

Astrofizyka Układów Planetarnych

2

ENERGIA I JEJ PRZENOSZENIE

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 movement. The lines are of varying thickness and brightness, some appearing as sharp, thin streaks while others are thicker and more diffuse.

Energia i jej transport

temperatura

- jedna z podstawowych wielkości fizycznych i jednocześnie cech ciał układu planetarnego
- wpływa znacząco na wiele zjawisk zachodzących we wnętrzach, na powierzchni i w atmosferach tych ciał

Temperatura jest miarą chaotycznych ruchów cząstek, czyli ich energii kinetycznej. Dla gazu idealnego:

$$E = (3/2) NkT$$

Temperatura ciała lub jego fragmentu zależy od wielu procesów dostarczających lub zabierających energię. Za transport energii odpowiedzialne są:

- przewodnictwo
- promieniowanie
- ruch masy (konwekcja)



Rotacja górnych warstw atmosfery Jowisza (Voyager 1)

Energia i jej transport

równowaga energetyczna

- ciała planetarne zyskują energię (termiczną) absorbując promieniowanie słoneczne*, a tracą ją poprzez wypromieniowanie w przestrzeń
- absorpcja odbywa się tylko przez „dzienną” powierzchnię ciała, a emisja przez całą powierzchnię
- ilość absorbowanej energii zależy od odległości od Słońca, ustawienia powierzchni względem kierunku na Słońce i albedo
- w dłuższej skali czasowej występuje równowaga pomiędzy energią absorbowaną a emitowaną (stała temperatura ciała)
- w krótszych skalach czasowych równowaga może nie być zachowana – zmiany dobowe, roczne

* wyjątki: Jowisz, Saturn, Neptun



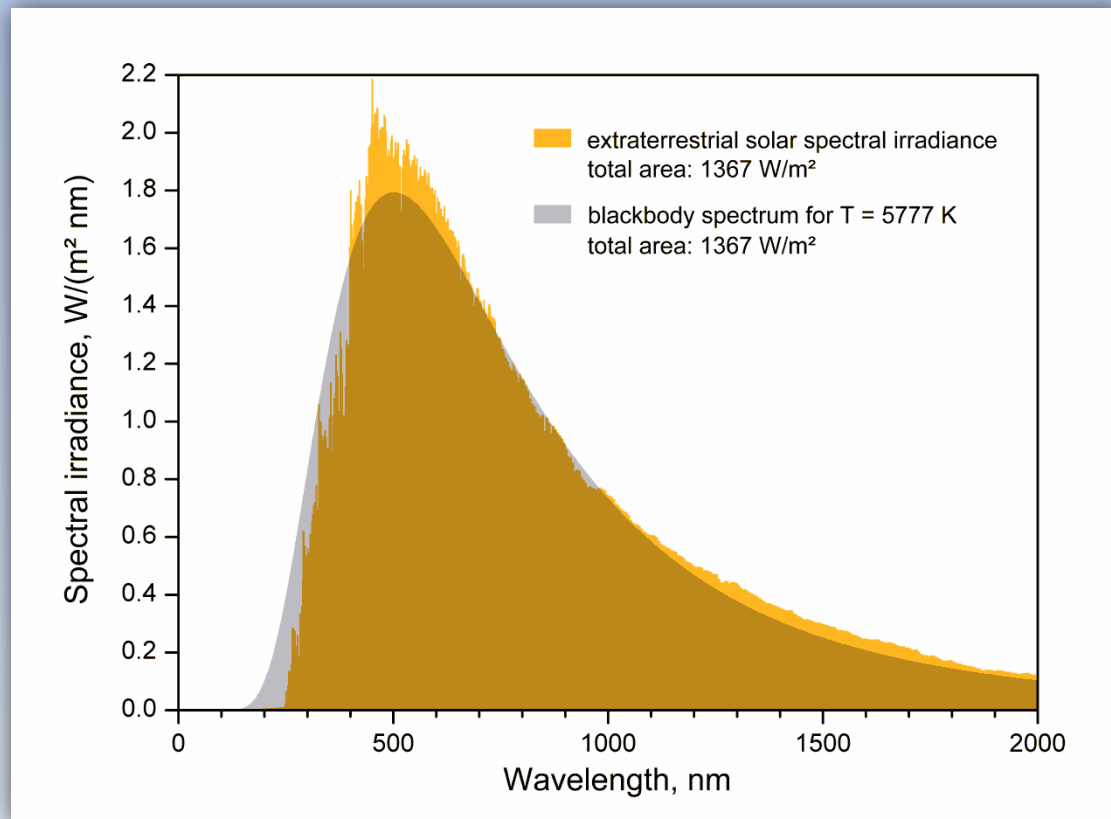
Energia i jej transport

temperatura efektywna

Temperatura efektywna ciała to temperatura jaką miałyby CDC emitujące tę samą ilość energii (ten sam strumień całkowity):

$$T_e = (F / \sigma)^{1/4}$$

(strumień całkowity to strumień emitowany we wszystkich dł. fali; dla CDC całka z rozkładu Plancka po λ)

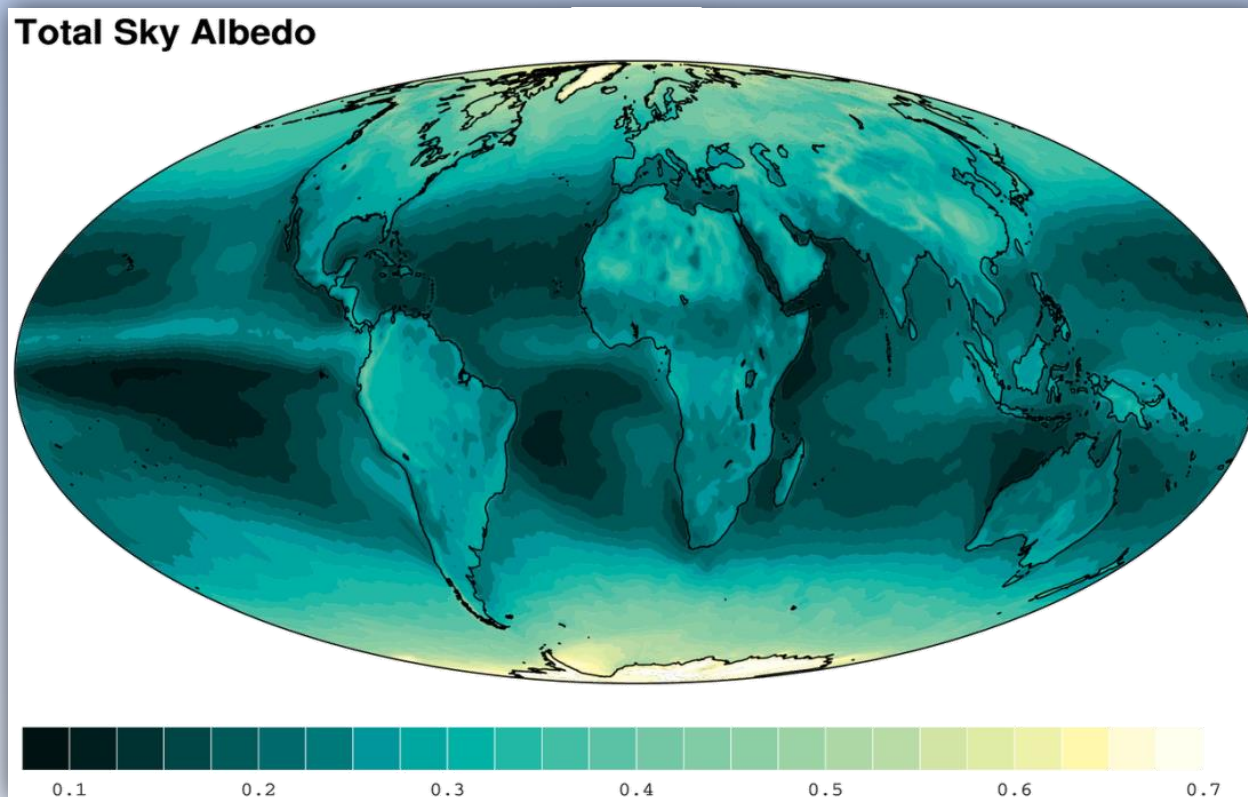


Energia i jej transport

albedo

Albedo określa ile światła (energii) padającego na ciało ulega odbiciu/rozproszeniu.
Wyróżnić można:

- albedo monochromatyczne
- albedo geometryczne
- **albedo całkowite (Bonda)**



albedo Ziemi z uwzględnieniem średniego zachmurzenia

Energia i jej transport

temperatura równowagowa

Przy założeniu, że ilość energii absorbowanej (w jednostce czasu) przez ciało E_{ab} równa się ilości energii emitowanej (w jednostce czasu) E_{em} , możemy wyznaczyć tzw. temperaturę równowagową. Dla sferycznego ciała o promieniu r , odległego od Słońca o d mamy:

$$E_{ab} = (1 - A) \frac{L}{4\pi d^2} \pi r^2$$

$$E_{em} = 4\pi r^2 \varepsilon \beta \sigma T^4$$

A – albedo Bonda, L – moc promieniowania Słońca,

ε – względna zdolność emisyjna,

β – ułamek powierzchni obiektu emitujący energię,

σ – stała Stefana–Boltzmannna.

$$E_{ab} = E_{em}$$

$$T = \left(\frac{(1 - A)L}{16\pi d^2 \varepsilon \beta \sigma} \right)^{1/4}$$

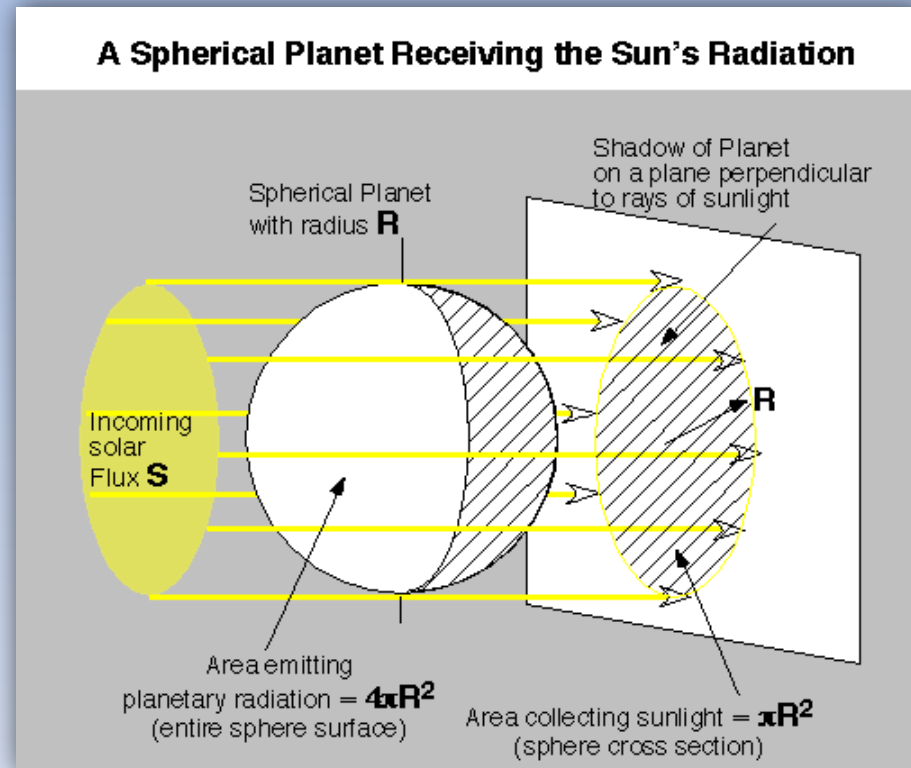
uwaga: równanie nie uwzględnia innych źródeł energii poza promieniowaniem słonecznym

Dla obiektów planetarnych szybko rotujących:

$$\varepsilon \approx 1, \beta = 1$$

Inaczej ujmując, temperatura równowagowa to temperatura efektywna CDC absorbującego tyle samo energii słonecznej, co dany obiekt.

Sytuacja jest bardziej złożona dla ciała wolno rotującego (więcej na ćwiczeniach).



Energia i jej transport

temperatura równowagowa a efektywna

Rozbieżności pomiędzy temperaturą równowagową a efektywną obiektu niosą ważne informacje o nim:

- T_e dla Jowisza, Saturna i Neptuna przewyższa ich temperatury równowagowe, a to oznacza, że te planety posiadają znaczące, wewnętrzne źródło ciepła.
- T_e górnych warstw atmosfery Wenus równa jest T równowagowej, co oznacza, że Wenus nie posiada istotnych, wewnętrznych źródeł ciepła; jednocześnie temperatura powierzchni Wenus znacząco przekracza T równowagową; łącznie te fakty wskazują na silny efekt cieplarniany.



Emisja termiczna Saturna. Obraz uzyskany teleskopem Keck I na fali 17.65 μm .

Energia i jej transport

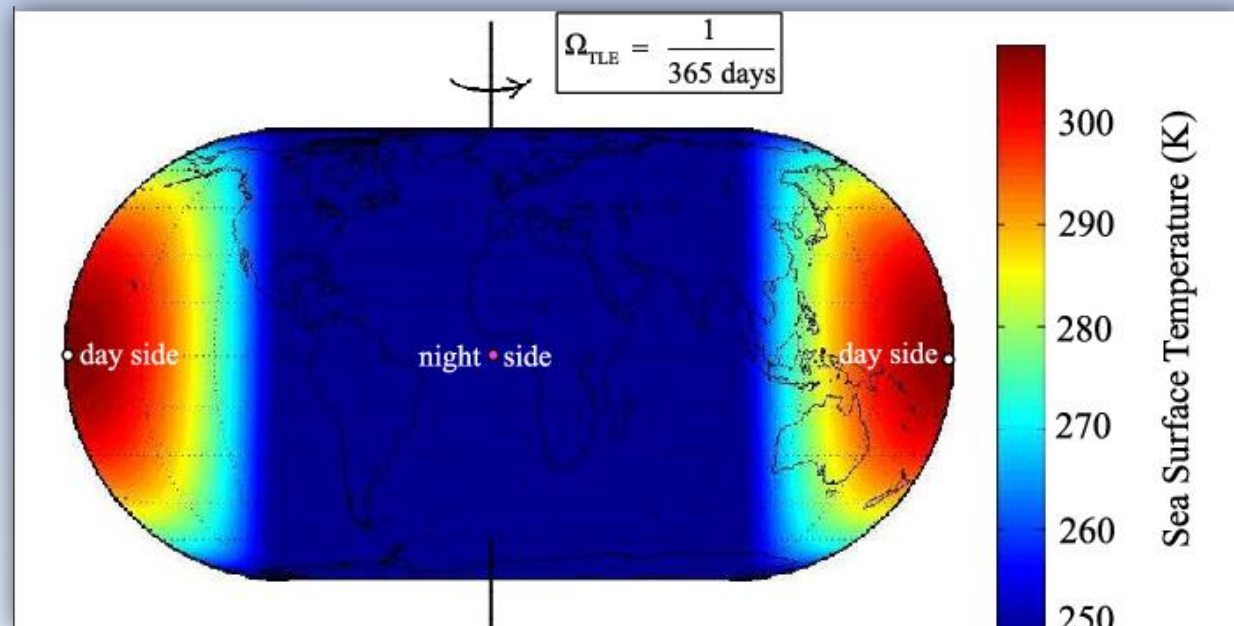
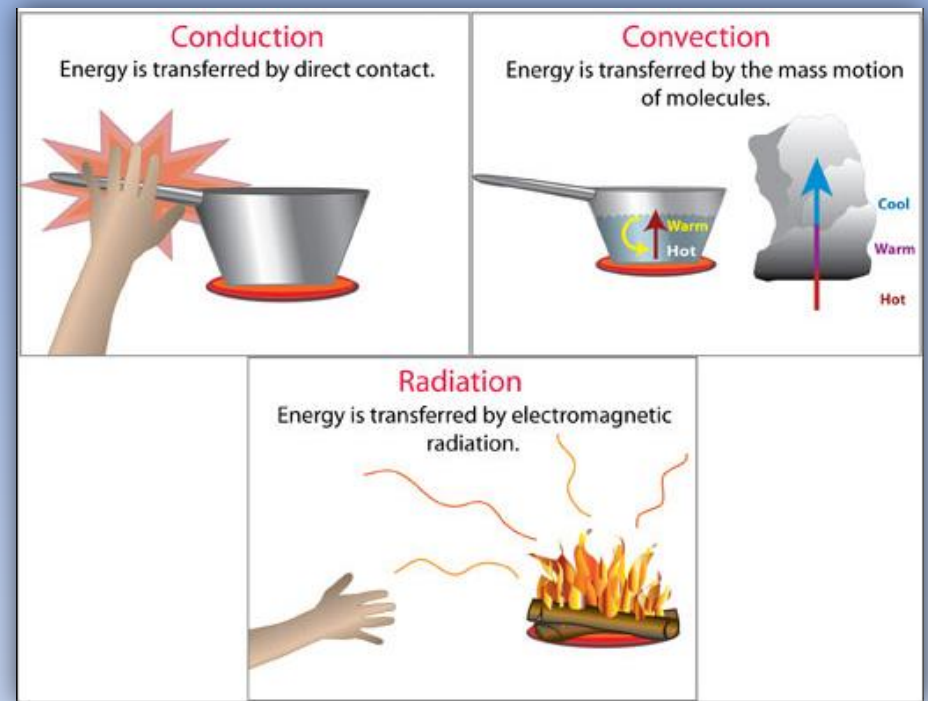
transport energii

Rozkładem temperatury rządzi efektywność transportu energii. Istnieją trzy mechanizmy tego transportu:

- przewodnictwo
- promieniowanie
- przepływ masy

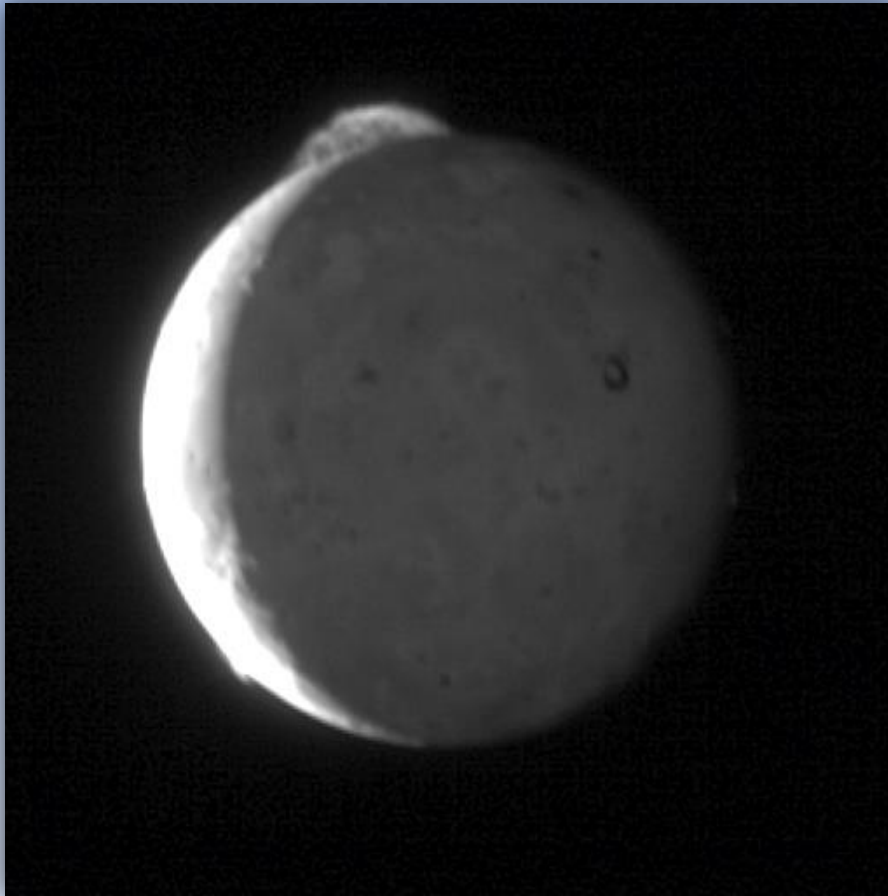
Każdy z procesów przewodzi ciepło z miejsc cieplejszych do chłodniejszych, prowadząc do wyrównywania temperatur.

W układzie planetarnym spotykamy wszystkie trzy mechanizmy. W danym środowisku zwykle dominuje jeden z nich.

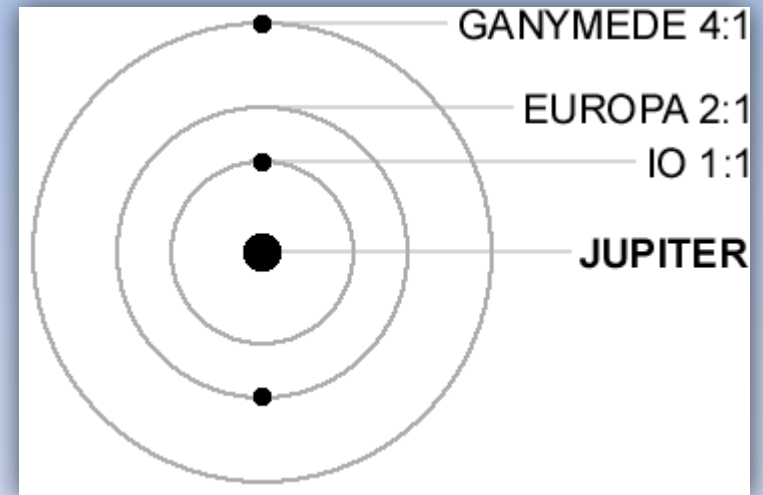


Temperatura powierzchni dla Ziemi rotującej synchronicznie (Proedrou & Hocke, 2016)

Energia i jej transport



Erupcja wulkanu na Io (sonda New Horizons, 2007)



Rezonans orbitalny księżyców odgrywa istotną rolę w grzaniu pływowym Io.

Ciekawym przypadkiem transportu energii jest Io. Energia termiczna wnętrza księżycy jest zwiększana dzięki grawitacji (grzanie pływowe).

Energia i jej transport

przewodnictwo

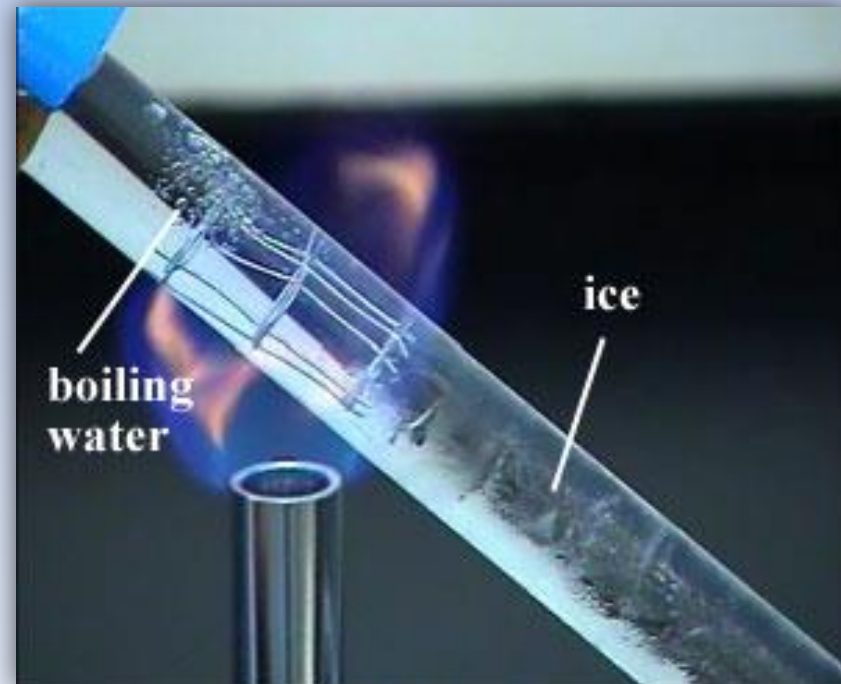
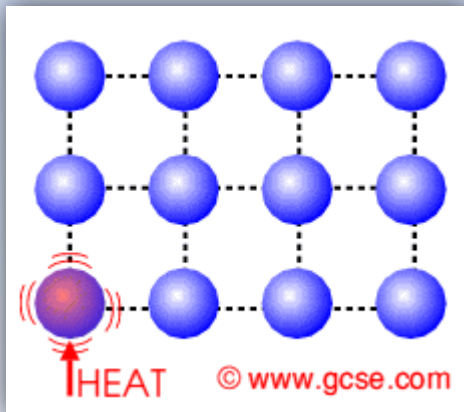
Przewodnictwo polega na przekazywaniu energii poprzez zderzenia zachodzące pomiędzy sąsiednimi cząstkami (ruch, drgania; atomy, jony, elektrony). Dominuje w ciałach stałych i bardzo rzadkich gazach (plazmie).

- tempo przepływu energii, **strumień cieplny** (Q), zależy od gradientu temperatury (∇T) i zdolności ciała do przewodzenia ciepła (**przewodność cieplna** k_T):

$$Q = -k_T \nabla T$$

- pojemność cieplna** (C) – ilość ciepła wymagana do podniesienia T ciała o 1K (dla jednostkowej masy mamy tzw. **ciepło właściwe**, c lub **ciepło właściwe molowe**, c_{mol})

$$C \equiv mc \equiv m_{mol}c_{mol} \equiv \frac{dQ}{dT}$$



Energia i jej transport

przewodnictwo

- **równanie przewodnictwa cieplnego** – opisuje zmiany w czasie rozkładu temperatury $T(x,y,z)$ w zadanym obszarze. Fizyczne znaczenie: *temperatura może pochodzić z jakiś źródeł lub z momentów wcześniejszych, ponieważ ciepło może przybywać, ale nie jest tworzone z niczego.*

$$k_d \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t}$$

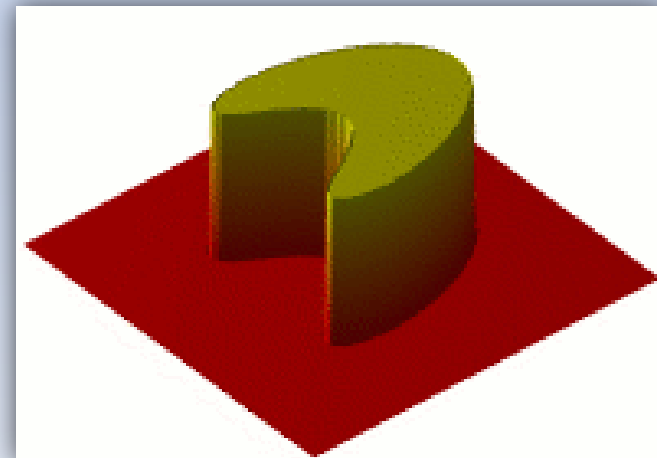
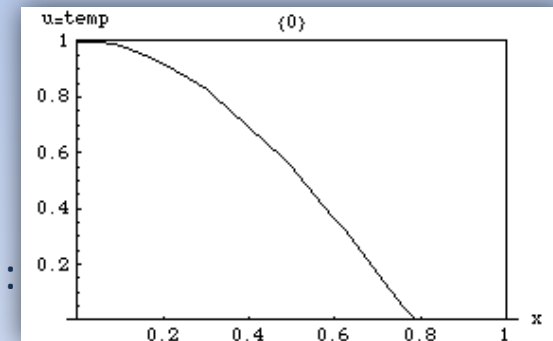
Dla przepływu ciepła do warstw podpowierzchniowych mamy:

$$k_d \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

Współczynnik k_d to tzw. dyfuzyjność termiczna ciała o gęstości ρ :

$$k_d \equiv \frac{k_T}{\rho c_p}$$

Równanie przewodnictwa cieplnego pozwala obliczyć np. dobowe zmiany T na zadanej głębokości po powierzchni ciała.



Energia i jej transport

przewodnictwo

Amplitudę i fazę dobowych zmian temperatury oraz jej gradient z głębokością pod powierzchnią określają:

- **bezwładność cieplna** (γ_T) mierzy zdolność do magazynowania energii:

$$\gamma_T = \sqrt{k_T \rho c_p}$$

- **termiczna grubość warstwy powierzchniowej** (L_T) opisuje głębokość charakterystyczną zaniku amplitudy dobowych zmian temperatury (ω_{rot} – prędkość kątowa obrotu ciała):

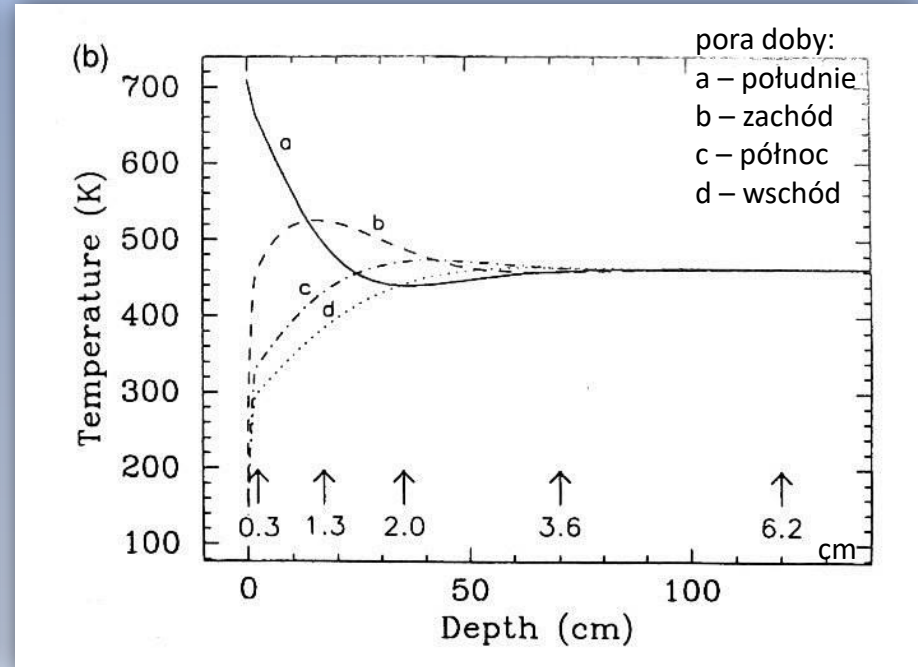
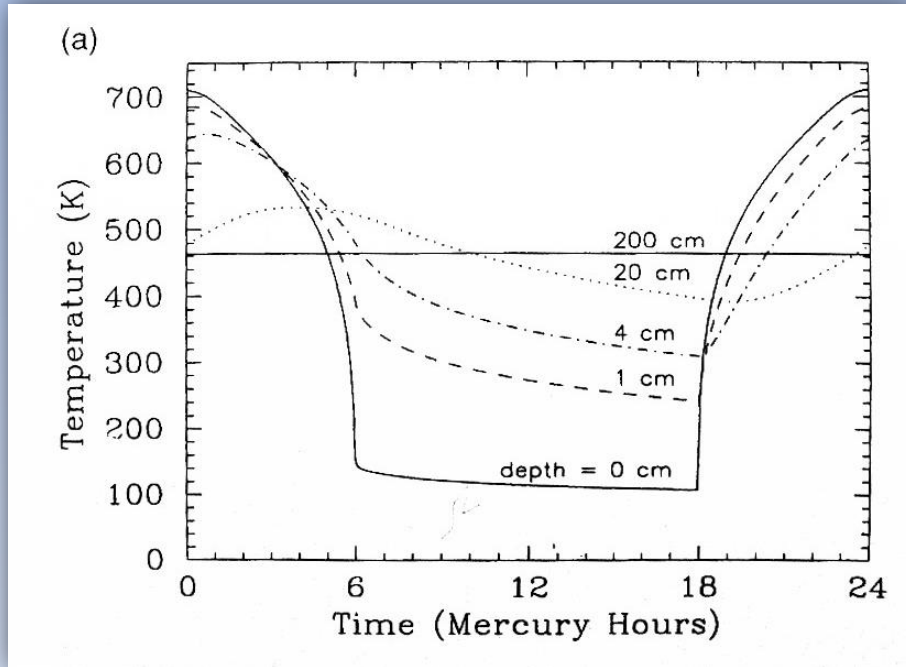
$$L_T \equiv \sqrt{\frac{2k_T}{\omega_{rot} \rho c_p}}$$

Mała przewodność cieplna oznacza dużą amplitudę zmian T, która jedna nie przenika głęboko pod powierzchnię. Duża przewodność cieplna działa na odwrót.

Energia i jej transport

przewodnictwo

Przewodnictwo jest dominującym mechanizmem transportu energii w obiektach lub ich częściach, które są w stanie stałym oraz w górnych, rzadkich częściach atmosfer.



Zmiany temperatury w warstwach powierzchniowych Merkurego (z obserwacji zdalnych).

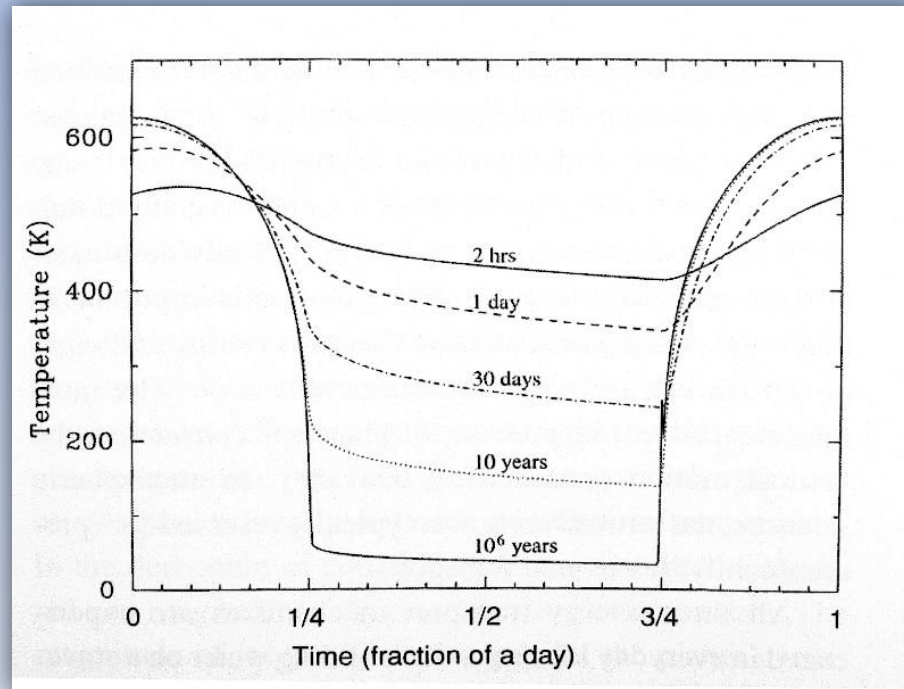
Wykresy te są dla długości planetograficznych 0 i 180 st. (ustawionych do Słońca w peryhelium).

Na głębokości poniżej zasięgu wahań dobowych, T utrzymuje się na stałym poziomie ok. 470 K (długości 0 i 180 st.) i ok. 350 K (długości 90 i 270 st., ustawione do Słońca w aphelium).

Energia i jej transport

przewodnictwo

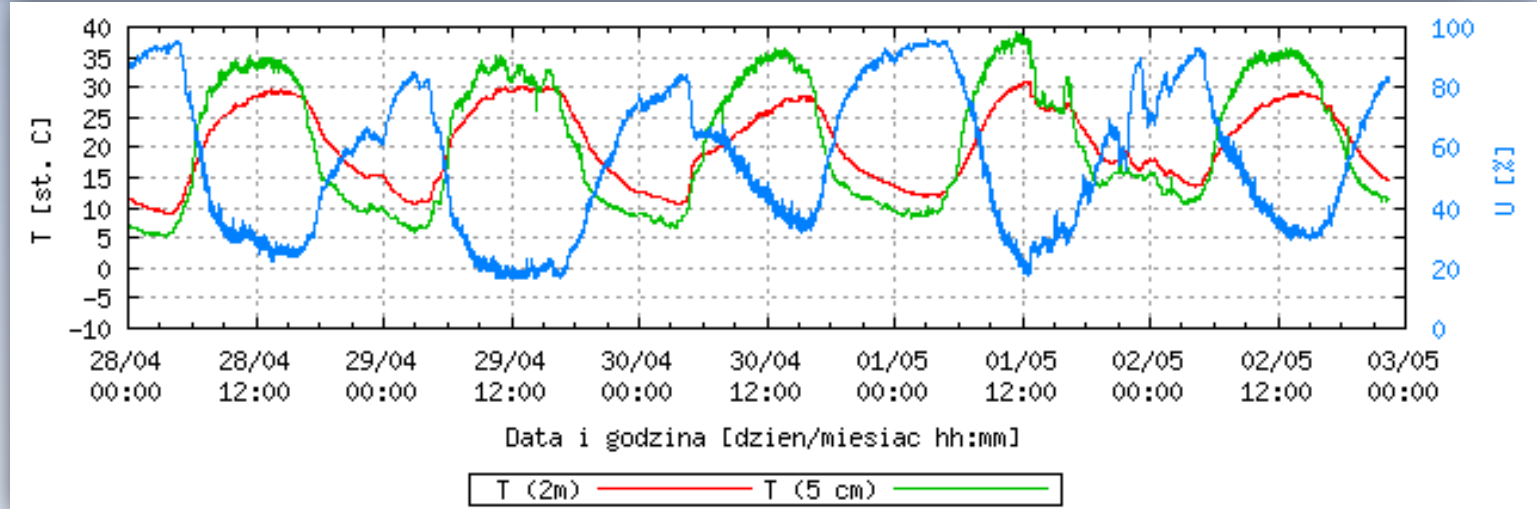
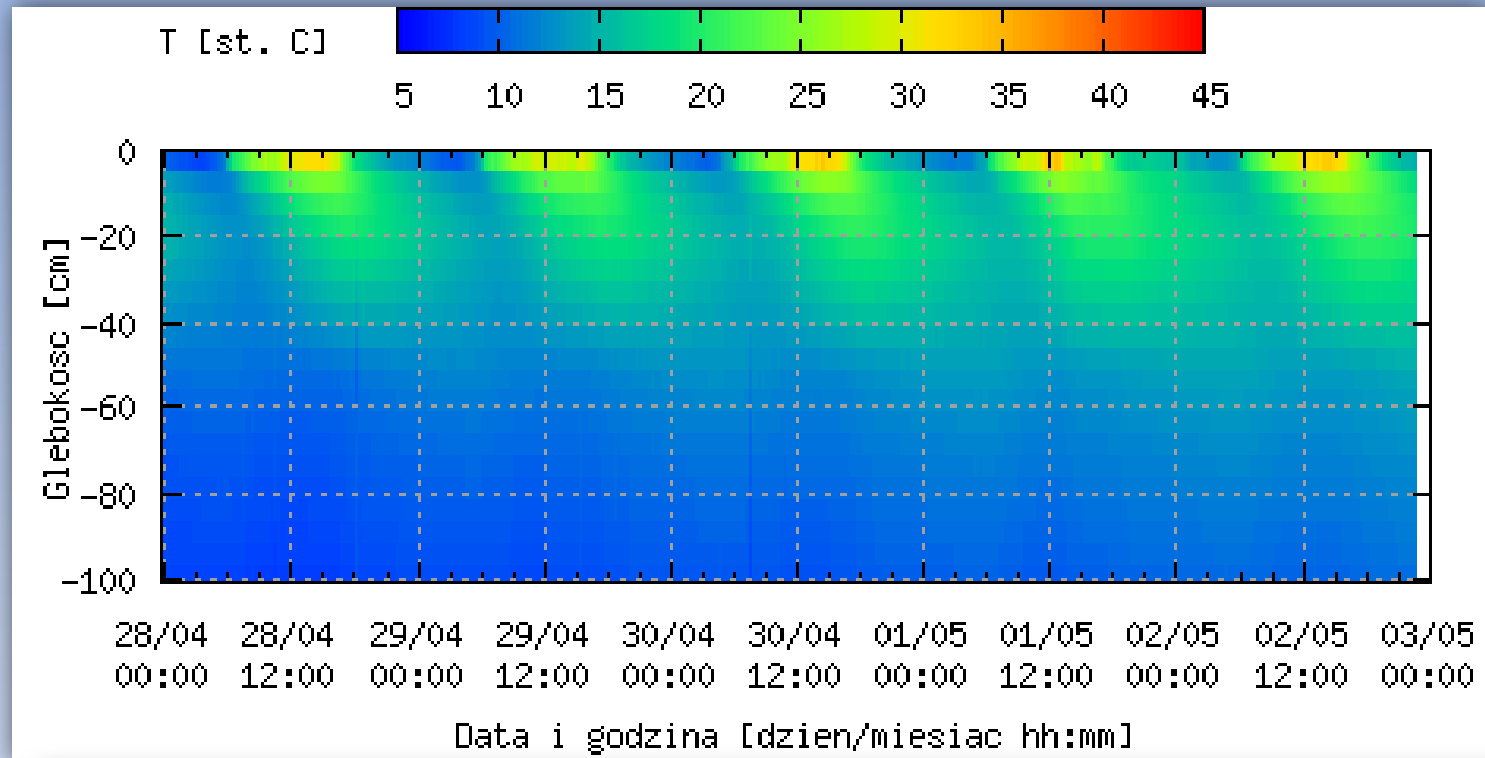
Przewodnictwo jest dominującym mechanizmem transportu energii w obiektach lub ich częściach, które są w stanie stałym oraz w górnych, rzadkich częściach atmosfer.



Zmiany temperatury na powierzchni obiektu podobnego do Merkurego, ale mającego różne okresy rotacji (6 modeli dla okresów od 2 godz. do 1 mln lat). Orbita kołowa o promieniu 0.4 AU, albedo 0.1, względna zdolność emisyjna 0.9.

Energia i jej transport

Transport ciepła w głąb gruntu na Ziemi
(pomiary w obserwatorium meteo na Kosiby)



Energia i jej transport

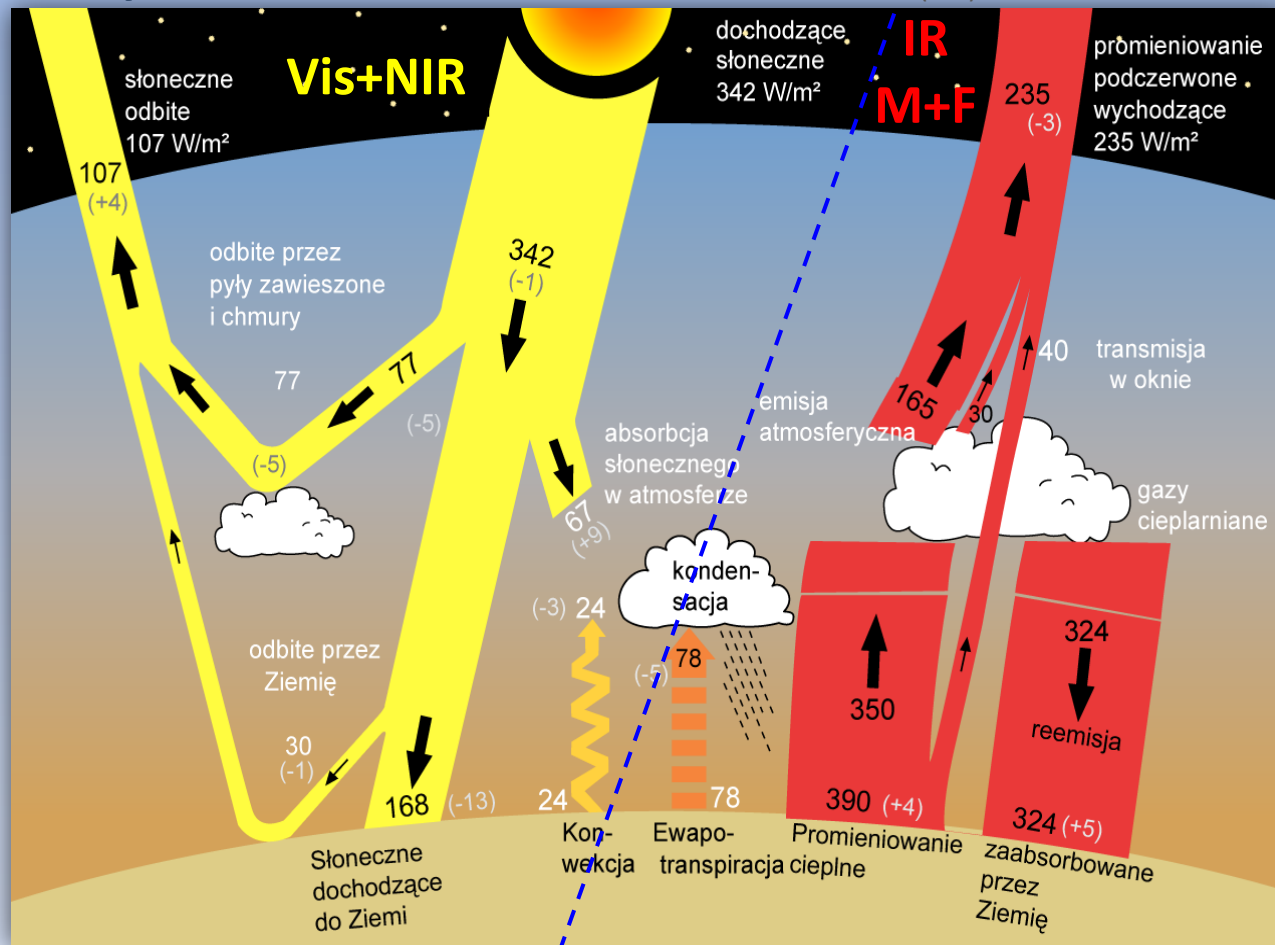
efekt cieplarniany

widzialne (VIS): 380 – 780 nm

bliska IR (NIR): 780 – 2500 nm

średnia IR (MIR): 2500 – 25 000 nm

daleka IR (FIR): 25 000 – 500 000 nm



Temperatura obiektu zależy od równowagi pomiędzy ilością **promieniowania dochodzącego do powierzchni (Vis+NIR)** i **promieniowania uciekającego w przestrzeń (M+F IR)**. Temperatura może być zmieniona przez:

- **zasoby własne:** ciepło płynące z wnętrza planety
- **albedo:** chmury, rodzaj powierzchni
- **efekt cieplarniany (dodatni/ujemny):** skład atmosfery, chmury

Energia i jej transport

efekt cieplarniany

- Jeśli planetę otacza atmosfera przynajmniej częściowo **nieprzezroczysta dla podczerwieni** i **przezroczysta dla światła widzialnego** (słonecznego) to zaczyna działać **efekt cieplarniany**. Skutek: wyższa temperatura powierzchni planety w porównaniu do temp. równowagowej (przy braku atmosfery.)
- Przykładowe gazy blokujące poczerwień (**gazy cieplarniane**): H_2O , CO_2 , CH_4 .
- Podobne zjawisko zachodzi dla materii lodowej – światło słoneczne może wnikać na kilka cm w głąb warstwy lodowej, która jest jednocześnie znacząco nieprzezroczysta dla podczerwieni. To zjawisko nazywane jest **efektem cieplarnianym dla ciał stałych**.



Mars – gejzery wywołane efektem cieplarnianym dla ciał stałych (wizja art. i zdjęcie z orbitera)

Energia i jej transport

efekt cieplarniany

Efekt cieplarniany:

atmosfera **przepuszcza większość Vis**, ale **blokuje częściowo IR**

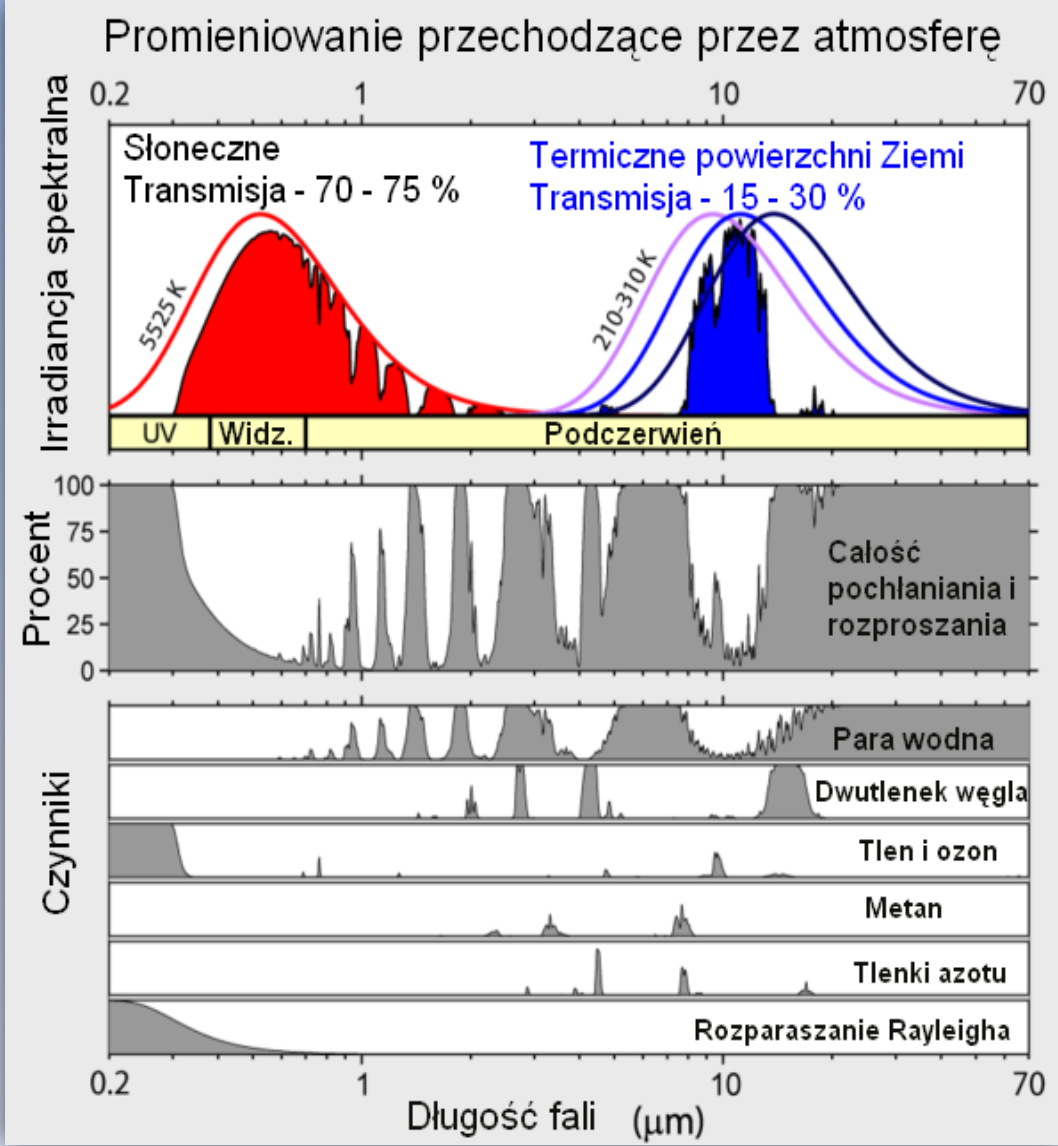
Dla Ziemi taką własność mają np.: metan, amoniak, ditlenek węgla.

Efekt anty-cieplarniany:

atmosfera **blokuje częściowo Vis**, ale **przepuszcza większość IR**

Efekt anty-cieplarniany powodują np. popioły wulkaniczne.

W atmosferze Tytana takie zjawisko wywołują mgły węglowodorowe.



Energia i jej transport

efekt cieplarniany

Przykłady:

	r	S_0	α_p	T_e	T_m	T_s	τ
	10^9 m	$W\ m^{-2}$		K	K	K	Earth days
Venus	108	2632	0.77	227	230	760	243
Earth	150	1367	0.30	255	250	288	1.00
Mars	228	589	0.24	211	220	230	1.03
Jupiter	780	51	0.51	103	130	134	0.41

W kolejnych kolumnach:

- promień orbity
- „stała słoneczna”
- albedo Bonda
- temperatura równowagowa
- temperatura odpowiadająca obserwowanej emisji termicznej (efektywna)
- średnia globalna temperatura powierzchni (dla Jowisza – górnej atmosfery)
- okres rotacji w dniach ziemskich

Energia i jej transport

efekt cieplarniany

uproszczone oszacowanie przy założeniu:

atmosfera to *jedna warstwa całkowicie przezroczysta dla światła słonecznego i całkowicie nieprzezroczysta dla podczerwieni emitowanej przez powierzchnię planety*

$$E_{ab} = (1 - A) \frac{L}{4\pi d^2} \pi r^2 = (1 - A) s_o \pi r^2$$

gdzie $s_o = \frac{L}{4\pi d^2}$

strumień absorbowany (T – temp. równowagowa):

$$F_{ab} = \frac{E_{ab}}{4\pi r^2} = \frac{1}{4} (1 - A) s_o = \sigma T^4$$

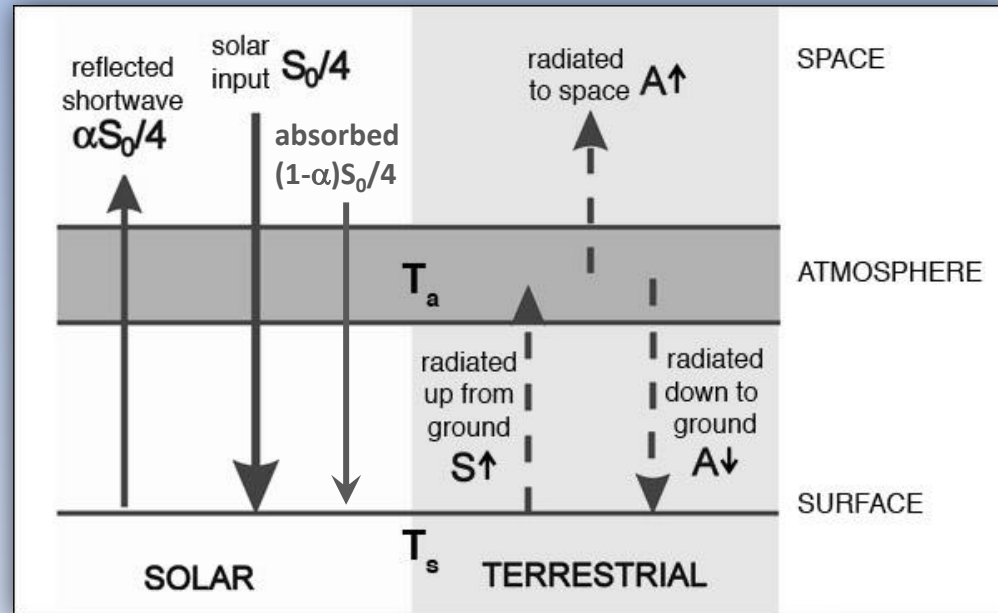
z rysunku:

$$S_{\uparrow} = F_{ab} + A_{\downarrow} \quad S_{\uparrow} = A_{\downarrow} + A_{\uparrow} \quad A_{\downarrow} = A_{\uparrow}$$

łącząc powyższe równania:

$$A_{\downarrow} + A_{\uparrow} = F_{ab} + A_{\downarrow}$$

$$\sigma T_A^4 = A_{\uparrow} = F_{ab} = \sigma T^4 \quad \text{temp. atmosfery}$$



$$\sigma T_S^4 = S_{\uparrow} = A_{\downarrow} + A_{\uparrow} = 2A_{\uparrow} = 2\sigma T^4$$

$$T_S = 2^{1/4} T \approx 1.19 T \quad \text{temp. powierzchni}$$

Energia i jej transport

„przeciekający” efekt cieplarniany

uproszczone oszacowanie przy założeniu:

atmosfera to **jedna warstwa całkowicie przezroczysta dla światła słonecznego i częściowo nieprzezroczysta (ε) dla podczerwieni emitowanej przez powierzchnię planety**

$$E_{ab} = (1 - A) \frac{L}{4\pi d^2} \pi r^2 = (1 - A) s_o \pi r^2$$

gdzie $s_o = \frac{L}{4\pi d^2}$

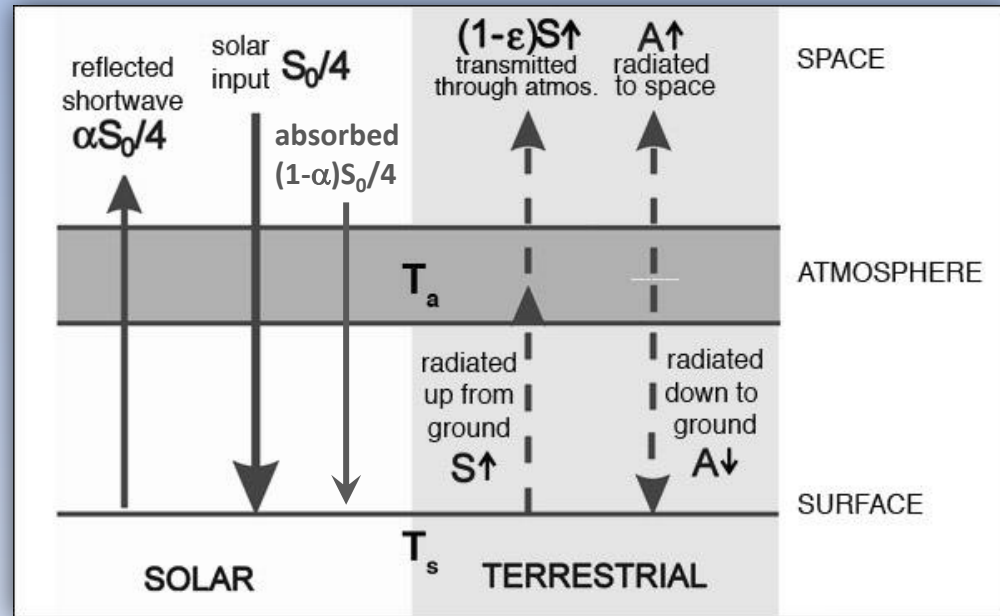
strumień absorbowany (T – temp. równowagowa):

$$F_{ab} = \frac{E_{ab}}{4\pi r^2} = \frac{1}{4} (1 - A) s_o = \sigma T^4$$

z rysunku:

$$S_{\uparrow} = F_{ab} + A_{\downarrow} \quad \varepsilon S_{\uparrow} = A_{\downarrow} + A_{\uparrow} \quad A_{\downarrow} = A_{\uparrow}$$

ε – nieprzezroczystość atmosfery dla IR (od 0 do 1)



łącząc powyższe równania:

$$\frac{1}{\varepsilon} (A_{\downarrow} + A_{\uparrow}) = F_{ab} + A_{\downarrow}$$

$$\sigma T_A^4 = A_{\uparrow} = \frac{\varepsilon}{2-\varepsilon} F_{ab} = \frac{\varepsilon}{2-\varepsilon} \sigma T^4 \quad \text{temp. atmosfery}$$

$$\sigma T_S^4 = S_{\uparrow} = \frac{1}{\varepsilon} (A_{\downarrow} + A_{\uparrow}) = \frac{2}{\varepsilon} A_{\uparrow} = \frac{2}{2-\varepsilon} \sigma T^4$$

$$T_S = \left(\frac{2}{2-\varepsilon} \right)^{1/4} T \quad \text{temp. powierzchni}$$