

Astrofizyka Układów Planetarnych

2

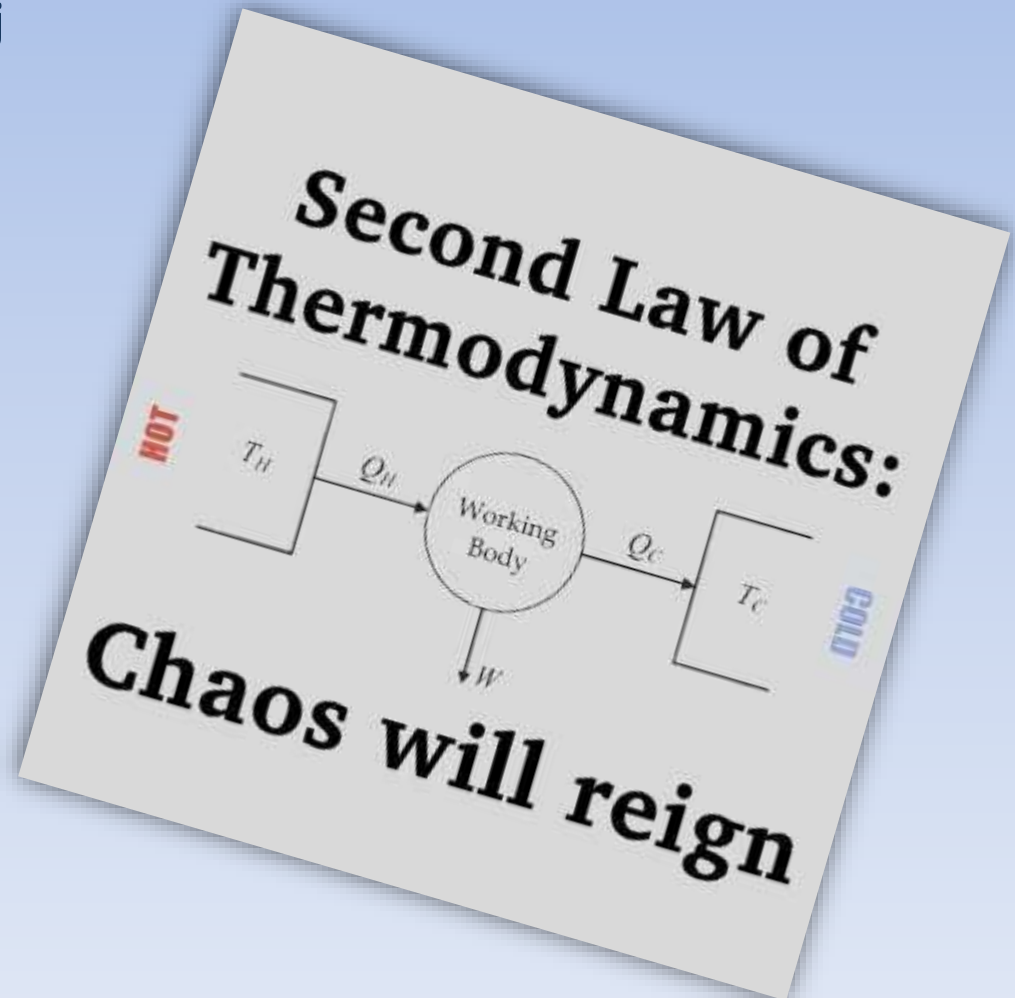
ENERGIA I JEJ PRZENOSZENIE



Energia i jej transport

prawa termodynamiki inaczej

- nie możesz wygrać
- nie możesz wyjść na zero
- nie możesz zrezygnować z gry



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

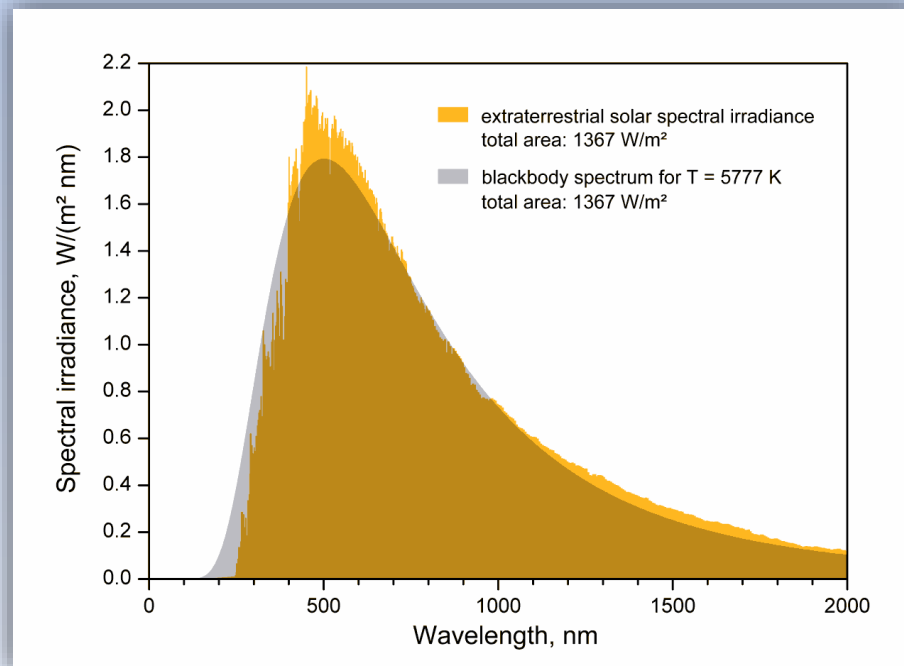
temperatura efektywna

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)

T_e obiektu planetarnego wyznaczyć można, jeśli z obserwacji widmowych/fotometrycznych uzyskamy strumień F wynikający z własnej emisji termicznej obiektu. Emisja ta, przy typowych temperaturach planetarnych, zachodzi głównie w podczerwieni. Obserwacje widmowe/fotometryczne służące do wyznaczenia F należy skorygować na promieniowanie odbite Słońca (odjąć od emisji mierzonej).

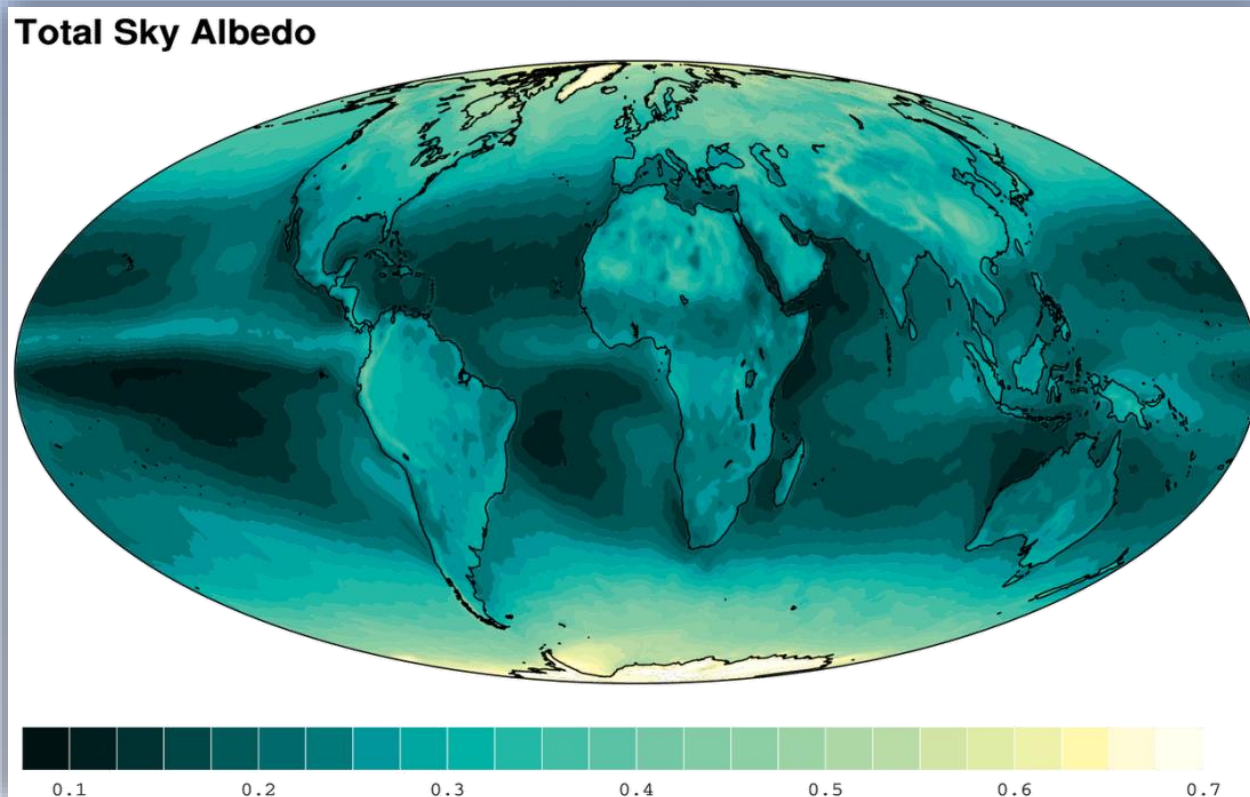


Energia i jej transport

albedo

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

- albedo monochromatyczne
- albedo geometryczne (odbicie w kierunku źródła światła (kąt fazowy = 0))
- **albedo całkowite (Bonda)** (obejmuje wszystkie dł. fali i kierunki, decyduje o bilansie energetycznym)



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–Boltzmann.

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

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

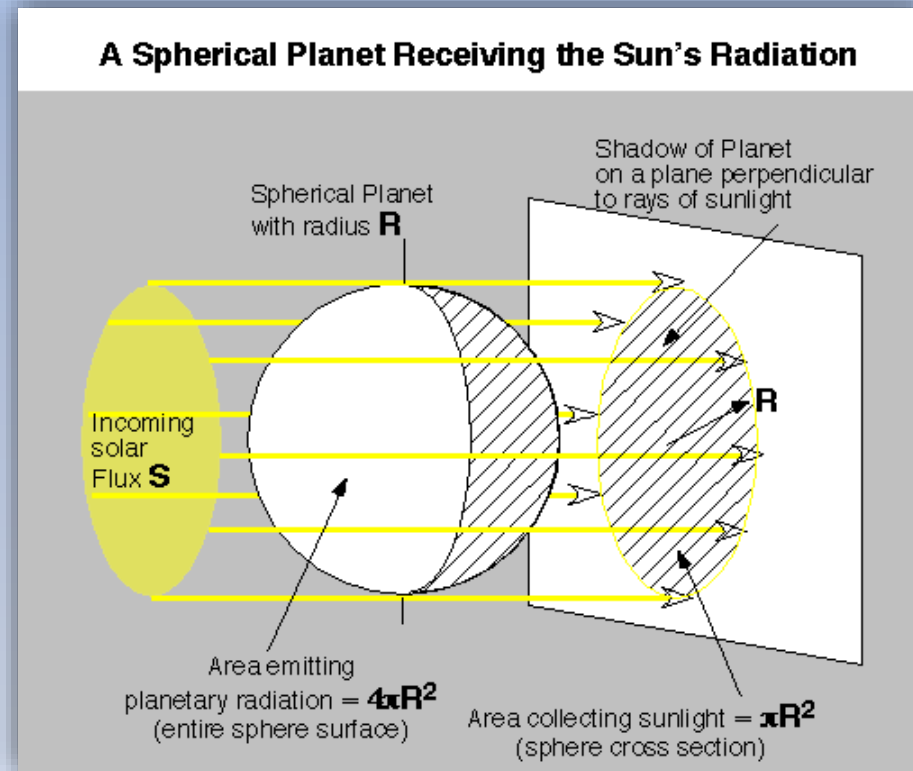
uwaga: równanie nie uwzględnia innych źródeł energii poza promieniowaniem słonecznym

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

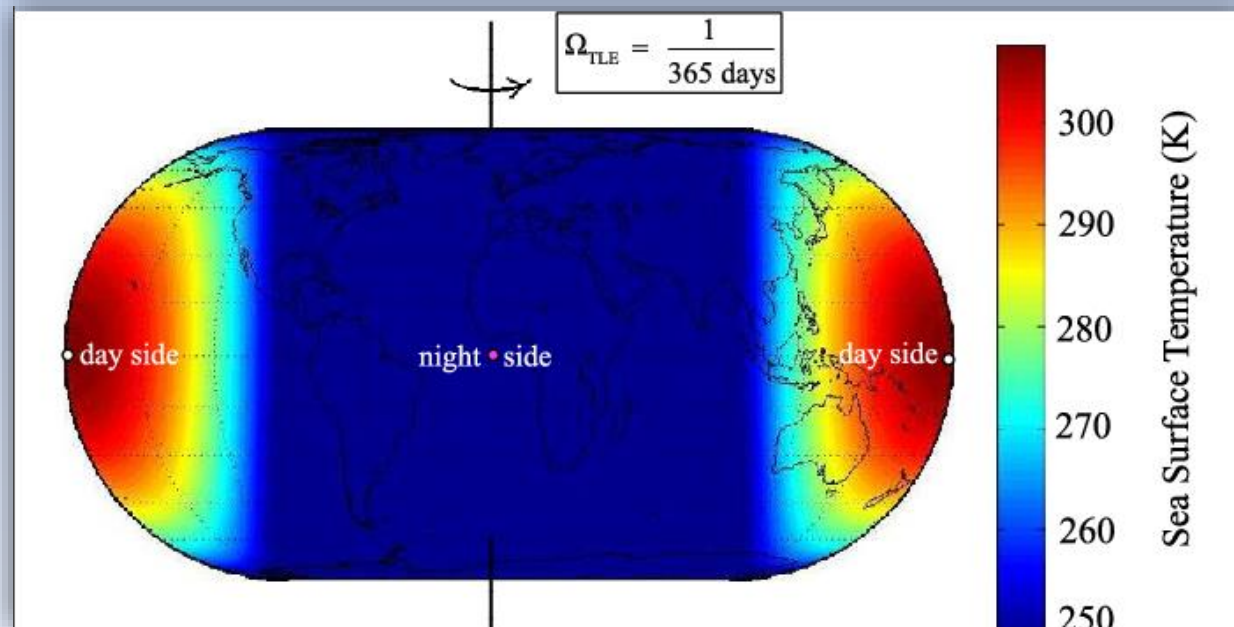
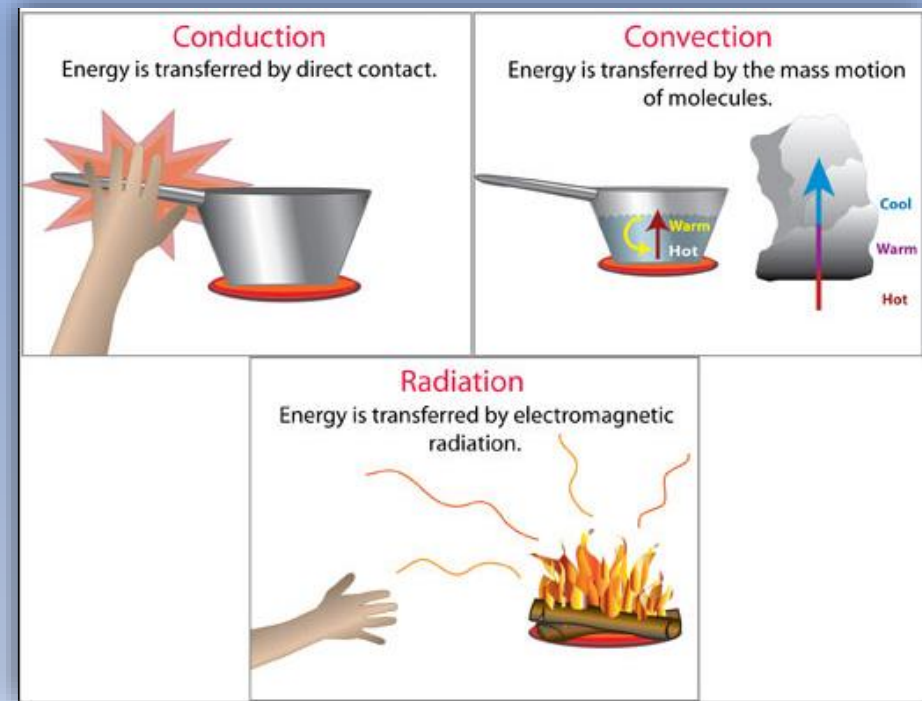
transport energii

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

- przewodnictwo
- promieniowanie
- przepływ masy

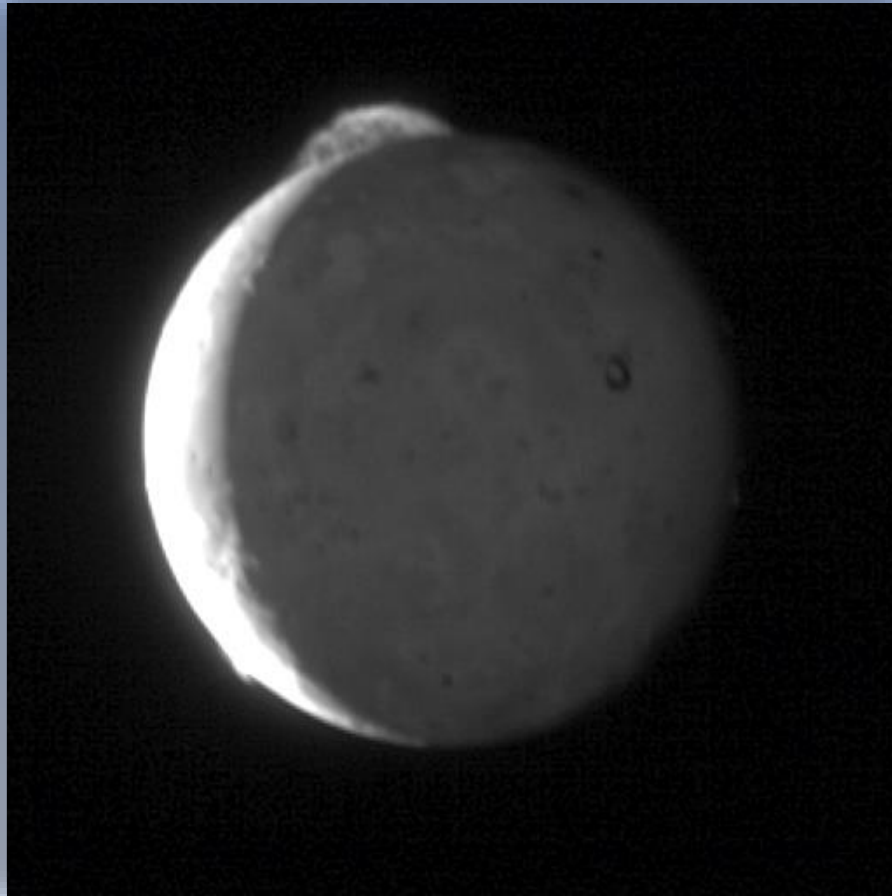
Każdy z procesów przewodzi ciepło z miejsc cieplejszych do chłodniejszych, prowadząc do wyrównywania temperatur.

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

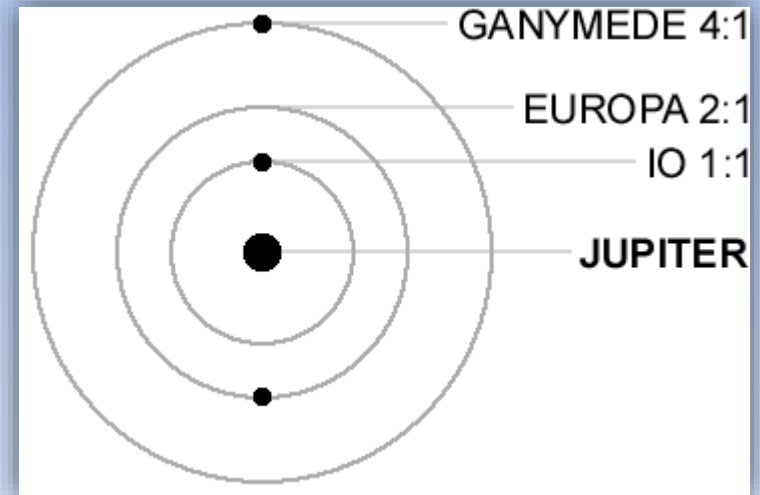


Temperatura powierzchni dla Ziemi rotującej synchronicznie (Proedrou & Hocke, 2016)

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

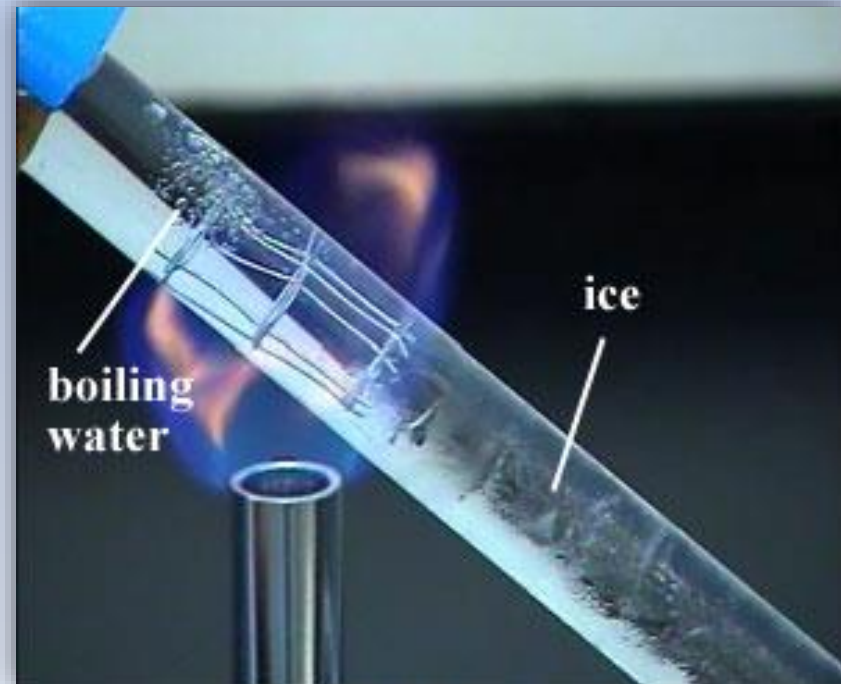
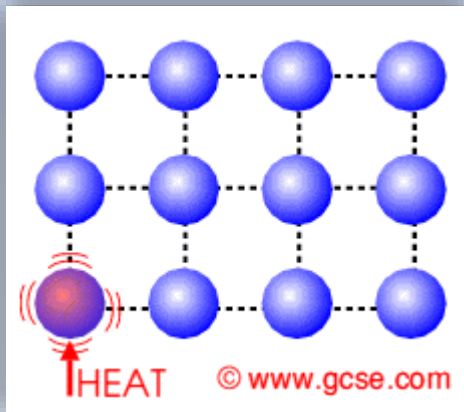
Przewodnictwo polega na przekazywaniu energii poprzez zderzenia zachodzące pomiędzy sąsiednimi cząstkami (ruch, drgania; atomy, jony, elektrony). Dominuje w ciałach stałych i bardzo rzadkich gazach (plazmie).

- 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.*

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

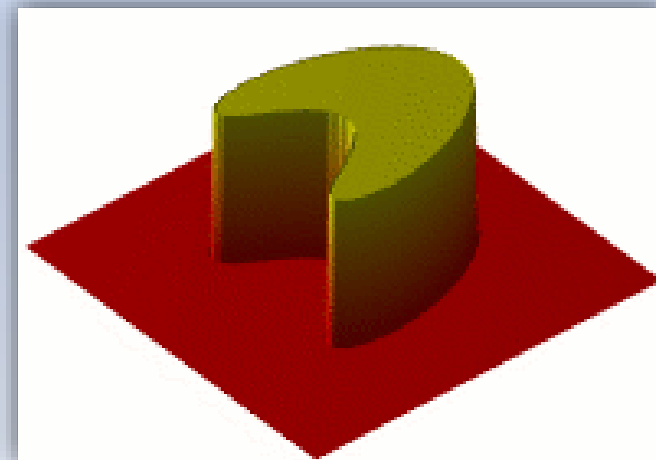
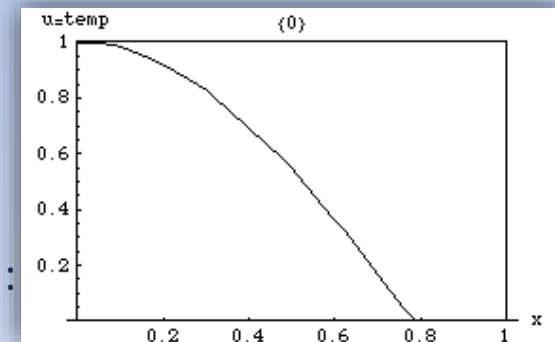
Dla przepływu ciepła do warstw podpowierzchniowych mamy:

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

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):

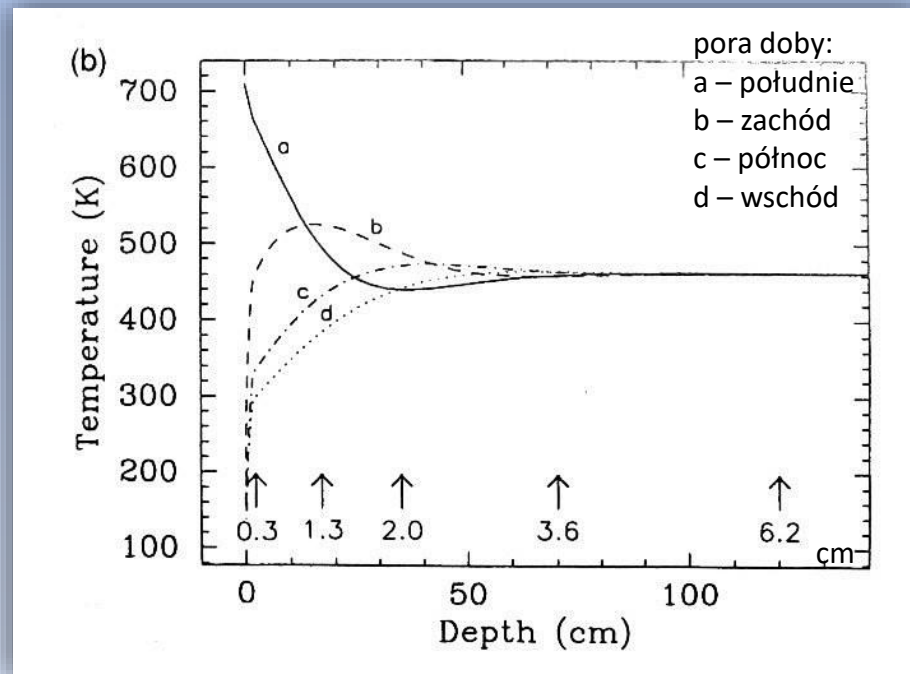
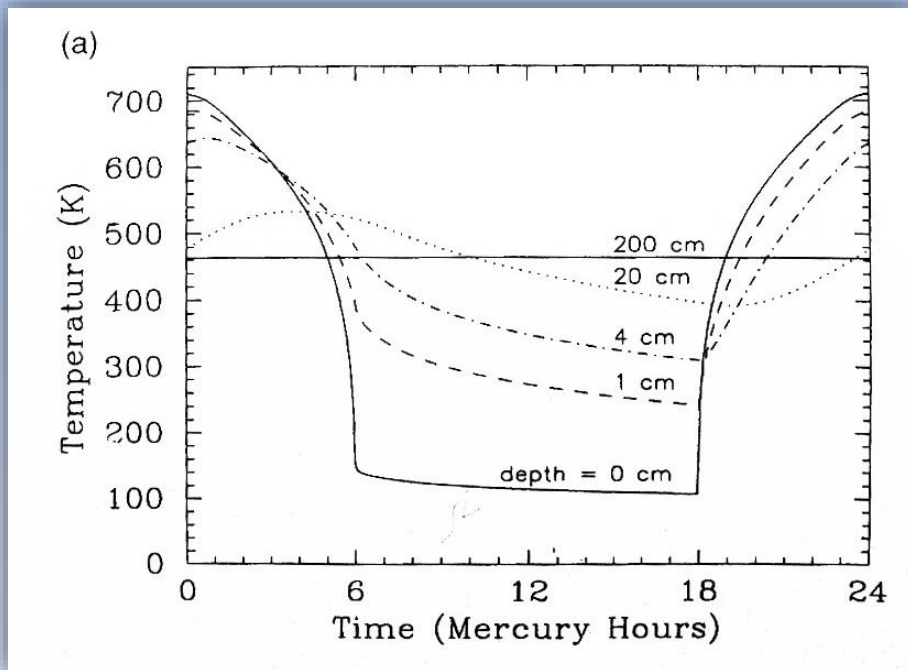
$$L_T \equiv \sqrt{\frac{2k_T}{\omega_{\text{rot}} \rho c_p}}$$

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).

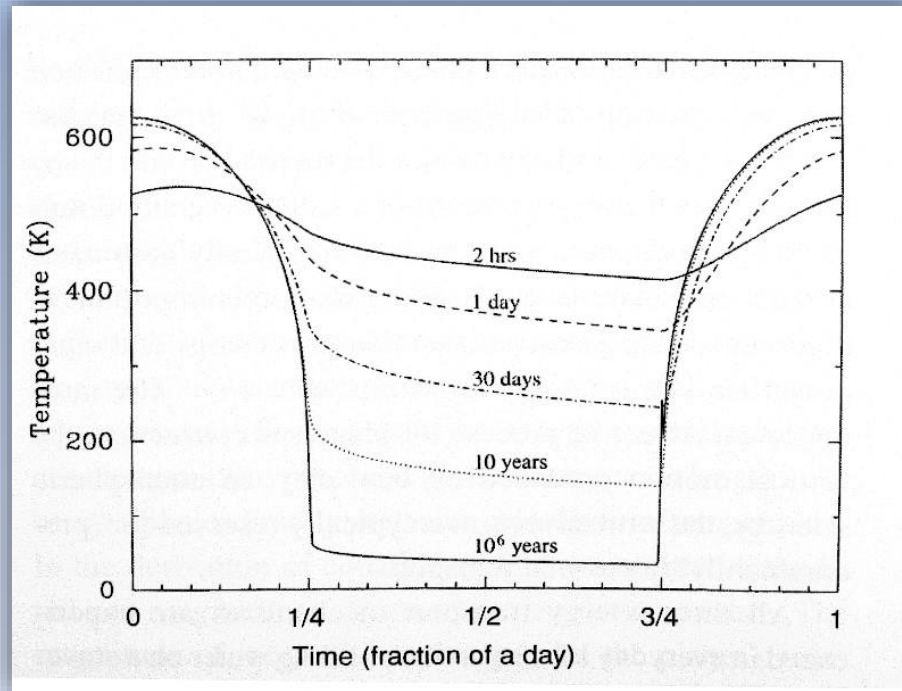
Wykresy te są dla długości planetograficznych 0 i 180 st. (ustawionych do Słońca w peryhelium).

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.