

**Kwantowe własności promieniowania,  
ciało doskonale czarne,  
zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne.**

# DUALIZM ŚWIATŁA

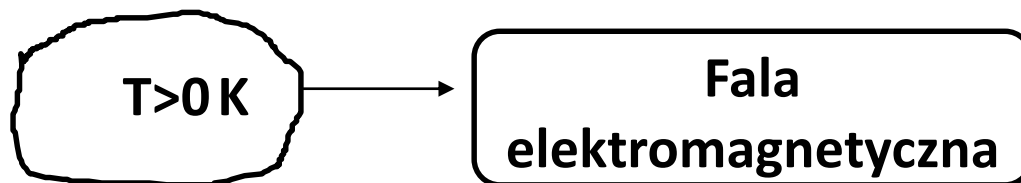
fala

interferencja,  
dyfrakcja,  
polaryzacja,...

kwant, foton

promieniowanie  
ciała doskonale  
czarnego,  
efekt  
fotoelektryczny ,...

## Promieniowanie ciała doskonale czarnego



- **Dowolne ciało w każdej temperaturze ( $T > 0 \text{ K}$ ) wysyła promieniowanie (*promieniowanie cieplne*) w postaci fali elektromagnetycznej.**
- **Ciało ogrzane do dostatecznie wysokiej temperatury zaczyna wysyłać promieniowanie widzialne.**

# ***Widmowa zdolność emisyjna***

$$\mathbf{R}_\lambda = \frac{\Delta P}{\Delta S \cdot \Delta \lambda}$$

**Moc  $\Delta P$  promieniowania wysydanego z jednostki powierzchni  $\Delta S$  ciała w jednostkowym przedziale długości fal  $\Delta \lambda$ .**

$$[\mathbf{R}_\lambda] = \mathbf{W/m^2 \cdot m = J/s \cdot m^2 \cdot m}$$

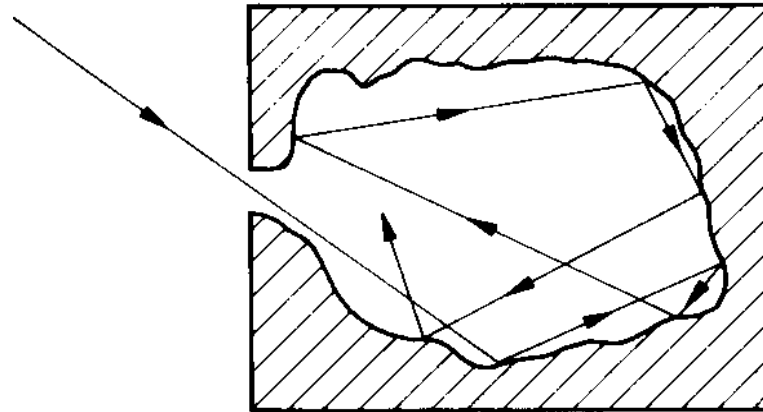
## ***Całkowita zdolność emisyjna R***

$$\mathbf{R} = \int_0^{\infty} \mathbf{R}_{\lambda} d\lambda$$

**to całkowita moc promieniowania w całym zakresie długości fal, wysyłana z jednostki powierzchni ciała.**

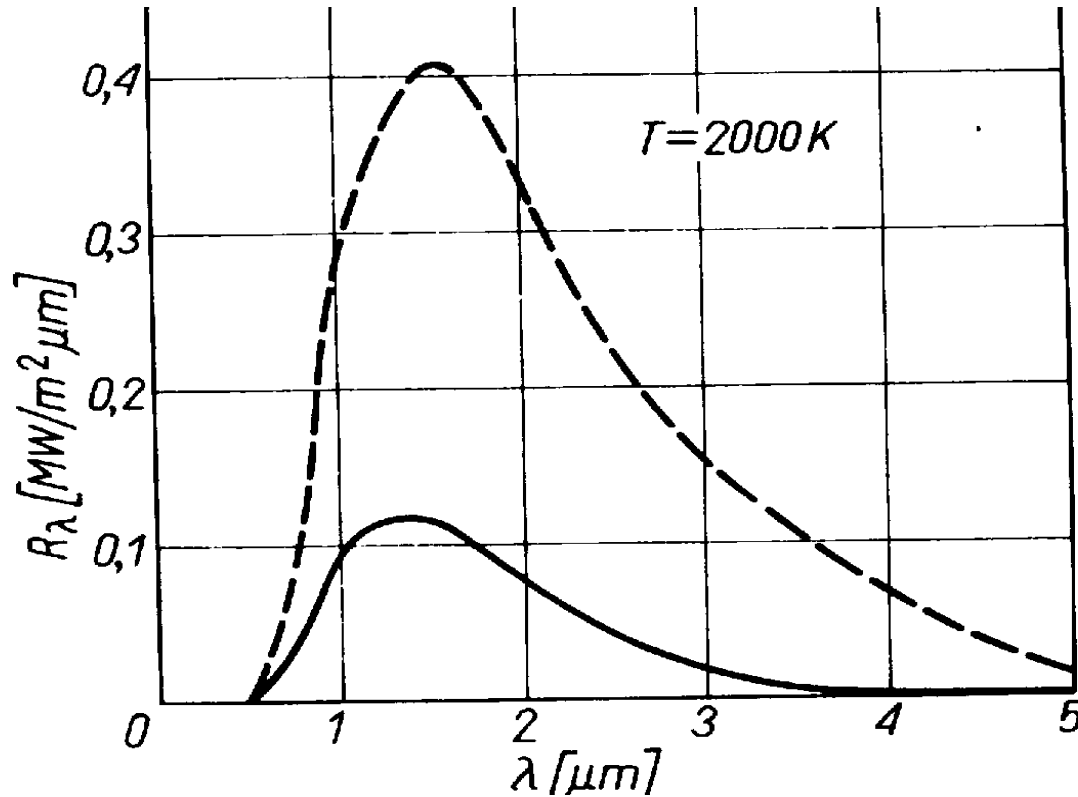
- Zdolność emisyjna jest funkcją długości fali i temperatury.**
- $R_{\lambda} = f(\lambda, T)$**

- ***Ciało doskonale czarne*** - teoretyczny model promieniowania cieplnego (obiekt hipotetyczny).



- **Ciało doskonale czarne jest to ciało, które pochłania całkowicie padające nań promieniowanie.**

# rozkłady widmowych zdolności emisyjnych wolframu i ciała doskonale czarnego w temperaturze 2000 K.



- Ciało doskonale czarne ma maksymalną zdolność emisyjną w każdej temperaturze.

## **Model Rayleigha – Jeansa** (termodynamika klasyczna)

- Wnęka ze zwierciadlaną ścianą;
- Wewnątrz takiej wnęki powstają elektromagnetyczne fale stojące;

$$\mathbf{R}_\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4} \mathbf{kT}$$

- W zakresie fal krótkich teoria daje wynik absurdalny („katastrofa w ultrafiolecie”).



# Model Wiena

(19.10.1900, fizyka klasyczna, model empiryczny)

- Prędkości cząsteczek w gorącym ciele mają rozkład prędkości Maxwella;
- Cząsteczki są naładowane elektrycznie, więc skutkiem ich niejednostajnego ruchu jest wysyłanie fali elektromagnetycznej;

$$\mathbf{R}_\lambda = \mathbf{C}_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{\mathbf{C}_2}{\lambda \mathbf{T}}\right)$$

- $C_1$  i  $C_2$  – stałe emisyjne, których wartości stałych dobrano tak, aby uzyskać jak najlepszą zgodność z doświadczeniem.

## Model Plancka (fizyka kwantowa, 14.12.1900)

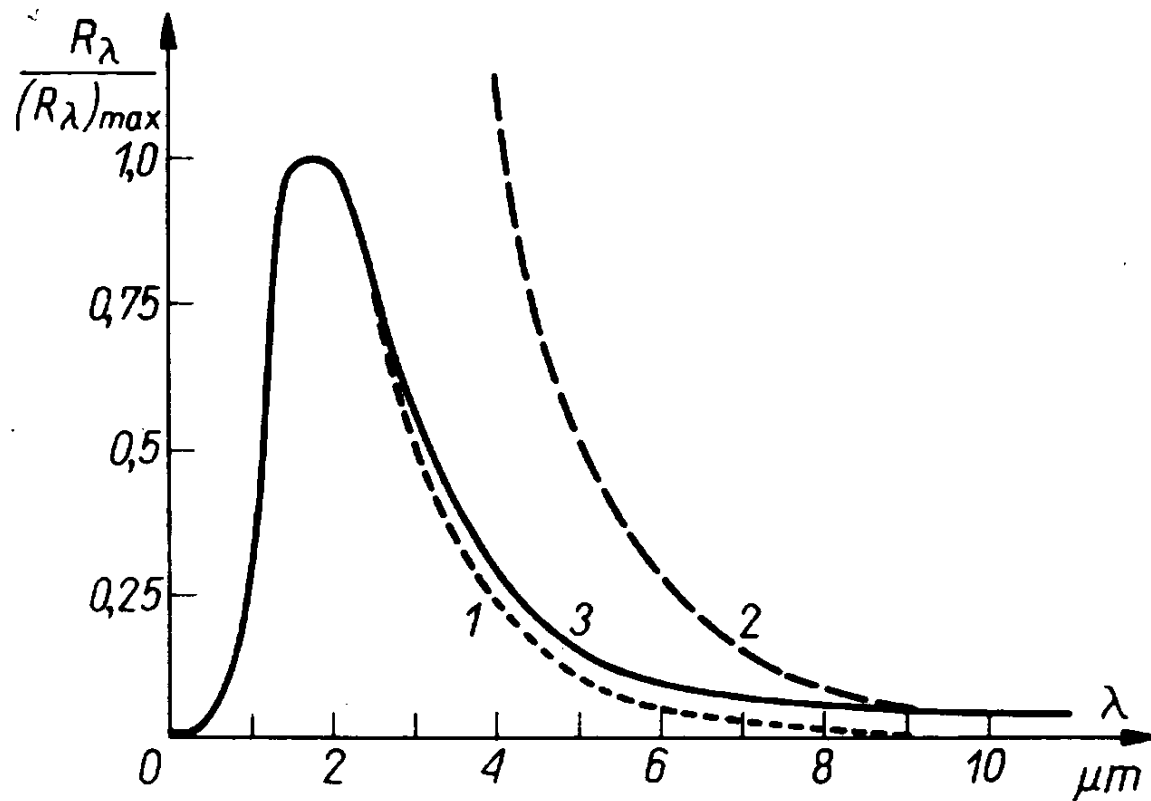
- Energia promieniowania jest wysyłana porcjami (teoria kwantów);
- Energia kwantu (fotonu) jest równa

$$E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$h$  - stała Plancka,

$\nu$  - częstotliwość promieniowania ( $\nu=c/\lambda$ ).

$$R_{\lambda} = C \cdot \lambda^{-5} \left\{ \exp\left[\frac{hc}{\lambda T}\right] - 1 \right\}^{-1}$$



Wykresy widmowej zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego wg teorii:

Wiena (1),

Rayleigha-Jeansa (2)

Plancka (3)

# ***Prawo Stefana - Boltzmannna:***

**Całkowita zdolność emisyjna ciała doskonale czarnego jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej.**

$$**R = \sigma T^4**$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4.$$

Dla dowolnego ciała rzeczywistego zdolność emisyjna ma mniejszą wartość i stąd

$$**R = A\sigma T^4**$$

A - zdolność absorpcyjna ciała.

- $A=1$  - ciało doskonale czarne,
- $0 < A < 1$  - ciało rzeczywiste,
- $A=0$  - ciało doskonale odbijające.

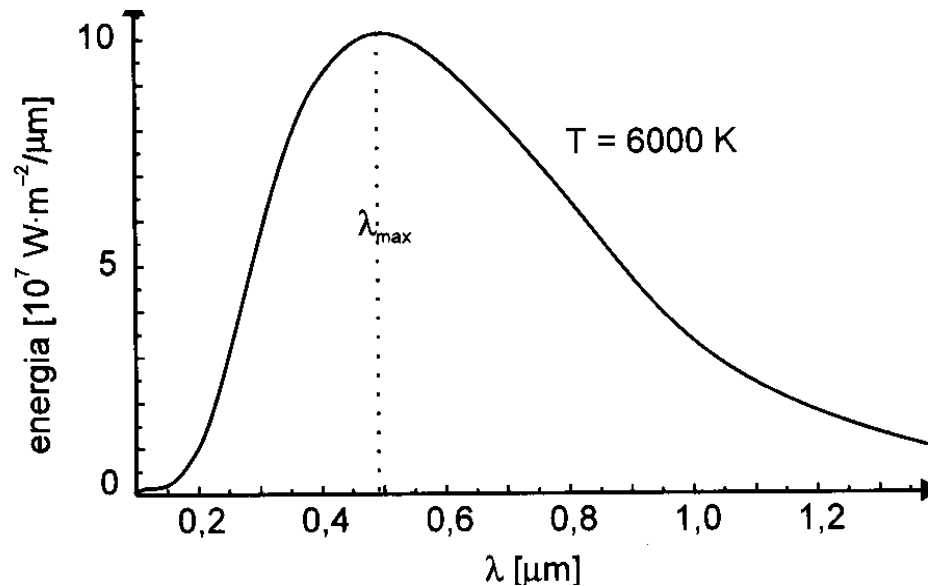
## ***Prawo przesunięć Wiena***

**Ze wzrostem temperatury maksimum promieniowania przesuwają się w stronę fal krótszych (np. zmiana barwy ogrzewanego ciała).**

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{T}}$$

$$b = 2898 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}$$

# Krzywa Plancka dla temperatury 6000 K (Słońce)



- Znaczna część widma promieniowania słonecznego leży w obszarze widzialnym (400-700 nm).
- Część leży w nadfiolecie ( $< 400 \text{ nm}$ ), oraz w podczerwieni ( $> 700 \text{ nm}$ ).

## ***Strumień energii $\Phi$***

- Ilość energii przenoszonej przez promieniowanie do wielkości powierzchni, przez którą ta energia przepływa w jednostce czasu

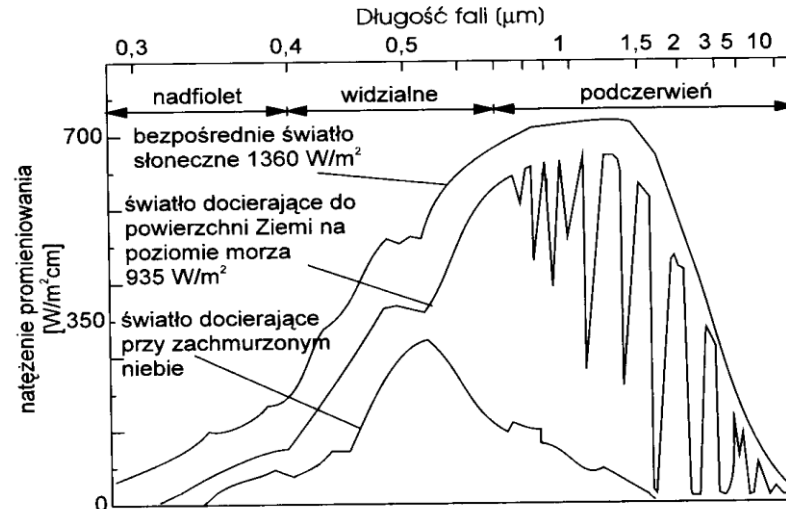
$$\Phi = \frac{\Delta P}{\Delta S}$$

$$\Phi(\text{Słońca}) = 1360 \text{ W/m}^2$$

### *Równowaga cieplna ciał:*

- W stanie równowagi cieplnej ciało emituje tyle energii, ile pochłania.
- Jeśli energie te nie są równe, to temperatura ciała wzrasta lub maleje, aż osiągnięty zostanie stan równowagi.

# Widmo promieniowania Słońca i zmiany wywołane pochłanianiem w atmosferze

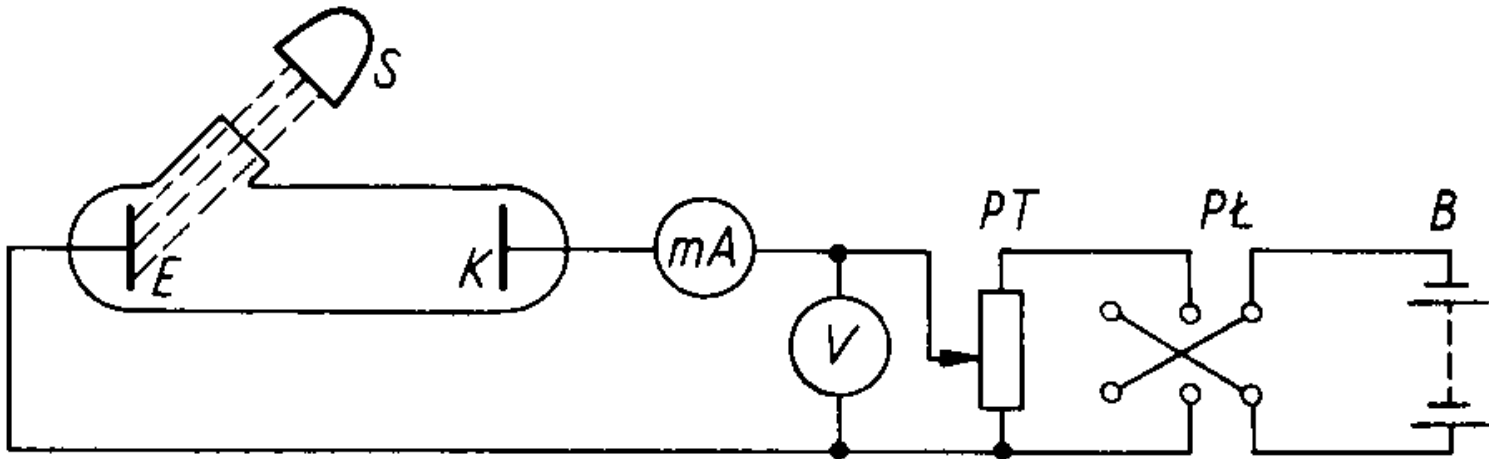


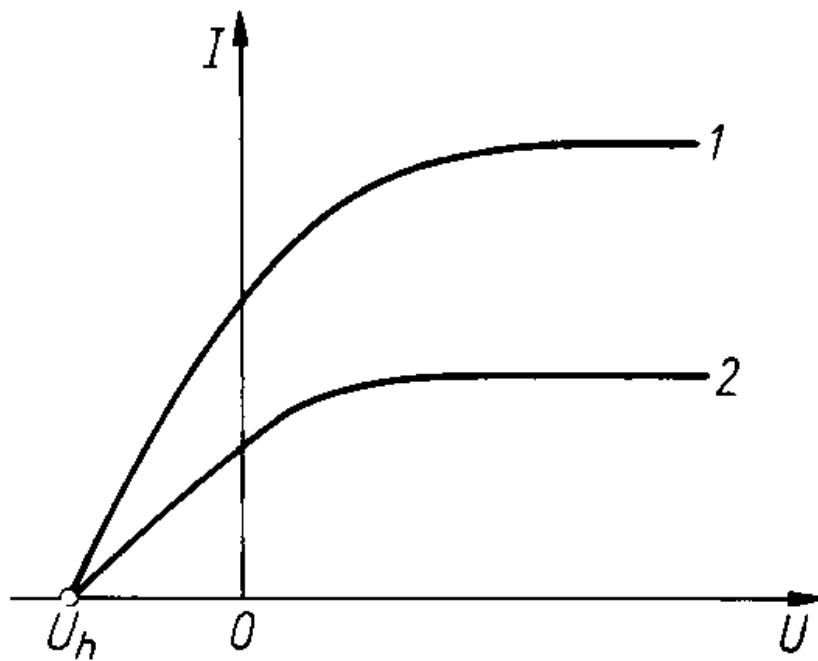
- Do powierzchni Ziemi dociera około  $935 \text{ W/m}^2$ .
- Reszta jest rozpraszana przez gazy, pyły zawarte w atmosferze oraz przez chmury.
- Każde z tych środowisk może tracić zaabsorbowaną energię.
- Ustala się stan równowagi cieplnej, wyrazem czego jest średnia temperatura tych środowisk:
- $15^{\circ}\text{C}$ - średnia temperatura powierzchni Ziemi,
- $-10^{\circ}\text{C}$ - średnia temperatura troposfery,
- $-38^{\circ}\text{C}$ - średnia temperatura stratosfery.



# ***Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne***

Polega na emisji elektronów z powierzchni metalu pod wpływem padającego promieniowania elektromagnetycznego światła.





Natężenie światła padającego na powierzchnię metalu w przypadku (1) jest większe niż w (2)

- Natężenie fotoprądu jest wprost proporcjonalne do natężenia światła.
- Natężenie fotoprądu nie zależy od częstotliwości padającego światła.
- Jeżeli  $U$  jest dostatecznie duże, to prąd osiąga nasycenie.
- Przy odpowiednio dużej ujemnej wartości  $U$  natężenie fotoprądu spada do zera ( $U_h$  - napięcie hamujące).
- $U_h$  zależy liniowo od częstotliwości światła.
- Miarą energii kinetycznej najszybszych elektronów jest

$$E_{k \max} = e \cdot U_h$$

# Kwantowa teoria zjawiska fotoelektrycznego (Einstein 1905)

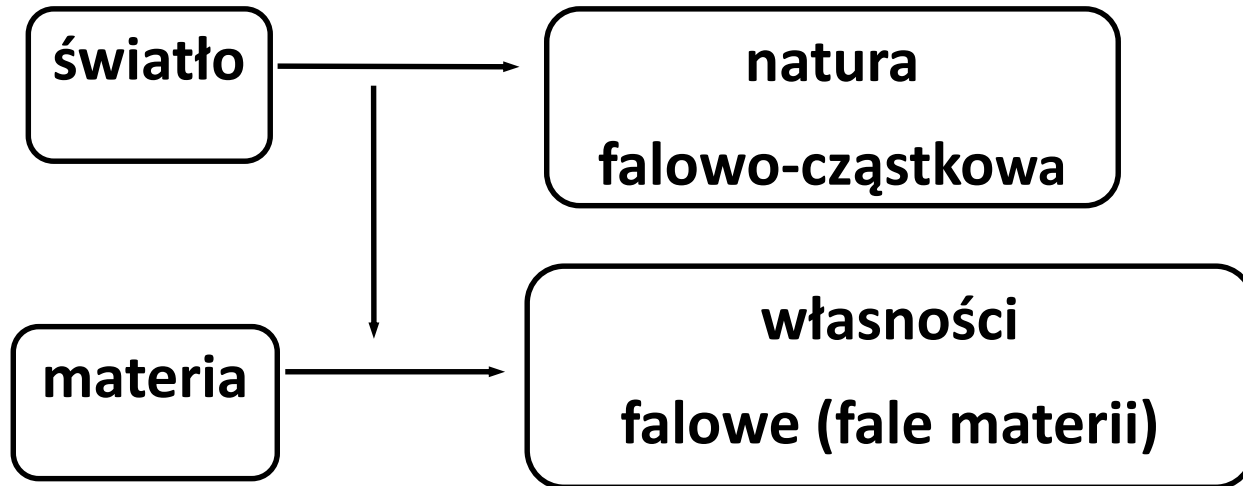
$$h \cdot \nu = W + E_{k \max}$$

$$W = h \cdot \nu_0$$

$$E_{k \max} = e \cdot U_h$$

W – praca wyjścia elektronu z metalu

# Falowe własności cząstek materialnych



Długość fal materii  $\lambda$  określona dla cząstki o pędzie  $p$  jest równa

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Hipoteza de Broglie'a została potwierdzona eksperymentalnie w roku 1927 przez *Davissona – Germera*

# Zasada nieoznaczoności Heisenberga

Iloczyn niepewności pomiaru pędu i pomiaru położenia cząstki jest zawsze nie mniejszy od stałej Plancka

$$\Delta p_x \Delta x \geq h$$

$$\Delta p_y \Delta y \geq h$$

$$\Delta p_z \Delta z \geq h$$

Ograniczenie dokładności pomiarów, zawarte w zasadzie Heisenberga, nie jest spowodowane niedokładnością przyrządów, lecz jest wynikiem falowej natury cząstki.

$$\Delta E \Delta t \geq h$$