

Astrofizyka Układów Planetarnych

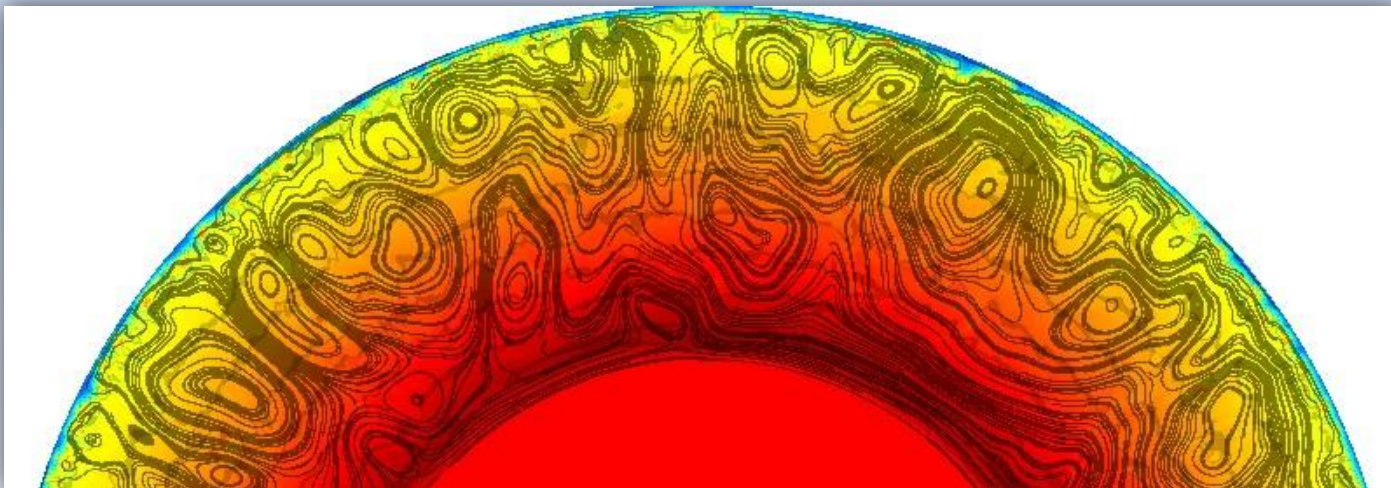
4

WNĘTRZA CIAŁ PLANETARNYCH

Wnętrza planet

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

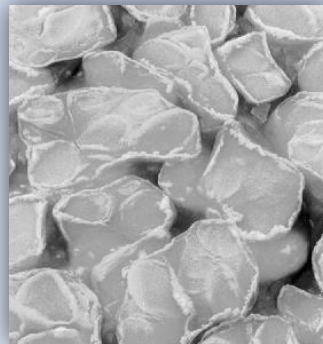
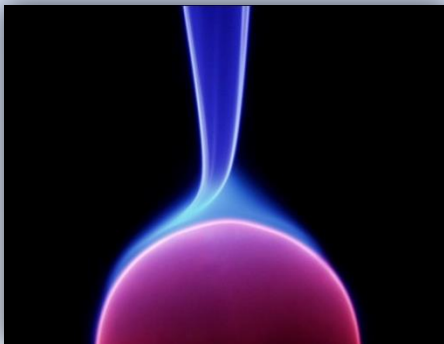
- fale sejsmiczne (Ziemia, Księżyc, Mars)
- masa i rozmiar (*śr. gęstość*)
- pole grawitacyjne
- okres rotacji i spłaszczenie
- pole magnetyczne (lub jego brak)
- strumień energii płynący z wnętrza
- skład chemiczny powierzchni i atmosfery
- aktywność geologiczna
- laboratoryjne badanie materiałów i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



Wnętrza planet

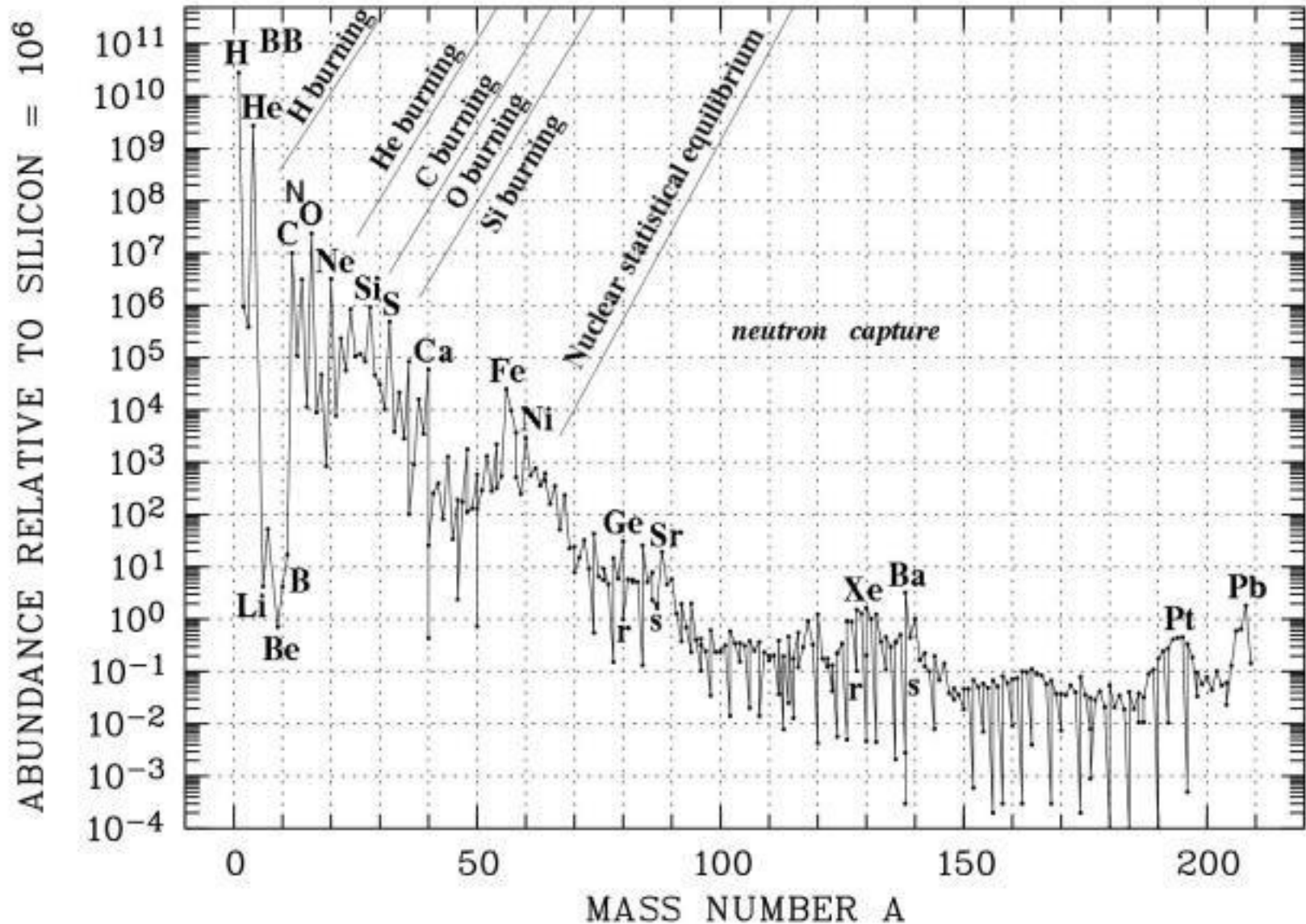
Typy materiałów budujących obiekty w Układzie Słonecznym:

- **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

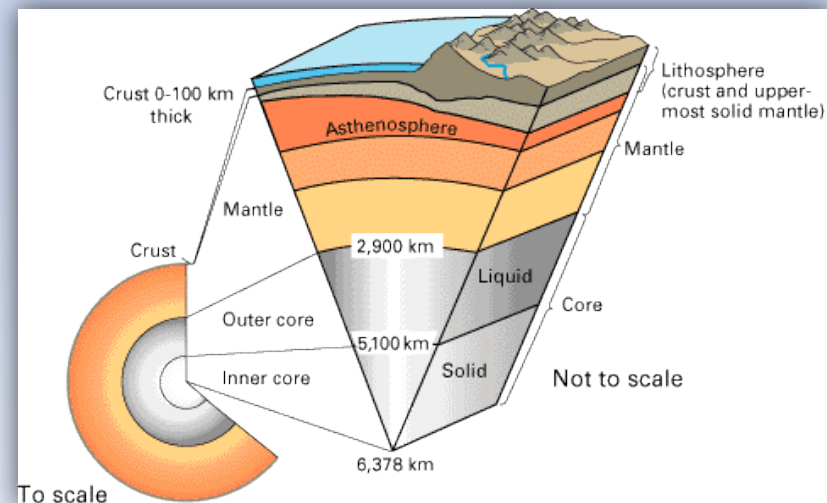
modelowanie wnętrza

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: $dm = \rho(r) \cdot dr \cdot dA$

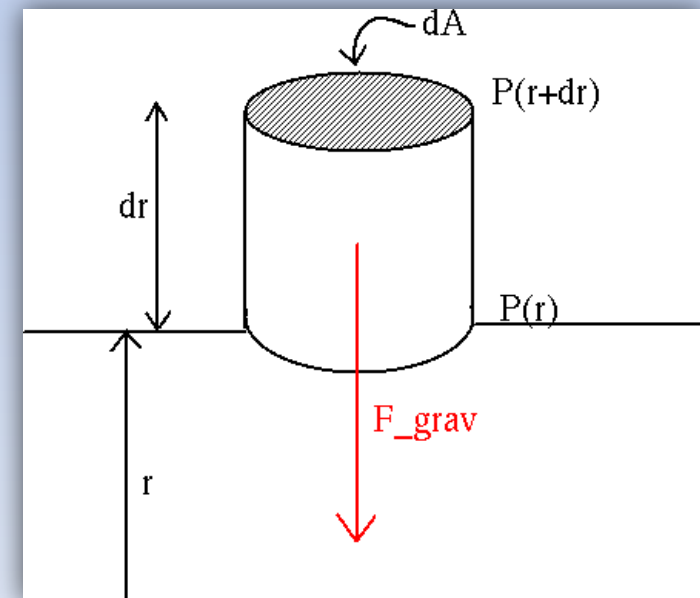
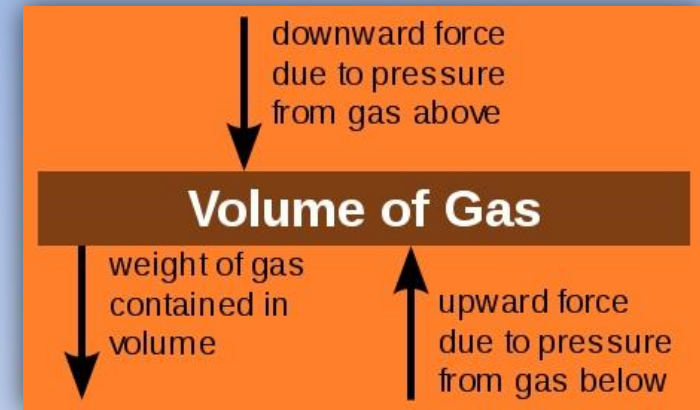
Siła grawitacji wywierana na obszar:

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

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

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:

$$F_p = F_g$$

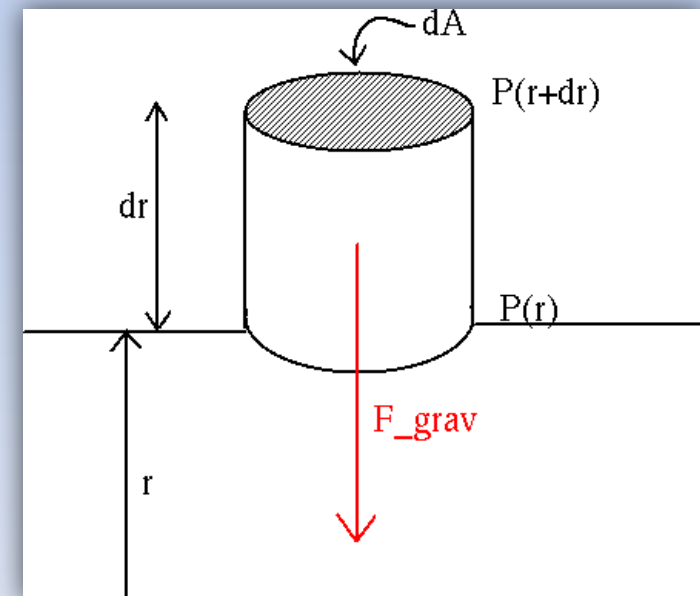
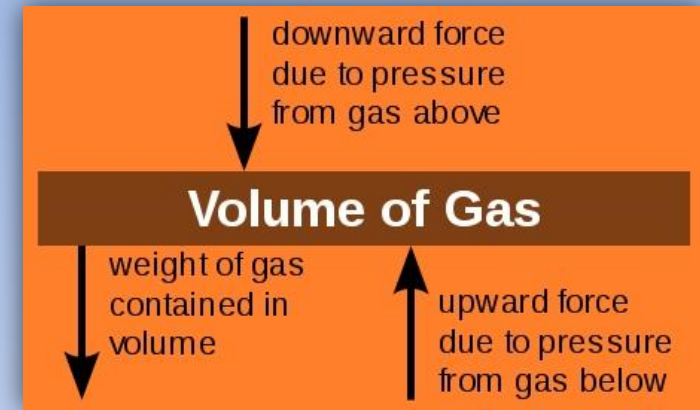
$$dP \cdot dA = -g(r) \cdot \rho(r) \cdot dr \cdot dA$$

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 wnętrza – 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 $\rho(r) = \rho_{sr}$

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

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 zawyża 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

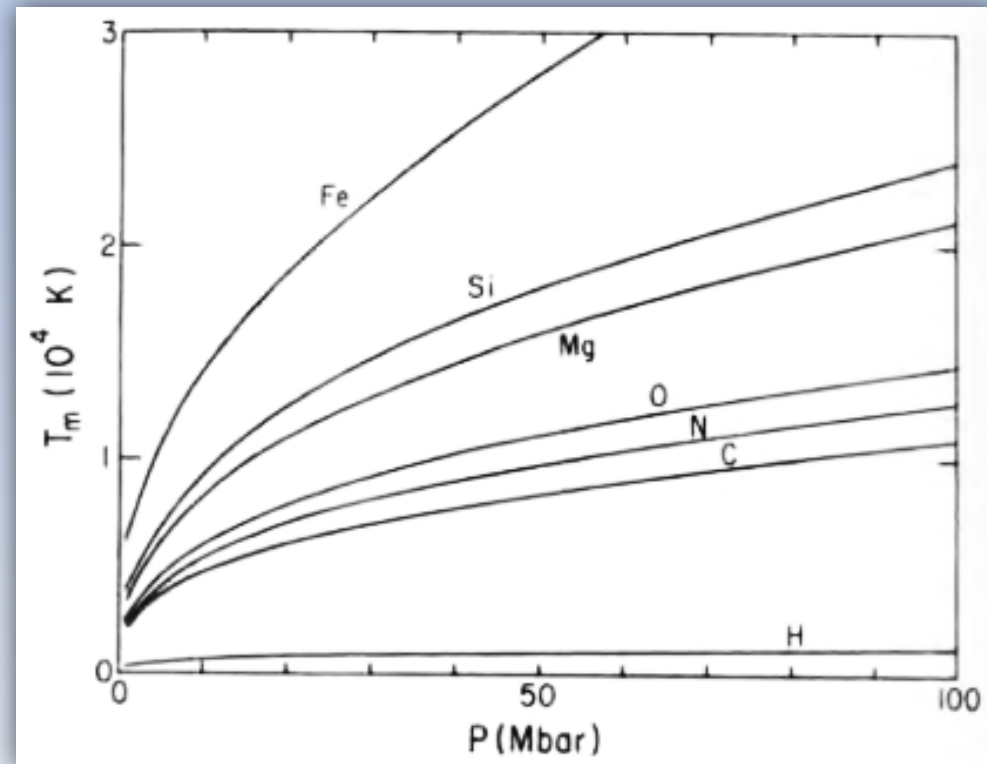
Wnętrza planet

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

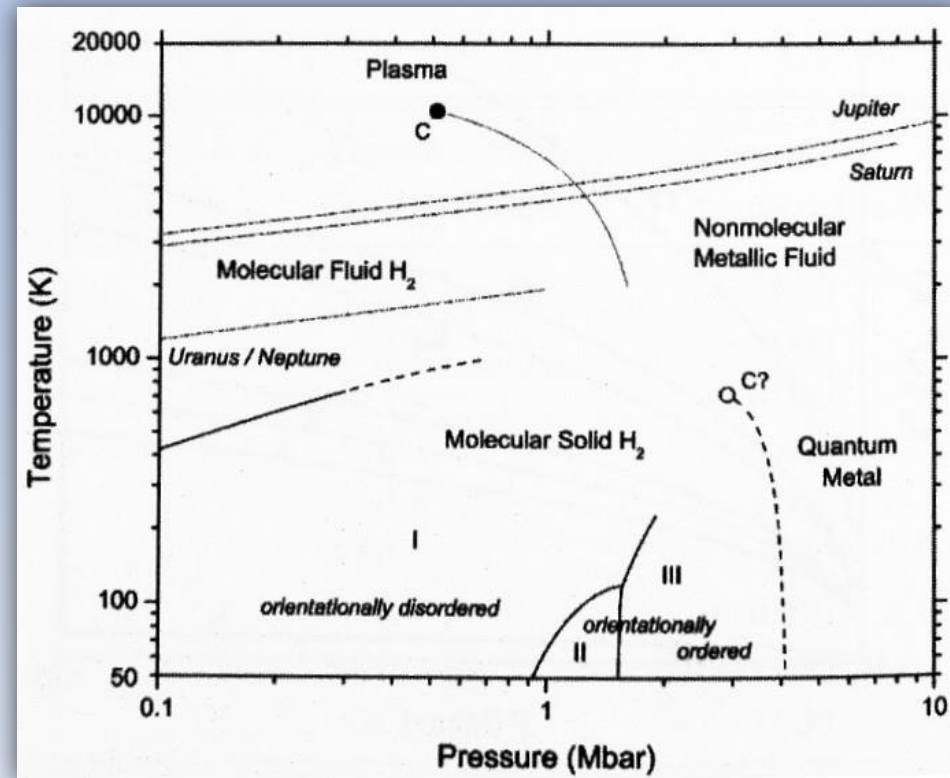
- Zachowanie materiału przy różnych ciśnieniach i temperaturach badamy w laboratoriach lub teoretycznie (powyżej 5-10 Mbar; $1\text{bar}=10^5\text{Pa}$). W wyniku otrzymujemy **diagram fazowy**.

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

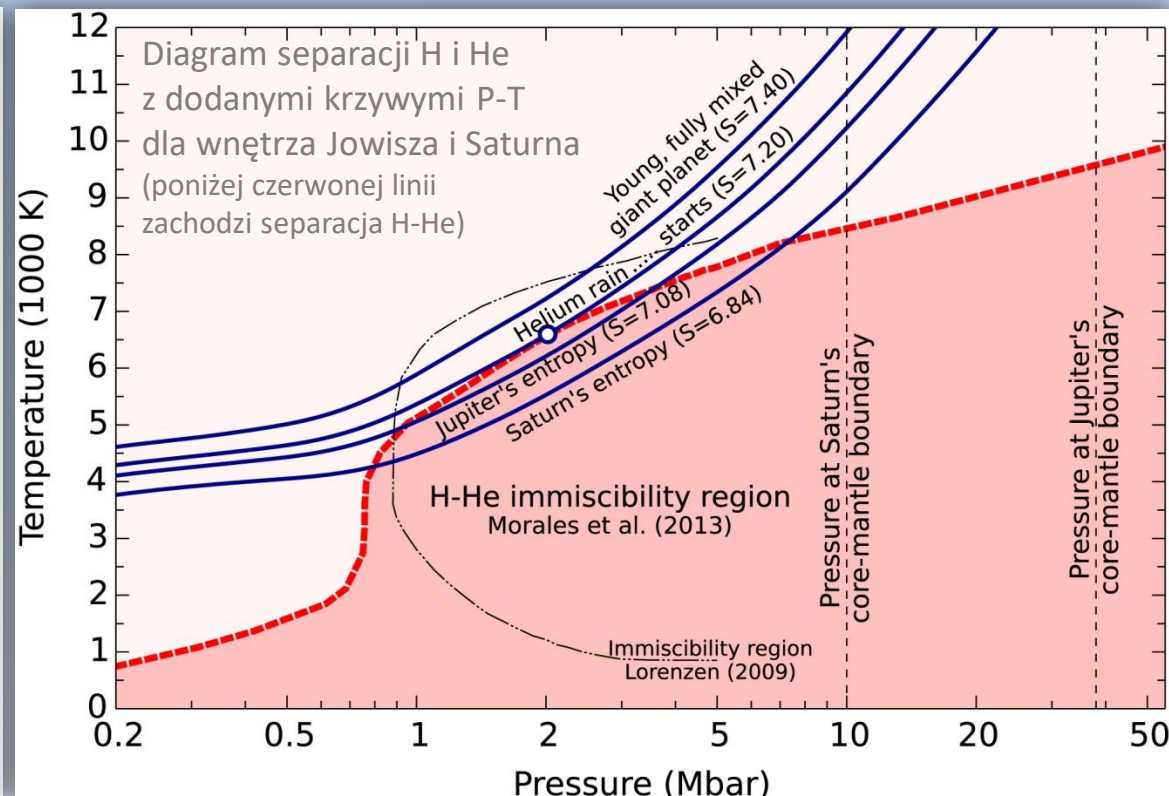
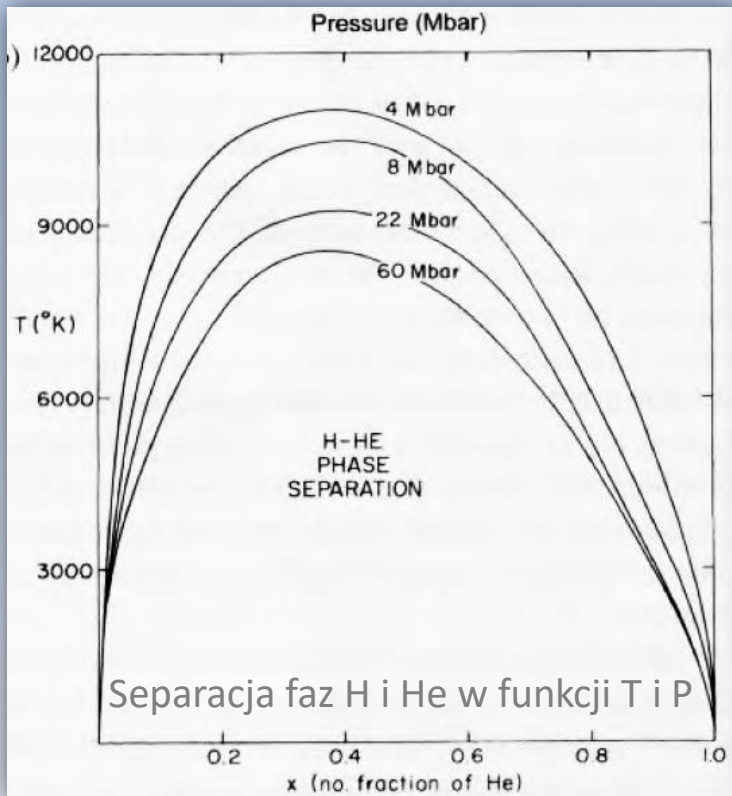
przykład: separacja faz wodoru i helu we wnętrzu Jowisza i Saturna

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

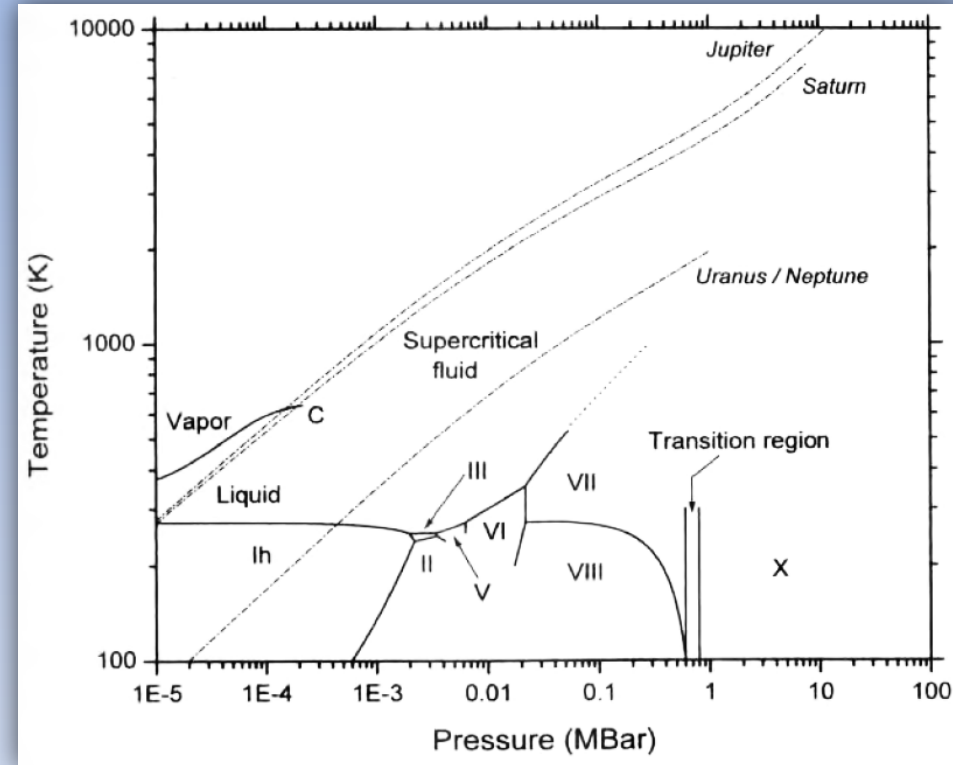


Wnętrza planet

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:

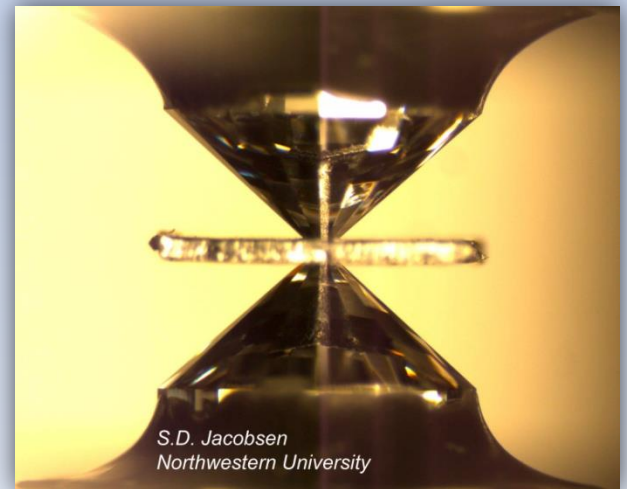
$$P = P(\rho, T, f_i)$$

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 niezanedbywane, 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 wnętrza – pole grawitacyjne, rotacja

- Pole grawitacyjne obiektu niesie informację o wewnętrznym rozkładzie gęstości (masy). Pole to możemy poznać dzięki śledzeniu orbit orbiterów, księżyców czy pierścieni.

Potencjał grawitacyjny ciała możemy zapisać jako:

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

gdzie $\Delta\Phi_g$ zawiera wszelkie odchylenia rzeczywistego potencjału od potencjału nierotującego plastycznego ciała w równowadze hydrostatycznej. Odchylenia spowodowane są przez rozkład masy (w tym rotacja i oddziaływania pływowe).

- Zapis $\Delta\Phi_g$ z wykorzystaniem szeregu fourierowskiego:

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

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.

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

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

- Dla rotującego ciała plastycznego w równowadze hydrostatycznej $J_n = 0$ dla n nieparzystych.

Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – pole grawitacyjne, rotacja

- Dla rotujących ciał powierzchnia ekwipotencjalna zależy od potencjału grawitacyjnego i rotacyjnego:

$$\Phi_g(r, \varphi, \vartheta) + \Phi_q(r, \varphi, \vartheta) = \text{const.} \quad (*)$$

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

- Z rozwiązanie równania (*) dla powierzchni ekwipotencjalnej w przypadku ciała plastycznego o jednorodnej gęstości (nieściśliwego, $\rho = \text{const.}$) otrzymujemy

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

gdzie q_r to iloraz siły odśrodkowej i grawitacyjnej:

$$q_r \equiv \frac{\omega_{rot}^2 R^3}{GM}$$

- Współczynnik odpowiedzi (response coefficient)

$$\Lambda_2 \equiv \frac{J_2}{q_r}$$

- Dla obiektu 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.

Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – pole grawitacyjne, rotacja

- Rozwiązanie równania (*) dla powierzchni ekwipotencjalnej w przypadku obiektów w równowadze hydrostatycznej daje nam zależność między spłaszczeniem ε , z okresem rotacji i J_2

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

gdzie R_e i R_p to równikowy i biegunowy promień obiektu.

- Dla szybko rotujących obiektów w równowadze hydrostatycznej harmoniki wyższego rzędu są proporcjonalne do q_r :

$$J_{2n} \propto q_r^n$$

i są małe w porównaniu do J_2 (więc trudno je wyznaczyć). Coraz wyższe rzędy J_{2n} odzwierciedlają rozkład masy coraz bliżej powierzchni, więc niosą istotną informację. Najważniejsze z nich to J_4 i J_6 .

Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – pole grawitacyjne, rotacja

- Równanie Radau-Darwina daje nam przybliżoną relację między znormalizowanym (biegunowym) momentem bezwładności I/MR^2 , rotacją i J_2 (dla szybko rotujących obiektów w stanie równowagi hydrostatycznej):

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

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

$$q = \frac{\omega_{rot}^2 R^3}{GM} \qquad \varepsilon = \frac{R_r - R_b}{R_r}$$

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 (szybka rotacja, efekty niehydrostatyczne), wartość I/MR^2 obliczona z równania R-D odbiega od „rzeczywistych” wartości.

Wnętrza planet

modelowanie wnętrz – pole grawitacyjne, rotacja

Body	J_2 ($\times 10^{-6}$)	J_3 ($\times 10^{-6}$)	J_4 ($\times 10^{-6}$)	J_6 ($\times 10^{-6}$)	q_r	Λ_2	I/MR^2
Mercury	60 ± 20				1.0×10^{-6}	60	0.346
Venus	4.46 ± 0.03	-1.93 ± 0.02	-2.38 ± 0.02		6.1×10^{-8}	73	0.337
Earth	1082.627	-2.532 ± 0.002	-1.620 ± 0.003	-0.21	3.45×10^{-3}	0.314	0.331
Moon	203.43 ± 0.09				7.6×10^{-6}	26.8	0.393
Mars	1960.5 ± 0.2	31.5 ± 0.5	-15.5 ± 0.7		4.57×10^{-3}	0.429	0.366
Jupiter	14696.4 ± 0.2		-587 ± 2	34 ± 5	0.089	0.165	0.276
Saturn	16290.7 ± 0.3		-936 ± 3	86 ± 9	0.151	0.108	0.22
Uranus	3343.5 ± 0.1		-28.9 ± 0.2		0.029	0.114	0.23
Neptune	3410 ± 9		-35 ± 10		0.026	0.136	0.23
Io	1860 ± 3				1.7×10^{-3}	1.08	0.378
Europa	436 ± 8				5.02×10^{-4}	0.87	0.346
Ganymede	128 ± 3				1.91×10^{-4}	0.67	0.312
Callisto	33 ± 1				3.67×10^{-5}	0.90	0.355

Dla jednorodnej kuli: $I/MR^2 = 0.4$, a dla pustej sfery: $I/MR^2 = 2/3$. Jeśli gęstość wzrasta z głębokością to $I/MR^2 < 0.4$.

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	~26	$\sim 1.3 \times 10^{-7}$
Mars		222	40	9×10^{-8}
Io			~2500	$\sim 10^{-5}$
Jupiter	124.4	113	5440	1.8×10^{-6}
Saturn	95.0	83	2010	1.5×10^{-6}
Uranus	59.1	60	<42	$< 4 \times 10^{-8}$
Neptune	59.3	48	433	3.2×10^{-6}

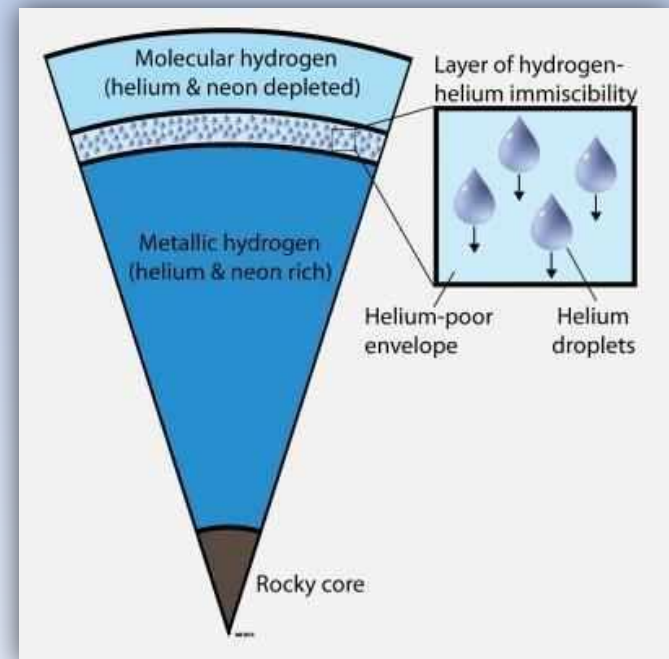
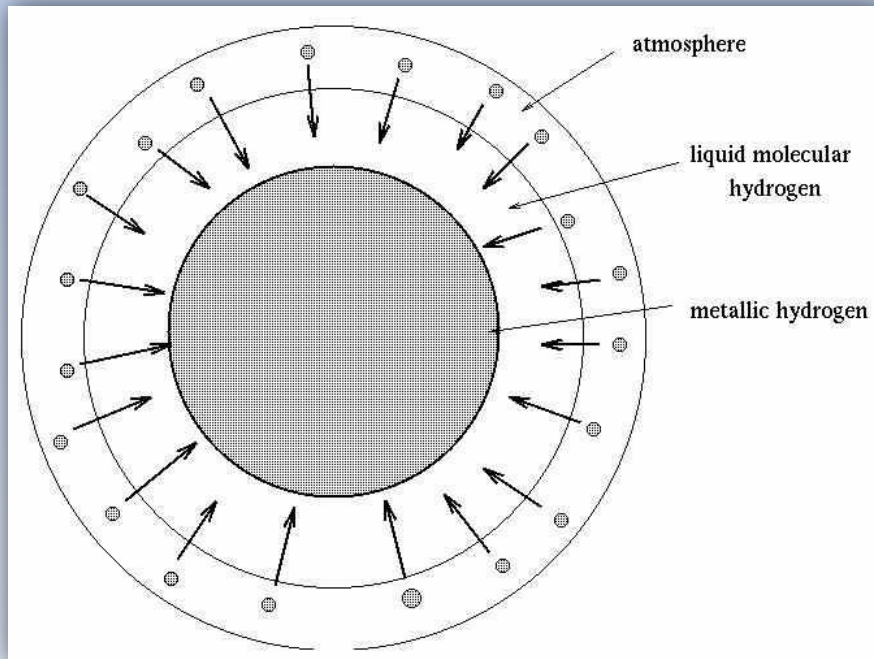
T_e efektywna T_{eq} równowagowa strumień cieplny z wnętrza

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]

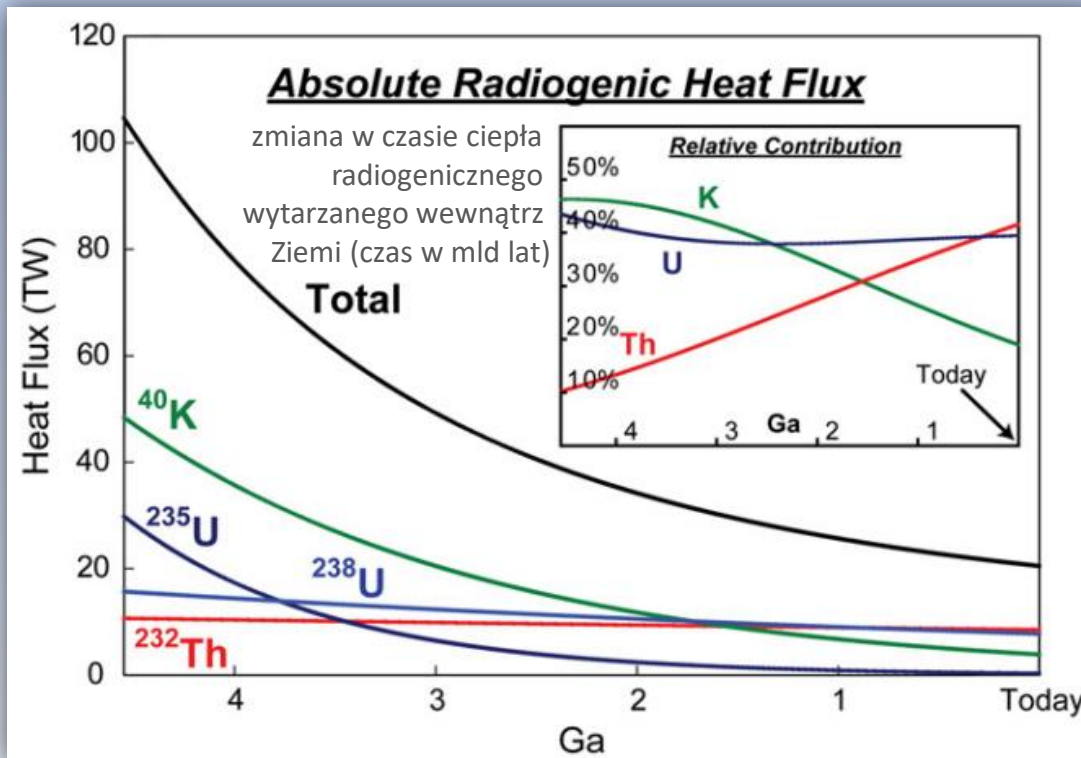


Wnętrza planet

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 planet skalistych, księżyców a nawet obiektów lodowych; np.: planety skaliste
- grzanie pływowe powodowane jest siłami pływowymi, które deformują ciało; ciągła deformacja podgrzewa wnętrze; np.: Io, Europa

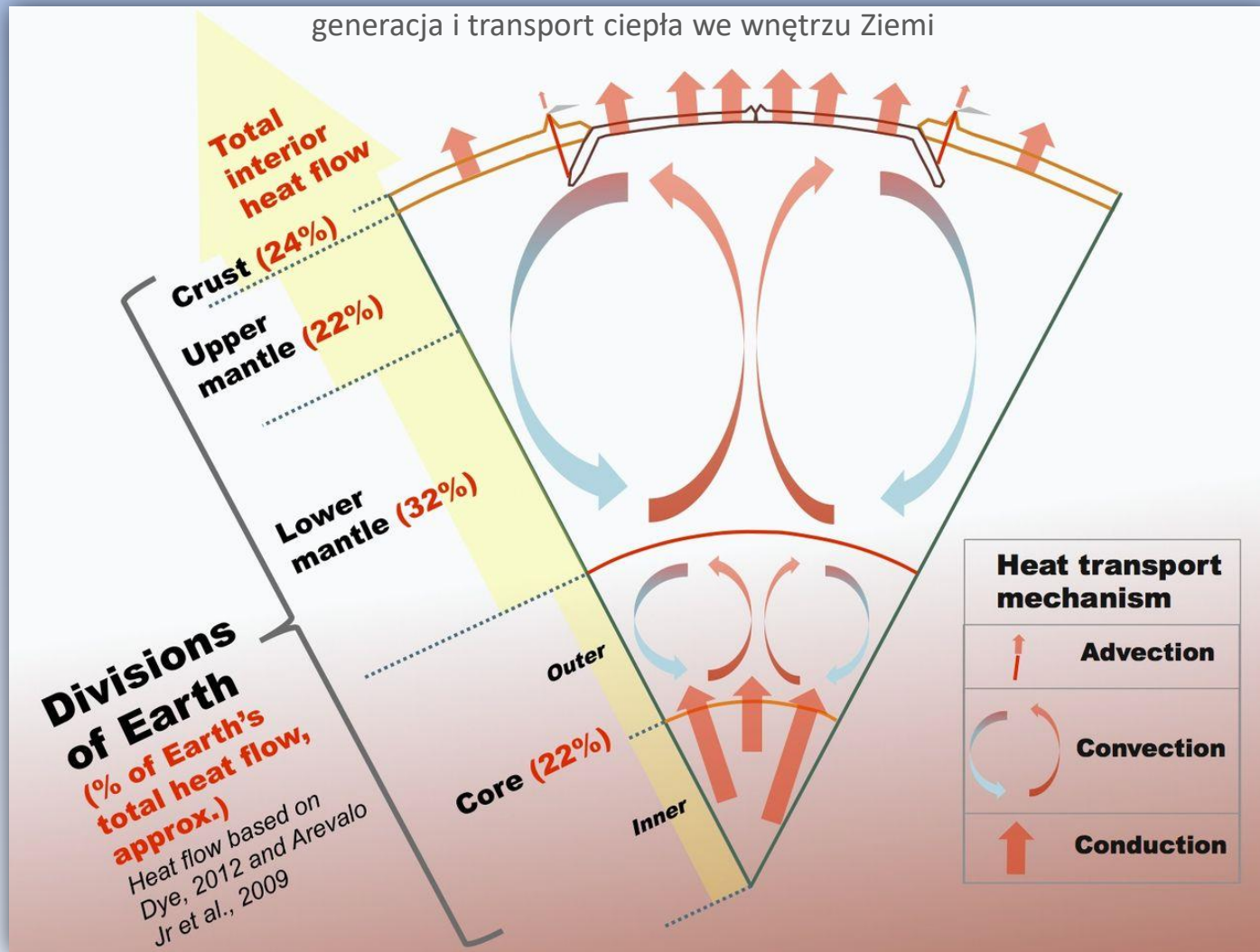


granit zawiera radioaktywny K, Th i U

Wnętrza planet

modelowanie wnętrza – utrata ciepła wewnętrznego

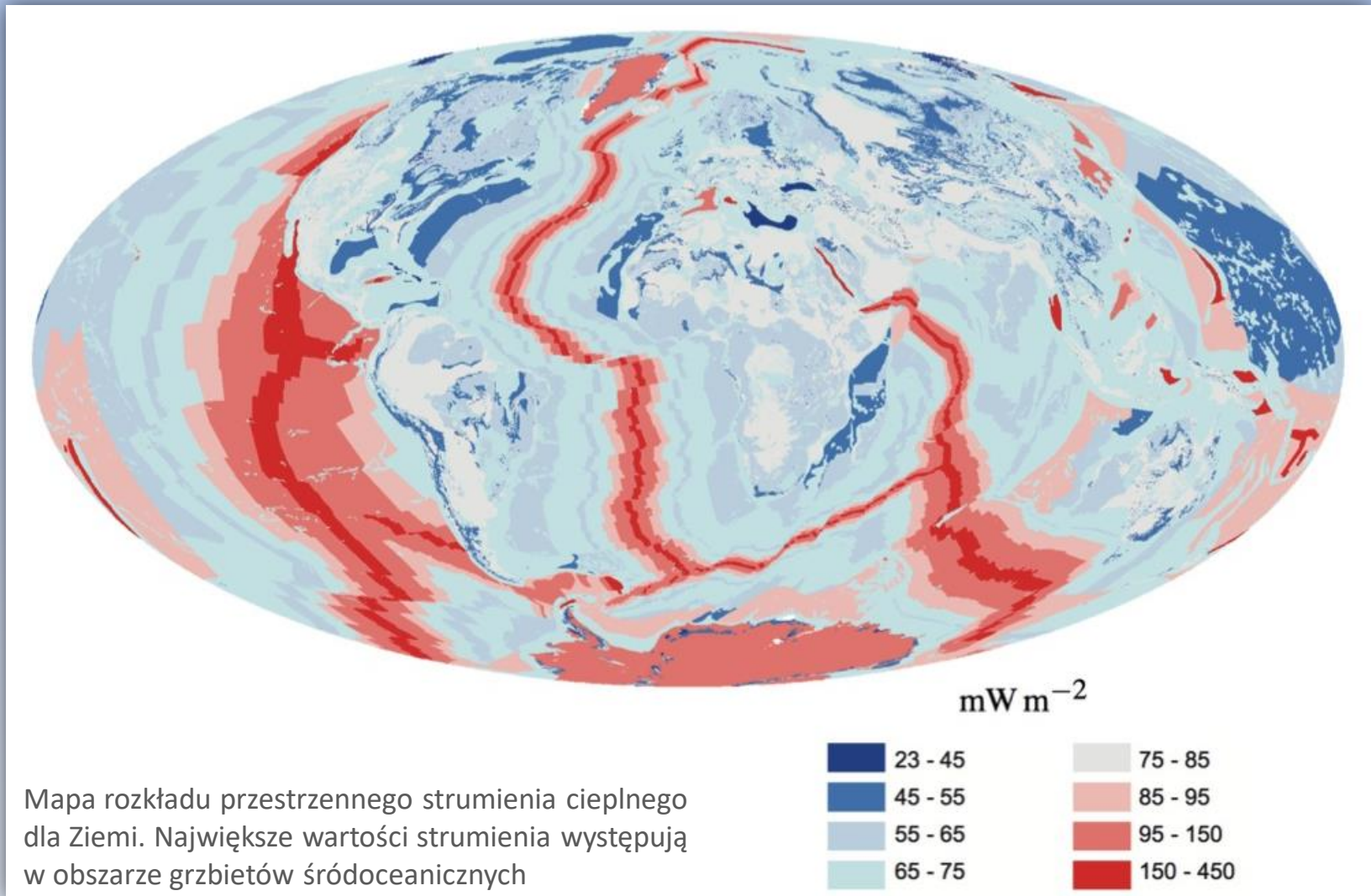
Ciepło wewnętrzne obiektu jest transportowane ku powierzchni i oddawane do otoczenia. Tempo stygnięcia ciała zależy od efektywności przepływu ciepła i wielkości ciała.



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:

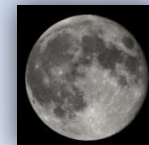
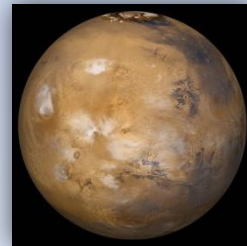
$$E_t = a \cdot \frac{4}{3} \pi R^3$$

- tempo utraty tej energii zależy od całkowitej mocy promieniowania:

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

- czas stygnięcia wynosi więc:

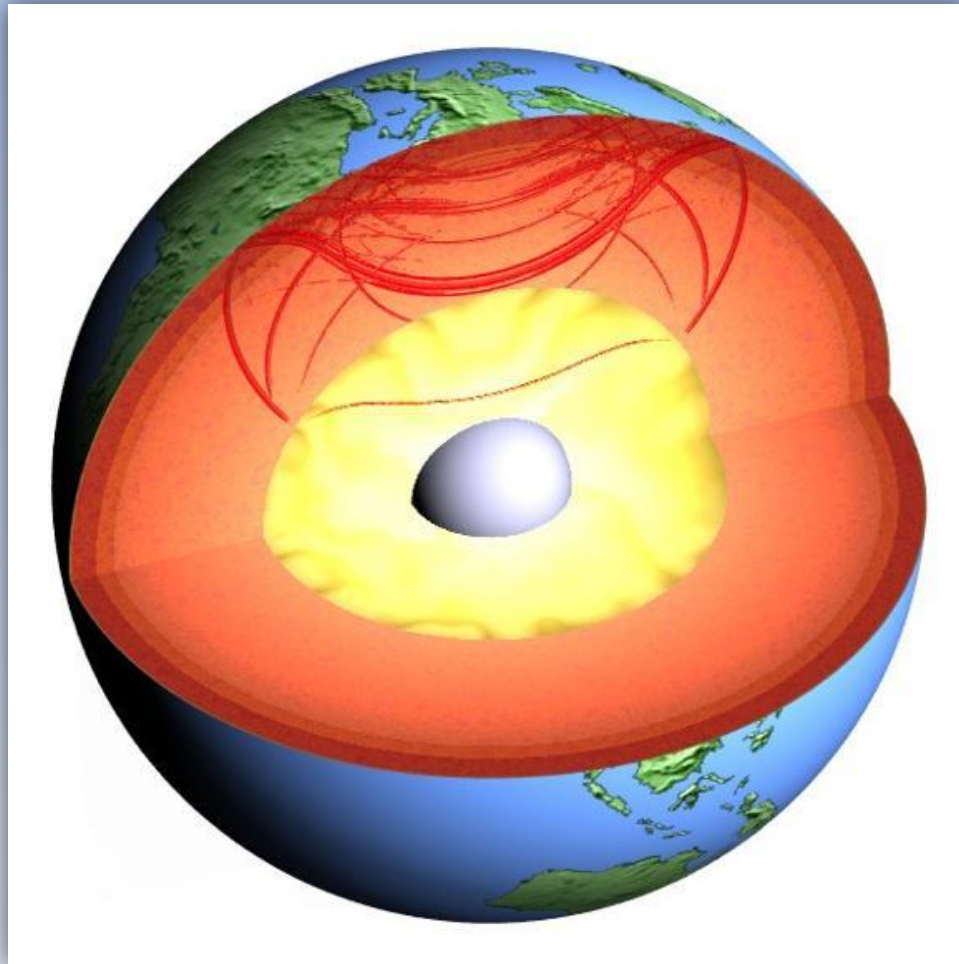
$$t = \frac{E_t}{L} \propto R$$



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.

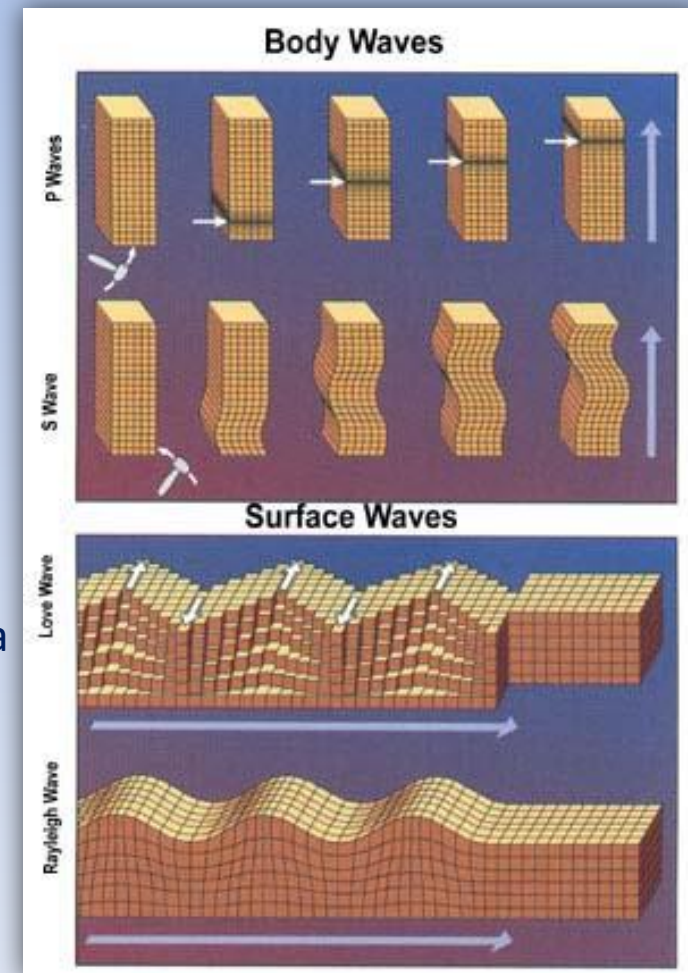


Wnętrza planet

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:

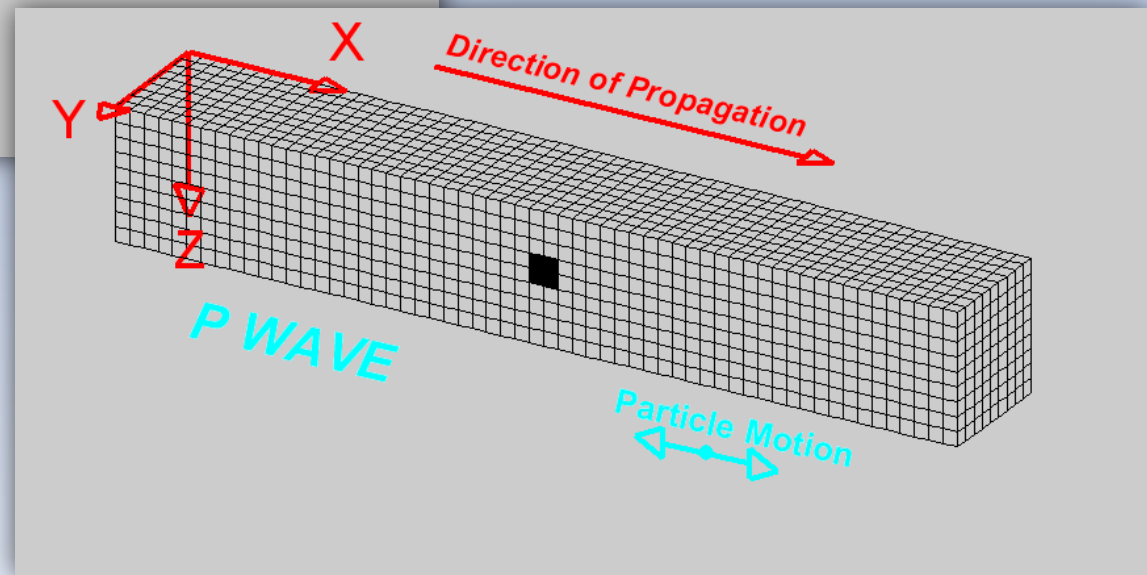
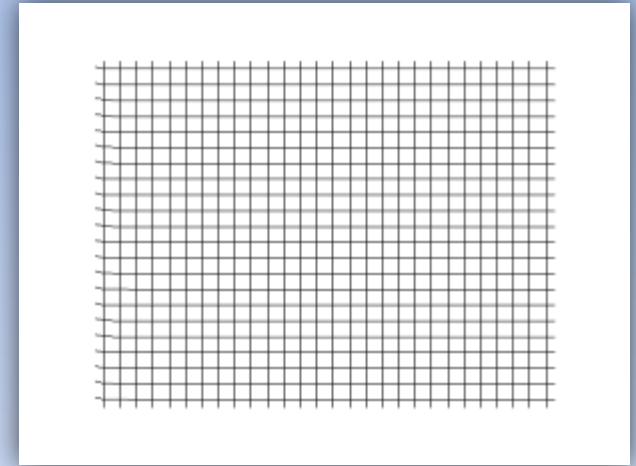
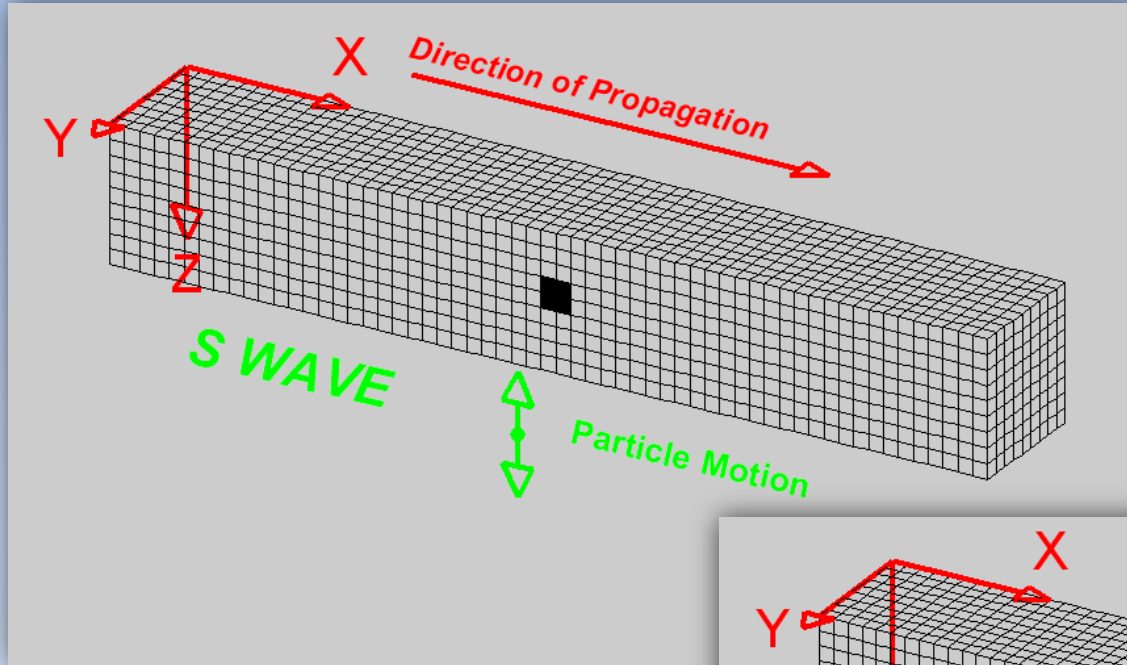
- **fale przestrzenne** (rozchodzą się z ogniska trzęsienia we wszystkich kierunkach):
 - **fale podłużne (P)** – powodują rozciąganie i ściskanie ośrodka; są szybsze około 2x od fal S
 - **fale poprzeczne (S)** – powodują drgania w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia; mogą rozchodzić się 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

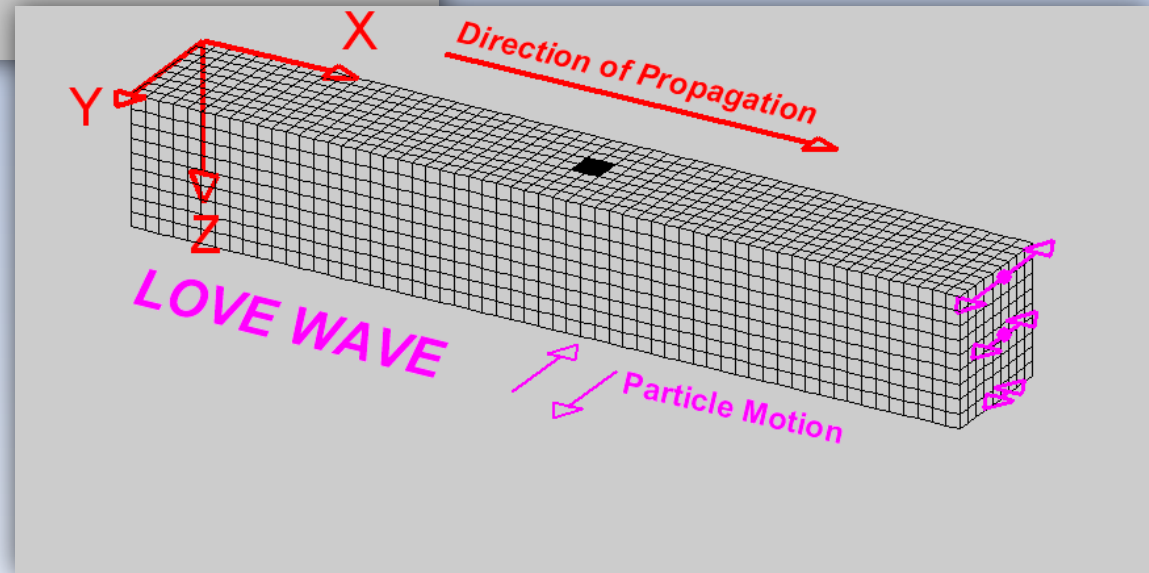
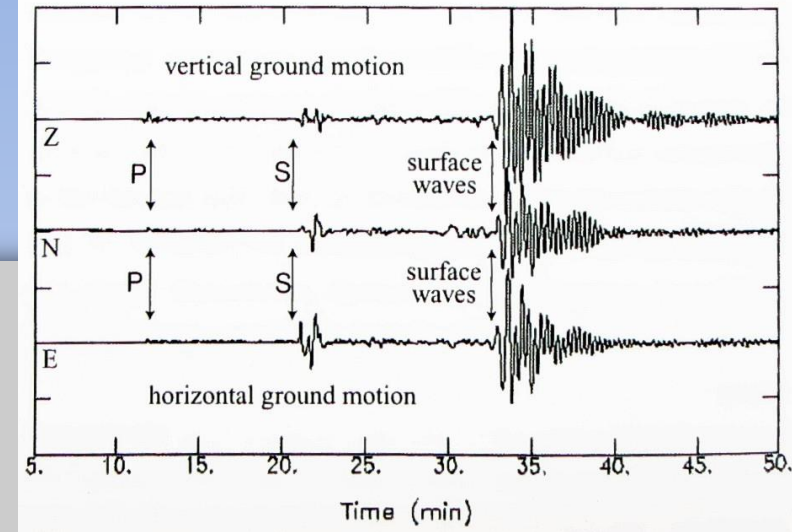
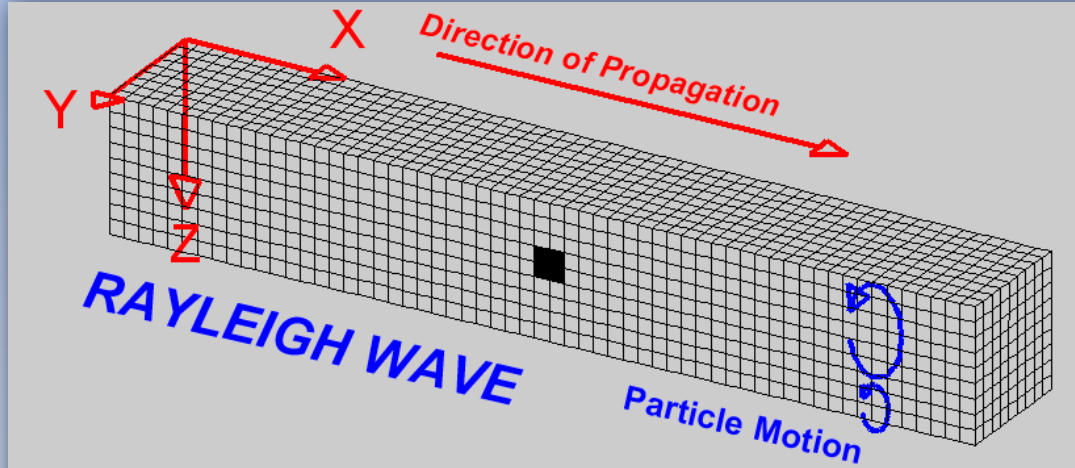
Fale typu P i S – animacja:



Wnętrza planet

Ziemia – wnętrze widziane na wskroś

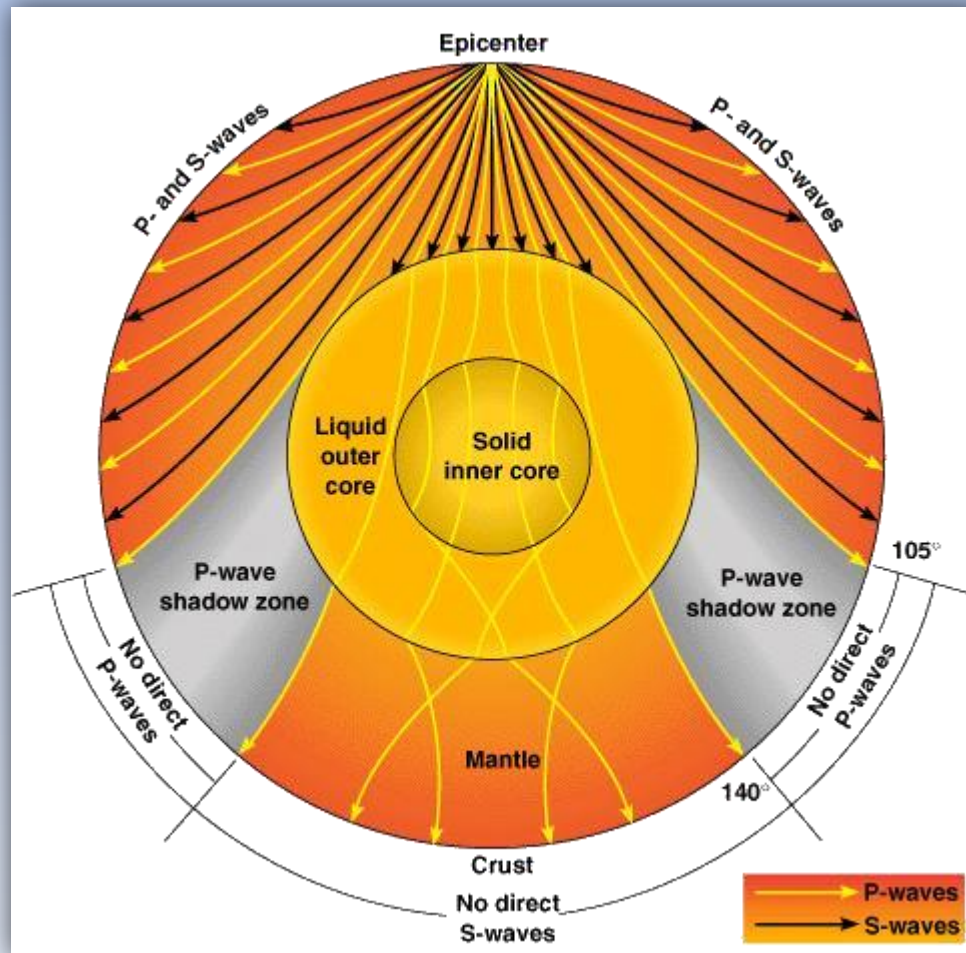
Fale Rayleigha i Love'a – animacja:



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.



Przejście 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.

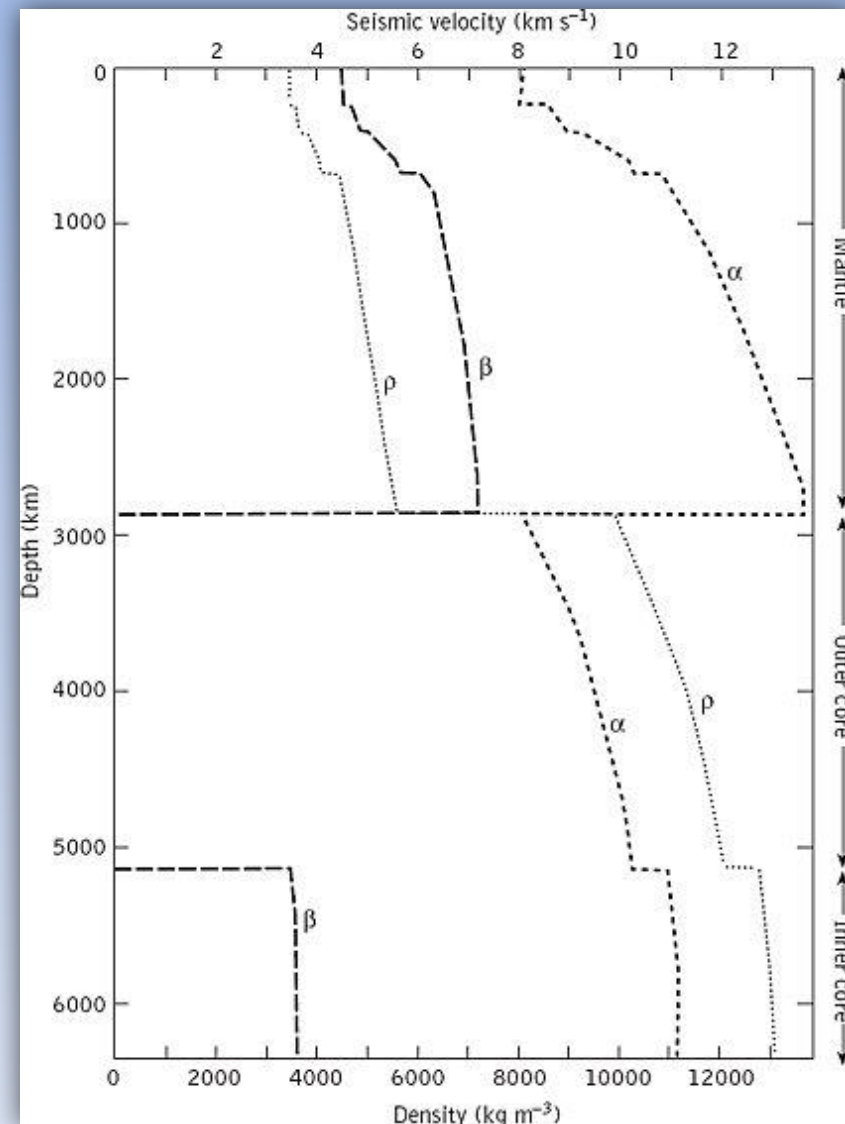
Wnętrza planet

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.

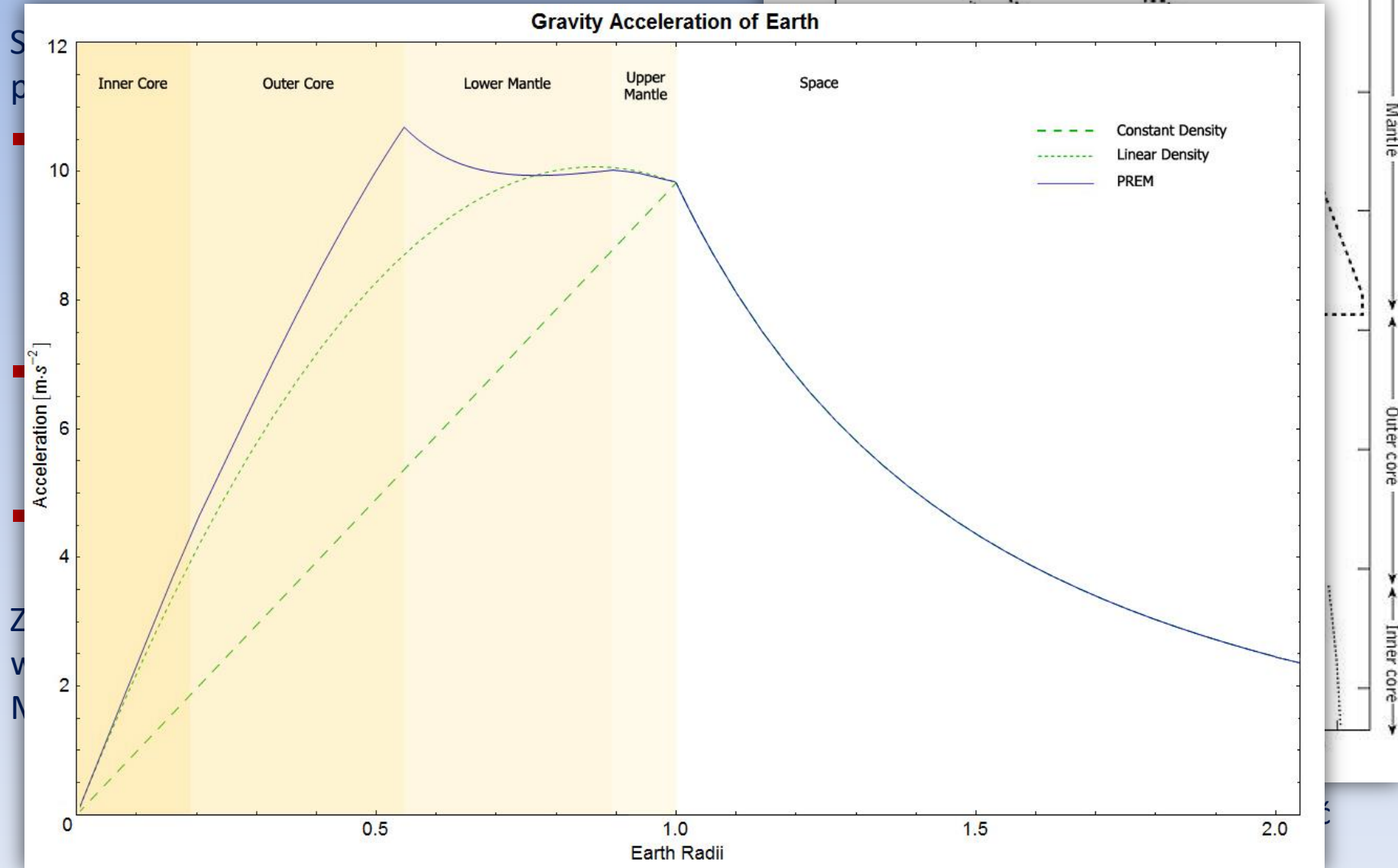
Z tych danych otrzymano profil gęstości we wnętrzu Ziemi (*PREM – Preliminary Reference Earth Model*).



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

Wnętrza planet

Ziemia – wnętrze widziane na wskroś



Wnętrza planet

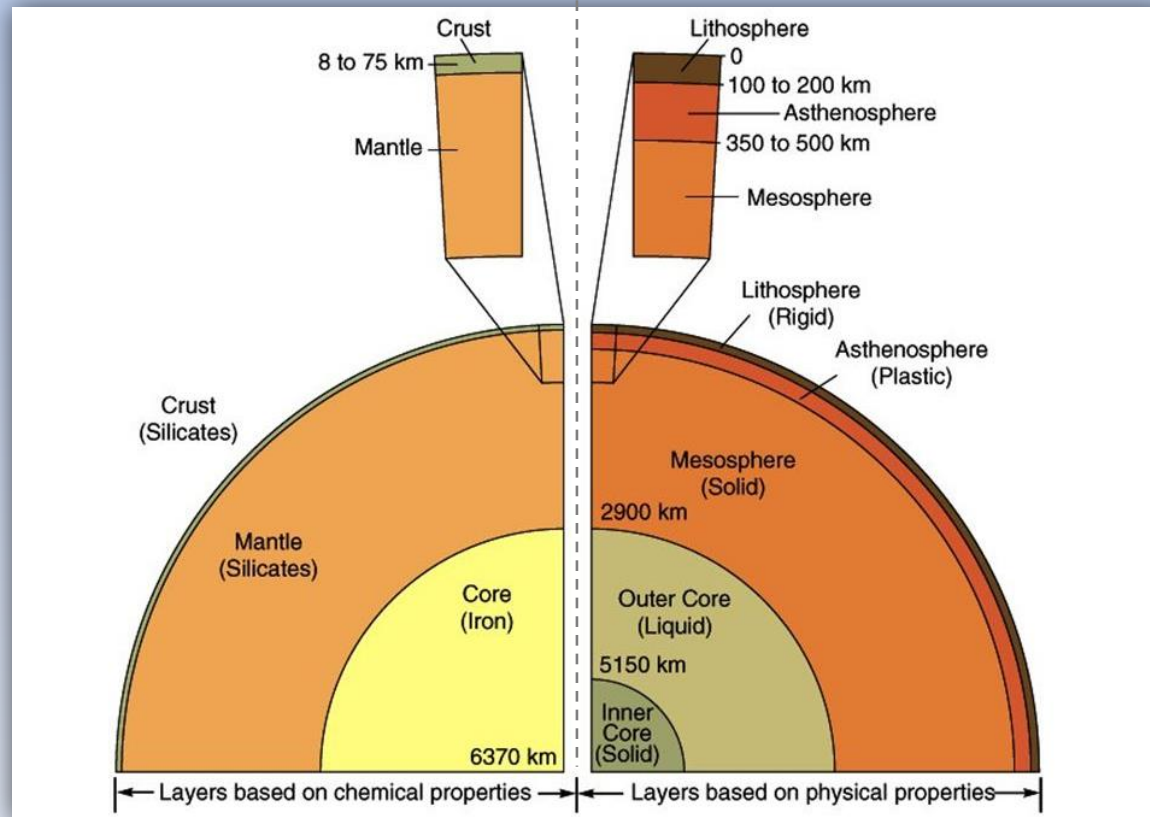
Ziemia – wnętrze widziane na wskroś

Struktura chemiczna wnętrza Ziemi:

- *skorupa* skalna (kontynentalna, oceaniczna), średnia grubość 35 km
- *płatcz* skalny do głębokości 2900 km
- *jądro* metaliczne o rozmiarze 55% promienia Ziemi

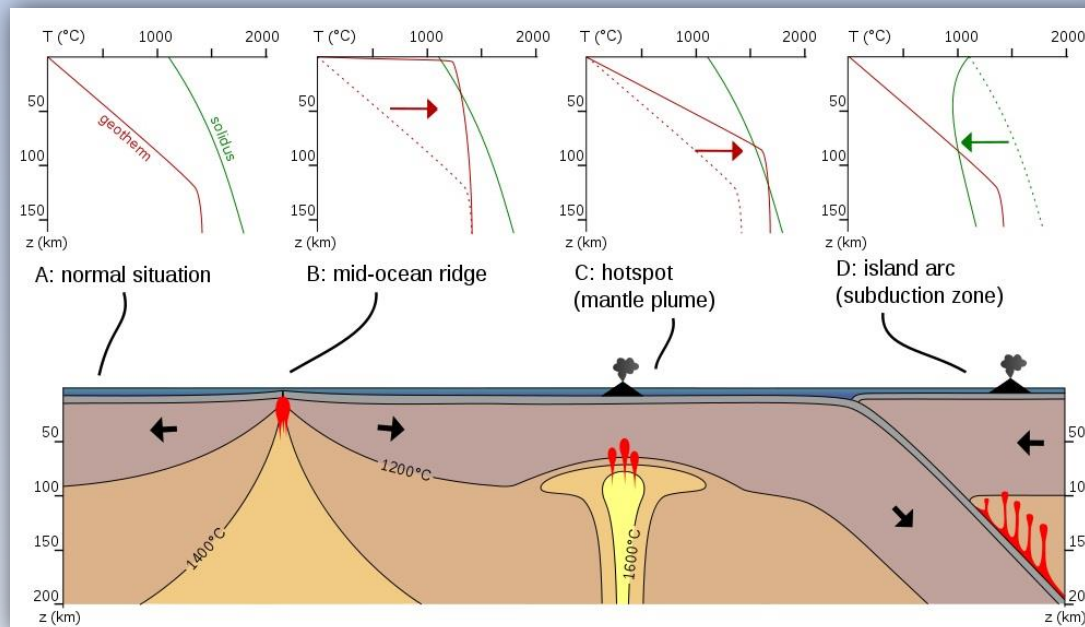
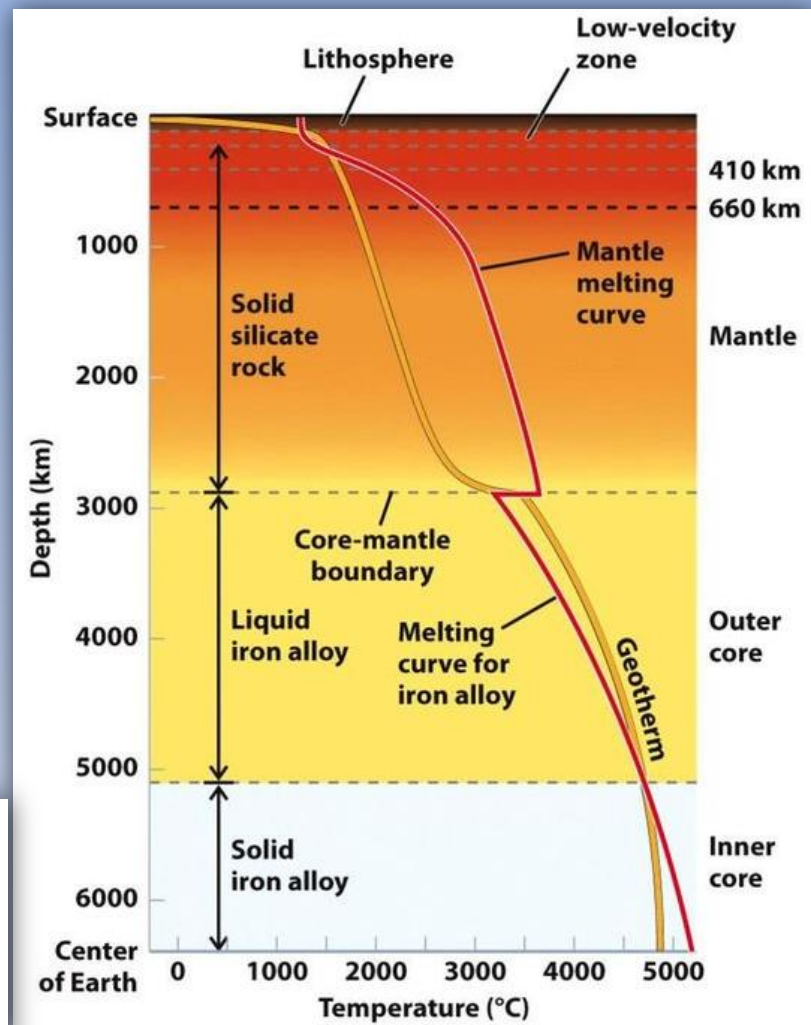
Struktura mechaniczna (reologiczna) wnętrza Ziemi:

- *litosfera* – warstwa stała (skorupa + górna końcówka płatcza)
- *astenosfera* – warstwa plastyczna (wyższe warstwy górnego płatcza); umożliwia ruch płyt tektonicznych
- *mezosfera* – warstwa stała (pozostała część płatcza)
- *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:
 a) sytuacja normalna,
 b) grzbiet śródoceaniczny,
 c) plama gorąca,
 d) 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.

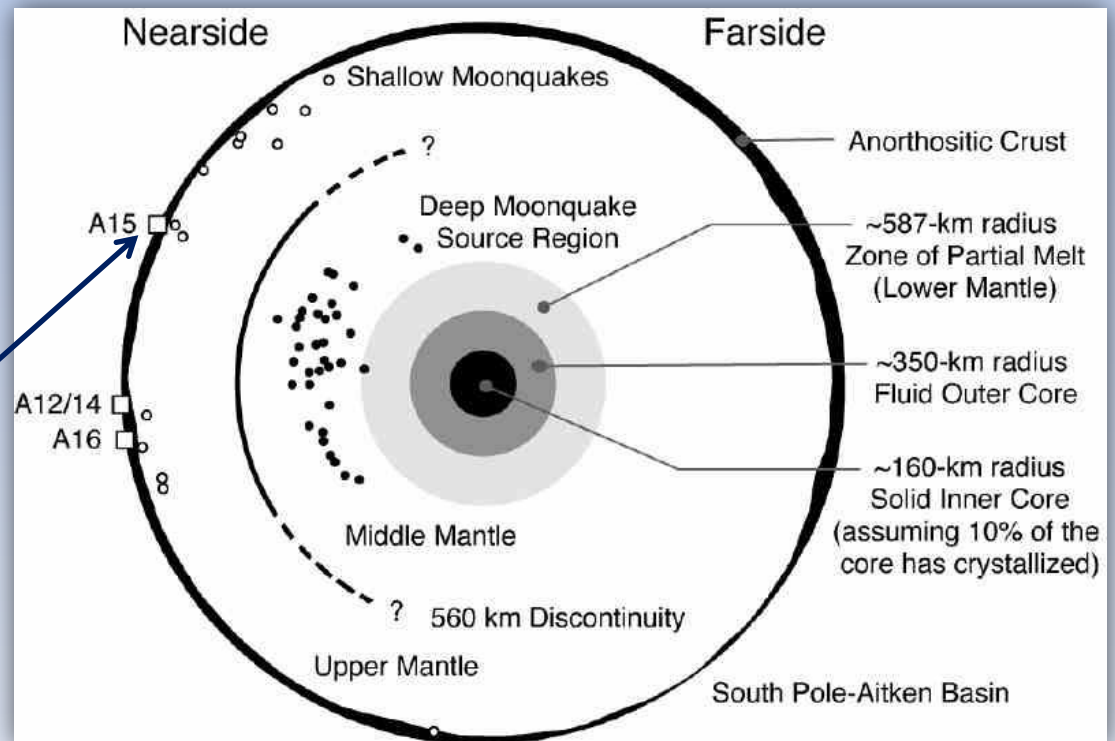
[LOGIN FOR A CHANCE AT HISTORY](#)

Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna Księżyca

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

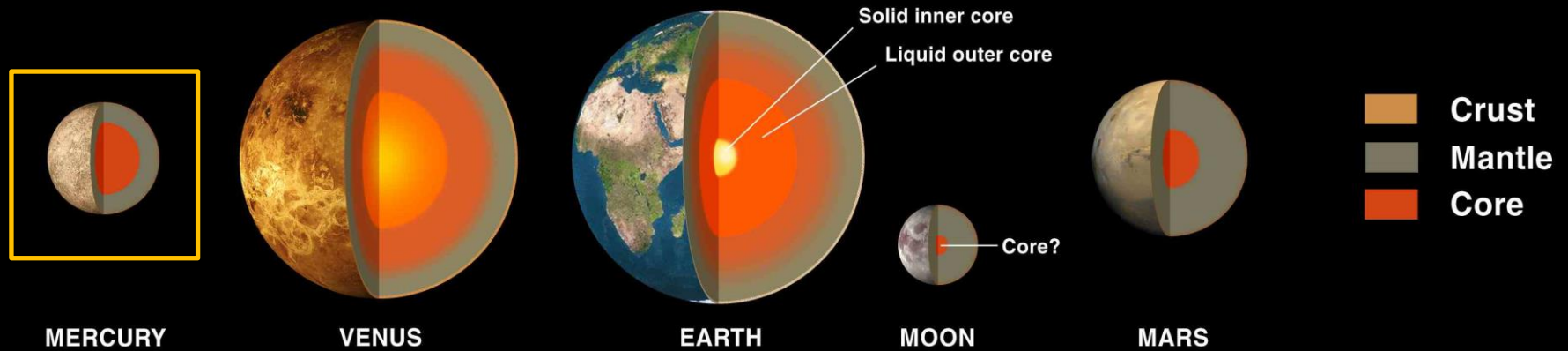
- skorupa – grubość około 60 km, gęstość 2.85 g/cm^3
- płaszcz – częściowo płynny, gęstość 3.3 g/cm^3
- jądro – niewielkie, o promieniu 300 – 400 km, częściowo płynne, bogate w Fe, gęstość 8 g/cm^3



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.



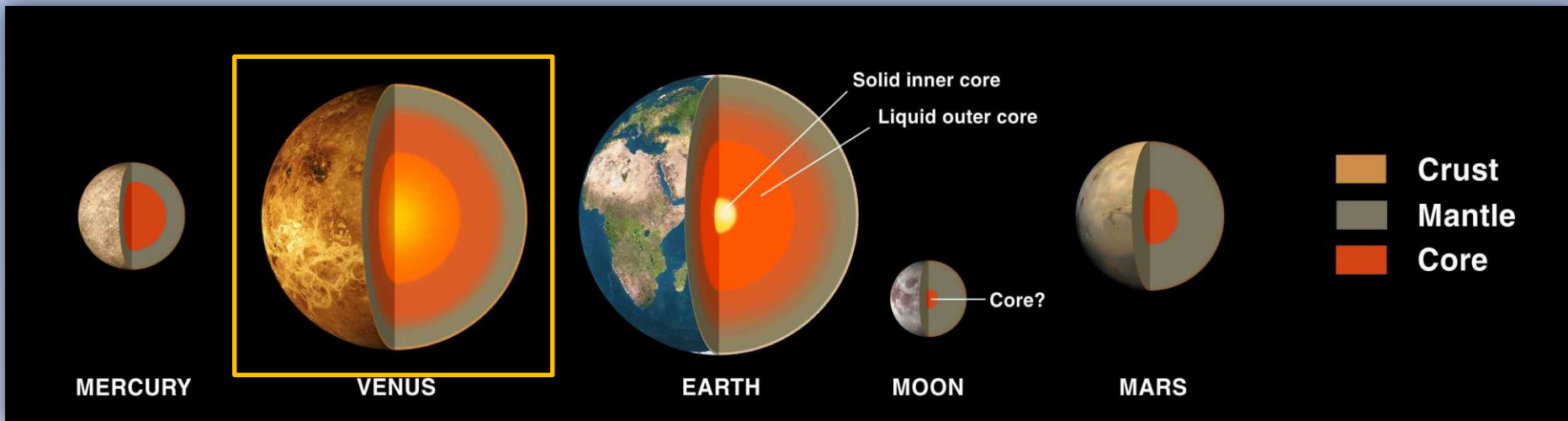
Merkury

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

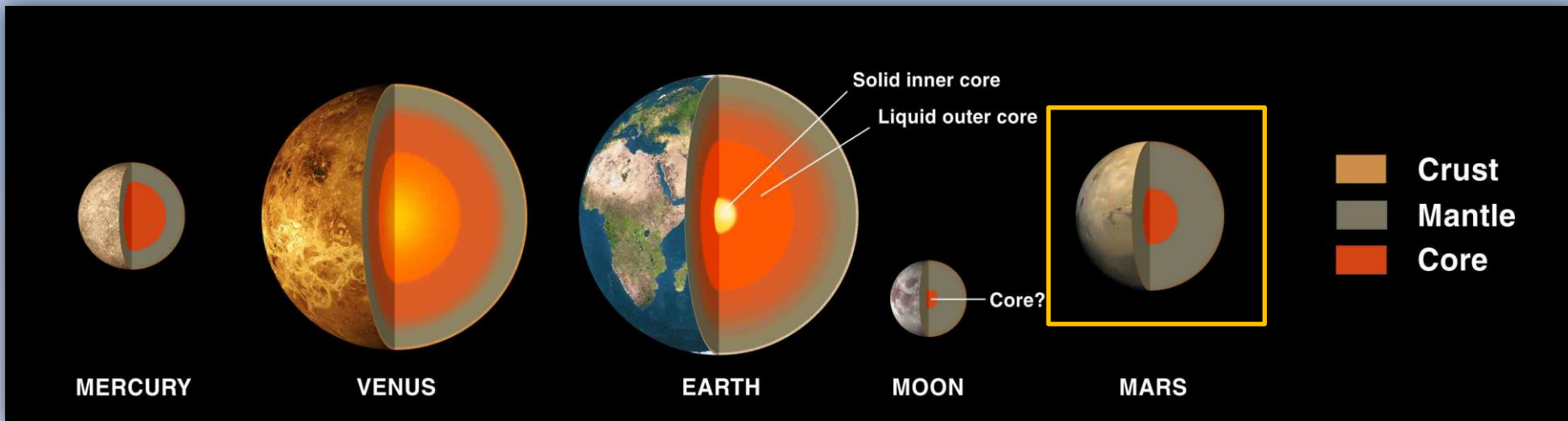
Masa, rozmiary i średnia gęstość podobne do ziemskich. To oznacza, że wnętrza obu planet są podobne. Ale nie są takie same – Wenus nie ma pola magnetycznego. To oznacza brak metalicznej warstwy konwekcyjnej:

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

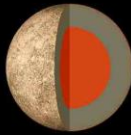
Brak tektoniki płyt (gruba litosfera) i obecnego wulkanizmu – wewnątrz jest chłodniejsze.

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

Wnętrza planet

Budowa

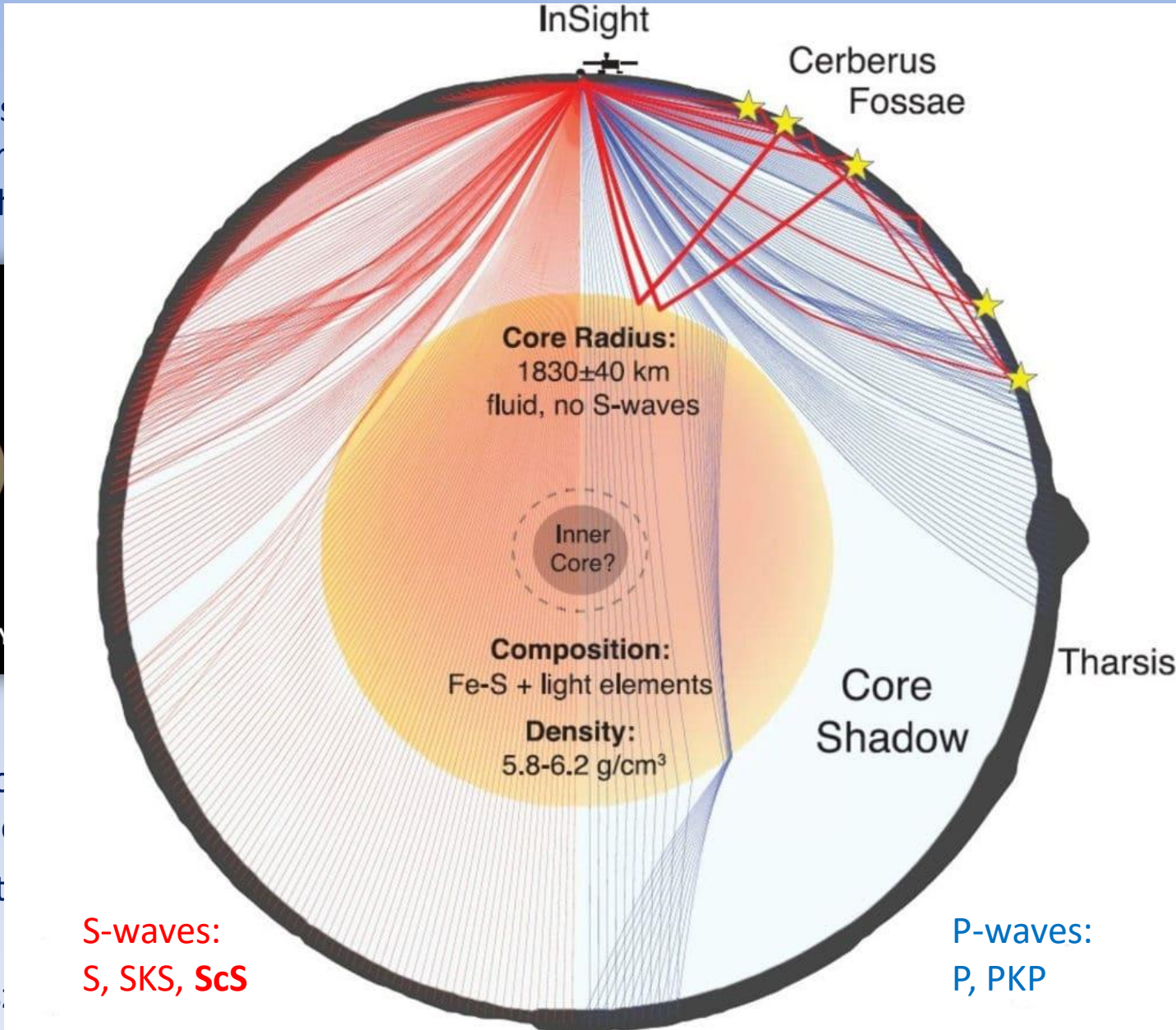
Ogólna s
jądro (fr
szczegół



MERCURY

Mars

Płaszcz
(za cz
Brak t
Jądro
(mies



Crust
Mantle
Core

edniki

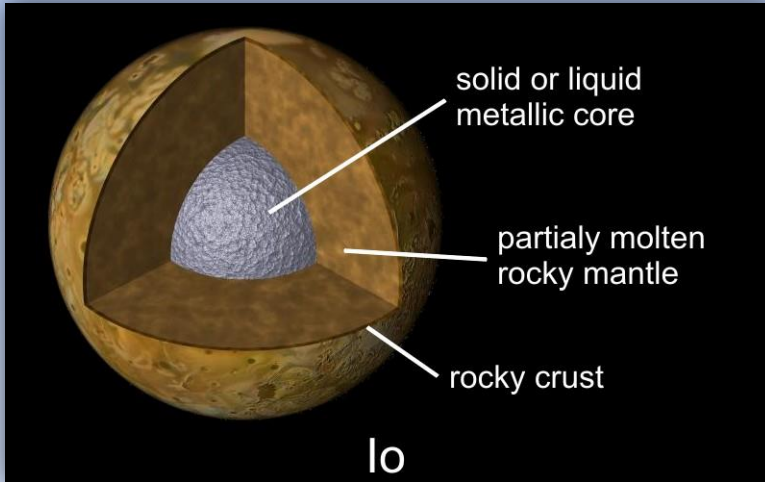
niejsze.

łynne

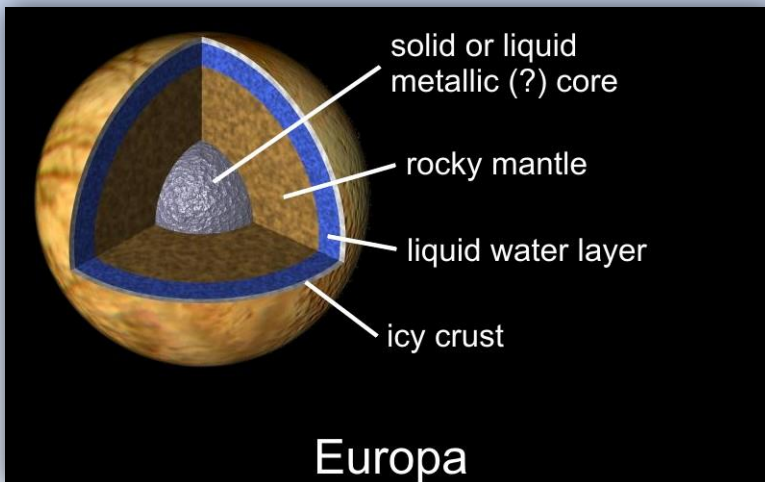
Wnętrza planet

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 płynny płaszcz (wulkanizm). Jądro zbudowane jest z Fe-Ni lub Fe-FeS-Ni i jest całkowicie płynne lub stałe (brak pola mag.). $I/MR^2=0.378$

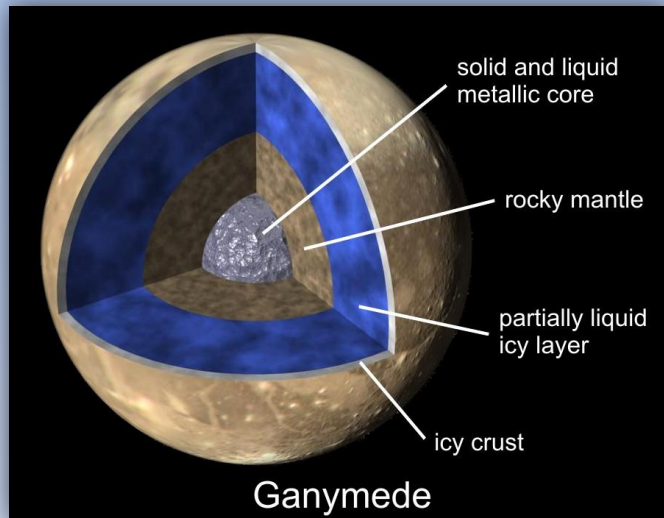


Europa – średnia gęstość 3.01 g/cm^3 oznacza, że dominuje to frakcja skalna (płaszcz, 90% masy). W środku znajduje się jądro metaliczne (Fe-Ni lub Fe-FeS-Ni). Skorupę buduje lód. Pomiedzy skorupą a płaszczem prawdopodobnie występuje ocean wodny (słony). $I/MR^2=0.346$

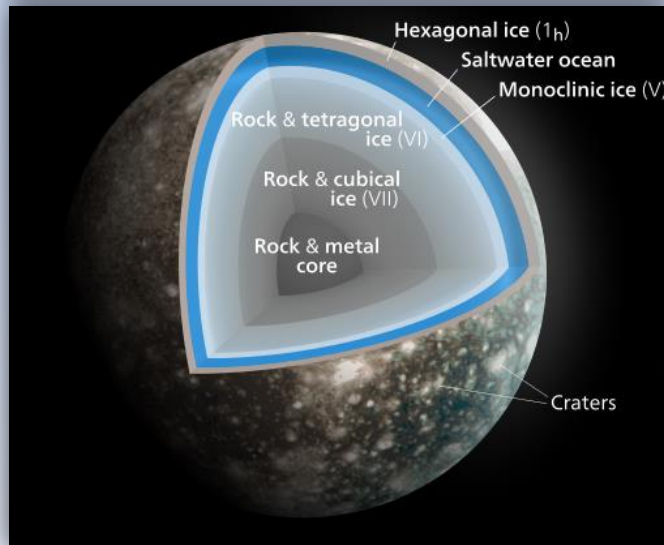
Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna największych księżyców

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



Ganimedes – średnia gęstość 1.94 g/cm^3 wskazuje na obiekt z przewagą frakcji skalno-łodowej. 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. $I/MR^2=0.312$

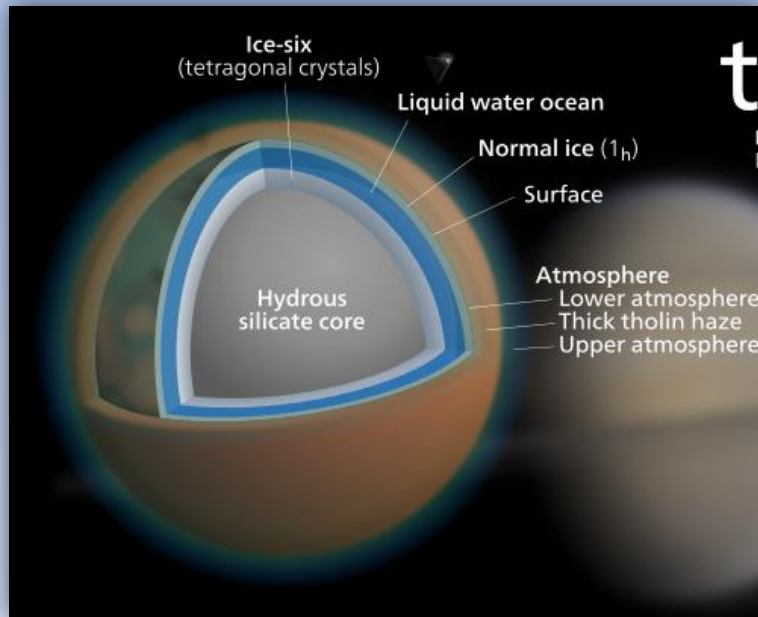


Kallisto – średnia gęstość 1.83 g/cm^3 , czyli zawiera więcej frakcji lodowej niż Ganimedes. Powierzchnię tworzy skorupa lodowa, pod którą może znajdować się (słony) ocean wodny. Poniżej leży skalno-łodowy płaszcz o gęstości rosnącej nieznacznie ku centrum. Brak jądra metalicznego. $I/MR^2=0.355$

Wnętrza planet

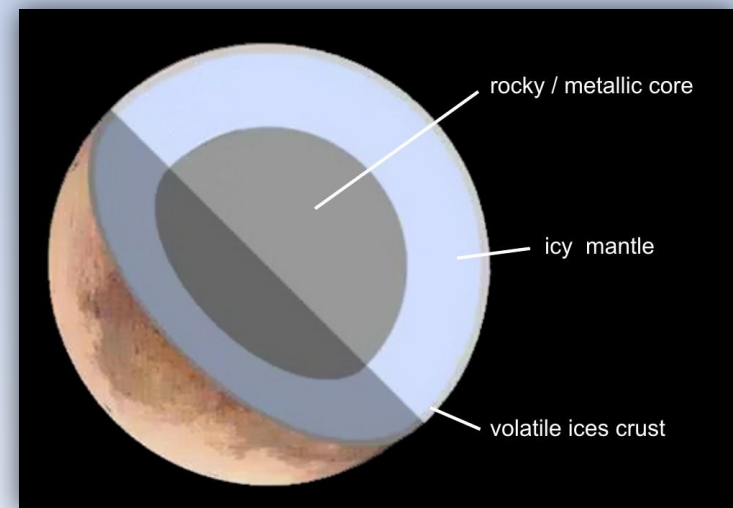
Budowa wewnętrzna największych księżyców

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



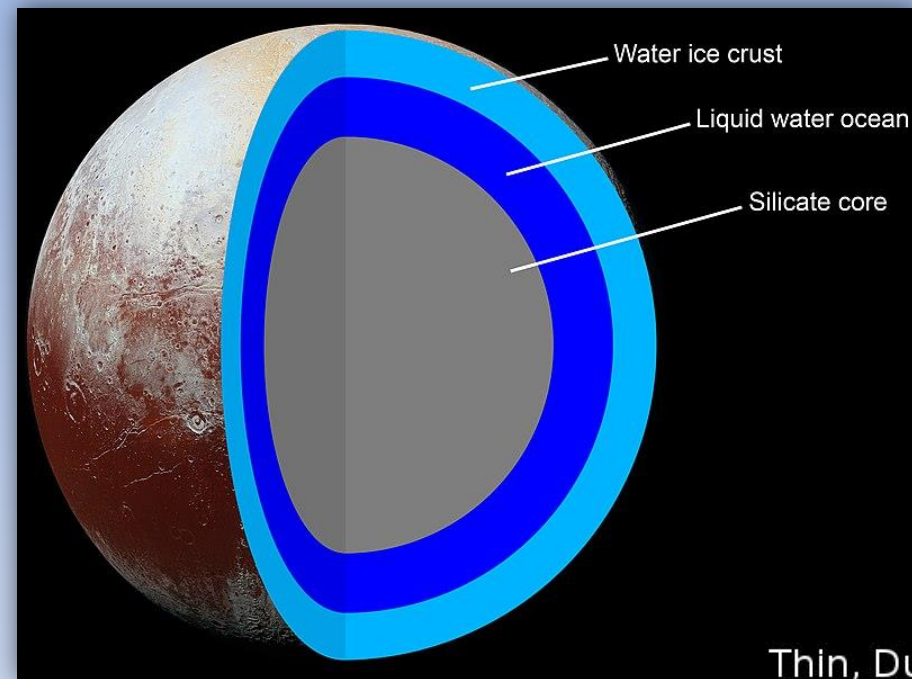
Tytan – średnia gęstość 1.88 g/cm^3 wskazuje na obiekt skalno-lodowy. Jądro buduje materiał skalny (+Fe). Nad nim położony jest płaszcz lodowy i płynna warstwa mieszaniny wody i amoniaku oraz lodowa skorupa. Podpowierzchniowy ocean może być źródłem zasilającym atmosferę.

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

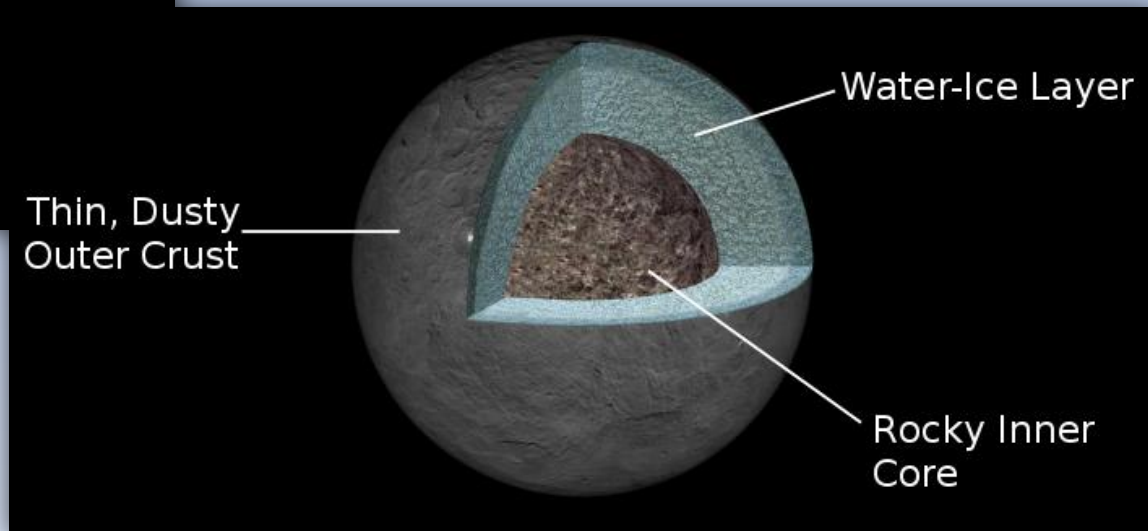


Wnętrza planet

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) domieszkuje krzemianami.

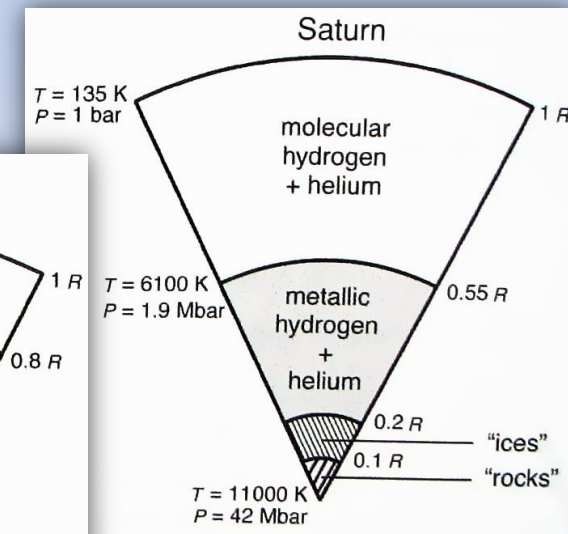
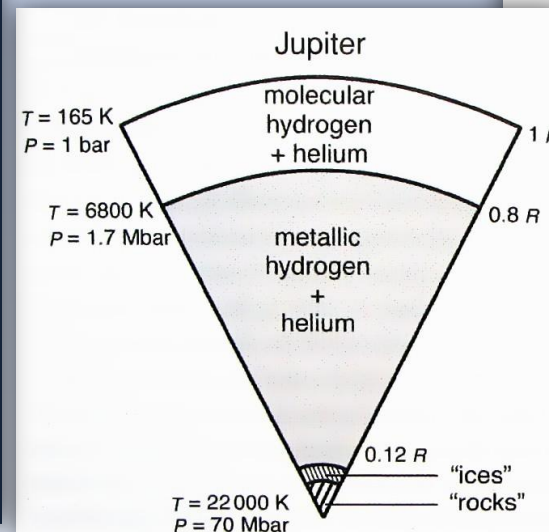
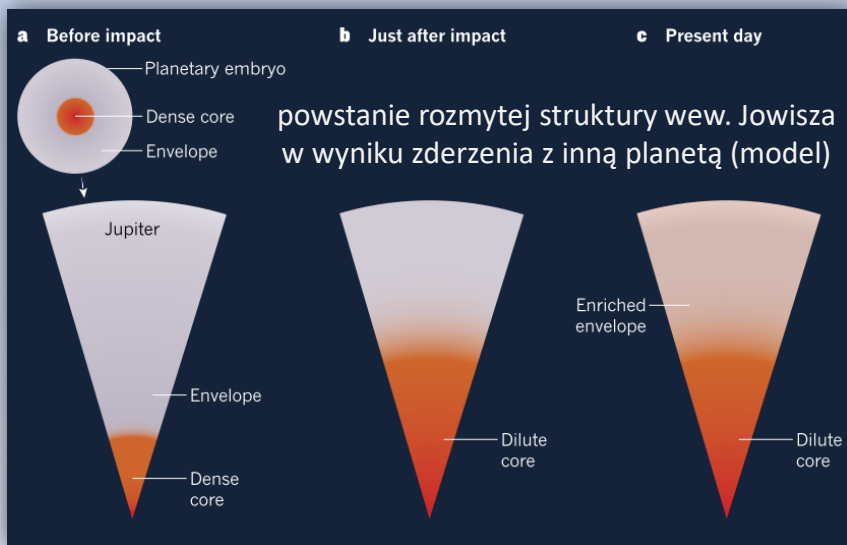
Wnętrza planet

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 skalno-metaliczne (rozmyte?);
- płaszcz lodowy (rozmyte?);
- otoczka wewnętrzna z metalicznego wodoru (źródło pola magnetycznego)
- zewnętrzna otoczka gazowa H_2 , He.



Wnętrza planet

Budowa wewnętrzna planet olbrzymów

Lodowe olbrzymy (Uran i Neptun) w około 80% zbudowane z „lodów” (H_2O , NH_3 , CH_4 , H_2S ; ale występują one głównie w postaci ciekłej). Reszta to materiał skalny i gazowy. Ogólna struktura wygląda następująco:

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

