

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 thin and sharp, with some appearing as bright streaks and others as softer, blurred trails.

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)

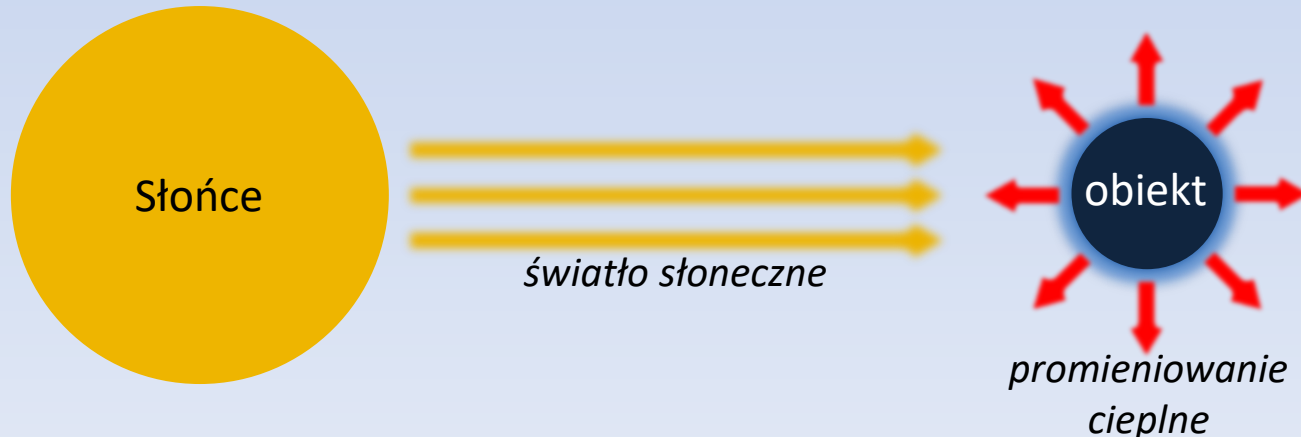


Energia i jej transport

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



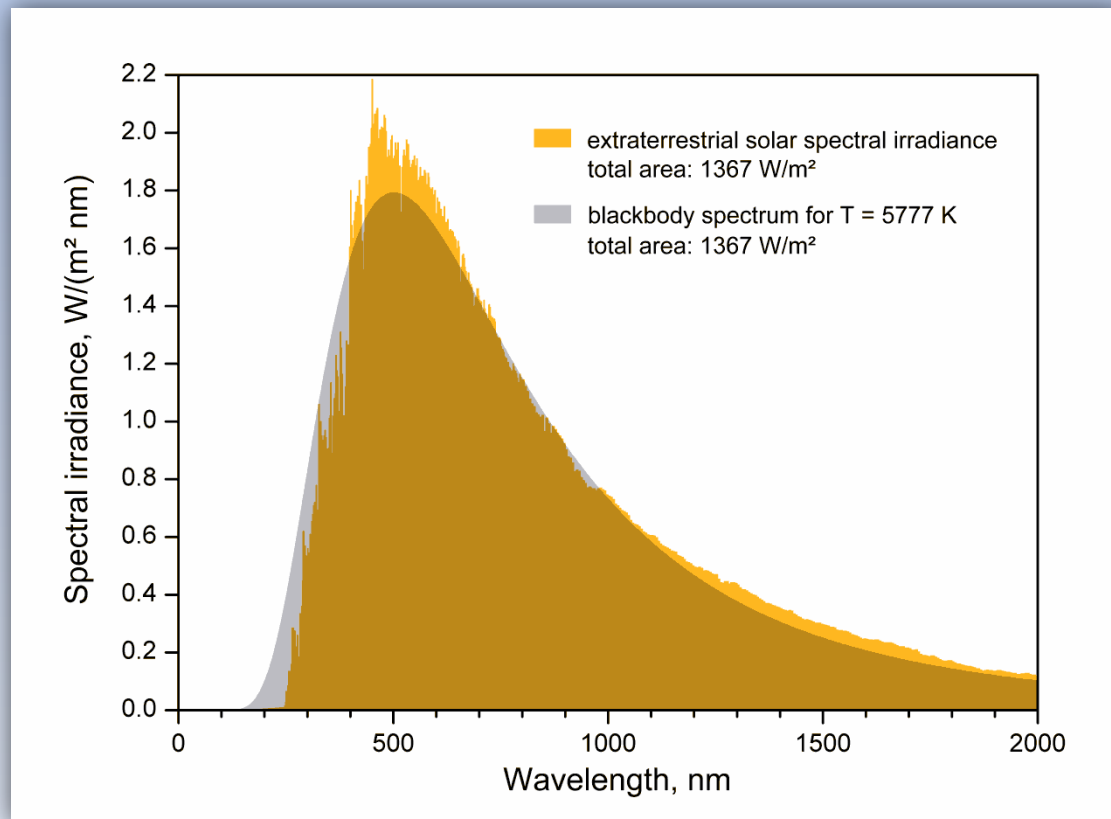
Energia i jej transport

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)

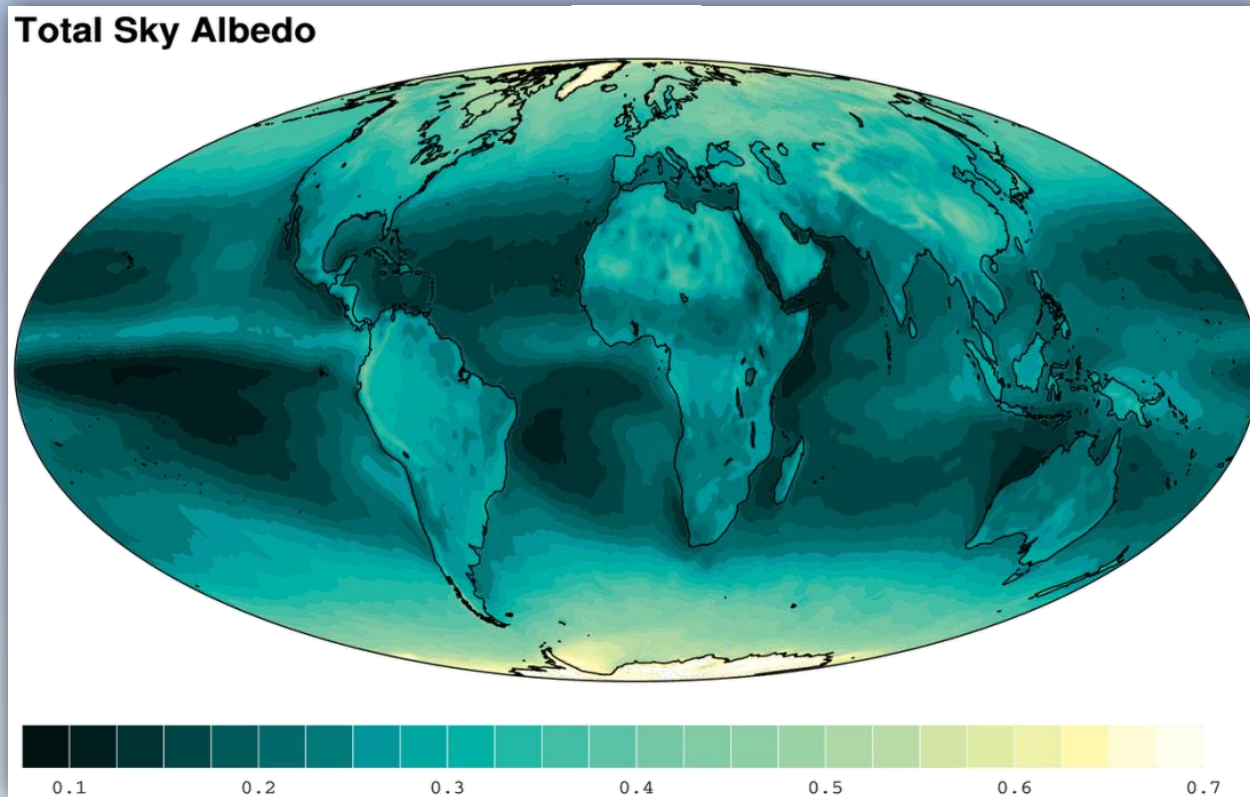


Energia i jej transport

albedo

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

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



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.

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

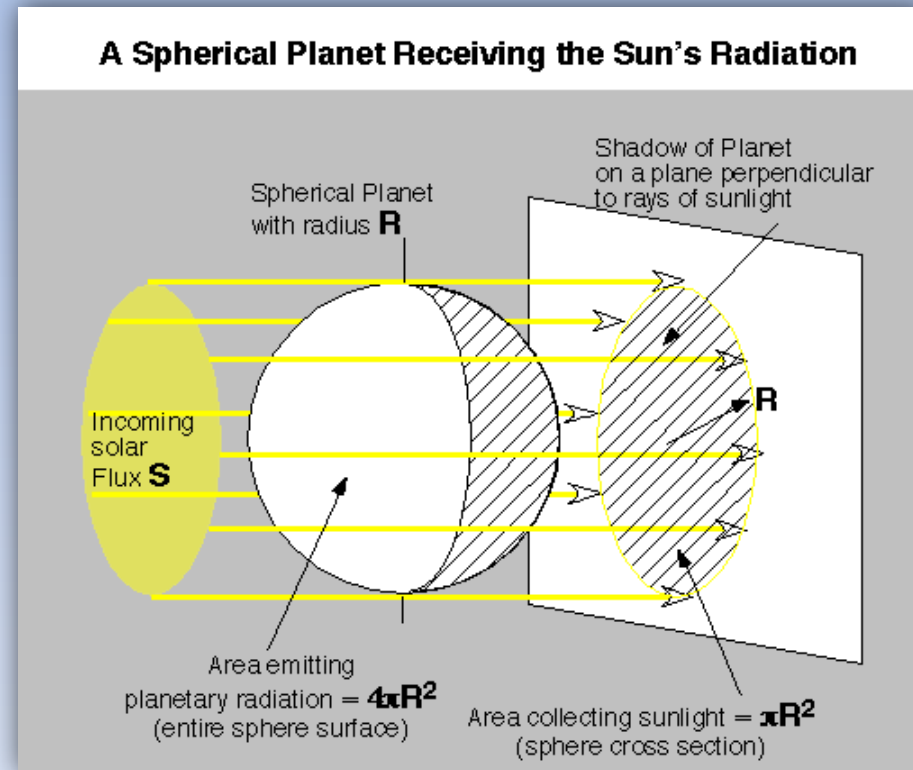
$$T = \left(\frac{(1 - A)L}{16\pi d^2 \varepsilon \beta \sigma} \right)^{1/4}$$

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



Energia i jej transport

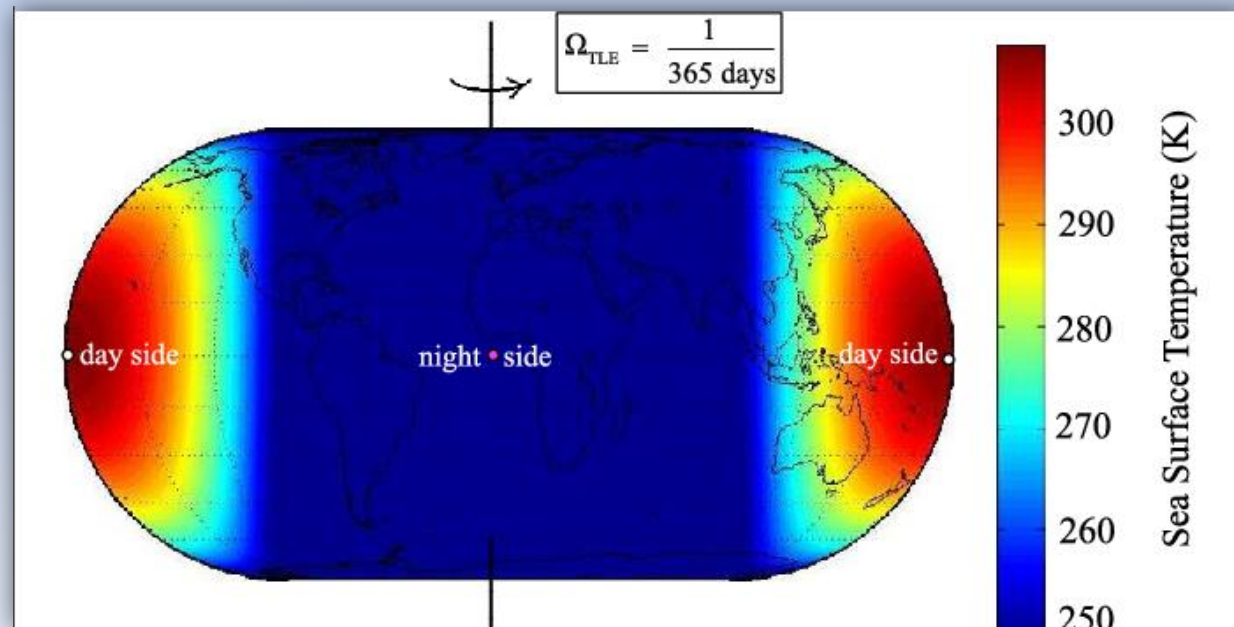
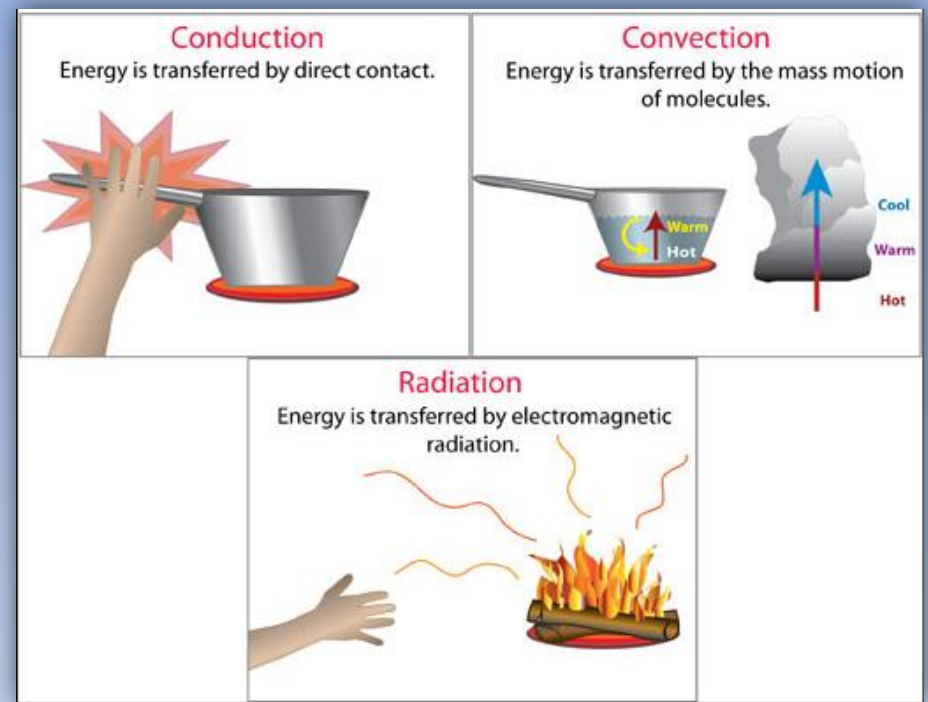
transport energii

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

- przewodnictwo
- promieniowanie
- przepływ masy

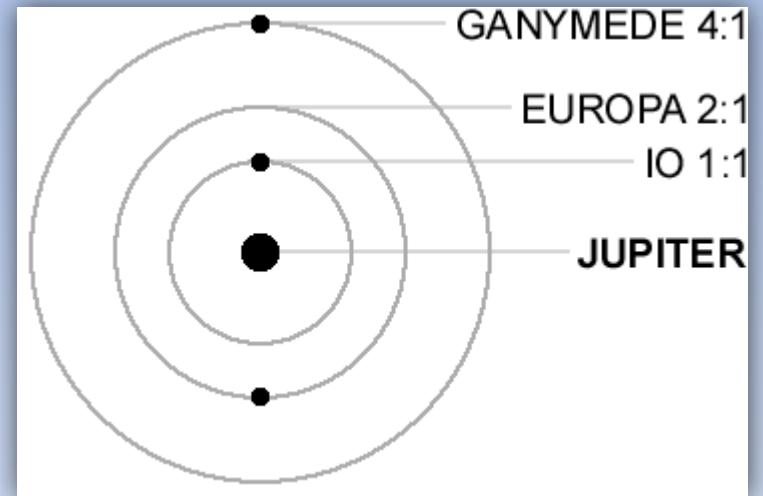
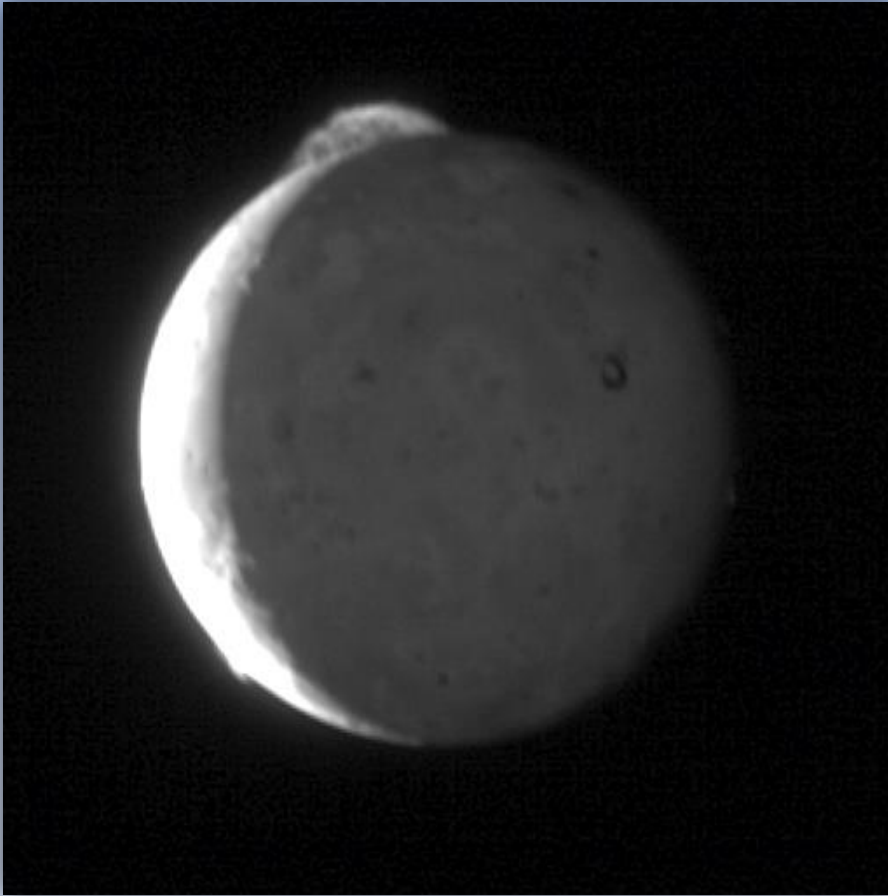
Każdy z procesów przewodzi ciepło z miejsc cieplejszych do chłodniejszych, prowadząc do wyrównywania temperatur.

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



Ciekawym przypadkiem transportu energii jest Io – jej większość dostaje za pośrednictwem grawitacji (grzanie pływowe).

Energia i jej transport

przewodnictwo

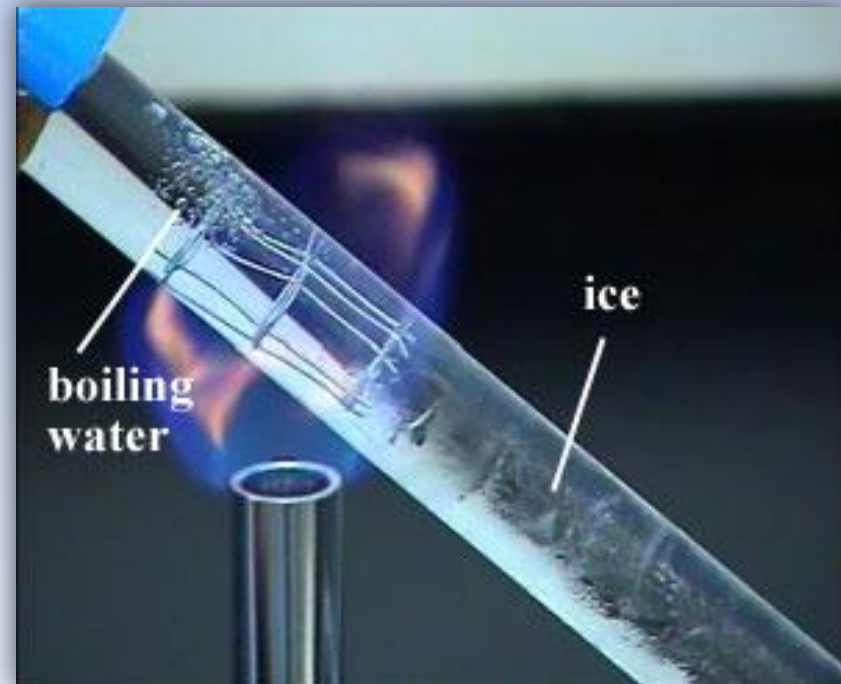
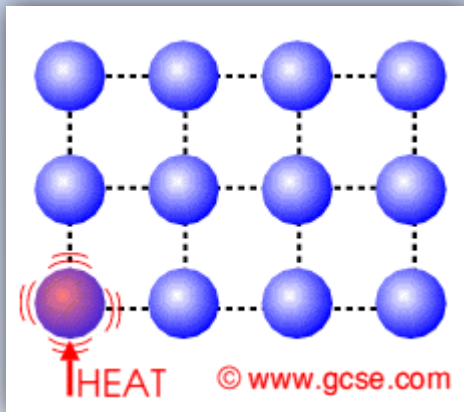
Przewodnictwo polega na przekazywaniu energii poprzez zderzenia zachodzące pomiędzy sąsiednimi cząstkami (ruch, drgania; atomy, jony, elektrony). Dominuje w ciałach stałych i bardzo rzadkich gazach (plazmie).

- 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 przyptywać, ale nie jest tworzone z niczego.*

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

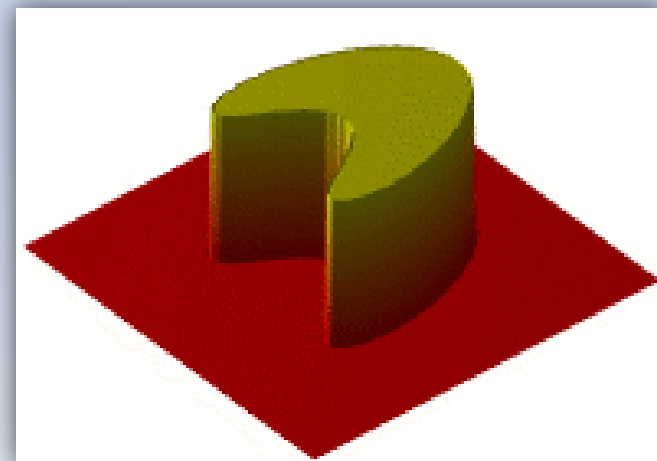
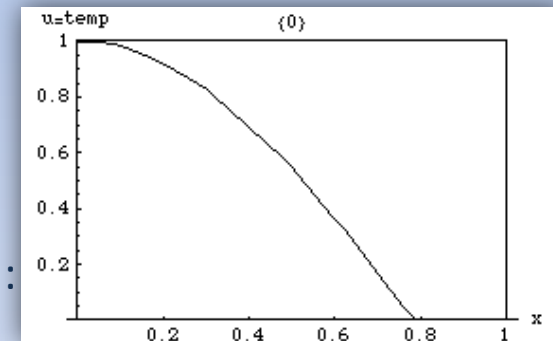
Dla przepływu ciepła do warstw podpowierzchniowych mamy:

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

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 powierzchnią 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):

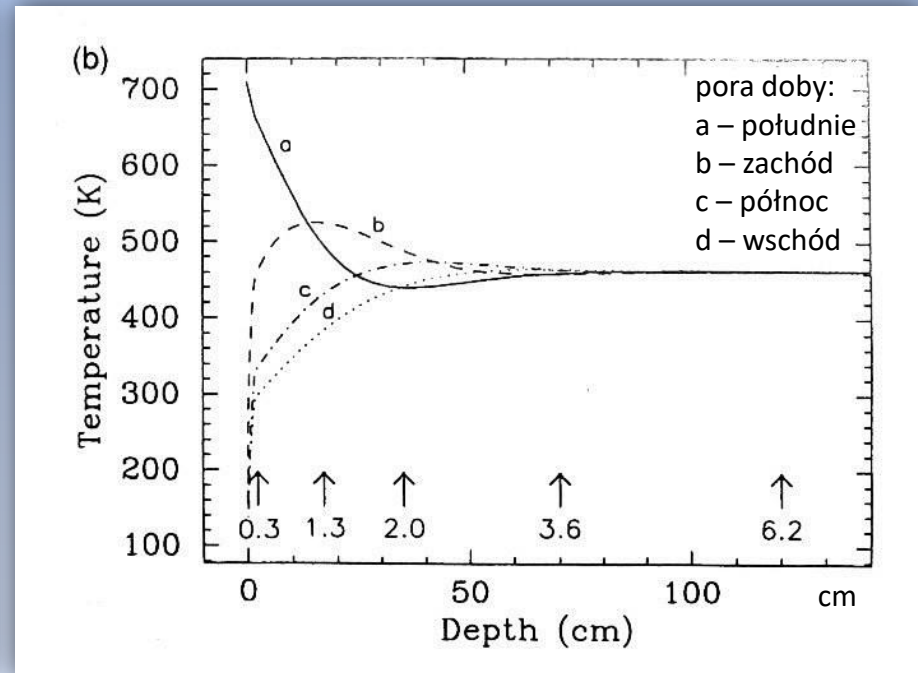
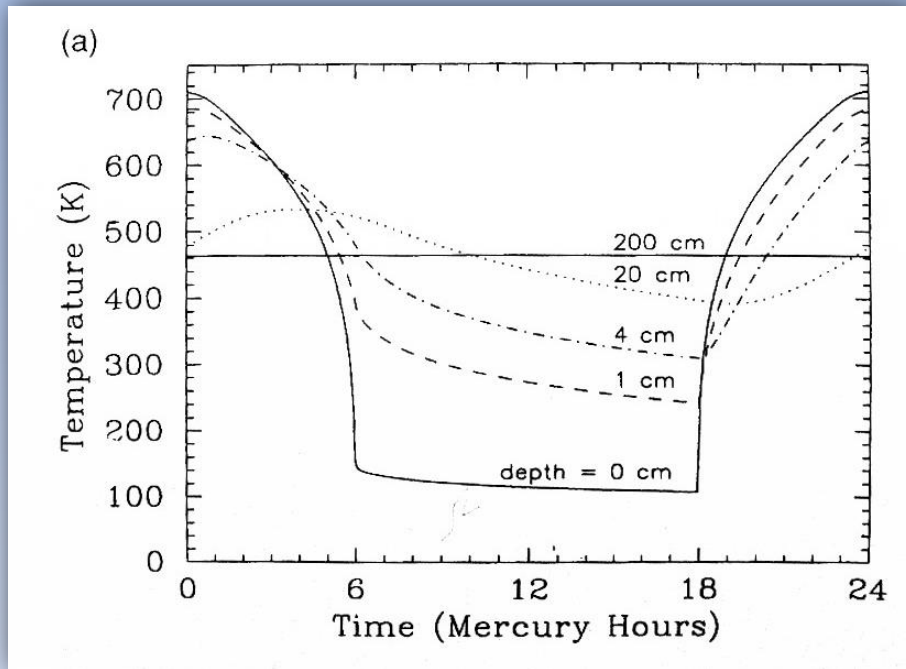
$$L_T \equiv \sqrt{\frac{2k_T}{\omega_{rot} \rho c_p}}$$

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.



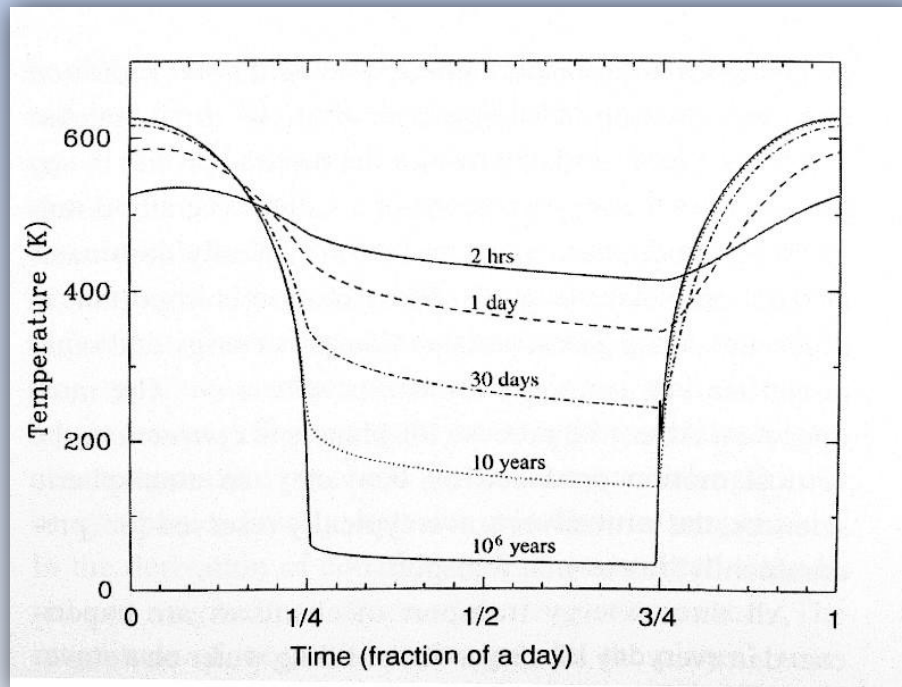
Zmiany temperatury w warstwach powierzchniowych Merkurego (z obserwacji zdalnych).

Energia i jej transport

przewodnictwo

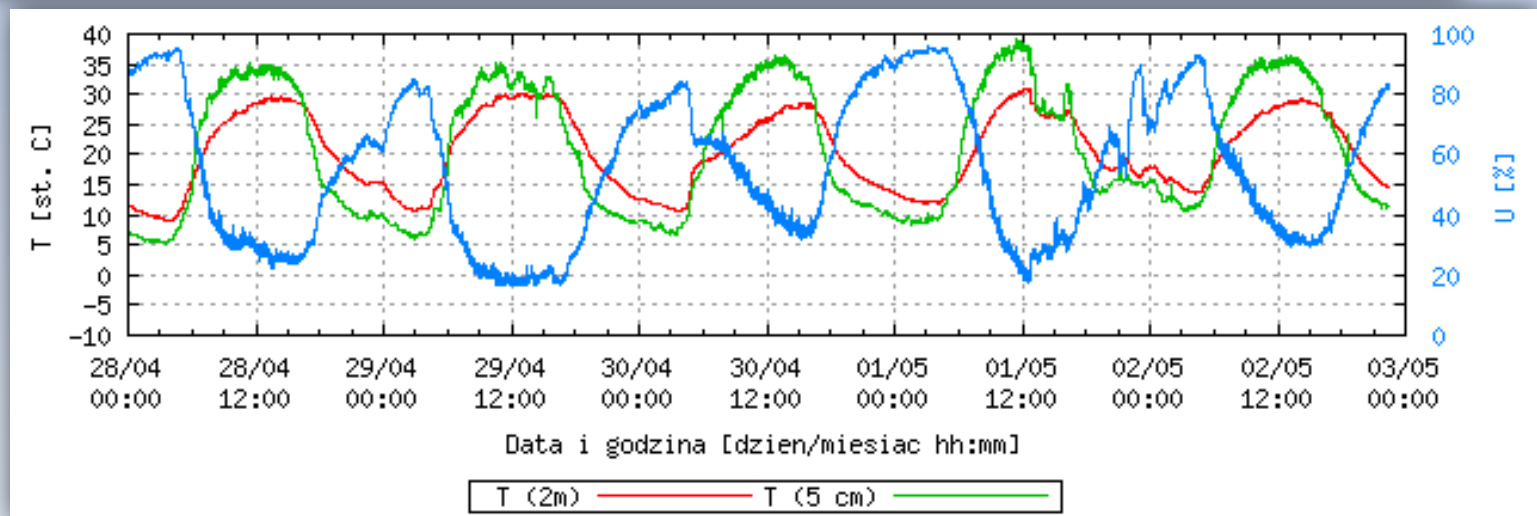
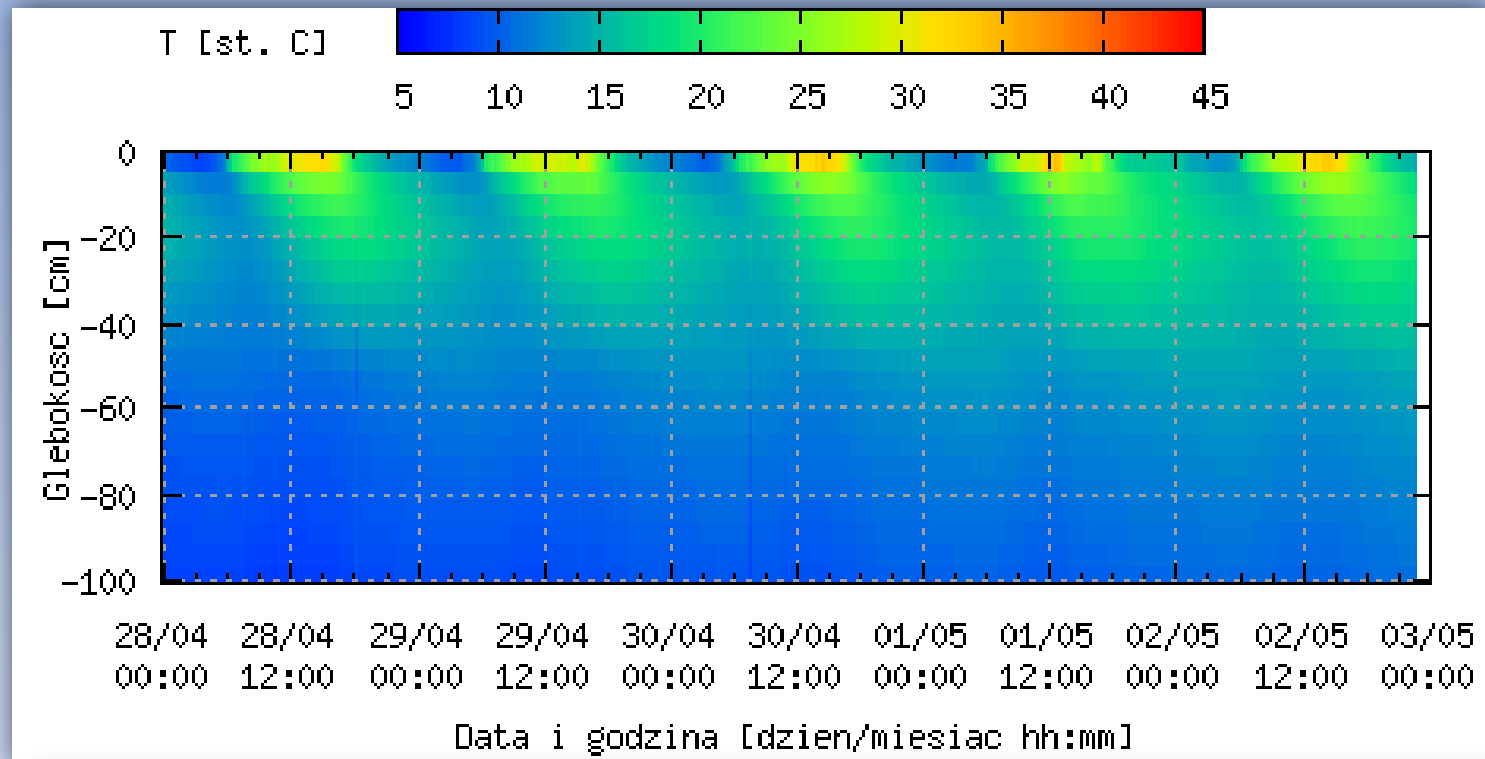
Przewodnictwo jest dominującym mechanizmem transportu energii w obiektach lub ich częściach, które są w stanie stałym oraz w górnych, rzadkich częściach atmosfer.

Zmiany temperatury na powierzchni obiektu podobnego do Merkurego, ale mającego różny okres rotacji (6 modeli dla okresów od 2 godz. do 1 mln lat)



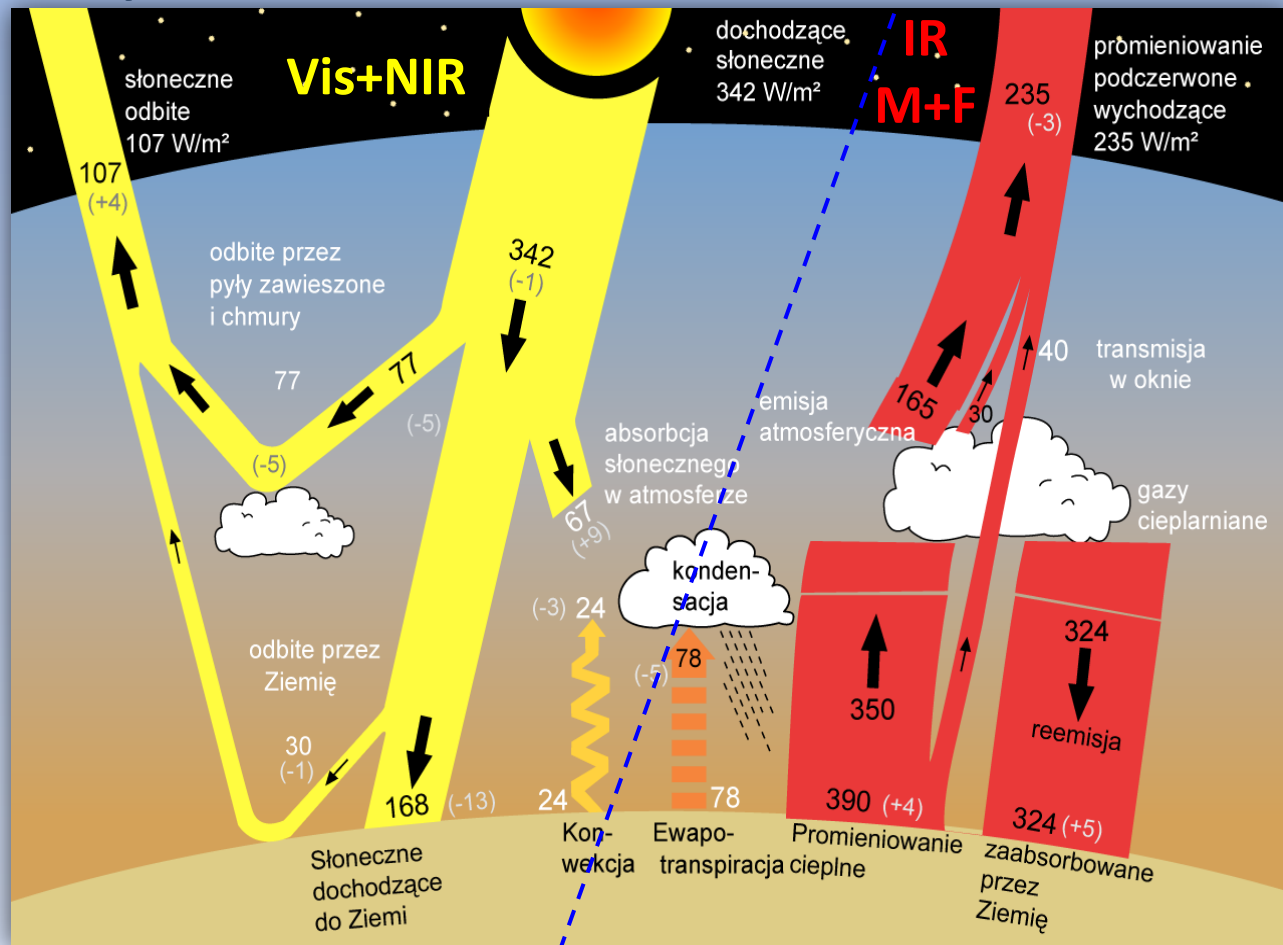
Energia i jej transport

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



Energia i jej transport

efekt cieplarniany



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**

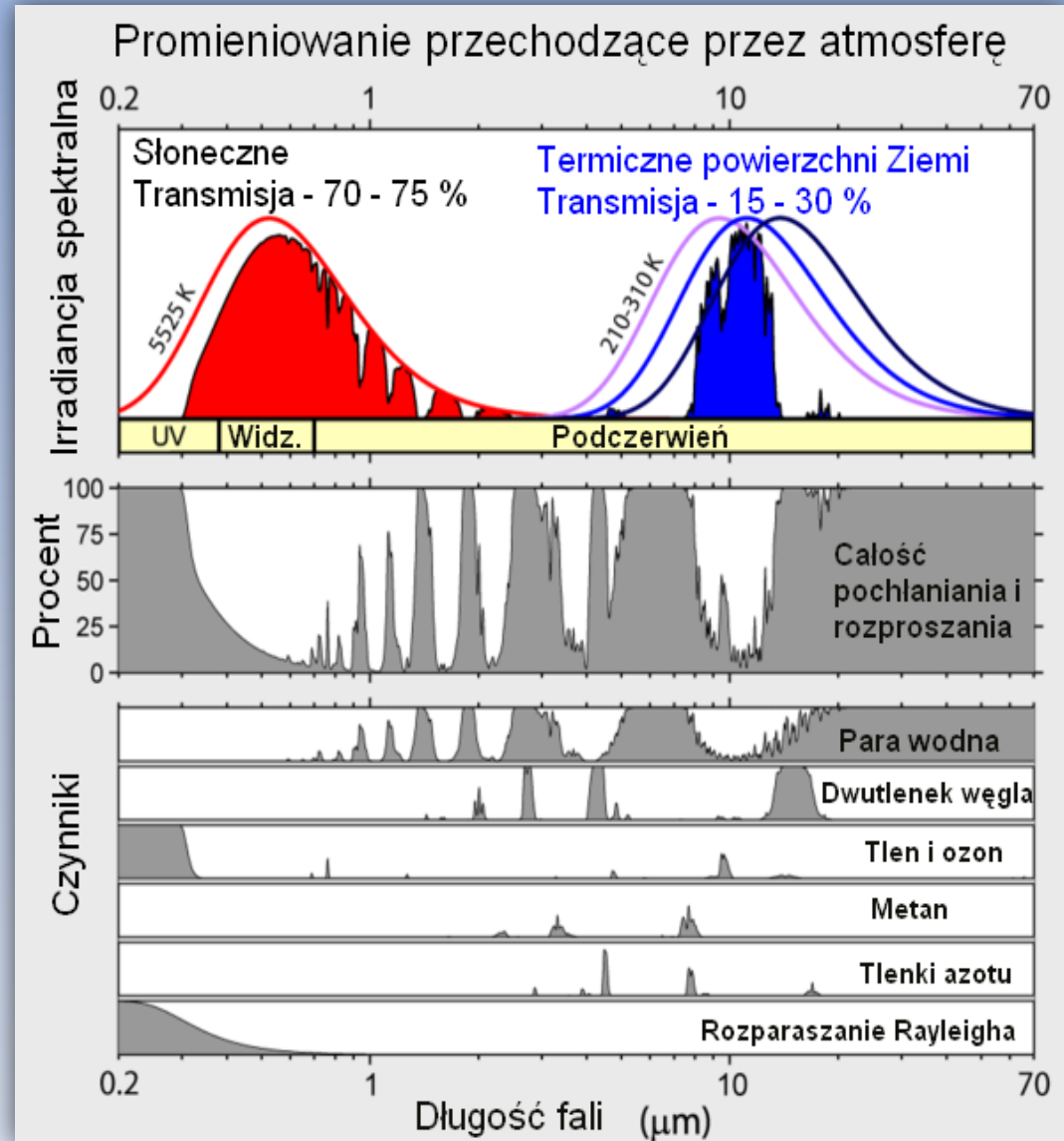
Dla Ziemi taką własność mają np.: metan, amoniak, ditlenek węgla.

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

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):

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

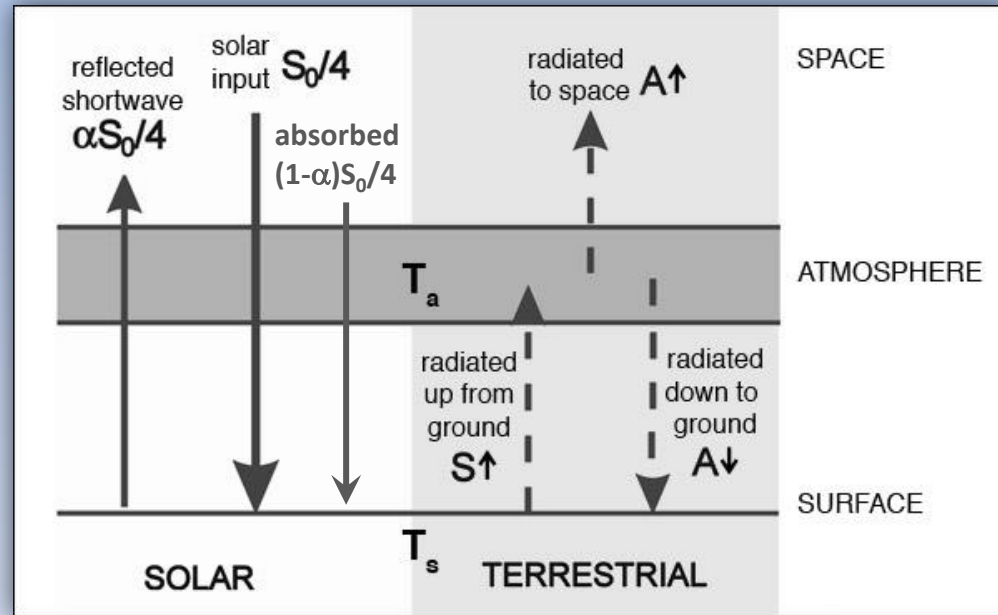
z rysunku:

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

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

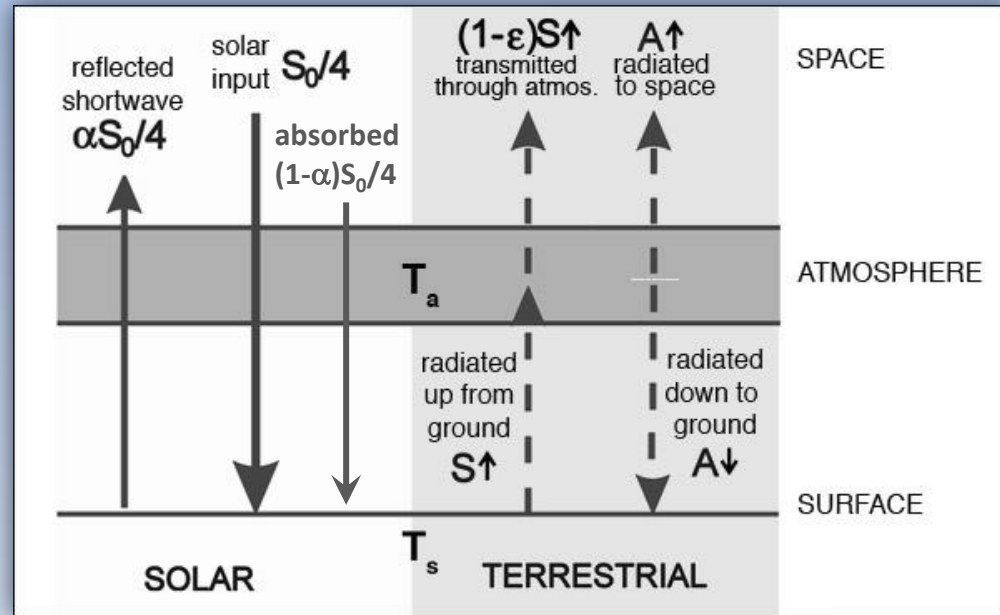
strumień absorbowany (T – temp. równowagowa):

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

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:

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

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

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

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