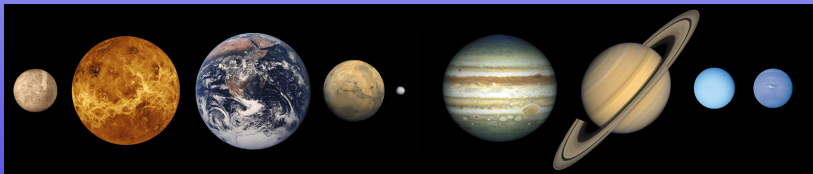


# Podstawy astrofizyki i astronomii

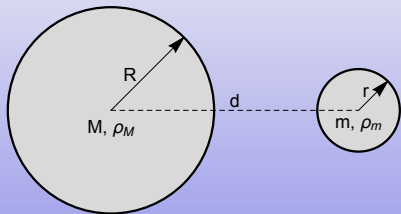
Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

22 marca 2016



Kiedy siła pływowa stanie się większa niż samograwitacja ciała?



$$\frac{2GM}{R^3} r > \frac{Gm}{r^2}$$

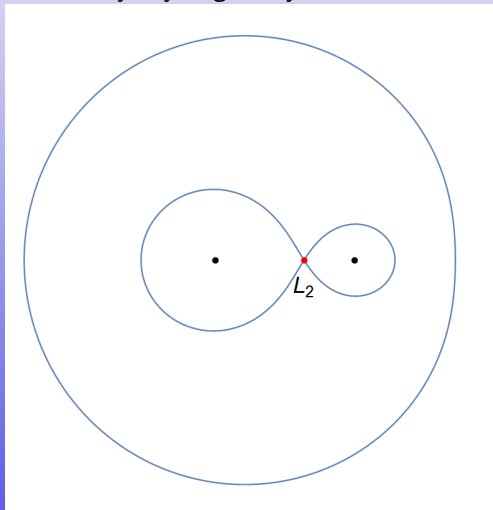
Tradycyjnie, wynik zapisujemy za pomocą gęstości średnich:

$$\frac{d}{R} < \sqrt[3]{2} \left( \frac{\bar{\rho}_M}{\bar{\rho}_m} \right)^{1/3}.$$

Powyższy wynik należy uznać za orientacyjny, z uwagi m.in. na siły niegrawitacyjne/mechaniczne.

# Obszar Roche'a, wypływ Roche'a

Nie należy mylić *granicy Roche'a* ze **strefą Roche'a**



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

## Częściowy rezonans 1:1

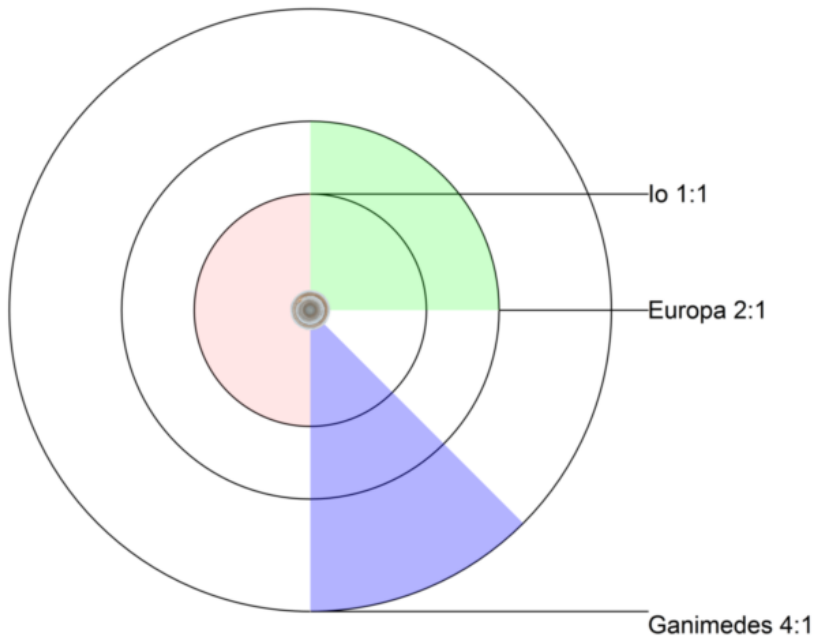


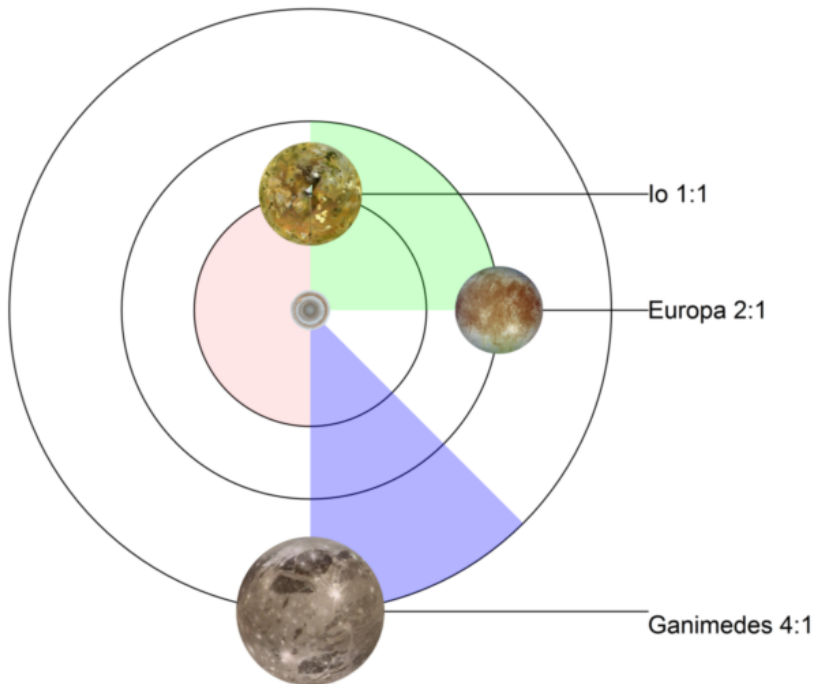
Ziemia - Księżyc

## Pełny rezonans 1:1

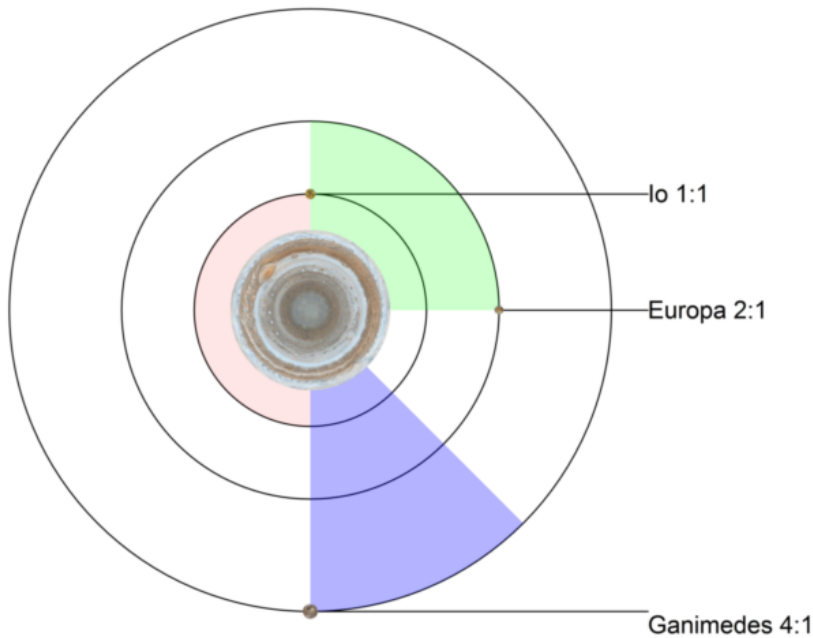


Pluton - Charon



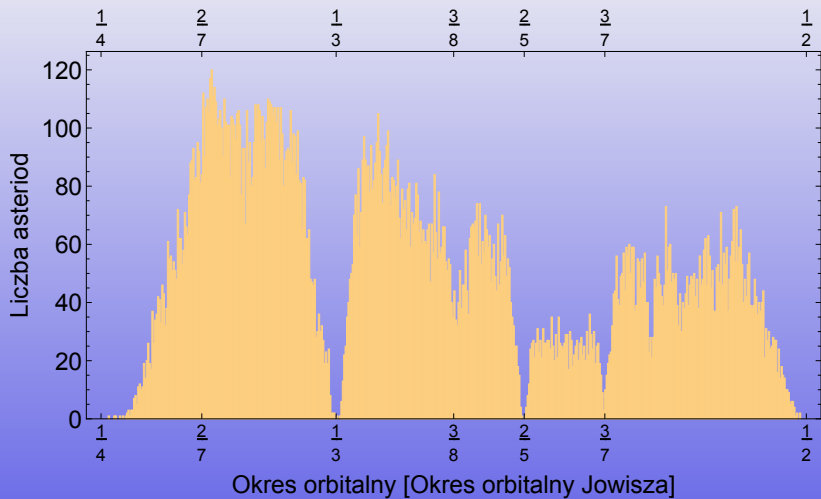






# Pojęcie bieguna w przypadku rotacji synchronicznej

- 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



# Rezonans bez tłumienia: przypomnienie

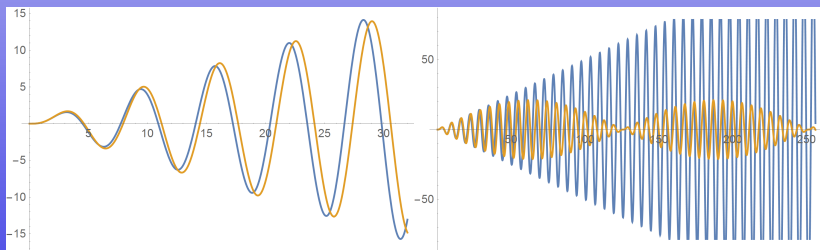
$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = A \sin \omega t, \quad x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

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)

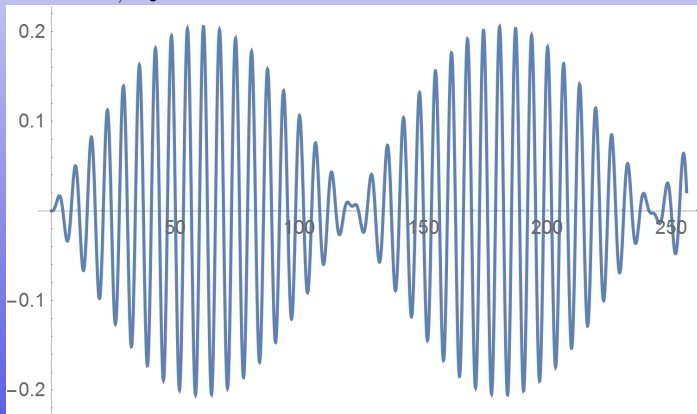
$$x(t) = \frac{A}{2\omega_0^2} (\sin(\omega t) - \omega t \cos(\omega t))$$



# Rezonans nieliniowy bez tłumienia

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

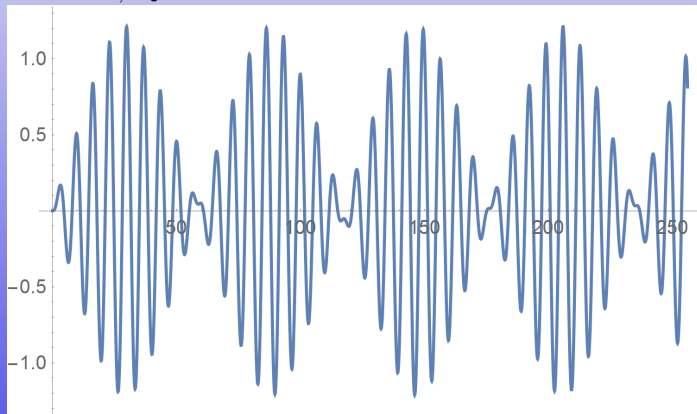
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.01$$



# Rezonans nieliniowy bez tłumienia

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

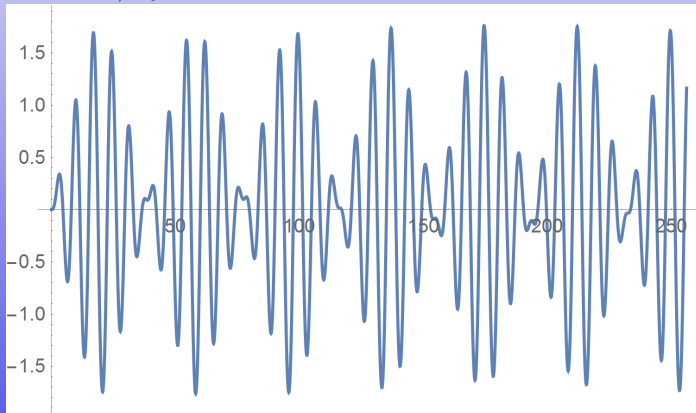
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.1$$



# Rezonans nieliniowy bez tłumienia

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

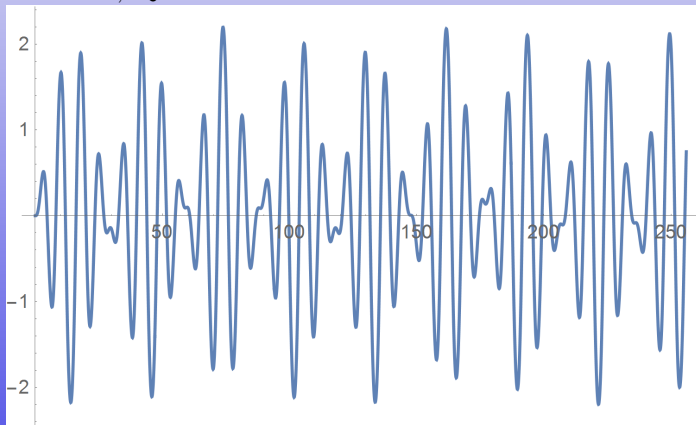
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.2$$



# Rezonans nieliniowy bez tłumienia

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

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

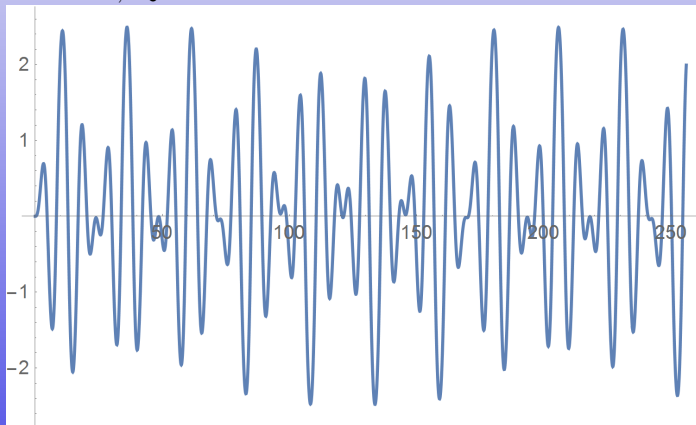




# Rezonans nieliniowy bez tłumienia

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

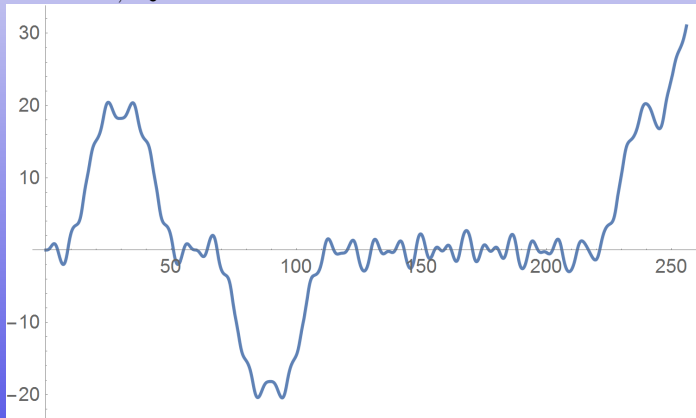
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.4$$



# Rezonans nieliniowy bez tłumienia

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

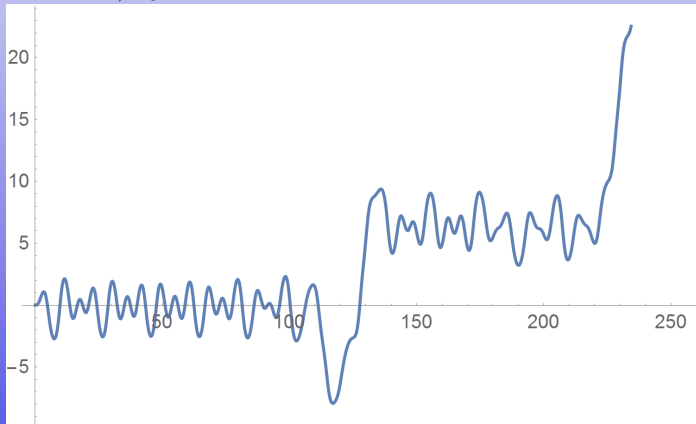
$$\omega = 0.95, \omega_0 = 1 \quad A = 0.5$$



# 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

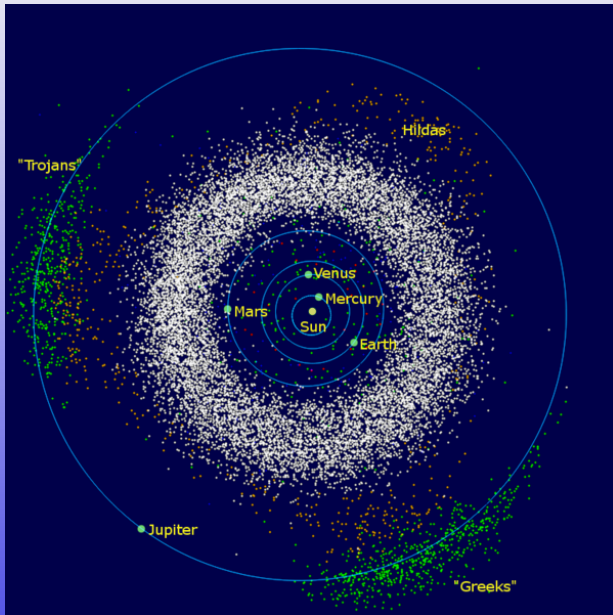
- 1 część rezonansów orbitalnych wydaje się dziełem przypadku
- 2 niektóre działają stabilizująco, inne destruktywnie
- 3 „siła” rezonansu  $n : m$  maleje ze wzrostem  $n$  i  $m$
- 4 rezonans działa jak wymuszony, ale energia nie jest pompowana do układu z zewnątrz w zwykłym sensie: energia całego 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 ?

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

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

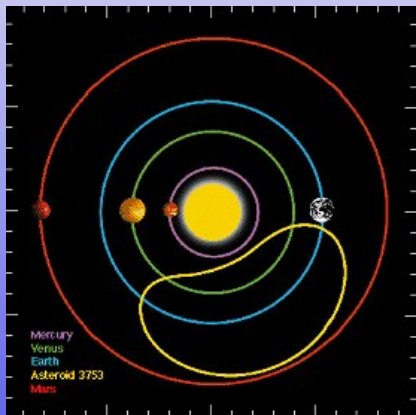
# Planetoidy trojańskie



# Dodatkowe „księżyce” Ziemi

Istnieją obiekty orbitujące z Ziemią w rezonansie 1:1

- 1 2010 TK<sub>7</sub> (L4)
- 2 3753 Cruithne (1:1)



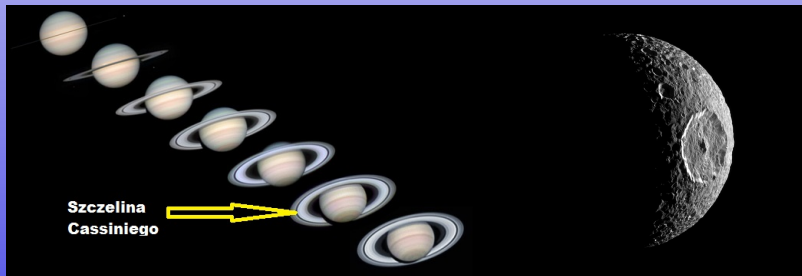
Obiekty te w celach propagandowo-marketingowych nazywane bywają księżycami Ziemi.



# Pierścień Saturna

Najbardziej spektakularnym wizualnie przykładem struktury rezonansowej są pierścienie Saturna.

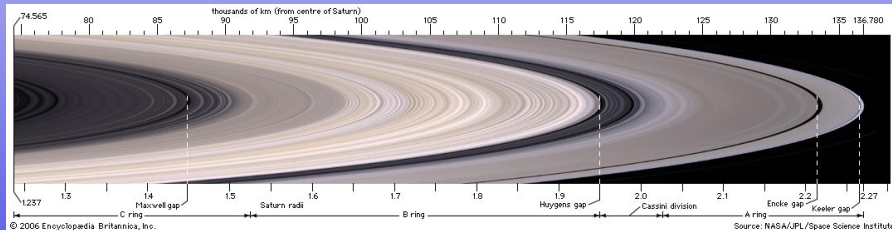
- szczelina Cassiniego — rezonans 1:2 z Mimasem
- przerwa Enckego — rezonans 1:1 z Pan-em
- krawędź pierścienia A — rezonans 7:6 z Janusem i Epimetheusem (orbita typu „podkowa”)



# Pierścień Saturna

Najbardziej spektakularnym wizualnie przykładem struktury rezonansowej są pierścienie Saturna.

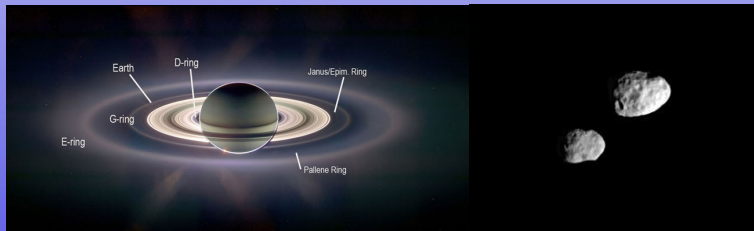
- szczelina Cassiniego — rezonans 1:2 z Mimasem
- przerwa Enckego — rezonans 1:1 z Pan-em
- krawędź pierścienia A — rezonans 7:6 z Janusem i Epimetheusem (orbita typu „podkowa”)



# 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 ( $\text{CH}_4$ ) **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).

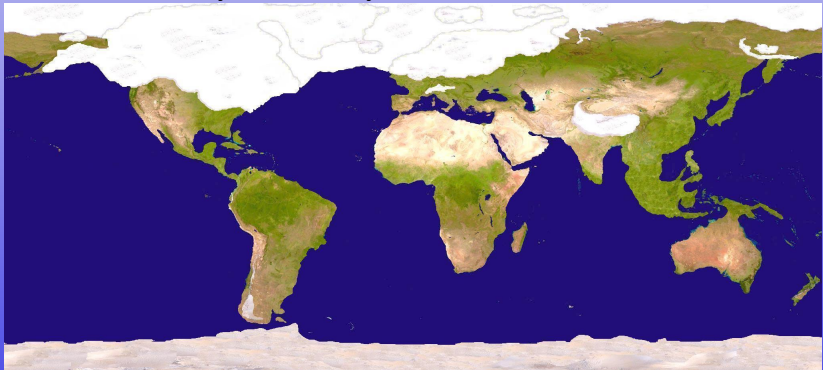


# Ostatnie maksimum zlodowacenia

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

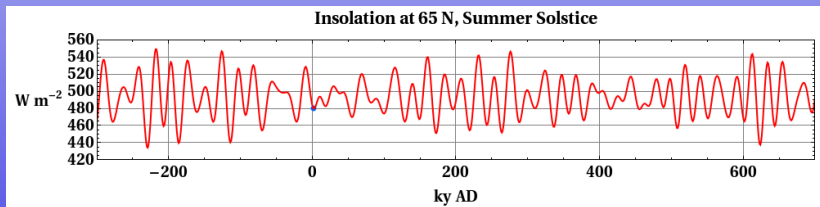
Co dało tak drastyczne zmiany w bardzo krótkim czasie?



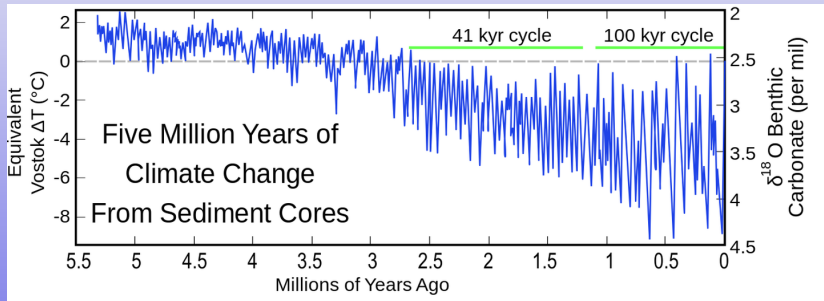
# Cykle Milankovica

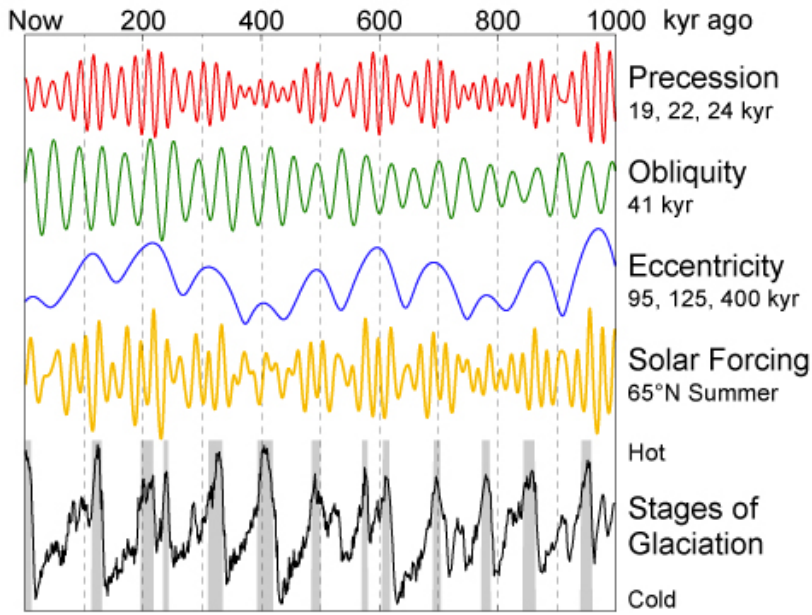
Elementy orbity Ziemi podlegają okresowym zmianom, wywołanym perturbacjami Jowisza, Saturna i innych planet:

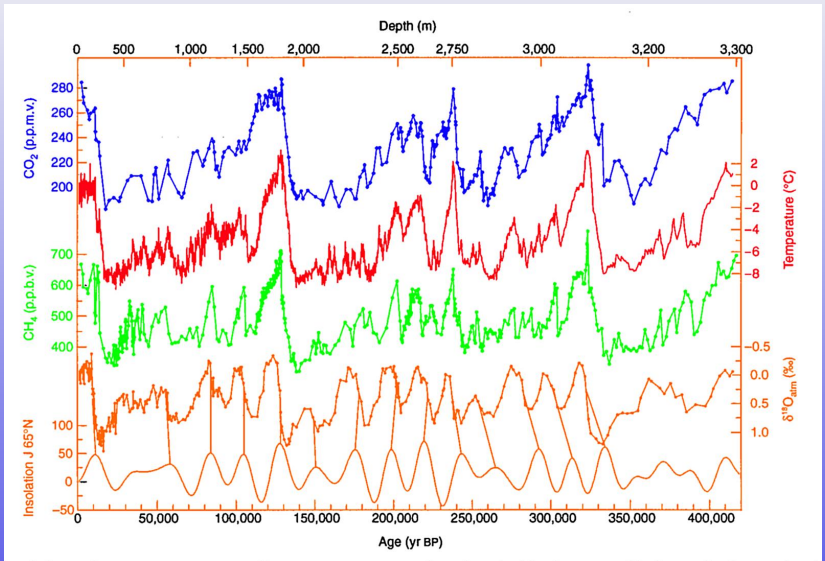
- 1 zmiana mimośrodów orbity w zakresie  $0 \leq e < 0.05$  z okresem około 100 tysięcy lat (aktualnie:  $e = 0.0167$ )
- 2 wahania nachylenia osi obrotu Ziemi z zakresie  $21.5 < \alpha < 24.5$  z okresem 41 000 lat (obecnie  $\alpha = 23.5^\circ$ )
- 3 precesja peryhelium z okresem około 112 000 lat (obecnie Ziemia jest w peryhelium 4 stycznia)
- 4 precesja osi obrotu Ziemi z okresem około 26 000 lat



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







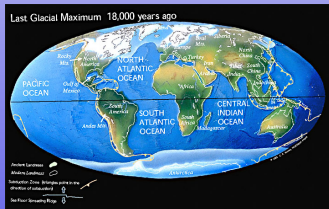
# Stan „chłodni” i „cieplarni”

Ziemia oscyluje pomiędzy dwoma stanami stabilnymi:

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

## Chłodnia

lądolody na biegunach  
niskie stężenie CO<sub>2</sub>  
20% historii



## Cieplarnia

brak stałego zlodowacenia  
wysokie stężenie CO<sub>2</sub>  
80% historii



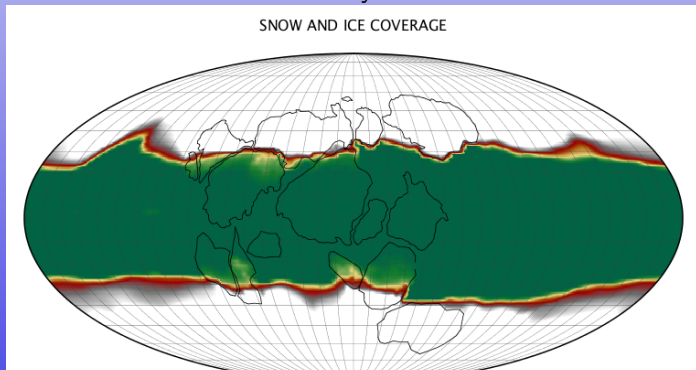
Obecnie Ziemia jest w stanie chłodni, w trakcie interglacjału.

# 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 paleozoiku
- 2 wymieranie kreda/trzeciorzęd wyznaczające koniec ery mezozoiku

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

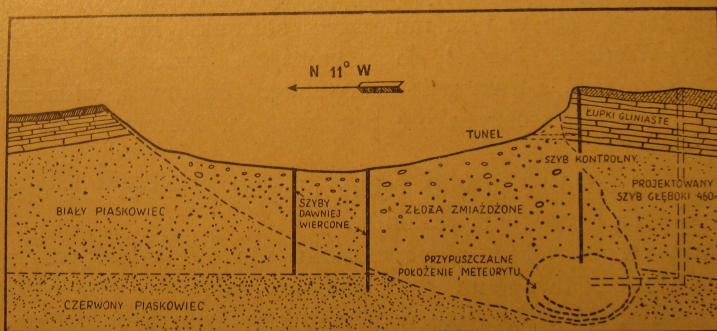
Adres: Meteor Crater Rd, AZ, USA



StreetView

# Przykład krateru meteorytowego

Adres: Meteor Crater Rd, AZ, USA



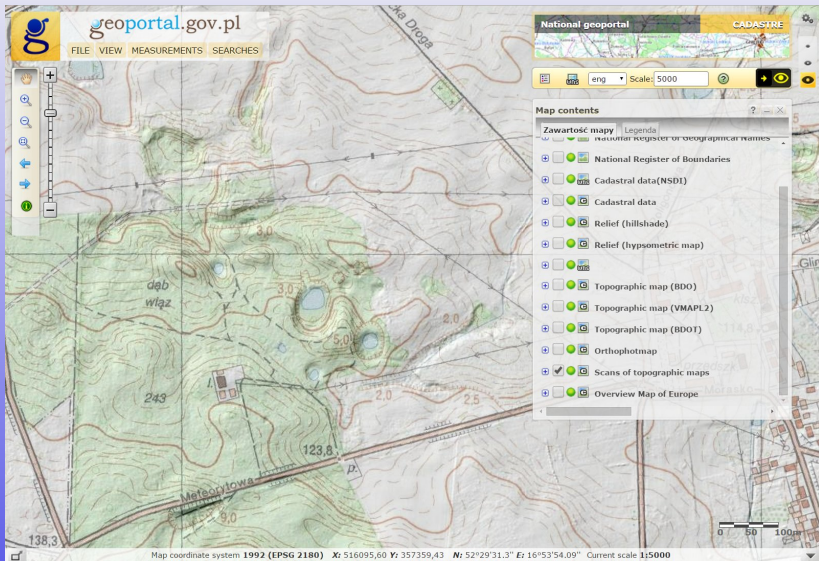
Rys. 57. Schematyczny przekrój Parowu Diabelskiego i miejsca przedsięwziętych w poszukiwaniu meteorytów wierceń.

StreetView

The screenshot displays the National Geoportal interface. The main map area shows a 3D topographic view of a crater. The interface includes a search bar at the top left, navigation tools on the left side, and a 'Map contents' panel on the right. The 'Map contents' panel lists several layers, including 'Usługa przeglądania hipsometrii o stałej sk', 'National Register of Geographical Names', 'National Register of Boundaries', 'Cadastral data(NSDI)', 'Cadastral data', 'Relief (hillshade)', 'Relief (hypsonetric map)', 'Topographic map (BDO)', 'Topographic map (VMAPL2)', 'Topographic map (BDOT)', and 'Orthophotmap'. The map shows a crater with a scale bar at the bottom right. The map coordinate system is 1992 (EPSG 2180) with coordinates X: 515987,12 Y: 357594,91 N: 52°29'28.02" E: 16°54'6.74" and a current scale of 1:5000.

## Morasko krater 3: fotosfera

# 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



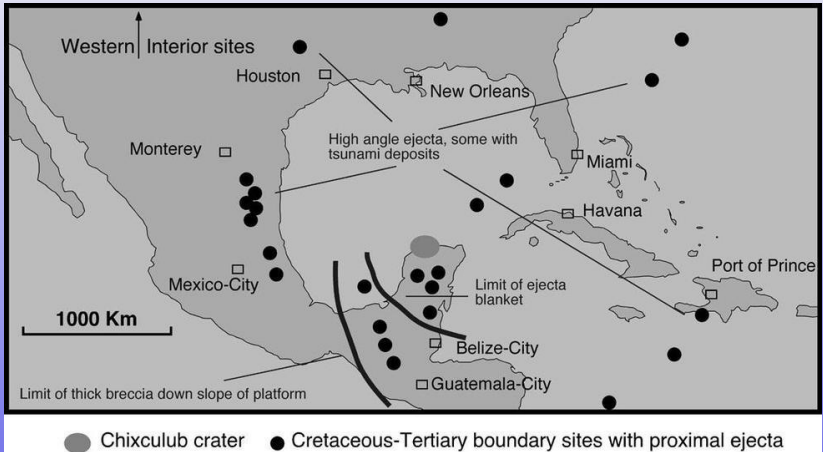
## Morasko krater 3: fotosfera





Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Chichen Itza Cenote

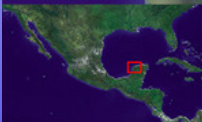


## Chichen Itza Cenote





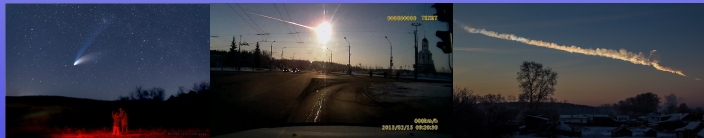
Each blue dot below represents a cenote such as the one to the left.



## 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
- 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
  - 5 GW150914 — pierwsza obserwacja fal grawitacyjnych (złączenie pary czarnych dziur o masach 29 i 36  $M_{\odot}$ )



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

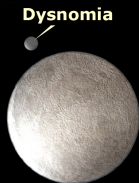
Trans-Neptunian objects

Plutoids

Small Solar System bodies

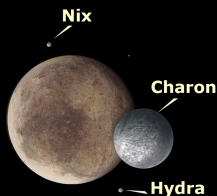
Comets

# Największe znane obiekty transneptunowe



Dysnomia

**Eris**

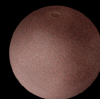


Nix

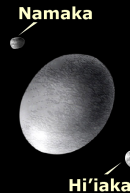
Charon

Hydra

**Pluton**



**Makemake**



Namaka

Hi'iaka

**Haumea**



**Sedna**



**2007 OR<sub>10</sub>**

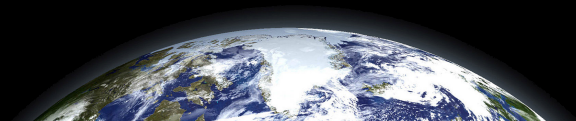
Weywot



**Quaoar**



Vanth  
**Orkus**



W ubiegłym roku dwie kluczowe misje:

- 1 Dawn — misja do Ceres (aktualnie na najniższej orbicie)
- 2 New Horizons — misja do Plutona (wypełniona zgodnie z planem)