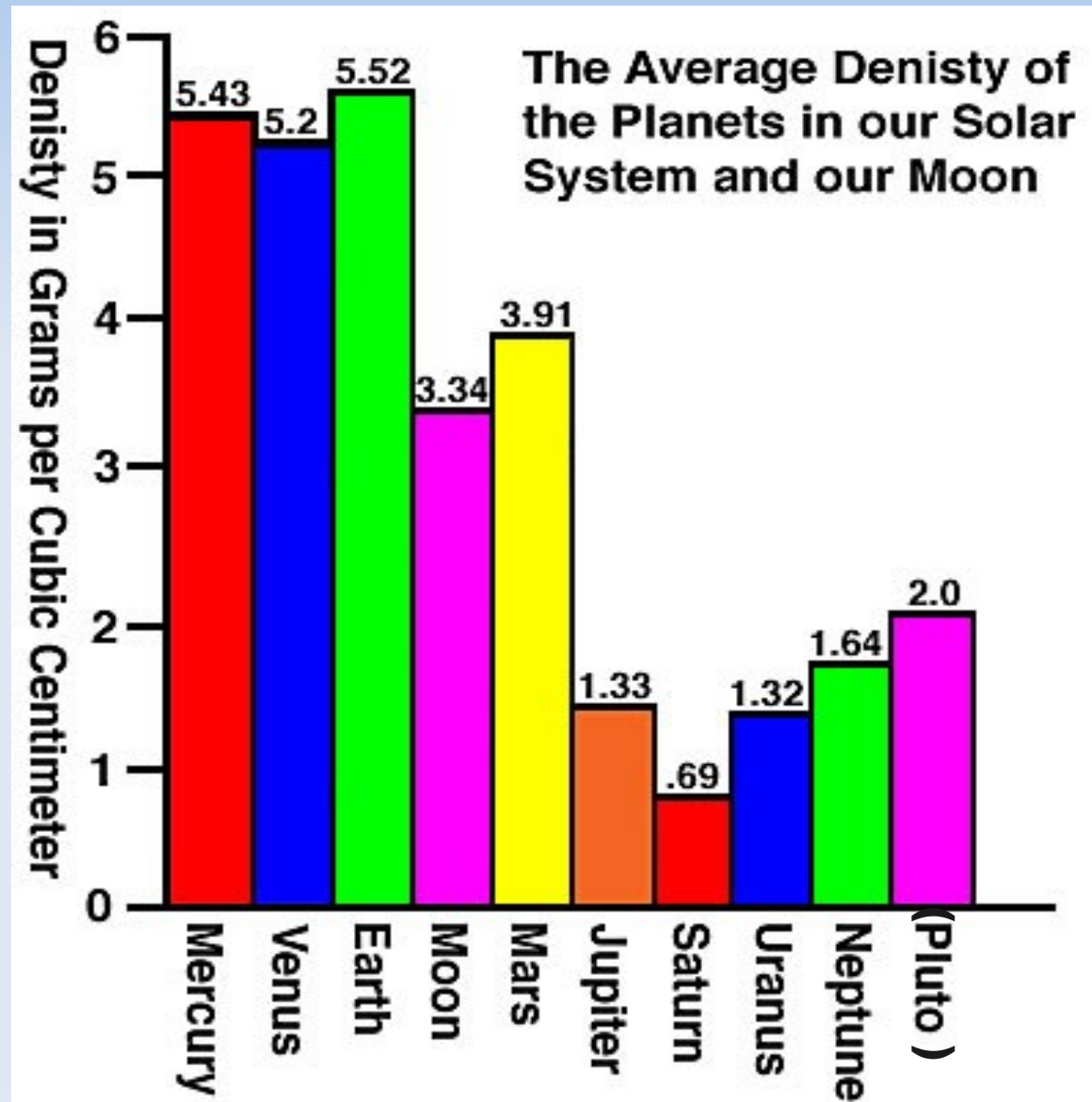


# Notranjost planetov našega Osončja

## Glavna vira:

1. Lewis J.S.: Physics and Chemistry of the Solar System
2. Courtney Seligman: The Structure of the Terrestrial Planets  
(<http://cseligman.com/text/planets/innerstructure.htm>)

# Povprečna gostota teles v Osončju



# Referenčni orbitalni podatki

Name	#	Orbits	Distance (000 km)	O_Period (days)	Incl	Eccen	Discoverer	Date	A.K.A.	Name	Radius (km)	Mass (kg)	Dens	Abo	Vo	Rotate (days)	Dimensions (km)
<a href="#">Sun</a>	-	-	-	-	-	-	-	-	Sol ( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Sun</a>	695000	1.99e30	1.41	?	-26.	24.6	
<a href="#">Mercury</a>	I	Sun	57910	87.97	7.00	0.21	-	-	( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Mercury</a>	2440	3.30e23	5.43	.11	-1.9	58.6	
<a href="#">Venus</a>	II	Sun	108200	224.70	3.39	0.01	-	-	( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Venus</a>	6052	4.87e24	5.24	.65	-4.4	-243	
<a href="#">Earth</a>	III	Sun	149600	365.26	0.00	0.02	-	-	( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Earth</a>	6378	5.97e24	5.52	.30	-	0.99	
<a href="#">Mars</a>	IV	Sun	227940	686.98	1.85	0.09	-	-	( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Mars</a>	3397	6.42e23	3.93	.15	-2.0	1.03	
<a href="#">Jupiter</a>	V	Sun	778330	4332.71	1.31	0.05	-	-	( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Jupiter</a>	71492	1.90e27	1.33	.52	-2.7	0.41	
<a href="#">Saturn</a>	VI	Sun	1429400	10759.50	2.49	0.06	-	-	( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Saturn</a>	60268	5.68e26	0.69	.47	0.7	0.45	
<a href="#">Uranus</a>	VII	Sun	2870990	30685.00	0.77	0.05	<a href="#">Herschel</a>	1781	( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Uranus</a>	25559	8.68e25	1.32	.51	5.5	-0.72	
<a href="#">Neptune</a>	VIII	Sun	4504300	60190.00	1.77	0.01	<a href="#">Adams</a> ( <a href="#">9</a> )	1846	( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Neptune</a>	24766	1.02e26	1.64	.41	7.8	0.67	
<a href="#">Pluto</a>	IX	Sun	5913520	90550	17.15	0.25	<a href="#">Tombaugh</a>	1930	( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Pluto</a>	1150	1.27e22	2.06	.55	13.6	-6.39	( <a href="#">z</a> )
<a href="#">Moon</a>	I	<a href="#">Earth</a>	384	27.32	5.14	0.05	-	-	Luna ( <a href="#">0</a> )	<a href="#">Moon</a>	1738	7.35e22	3.34	.12	-12.7	S	

## Dejanske, skalirane, kotne velikosti

Name	Gravity (g)	Esc vel (km/s)	M.O.V (km/s)	Axial incl	Oblate	Ascend node	Peri-helion	Equilib (K)	Surface (K)	Press (atm)	Atmospheric Composition
<a href="#">Mercury</a>	0.378	4.44	47.87	0		48.35	77.44	449	440	0	--
<a href="#">Venus</a>	0.907	10.36	35.02	177.36		76.72	131.56	328	730	93	CO2, N2
<a href="#">Earth</a>	1.000	11.19	29.79	23.45	.00335	354.90	102.83	279	287	1	N2, O2, Ar
<a href="#">Mars</a>	0.377	5.03	24.13	25.19	.00519	49.60	335.99	226	218	0.007	CO2, N2, Ar
<a href="#">Jupiter</a>	2.364	59.5	13.06	3.13	.06481	100.47	15.63	122	120	( <a href="#">x</a> )	H2, He
<a href="#">Saturn</a>	0.916	35.5	9.66	26.73	.1076	113.71	92.80	90	88		H2, He
<a href="#">Uranus</a>	0.889	21.3	6.80	97.86	.030	74.06	176.29	64	59		H2, He, CH4
<a href="#">Neptune</a>	1.125	23.5	5.44	29.60	.026	131.81	1.95	51	48		H2, He, CH4
<a href="#">Pluto</a>	0.067	1.3	4.74	122.52		110.42	224.59	44	37	1e-5	N2, CH4, CO

### Key:

Gravity Equatorial surface gravity in g's (see also "[Your Weight On Other Worlds](#)")

Esc vel Escape velocity in [kilometers](#) per second

M.O.V. Mean Orbital Velocity in kilometers per second

Axial incl Inclination of the rotation axis in degrees (obliquity)

Oblate Oblateness

Ascend Longitude of the ascending node

Perihelion Longitude of perihelion

Equilib Equilibrium temperature in [Kelvins](#)

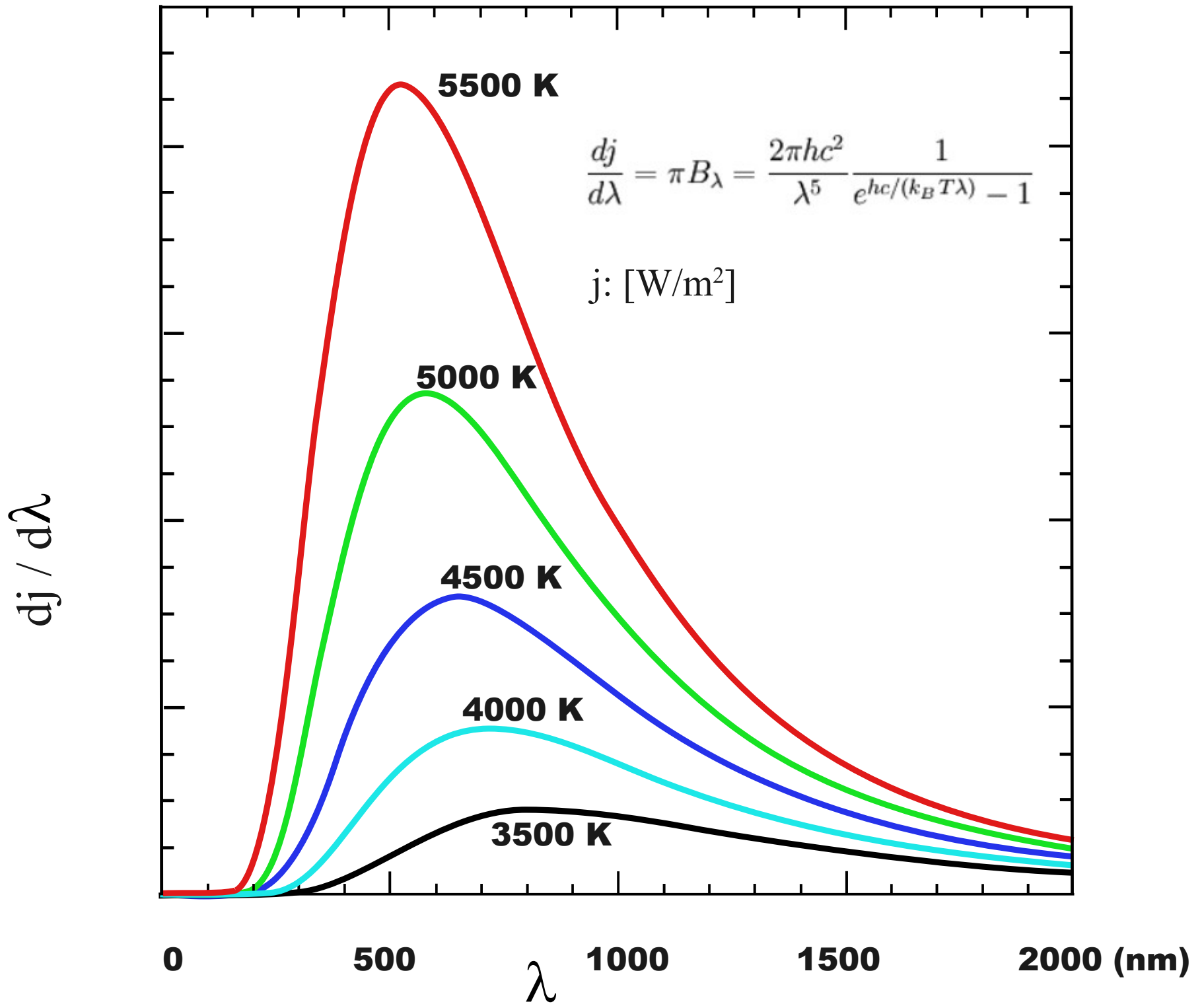
Surface Surface temperature in Kelvins

Press Surface pressure in [atmospheres](#)

### Notes:

(x) for the [jovian](#) planets "surface" refers to the cloud tops or 1 bar level

Much more accurate and detailed data is available from JPL's [Horizons](#) [telnet](#) interface



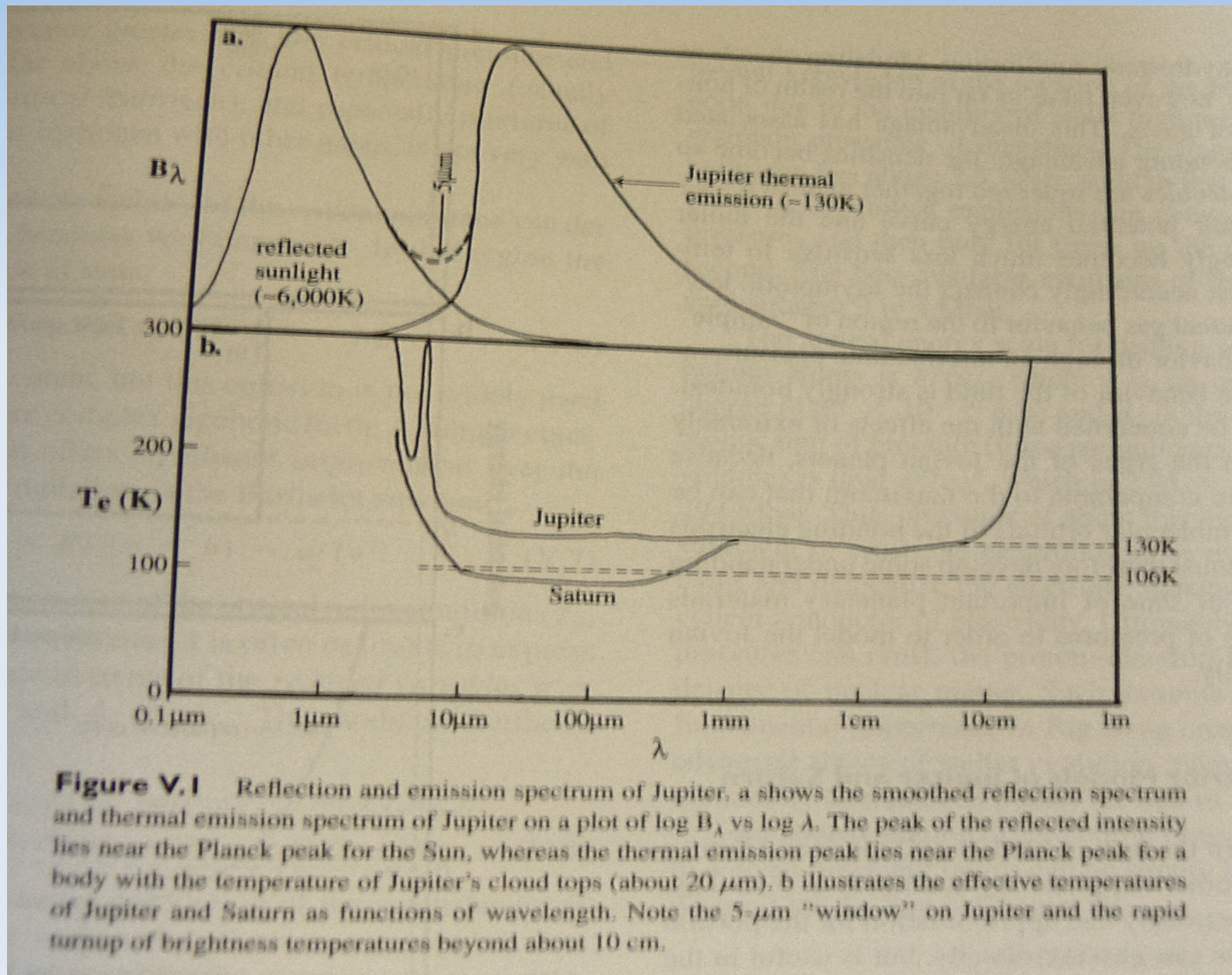
# Notranjost velikih planetov

Ocena površinske temperature z ravnovesjem med absorbirano (predvsem vidno) svetlobo Sonca in emitirano (predvsem daljno infrardečo svetlobo) planeta, da

- za Jupiter z albedom 0.44,  $T_{\text{eff}} = 106 \text{ K}$ ,
- za Saturn z albedom 0.62,  $T_{\text{eff}} = 71 \text{ K}$ .

Dejanske temperature so precej višje:

# Teff Jupitra in Saturna



- Slika V.1 na str. 139, Lewis J.S.: Physics and Chemistry of the Solar System

# Bilanca prejetega in oddanega toka za Jupiter

- Svetlobni tok z Jupitra:  $16 \text{ W/m}^2$ ,  
odbita komponenta pa:  $7 \text{ W/m}^2$ .
- Skupaj ima torej svoj lastni izsev  
 $(9 \text{ W/m}^2) * 4\pi R_J^2 = 5,8 \times 10^{17} \text{ W}$ .
- Pri valovni dolžini okrog  $5 \mu\text{m}$  in pri več cm je  
atmosfera Jupitra še posebej prozorna (nizka  
absorptivnost vodika, metana, amonijaka), zato  
tam vidimo v globlje in očitno še bolj vroče  
plasti.

# Bilanca prejetega in oddanega toka za Saturn

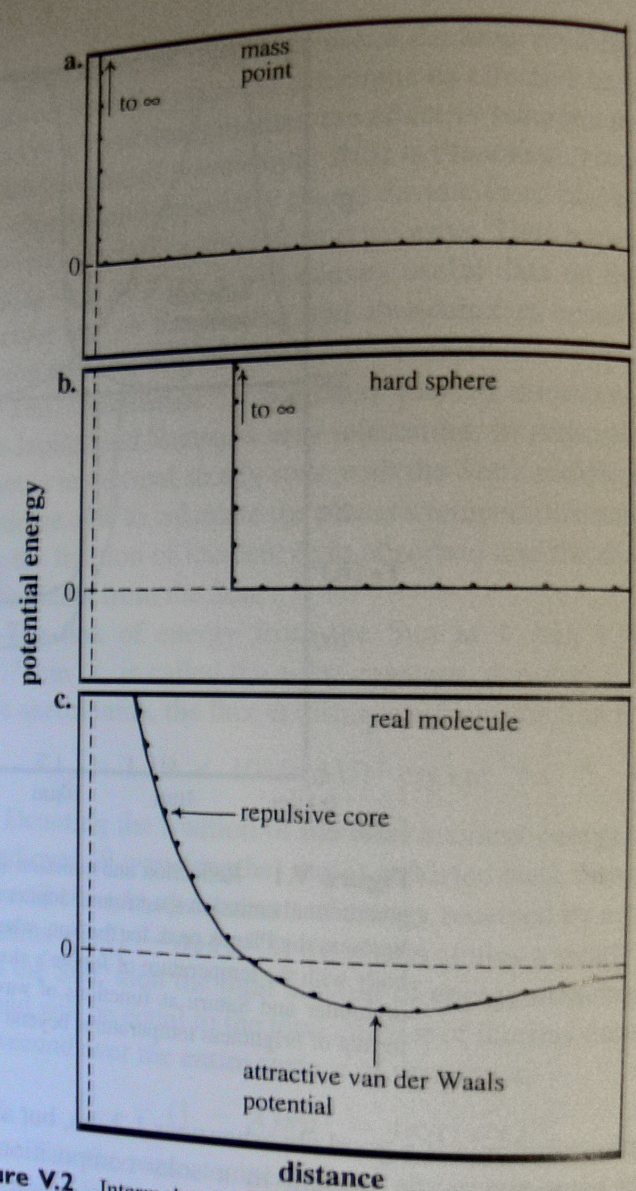
- Svetlobni tok z Saturna:  $4,6 \text{ W/m}^2$ ,  
odbita komponenta pa:  $1,4 \text{ W/m}^2$ .
- Torej podobna zgodba, kot za Jupiter.
- Površinske plasti obeh planetov kažeta tudi dokaj nagle spremembe: površine velikosti zemeljskih celin se lahko spremenijo (npr. barva oblakov) v 1-10 zemeljskih dneh, v nekaj tednih ali mesecih pa barve celotnih pasov. Te spremembe mora seveda nekaj poganjati.



# Gostota snovi

- Povprečna gostota velikih planetov kaže, da idealni plin ni dobra predpostavka.
- V idealnem plinu delci nimajo velikosti.
- Potencial realne molekule (ali atoma) ima odbojno jedro (zaradi kvantnomehanskih prepovedi), na 1-2 Å pa zmeren van der Waalsov privlak (polarizacija bližnjih pozitivnih in negativnih nabojev).

# Potencial med molekulami



**Figure V.2** Intermolecular potentials. a shows the potential vs intermolecular distance  $D$  for a mathematically idealized mass point with an infinite repulsive potential of zero extent, an approximation appropriate only for collisionless gases. b shows the potential for a hard sphere, with an infinite repulsive potential of finite extent, appropriate for modeling the behavior of ideal gases. c is a representative potential for real molecular collisions. The potential is weakly attractive at distances of a few Ångströms (because of the polarizability of the molecules) and passes through a minimum near 1 or 2 Å, thus permitting the formation of stable solids and liquids at low temperatures. The potential becomes strongly repulsive because of electrostatic (Coulomb) repulsion of the nuclei at very small distances and reaches up to MeV energies for interatomic distances that place the nuclei in close proximity to each other.

- Slika V.2, str. 140,

Lewis J.S.: Physics and Chemistry of the Solar System

# Kovinski vodik

Pri velikih gostotah se vodikova jedra razporedijo v pravilno kristalno rešetko, elektrone pa „iztisne“ v prevodni pas in niso lokalizirani na svoje atome.

Temu stanju pravimo kovinski vodik.

Zanj je potrebna visoka gostota, ne pa temperatura.

Tipična mejna gostota za nastanek kovinskega vodika je 3-4 Mbare.

# Ocena gostote v središču

Če zanemarimo velikost delcev in odbojni potencial med njimi, torej če snov obravnavamo kot idealni plin in torej tako dobimo spodnjo oceno za dejanski tlak, lahko ocenimo:

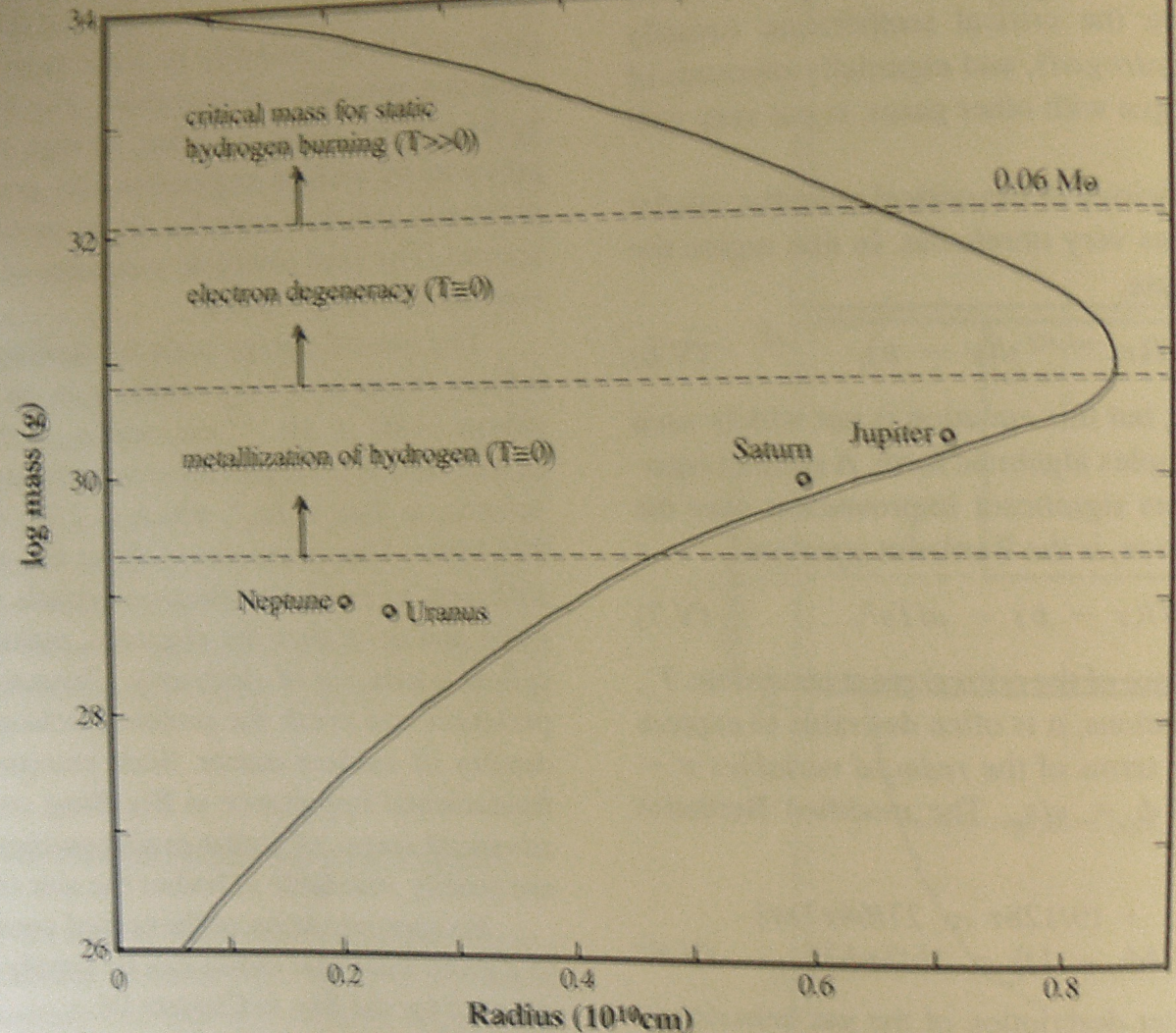
$$P_c = 3 G M^2 / (8 \pi R^4) = 11 \text{ Mbar [za Jupiter]}$$

**Tu smo privzeli  
konstantno  
gostoto**

To je več, kot je meja za nastanek kovinskega vodika.

Tu smo privzeli, da je Jupiter iz vodika. Usedenje težjih elementov v središče bi še znatno povečalo centralni tlak, vendar v samem središču potem ni vodika.

# M(R) diagram za hladno vodikovo kroglo



**Figure V.3** Mass-radius diagram for cold hydrogen. Spherical, nonrotating bodies of pure hydrogen show a monotonic increase of radius with mass up to approximately  $10^{31}$  g and radii of about  $9 \times 10^9$  cm. Beyond that size the central pressures are so high that they overcome the crushing strength of the to form. Bodies at nonzero temperatures would be larger (thermal energy helps resist compression) and off the curve tells us that all of them must have mean atomic weights significantly heavier than pure Uranus and Neptune.

Graf V.3 na str. 142,

Lewis J.S.: Physics and Chemistry  
of the Solar System

Tak hladen vodik za masivna telesa ni realen.

Pri skrčenju vodikove krogle z maso Jupitra ( $\sim 10^{27}$  kg) iz neskončnosti na velikost Jupitra ( $7 \times 10^7$  m), bi se tako telo segrelo na kakih 25000 K.

Vsi štirje veliki planeti so gostejši od krogle hladnega vodika. Zaradi višje temperature bi bili le redkejši, torej so iz gostejše snovi kot vodik. Še zlasti Uran in Neptun. Torej imamo dva para: Jupiter in Saturn ter Uran in Neptun.

# Generiranje toplote v velikih planetih

Toplota, ki jo generirajo veliki planeti, vpliva na njihovo strukturo. Torej jih ne smemo obravnavati kot hladne krogle.

Toploto generirajo radiaktivni razpadi, zlasti  $^{40}\text{K}$  in  $^{235}\text{U}$ .

# Toplota radioaktivnih razpadov

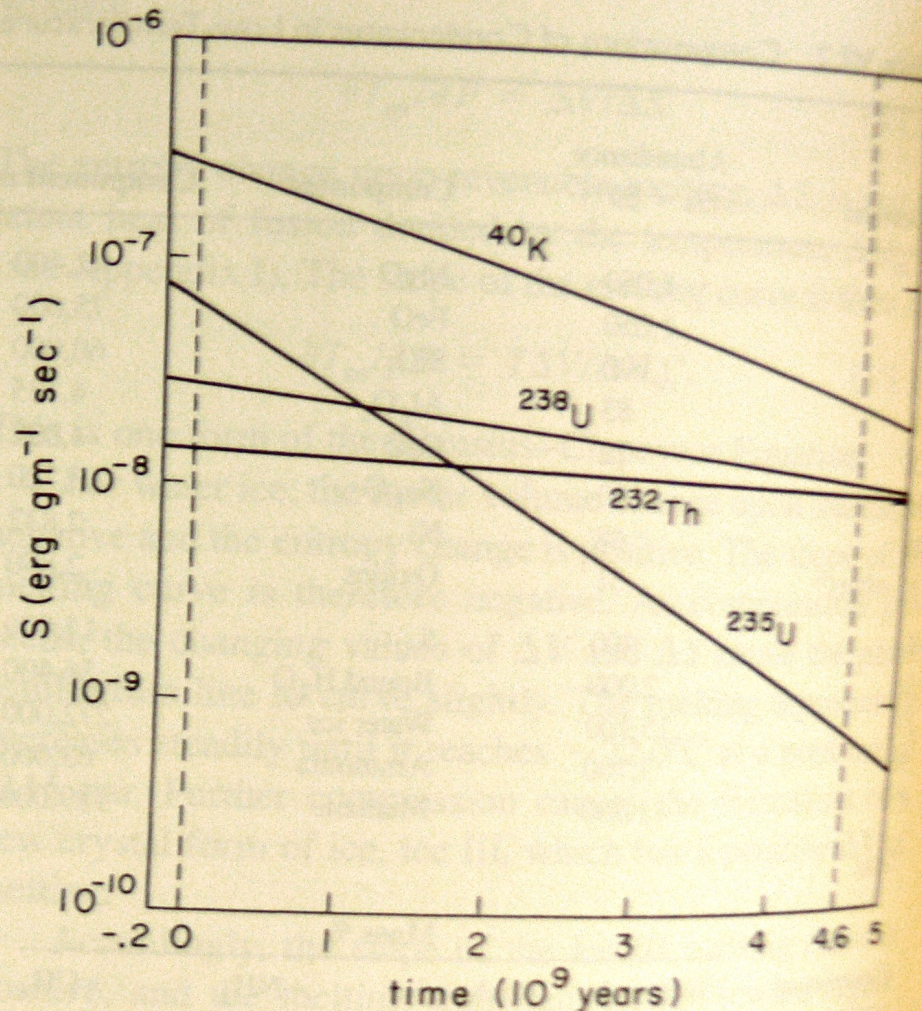
**Table VI.3** Long-Lived Radioactive Heat Sources<sup>a</sup>

Element	Isotope	Abundance (ppm wt)	Half-life (10 <sup>9</sup> years)	Heat production rate (erg g <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
K	<sup>40</sup> K	815	1.47 (to <sup>40</sup> Ca)	2 × 10 <sup>-8</sup>
			11.8 (to <sup>40</sup> Ar)	
Th	<sup>232</sup> Th	0.04	13.9	1 × 10 <sup>-8</sup>
U	<sup>235</sup> U	0.012	0.72	7 × 10 <sup>-10</sup>
	<sup>238</sup> U	0.00009	4.51	1.2 × 10 <sup>-8</sup>
Rb	<sup>87</sup> Rb	2.5	50.	2 × 10 <sup>-9</sup>
			0.7	

<sup>a</sup>Present-day heat production rates per gram of rocky material.

where the subscript 0 indicates the beginning of decay. The time interval over which half the parent radionuclide decays is given by

$$\ln(1/2) = -\lambda_i(t_{1/2}) = -0.693, \quad (\text{VI.20})$$



**Figure VI.12** Time dependence of long-lived radiogenic heat sources in rocky material. Note the early importance of the relatively short-lived isotopes <sup>40</sup>K and <sup>235</sup>U. After Lewis and Prinn (1984).



# Je notranji toplotni tok lahko od radioaktivnih razpadov?

Razpad  $^{40}\text{K}$  in ostalih radioaktivnih elementov generira  $5 \times 10^{-12}$  W/kg skalovitega materiala. Če bi bil Jupiter iz skal (=brez vodika), bi pri masi  $10^{27}$  kg to dalo  $5 \times 10^{15}$  W.

Vendar potrebujemo bistveno več, to je v primeru Jupitra  $5.6 \times 10^{17}$  W. Torej je ta toplotni tok verjetno posledica počasnega sesedanja planeta (str. 217).

Hitrost tega krčenja lahko tudi ocenimo.

# Potrebno krčenje Jupitra

Zahtevanih  $P = 5.6 \times 10^{17}$  W lahko grobo ocenimo kot spremembo gravitacijske potencialne v enoti časa:

$$P \sim -d(-2GM^2/R)/dt = 2GM^2/R^2 (-dR/dt)$$

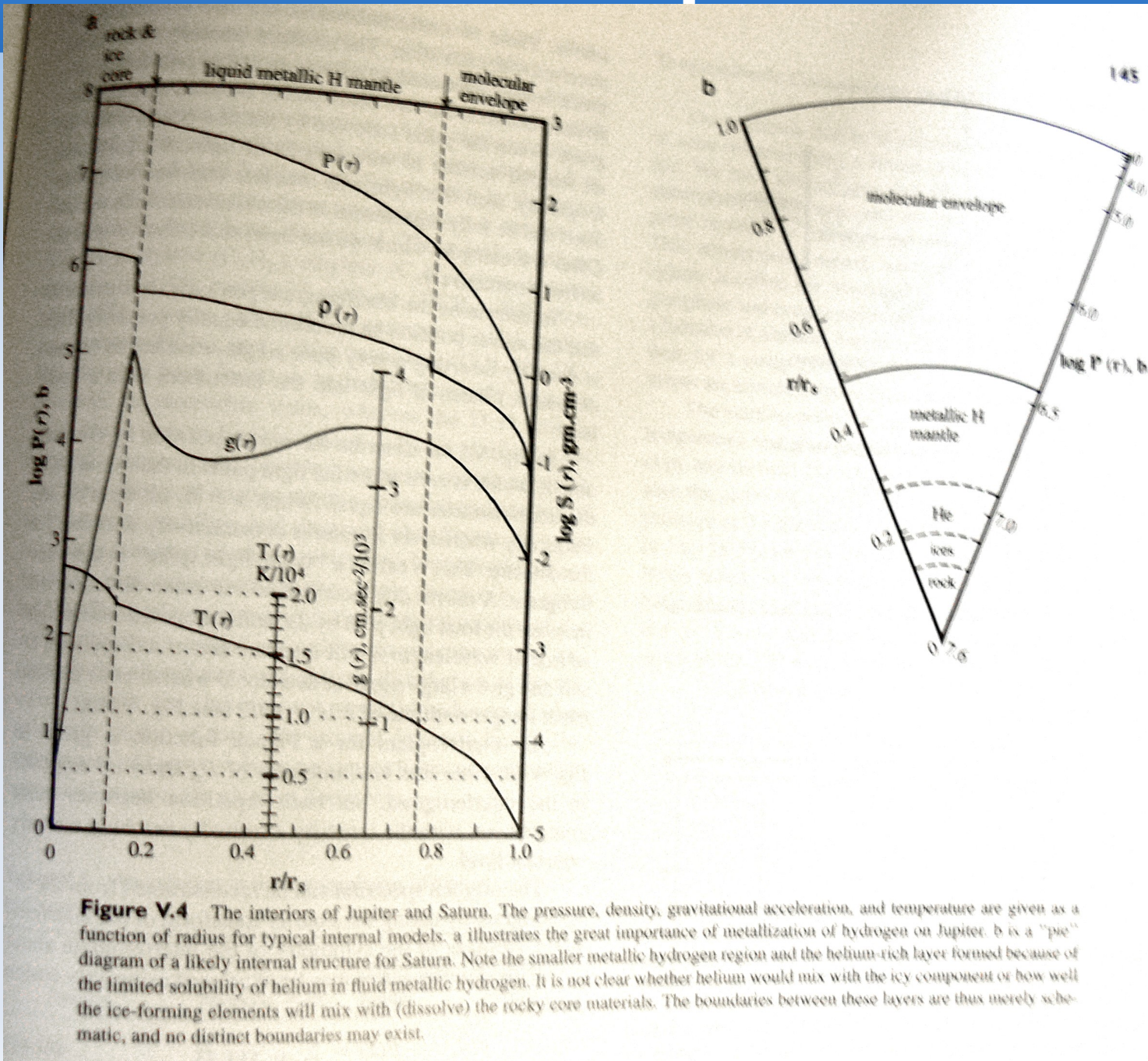
$$(\Delta R/R)/\Delta t \sim -P / (2GM^2/R)$$

$$2GM^2/R = 6.7 \times 10^{36} \text{ J}$$

$$\begin{aligned} (\Delta R/R)/\Delta t &\sim -8.3 \times 10^{-20} \text{ s}^{-1} = 2.6 \times 10^{-12} \text{ leto}^{-1} \\ &= 2.6 \times 10^{-3} / (10^9 \text{ let}) \end{aligned}$$

# Notranja struktura velikih planetov

Konvekcija  
poteka  
takorekoč  
po vsem  
volumnu.

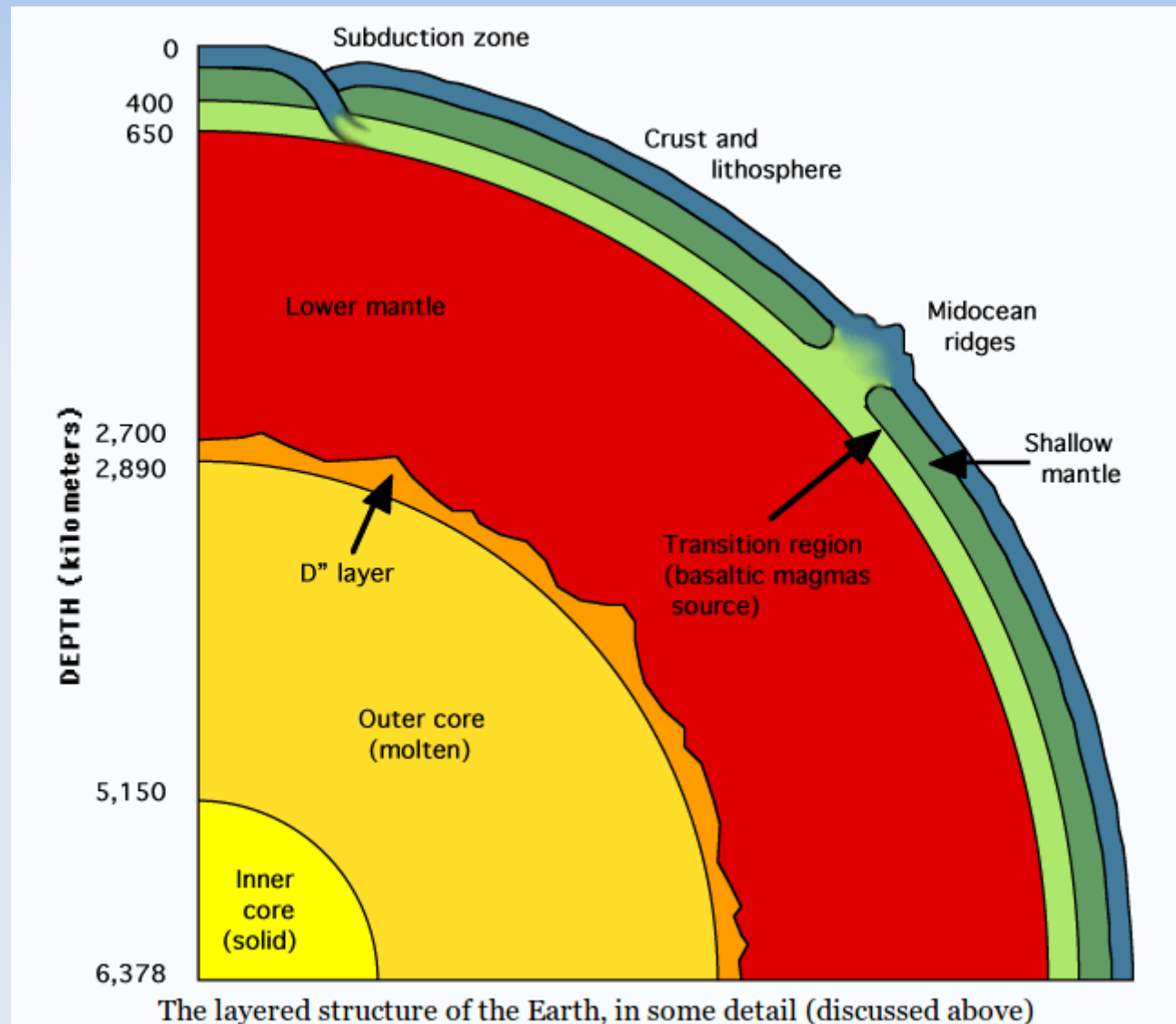


Slika V.4 str. 145,  
Lewis J.S.: Physics and  
Chemistry of the Solar System.

# Notranja struktura Zemlji podobnih planetov

- Na kratko obravnavamo predvsem Zemljo.
- Rezultate potem apliciramo na Venero, Mars in Merkur.

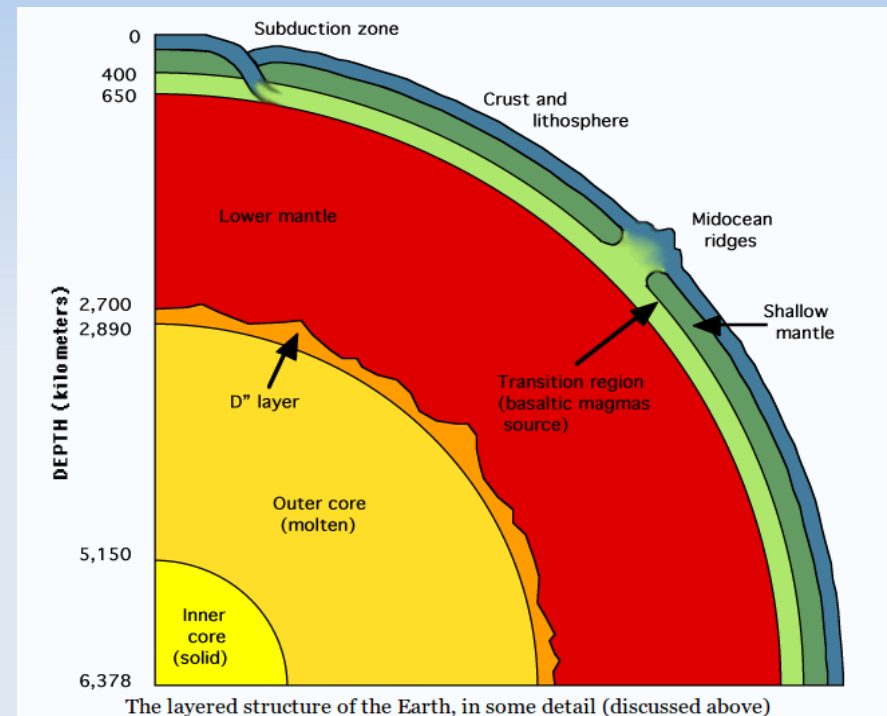
# Notranja struktura Zemlje



# Notranja struktura Zemlje

**To strukturo bomo opisali in obravnavali v nadaljevanju.**

**Že sedaj omenimo, da NI RES, da notranji del sredice postane trden zaradi naraščajočega tlaka. V resnici nam enačba hidrostatičnega ravnovesja pove, da gre odvod tlaka v bližini središča proti nič.**



$$dP / dr = -\rho G M_r / r^2$$

# Notranja struktura Zemlje

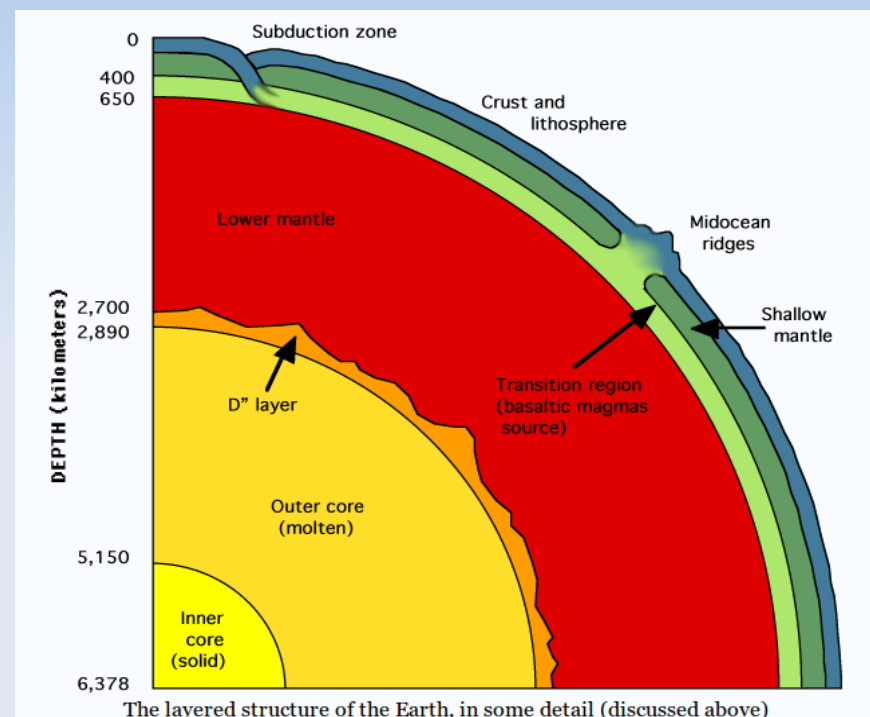
**Vidimo tudi, da so radiji mej posameznih plasti znani na bolje kot 1% natančno.**

**Od kod takšna preciznost?**

**V glavnem seizmologija.**

**Ob potresih opazujemo hitrejših P (kompresijskih) in počasnejših S (strižnih)**

**valov. Prvi pridejo prej, zato primarni valovi, drugi kasneje, zato sekundarni valovi. Slednji se ne morejo širiti skozi tekočino.**



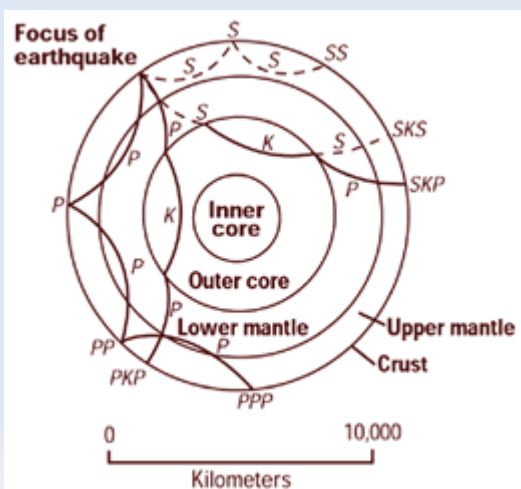
# Hitrost seizmičnih valov

**P valovi so vedno hitrejši od S valov.**

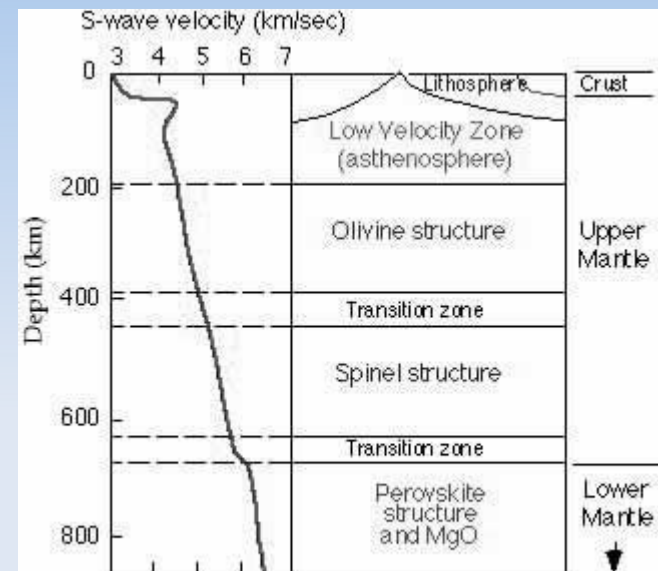
**Hitrost se pod površino naglo poveča, nato je večanje počasnejše.**

**Na meji zunanjega jedra S valovi izginejo, P valovi pa postanejo skoraj 50% počasnejši.**

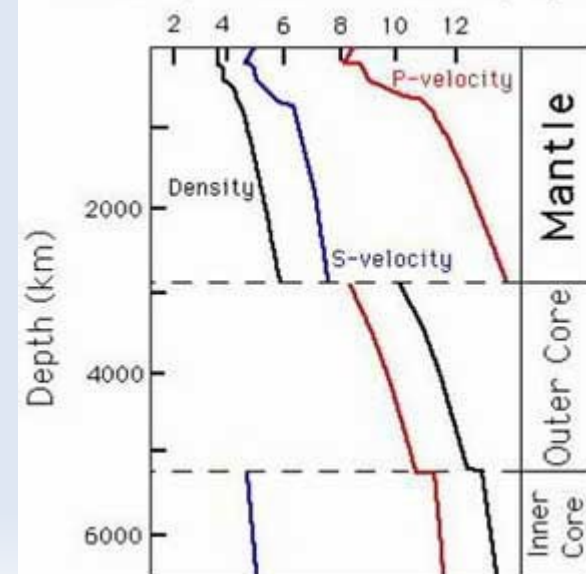
**Kako to vemo? Z merjenjem moči in smeri potresnih valov ob velikih svetovnih potresih.**



**Poti valov so zaradi različne hitrosti krive. Ob nenadnih spremembah hitrosti prihaja do (skoraj) diskretnega loma poti.**



Velocity (km/s) and Density (g/cm<sup>3</sup>)





# Primer poti valov vrste P

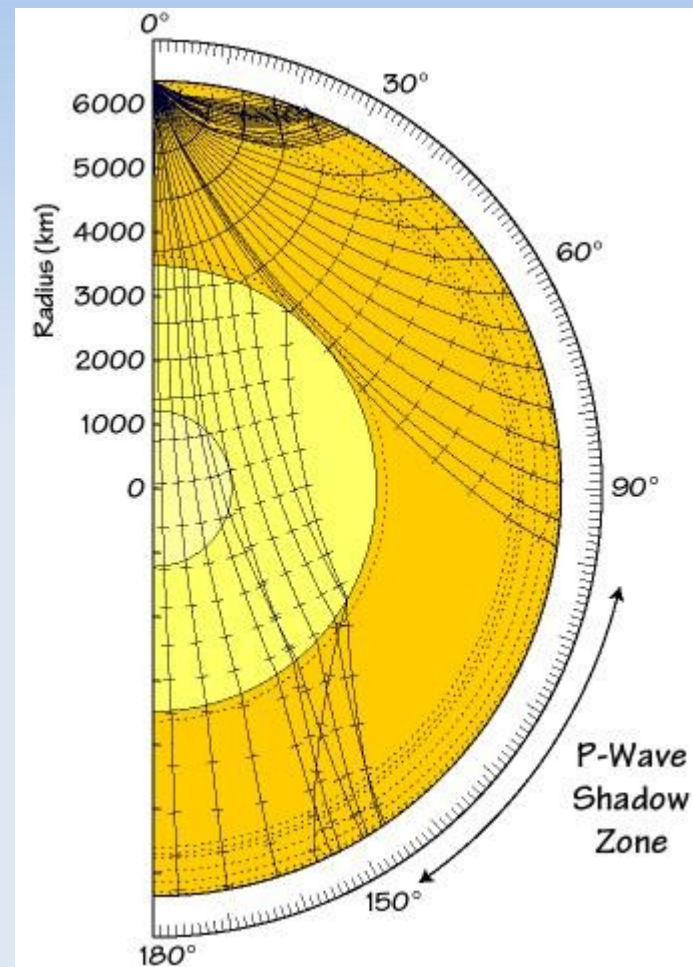
**Valovi izhajajo iz hipocentra potresa (zgoraj).**

**Črtice na njihovih poteh kažejo položaj v enominutnih razmakih.**

**Jedro Zemlje povzroči nastanek senčnega območja.**

**Valovi, ki jih hitro potovanje v jedru odmakne iz sence, se potem zberejo na drugi strani Zemlje in tam prispevajo k močnejšemu tresenju, kot bi bilo prisotno sicer.**

**S valovi nasprotne strani Zemlje ne dosežejo, saj se ne morejo širiti skozi jedro. Na nasprotni strani zaznamo le S valove, ki nastanejo ob prehodu P valov iz jedra nazaj v plašč.**



# Tlak in temperatura v notranjosti Zemlje

**Lastnosti snovi v Zemlji ne določa le visok tlak**

$$P_c \sim G M^2 / (8 \pi R^4) = 5,6 \times 10^{10} \text{ Pa} = 5,6 \text{ Mbar}$$

**ampak tudi zelo visoke temperature, ki dosegajo ~7000 K.**

# Temperatura v notranjosti Zemlje

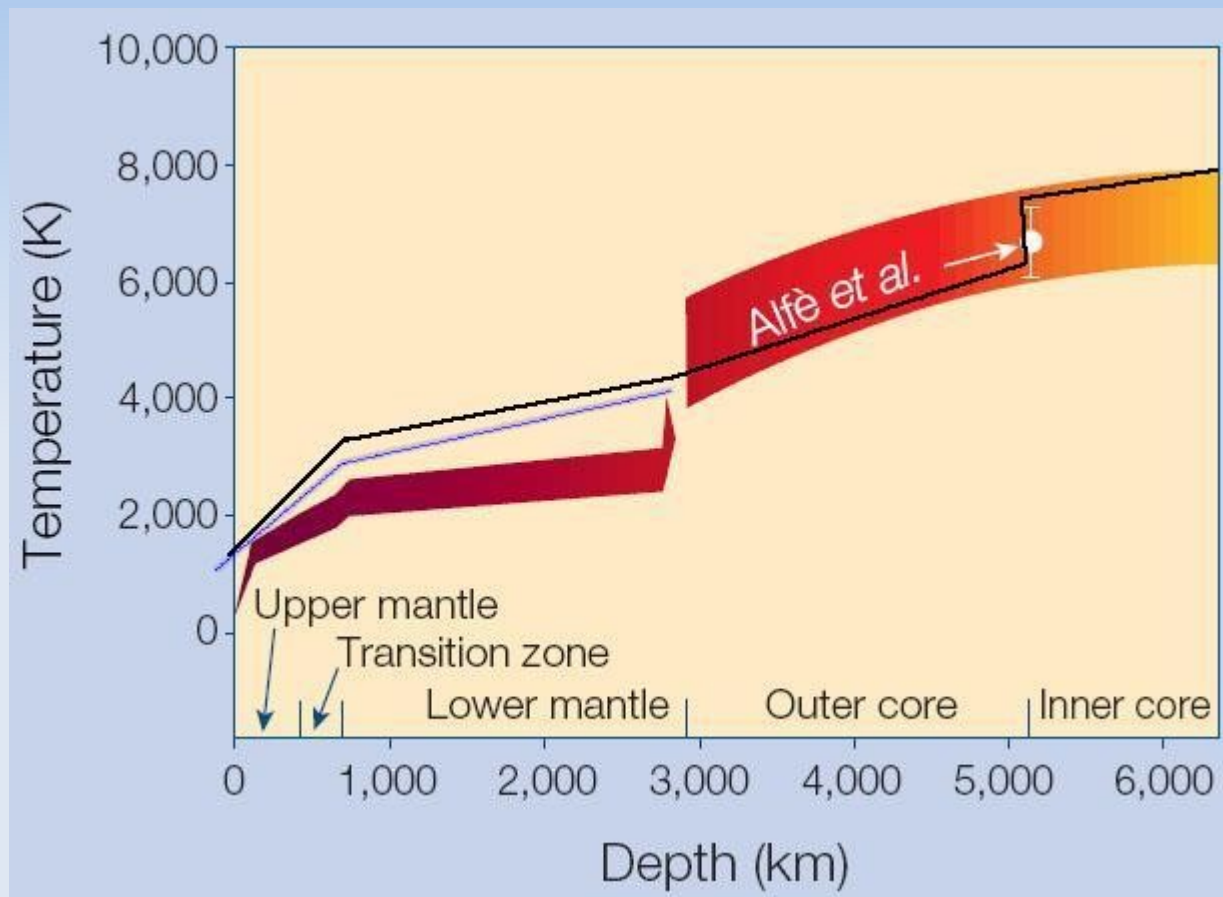
V rdečih tonih je verjetni potek temperature z globino.

Črna črta je temperatura utekočinjenja,

modra črta so temperature vročih stolpov dvigajoče se snovi v plašču.

V zunanjem jedru so temperature dovolj visoke, da je zunanje jedro tekoče (oz. staljeno, tu zato ni S valov). Povsod drugod je snov v trdnem stanju.

Kjer je temperatura mnogo pod pragom taljenja (skorja in spodnji plašč), so skale zares trdne, drugod (notranje jedro, meja med skorjo in plaščem, dvigajoči se stebri snovi v plašču) pa mehke (deformacija) oz. precej plastične.

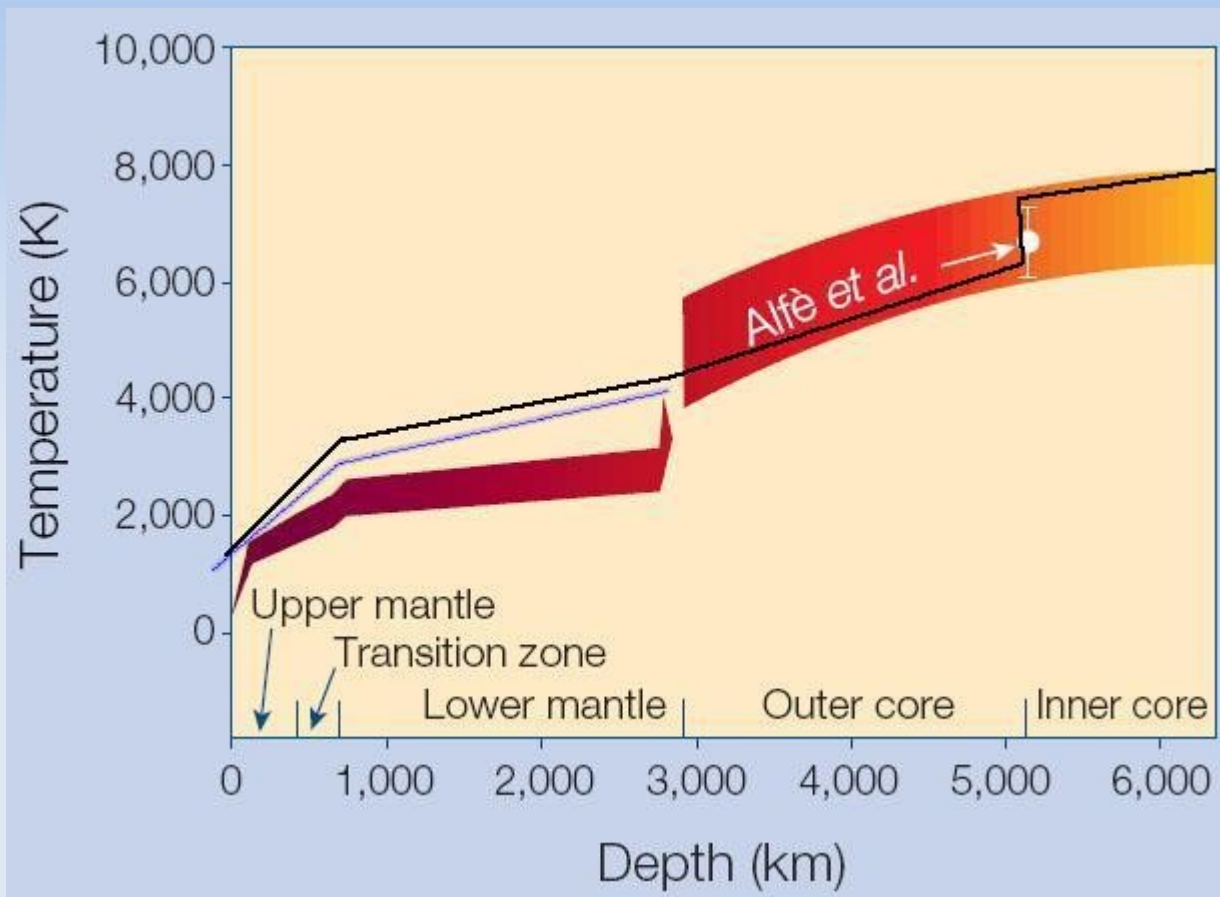


# Temperatura v notranjosti Zemlje

**Temperatura se v skorji hitro viša z globino, tipični gradient je 24 K / km.**

**Če bi se to nadaljevalo v notranjost, bi temperatura hitro preseгла talilne in izparilne temperature vseh snovi.**

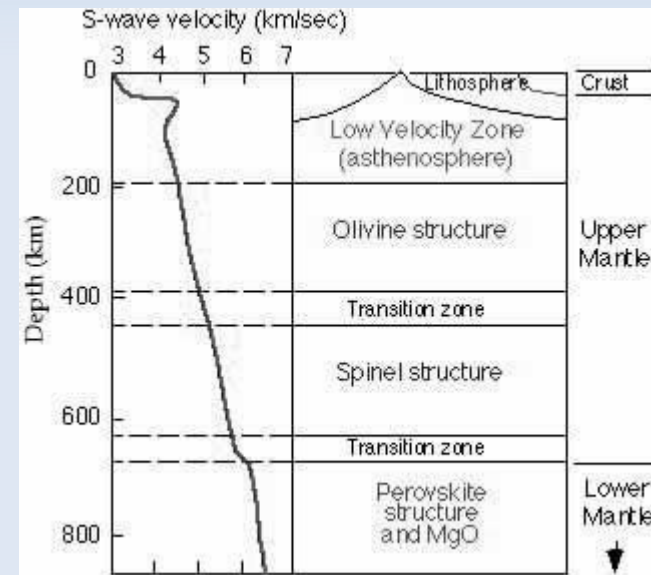
**V plašču gradient pade. Tako smo na vrhu plašča blizu taljenja, na njegovem dnu pa (zaradi tlaka, ki poviša talilno temperaturo) daleč pod pragom taljenja.**



# Meja med skorjo in plaščem in plašč

**Hitrost potresnih valov je odvisna od trdosti snovi. V skorji so vezi v silikatih relativno „dolge“ in mehke, saj je gostota mnogo nižja kot v globljih plasteh. Globlje tlak potisne atome bližje skupaj, kar poviša tudi tališno temperaturo. Ob tem se poviša tudi hitrost potovanja potresnih valov.**

**Na spodnji meji skorje se temperatura približa tališni. Skale postanejo plastične. Čeprav ostajajo v trdnem stanju, lahko počasi „tečejo“, se deformirajo v linearne strukture. Plastičnost povzroči tudi nagel padec hitrosti potresnih valov. Ta padec oz. diskontinuiteta, ki jo imenujemo po hrvaškem fiziku Mohorovičiču, predstavlja mejo med skorjo in plaščem.**



**Litosfera je področje skal, astenosfera pa plastičnosti. Naraščajoči tlak v plašču tudi povzroči nastajanje bolj kompaktnih kemičnih struktur (kot pri grafitu in diamantu, ki sta dve obliki ogljika z zelo različno gostoto). To še povečuje hitrost širjenja valov, ki prodirajo v plašč.**

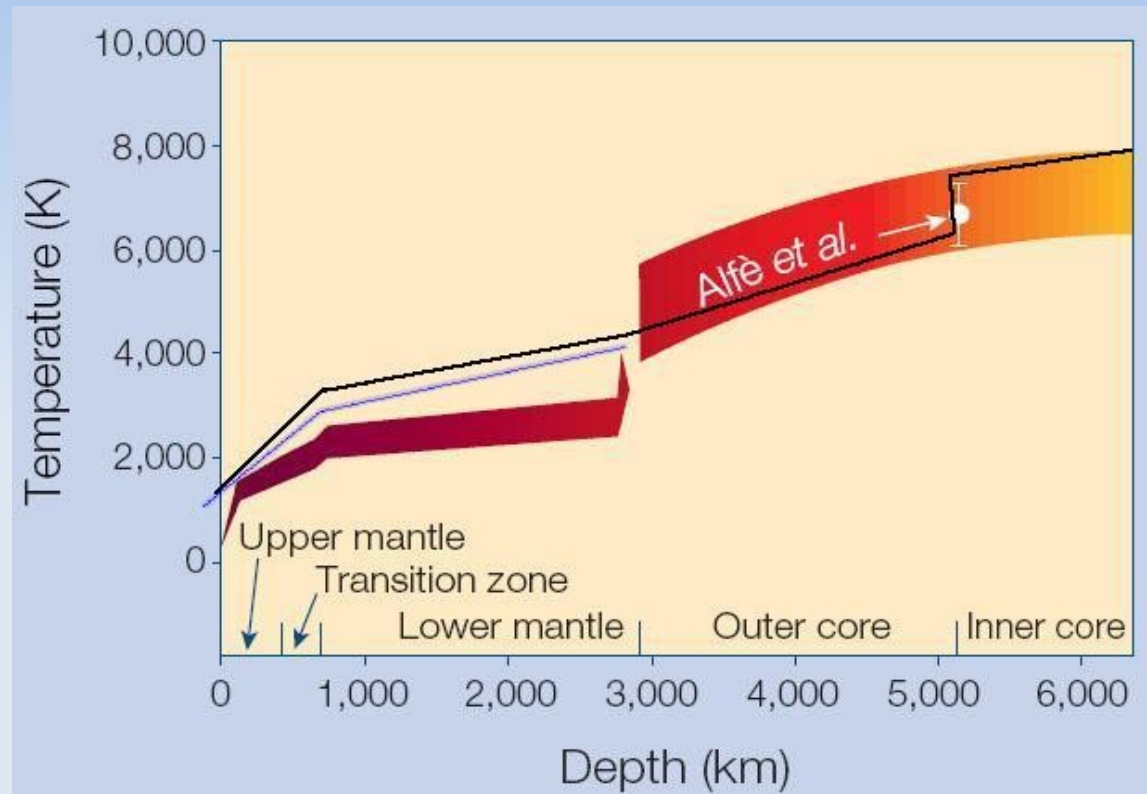
# Dviganje snovi skozi plašč

**Med jedrom in plaščem imamo velik temperaturni skok. Torej toplotni tok, ki iz jedra prihaja v plašč poganja dviganje skoraj staljenih stolpov snovi.**

**Hitrosti dviganja so 1-15 cm na leto.**

**Ko ti stolpi iz jedra dosežejo zunanjo mejo**

**plašča, so dovolj vroči, da se (ker je tu okolica tu blizu meji taljenja) povsem stalijo in prodrejo na površje. To je vir večine lave na Zemlji, sedaj pa recimo delujočih vulkanov na zahodu ZDA. Ta lava ima v sebi zelo malo plinov in vode. Zato je gosta in povzroča eksplozivne erupcije. Tekoča lava z veliko plini in vode izvira v dviganju snovi v plašču, ima mnogo plinov in vode in je tekoča (to je vir večine sedanjih svežih erupcij, primera sta Havaji ali Islandija).**



# Razporeditev radionuklidov

**Večina lahkih radionuklidov, ki so stopili zgodnjo Zemljo, se je hitro porabila, zato se je Zemlja ponovno začela strjevati. Hitreje so se strjevale površinske plasti, ki so lahko tudi sevale toploto v vesolje.**

**Pri strjevanju je pomembno, da uran, ki je pomemben dolgoživ radioaktiven element, nastopa predvsem v obliki oksida, ki pa ima relativno nizko gostoto. Zato je danes večina urana v plašču v njegovih zgornjih 100 ali 200 km, saj so zaradi naraščajočega tlaka bolj spodaj le gostejše strukture. To pomeni, da plašč nima večjega gretja zaradi nuklearnih razpadov in je zato temperaturni gradient (skozi plašč se hladi le jedro, ki pa je daleč spodaj) majhen. Nasprotno radioaktivni razpadi povzročijo naglo rast temperature z globino v Zemljini skorji.**

# Jedro

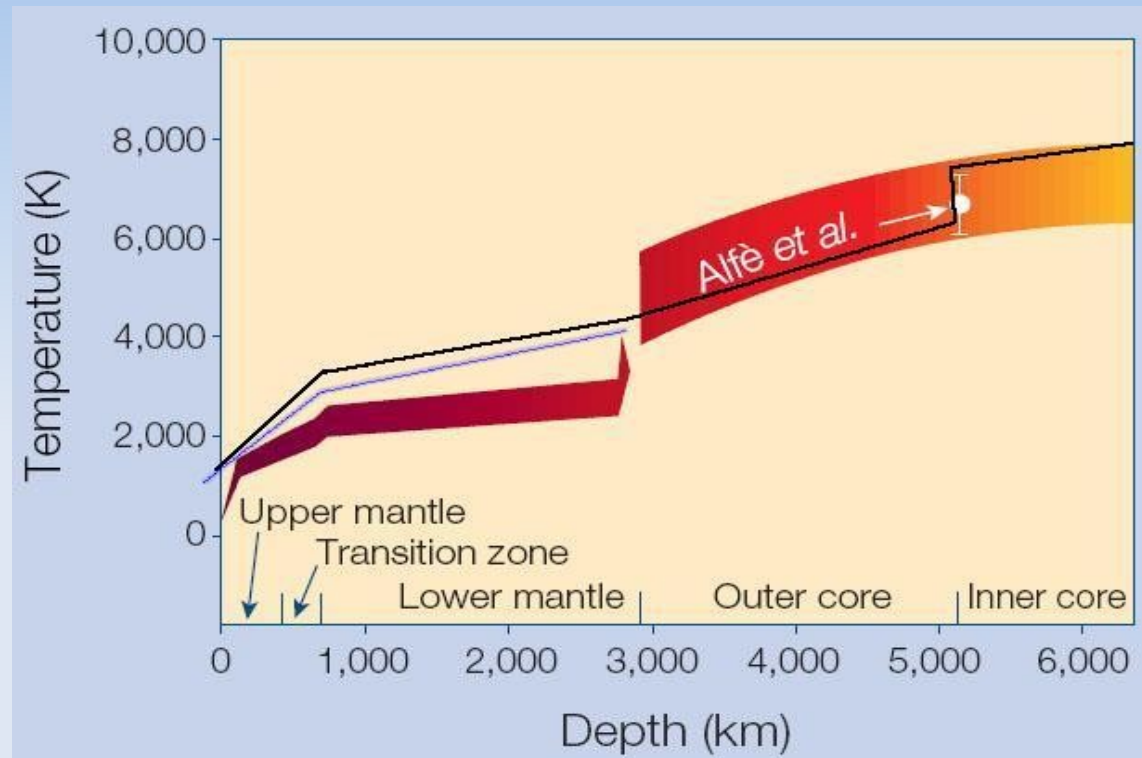
**Verjetno je uran odgovoren za zelo visoke temperature v jedru, vendar tam očitno ne more nastopati v obliki oksida.**

**Mejo med zunanjim in notranjim jedrom markira skok v tališni temperaturi.**

**Notranje jedro je kristalna struktura skoraj čistega**

**železa in niklja, kakršno najdemo v železnih meteoritih. Tamkajšnji Widmanstattsenski vzorci (spremembe v relativni zastopanosti niklja) kažejo na nastanek v razmerah visokega tlaka in temperature. So torej okruški jedra večjega telesa, podobno kot so kamniti meteoriti morda iz bolj površinskih plasti.**

**V zunanjem jedru je več nečistoč (Si, O), ki znižujejo tališče, zato je (dobro premešano) zunanje jedro tekoče.**





# Drugi notranji planeti

**Za noben drug planet nimamo seizmične informacije, torej sklepamo na podlagi skaliranja Zemlje.**

**Venera je zelo podobna Zemlji, čeprav nekoliko manjša.**

**Mars je mnogo manjši, zato ima zelo majhno jedro, ali pa je iz redkejšega materiala Zemlja.**

**Merkurjevo jedro mora biti veliko, na kar kaže obstoj kotanje Caloris, vendar absolutno gledano manjše od Zemlje.**

