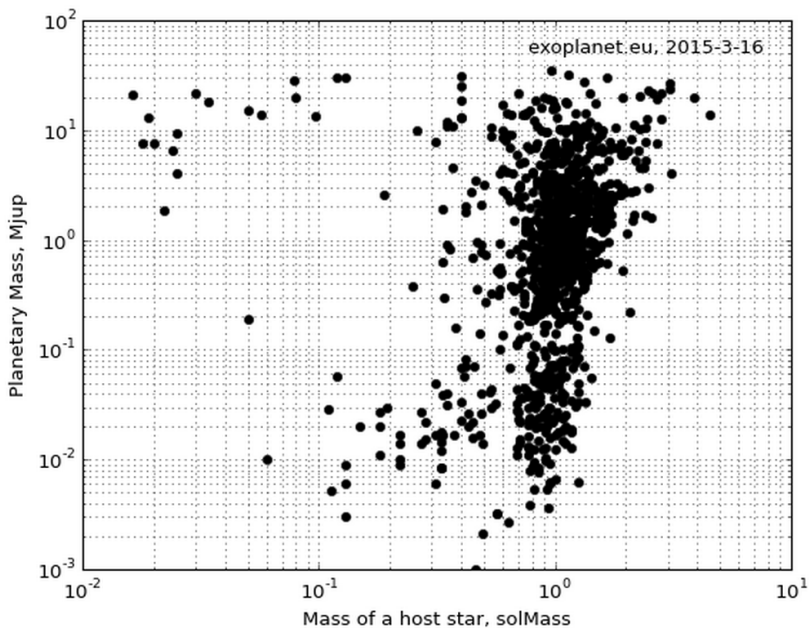
- Układ składa się z 4 planet skalistych $0.4R_{\oplus} < R < R_{\oplus}$ wewnątrz oraz 4 gazowych gigantów $3.9R_{\oplus} < R < 11.2R_{\oplus}$
- orbity są prawie kołowe $0.007 < e < 0.12$, $\bar{e} = 0.06$
- orbity są prawie w jednej płaszczyźnie $0.33^{\circ} < i < 6.3^{\circ}$
- moment pędu Słońca jest bardzo mały $J_{\odot} \simeq 0.005J_{\text{tot}}$
- równik Słońca jest nachylony pod małym kątem $\alpha = 6^{\circ}$ do płaszczyzny niezmienniczej Laplace'a
- rozmiary orbit spełniają w przybliżeniu regułę Titiusa-Bodego











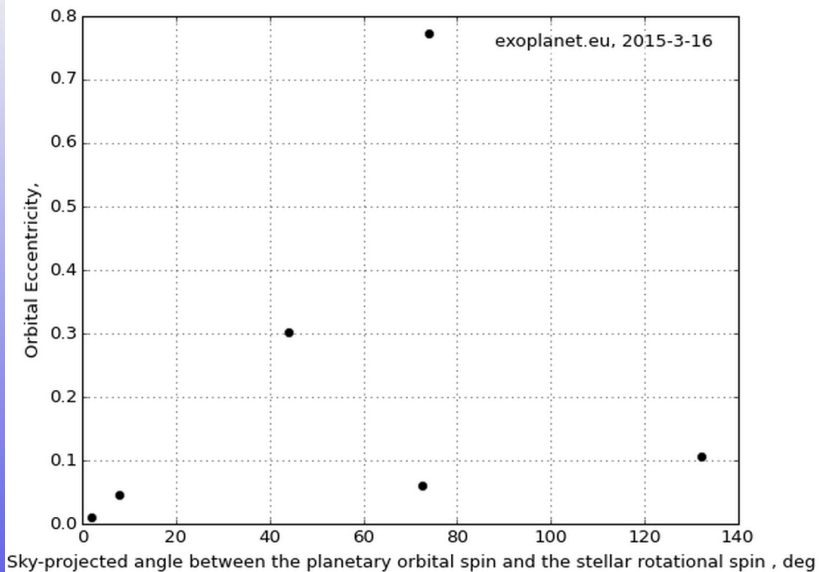


Table 1. Planet occurrence rates around FGK stars

Study	Technique	Period range	Size range	Occurrence [%]
Wright et al. (2012)	RV	< 10 d	> 30 M_{\oplus}	1.20 ± 0.38
Mayor et al. (2011)	RV	< 11 d	> 50 M_{\oplus}	0.89 ± 0.36
Cumming et al. (2008)	RV	< 5.2 yr	>100 M_{\oplus}	8.5 ± 1.3
		<100 d	>100 M_{\oplus}	2.4 ± 0.7
Howard et al. (2010)	RV	<50 d	3–10 M_{\oplus}	$11.8^{+4.3}_{-3.5}$
		<50 d	10–30 M_{\oplus}	$6.5^{+3.0}_{-2.3}$
Mayor et al. (2011)	RV	<50 d	3–10 M_{\oplus}	16.6 ± 4.4
		<50 d	10–30 M_{\oplus}	11.1 ± 2.4
		<10 yr	>50 M_{\oplus}	13.9 ± 1.7
Fressin et al. (2013)	Transit	<10 d	6–22 R_{\oplus}	0.43 ± 0.05
		<85 d	0.8–1.25 R_{\oplus}	16.6 ± 3.6
		<85 d	1.25–2 R_{\oplus}	20.3 ± 2.0
		<85 d	2–4 R_{\oplus}	19.9 ± 1.2
		<85 d	1.25–22 R_{\oplus}	52.3 ± 4.2
Petigura, Howard & Marcy (2013)	Transit	5–100 d	1–2 R_{\oplus}	26 ± 3
		5–100 d	8–16 R_{\oplus}	1.6 ± 0.4

Table 2. Occurrence rates of “Earth-like planets”

Type of star	Type of planet	Approx. HZ boundaries* [S/S_{\oplus}]	Occurrence rate [%]	Reference
M	1-10 M_{\oplus}	0.75-2.0	41^{+54}_{-13}	1
FGK	0.8-2.0 R_{\oplus}	0.3-1.8	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	2
FGK	0.5-2.0 R_{\oplus}	0.8-1.8	34 ± 14	3
M	0.5-1.4 R_{\oplus}	0.46-1.0	15^{+13}_{-6}	4
M	0.5-1.4 R_{\oplus}	0.22-0.80	48^{+12}_{-24}	5
GK	1-2 R_{\oplus}	0.25-4.0	11 ± 4	6
FGK	1-2 R_{\oplus}	0.25-4.0 [†]	~ 0.01	7
FGK	1-4 R_{\oplus}	0.35-1.0	$6.4^{+3.4}_{-1.1}$	8

Czego się dowiedzieliśmy?

Czy Układ Słoneczny jest jedyny w Galaktyce?

Ile gwiazd typu Słońca posiada planety?

Czy Ukł. Słoneczny jest typowy?

Czy obecność Jowisza jest typowa

Czy pojęcie „ekliptyki” ma sens

Czy występują rezonanse?

Czy spin gwiazdy jest równoległy do krętu układu?

NIE

conajmniej 10%

NIE

TAK, ale $0 < e < 0.9$, $\bar{e} \simeq 0.2$

TAK

TAK, szczególnie pomiędzy gigantami

NIE

Prawie potwierdzone jest istnienie całego ZOO egzotycznych (z naszego punktu widzenia) układów planetarnych:

- L (librator)
 - C1 — „Ziemia” orbituje poza orbitą „Jowisza”
 - C2 — „Ziemia” orbituje wewnątrz orbity „Jowisza”
 - C3 — „Ziemia” orbituje w punkcie L_4 „Jowisza” w rezonansie 1:1
- S (satelita) — planeta w układzie podwójnym gwiazd blisko jednej z nich
- P (planeta) — planeta w układzie podwójnym gwiazd orbitująca dookoła obu składników
- M (moon) — „Ziemia” jest księżycem „Jowisza”

Klasyczna teoria formowania się planet jest aktualnie w kryzysie spowodowanym konfrontacją z danymi obserwacyjnymi egzoplanet.

Zarys teorii

- 1 obłok otaczający gwiazdę kolapsuje do postaci dysku
- 2 niestabilności powodują uformowanie *planetozymali*
- 3 zderzenia i sklejanie planetozymali powoduje utworzenie jąder planet
- 4 akrecja (gazu lub pyłu, w zależności od tzw. linii śniegu) powoduje wzrost do obecnych rozmiarów
- 5 migracja i rezonanse powodują utrwalenie struktury układu

Metody szukania egzoplanet

Wyniki dotyczące układów pozasłonecznych są silnie przekształcone poprzez obserwacyjny **bias**.

Metoda szukania	BIAS
prędkość radialna	$T, M, M_* \Omega_*$
astrometria	a, M, T
tranzyty (zaćmienia)	i, R, R_*
mikrosoczewkowanie	brak potwierdzenia
bezpośrednie zdjęcia	R, a

T – okres orbitalny, a – wielka półoś orbity, M – masa planety, M_* – masa gwiazdy, Ω_{ast} – prędkość kątowna gwiazdy, R – promień planety, R_* – promień gwiazdy