

# Astrofizyka Układów Planetarnych

5

POWIERZCHNIE  
CIAŁ PLANETARNYCH



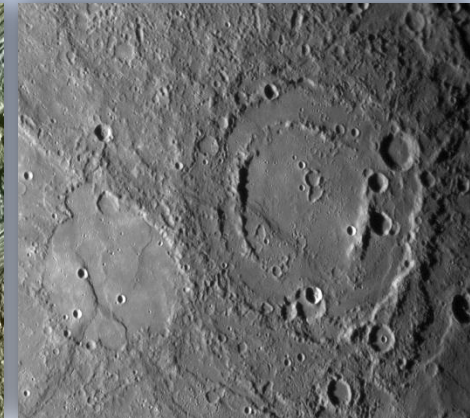
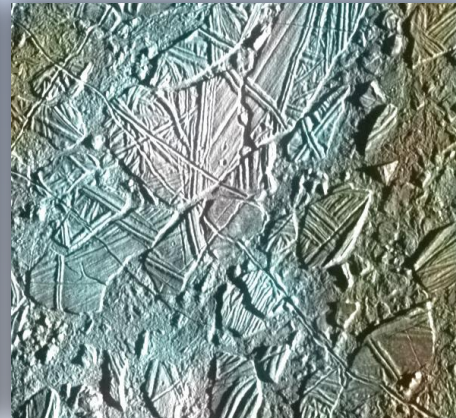
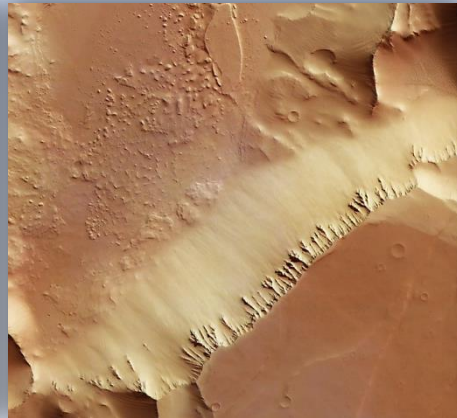
# Powierzchnie planet

## Różnorodność powierzchni w Układzie Słonecznym

Wszystkie obiekty w Układzie Słonecznym z wyjątkiem Słońca i planet olbrzymów posiadają stałe powierzchnie. Wygląd powierzchni jest efektem działania procesów zachodzących wewnątrz ciała, w jego atmosferze i szeroko pojętej przestrzeni międzyplanetarnej. Różnorodność powierzchni jest odzwierciedleniem bogactwa fizycznego układów planetarnych.

Mamy do czynienia z powierzchniami:

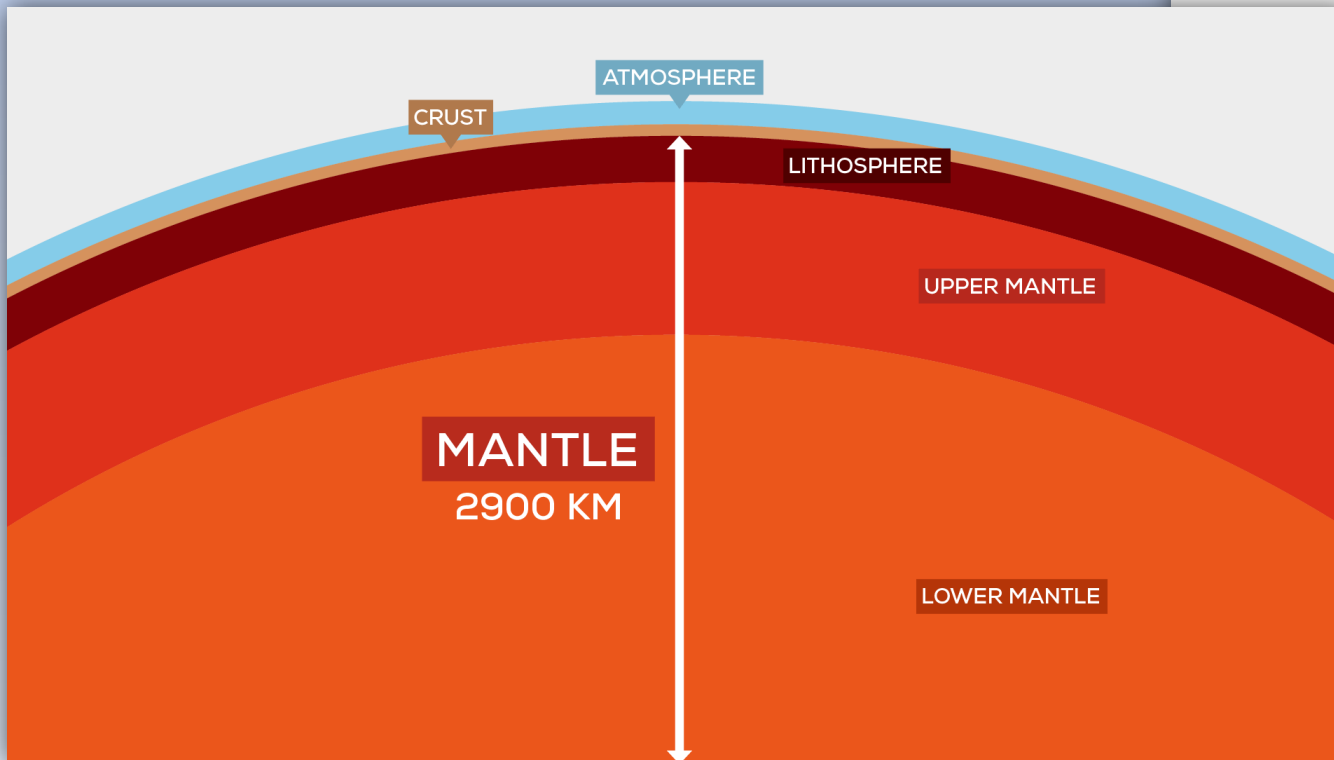
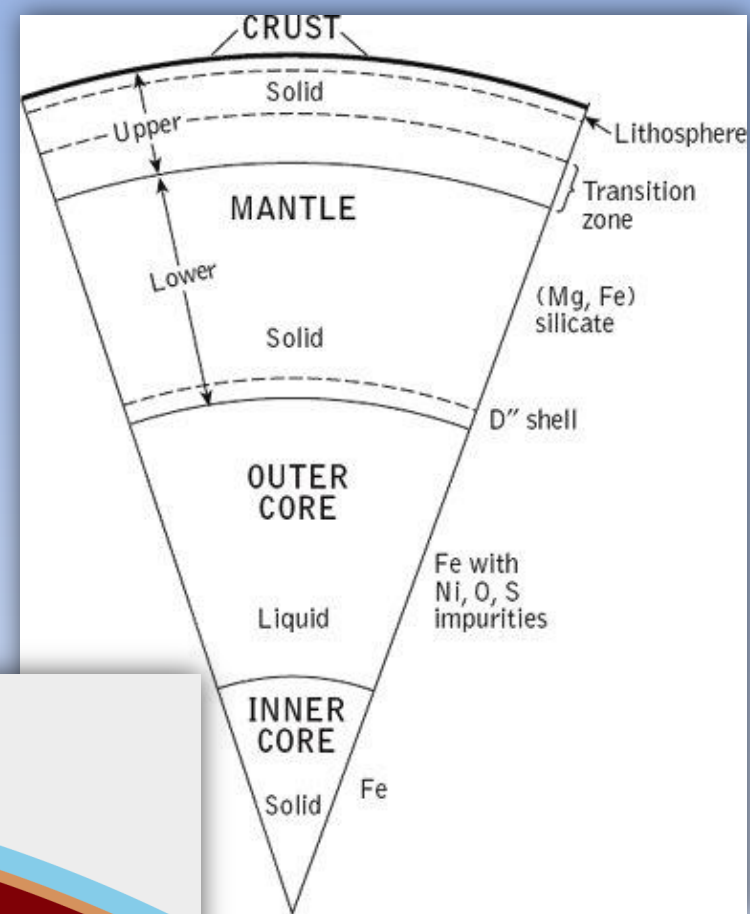
- jasnymi i ciemnymi,
- pokrytymi gęsto kraterami lub prawie bez nich,
- wykazującymi aktywność wulkaniczną (obecnie lub w przeszłości),
- noszącymi ślady aktywności tektonicznej (uskoki, skarpy, grzbiety),
- ...



# Powierzchnie planet

## Warstwy przypowierzchniowe (na przykładzie Ziemi)

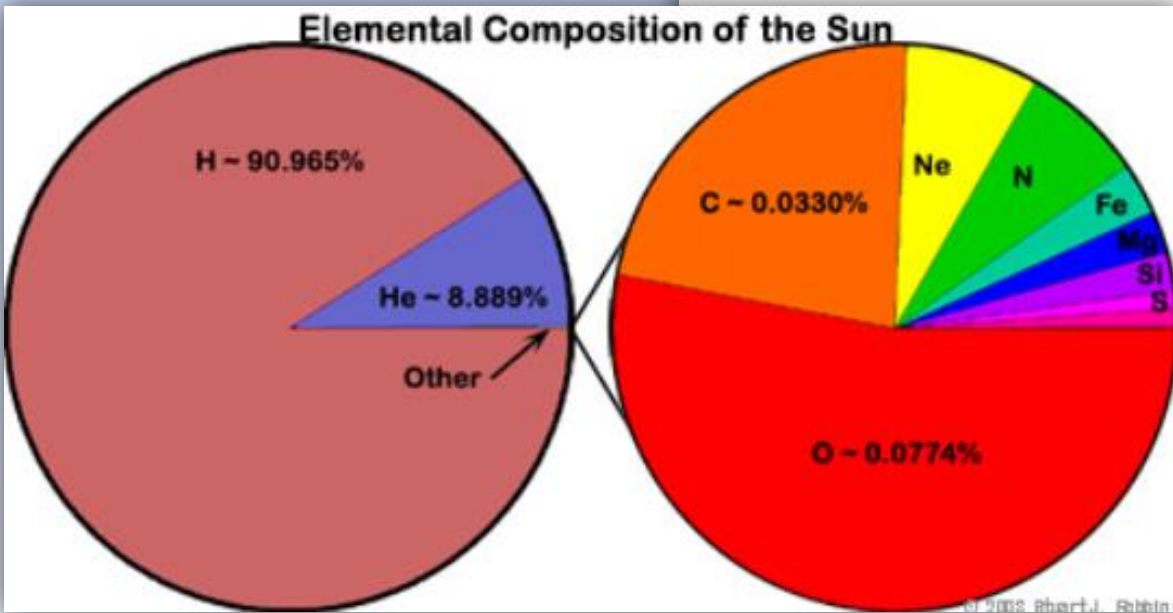
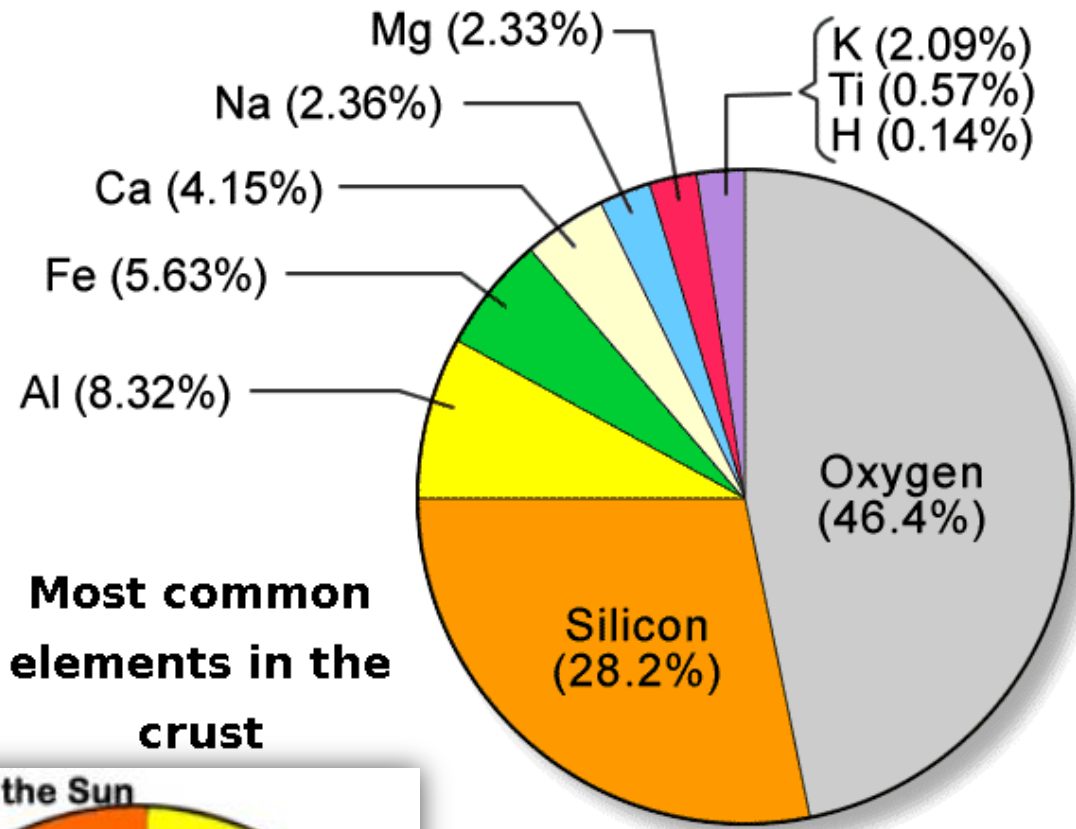
- *skorupa* (kontynentalna, oceaniczna), średnia grubość odpowiednio 6 km i 35 km
- *litosfera* (skorupa i górna część płaszcza), warstwa elastyczna o grubości do 200 km
- *astenosfera*, warstwa plastyczna umożliwiająca dryf kontynentów, grubość 200-300 km



# Powierzchnie planet

## Pierwiastki

Skład chemiczny skorupy nie odzwierciedla słonecznej obfitości pierwiastków (warunki w mgławicy protoplanetarnej, dyferencjacja obiektu)



# Powierzchnie planet

## Skąły i minerały

Powierzchnie ciał skalistych (skorupa) zbudowane są ze skał i lodów. **Skąły są dużymi skupiskami minerałów jednorodnych lub różnorodnych.** Właściwości skał i minerałów badane są przez petrologię i mineralogię.



- **Minerał to naturalnie występujący w postaci stałej (krystalicznej) pierwiastek lub związek chemiczny.**
- Cechy minerału zależą od składu chemicznego i struktury krystalicznej.
- 95% minerałów to minerały rzadkie.
- Lód wodny i inne lody astrofizyczne są minerałami.
- Minerały skałotwórcze to główne minerały tworzące skały. Jest ich około 200.

# Powierzchnie planet

## Skąły i minerały

Minerały klasyfikowane są ze względu na ich budowę chemiczną (gromady):

- pierwiastki rodzime, stopy (miedź, srebro, **grafit**, elektrum (Ag+Au), krzemki (krzem+metal))
- siarczki i podobne (zawierają  $S^{2-}$ , np. **piryt**)
- tlenki i wodorotlenki (zawierają  $O^{2-}$ , np. hematyt)
- halogenki (sole kwasów halogenowodorowych, np. **chlorek sodu**)
- węglany i podobne (zawierają  $(CO_3)^{2-}$ , np. kalcyt) **sole kwasów tlenowych**
- siarczany i podobne (zawierają  $(SO_4)^{2-}$  np. **baryt**)
- fosforany i podobne (zawierają  $(PO_4)^{3-}$ , np. apatyt)
- krzemiany i podobne (najbardziej rozpowszechnione minerały, zawierają  $SiO_4^{4-}$ , np. **forsteryt**)
- organiczne (substancje krystaliczne powstałe z udziałem materiału organicznego, np. węglowodorów)
- lody (lekke związki chemiczne w stanie stałym, np.:  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $CO_2$ )



*grafit*



*piryt*



*chlorek sodu*



*baryt*



*forsteryt*

# Powierzchnie planet

## Skąły i minerały

Skąły klasyfikowane są według historii ich formowania. Wyróżnia się 4 główne typy skąły: **pierwotne**, **magmowe**, **metamorficzne** i **osadowe**. Dodatkowym typem jest **brekcja**.

### Skąły pierwotne

Są to skąły, które uformowały się podczas kondensowania materii z mgławicy protoplanetarnej. Nigdy nie były poddane działaniu wysokich temperatur i ciśnień, nie przeszły transformacji we wnętrzach większych obiektów. Występują powszechnie na powierzchniach planetoid i budują meteoryty.



*chondryt*

# Powierzchnie planet

## Skąły i minerały

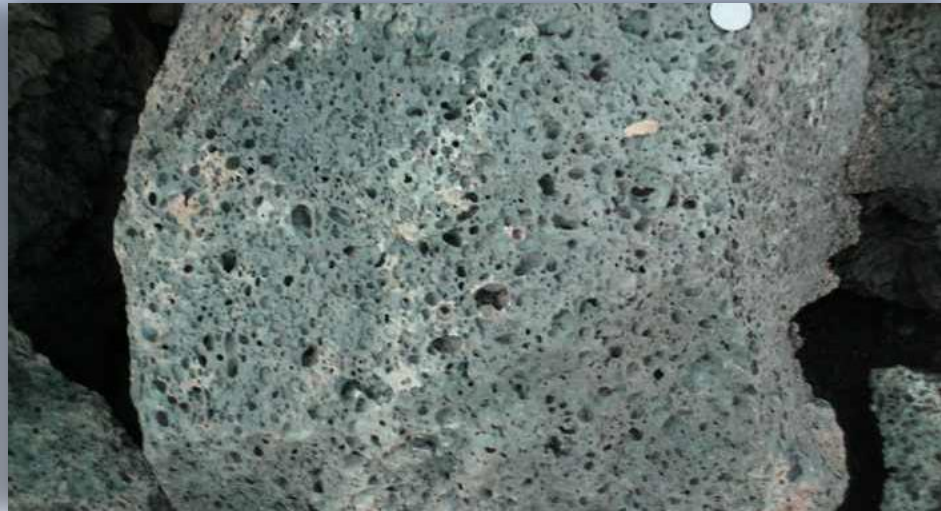
### Skąły magmowe

Skąły te powstają w wyniku zestalenia się magmy. Są najpowszechniejszym typem skął na powierzchniach obiektów, które przeszły fazę topienia. Dzielą się na dwie grupy:

- *skąły plutoniczne (głębinywe)* – powstają z magmy stygnącej pod powierzchnią; stygnięcie zachodzi wolno, dzięki temu skąły te mają *strukturę jawnokrystaliczną* (duże ziarna minerałów); przykład: granit
- *skąły wulkaniczne (wylewne)* – powstają na powierzchni; magma stygnie szybko i kryształki minerałów nie osiągają dużych rozmiarów (*struktura skrytokrystaliczna*); przykład: bazalt



*granit*



*bazalt*



# Powierzchnie planet

## Skąły i minerały

### Skąły metamorficzne

Są to skąły, które przeszły zmiany fizyczne lub/i chemiczne wskutek działania wysokich temperatur i ciśnień oraz kontaktu z aktywnymi chemicznie związkami (np. roztwory hydrotermalne). Metamorfoza zachodzi pod powierzchnią obiektu. Metamorfizowana skąła nie może ulec stopieniu, ale może mieć kontakt z magmą.

Przykłady skał metamorficznych:

- *gnejs* – powstaje np. z granitu



- *amfibolit* – powstaje ze skał wulkanicznych



- *serpentynit* – powstaje z skał bogatych w magnez



# Powierzchnie planet

## Skąły i minerały

### Skąły osadowe

Skąły te powstają na obiektach posiadających atmosferę. Są końcowym stadium przenoszenia i osadzania materiału przez wiatr, deszcz lub przepływy cieczy. Nagromadzony materiał po scementowaniu staje się skąłą. Skąły osadowe dzielą się na następujące grupy:

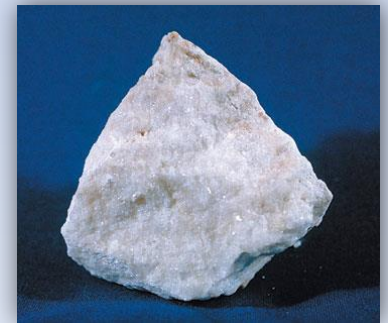
- *skąły okruchowe* – powstają wskutek niszczenia, transportu i osadzania ze starszych erodujących skął; rozmiary osadzanych okruchów wpływają na formę powstającej skąły; przykład: **piaskowiec** powstający ziaren o rozmiarach 0.1-2 mm.
- *skąły chemiczne* – powstają przy oddziaływaniu skął z substancjami chemicznymi rozpuszczonymi w wodzie lub atmosferze; przykładem jest **wapień** efekt – reakcji CO<sub>2</sub> i krzemianów.
- *skąły ewaporatowe* (ewaporaty) – powstają, gdy wyparowuje zbiornik cieczy, pozostawiają osady na jego dnie; przykładem jest sól czy **trawertyn**
- *skąły organogeniczne* – powstają z osadzania się materiału organicznego; przykłady: kreda, węgiel



*piaskowiec*



*wapień*



*trawertyn*

# Powierzchnie planet

## Skąły i minerały

### Brekcja (okrucowiec)

Skąły te skądają się z ostrokrawędzistych okruców o różnych rozmiarach scementowanych ze sobą. Typy brekcji:

- *uderzeniowa* – powstaje przy upadku meteorytów; często pokrywa dna kraterów
- *wulkaniczna* – powstaje z materiału piroklastycznego (bomby wulkaniczne, pumeks, popioły wulkaniczne)
- *tektoniczna* – efekt kruszenia skął podczas ruchów tektonicznych i wtórnego spojenia okruców
- *hydrotermalna* - powstaje pod działaniem gorącej wody w wnękach skalnych (w obszarze uskóków tektonicznych)
- *osadowa* – osadowe skąły okrucowe



*brekcja osadowa*



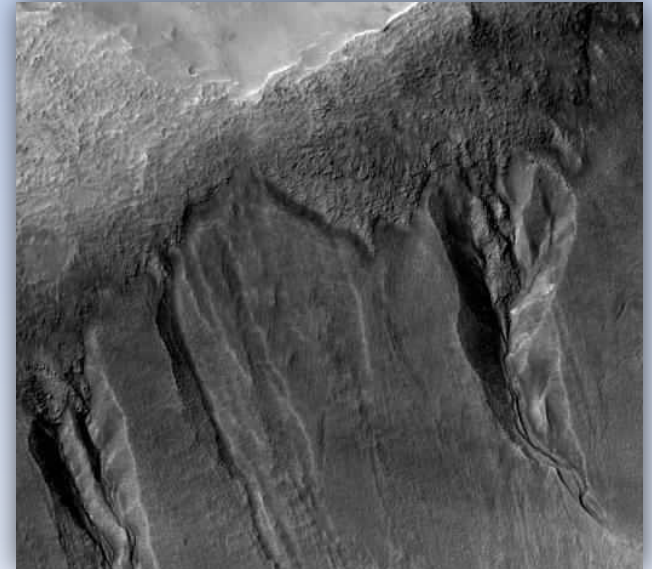
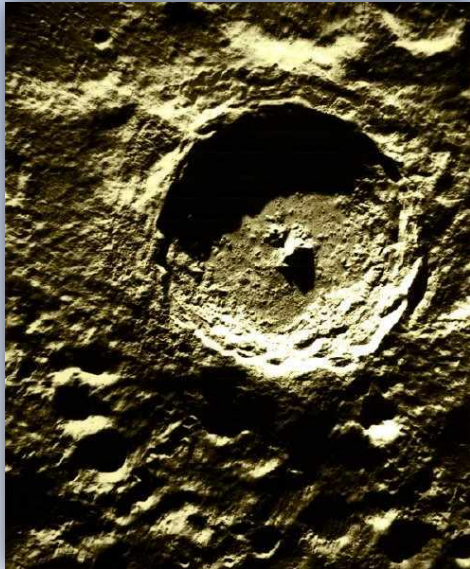
*brekcja uderzeniowa*

# Powierzchnie planet

## Procesy kształtujące powierzchnie

Każdy obiekt w Układzie Słonecznym posiadający stałą powierzchnię posiada wyraźne struktury morfologiczne, np.: góry, wulkany, kratery, kaniony, uskoki. Struktury te są efektem działania procesów:

- *endogenicznych* (wewnętrznych) – napędzane są energią zgromadzoną wewnątrz ciała, jego własną grawitacją i obrotem, np. tektonika, wulkanizm
- *egzogenicznych* (zewnątrznych) – są efektem działania czynników zewnętrznych, działających w atmosferze planety i przestrzeni międzyplanetarnej, np.: upadki meteorytów, wietrzenie, erozja

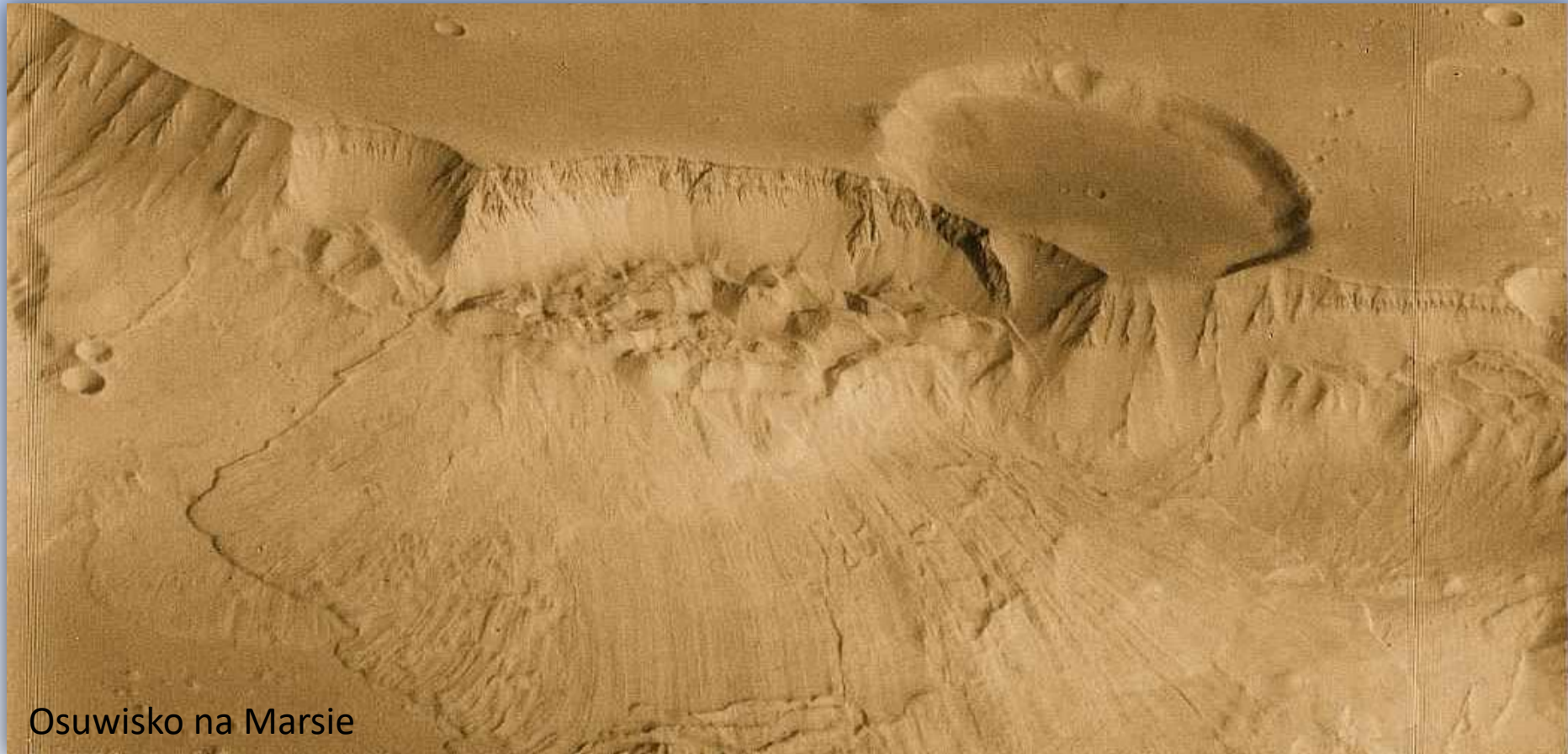


# Powierzchnie planet

## Procesy endogeniczne – grawitacja

Siła grawitacji odpowiedzialna jest za **ruchy masy w dół** powierzchni nachylonych: osuwiska, spływy błotne, lawiny, strumienie lawy, ruch lodowców.

Zjawiska te mogą wystąpić samoistnie (przekroczenie **kąta tarcia wewnętrznego**) lub być zapoczątkowane przez inne procesy endo- i egzogeniczne (trzęsienia, obecność cieczy).



Osuwisko na Marsie

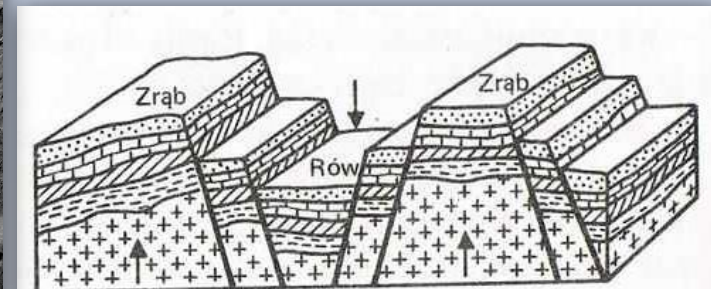
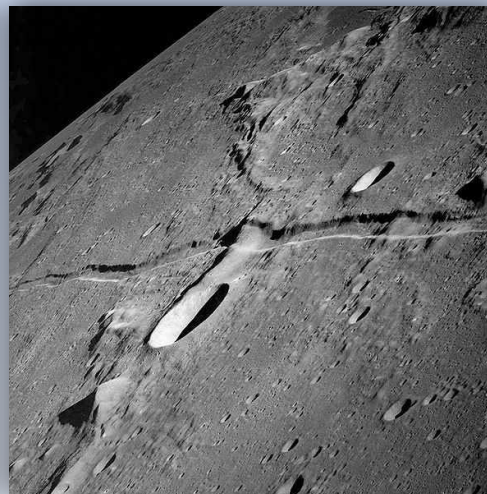
# Powierzchnie planet

## Procesy endogeniczne – tektonika

Ruchy tektoniczne to przemieszczenia skorupy pod wpływem procesów zachodzących wewnątrz obiektu. Ruchy te powodują deformację powierzchni. Typowe struktury tektoniczne to:

- *fałdy* – ciągłe deformacje warstw skalnych powodujące powstawanie fałdów (powstające struktury: antyklina i synklina)
- *uskoki* – deformacje powodujące przerwanie ciągłości warstw skalnych i ich względne przemieszczenie wzdłuż powstałej płaszczyzny uskokowej (powstające struktury: zręby, zapadliska/rowy)

Przyczyną ruchów tektonicznych może być kurczenie/rozciąganie skorupy lub ruchy płyt tektonicznych.



# Powierzchnie planet

## Procesy endogeniczne – wulkanizm

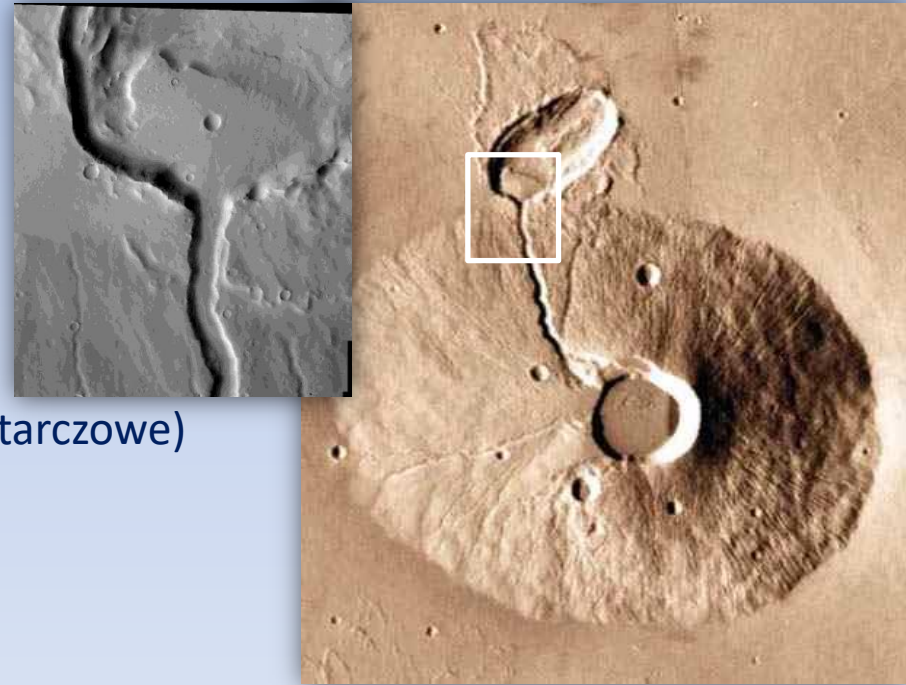
Wiele obiektów w Układzie Słonecznym posiada struktury wulkaniczne, ale tylko nieliczne wykazują aktywność wulkaniczną obecnie (Ziemia, Io, Enceladus). Dla zaistnienia aktywności wulkanicznej konieczne jest istnienie płynnego materiału o obniżonej gęstości (np. magma). Ciepło niezbędne do powstania takiego materiału może pochodzić z:

- ciepła nagromadzonego podczas formowania obiektu (akrecja, dyferencjacja)
- rozpadu pierwiastków promieniotwórczych
- oddziaływań pływowych

Typowe utwory wulkaniczne to:

- stożki wulkaniczne (stratowulkany, wulkany tarczowe)
- kratery wulkaniczne / kaldery
- rury/jaskinie i potoki lawowe
- *atmosfera*

Cechy utworów wulkanicznych zależą od lepkości „czynnika aktywnego” (magmy), jego temperatury, gęstości i składu, budowy skorupy i warunków fizycznych w niej panujących, siły grawitacji i obecności atmosfery.



# Powierzchnie planet

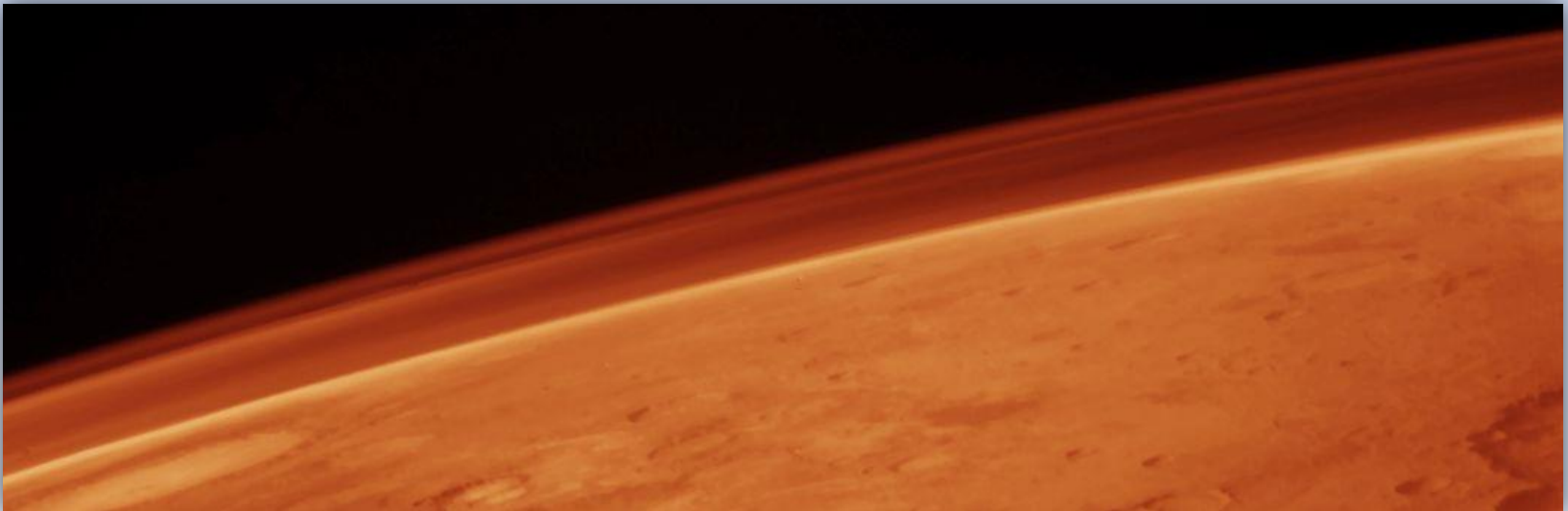
## Procesy egzogeniczne – atmosfera

Powierzchnie obiektów posiadających znaczące atmosfery mogą być przez te atmosfery kształtowane w procesach fizycznych i chemicznych. Dostatecznie gęsta atmosfera wpływa też na inny proces egzogeniczny – tworzenie kraterów uderzeniowych (częściowa ochrona).

*Procesy fizyczne* powodują gradację i rzeźbienie powierzchni poprzez przemieszczenie materii wywołane:

- ruchem samej atmosfery (wiatr)
- przemieszczaniem się cieczy (opad, przepływ po powierzchni, zbiorniki)

*Procesy chemiczne* są skutkiem reakcji chemicznych zachodzących między atmosferą a powierzchnią (zależą od cech obu ośrodków).





# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – atmosfera

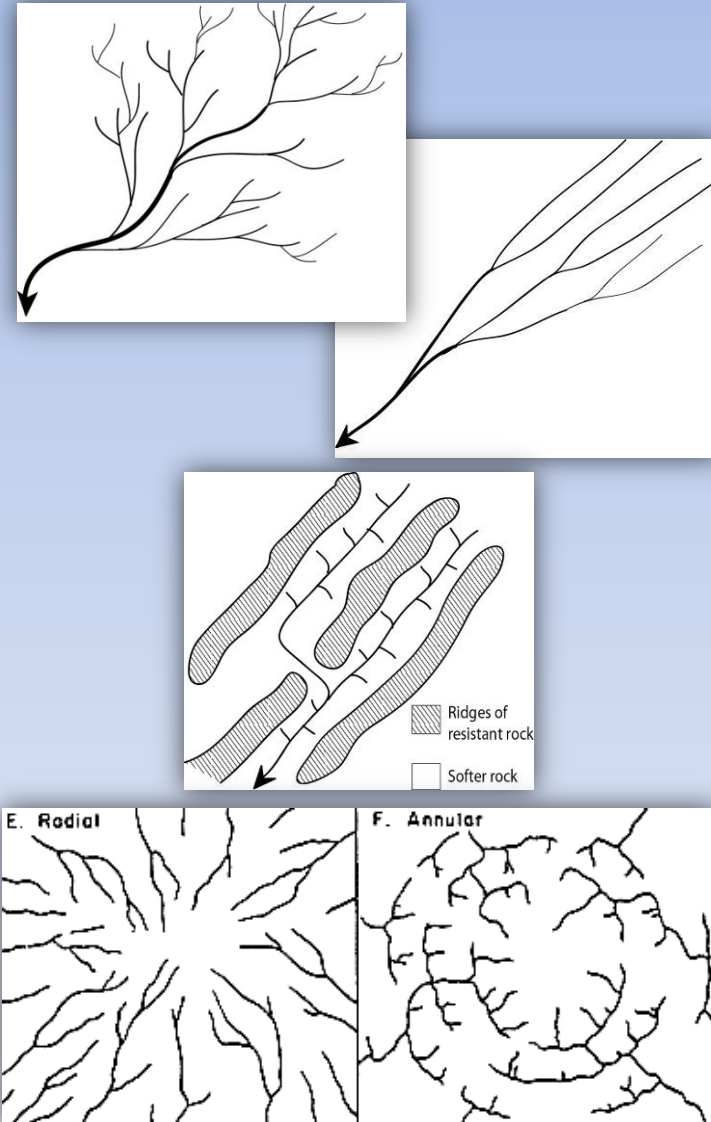
**Procesy fluwialne**, czyli przepływ ciecży po powierzchni („rzeki”) powodują:

- **erozję, transport i akumulację** materiału na powierzchni; procesy te powodują zarazem segregację materiału pod względem rozmiaru
- powstanie **rzeźby fluwialno-denudacyjnej** – formowanie koryt rzecznych

Kształt sieci rzecznej niesie informację o lokalnej topografii:

- układ dendryczny / równoległy – teren nachylony / znacznie nachylony
- układ kratowy – obszar występowania struktur równoległych
- układ promienisty / pierścieniowy – utwory stożkowe (np. wulkany) lub kotliny

Ciecże zgromadzone w zagłębieniach (jeziora, morza) tworzą **struktury linii brzegowej** jak plaże i klify.



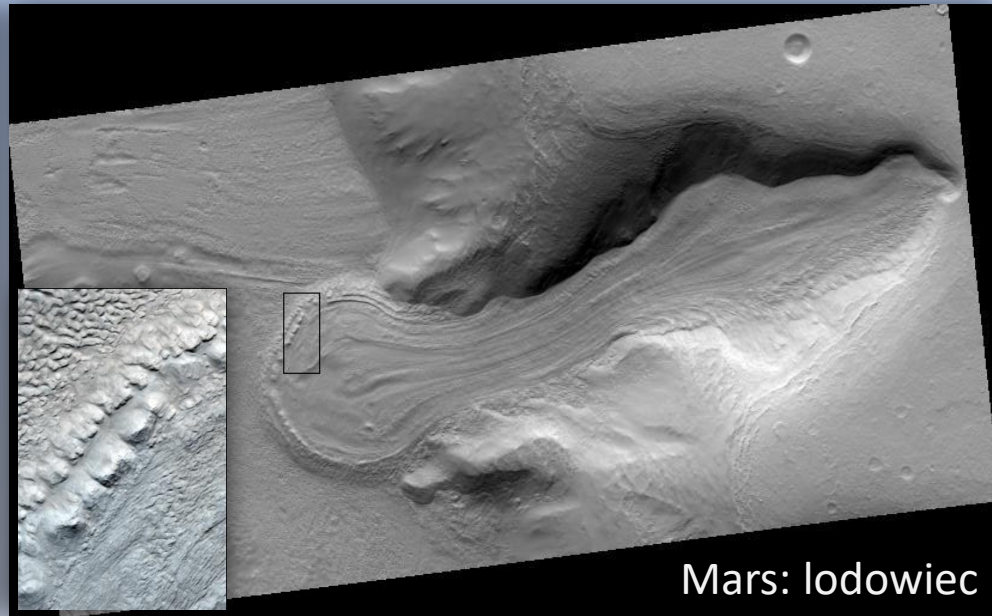
# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – atmosfera

Do procesów fluwialnych można też zaliczyć **erozję lodowcową**. Lód zachowuje się jak pseudo-plastyczna ciecz. Lodowce płyną po nachylonym terenie powodując powstanie charakterystycznych struktur: doliny u-kształtne, moreny, kotły, bruzdy.



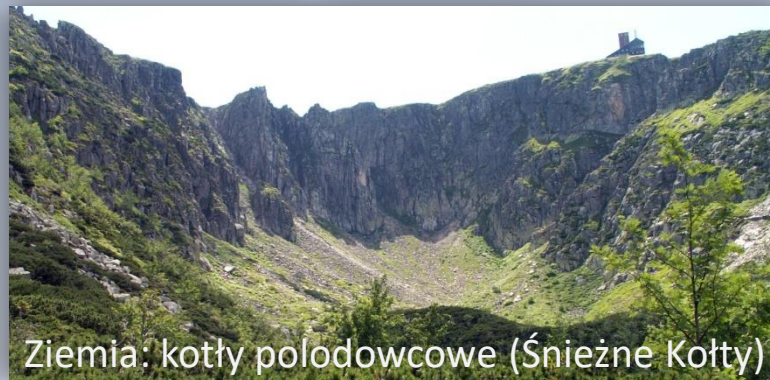
Ziemia: lodowiec



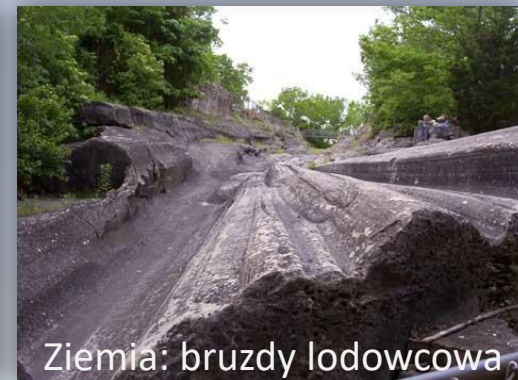
Mars: lodowiec



Ziemia: dolina U-kształtna



Ziemia: kotły polodowcowe (Śnieżne Kotły)



Ziemia: bruzdy lodowcowa

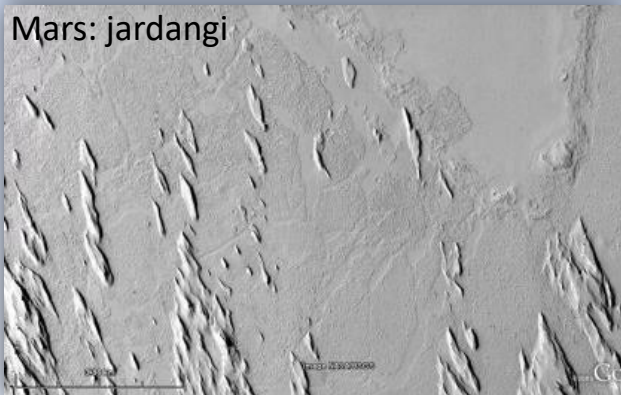
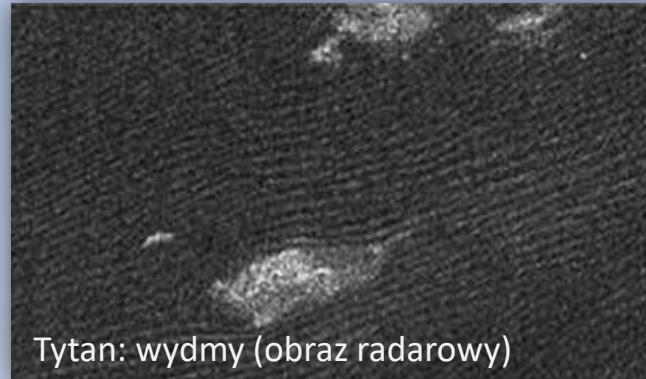
# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – atmosfera

Na **procesy eolityczne**, czyli erozję wiatrową, składa się niszczenie, transport i osadzanie. Niszczenie wiatrowe składa się z:

- **deflacji** – wywiewanie zwięzłego materiału skalnego (misy, bruki deflacyjne)
- **korazji** – szlifowanie, ścieranie i żłobienie powierzchni przez materiał niesiony wiatrem (jardangi, grzyby skalne)

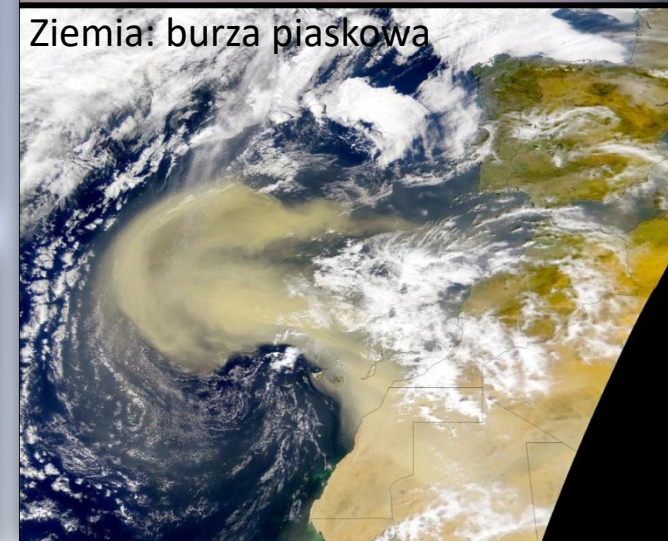
Zerodowany materiał jest akumulowany w postaci np. zmarszczek eolicznych i wydmy.



# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – atmosfera

Transport w erozji wiatrowej odbywa się poprzez unoszenie, podrzucanie, toczenie, przesuwanie. Przejawem działalności transportowej wiatru są burze pyłowe/piaskowe lub wiry pyłowe.



# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – atmosfera

**Wietrzenie** jest procesem niszczącym powierzchnię bez przenoszenia materiału. Wietrzenie następuje pod wpływem działania czynników fizycznych i chemicznych.

**Wietrzenie fizyczne** (mechaniczne), np:

- **termiczne** – niszczenie poprzez ciągłe rozszerzanie i kurczenie przy cyklicznych zmianach temperatury
- **mrozowe** – kruszenie przy zamarzaniu wody znajdującej się w szczelinach
- **solne** – proces podobny do mrozowego, ale czynnikiem niszczącym jest krystalizująca sól

**Wietrzenie chemiczne** zmienia skład chemiczny materiału poprzez reakcje chemiczne zachodzące pomiędzy atmosferą a powierzchnią, prowadząc do jego rozpadu.

Przykładowo:

- **rozpuszczanie** – usuwanie cząsteczek materiału pod wpływem substancji rozpuszczającej
- **utlenianie** – łączenie się cząsteczek materiału z tlenem

Ziemia: gołoborze  
(efekt wietrzenia mrozowego)

Ziemia:  
kociołek wietrzeniowy

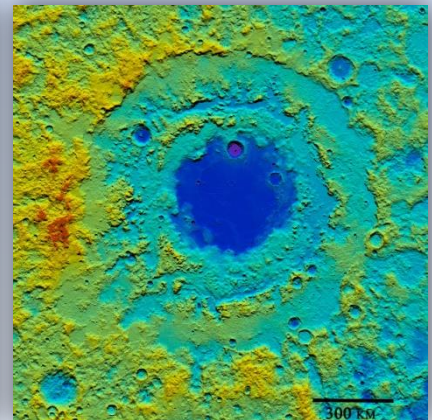
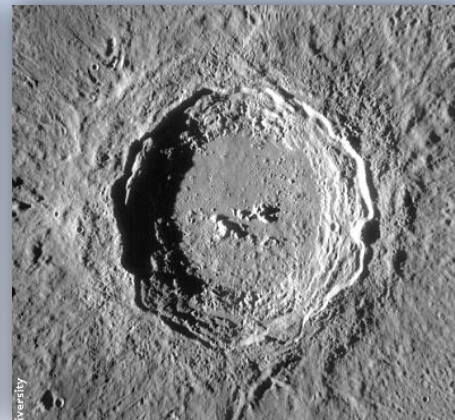
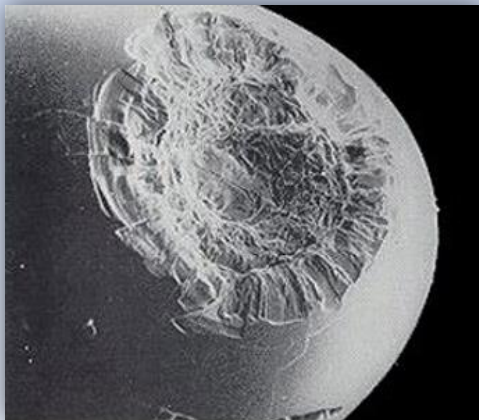


# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

Krater uderzeniowy to najpowszechniej występująca forma powierzchniowa w Układzie Słonecznym. Powstają wskutek zderzeń z innymi ciałami. Przy zderzeniu wydzielana jest energia rzędu  $10^{12}$  erg/g.

- **mikrokrater** – rozmiar do 1 cm; są tworzone przez ciała o rozmiarach mm i mniejszych; obecne tylko na obiektach pozbawionych atmosfery; dno mikrokrateru pokrywa często zeszlony materiał
- **krater proste (małe)** – średnica do kilku kilometrów; dno wklęsłe; głębokość wynosi ok. 1/5 średnicy
- **krater złożone (duże)** – średnica kilkadziesiąt - kilkaset km; dno płaskie, na środku pojedyncze wniesienie lub pierścień wzniesień; brzeg wewnętrzny schodkowy
- **baseny uderzeniowe (wielopierścieniowe)** – rozmiary nawet powyżej 1000 km, dno płaskie, czasami pokryte zastygłą lawą; brzeg złożony z wielu koncentrycznych pierścieni

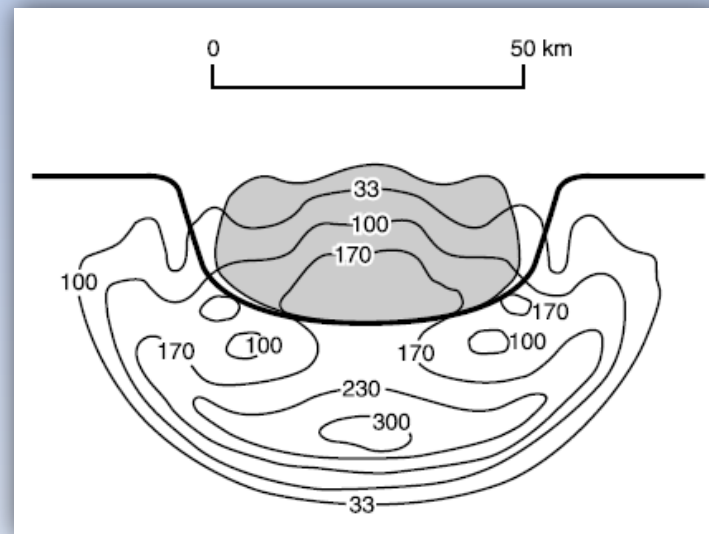
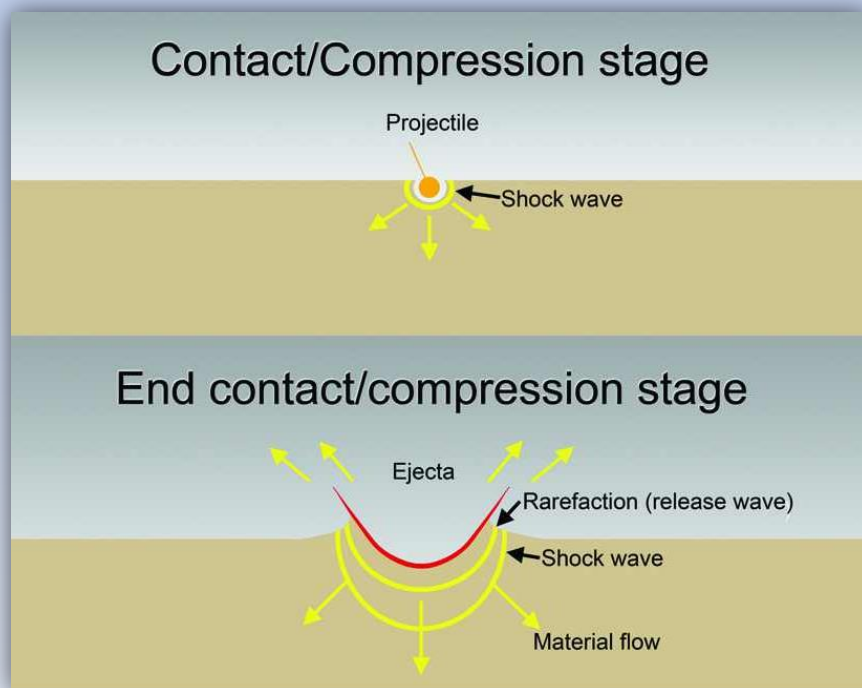


# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

Proces powstania krateru uderzeniowego zaczyna się w momencie pierwszego kontaktu „pocisku” z „celem” a kończy, gdy ostatnie wyrzucone z krateru fragmenty skał opadną na powierzchnię. W procesie wyróżnia się trzy fazy:

- **faza kontaktu i kompresji** – przy kontakcie „pocisku” i „celu” energia kinetyczna zamieniana jest w naddźwiękowe fale uderzeniowe rozchodzące się w obu obiektach. Rozchodzenie się fal powodują szybką kompresję a następnie dekompresję materiału co prowadzi do jego stopienia lub odparowania (intruz może wyparować prawie całkowicie („kula ognia”). Cała faza trwa znacznie poniżej 1 sekundy.

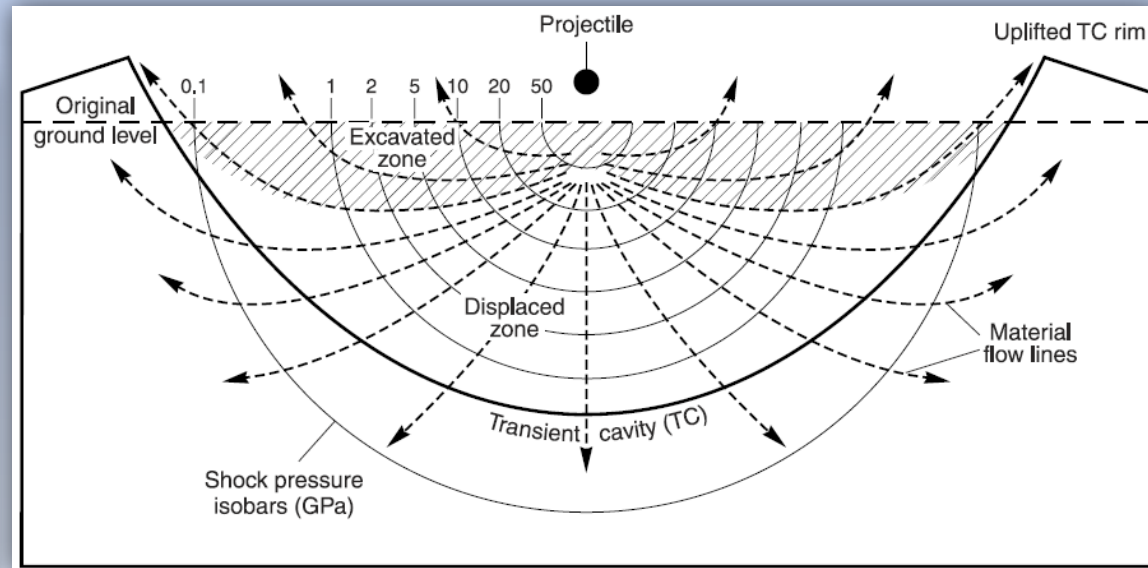
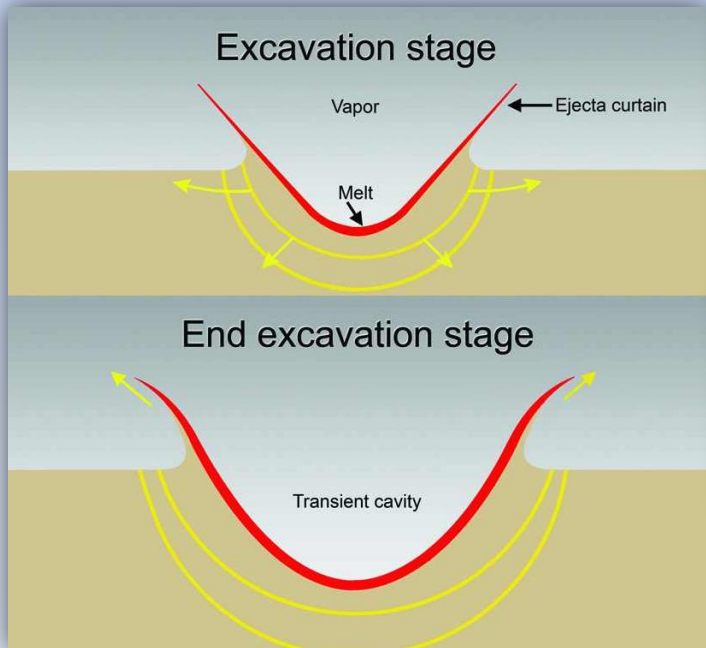


Ciśnienie (w GPa) fali uderzeniowej wytwarzanej przy uderzeniu ciała o śr. 50 km w skalną powierzchnię (czas: 1 s od początku zderzenia).

# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

- **faza ekskawacji** (wyrzucania) – fale kompresji i dekompresji rozchodzące się w uderzonym obiekcie powodują wyrzucenie i przemieszczenie materiału prowadząc do „otwarcia” krateru. Wyrzucony materiał porusza się początkowo do góry i na zewnątrz tworząc kurtynę o kształcie stożka, a po opadnięciu na powierzchnię – pokrywą wokół krateru (czasem krater wtórne). Krater istniejący pod koniec tej fazy nazywany jest przejściowym. Cała faza trwa do kilku minut.



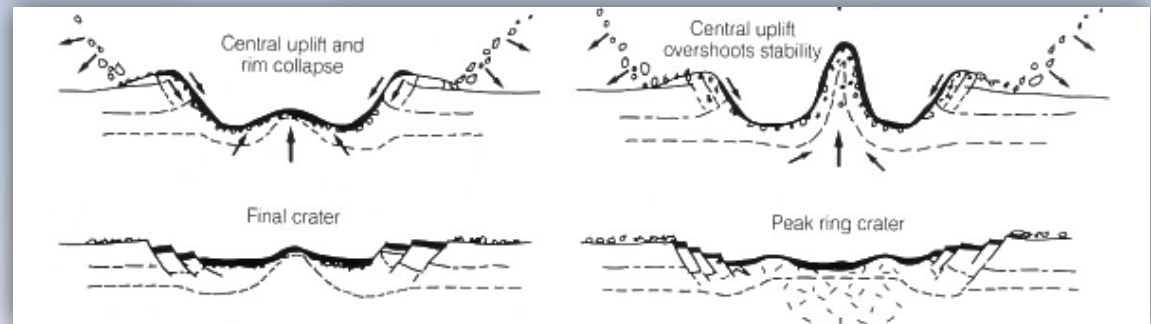
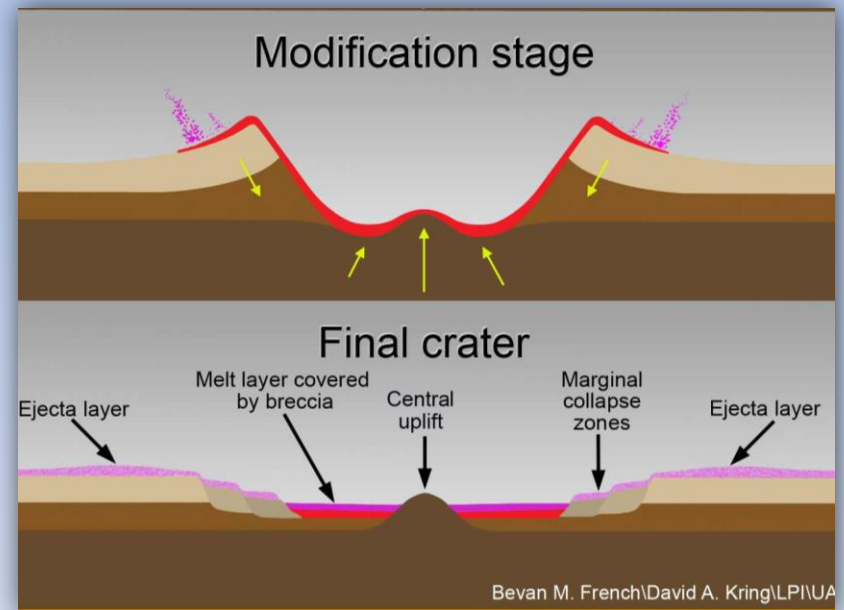
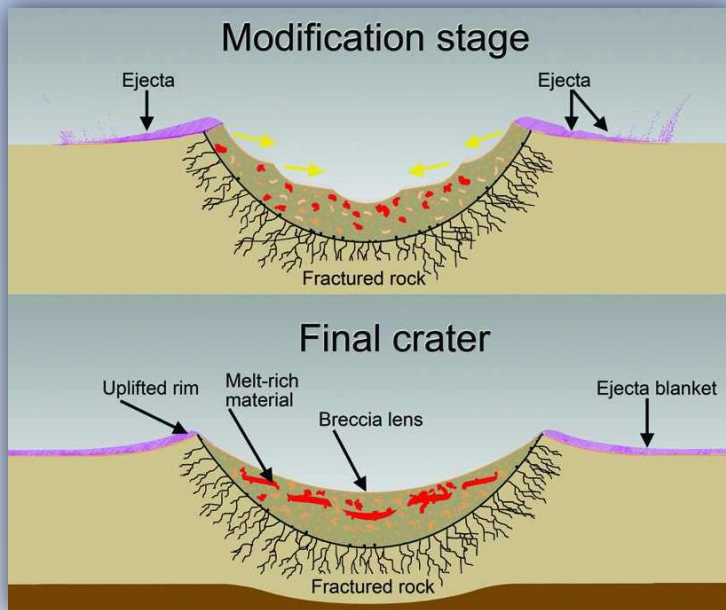
Przekrój przez krater przejściowy. Pokazano izoliny ciśnienia fali uderzeniowej (półokręgi, w GPa). Strzałki pokazują przemieszczanie się materiału w obszarze powstającego krateru. Obszar zakreskowany – strefa materiału wyrzuconego z krateru.



# Powierzchnie planet

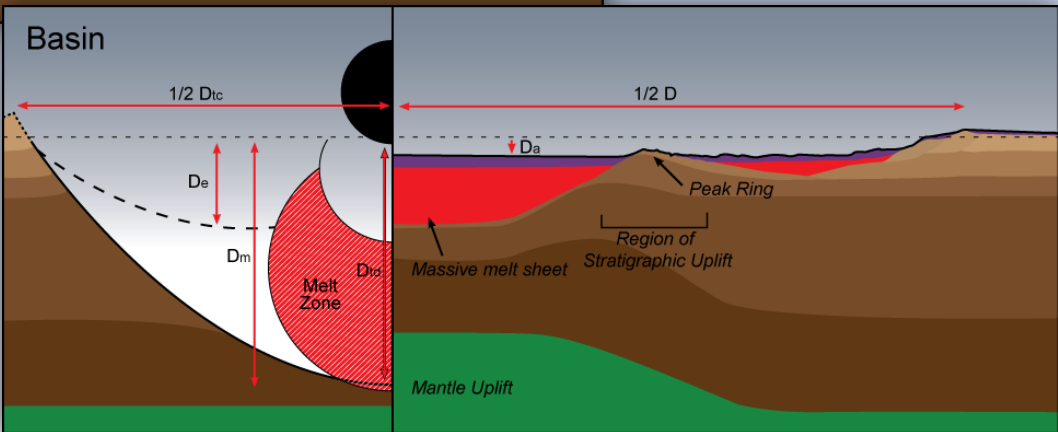
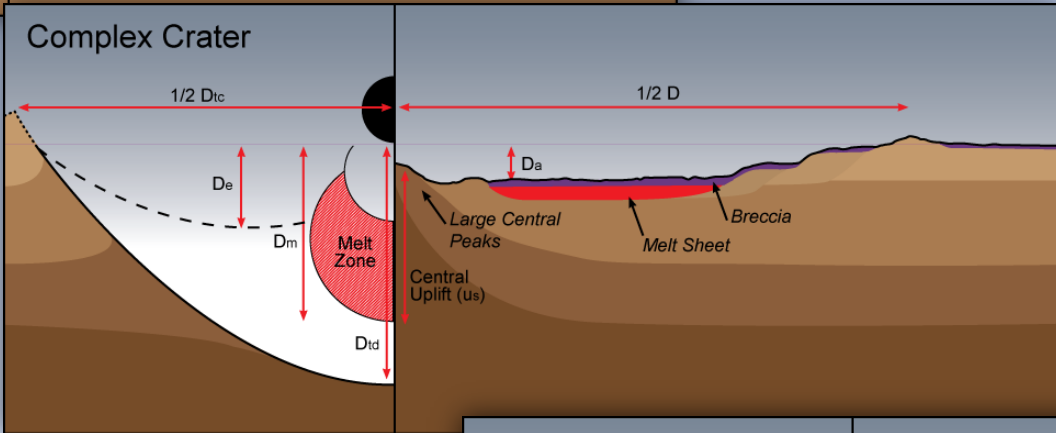
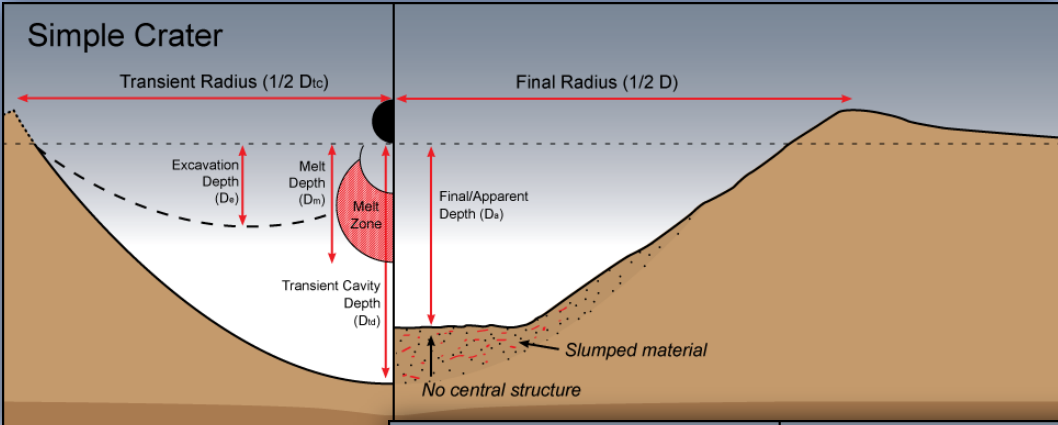
## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

- **faza zapadania i modyfikacji** – kiedy wyczerpuje się energia fal uderzeniowych, kształt krateru przejściowego zaczyna podlegać procesom geologicznym związanym z grawitacją. Dochodzi do modelowania dna krateru (wynoszenie dna, powstanie wzniesienia centralnego) i osuwania jego krawędzi. Krater przybiera postać końcową



# Powierzchnie planet

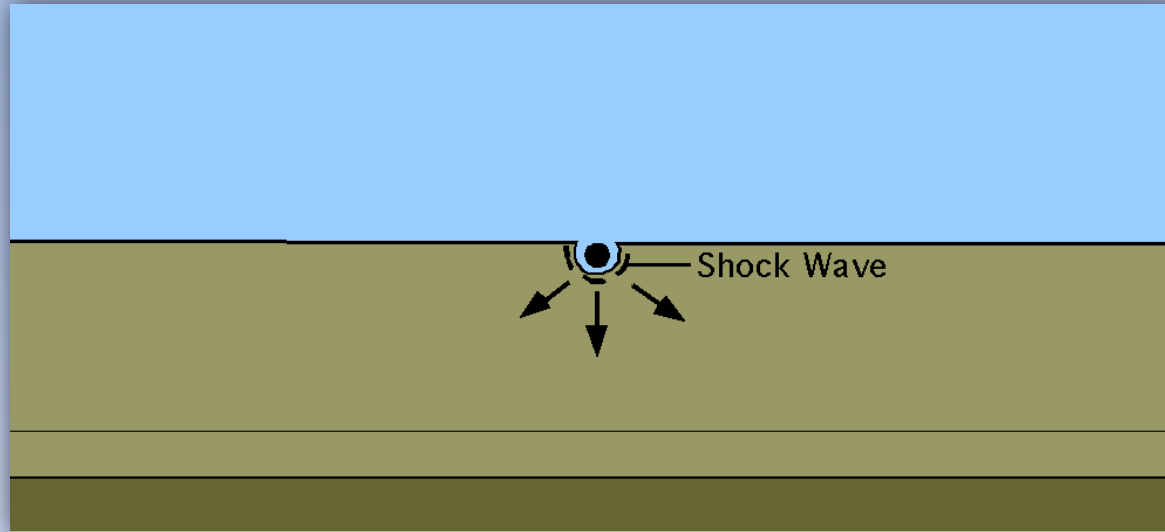
## krater przejściowy i końcowy – porównanie



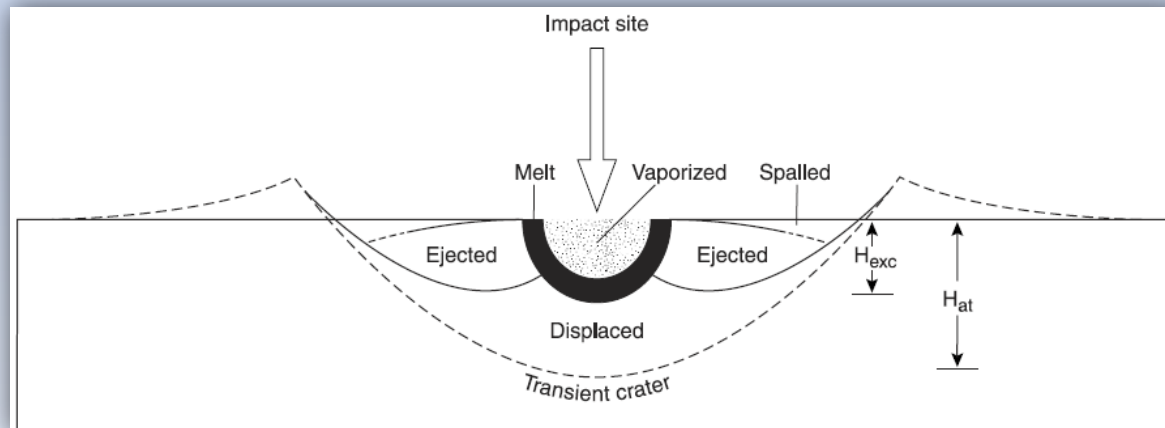
# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

wszystkie fazy razem



podsumowanie zmian w miejscu zderzenia



# Powierzchnie planet

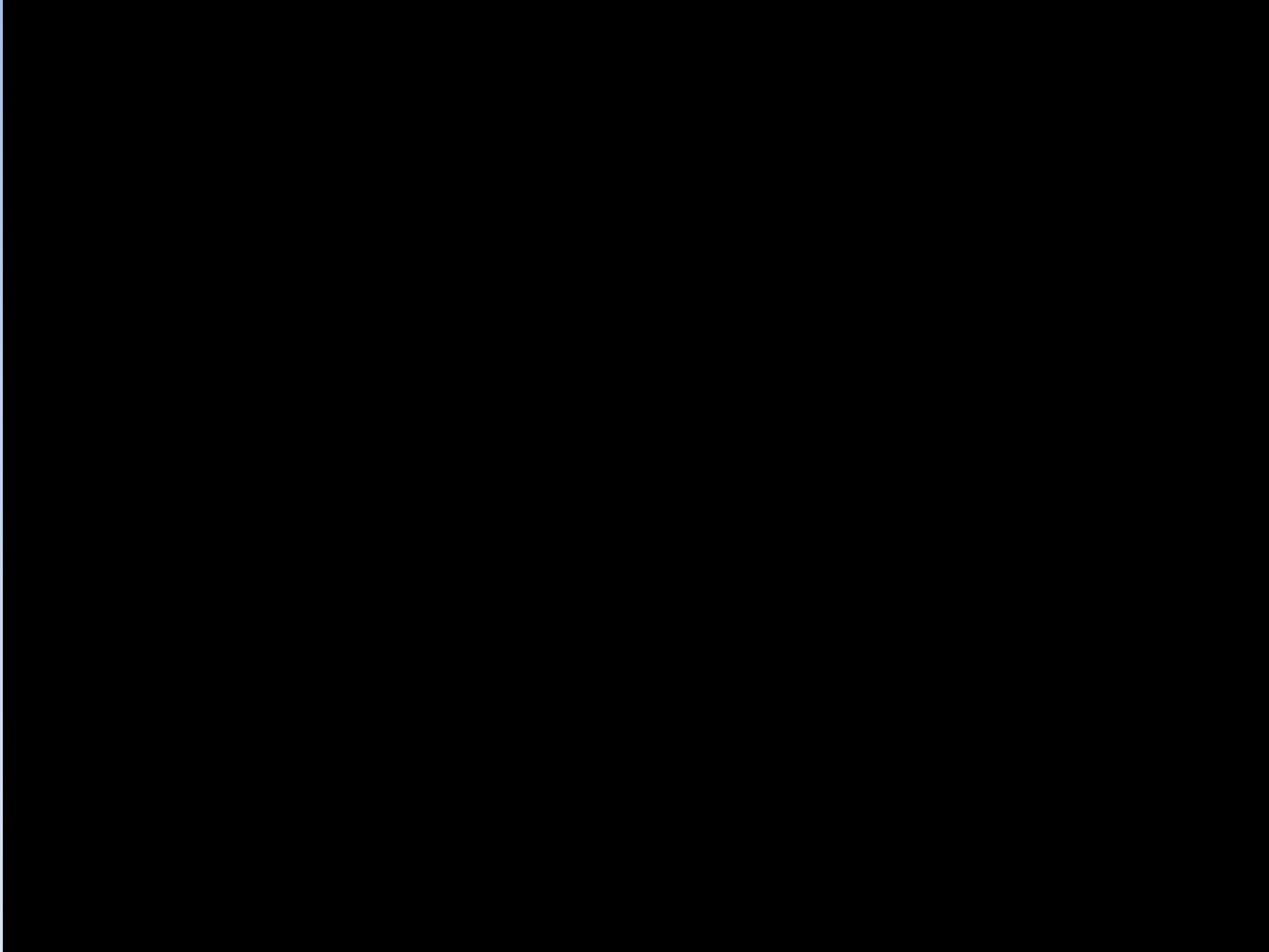
## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych



laboratoryjna symulacja tworzenia krateru

# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych



domowa symulacja tworzenia krateru

# Powierzchnie planet

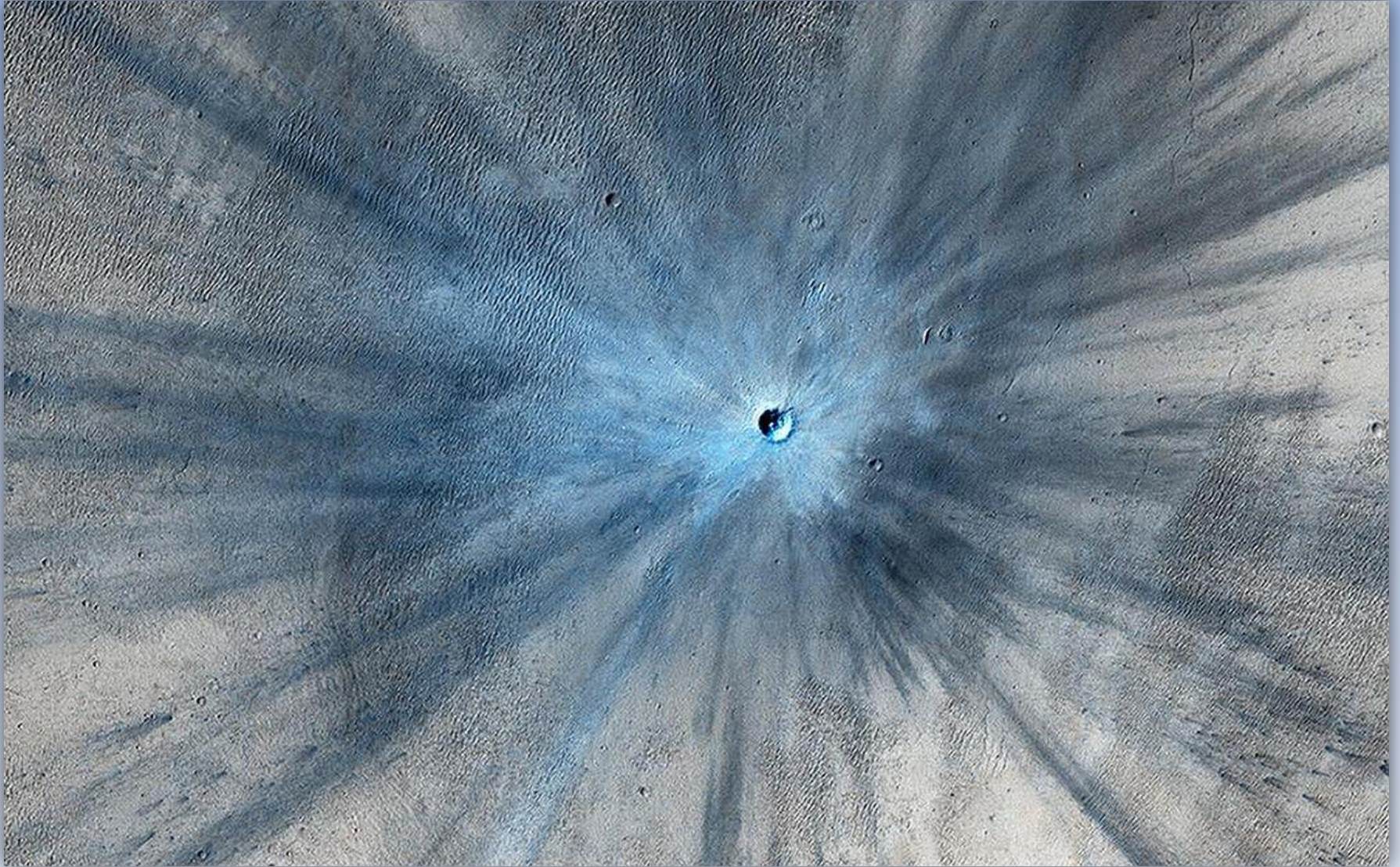
## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych



domowa symulacja tworzenia krateru  
(krater otoczony pokrywą materiału wyrzuconego)

# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych



Jak powstaje system promieni otaczających krater?

film do obejrzenia: <https://www.youtube.com/watch?v=6JC4J4sBBsE>

# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

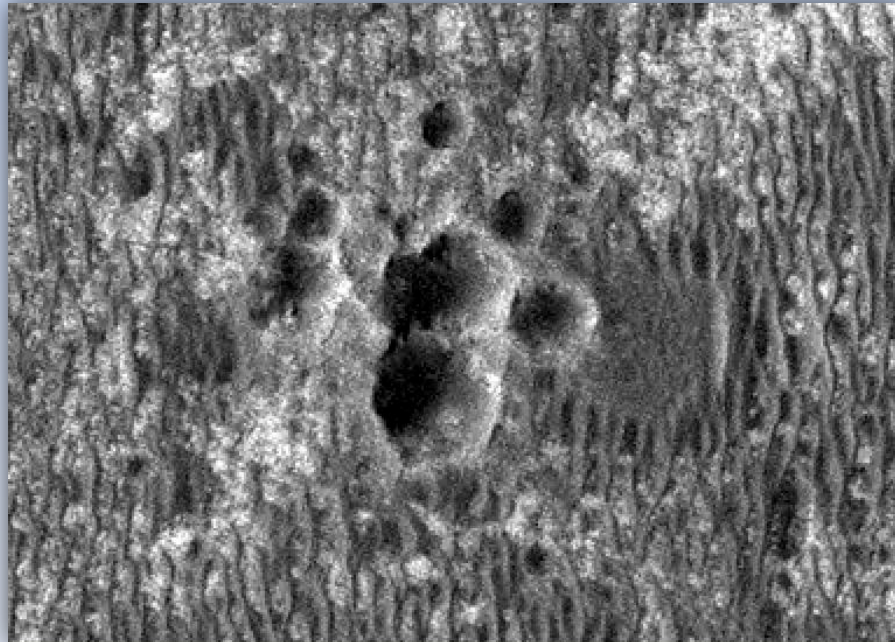
Jeżeli obiekt uderzany posiada gęstą atmosferę, to wpływa ona na proces formowania krateru. Pocisk:

- może odparować w atmosferze (brak krateru)
- może rozpaść się na mniejsze części (grupa kraterów)
- zwolnić znacząco i uderzyć w powierzchnię z prędkością graniczną (dołek zamiast krateru)

Przejście przez atmosferę zmienia rozmiar intruza – ablacja (topienie i odparowanie).

Materia wyrzucona z krateru może długo pozostawać zawieszona w atmosferze.

Duże uderzenie może spowodować utratę części atmosfery.





# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

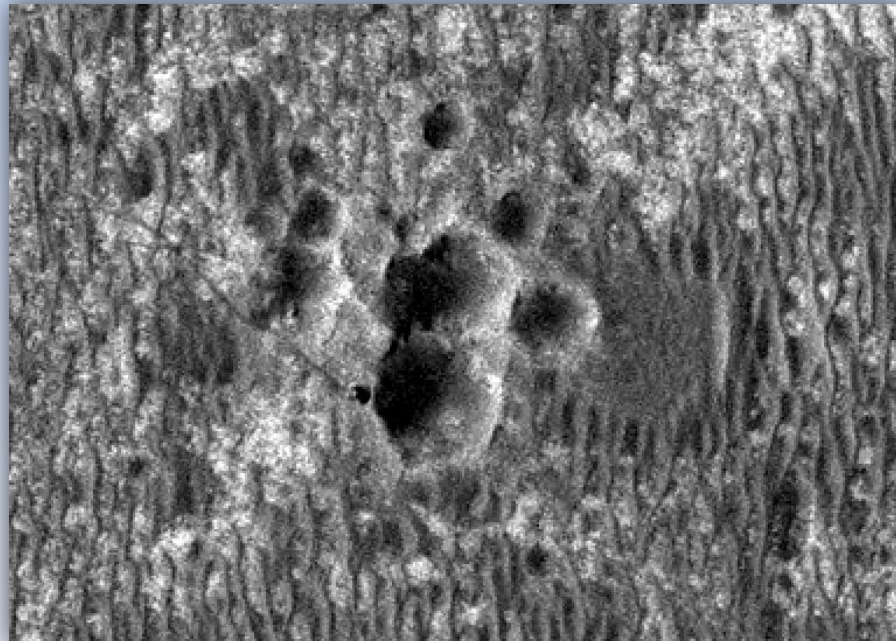
Jeżeli obiekt uderzany posiada gęstą atmosferę, to wpływa ona na proces formowania krateru. Pocisk:

- może odparować w atmosferze (brak krateru)
- może rozpaść się na mniejsze części (grupa kraterów)
- zwolnić znacząco i uderzyć w powierzchnię z prędkością graniczną (dołek zamiast krateru)

Przejście przez atmosferę zmienia rozmiar intruza – ablacja (topienie i odparowanie).

Materia wyrzucona z krateru może długo pozostawać zawieszona w atmosferze.

Duże uderzenie może spowodować utratę części atmosfery.

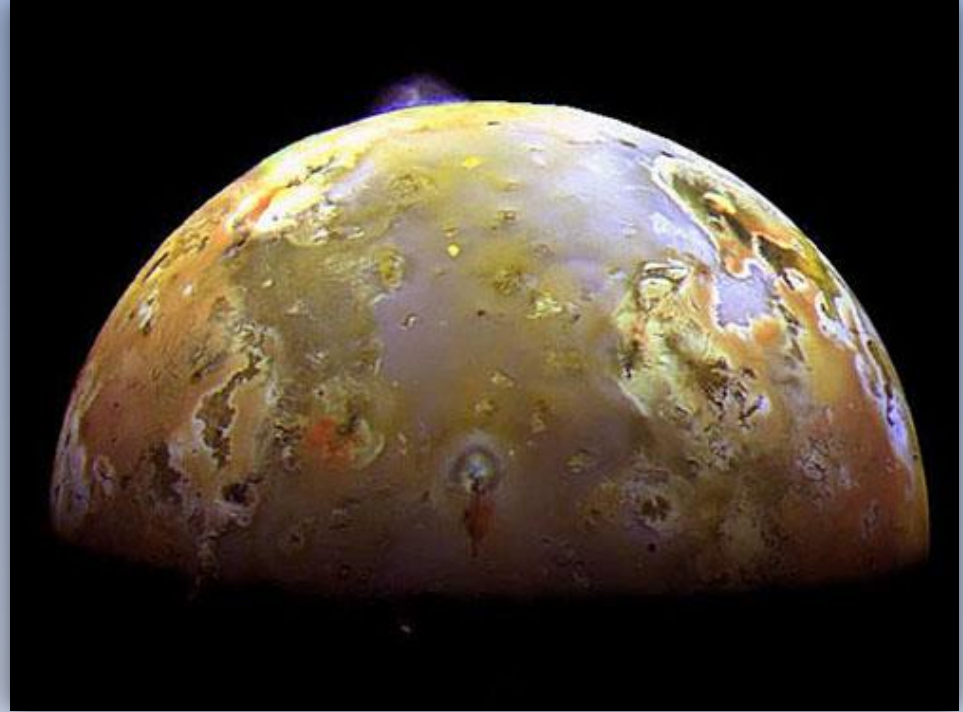
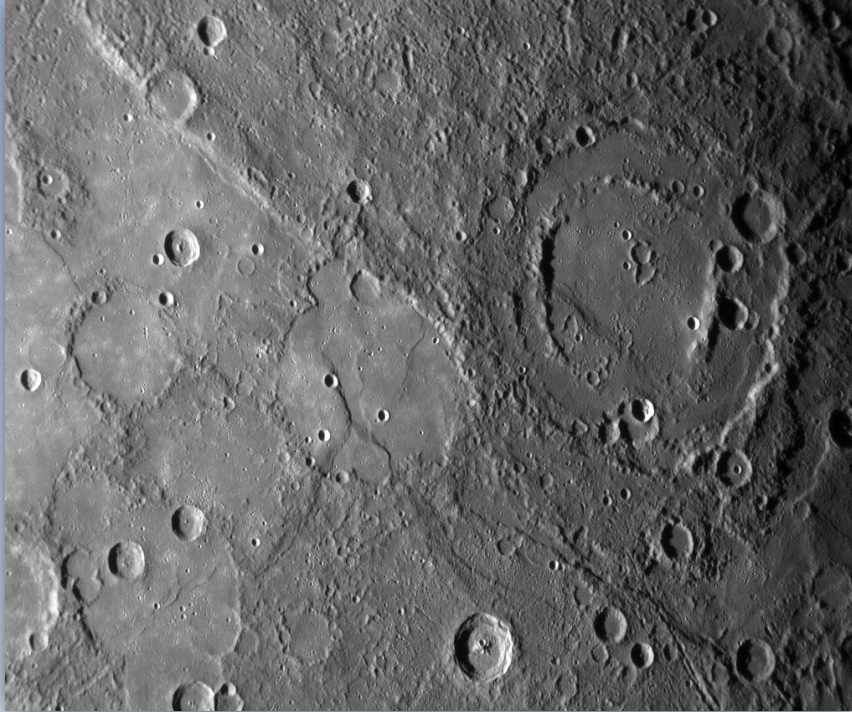


Mars: grupa kraterów,  
widoczny łazik Opportunity

# Powierzchnie planet

## Procesy egzogeniczne – tworzenie kraterów uderzeniowych

Liczba kraterów na danym obiekcie daje informację o efektywności innych procesów kształtujących powierzchnię. Procesy te mogą całkowicie wymazać starsze kratery.



## Morał z badania procesów egzo- i endogenicznych

Dzięki stratygrafii możemy poznać kolejność powstawania różnych form powierzchniowych a dzięki temu geologiczną przeszłość obiektu i przeszłość układu planetarnego (np. zmianę częstotliwości zderzeń).

# Powierzchnie planet

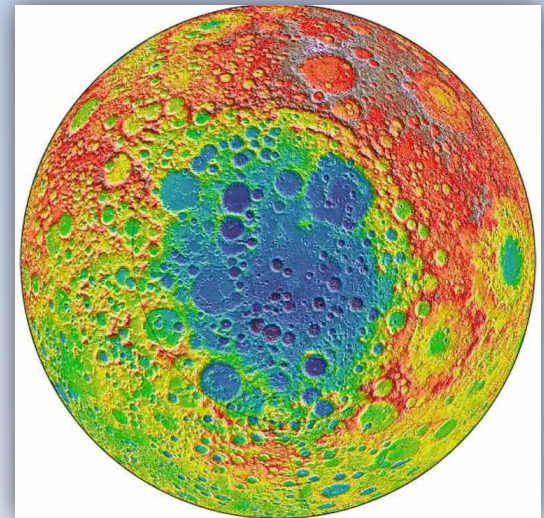
## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Księżyc

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- jasne wyżyny (lądy) gęsto pokryte kraterami, wiek około 4.4 mld lat
- ciemniejsze równiny (morza) mniej kraterów, pokryte bazaltem pochodzącym z płaszczka; wiek około 3.1 – 3.9 mld lat
- kraterzy różnej wielkości, od mikokraterów po olbrzymi Basen Biegun Południowy - Aitken (śr. 2500 km, głęb. 13 km, największy znany w Układzie Słonecznym)
- całą powierzchnię pokrywa regolit – gruba na kilka - kilkanaście metrów warstwa pokruszonych skał – efekt uderzeń.

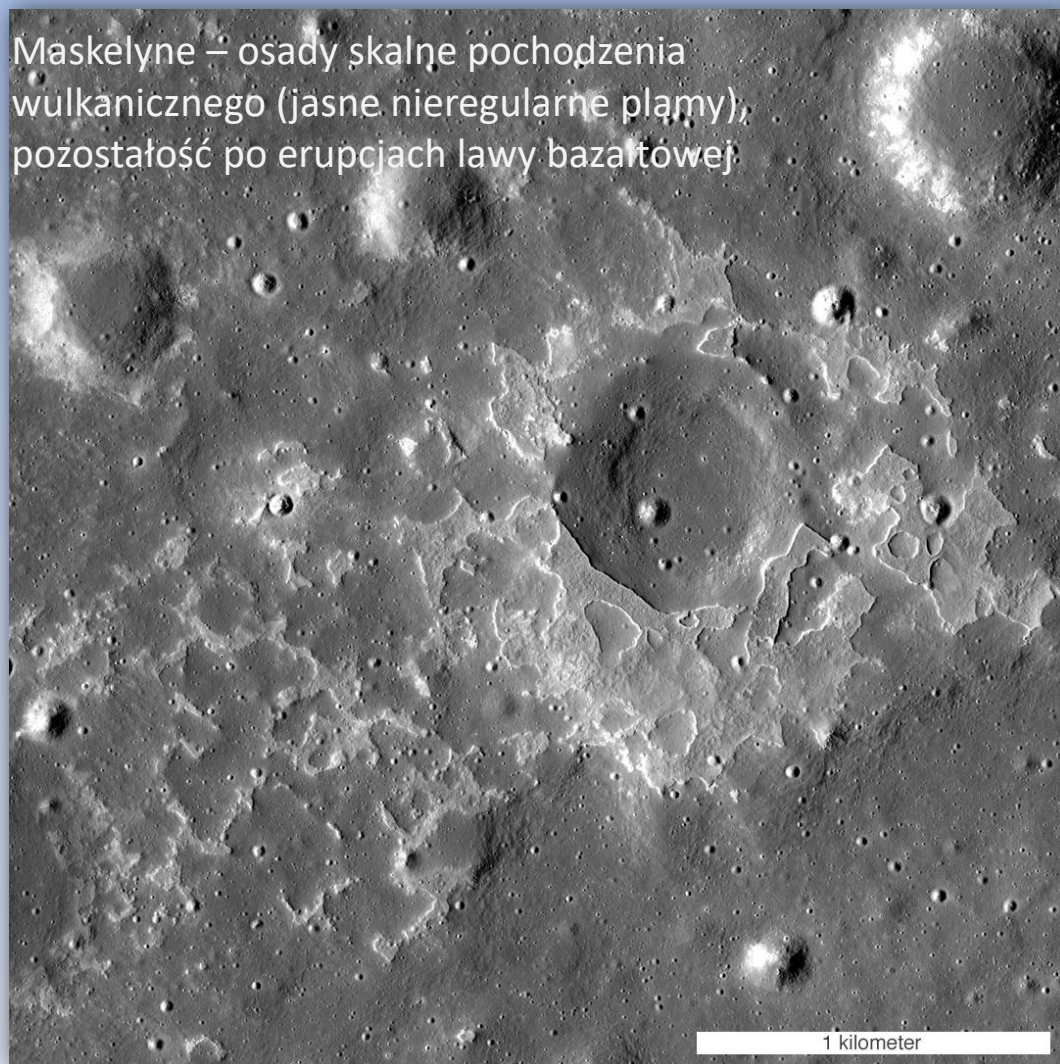
Oprócz struktur uderzeniowych na Księżycu znajdziemy też ślady wulkanizmu i ruchów tektonicznych.



# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Księżyc



# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Merkury

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- powierzchnia planety przypomina Księżyc – dominują tu kraterzy. Obszary gęsto pokryte kraterami przeplatają się z równinami (o podobnym albedo)
- największa struktura uderzeniowa to basen Caloris (1550 km średnicy)
- przez setki km ciągną się skarpy wysokie do kilku km; są to struktury pochodzenia tektonicznego, uformowały się prawdopodobnie podczas kurczenia się planety przy stygnięciu (promień zmniejszył się ok. 4 km)
- na powierzchni występują też struktury wulkaniczne (np. wulkan tarczowy)



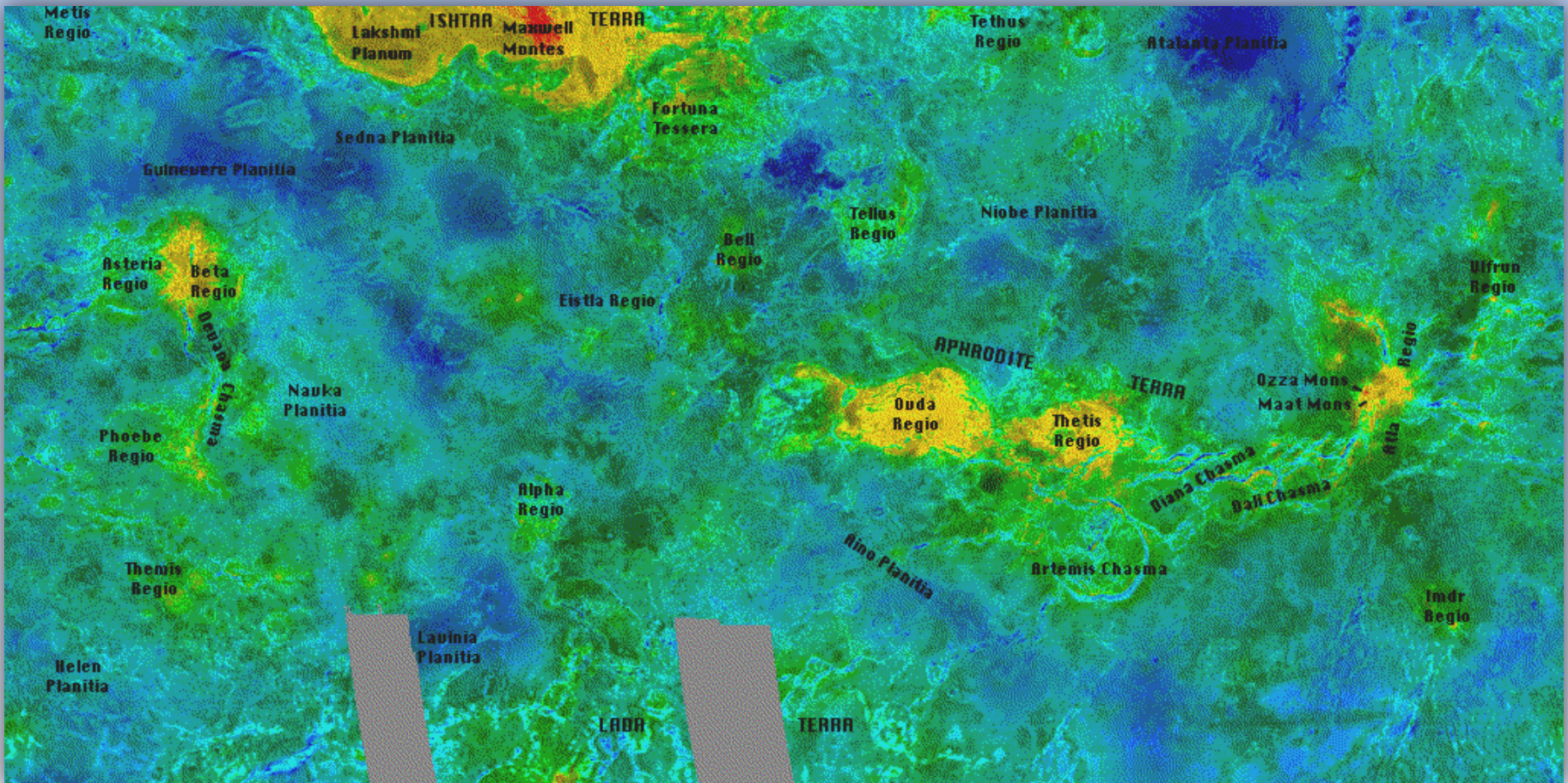
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Wenus

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- większa część powierzchni (70%) leży na średnich wysokościach; pozostałe 30% to niziny i obszary wyżynne



Radarowa mapa hipsometryczna Wenus (dane z orbitera Magellan)

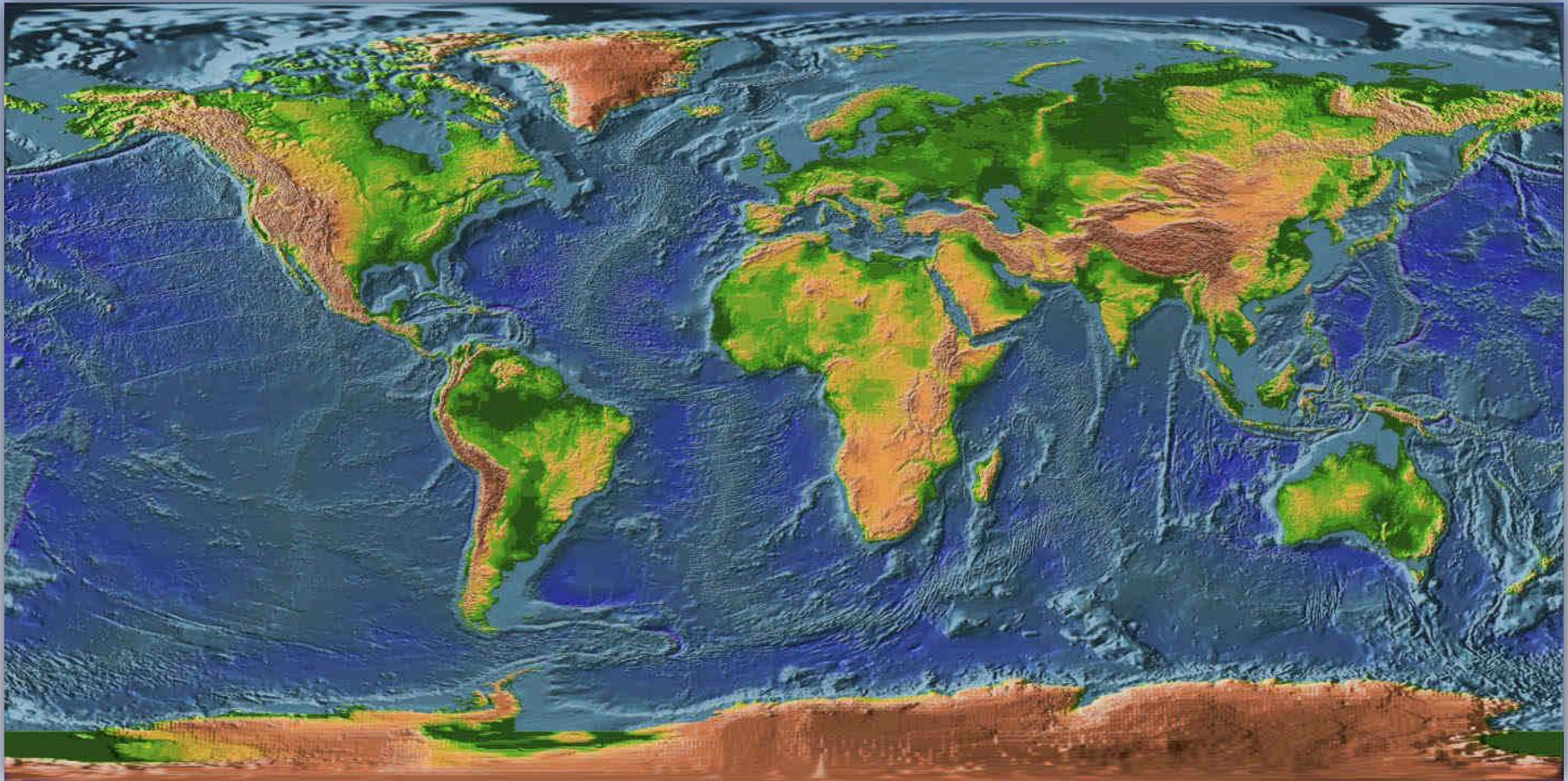
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Wenus

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- większa część powierzchni (70%) leży na średnich wysokościach; pozostałe 30% to niziny i obszary wyżenne



Mapa hipsometryczna Ziemi (dla porównania)

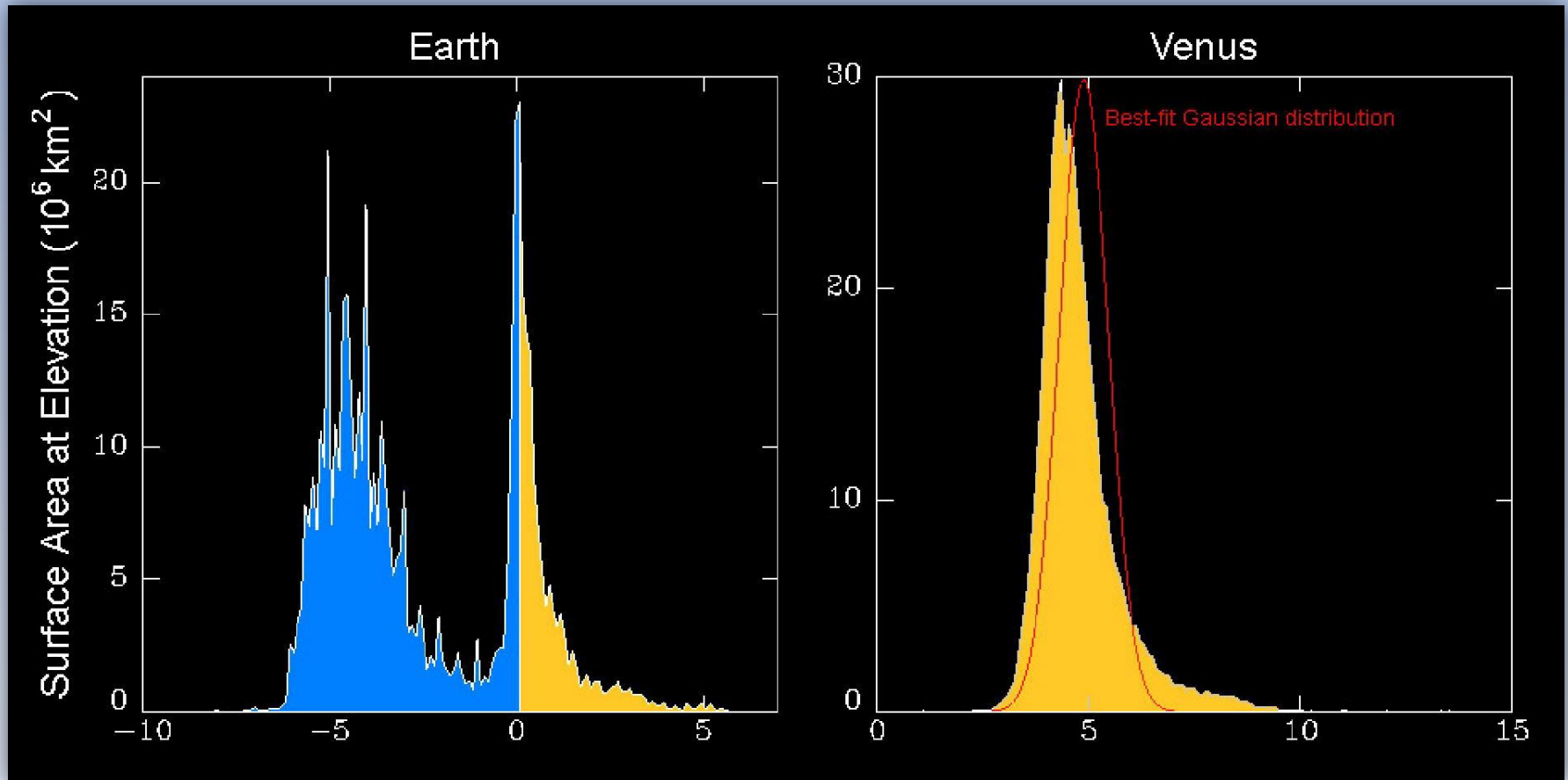
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Wenus

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- większa część powierzchni (70%) leży na średnich wysokościach; pozostałe 30% to niziny i obszary wyżenne



Histogramy wysokości terenu nad poziomem odniesienia dla Ziemi i Wenus. Dwumodalność rozkładu dla Ziemi wynika z tektoniki płyt i podziału skorupy na oceaniczną i kontynentalną



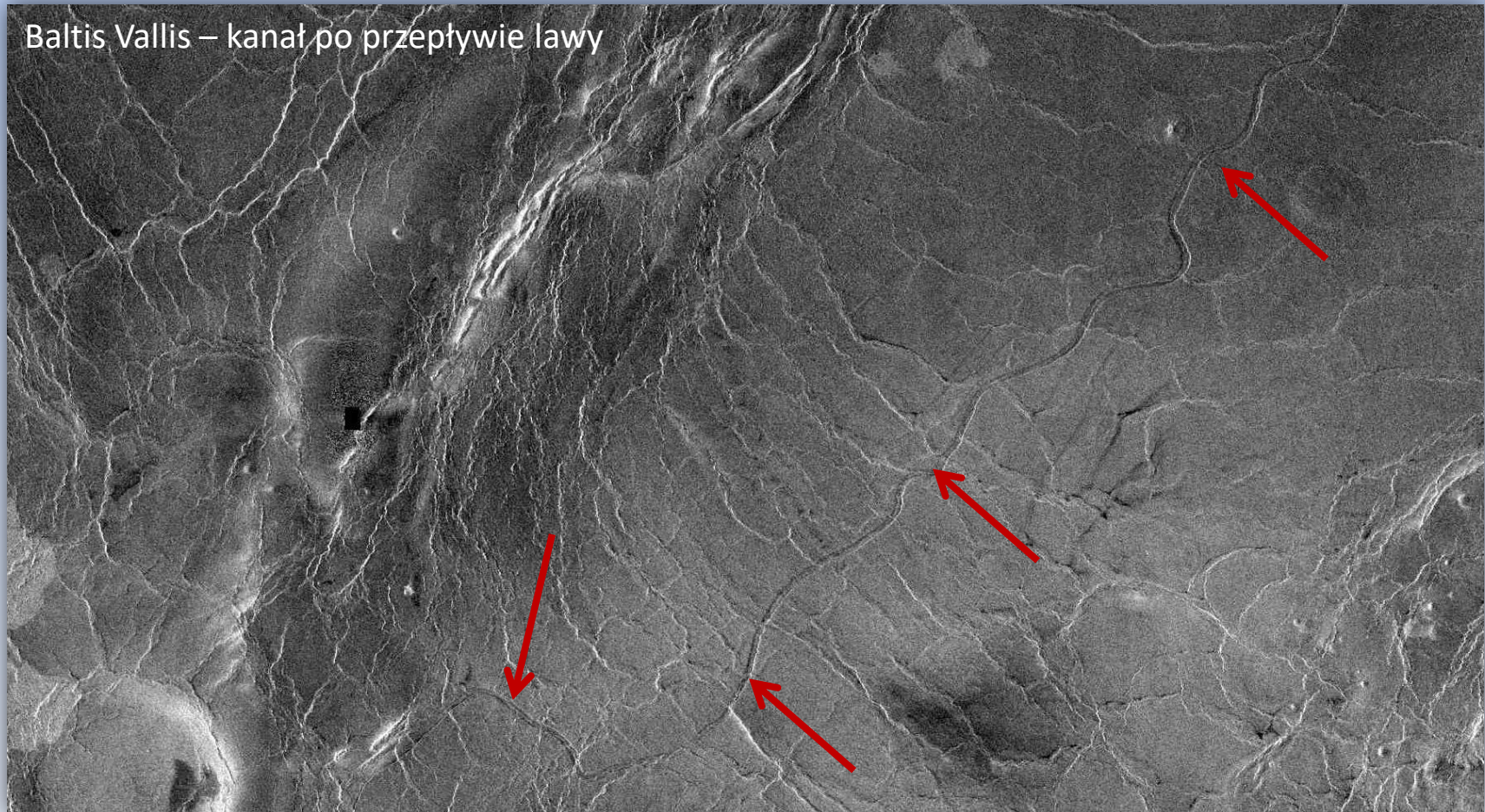
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Wenus

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- struktury pochodzenia wulkanicznego: wulkany (>1000), koryta lawowe – najdłuższe z nich ma około 7000 km (najdłuższa znana tego typu struktura)



# Powierzchnie planet

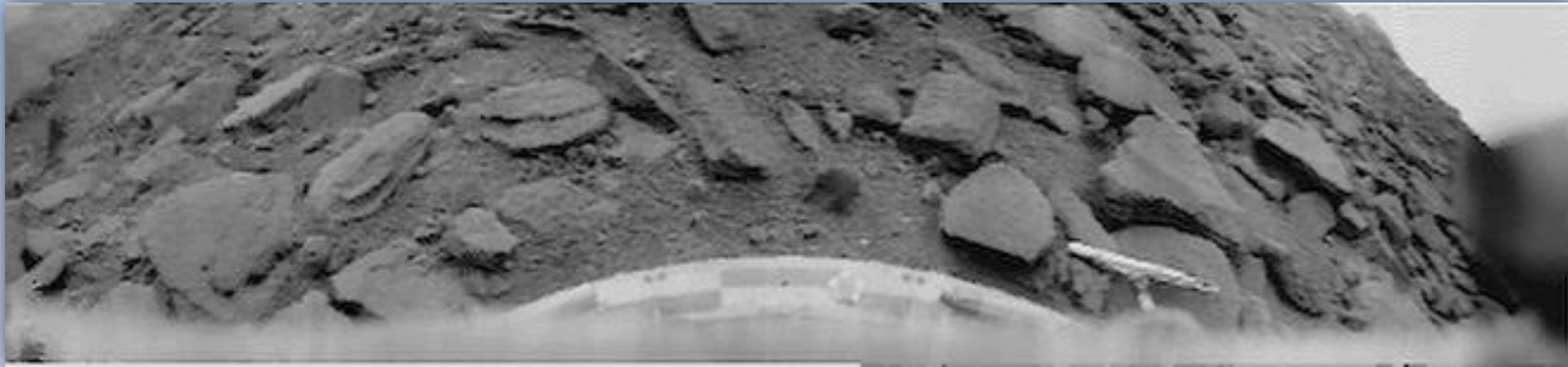
## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Wenus

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- powierzchnię pokrywają bazalty podobne do ziemskich; skały są zwarte, przykryte nie więcej niż kilka cm pyłu/gleby; powierzchnia jest młoda (mało kraterów)

Erozja i wietrzenie działają słabo w gęstej, gorącej i suchej atmosferze planety.



zdjęcia z lądowników Venera 9 i 14

# Powierzchnie planet

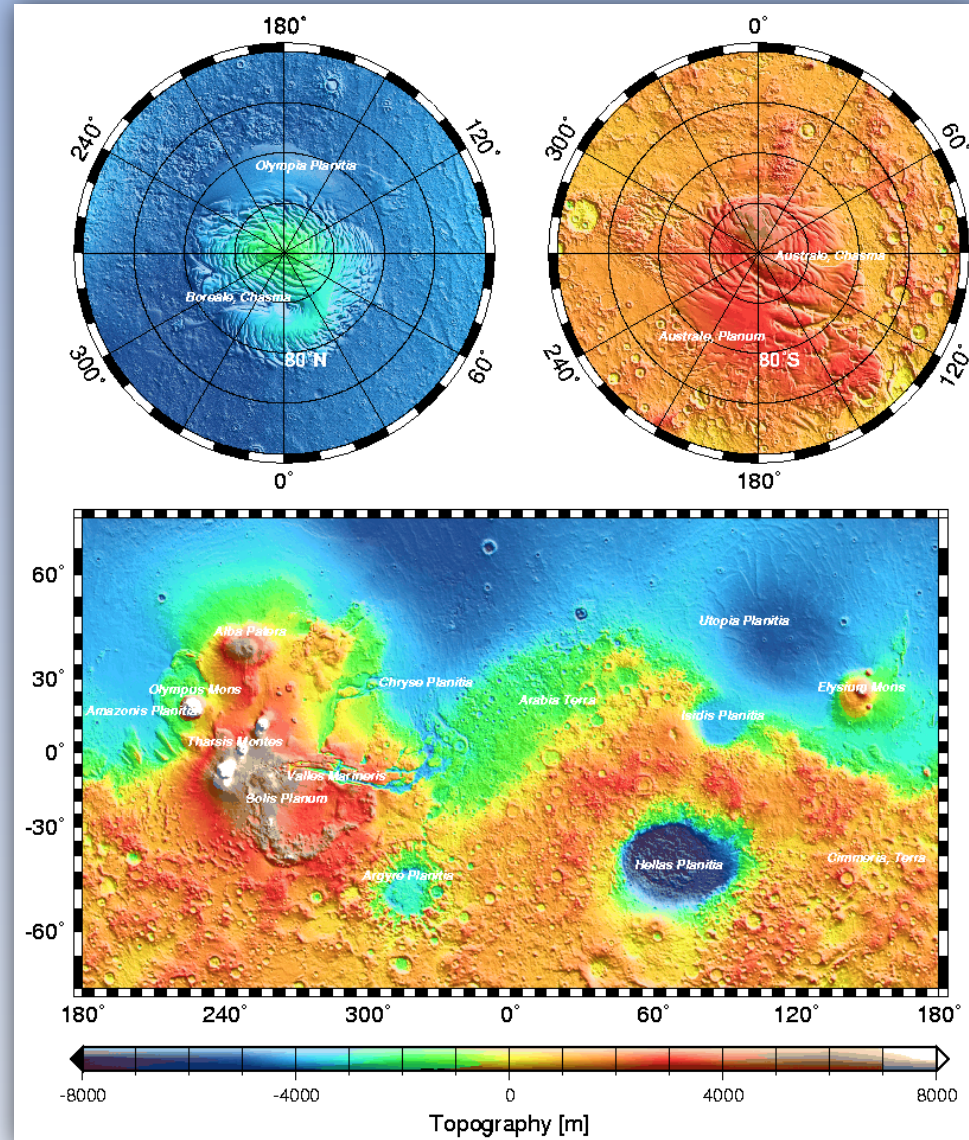
## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Mars

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- wyraźna asymetryczna topografia w skali globalnej:
  - półkula południowa – wyżynna, duża ilość kraterów, wiek ponad 4 mld lat
  - północna – nisko położone równiny, gładkie, młodsze (uformowane w tym samym czasie, ale przykryte potem materiałem osadowym, wulkanicznym)

Przyczyny dychotomii skorupy: basen uderzeniowy? wielkoskalowa konwekcja w płaszczu?



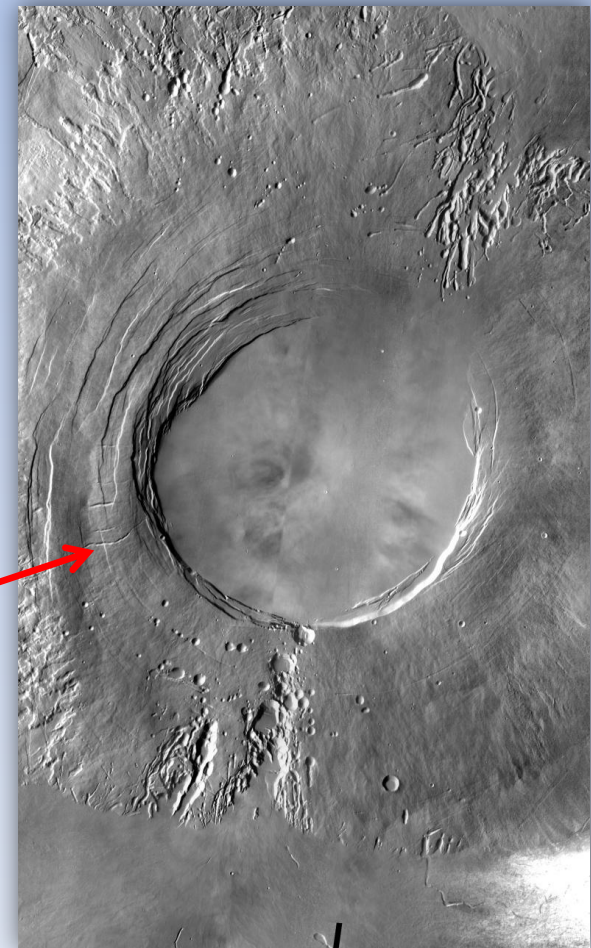
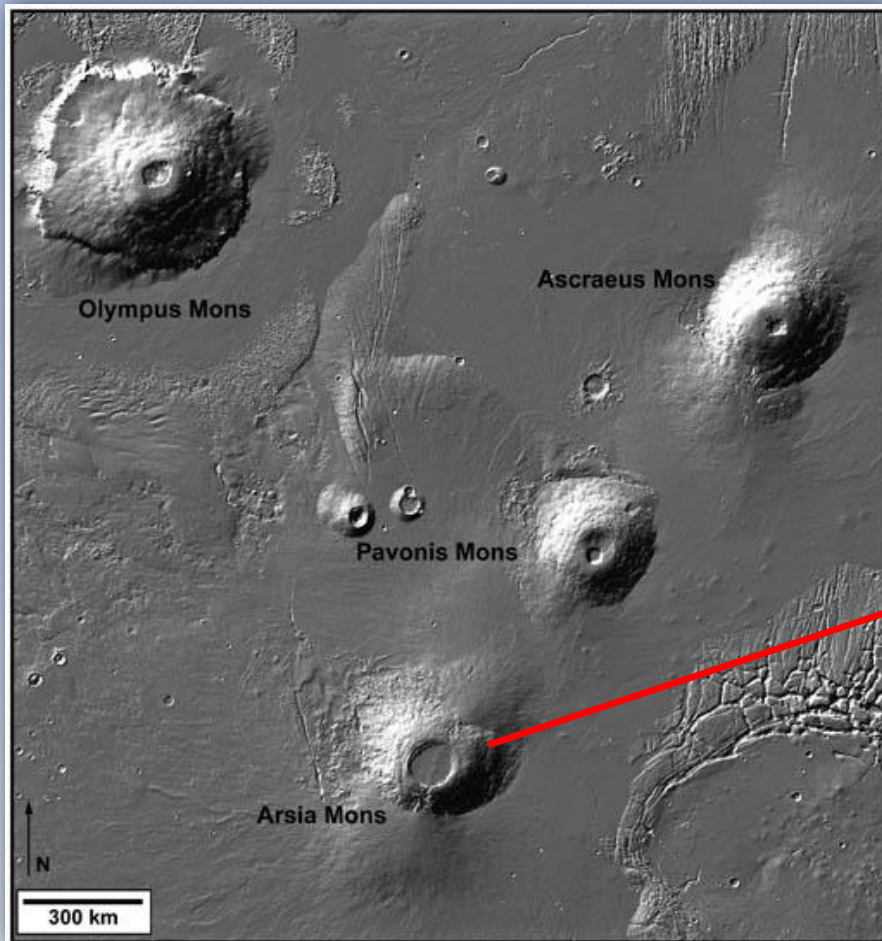
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Mars

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- wyraźne struktury pochodzenia wulkanicznego, w tym olbrzymie wulkany tarczowe na wyżynie Tharsis



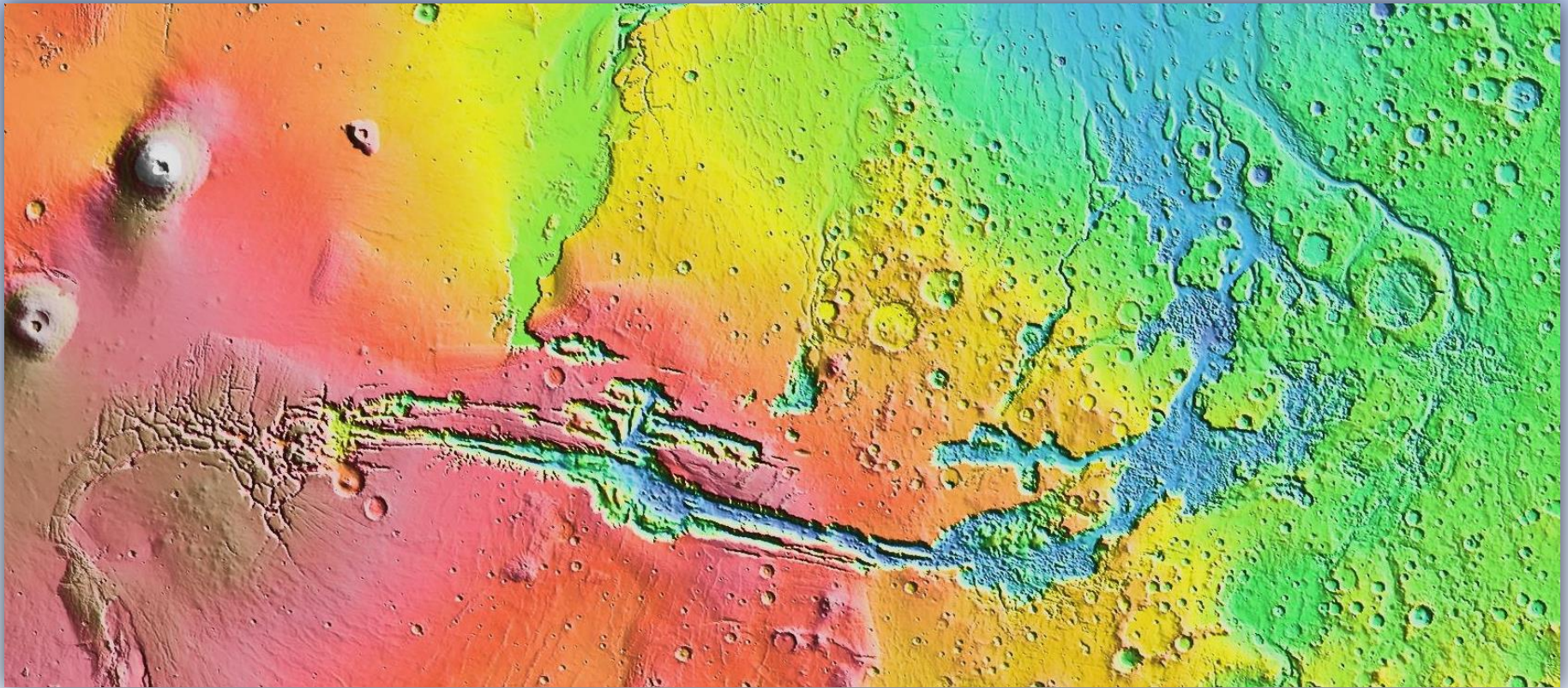
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Mars

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- struktury tektoniczne, w tym największy znany system kanionów – Valles Marineris



# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

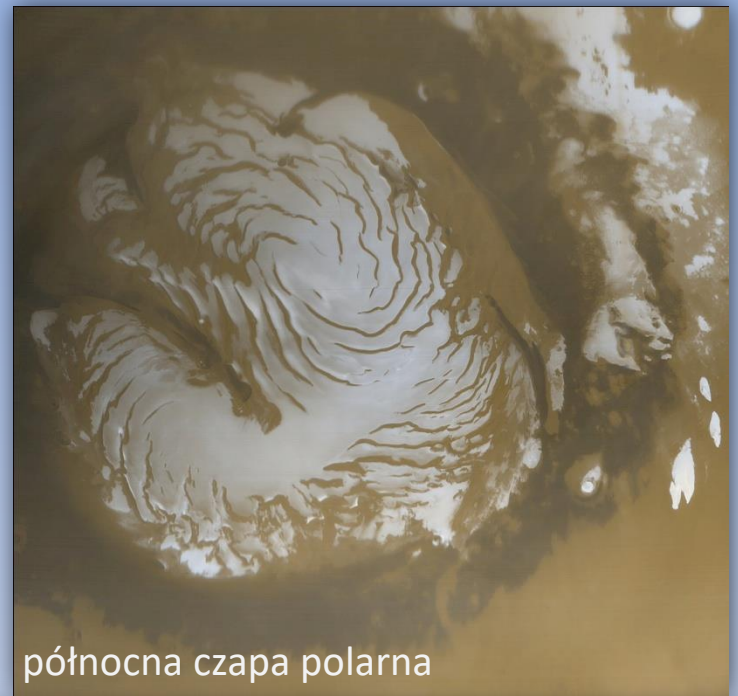
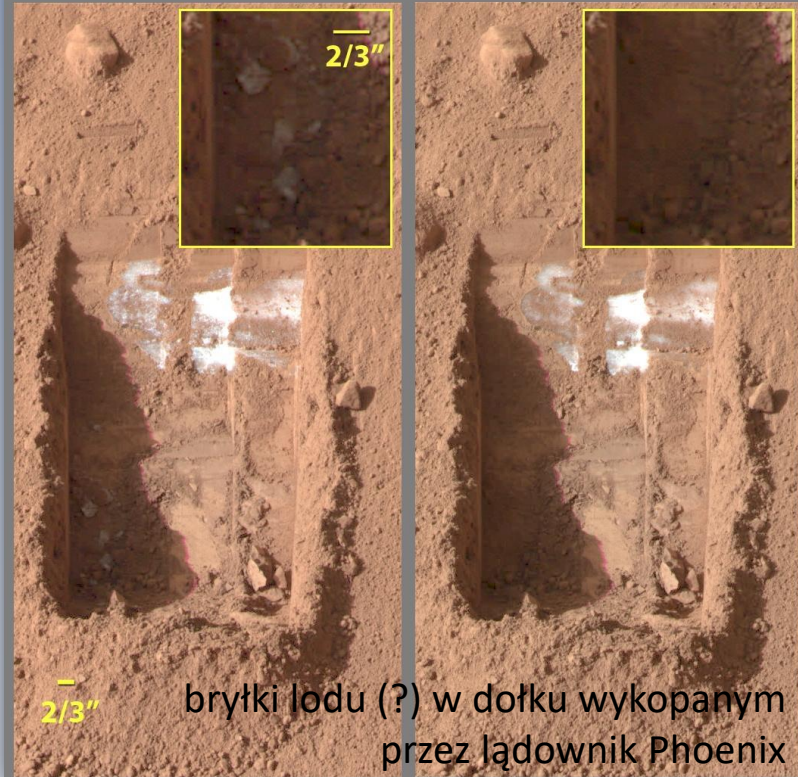
### Mars

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- biegunowe czapy lodowe oraz lód zawarty w gruncie (wieczna zmarzlina)

Sol 20

Sol 24



północna czapa polarna



kratery wypełnione lodowcem?

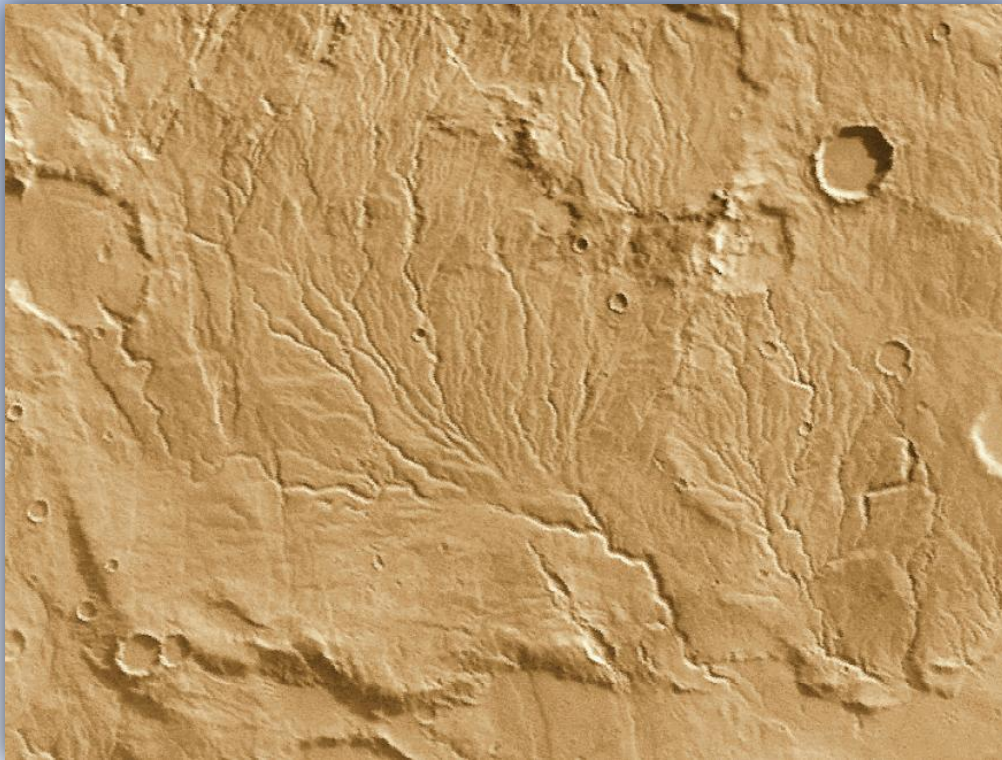
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

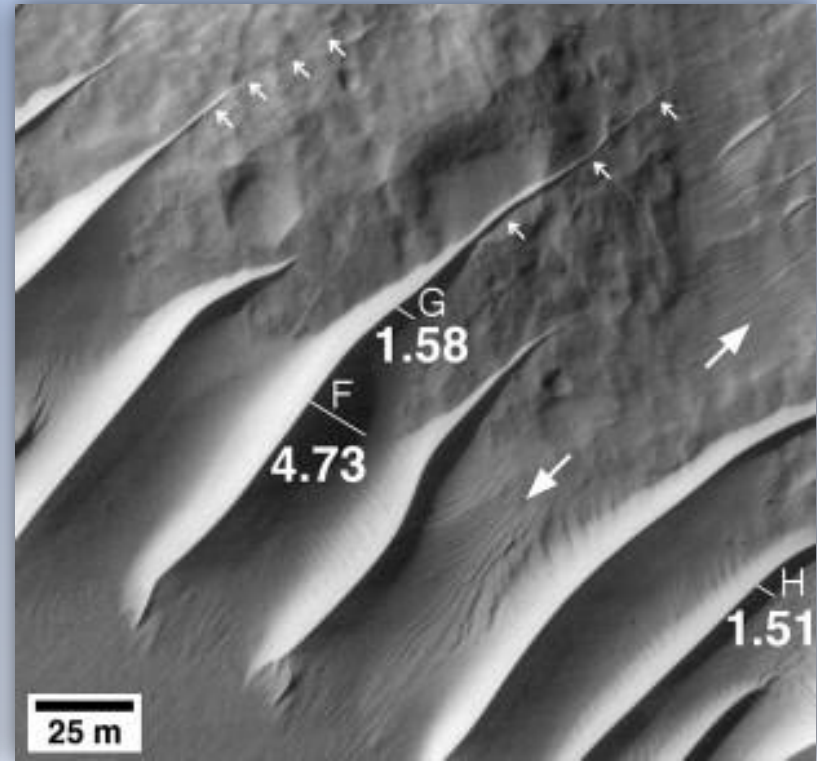
### Mars

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- wyraźne struktury związane z erozją wiatrową i wodną



Sieć rzeczna typu dendrycznego – erozja fluwialna (?)



Wydmy, wysokość podana w metrach

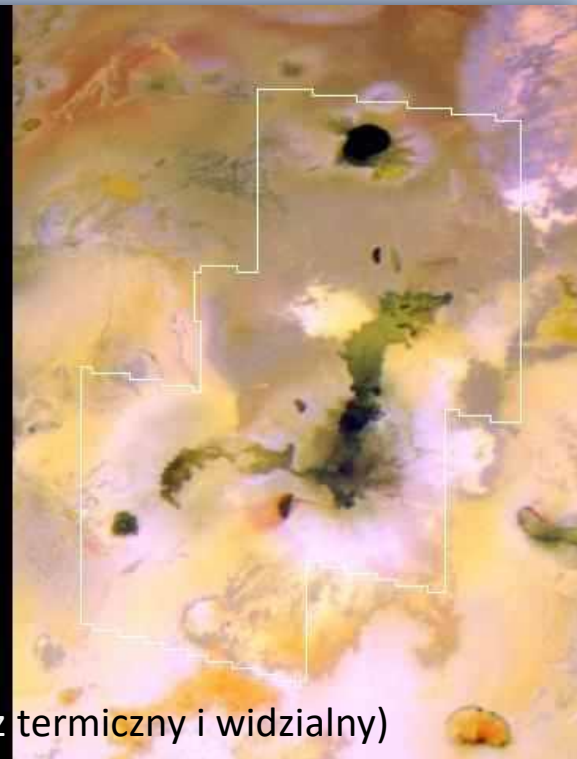
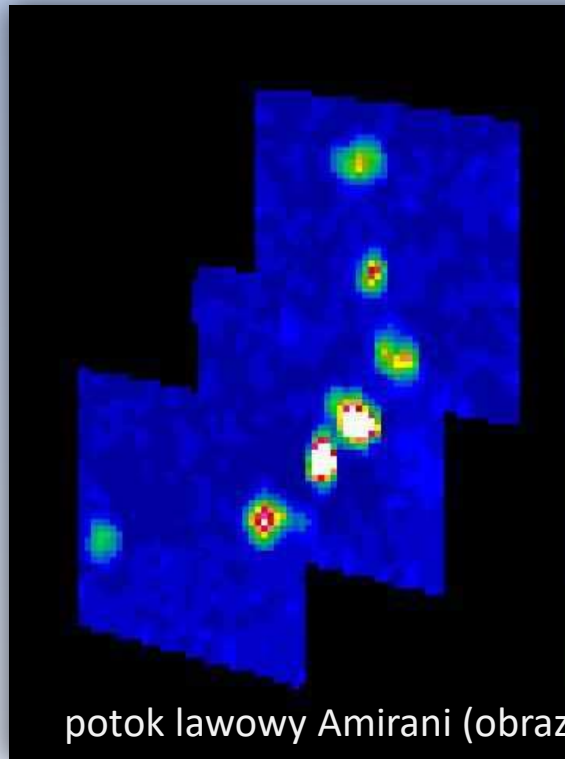
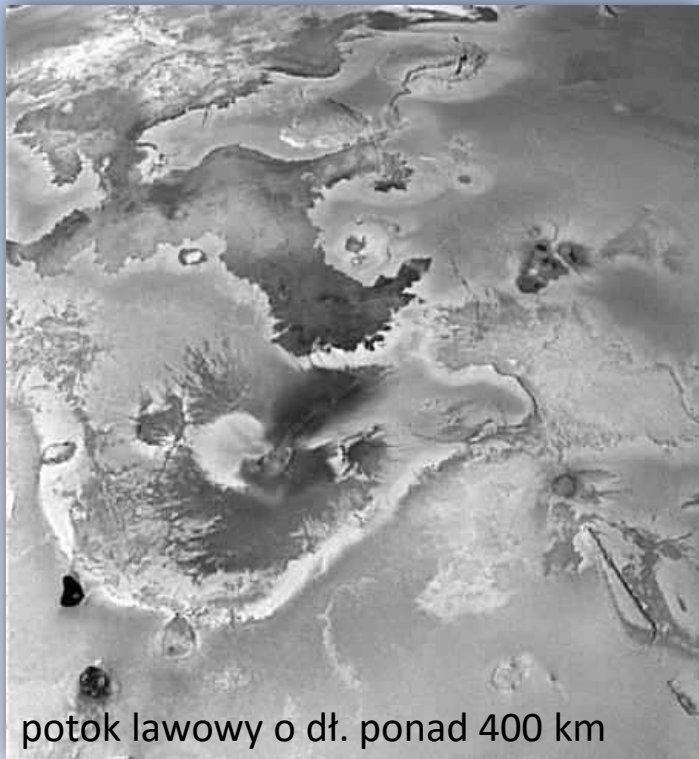
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

Io

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- najbardziej wulkaniczny obiekt w Układzie Słonecznym (źródło energii – grzanie pływowe)
- brak kraterów uderzeniowych – powierzchnia bardzo młoda
- dominują struktury wulkaniczne: kaldery (>400 szt.), jeziora i potoki lawy (długie na setki km), osady piroklastyczne





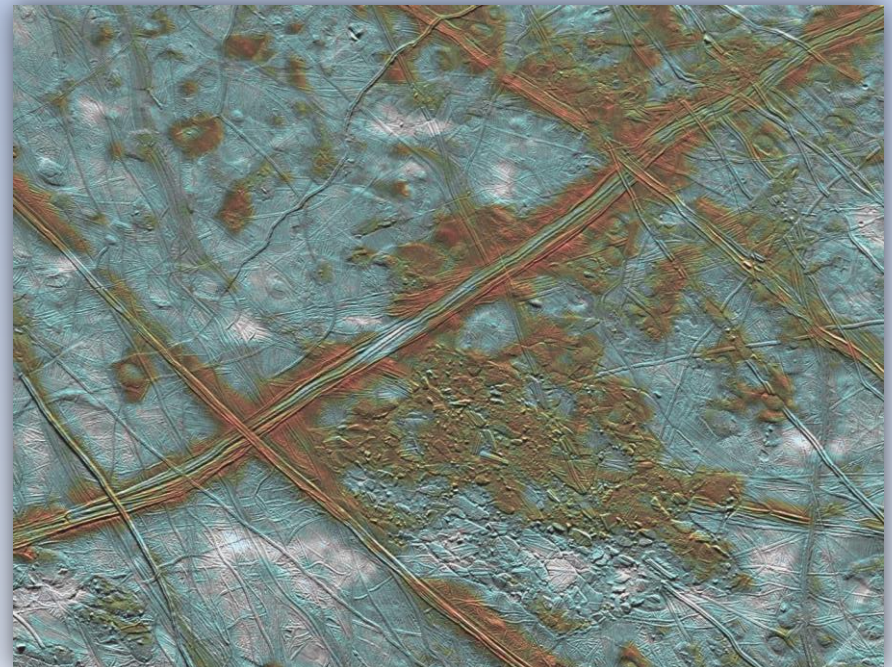
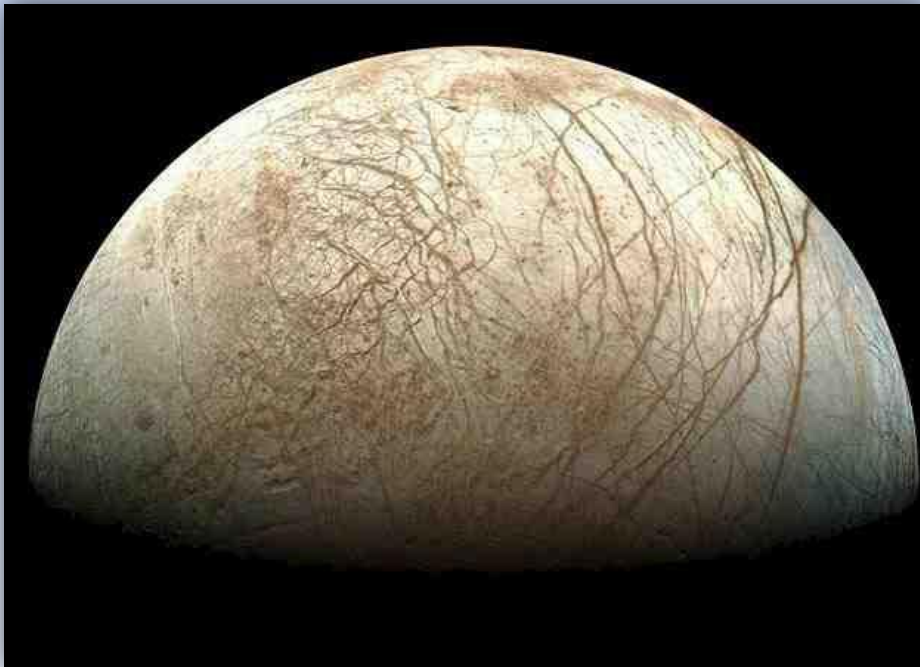
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Europa

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- powierzchnia to prawie czysty lód wodny, który buduje grubą na kilka do 20 km skorupę księżyca
- kratery uderzeniowe są nieliczne; brak też znacznych wzniesień terenu
- główna forma terenu to „prążkowane” równiny; pręgi mają w przekroju poprzecznym kształt litery W (rozchodzenie się czy zderzanie płyt lodowych?, „lodowa” tektonika płyt?)



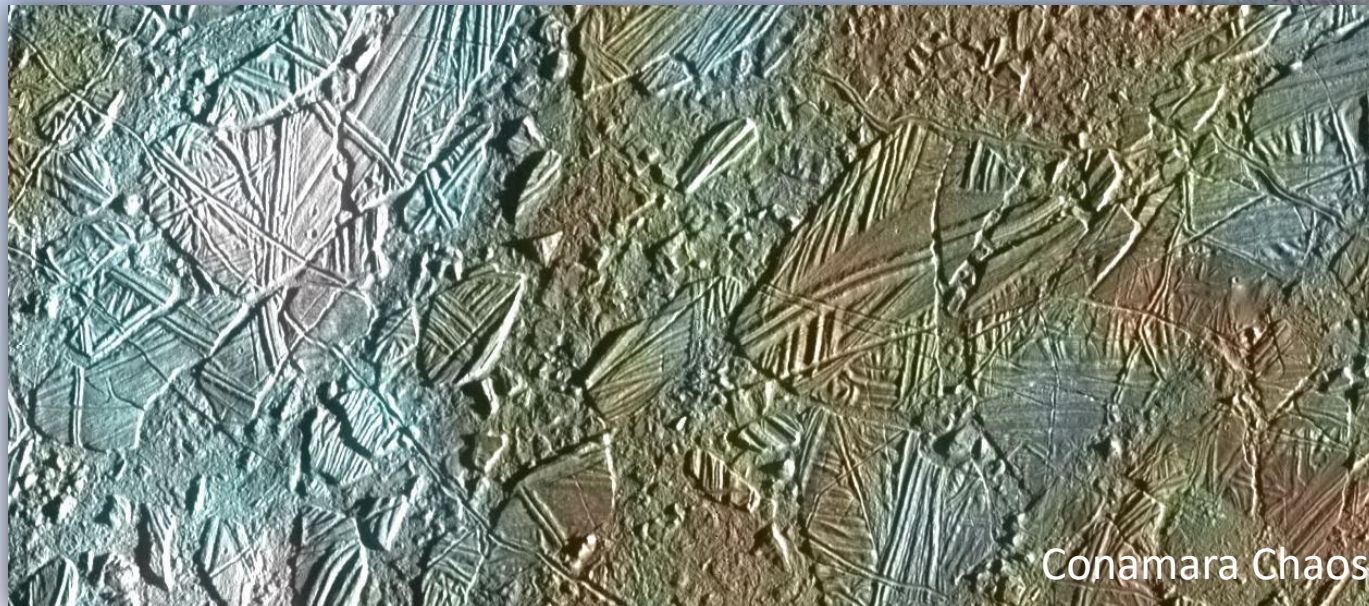
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Europa

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- dwie najciekawsze formy powierzchniowe to:
  - Conamara Chaos – obszar chaotycznie ułożonych bloków pokruszonej skorupy (efekt wydostania się oceanu na powierzchnię?)
  - lodowe wzniesienia, doły – mogły powstać przy wypływie/podpłynięciu tuż pod powierzchnię „ciepłego” lodu (ruchy konwekcyjne)



Conamara Chaos

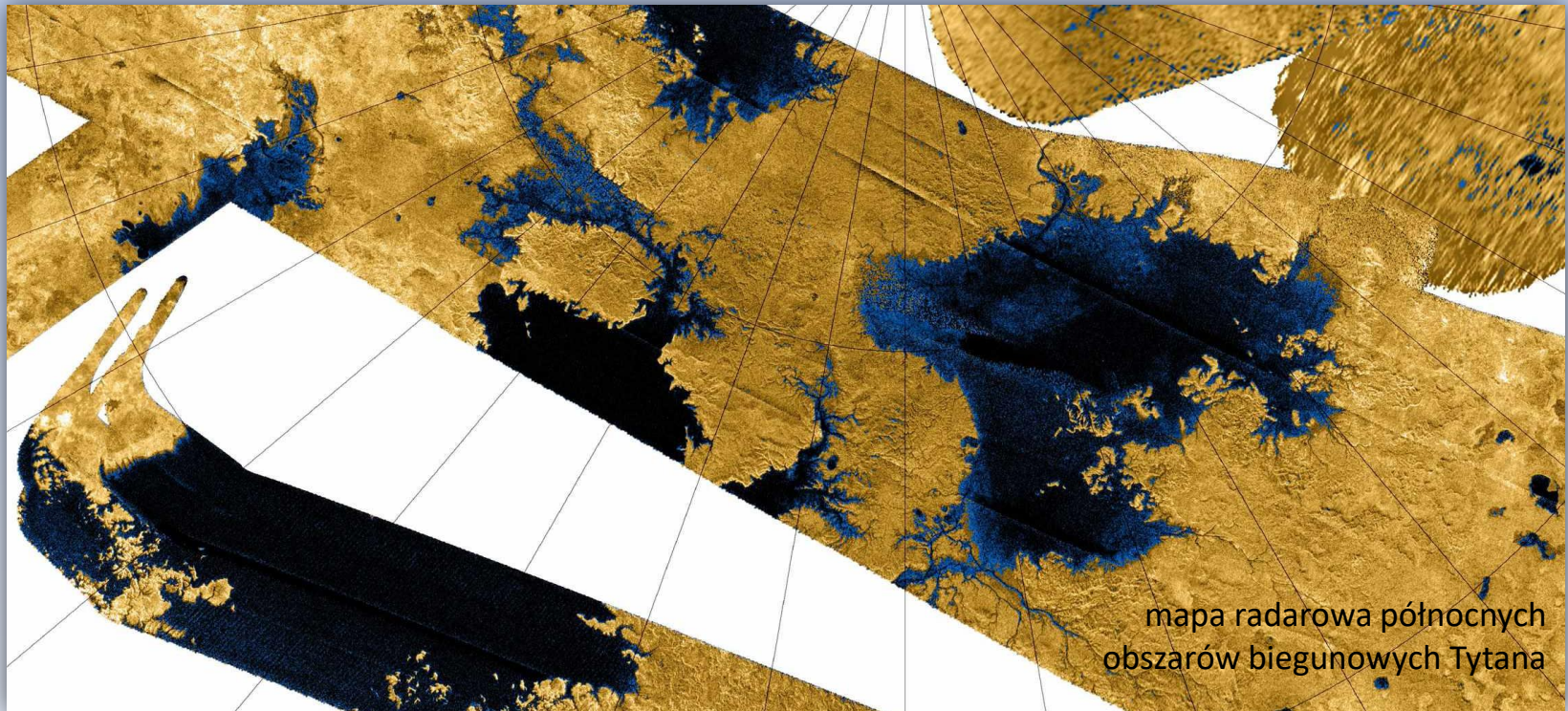
# Powierzchnie planet

## Powierzchnie ciał Układu Słonecznego

### Tytan

Formy charakterystyczne dla obiektu:

- kratery uderzeniowe prawie nie występują – powierzchnia jest młoda
- obecne są struktury typowe dla erozji fluwialnej i eolitycznej oraz występują zbiorniki ciekłych węglowodorów (gęsta atmosfera umożliwiająca istnienie metanu w 3 fazach; występuje cykl podobny do ziemskiego hydrologicznego)
- istnieje możliwość działania kriowulkanizmu



mapa radarowa północnych obszarów biegunowych Tytana