

Astrofizyka Układów Planetarnych

4

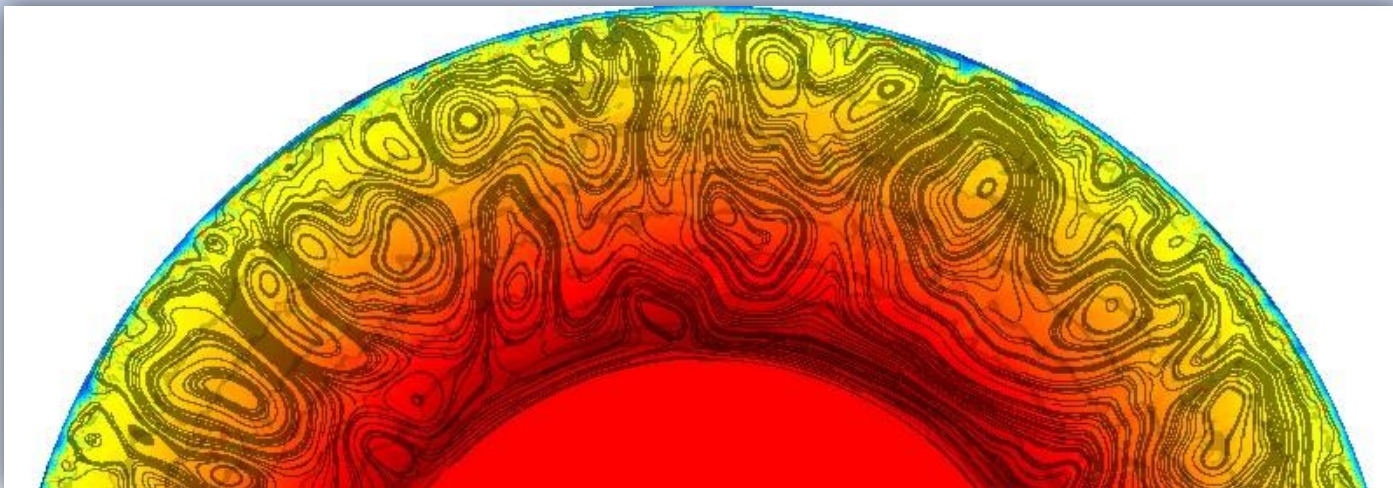
WNĘTRZA CIAŁ PLANETARNYCH

The background of the slide is black, featuring a complex pattern of glowing, multi-colored lines. These lines, in shades of orange, red, and white, radiate from various points, creating a sense of dynamic energy and depth. The lines vary in thickness and brightness, some appearing as sharp, thin streaks while others are thicker and more diffuse.

Wnętrza planet

Wnętrza planet nie podlegają bezpośredniej obserwacji. Co kryje się pod powierzchnią możemy wnioskować na podstawie:

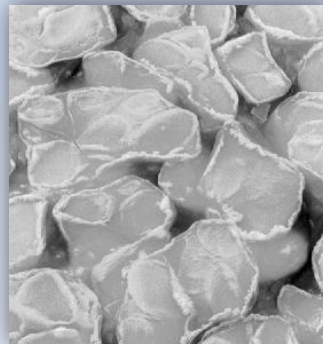
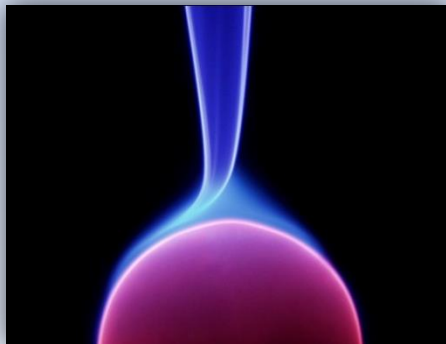
- fale sejsmiczne (Ziemia, Księżyc, Mars)
- masa i rozmiar (*śr. gęstość*)
- pole grawitacyjne
- okres rotacji i spłaszczenie
- pole magnetyczne (lub jego brak)
- strumień energii płynący z wnętrza
- skład chemiczny powierzchni i atmosfery
- aktywność geologiczna
- laboratoryjne badanie materiałów i obliczenia teoretyczne



Wnętrza planet

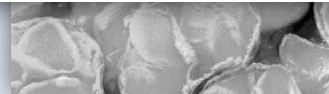
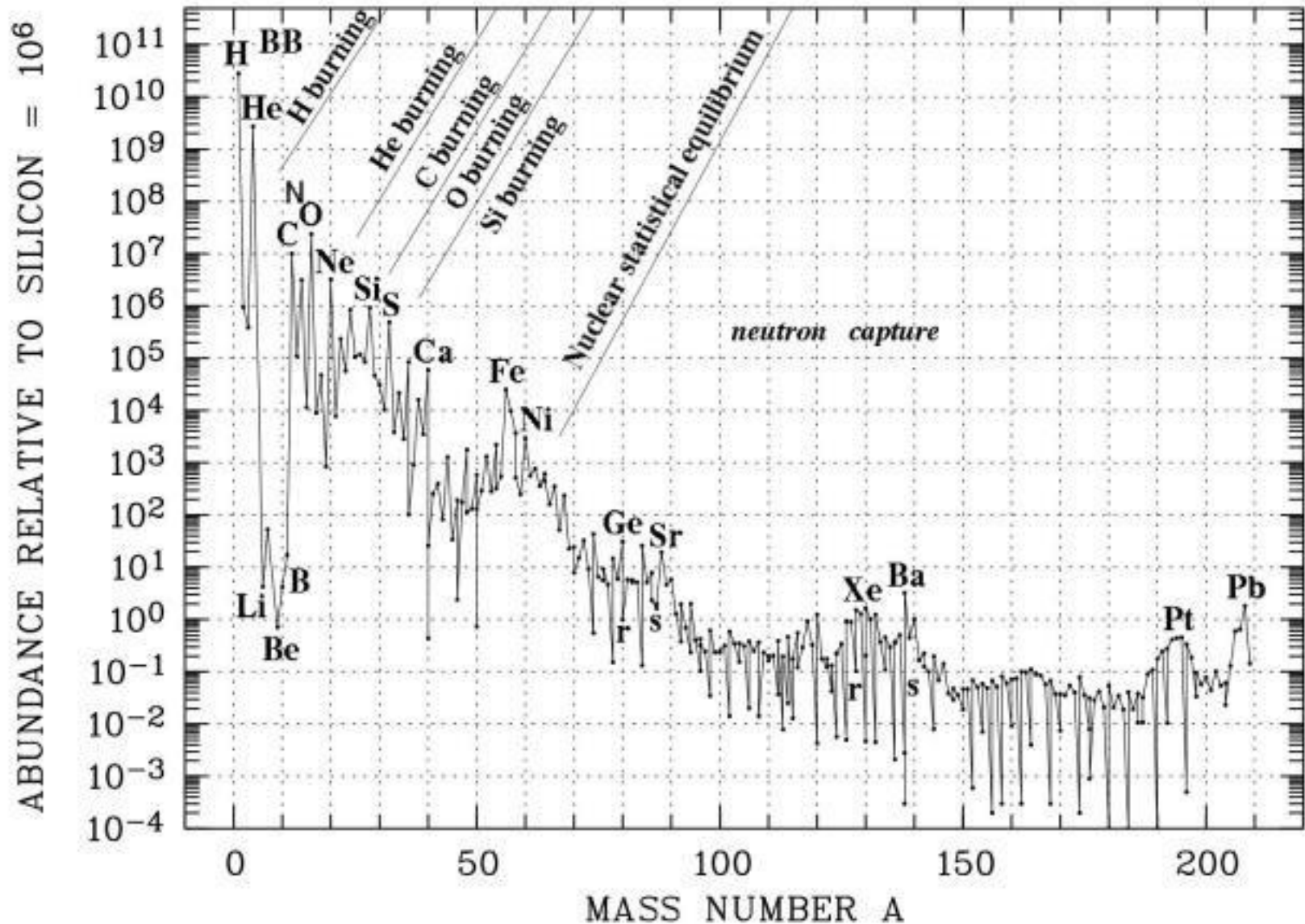
Typy materiałów budujących obiekty w Układzie Słonecznym:

- **plazma** – zjonizowany gaz; występuje w Słońcu, wietrze słonecznym, magnetosferach.
- **gaz** – lekkie pierwiastki (H, He) i ich związki w postaci lotnej; tworzy atmosfery a w przypadku planet gazowych olbrzymów stanowi nawet znaczną część ich masy, przechodząc głęboko w wnętrzu w postać płynną; **gęstość: $< 1 \text{ g/cm}^3$**
- **lód** – lekkie związki chemiczne w stanie stałym (np.: H_2O , CH_4 , NH_3 , CO_2); ważny budulec ciał w zewnętrznej części Układu Słonecznego: lodowe olbrzymy, księżycy, obiekty transneptunowe, komety, pierścienie; **gęstość około 1 g/cm^3**
- **skały** – skupiska jednorodnych lub różnorodnych minerałów, czyli związków chemicznych pierwiastków takich jak: O, Si, Mg, S, Ca, Al, C, Fe, Ni i innych; stanowią główny materiał tworzący planety typu ziemskiego, występują w księżycach, planetoidach a nawet mogą budować jądra planet olbrzymów; **gęstość około 3 g/cm^3**
- **metale** – skupiska głównie Fe i Ni; mogą występować domieszki pierwiastków lżejszych; metale tworzą jądra planet skalistych i być może niektórych z dużych księżyców; **gęstość około 8 g/cm^3**



Wnętrza planet

Podstawowe pierwiastki budujące obiekty planetarne to te najobfitsze we Wszechświecie



Wnętrza planet

masa, kształt, wnętrze

Podstawowe dane obserwacyjne dla naszej wiedzy o budowie wewnętrznej to **masa**, **rozmiar** i **kształt** obiektu.

Masa i rozmiar daje **średnią gęstość**, czyli ogólną informację o **składzie chemicznym** wnętrza obiektu.

Kształt obiektu zależy od: rozmiarów, gęstości, wytrzymałości materiału, oddziaływań grawitacyjnych (pływy), minionych wydarzeń.

W dużych obiektach wnętrze podlega tak dużemu naciskowi warstw położonych powyżej, że materia ulega deformacji (uplastycznieniu, pokonanie wytrzymałości) aż do osiągnięcia równowagi między ciśnieniem a grawitacją (**równowaga hydrostatyczna**).

Kształt równowagowy:

- Nieobrcające się ciało z plastycznego materiału osiągnie kształt sferyczny (plastyczny = deformowalny w geologicznej skali czasu; plastyczność zależy od typu materiału i rozmiaru obiektu)
- Rotacja powoduje spłaszczenie obiektu (do osiągnięcia równowagi grawitacji i siły odśrodkowej)

Kształt małych ciał zależy znacząco od wytrzymałości materiału budulcowego.



Wnętrza planet

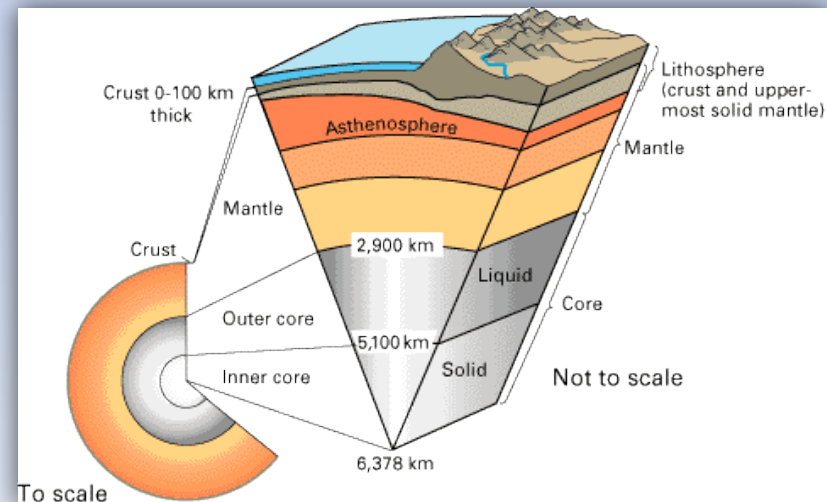
modelowanie wnętrza

W pierwszym przybliżeniu struktura wewnętrzna dużego obiektu (sferycznego) zależy od równowagi hydrostatycznej. Do wyznaczenia tej równowagi i pełnego modelu wnętrza potrzebujemy znać:

- rozkład siły grawitacji
- skład chemiczny
- równanie stanu
- źródła ciepła i jego transport/utrata (struktura termiczna)
- diagramy fazowe (np. zależność temperatury topnienia od ciśnienia)

Otrzymany **model** wnętrza poda nam **warunki fizyczne i stan materii na dowolnej głębokości** pod powierzchnią.

Model musi być poddany kontroli obserwacyjnej, czyli poprawnie przewidywać parametry obserwowane.



Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – równowaga hydrostatyczna

Struktura wewnętrzna obiektu jest w dużym stopniu określana przez równowagę między ciśnieniem a grawitacją.

Rozważmy cylindryczny obszar materii (dr , dA) wewnątrz planety, w odległości r od jej centrum, o następujących cechach:

- gęstość masy: $\rho(r)$
- objętość: $dr \cdot dA$
- masa: $dm = \rho(r) \cdot dr \cdot dA$

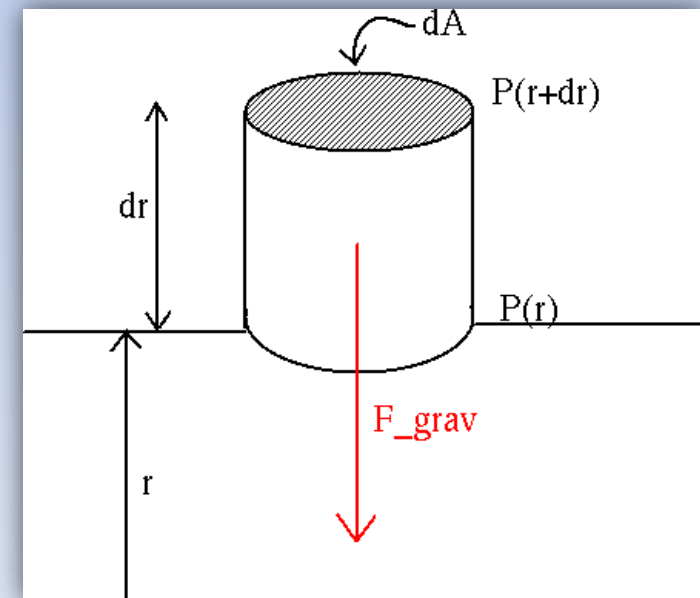
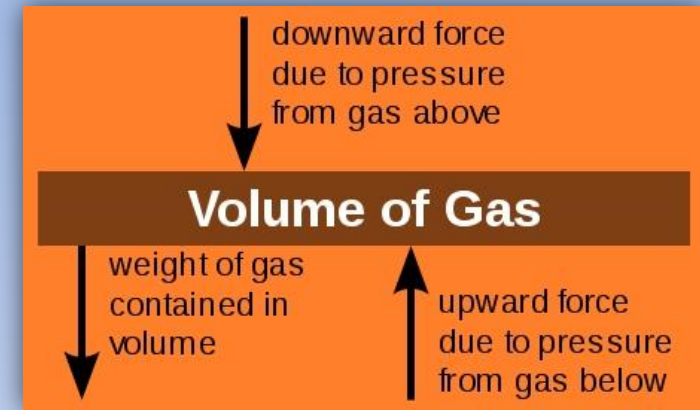
Siła grawitacji wywierana na obszar:

$$F_g = -\frac{G \cdot M(r) \cdot dm}{r^2} = -\frac{G \cdot M(r)}{r^2} \rho(r) \cdot dr \cdot dA$$

$$F_g = -g(r) \cdot \rho(r) \cdot dr \cdot dA$$

Siła wywierana na obszar przez różnicę ciśnień:

$$F_p = (P(r + dr) - P(r)) \cdot dA = dP \cdot dA$$



Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – równowaga hydrostatyczna

W równowadze hydrostatycznej siła grawitacji i siła wywierana przez ciśnienie są takie same:

$$F_p = F_g$$

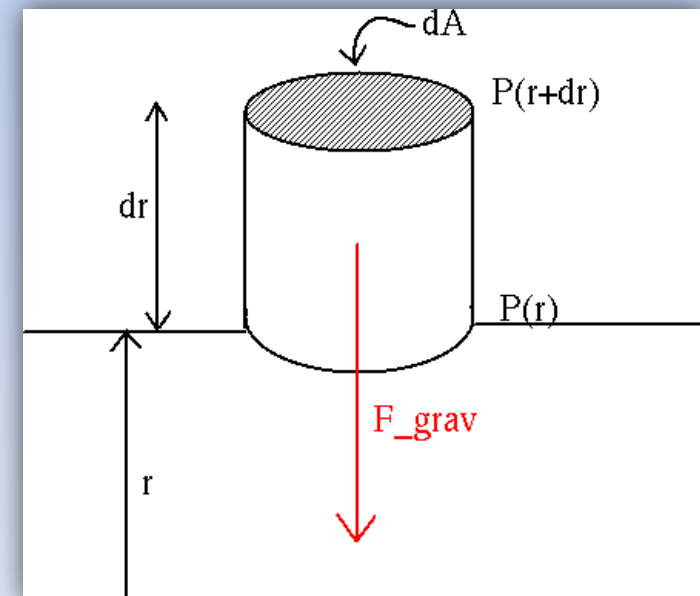
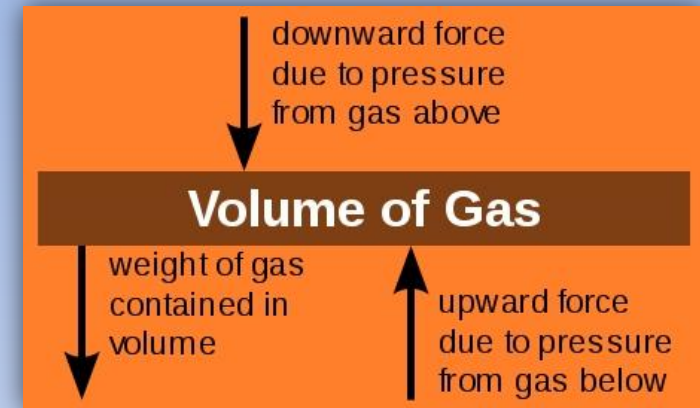
$$dP \cdot dA = -g(r) \cdot \rho(r) \cdot dr \cdot dA$$

Stąd otrzymujemy równanie równowagi hydrostatycznej:

$$\frac{dP}{dr} = -g(r) \cdot \rho(r)$$

Równanie to pozwala znaleźć rozkład $P(r)$ we wnętrzu planety, jeśli znamy $\rho(r)$ i $g(r)$:

$$P(r) = \int_r^R g(r') \cdot \rho(r') dr'$$



Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – równowaga hydrostatyczna

Dwa proste oszacowania ciśnienia w centrum planety ($r=0$):

1. przy założeniu $\rho(r) = \rho_{sr}$ i $g(r) = g(R)$

$$P_c = \frac{3GM^2}{4\pi R^4}$$

2. przy założeniu $\rho(r) = \rho_{\dot{s}r}$

$$P_c = \frac{3GM^2}{8\pi R^4}$$

Drugie oszacowanie może stanowić **dolne ograniczenie** na P_c , ponieważ zwykle gęstość spada z promieniem. Jest dobre dla ciał względnie małych o jednorodnej gęstości (Księżyc).

Pierwsze oszacowanie zawiąza siłę grawitacji wewnątrz i daje wynik 2x większy od drugiego oszacowania (**górne ograniczenie**). Jest dobre dla obiektów, w których gęstość spada z promieniem, ale niezbyt szybko (Ziemia).

(oszacowania P_c na ćwiczeniach)

Planet	Radius (equatorial) (km)	Density (g cm ⁻³)	Uncompressed density (g cm ⁻³)	Central pressure (Mbar)
Mercury	2 440	5.43	5.3	~ 0.4
Venus	6 042	5.20	4.3	~ 3
Earth	6 378	5.515	4.4	3.6
Moon	1 738	3.34	3.3	0.045
Mars	3 390	3.93	3.74	~ 0.4
Jupiter	71 492	1.33		~ 80
Saturn	60 268	0.69		~ 50
Uranus	25 559	1.32		~ 20
Neptune	24 766	1.64		~ 20

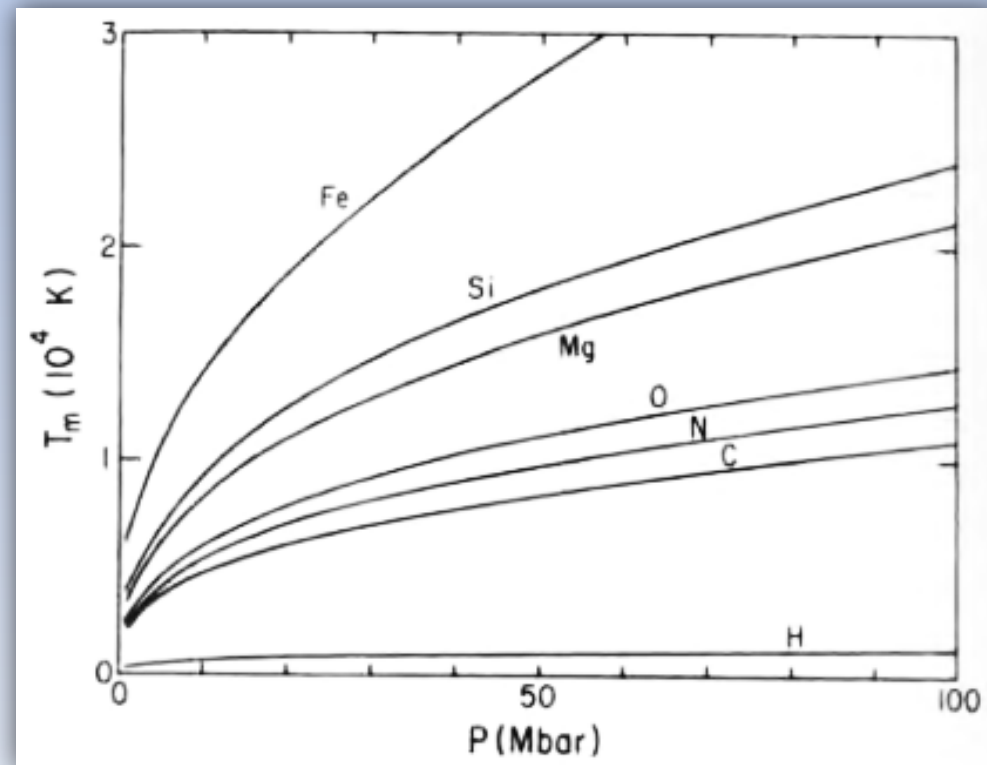
Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – diagramy fazowe

- Właściwości fizyczne materiału i procesy zachodzące w wnętrzu planety zależą od stanu skupienia (fazy) w jakiej on występuje.
- Faza materii zależy od temperatury i ciśnienia.
- Sytuacja bardziej skomplikowana dla mieszaniny pierwiastków (reakcje chemiczne, separacja składników)
- W jednej temperaturze możemy mieć mieszankę różnych faz

przykład: temperatury topnienia T_m
wybranych pierwiastków

- T_m rośnie z ciśnieniem...
- i liczbą atomową



Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – diagramy fazowe

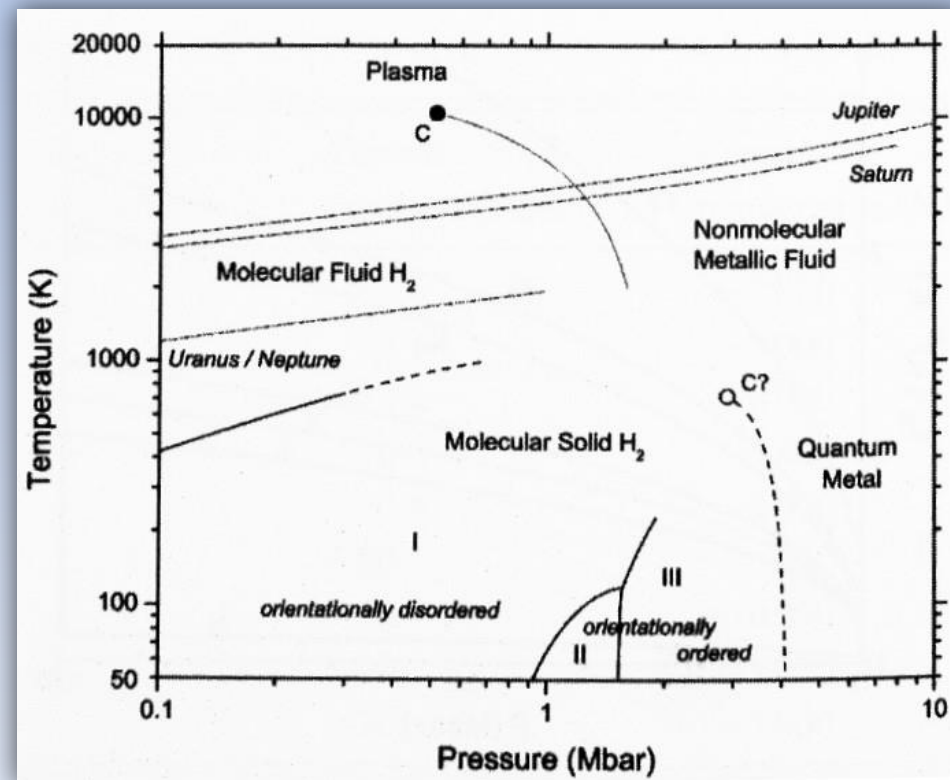
- Zachowanie materiału przy różnych ciśnieniach i temperaturach badamy w laboratoriach lub teoretycznie (powyżej 5-10 Mbar; $1\text{bar}=10^5\text{Pa}$). W wyniku otrzymujemy **diagram fazowy**.

przykład: diagram fazowy wodoru

- poniżej $\sim 1 - 4$ Mbar i ~ 1000 K – stały lub ciekły wodór molekularny
- powyżej tego ciśnienia – przejście w wodór atomowy (ciekły, stały) a potem w metal kwantowy.
- dla wysokich temperatur i niskich ciśnień – plazma

... i skutki dla Jowisza:

ciekły wodór metaliczny jest bardzo dobrym przewodnikiem elektryczności, więc jego ruch może wygenerować silne pole magnetyczne



Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – diagramy fazowe

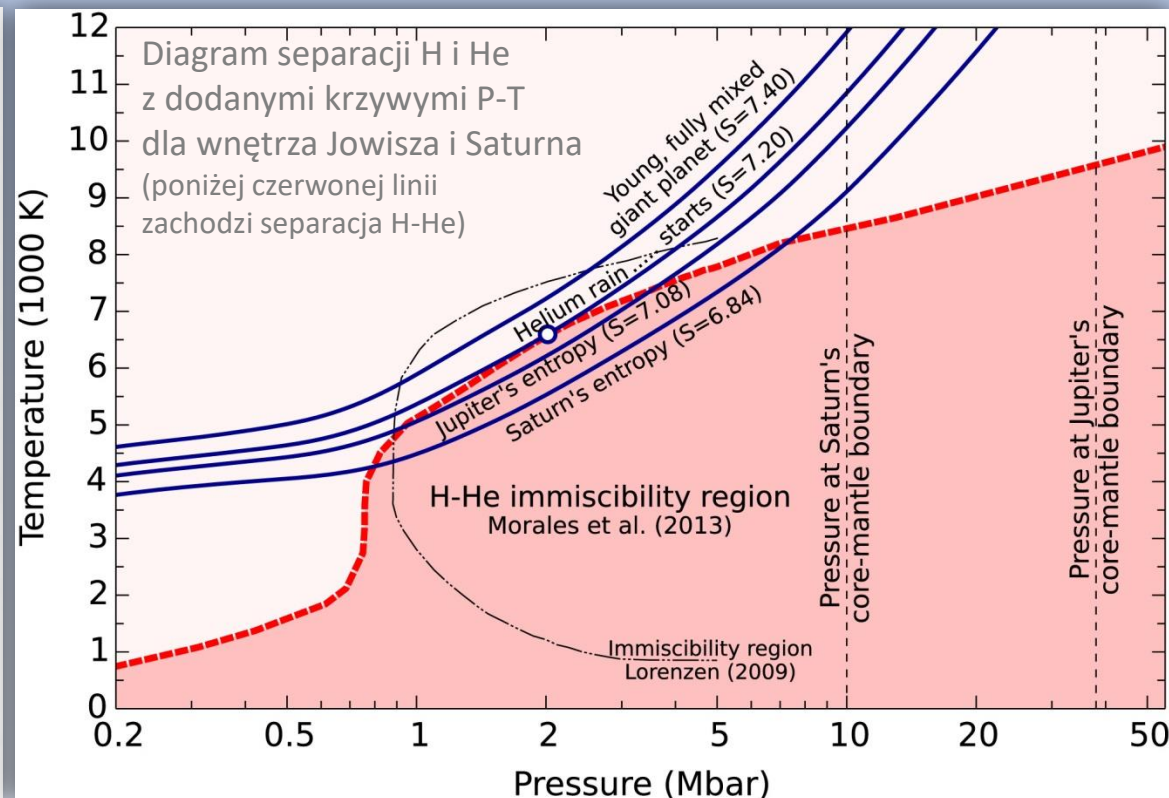
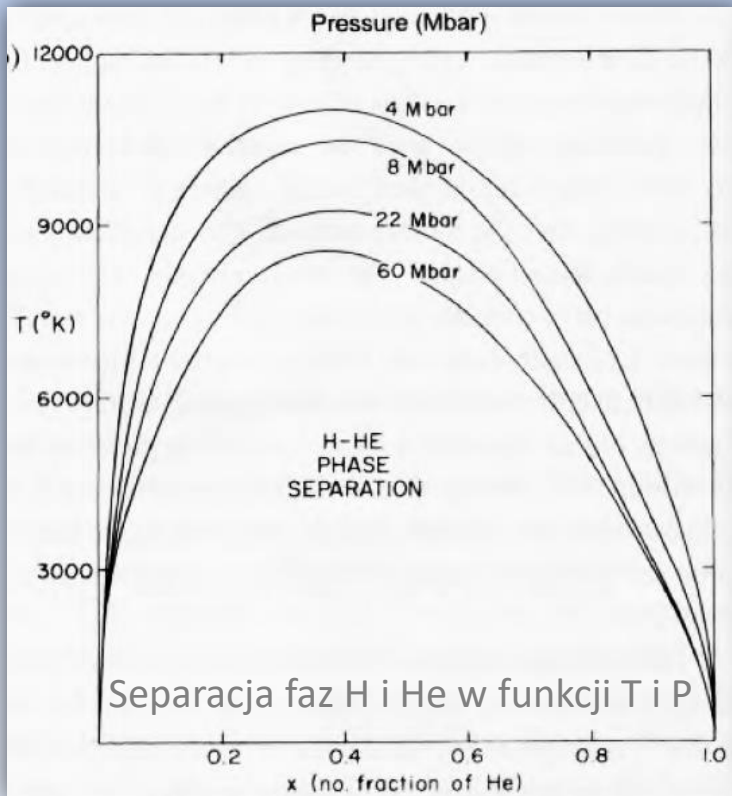
przykład: separacja faz wodoru i helu we wnętrzu Jowisza i Saturna

H i He mieszają się tylko w odpowiednio wysokich temp. i ciśnieniu (zależnie od względnej obfitości)

Separacja faz może tłumaczyć obniżoną obfitość He w atmosferach obu planet.



Separacja faz olej – ocet winny

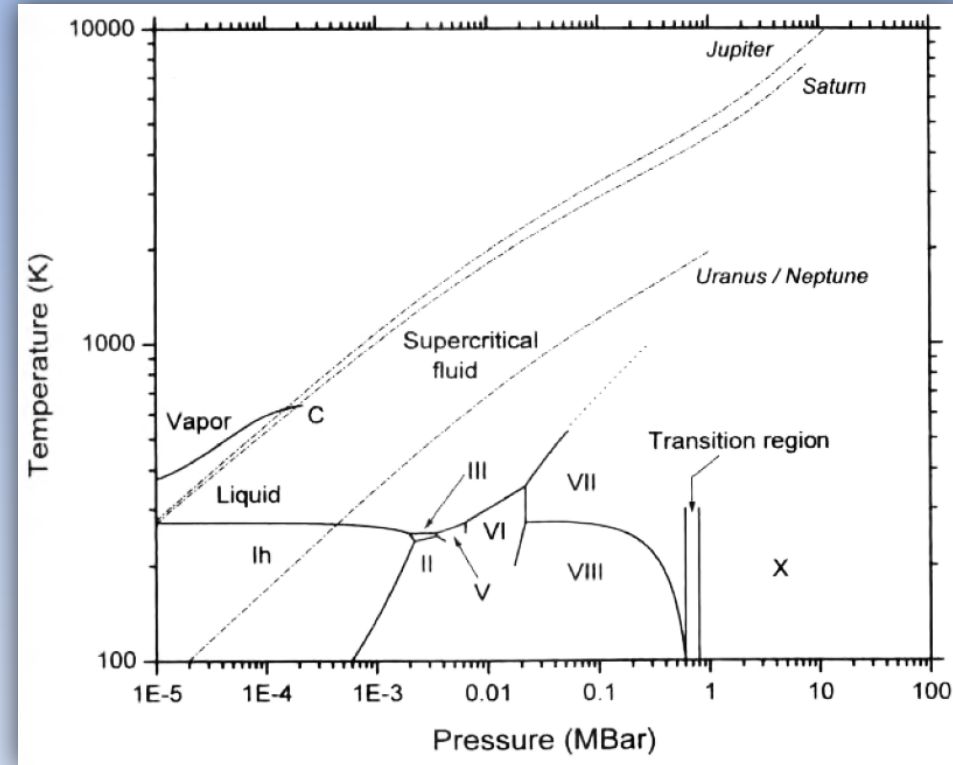


Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – diagramy fazowe

przykład: diagram fazowy wody

- wiele form krystalicznych o różnej gęstości
- dla $P > 200$ kbar – ciecz przewodząca (możliwość wzbudzenia mechanizmu dynama)
- istotne dla wnętrza księżyców i innych obiektów za linią śniegu, w tym lodowych olbrzymów



Inne składniki:

- Dla minerałów i skał diagramy fazowe są jeszcze bardziej złożone
- Nie do końca poznane jest zachowanie Fe (i domieszek) w wysokich ciśnieniach

Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – równanie stanu

Równanie stanu wiąże ze sobą parametry fizyczne materiału: ciśnienie, gęstość, temperaturę i skład chemiczny:

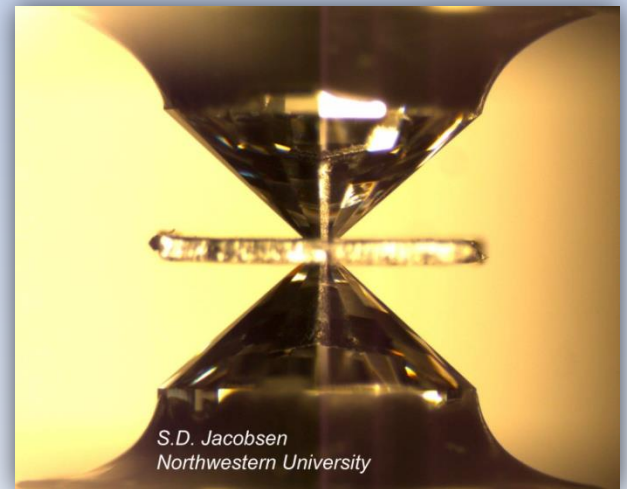
$$P = P(\rho, T, f_i)$$

W atmosferach planet do ciśnienia około 50 bar możemy stosować równanie stanu gazu doskonałego:

$$P = nkT$$

Dla większych ciśnień to przybliżenie nie jest dopuszczalne – rozmiary atomów/molekuł stają się niezaniebawane, dochodzi do oddziaływań między nimi, pojawiają się fazy ciekłe i stałe. Dla takich warunków równanie stanu wyznaczane jest zwykle eksperymentalnie.

Prasa z kowadłami diamentowymi do poddawania próbek materiałów wysokim ciśnieniom (do 1 Mbar)



Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – pole grawitacyjne, rotacja

- Potencjał grawitacyjny sferycznego obiektu (nierotujące ciało w równowadze hydrostatycznej)

$$\Phi_g(r) = -\frac{GM}{r}$$

nie dostarcza informacji o budowie wewnętrznej tego obiektu.

- Rotacja takiego obiektu powoduje jego spłaszczenie (rotacyjne).
- Wielkość deformacji rotacyjnej zależy od prędkości rotacji i rozkładu masy w obiekcie (i plastyczności budulca).
- Deformacja rotacyjna zmienia potencjał grawitacyjny wokół obiektu. Potencjał można zapisać jako:

$$\Phi_g(r, \varphi, \vartheta) = -\left(\frac{GM}{r} + \Delta\Phi_g(r, \varphi, \vartheta)\right)$$

gdzie $\Delta\Phi_g$ zawiera odchylenia rzeczywistego potencjału od potencjału obiektu sferycznego.

- Kształt $\Phi_g(r, \varphi, \vartheta)$ można wyznaczyć z pomiarów zmian/zaburzeń:
 - orbit orbiterów i sond przelatujących obok obiektu (np. efekt Dopplera, altymetria),
 - orbit księżyców i pierścieni (np. precesja orbit)
- Z wyznaczonego potencjału $\Phi_g(r, \varphi, \vartheta)$ można otrzymać dane o rozkładzie masy w obiekcie $\rho(r, \varphi, \vartheta)$.

Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – pole grawitacyjne, rotacja

[szczegóły]

- Potencjał grawitacyjny obiektu symetrycznego osiowo (spełnione dla rotującego plastycznego ciała w równowadze hydrostatycznej) można zapisać w formie szeregu fourierowskiego:

$$\Phi_g(r, \vartheta) = -\frac{GM}{r} \left[1 - \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{R_e}{r} \right)^n J_n P_n(\cos(\vartheta)) \right]$$

ϑ – dopełnienie szerokości, R_e – promień równikowy obiektu, J_n – momenty grawitacyjne, $P_n(\cos(\theta))$ – wielomiany Legendre'a. $J_1 = 0$ – ponieważ środek układu jest w środku masy.

- Potencjał grawitacyjny mierzony poza obiektem zależy od rozkładu masy w obiekcie, $\rho(\vec{r}')$:

$$\Phi_g(\vec{r}) = -G \int \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r'$$

$\rho(\vec{r}')$ - rozkład masy w punkcie \vec{r}' , $|\vec{r} - \vec{r}'|$ - odległość między punktem obserwacji a danym elementem masy, dV' - element objętości obiektu.

- Łącząc powyższą zależność z zapisem potencjału Φ_g przez szereg Fouriera, dostajemy zależność J_n od rozkładu masy (**J_n opisują rozkład masy w obiekcie**).

$$J_n = -\frac{1}{MR_e^n} \int r^n P_n(\cos(\vartheta)) \rho(r, \vartheta) d^3r$$

Wnętrza planet

modelowanie wewnątrz – pole grawitacyjne, rotacja

- Dla nierotującego ciała plastycznego w równowadze hydrostatycznej $J_n = 0$, stąd:

$$\Phi_g(r) = -\frac{GM}{r}$$

- Dla rotującego ciała plastycznego w równowadze hydrostatycznej $J_n \approx 0$ dla n nieparzystych, jeśli występuje symetria rozkładu masy względem osi rotacji i płaszczyzny równika – dobre przybliżenie dla planet olbrzymów. Dla obiektów skalistych/lodowych (planety typu Ziemi, księżyce) nie można pominąć nieparzystych J_n . (tabela poniżej)

Body	J_2 ($\times 10^{-6}$)	J_3 ($\times 10^{-6}$)	J_4 ($\times 10^{-6}$)	J_6 ($\times 10^{-6}$)
Mercury	60 ± 20			
Venus	4.46 ± 0.03	-1.93 ± 0.02	-2.38 ± 0.02	
Earth	1 082.627	-2.532 ± 0.002	-1.620 ± 0.003	-0.21
Moon	203.43 ± 0.09			
Mars	$1 960.5 \pm 0.2$	31.5 ± 0.5	-15.5 ± 0.7	
Jupiter	$14 696.4 \pm 0.2$	-0.0450 ± 0.0011	-587 ± 2	34 ± 5
Saturn	$16 290.7 \pm 0.3$	-0.0590 ± 0.0076	-936 ± 3	86 ± 9
Uranus	$3 343.5 \pm 0.1$		-28.9 ± 0.2	
Neptune	$3 410 \pm 9$		-35 ± 10	

Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – pole grawitacyjne, rotacja

- Kształt (powierzchnia ekwipotencjalna) rotującego plastycznego obiektu w równowadze hydrostatycznej zależy od potencjału grawitacyjnego i rotacyjnego (siła odśrodkowa):

$$\Phi_g(r, \vartheta) + \Phi_{rot}(r, \vartheta) = \Phi_{tot}(r, \vartheta) = \text{const.} \quad (*)$$

gdzie $\Phi_{rot}(r, \vartheta) = -\frac{1}{2}r^2\omega_{rot}^2 \sin^2(\vartheta)$

Kształt (spłaszczenie geometryczne, ε) powiązany jest więc rozkładem masy ρ , prędkością rotacji ω_{rot} , masą całkowitą M , promieniem R i momentami grawitacyjnymi J_n

- Rozwiązanie równania (*) dla powierzchni ekwipotencjalnej w przypadku obiektów równowadze hydrostatycznej daje następującą zależność:

$$\varepsilon \equiv \frac{R_e - R_p}{R_e} \approx \frac{3}{2}J_2 + \frac{q_r}{2}$$

gdzie R_e i R_p to równikowy i biegunowy promień obiektu, q_r to iloraz siły odśrodkowej i grawitacyjnej, $q_r \equiv \frac{\omega_{rot}^2 R^3}{GM}$

- Moment J_2 jest bezpośrednio związany ze spłaszczeniem rotacyjnym, które zależy m.in. od rozkładu masy.
- Momenty wyższego rzędu są proporcjonalne do q_r : $J_{2n} \propto q_r^n$ i dostarczają bardziej szczegółowej informacji o rozkładzie masy. Są jednak mniejsze od J_2 (trudno je wyznaczyć).

Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – pole grawitacyjne, rotacja

- W przypadku rotującego ciała plastycznego o jednorodnej gęstości ($\rho = \text{const.}$) otrzymujemy:

$$J_2 = \frac{1}{2} q_r$$

- Współczynnik odpowiedzi (opisuje „odpowieź” planety na jej rotację, tj. spłaszczenie)

$$\Lambda_2 \equiv \frac{J_2}{q_r} = \frac{1}{2}$$

- Dla obiektu niejednorodnego, o gęstości wzrastającej do środka:

$$J_2 < \frac{1}{2} q_r \quad \text{lub} \quad \Lambda_2 < \frac{1}{2}$$

J_2 i Λ_2 niosą informację o stopniu koncentracji masy ku środkowi obiektu. Stopień koncentracji masy, wpływa na kształt (spłaszczenie) obiektu.

Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – pole grawitacyjne, rotacja

- Równanie (przybliżenie) Radau-Darwina daje nam przybliżoną relację między znormalizowanym (biegunowym) momentem bezwładności I/MR^2 , rotacją i grawitacją oraz spłaszczeniem (dla szybko rotujących obiektów w stanie równowagi hydrostatycznej – efekty niehydrostatyczne są zanedbywalne):

$$\frac{I}{MR^2} = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{2}{5} \sqrt{\frac{5q_r}{2\varepsilon} - 1} \right)$$

gdzie q_r to iloraz siły odśrodkowej i grawitacyjnej, a ε to spłaszczenie geometryczne.

$$q_r \equiv \frac{\omega_{rot}^2 R^3}{GM} \quad \varepsilon = \frac{R_e - R_p}{R_e}$$

Równanie R-D pozwala obliczyć I/MR^2 z łatwo dostępnych danych obserwacyjnych. Wartość tego momentu niesie informację o stopniu koncentracji masy do centrum. Dla jednorodnej kuli: $I/MR^2 = 0.4$, a dla pustej sfery: $I/MR^2 = 2/3$. Jeśli gęstość wzrasta z głębokością to $I/MR^2 < 0.4$.

W przypadku niespełnienia założeń (wolna rotacja, efekty niehydrostatyczne, znaczna koncentracja masy ku centrum), wartość I/MR^2 obliczona z równania R-D odbiega od rzeczywistych wartości.

Wnętrza planet

- Dla większości dużych obiektów $I/MR^2 < 0.4$. Masa jest skoncentrowana ku centrum. Wnętrze może wykazywać budowę warstwową (dyferencjacja).
- Saturn – najniższa wartość wśród planet, efekt silnej koncentracji masy do centrum i niskiej gęstości średniej.
- Ganimedes – najniższa wartość wśród obiektów stałych, efekt dyferencjacji (jądro żelazowe, skorupa lodowa).
- Merkury, Wenus, Księżyc – nie można użyć rów. R-D, zbyt wolna rotacja.
- Planety olbrzymy – nie można użyć rów. R-D, zbyt duża koncentracja masy ku centrum.

Planet	Moment of Inertia Factor
Mercury	0.346
Venus	0.337
Earth	0.3307
Mars	0.366
Jupiter	0.2533
Saturn	0.220
Uranus	0.225
Neptune	0.227

Moon	Moment of Inertia Factor
Ganymede	0.31
Titan	0.34
Callisto	0.33
Io	0.37
Europa	0.34
The Moon	0.3931

Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – ciepło wewnętrzne

Porównanie temperatur efektywnych z równowagowymi dla 3 planet olbrzymów wskazuje, że mają one znaczne źródła ciepła wewnętrznego. Również inne obiekty w Układzie Słonecznym są ciepłe wewnątrz. To ciepło jest oddawane do otoczenia w postaci promieniowania podczerwonego.

Skąd pochodzi wewnętrzne ciepło, ile go jest i jak efektywnie jest oddawane?

Body	T_e (K)	T_{eq} (K)	H_i (erg cm ⁻² s ⁻¹)	L/M (erg g ⁻¹ s ⁻¹)
Sun	5770		6.2×10^{10}	1.9
Carbonaceous chondrites				4×10^{-8}
Mercury		446		
Venus		238		
Earth		263	75	6.4×10^{-8}
Moon		277	~18	~ 10^{-7}
Mars		222	40	9×10^{-8}
Io		92	1500–3000	~ 10^{-5}
Jupiter	124.4	113	5440	1.8×10^{-6}
Saturn	95.0	83	2010	1.5×10^{-6}
Uranus	59.1	60	<42	< 4×10^{-8}
Neptune	59.3	48	433	3.2×10^{-7}

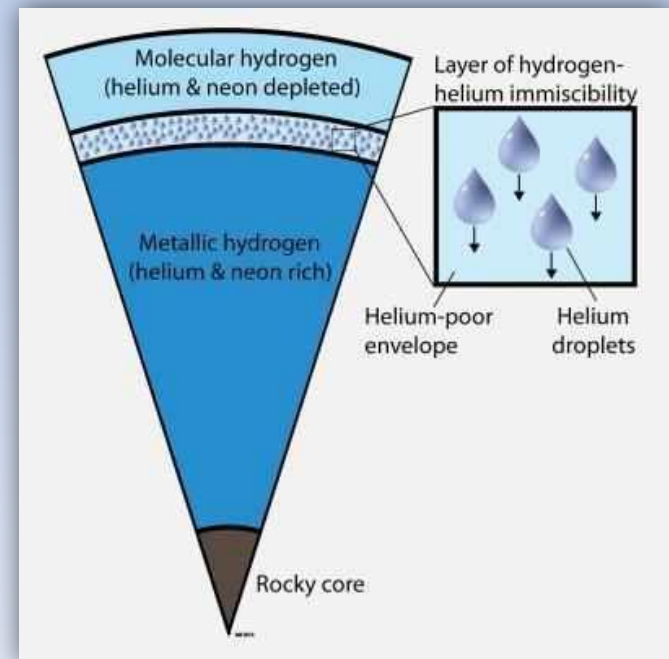
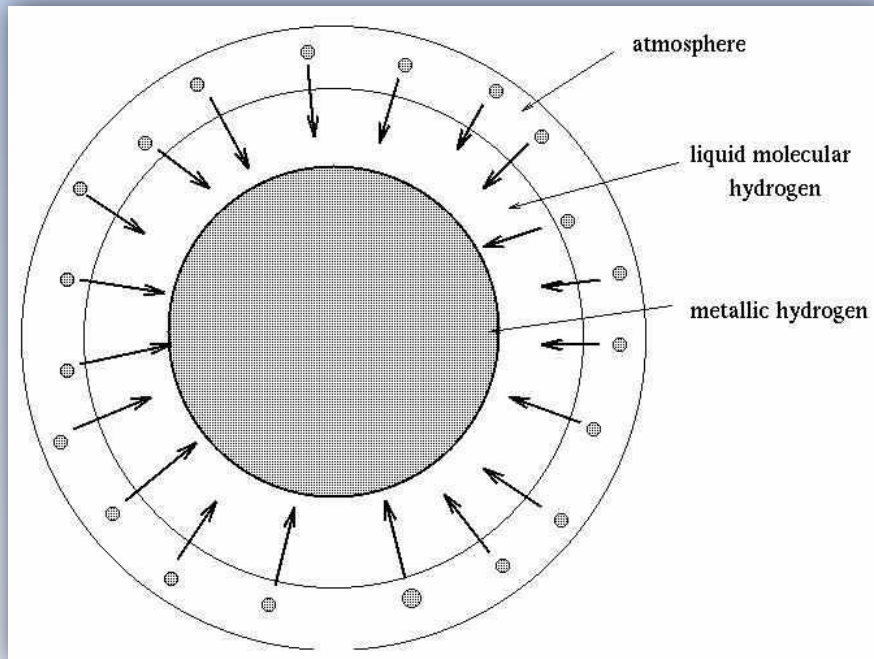
T efektywna T równowagowa strumień cieplny z wnętrza

Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – źródła ciepła wewnętrznego

Ciepło wewnętrzne może być następującego pochodzenia:

- ciepło grawitacyjne dostarczone w fazie powstawania obiektu przez akrecję materiału (energia grawitacyjna zamieniana jest na termiczną); to źródło dobrze tłumaczy obserwowany strumień ciepła z planet olbrzymów (np.: Jowisz, Neptun)
- ciepło grawitacyjne powstające przy dyferencjacji wnętrza obiektu (energia grawitacyjna zamieniana jest na termiczną); ten proces wyjaśnia obserwowany strumień ciepła dla Saturna („deszcz helowy”) [rysunki poniżej]

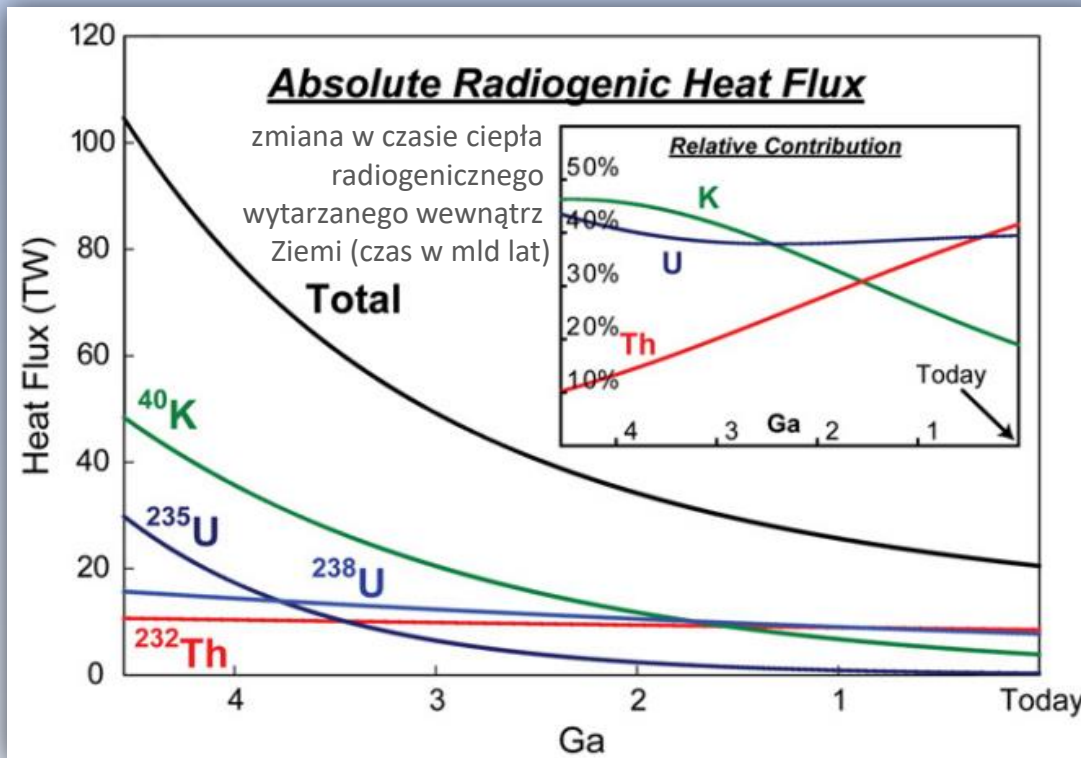


Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – źródła ciepła wewnętrznego

Ciepło wewnętrzne może być następującego pochodzenia:

- rozpad radioaktywny pierwiastków: ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K o czasie połowicznego rozpadu rzędu kilku mld lat stanowi ważne źródło ciepła dla obiektów skalnych i skalno-lodowych, np. Ziemia
- grzanie pływowe powodowane jest siłami pływowymi, które deformują ciało; ciągła deformacja podgrzewa wnętrze; np.: Io, Europa

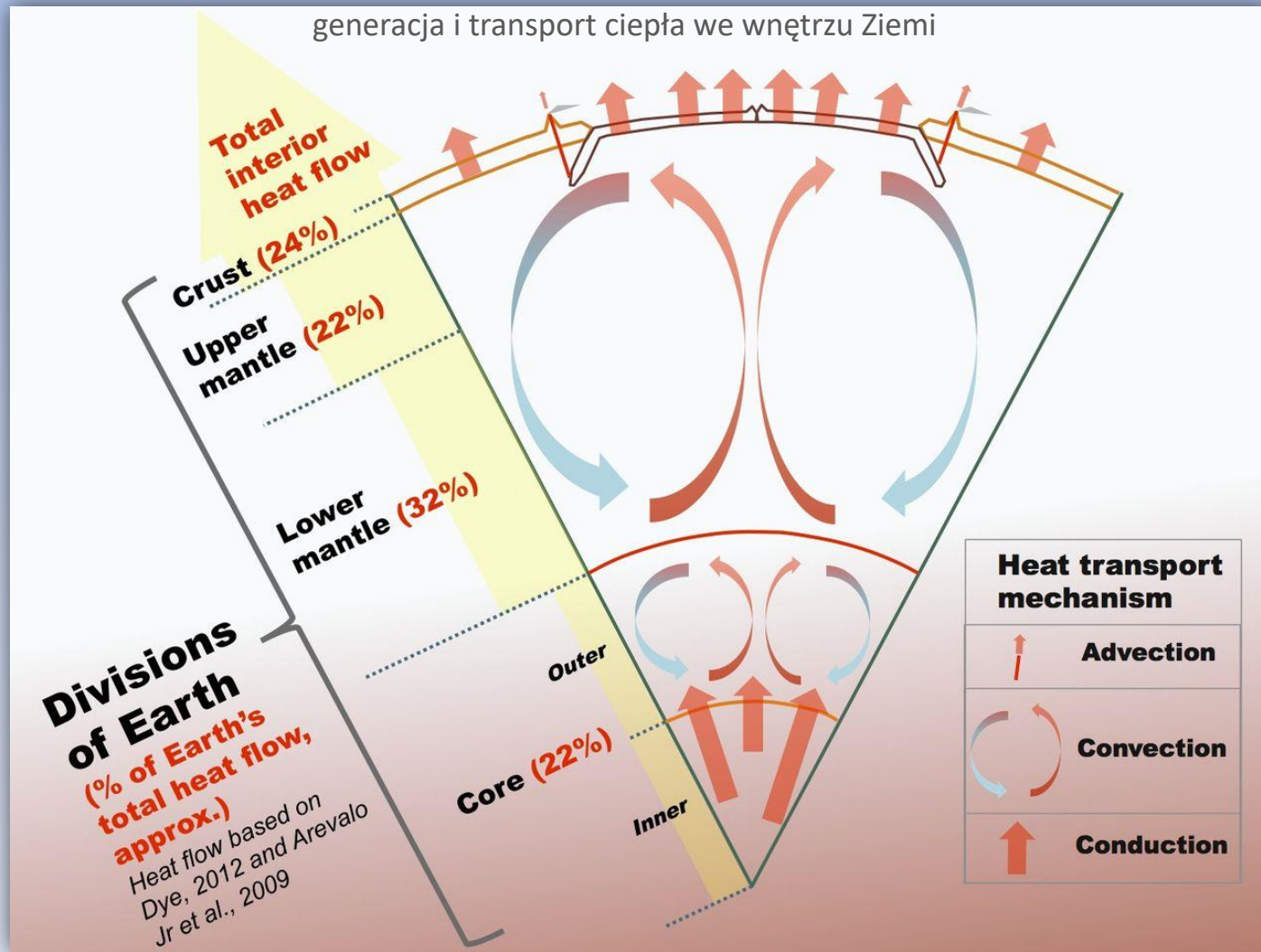


granit zawiera radioaktywne K, Th i U

Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – utrata ciepła wewnętrznego

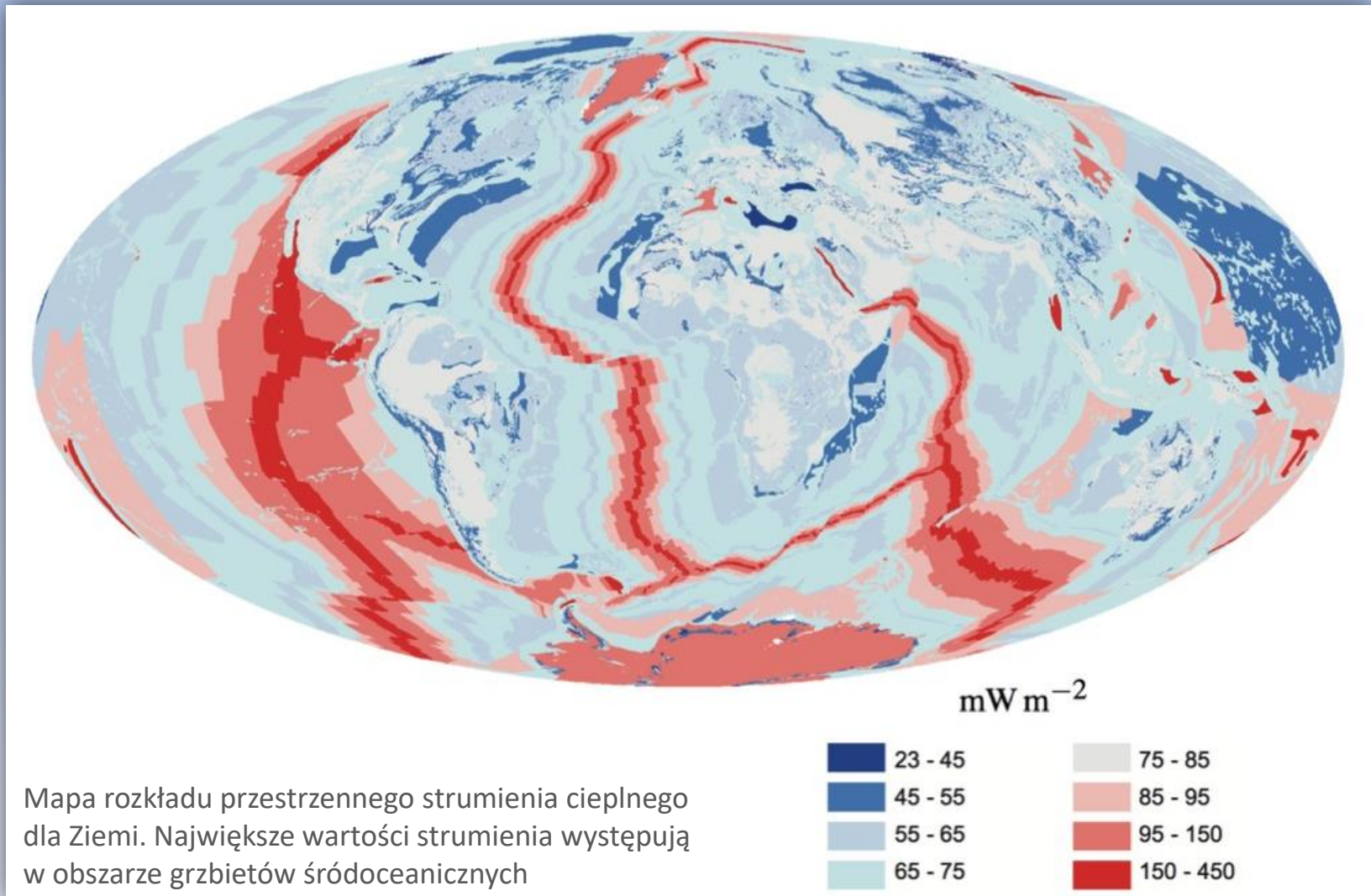
Ciepło wewnętrzne obiektu jest transportowane ku powierzchni i oddawane do otoczenia. Tempo stygnięcia ciała zależy od efektywności przepływu ciepła i wielkości ciała.



Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – utrata ciepła wewnętrznego

Ciepło wewnętrzne obiektu jest transportowane ku powierzchni i oddawane do otoczenia. Tempo stygnięcia ciała zależy od efektywności przepływu ciepła i wielkości ciała.



Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – utrata ciepła wewnętrznego

Ciepło wewnętrzne obiektu jest transportowane ku powierzchni i oddawane do otoczenia. Tempo stygnięcia ciała zależy od efektywności przepływu ciepła i wielkości ciała. Im mniejsze ciało tym szybciej stygnie, bo:

- ilość energii termicznej zawartej w obiekcie zależy od jego objętości:

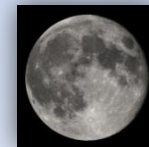
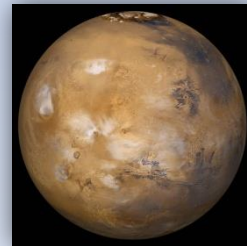
$$E_t = a \cdot \frac{4}{3} \pi R^3$$

- tempo utraty tej energii zależy od całkowitej mocy promieniowania:

$$L = F \cdot 4\pi R^2$$

- czas stygnięcia wynosi więc:

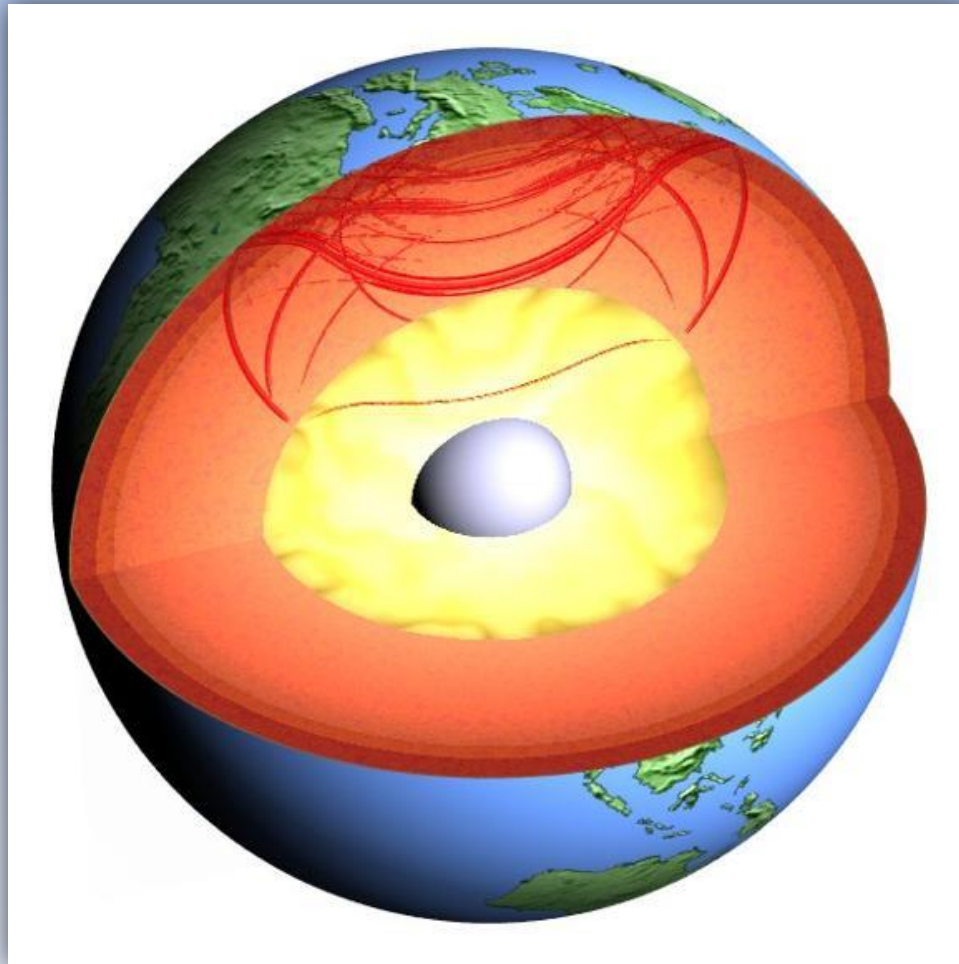
$$t = \frac{E_t}{L} \propto R$$



Wnętrza planet

Ziemia – wnętrze widziane na wskroś

Sejsmologia jest najlepszą metodą badania wnętrza Ziemi. Sejsmologia wraz z pomiarami pola grawitacyjnego pozwala zbudować szczegółowy model wnętrza.

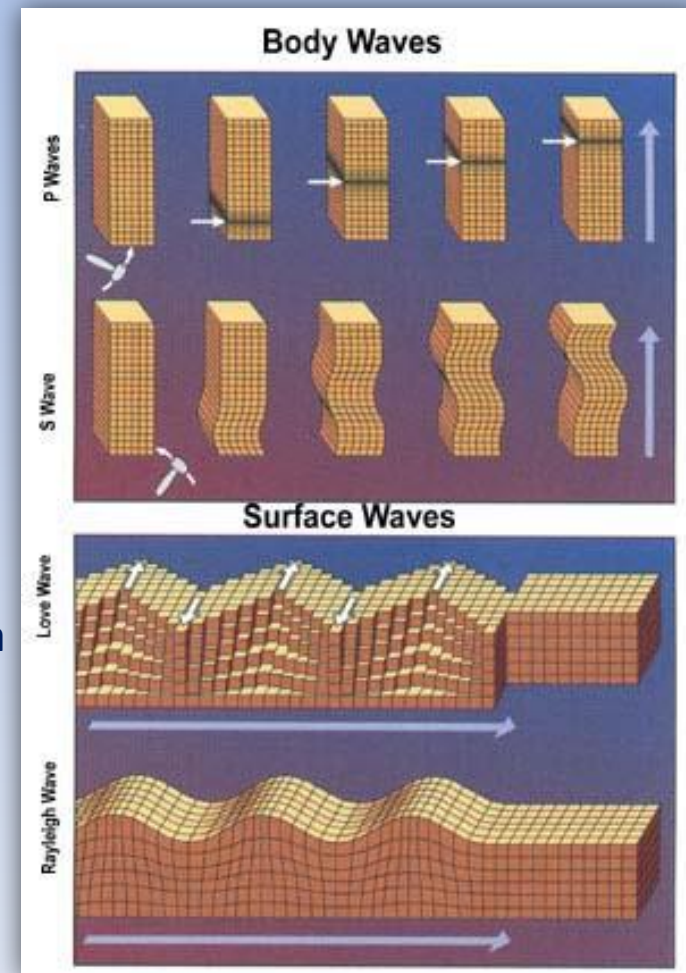


Wnętrza planet

Ziemia – wnętrze widziane na wskroś

Fale sejsmiczne rozchodzące się w obiekcie skalistym mogą być wywoływane przez: trzęsienia, upadki meteoroidów, wybuchy wulkanów, działalność górniczą, wybuchy bomb. Fale te są następujących typów:

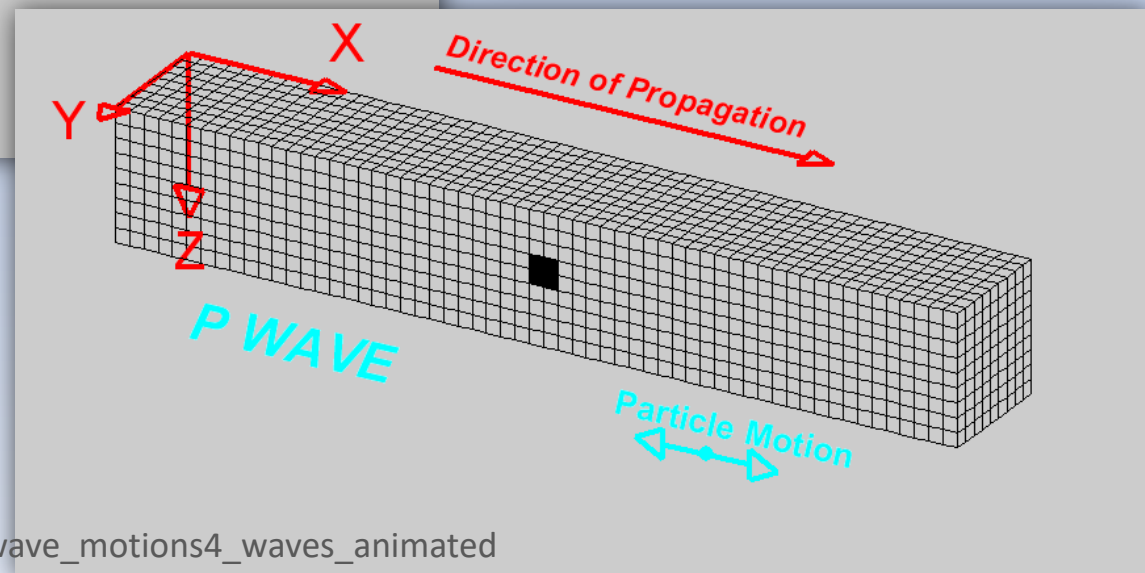
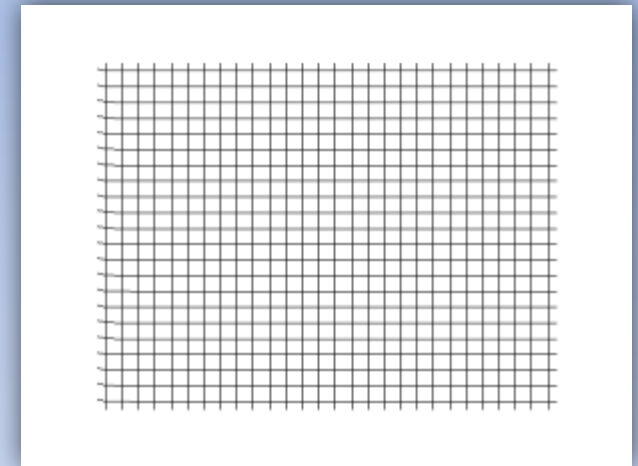
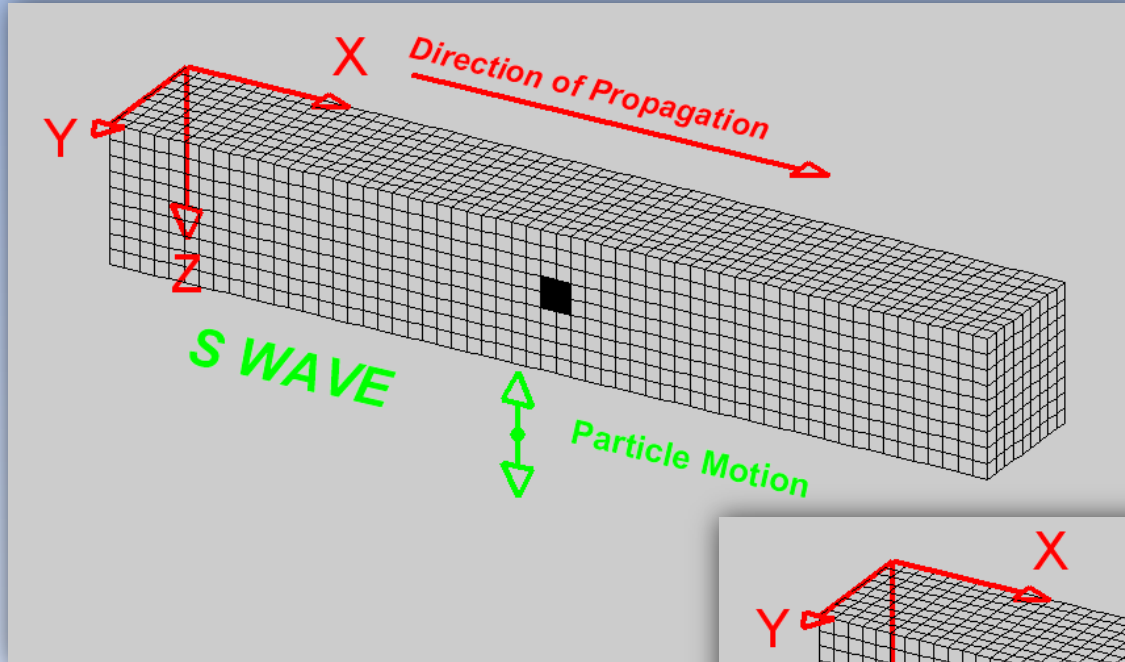
- **fale przestrzenne** (rozchodzą się z ogniska trzęsienia we wszystkich kierunkach):
 - **fale podłużne (P)** – powodują rozciąganie i ściskanie ośrodka; są szybsze około 2x od fal S
 - **fale poprzeczne (S)** – powodują drgania w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia; mogą rozchodzić się tylko w ciałach stałych
- **fale powierzchniowe** (rozchodzą się tylko na powierzchni/granicy ośrodków; wolniejsze od fal przestrzennych):
 - **fale Rayleigha** – są falami grawitacyjnymi; ruch ośrodka odbywa się w płaszczyźnie pionowej; w większości w czasie trzęsień odczuwane są te fale
 - **fale Love'a** – ruch ośrodka zachodzi w płaszczyźnie poziomej; powodują większość zniszczeń na obszarze trzęsienia



Wnętrza planet

Ziemia – wnętrze widziane na wskroś

Fale typu P i S – animacja:



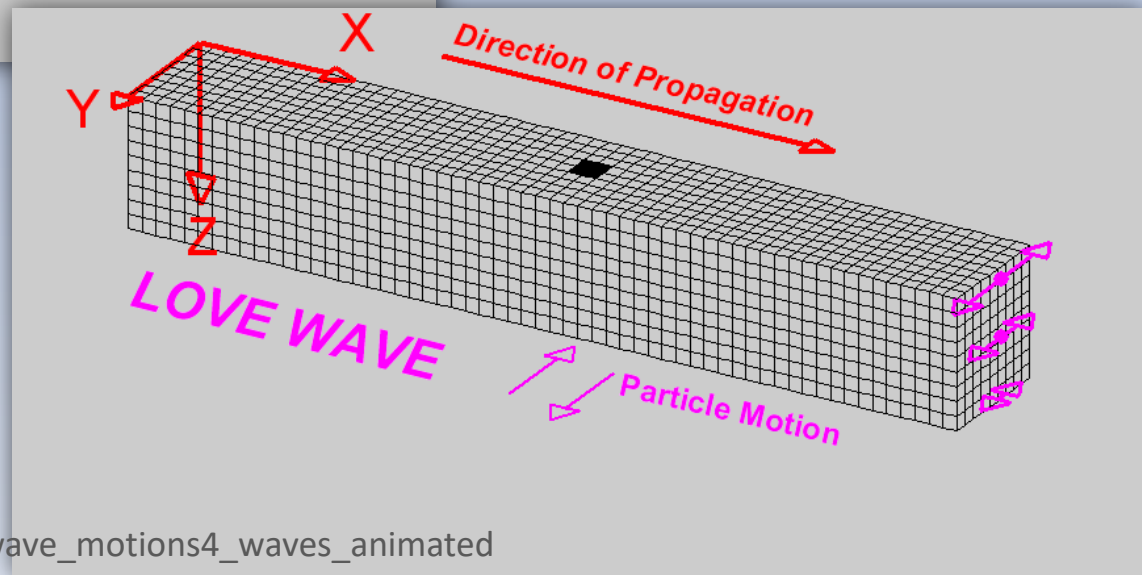
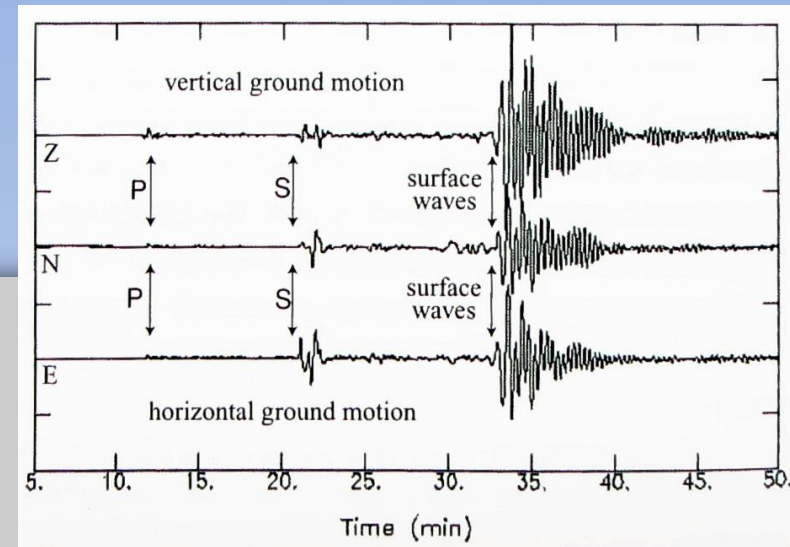
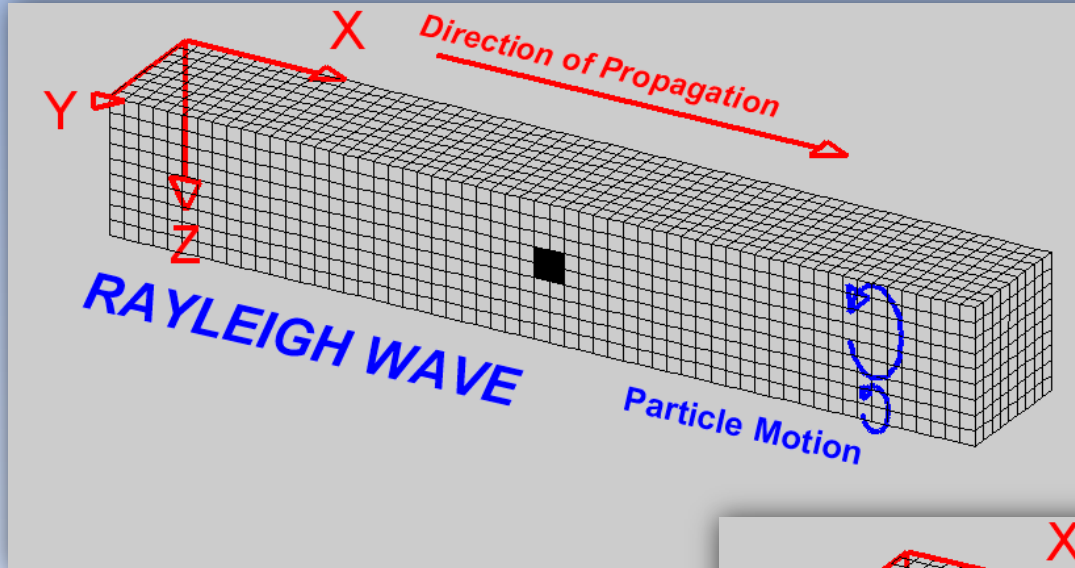
animacje dostępne na:

www.iris.edu/hq/inclass/animation/seismic_wave_motions4_waves_animated

Wnętrza planet

Ziemia – wewnątrz widziane na wskroś

Fale Rayleigha i Love'a – animacja:



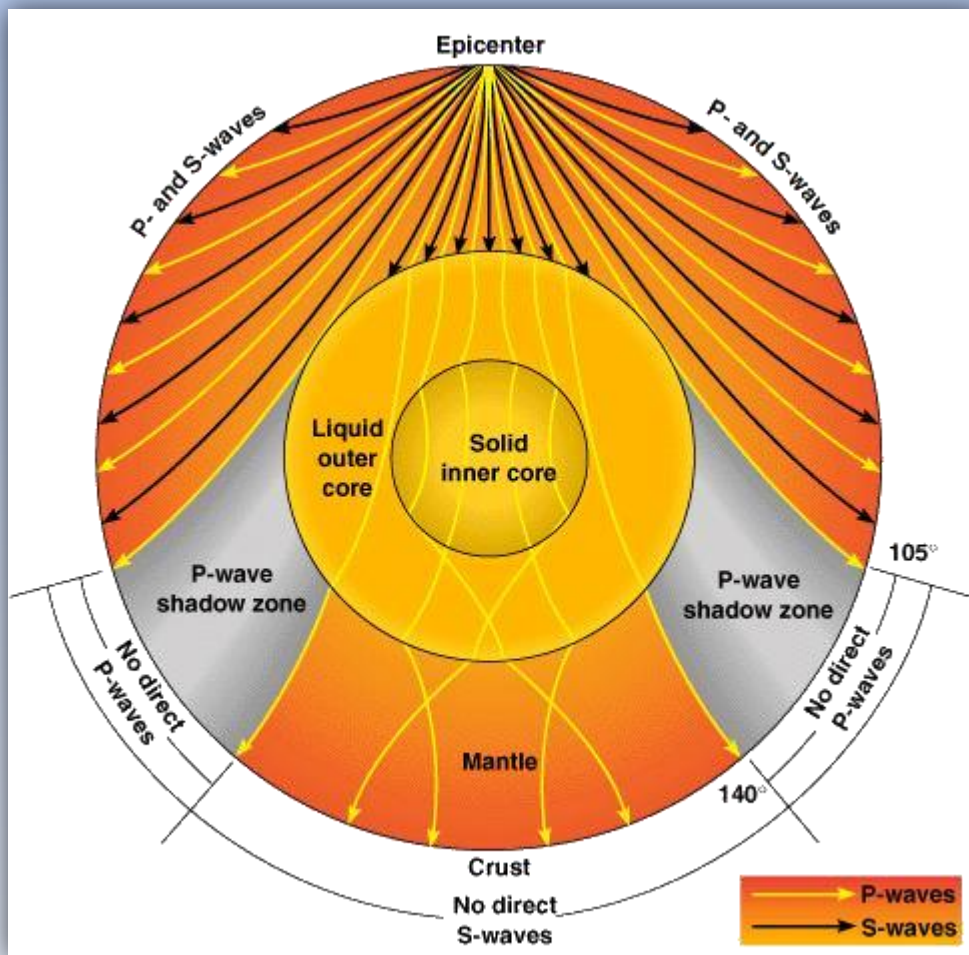
animacje dostępne na:

www.iris.edu/hq/inclass/animation/seismic_wave_motions4_waves_animated

Wnętrza planet

Ziemia – wnętrze widziane na wskroś

Obserwacje sejsmiczne mówią jak rozchodzą się fale P i S we wnętrzu Ziemi. Fizyka daje informacje o tym jak rozchodzenie fal zależy od cech ośrodka. Łącząc to informacje dostajemy wiedzę o wnętrzu Ziemi, np.: istnienie cieni sejsmicznych pozwala stwierdzić, że jądro zewnętrzne jest ciekłe.



Przejęcie fal sejsmicznych P i S przez wnętrze Ziemi. Powstawanie cieni sejsmicznych (shadow zone) wynika z warstwowej struktury wnętrza: na granicy warstw następuje skokowa zmiana gęstości, jądro wewnętrzne jest płynne.

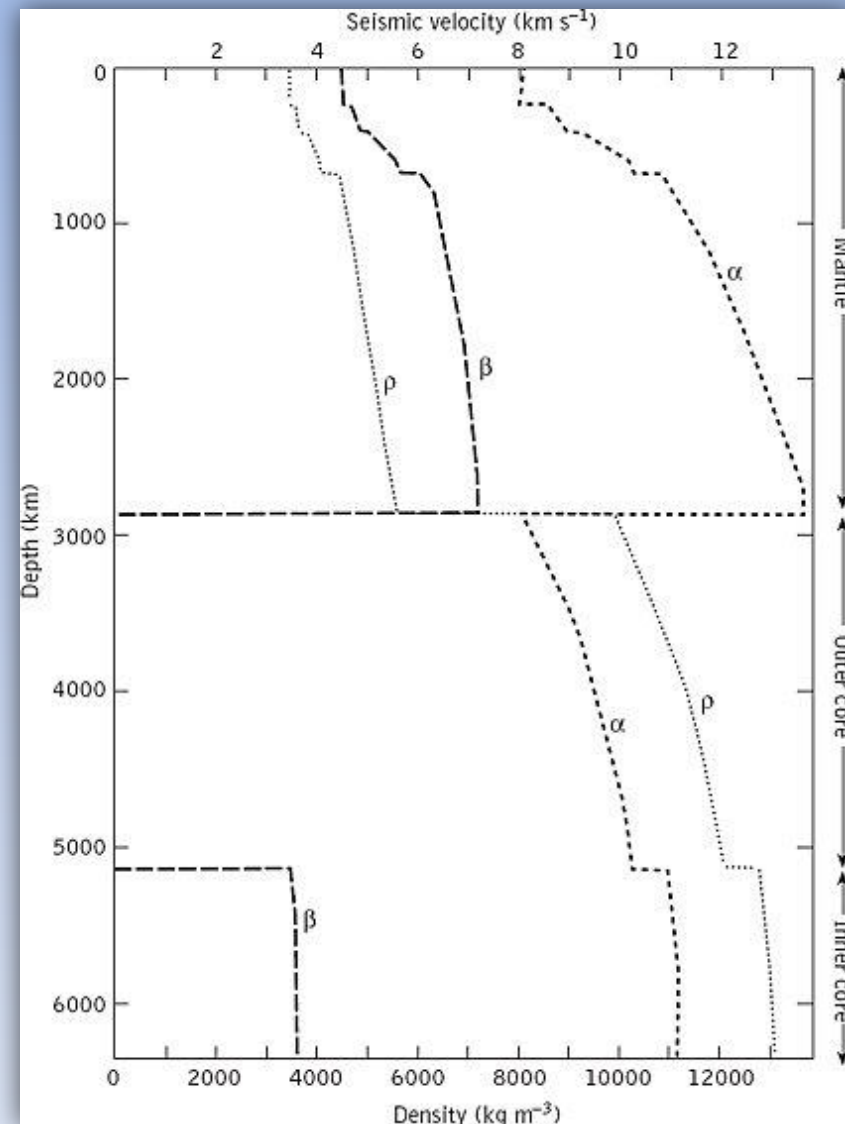
Wnętrza planet

Ziemia – wnętrze widziane na wskroś

Skąd wziąć informacje potrzebne do odtworzenia profilu gęstości wewnątrz Ziemi:

- Różne typy fal sejsmicznych rozchodzą się w danym ośrodku z różnymi prędkościami. Prędkość danej fali zależy od gęstości ośrodka. My mierzymy w danym miejscu czas przybycia różnych fal.
- Duże trzęsienia wzbudzają również oscylacje Ziemi (fale stojące), które mogą trwać przez wiele miesięcy. Mierzymy okresy tych oscylacji.
- Dodajemy do tego informację o potencjale grawitacyjnym Ziemi.

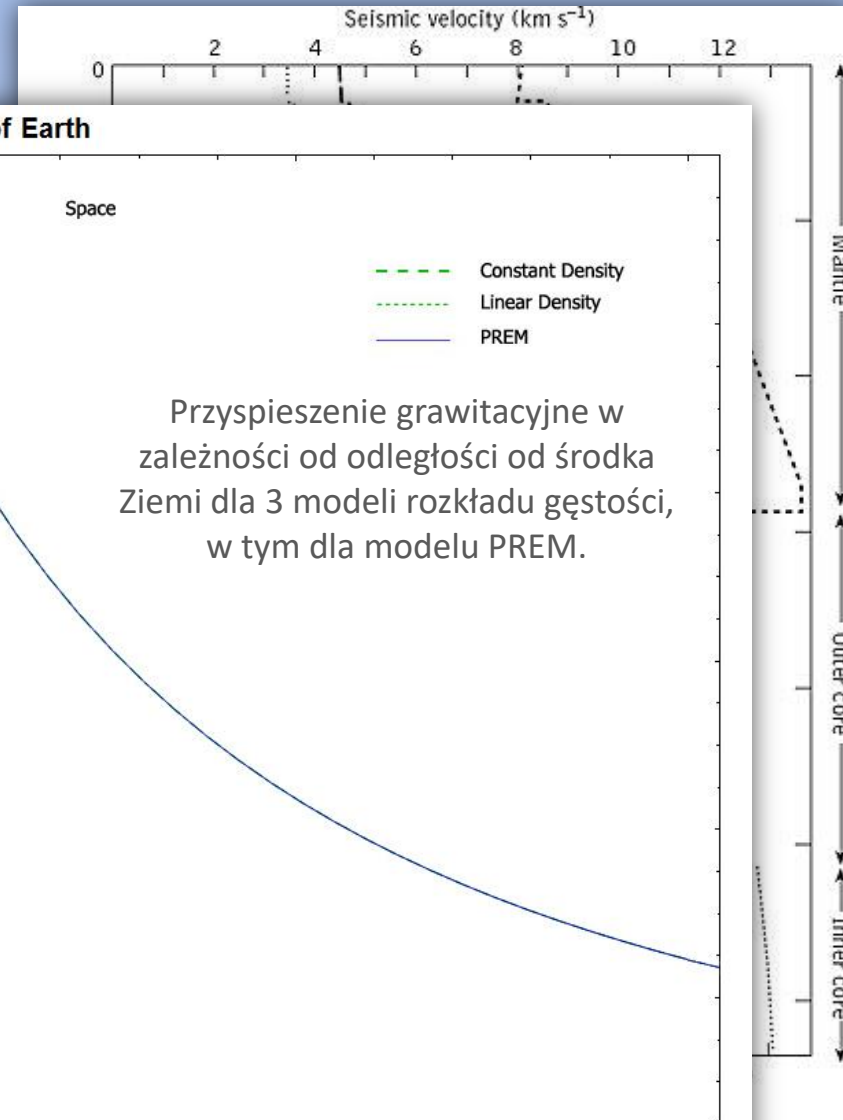
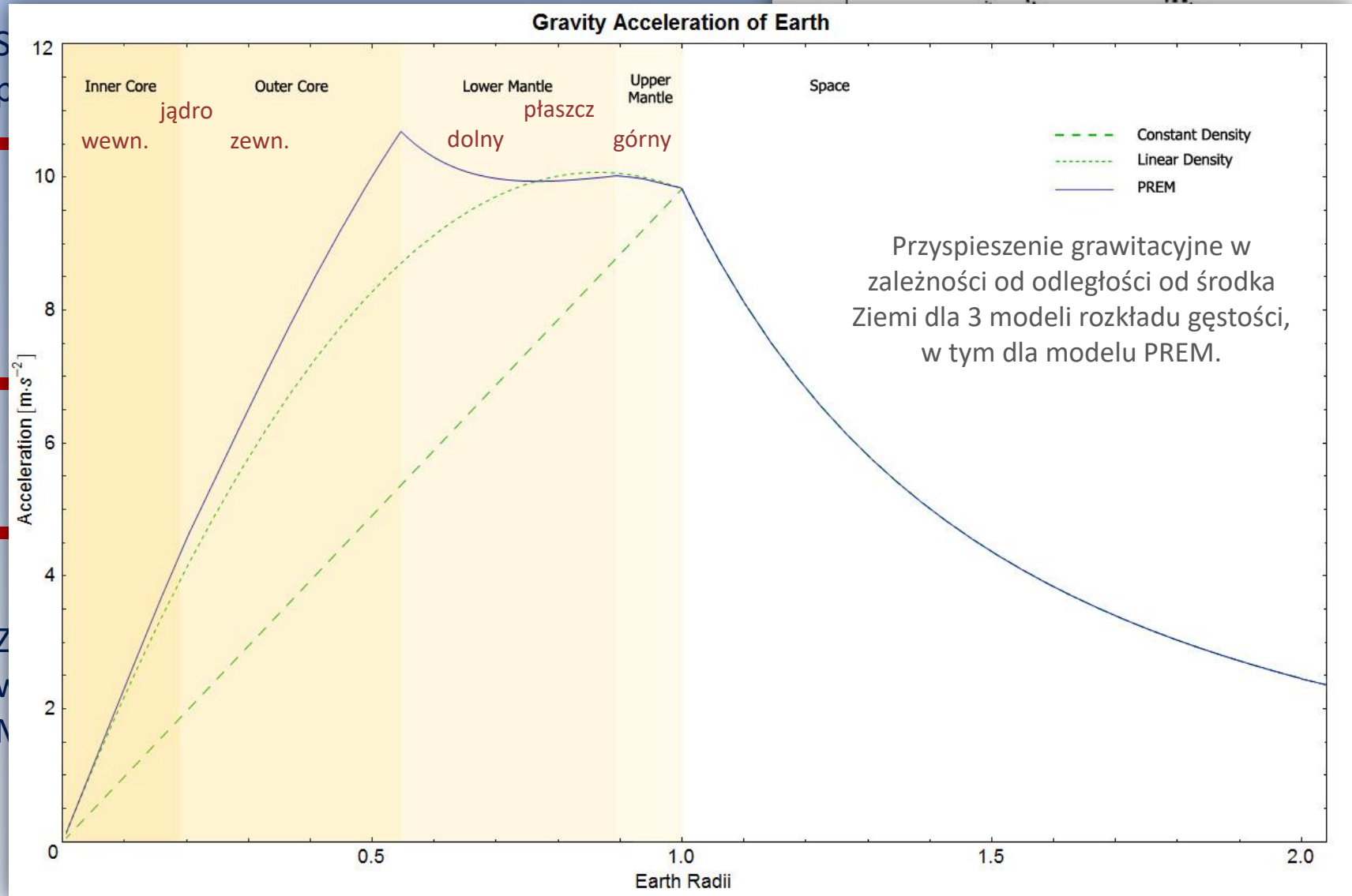
Z tych danych otrzymano profil gęstości we wnętrzu Ziemi (*PREM – Preliminary Reference Earth Model*).



α , β – prędkości fal P i S, ρ – gęstość

Wnętrza planet

Ziemia – wnętrze widziane na wskroś



Wnętrza planet

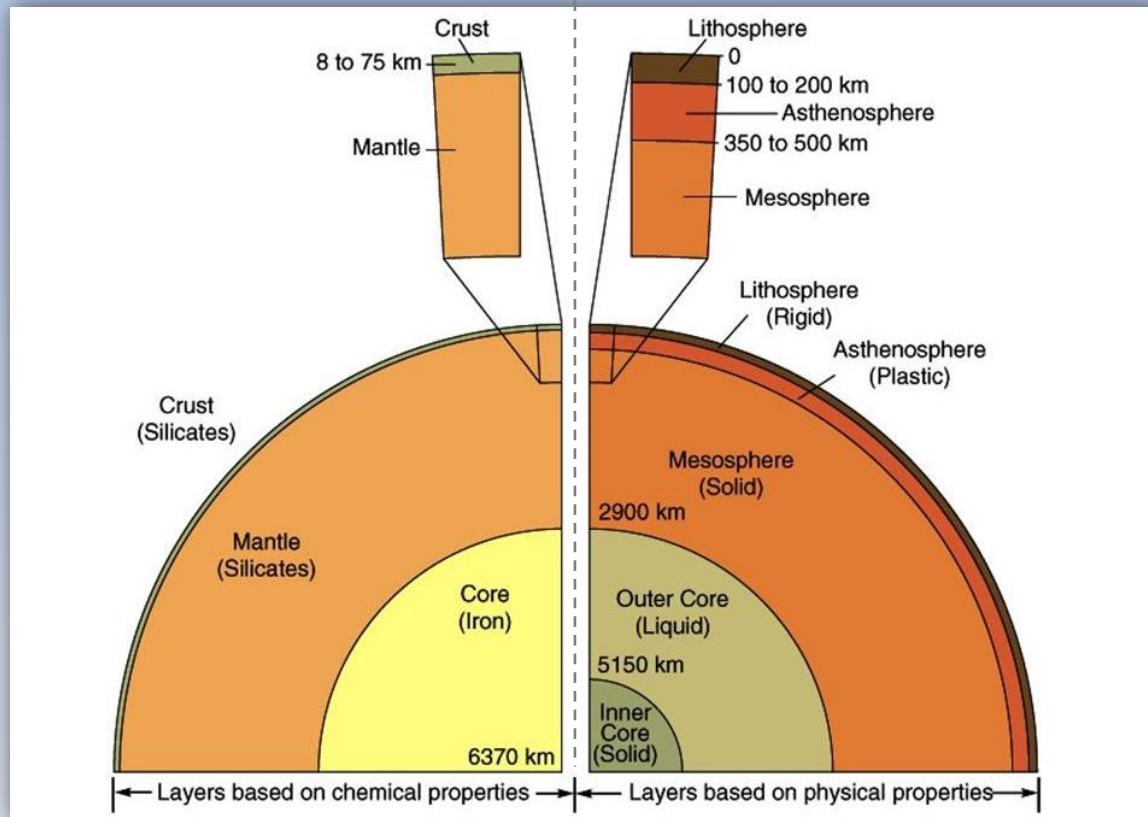
Ziemia – wnętrze widziane na wskroś

Struktura chemiczna wnętrza Ziemi:

- *skorupa* skalna (kontynentalna, oceaniczna), średnia grubość 35 km (O, Si, Al)
- *płaszcz* skalny do głębokości 2900 km (O, Mg, Si)
- *jądro* metaliczne o rozmiarze 55% promienia Ziemi (Fe, Ni, S)

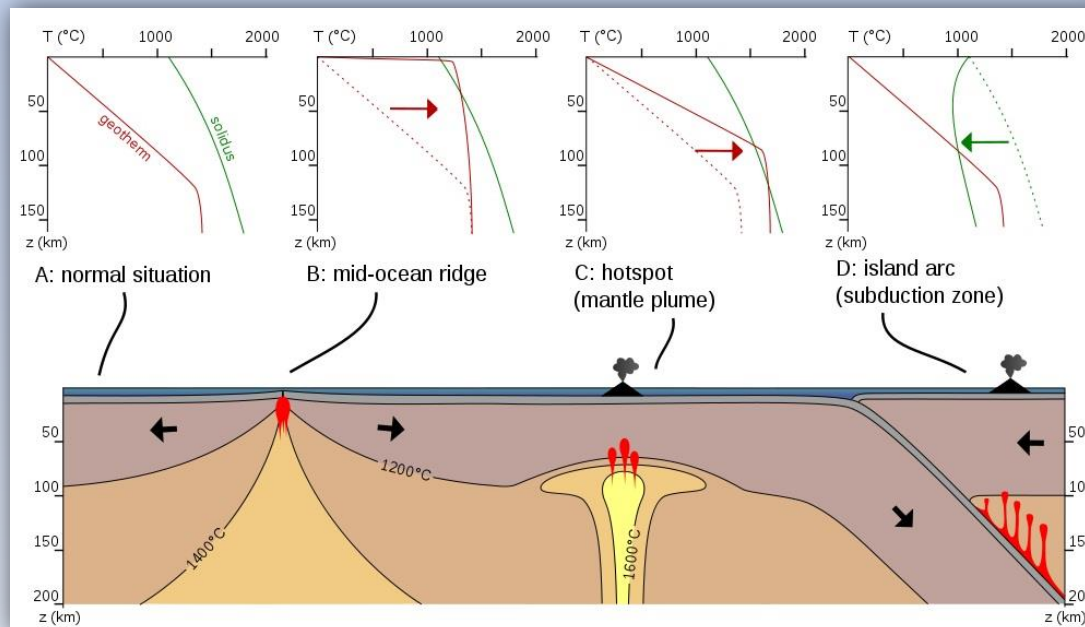
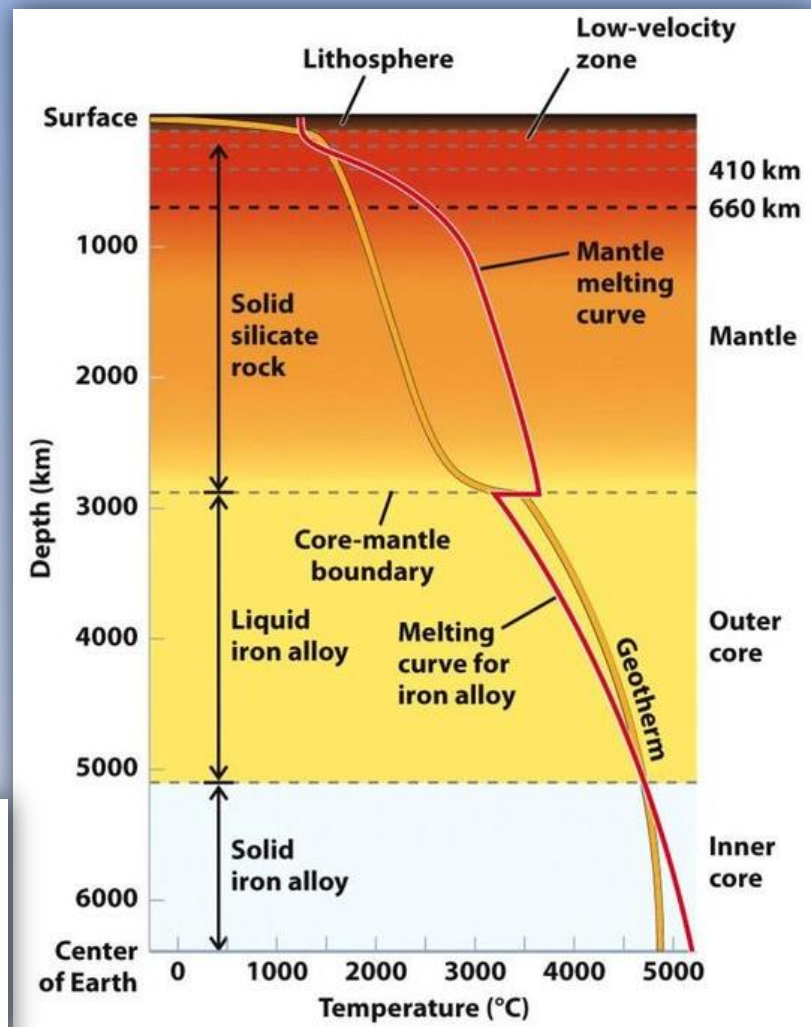
Struktura mechaniczna (reologiczna) wnętrza Ziemi:

- *litosfera* – warstwa stała (skorupa + górna końcówka płaszcza)
- *astenosfera* – warstwa plastyczna (wyższe warstwy górnego płaszcza); umożliwia ruch płyt tektonicznych
- *mezosfera* – warstwa stała (pozostała część płaszcza)
- *jądro zewnętrzne* – warstwa płynna; źródło pola magnetycznego
- *jądro wewnętrzne* – warstwa stała



Wnętrza planet

- Wnętrze Ziemi nie jest w całości płynne.
- Geoterma – przebieg temperatury wnętrza Ziemi z głębokością (linia pomarańczowa).
- Krzywa s/l (solidus/liquidus) – krzywa równowagi fazy ciekłej i stałej w funkcji głębokości (linia czerwona). Oddziela fazę stałą od ciekłej.
- Dany obszar jest płynny, jeśli geoterma na wykresie przebiega powyżej (na prawo od) krzywej s/l.
- Jedyne obszary płynne to jądro zewnętrzne i małe obszary pod skorupą (ogniska magmowe).
- W astenosferze geoterma jest blisko krzywej s/l, stąd obszar ten wykazuje plastyczność



Przebieg geotermy i krzywej s/l w litosferze:

- sytuacja normalna,
- grzbiet śródoceaniczny,
- plama gorąca,
- strefa subdukcji.

W obszarach b-d lokalnie występuje magma.

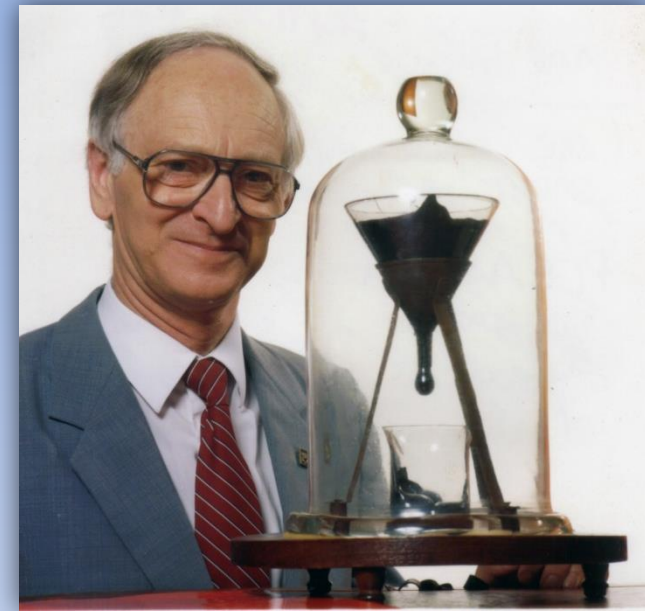
Wnętrza planet

Plastyczność materii o bardzo dużej lepkości

Eksperyment kropli paku węglowego pokazuje, że niektóre ciała pozornie stałe są cieczami o bardzo wysokiej lepkości.

Przykładowa lepkość:

- woda 10^{-3} Pa·s
- pak węglowy 2.3×10^8 Pa·s
- astenosfera 7×10^{19} Pa·s
- płaszcz $1-2 \times 10^{21}$ Pa·s



THE NINTH WATCH

Watch the Pitch Drop
in high resolution.

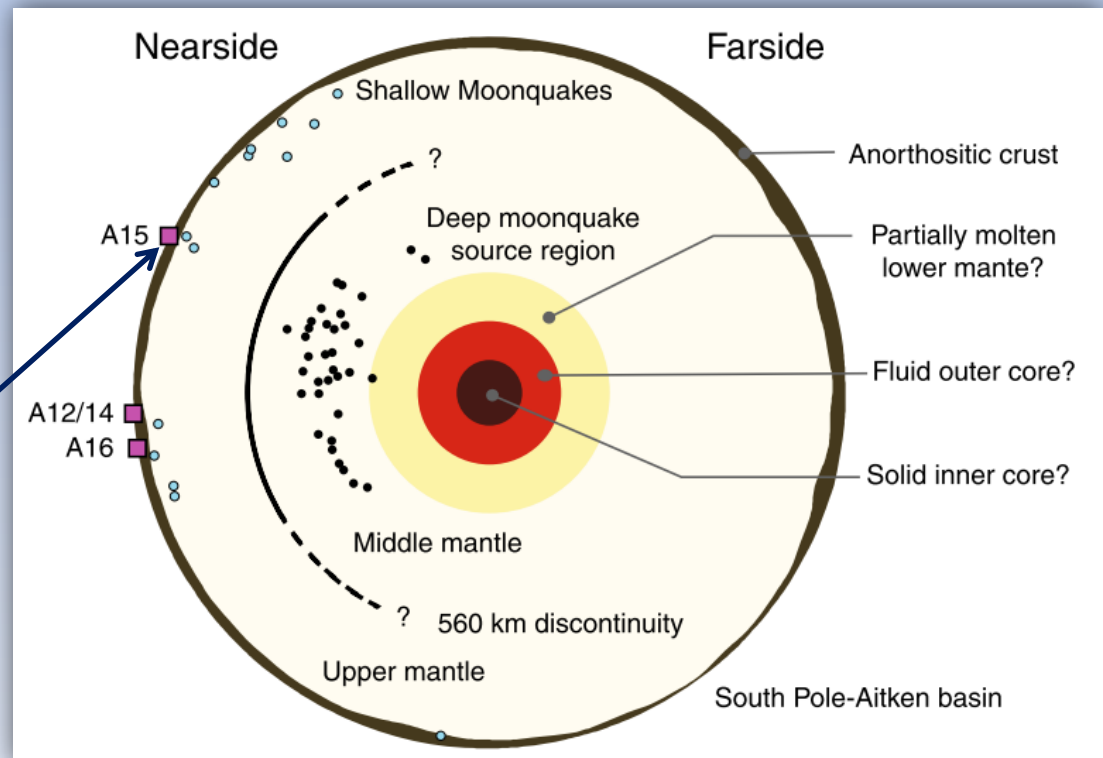
[LOGIN FOR A CHANCE AT HISTORY](#)

Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna Księżyca

Struktura wewnętrzną Księżyca znamy dzięki pomiarom pola grawitacyjnego oraz obserwacjom sejsmicznym (sejsmografy ustawione w ramach misji Apollo). Warstwy budujące Księżyc to:

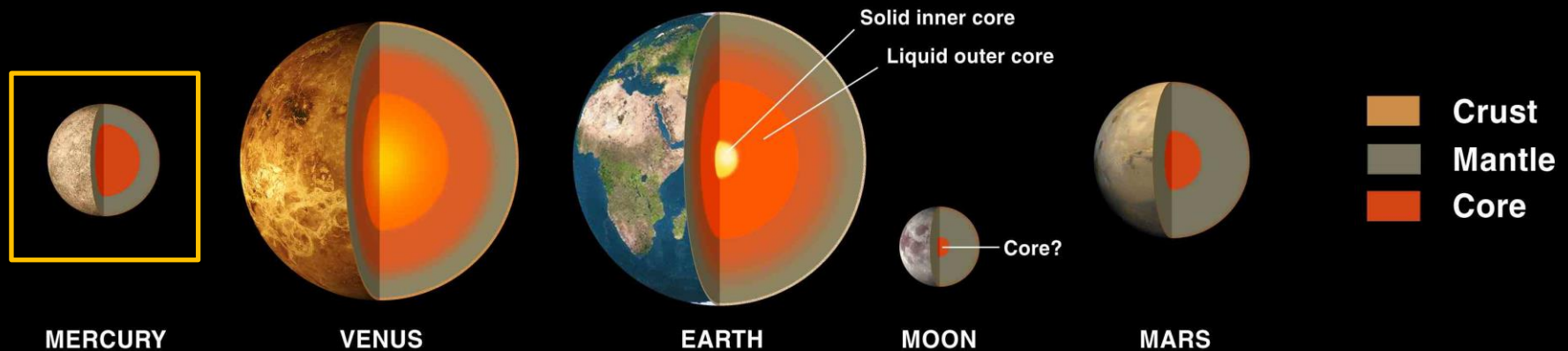
- skorupa – grubość około 60 km, gęstość 2.85 g/cm^3
- płaszcz – częściowo płynny, gęstość 3.3 g/cm^3
- jądro – niewielkie, o promieniu 300 – 400 km, częściowo płynne, bogate w Fe, gęstość 8 g/cm^3



Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna planet skalistych

Ogólna struktura wewnętrzna planet skalistych jest podobna. Każda z nich zawiera jądro (frakcja metaliczna), płaszcz i skorupę (frakcja skalna). Różnice tkwią w szczegółach.



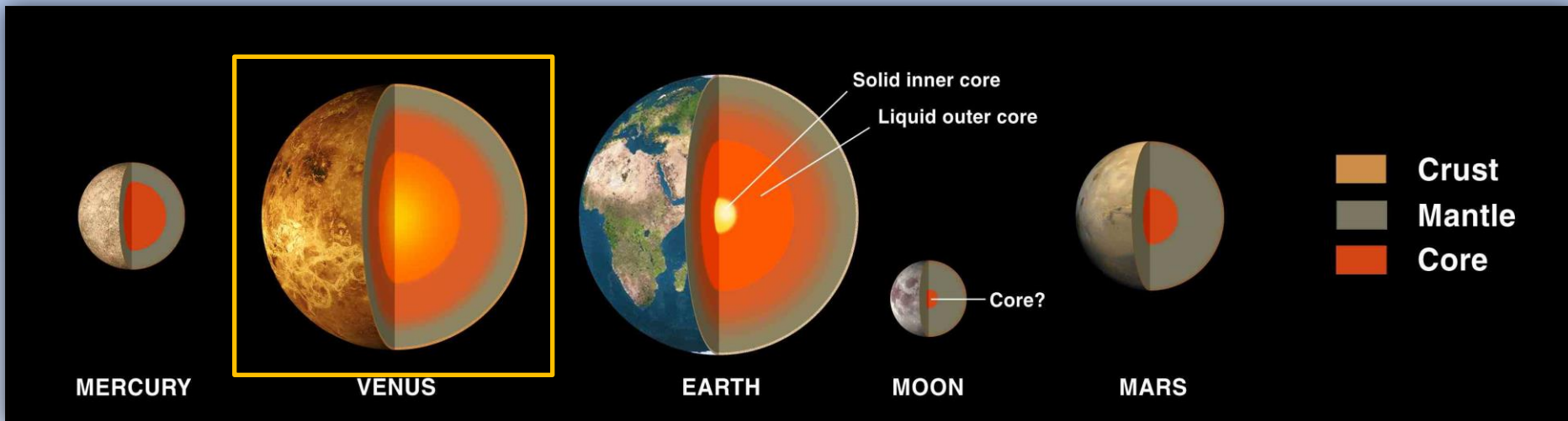
Merkury

Duża gęstość (5.43 g/cm^3) w połączeniu z małą masą wskazują na dużą zawartość Fe. Planeta musi mieć względnie duże jądro (75% promienia) i dość cienki płaszcz (600 km) (dlaczego?). Jądro planety może być wciąż częściowo płynne (obecność globalnego pola magnetycznego).

Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna planet skalistych

Ogólna struktura wewnętrzna planet skalistych jest podobna. Każda z nich zawiera jądro (frakcja metaliczna), płaszcz i skorupę (frakcja skalna). Różnice tkwią w szczegółach.



Wenus

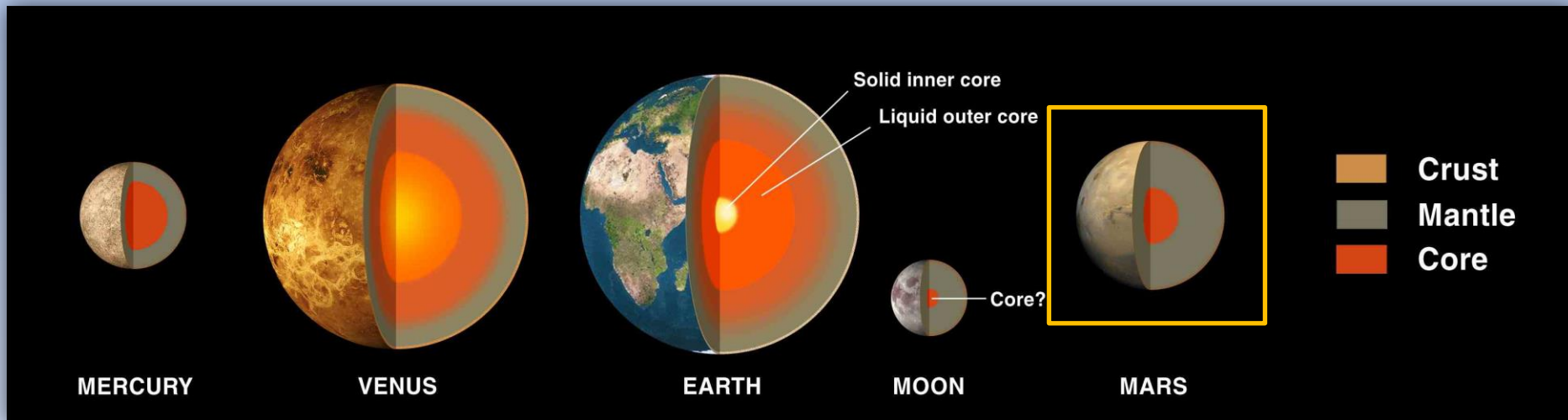
Masa, rozmiary i średnia gęstość podobne do ziemskich. To oznacza, że wnętrza obu planet są podobne. Ale nie są takie same – Wenus nie ma pola magnetycznego. To oznacza brak metalicznej warstwy konwekcyjnej:

- jądro jest w stanie stałym (wyższa temperatura topnienia)?
- jądro jest płynne, ale brak jest konwekcji - brak stałego jądra wewnętrznego?, płaszcz jest być gorący?

Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna planet skalistych

Ogólna struktura wewnętrzna planet skalistych jest podobna. Każda z nich zawiera jądro (frakcja metaliczna), płaszcz i skorupę (frakcja skalna). Różnice tkwią w szczegółach.



Mars

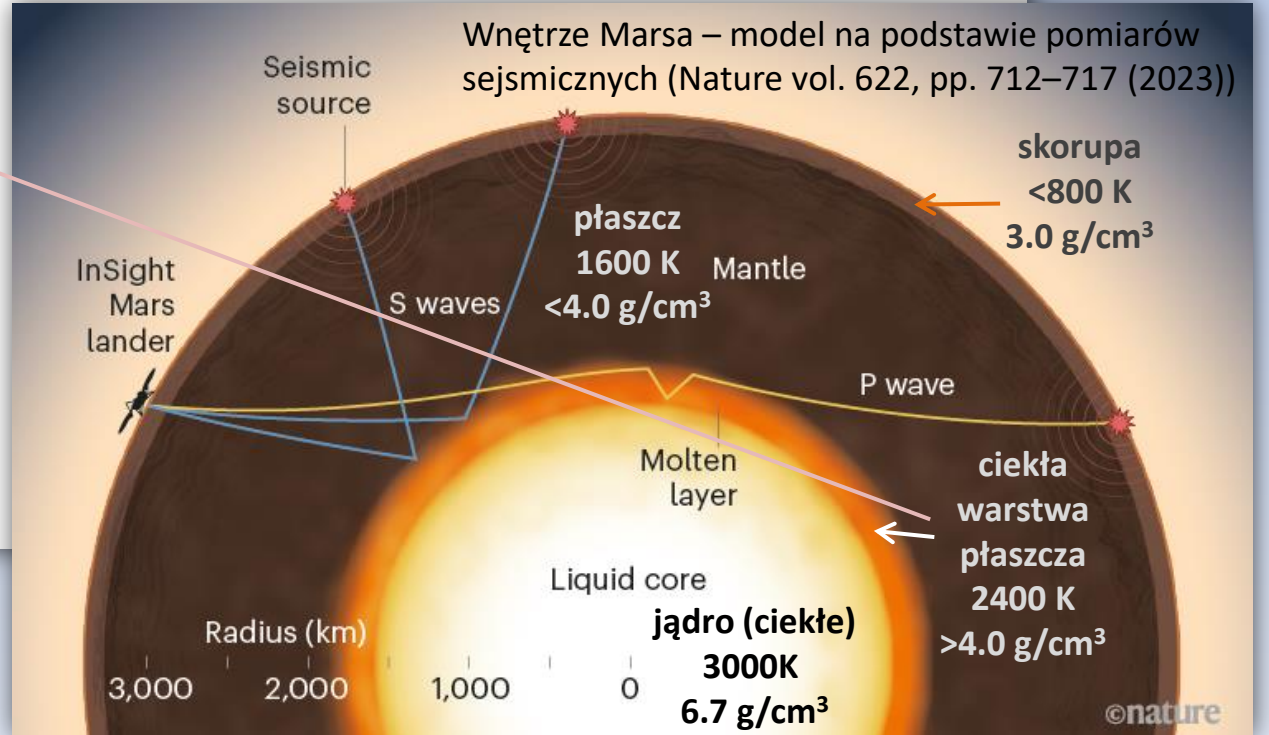
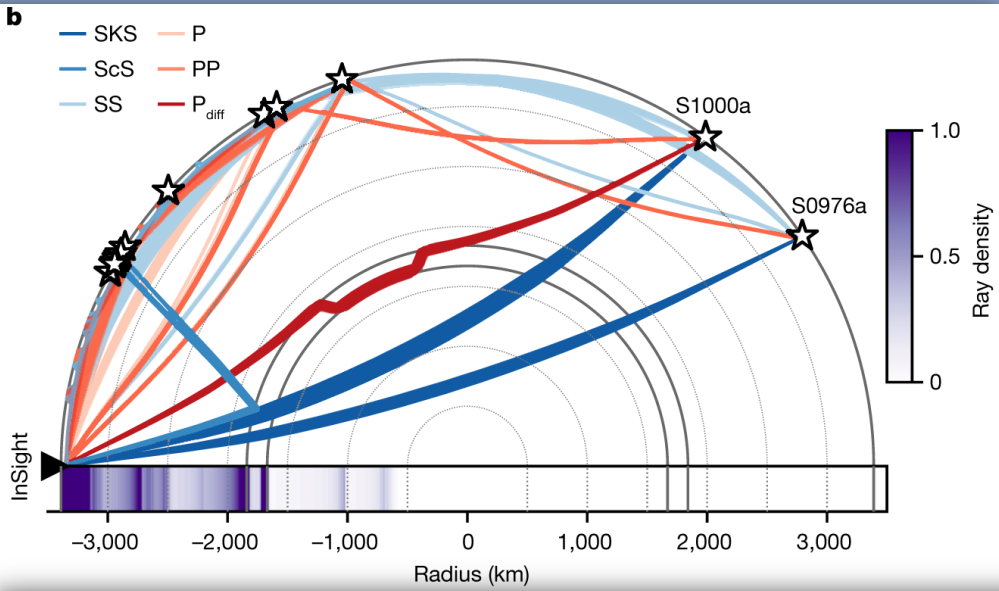
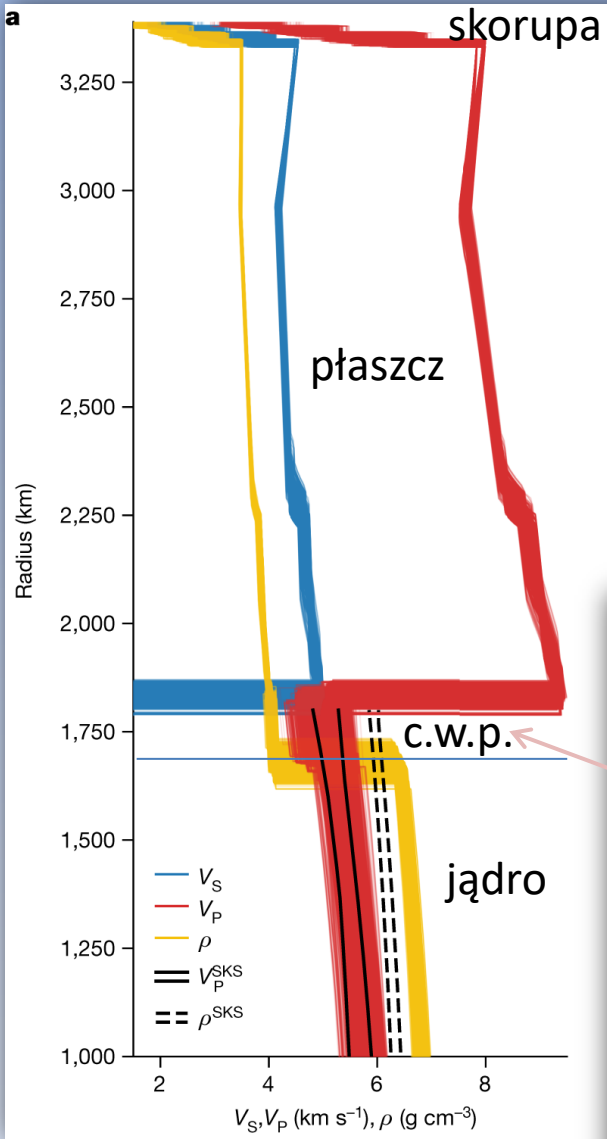
Płaszcz (i skorupa) Marsa zawiera ponad 2x więcej FeO niż ich ziemskie odpowiedniki (za czerwony kolor Marsa odpowiada rdza – Fe_2O_3).

Brak tektoniki płyt (gruba litosfera) i obecnego wulkanizmu – wewnątrz jest chłodniejsze.

Jądro Marsa o rozmiarze około 50% promienia jest prawdopodobnie w całości płynne (mieszanka Fe-FeS), ale nie konwektywne (brak pola magnetycznego).

Wnętrza planet

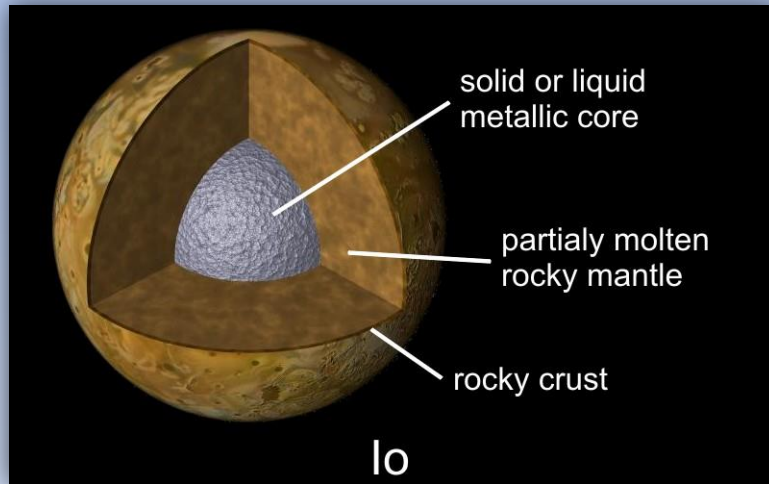
Mars: (a) profile prędkości fal sejsmicznych i gęstości, (b) geometria analizowanych fal sejsmicznych (Nature vol. 622, pp. 718–723 (2023))



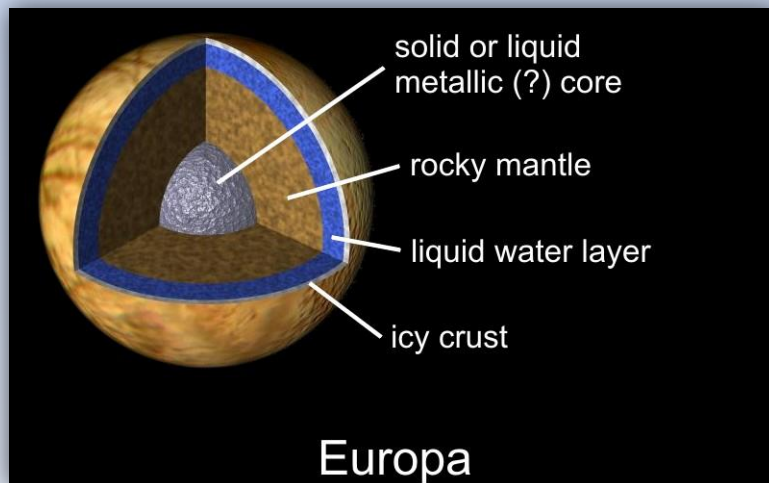
Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna największych księżyców

Największe księżyce Układu Słonecznego (Księżyc, Io, Europa, Ganimedes, Kallisto, Tytan, Tryton) wykazują różnorodność w budowie wewnętrznej podobną do planet.



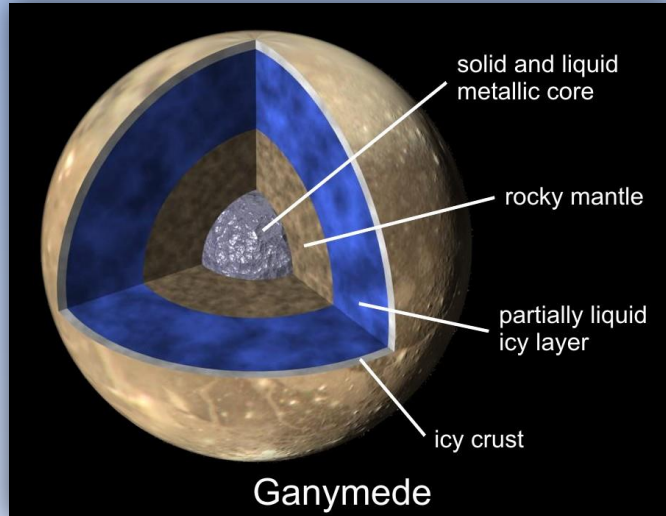
Io – średnia gęstość 3.53 g/cm^3 wskazuje na obiekt skalno-metaliczny. Skorupa bogata jest w związki S. Pod nią znajduje się częściowo ($\sim 10\%$) płynny płaszcz (wulkanizm). Jądro zbudowane jest z Fe-Ni lub Fe-FeS-Ni i jest całkowicie płynne lub stałe (brak pola mag.). $I/MR^2=0.378$



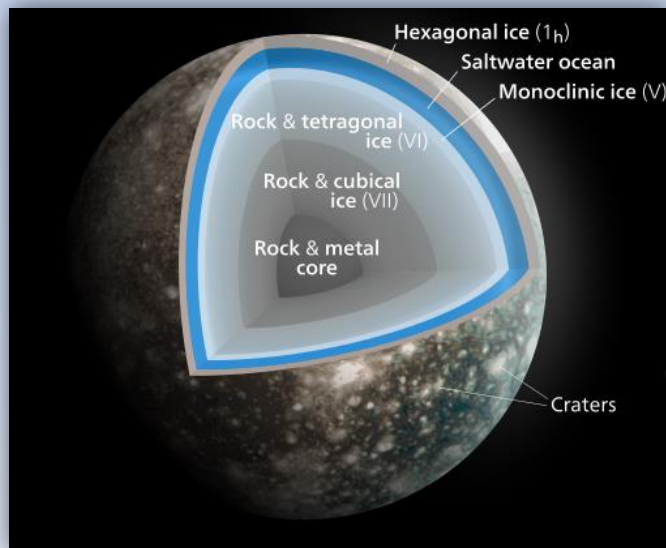
Europa – średnia gęstość 3.01 g/cm^3 oznacza, że dominuje to frakcja skalna (płaszcz, 90% masy). W środku znajduje się jądro metaliczne (Fe-Ni lub Fe-FeS-Ni). Skorupę buduje lód. Pomiedzy skorupą a płaszczem prawdopodobnie występuje ocean wodny (słony). $I/MR^2=0.346$

Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna największych księżyców



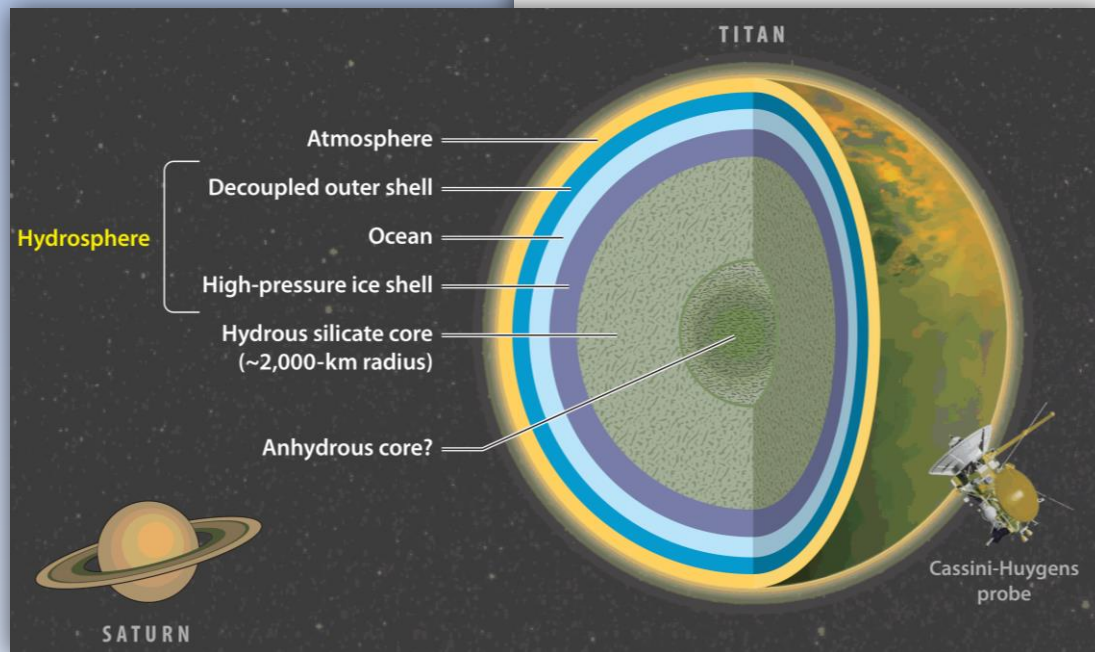
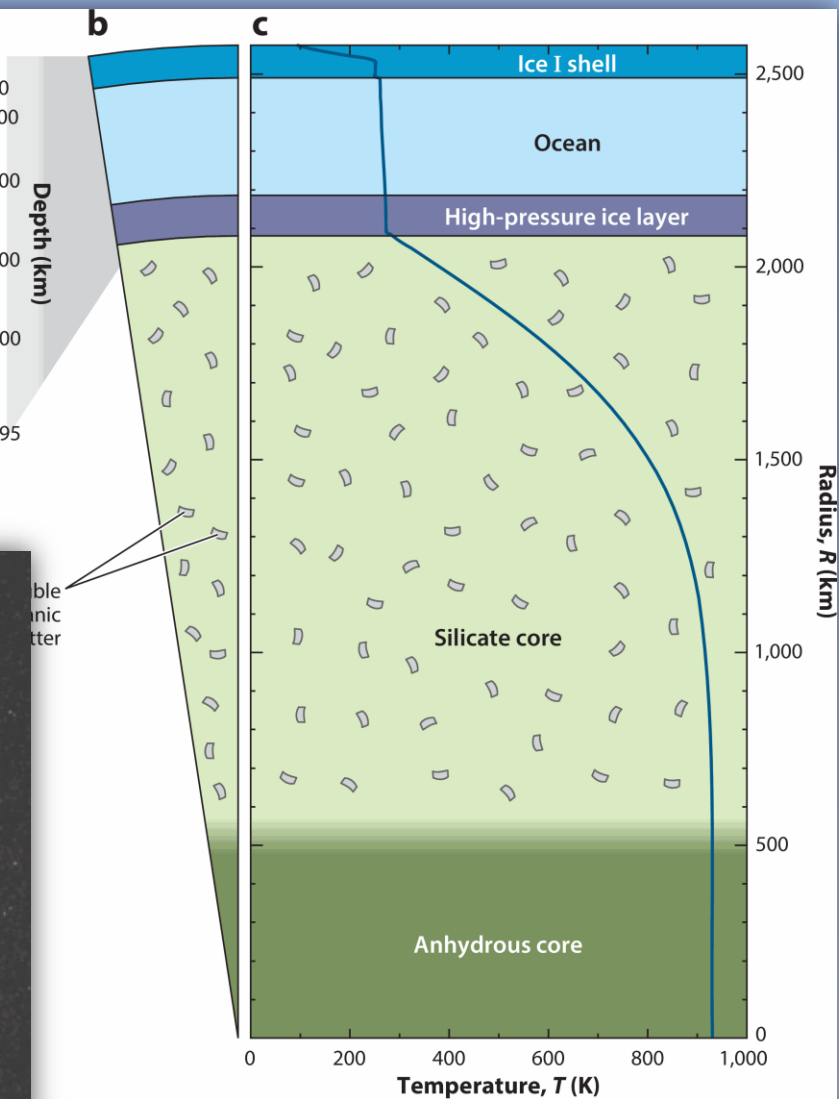
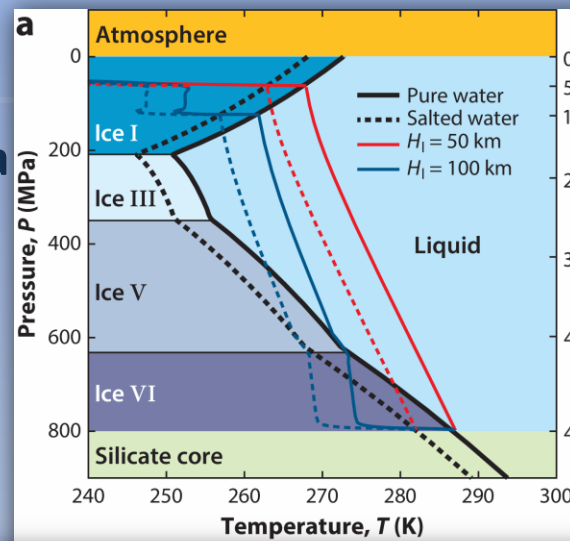
Ganymedes – średnia gęstość 1.94 g/cm^3 wskazuje na obiekt z przewagą frakcji skalno-lodowej. Księżyc ten wykazuje silną koncentrację masy ku centrum. Posiada własne pole magnetyczne, co oznacza obecność płynnego jądra metalicznego z małym stałym jądrem wewnętrznym (?). Powyżej znajduje się płaszcz skalny i gruba warstwa lodowa (może być płynna w górnej części) i skorupa lodowa. $I/MR^2=0.312$



Kallisto – średnia gęstość 1.83 g/cm^3 , czyli zawiera więcej frakcji lodowej niż Ganymedes. Powierzchnię tworzy skorupa lodowa, pod którą może znajdować się (słony) ocean wodny. Poniżej leży skalno-lodowy płaszcz o zawartości skał rosnącej ku centrum. W centrum może być jądro skalne (uwodnione krzemiany). $I/MR^2=0.355$

Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna



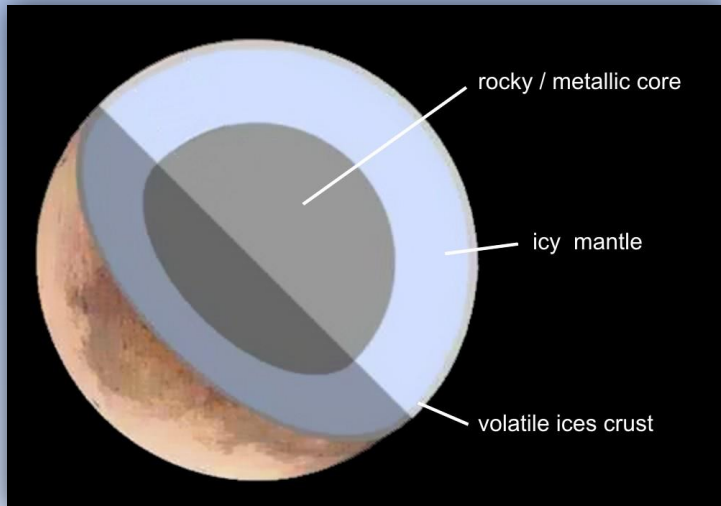
Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 49, pp. 579-607, 2021

Tytan – średnia gęstość 1.88 g/cm^3 wskazuje na obiekt skalno-lodowy. Jądro buduje materiał skalny (+Fe). Nad nim położony jest płaszcz lodowy, ocean wodny (domieszkowany) oraz lodowa skorupa. Podpowierzchniowy ocean może być źródłem zasilającym atmosferę.

$$I/MR^2 = 0.341$$

Wnętrza planet

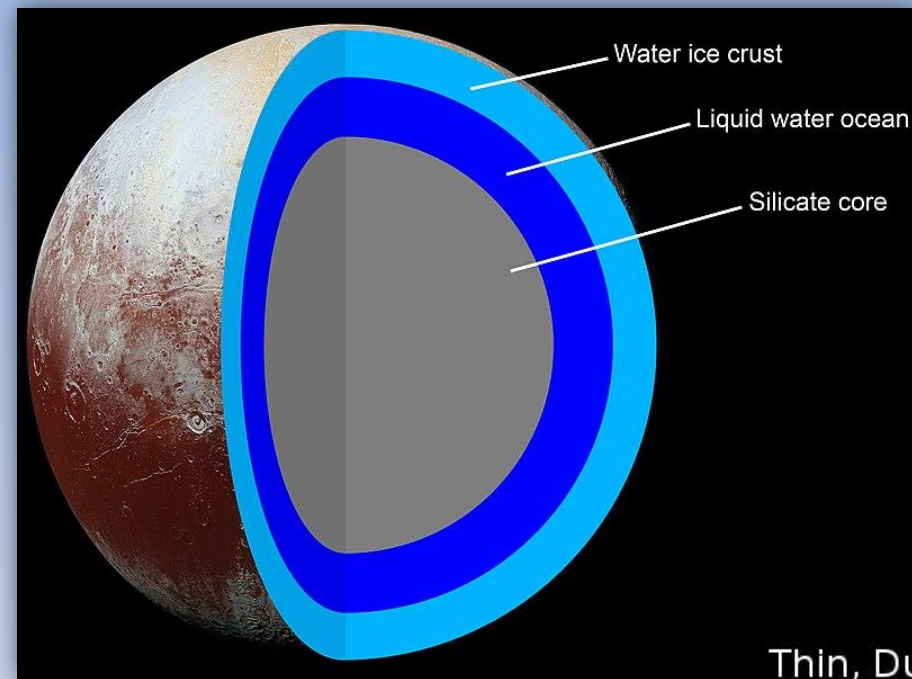
Budowa wewnętrzna największych księżyców



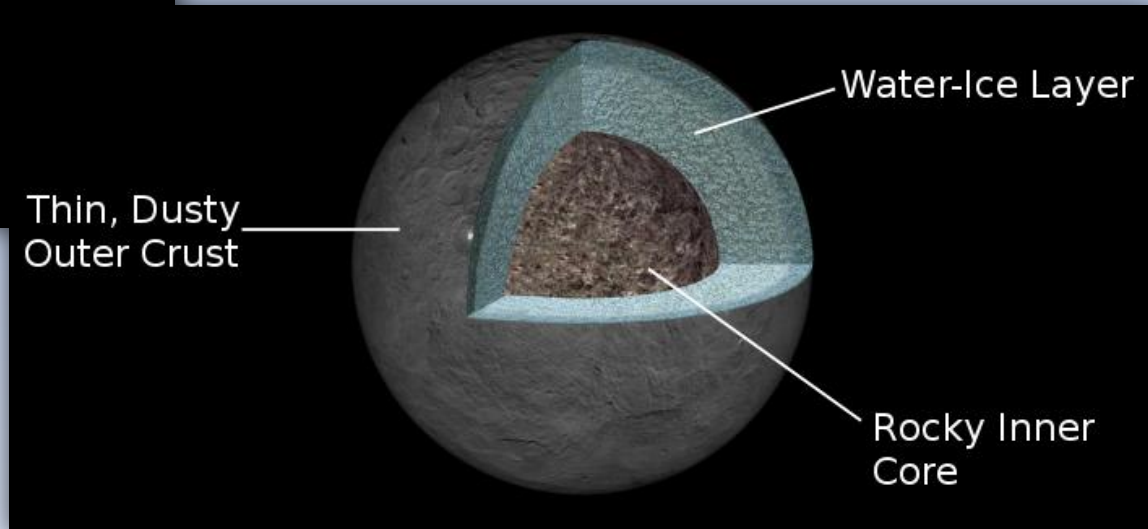
Tryton – średnia gęstość 2.05 g/cm^3 . Księżyc posiada spore jądro skalno-metaliczne otoczone lodowym płaszczem. Skorupę tworzą zestalone lekkie związki chemiczne i pierwiastki

Wnętrza planet

Planetule – budowa wewnętrzna



Pluton – średnia gęstość 1.86 g/cm^3 .
Obiekt skalno-lodowy zdyferencjonowany (przeobrażony) w równowadze hydrostatycznej. Jądro buduje materiał skalny (1700 km). Nad nim płaszcz lodowy. Na granicy jądro płaszcz grzanie radioaktywne może utrzymywać warstwę ciekłej wody.



Ceres – średnia gęstość 2.16 g/cm^3 , $I/MR^2=0.37$.
Obiekt skalno-lodowy zdyferencjonowany w równowadze hydrostatycznej. Jądro buduje materiał skalny (2.7 g/cm^3). Nad nim płaszcz lodowy (1.8 g/cm^3 , 70-190 km) i skorupa domieszkowane krzemianami.

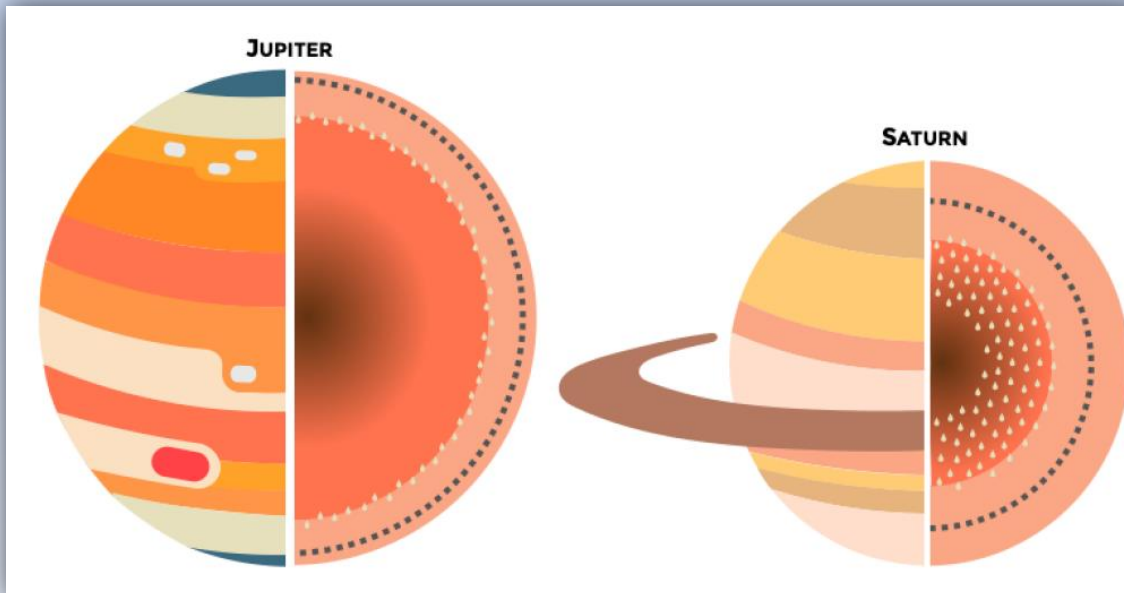
Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna planet olbrzymów

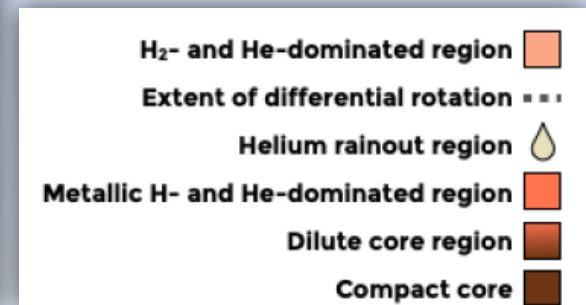
Największe planet Układu Słonecznego zbudowane są głównie z lekkich pierwiastków. Ich budowa znacząco różni się od budowy obiektów „skalistych”.

Gazowe olbrzymy (Jowisz i Saturn) zbudowane są głównie z H i He w różnych fazach. Cięższe pierwiastki stanowią nie więcej niż około 20% ich masy. Budowa obu planet jest następująca:

- niewielkie jądro złożone z cięższych pierwiastków (rozmyte?);
- otoczka wewnętrzna z metalicznego wodoru (źródło pola magnetycznego)
- zewnętrzna otoczka gazowa H_2 , He.



Interior and Evolution of the Giant Planets
Remote Sens. 2023, 15, 681



Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna planet olbrzymów

Lodowe olbrzymy (Uran i Neptun) w ponad 80% zbudowane z „metali”, w tym materii skalnej i lodów (H_2O , NH_3 , CH_4 , H_2S , ale głównie w postaci ciekłej). Proporcja skał do lodów nie jest znana (1:2 – 2:1). Ogólna struktura może być następująca:

- małe jądro skalne (rozmyte?)
- ciekły płaszcz lodowy („ocean jonowy”; źródło pola magnetycznego) (rozmyty?)
- otoczka gazowa H_2 , He.

