

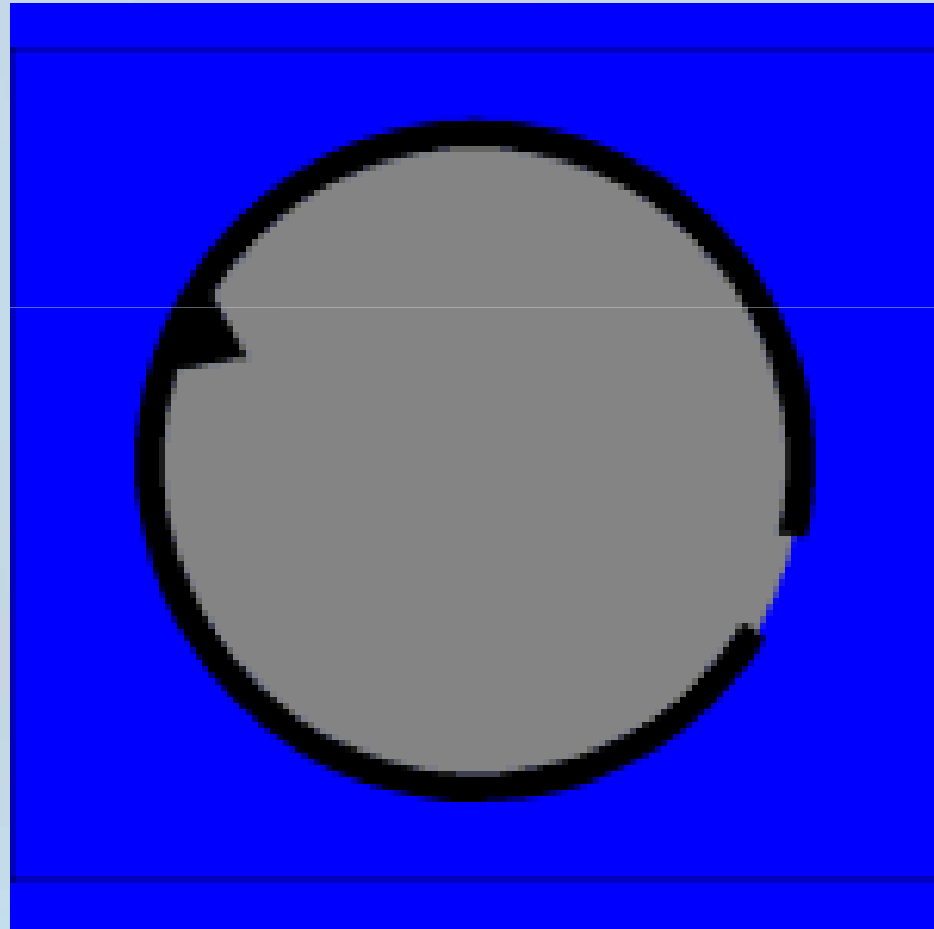
# **IDE-IDE DASAR MEKANIKA KUANTUM**

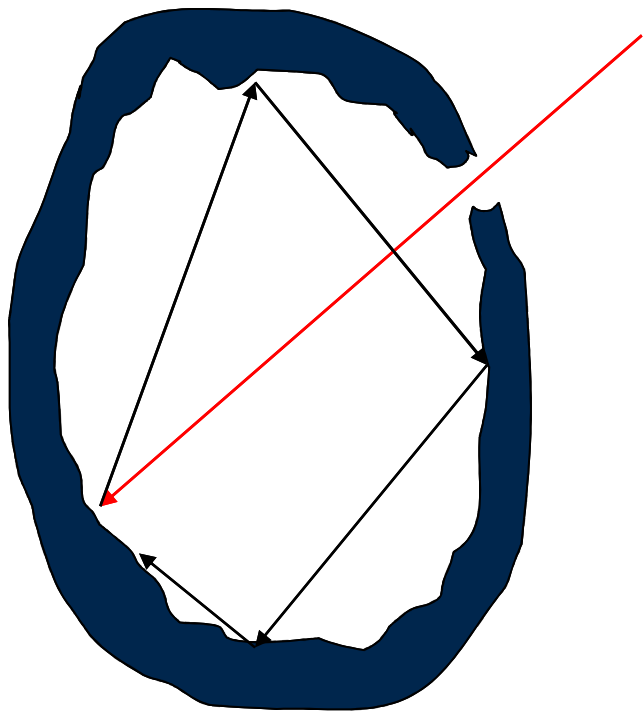
- **RADIASI BENDA HITAM**
- **EFEK FOTOLISTRIK DAN TEORI KUANTUM CAHAYA**
  - **EFEK COMPTON**
- **GELOMBANG MATERI: Relasi de Broglie dan Prinsip Ketidakpastian Heisenbergh.**
  - **PRINSIP HEISENBERGH**

# RADIASI BENDA HITAM

- Radiasi benda hitam  $\equiv$  *blackbody radiation*  $\equiv$  *cavity radiation*
- **Benda hitam**  $\equiv$  suatu benda yang menyerap seluruh radiasi elektromagnetik yang datang kepadanya (daya absorpsi = 1).
- ***Blackbody radiation*** or "***cavity radiation***" refers to an object or system which absorbs all radiation incident upon it and re-radiates energy which is characteristic of this radiating system only, not dependent upon the type of radiation which is incident upon it.

Benda hitam diaproximasikan sebagai suatu rongga yang diberi lubang kunci sbb.





Setiap berkas cahaya yang masuk rongga akan jatuh pada dinding dalam dan akan mengalami penyerapan energi oleh dinding. Sisanya dipantulkan sedemikian rupa seterusnya, sehingga seluruh energi berkas cahaya itu habis diserap oleh dinding.

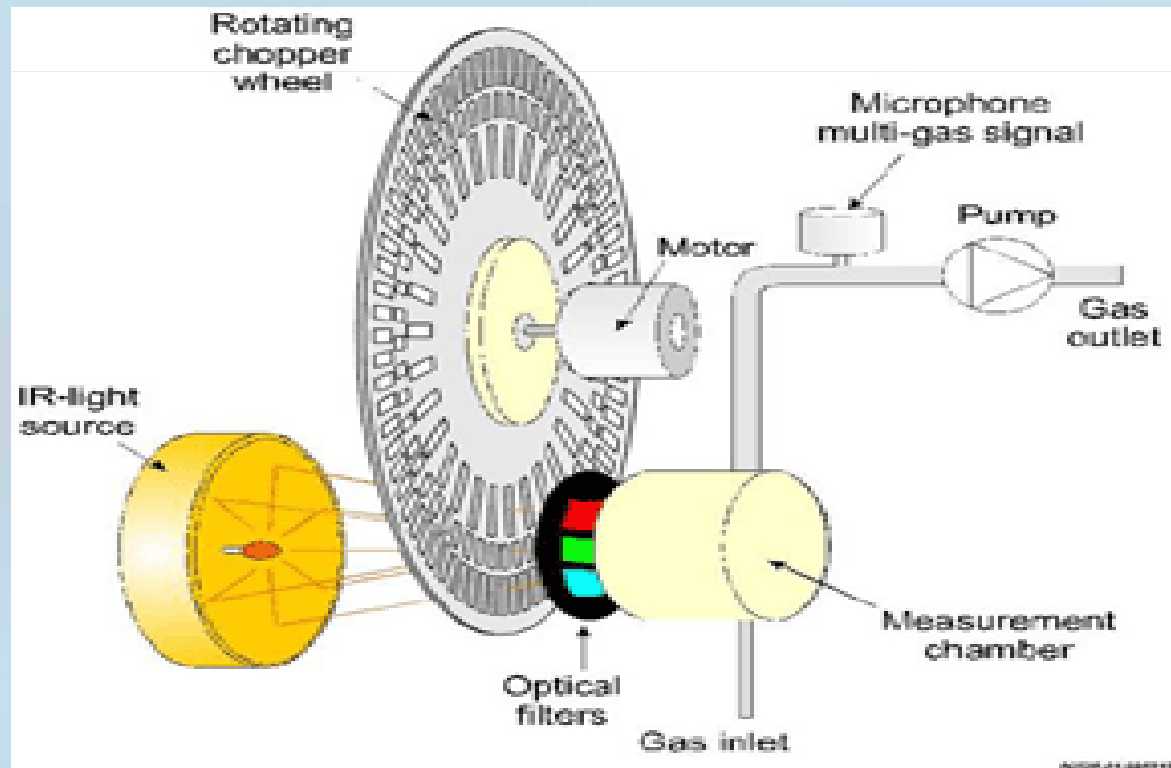
## a. Hasil-Hasil Empiris

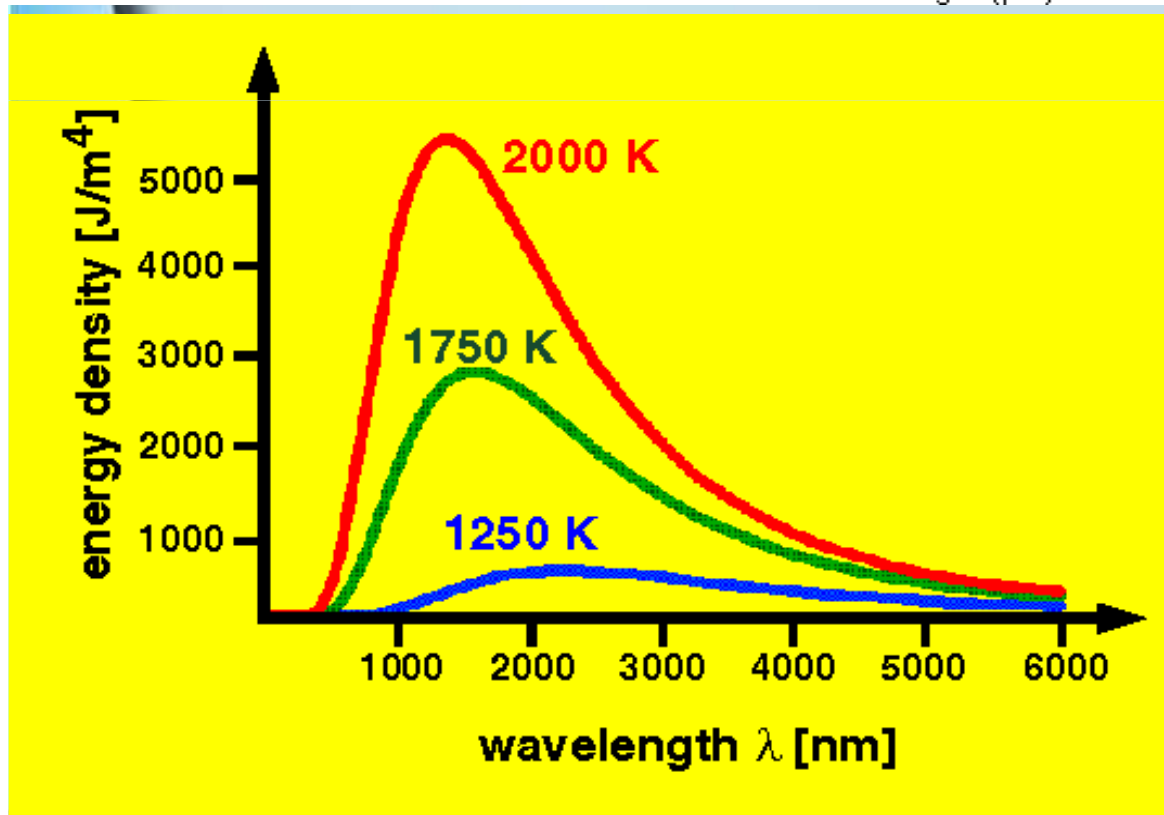
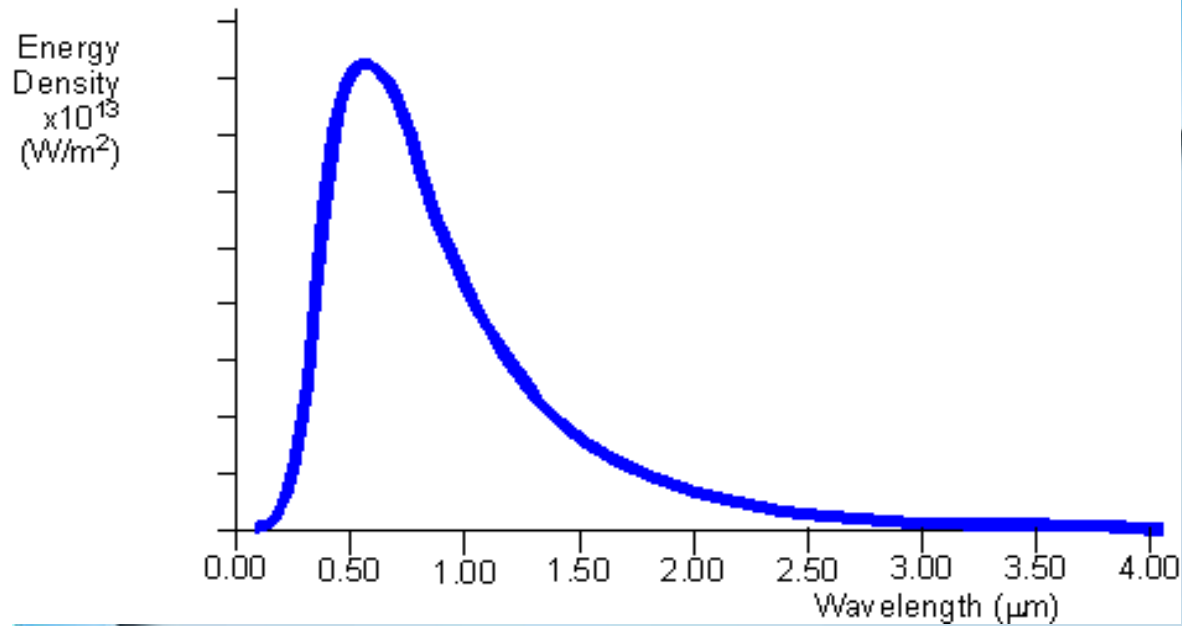
- **Thomas Wedgwood dan Erasmus Darwin (1772)** telah melakukan pengamatan terhadap karakter universal seluruh benda di dalam oven yang tak bergantung pada bentuk fisis dan susunan kimianya, akan menjadi merah pada suhu yang sama.



# a. Hasil-Hasil Empiris

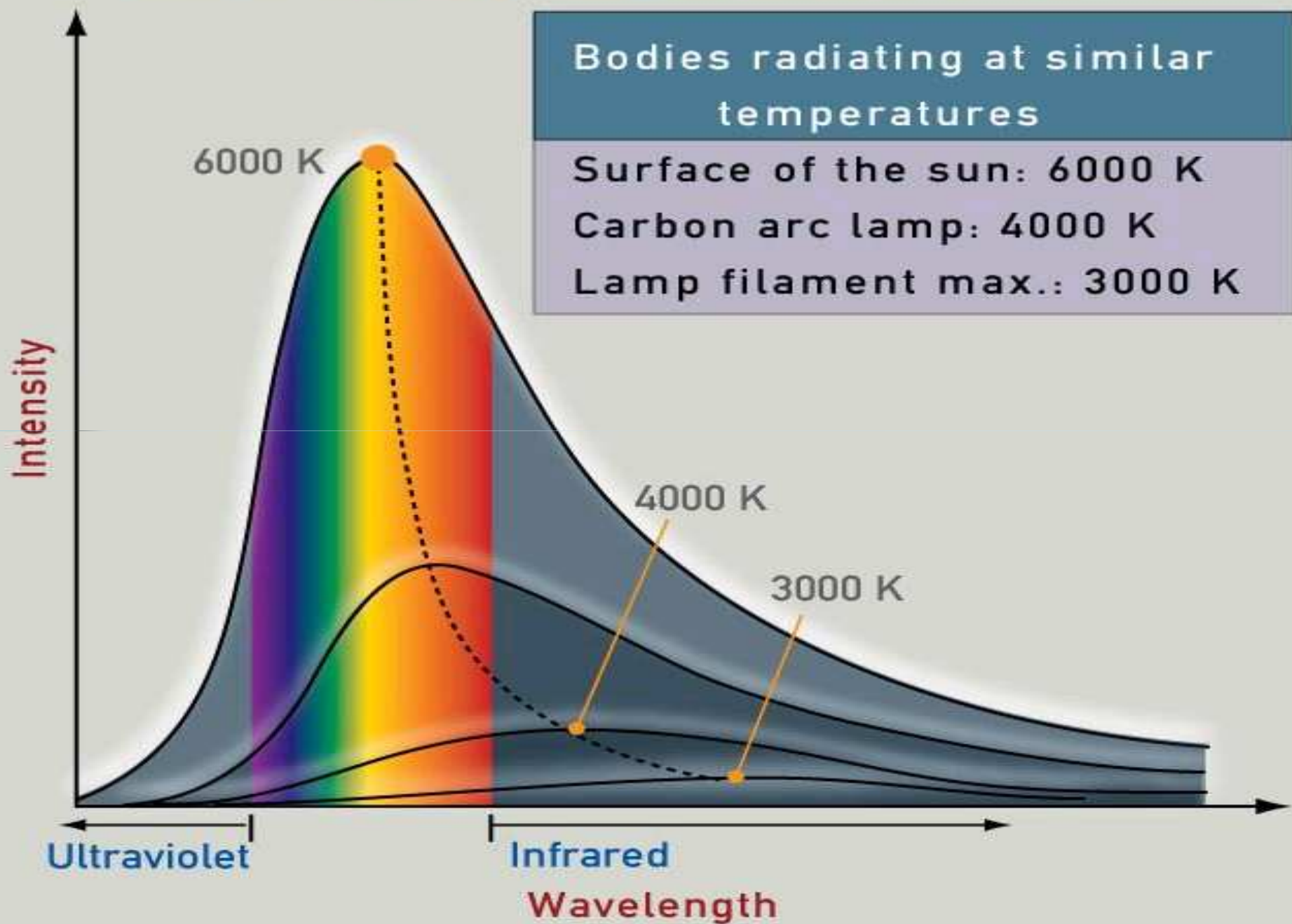
- Dengan menggunakan teknik spektroskopi (Thn 1800-an) diketahui bahwa benda padat berpijar akan memancarkan spektrum kontinu dibandingkan dengan spektrum garis (pita) yang dipancarkan oleh gas panas.





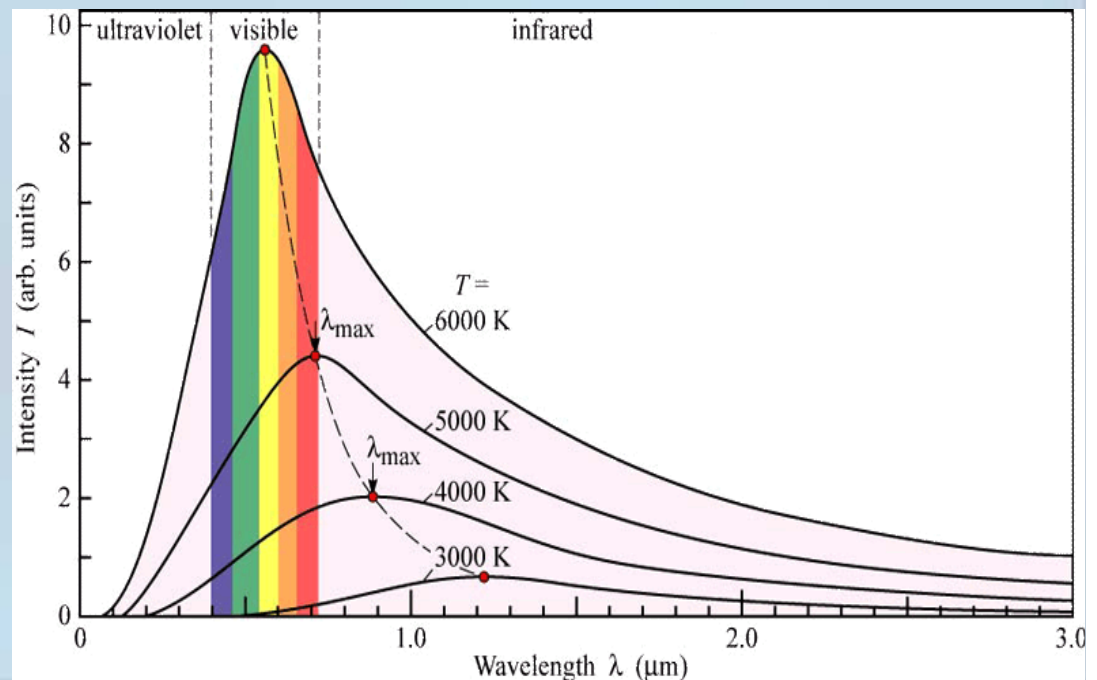
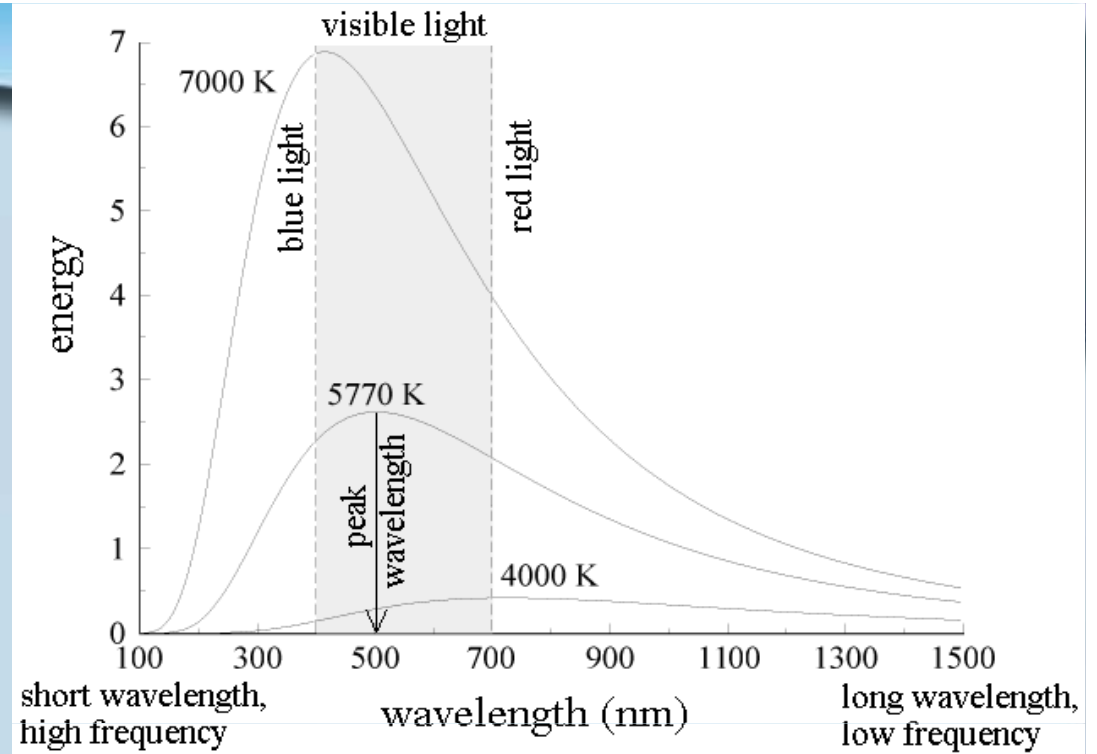
Pancaran padatan berpijar memiliki jumlah emisi radiasi (luas di bawah kurva) meningkat dengan naiknya suhu.

# Blackbody Radiation Curves





Telah dipelajari dalam Fisika Modern tentang hubungan Radiasi Spektral,  $R_T(\nu)$ , untuk berbagai suhu  $T$  dari suatu benda hitam sempurna, dimana grafik hubungan  $R_T(\nu)$  terhadap frekuensi  $\nu$  adalah:



**Gustav Robert Kirchhoff (1860)** membuktikan secara teoritis yang argumentasinya didasarkan pada telaah termodinamika bahwa “**untuk setiap benda yang berada dalam kesetimbangan termal dengan radiasi daya pancarnya berbanding lurus dengan daya serapnya**”, yaitu

$$e_f = J(f, T) A_f$$

$e_f$  = daya pancaran persatuan luas persatuan frekuensi dari suatu benda panas;  $A_f$  = daya absorpsi; dan  $J(f, T)$  = fungsi universal (sama untuk seluruh benda) yang hanya bergantung pada frekuensi cahaya dan temperatur absolut benda.

Untuk benda hitam, Kirchhoff merumuskan  
 $A_f = 1$  untuk semua frekuensi, sehingga

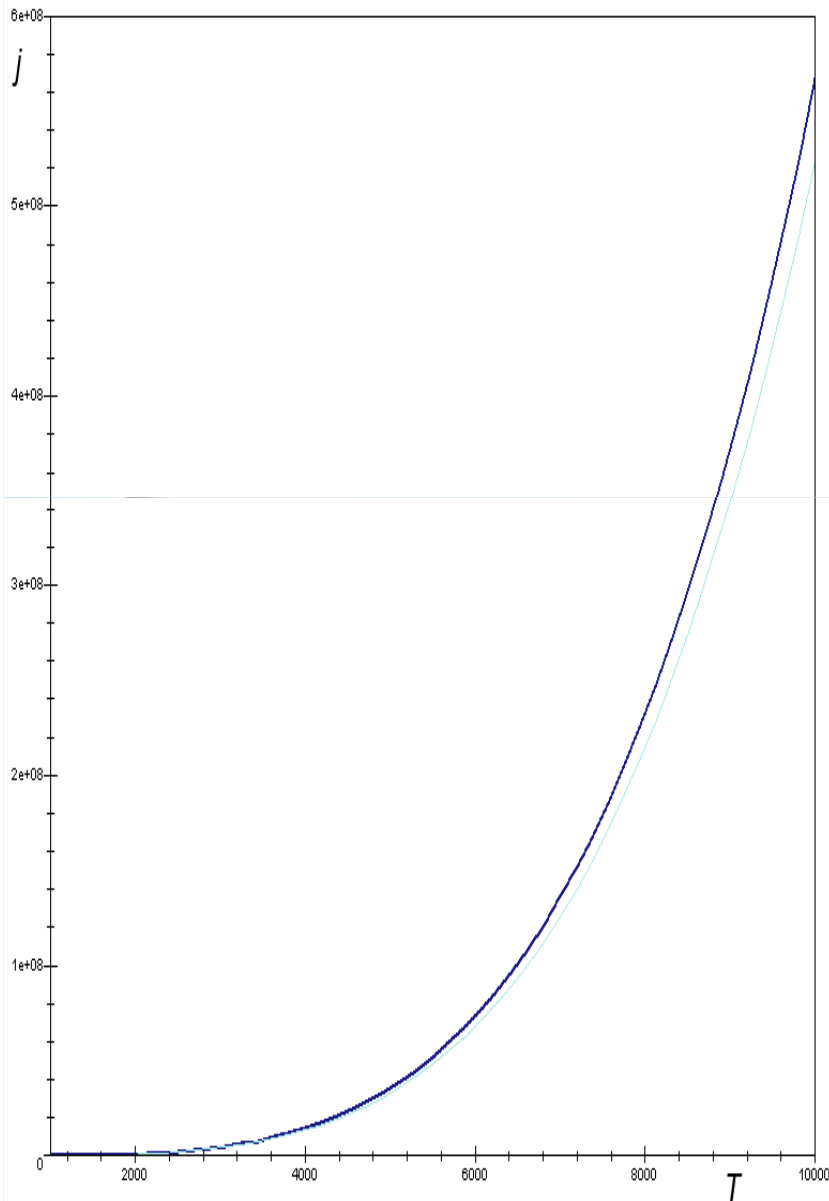
$$e_f = J(f, T)$$

**Persamaan tersebut** menunjukkan bahwa daya pancaran persatuan luas persatuan frekuensi oleh benda hitam hanya bergantung pada temperatur dan frekuensi cahaya serta tidak bergantung pada bentuk fisis dan unsur kimia penyusunnya.

Cocok dengan  
eksperimen  
Wedgwood dan  
Darwin



# HUKUM STEFAN

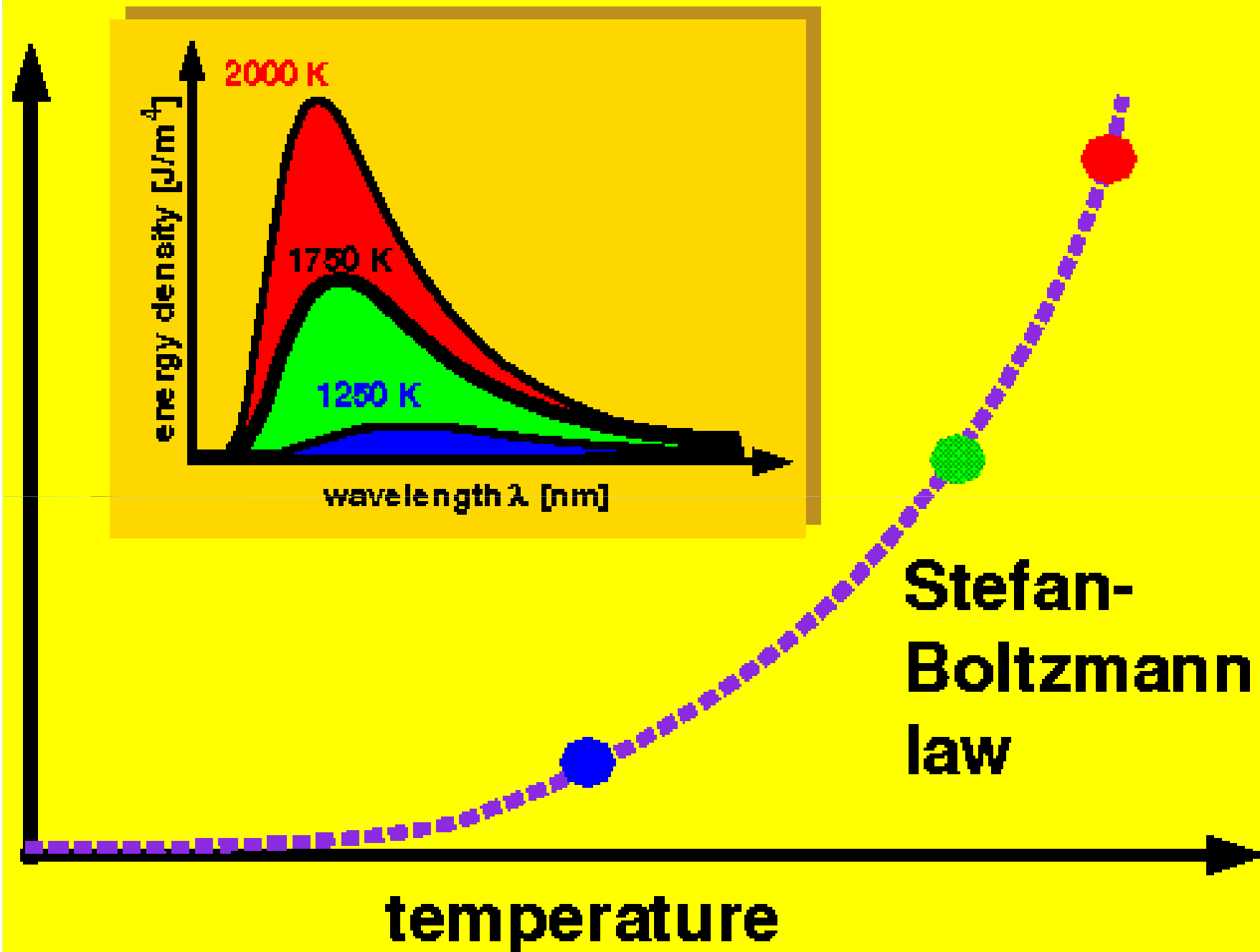


Berdasarkan hasil eksperimen (1879) Stefan menyatakan bahwa radiasi total suatu benda hitam sempurna berbanding lurus dengan suhu mutlaknya pangkat empat.

**Hukum Stefan** (Hk. Stefan-Boltzmann) tersebut adalah

$$J = \sigma T^4$$

Dengan  $J$  = radiasi total,  $\sigma$  = tetapan stefan-boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ wm}^{-2} \text{ K}^4$ ), dan  $T$  = suhu mutlak.



## Catatan:

Hukum Stefan juga dapat dituliskan sebagai

$$e_{total} = \int_0^{\infty} e_f d_f = \sigma T^4$$

Dengan  $e_{total}$  adalah daya persatuan luas yang dipancarkan benda hitam.

Untuk benda yang bukan benda hitam (radiator) persamaan tersebut dapat dinyatakan sebagaiberikut

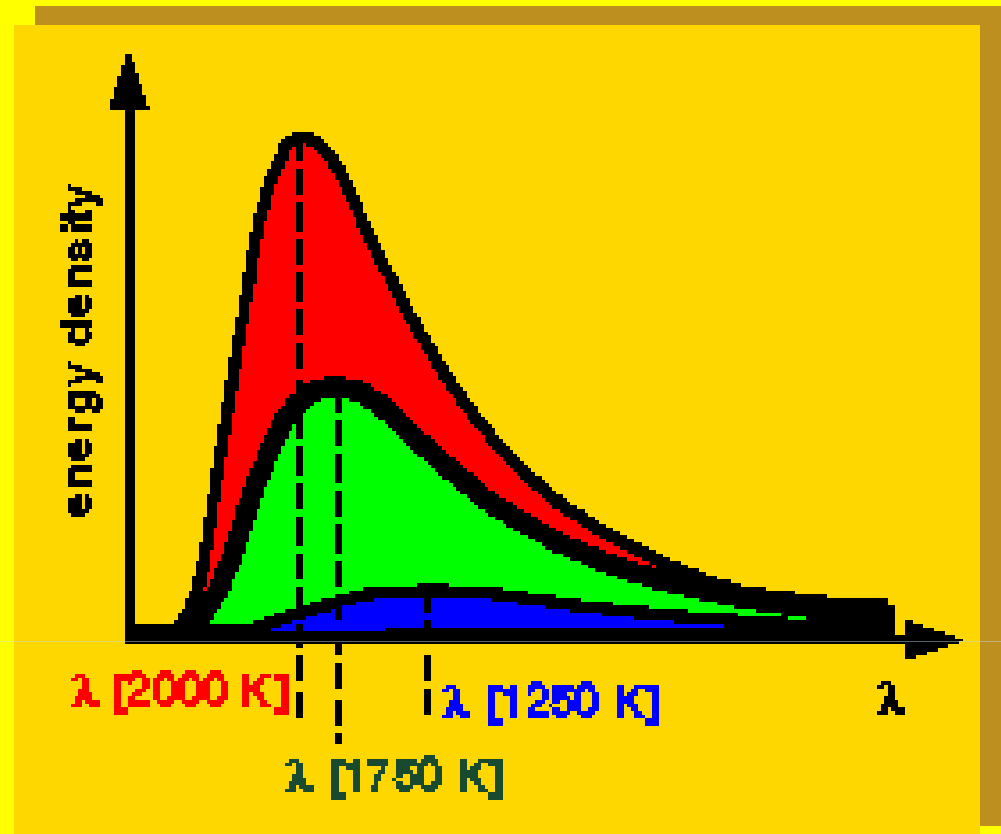
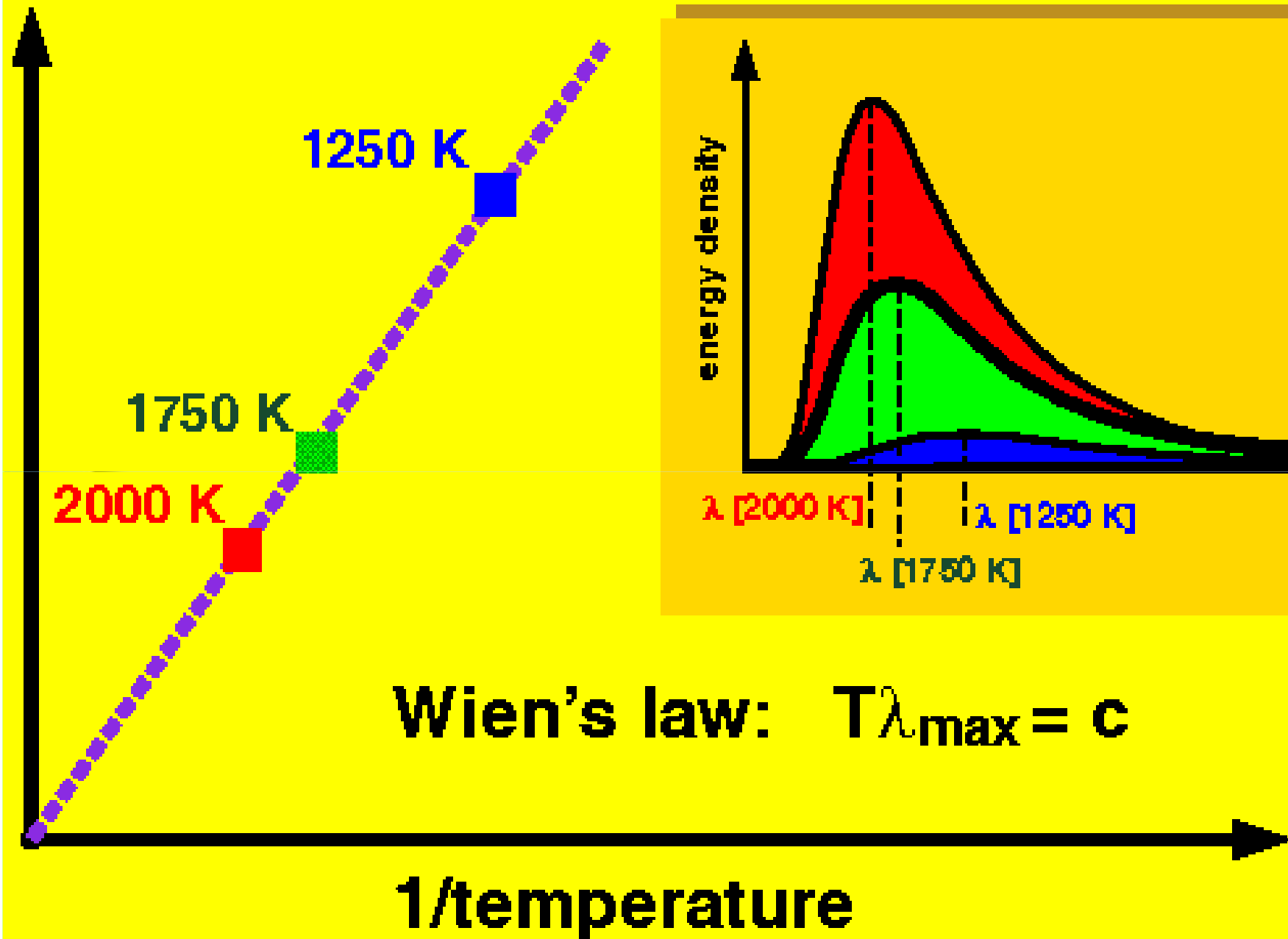
$$e_{total} = A\sigma T^4$$

dengan  $0 < A < 1$

# HUKUM PERGESERAN WIEN

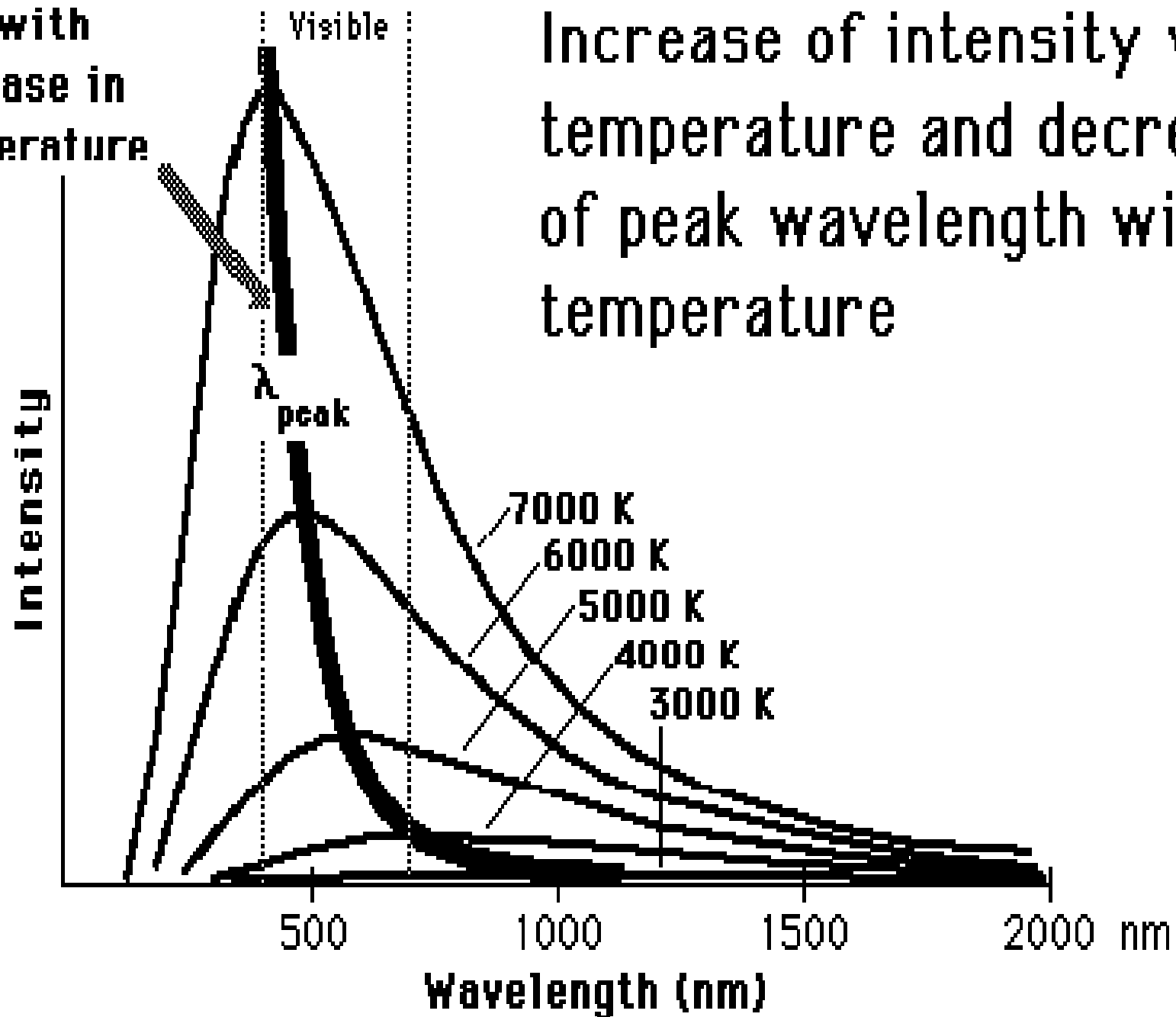
Wien menyatakan ada hubungan antara suhu suatu benda hitam sempurna dan panjang gelombang dalam mana radiasi total akan berharga maksimum pada  $\lambda_{\text{maks}}$ , yaitu:

$$\lambda_{\text{maksimum}} \cdot T = \text{konstan}$$
$$= 2,898 \times 10^{-3} \text{ (mK)}$$





Decrease in  $\lambda_{\text{peak}}$  with increase in temperature



# USAHA-USAHA PENJELASAN TEORITIS

Rayleigh dan Jeans mengemukakan telaah teoritisnya di dasarkan pada teori equipartisi dalam mencari hubungan antara rapat energi ( $\rho_T$ ) dengan frekuensi ( $\nu$ ), yaitu:

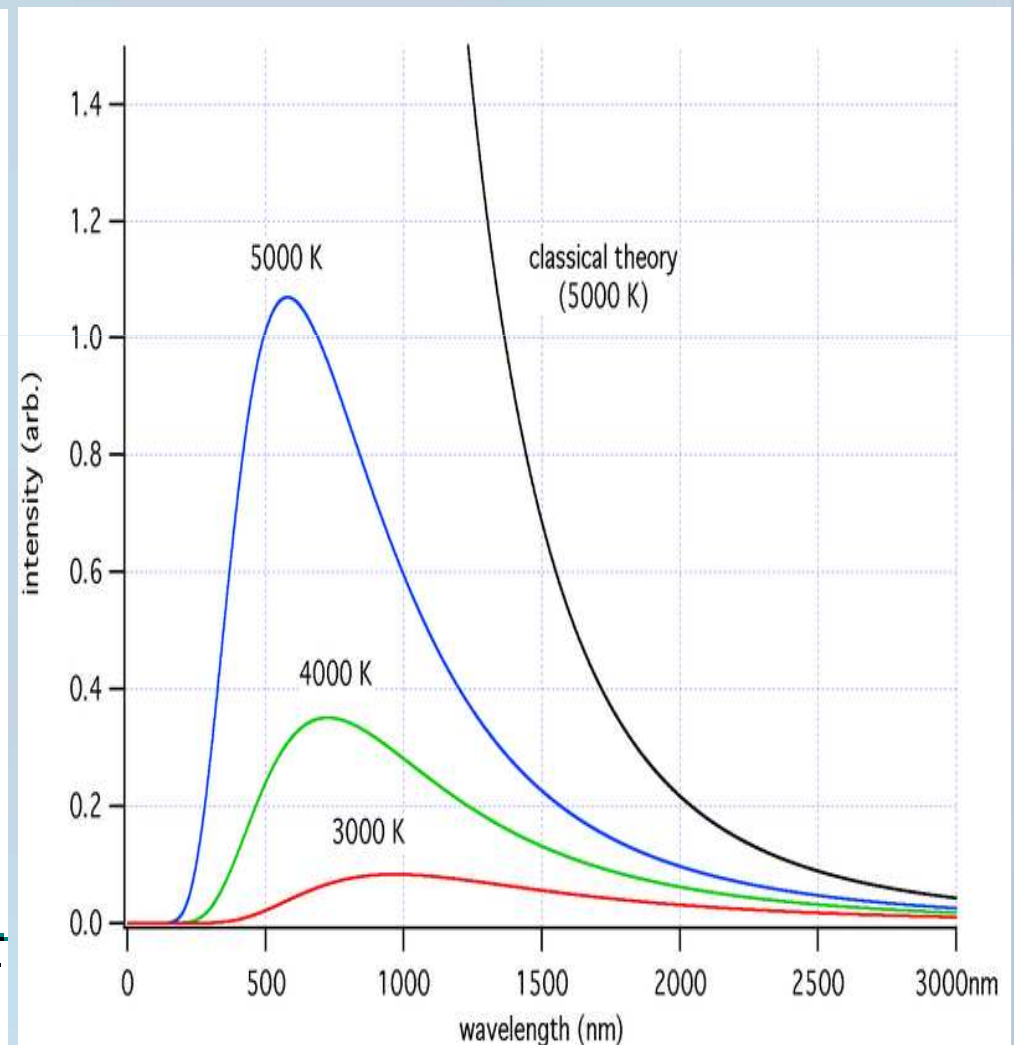
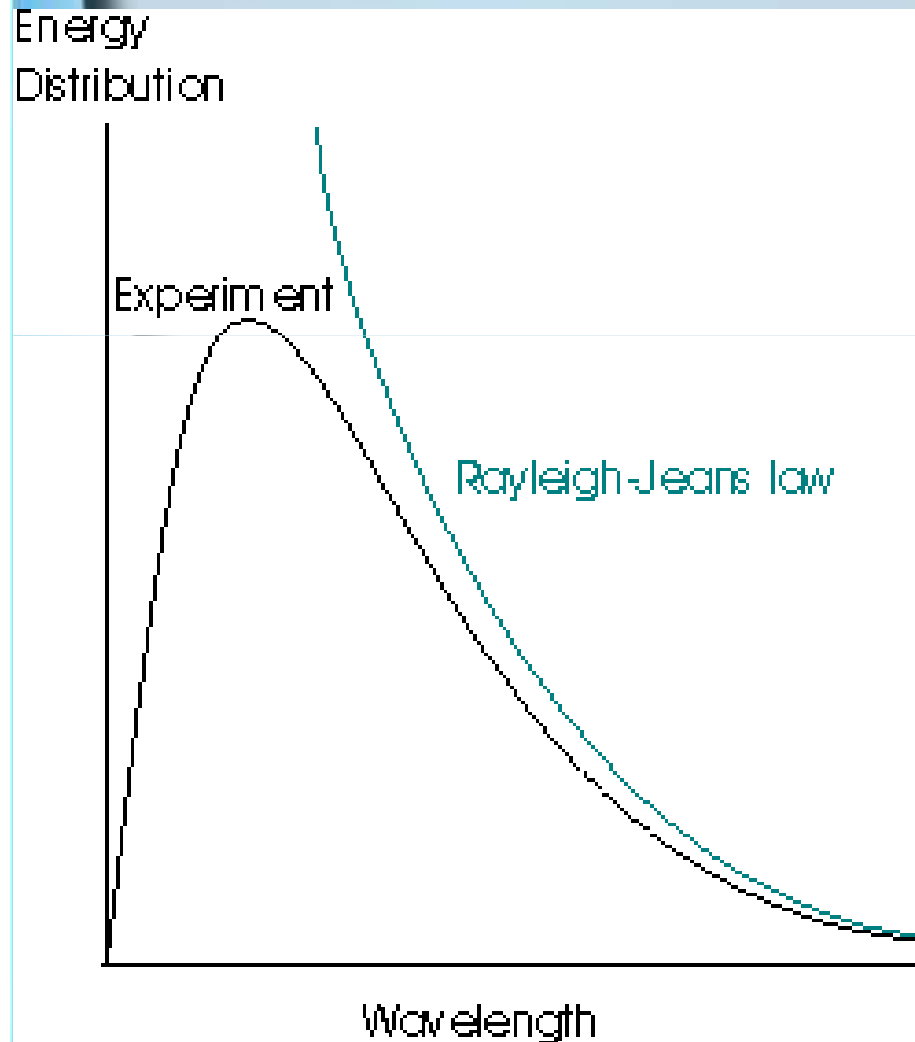
$$\rho_T(\nu) = \frac{(8\pi\nu^2 kT)}{c^3}$$

Equipartisi  
Energi:

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

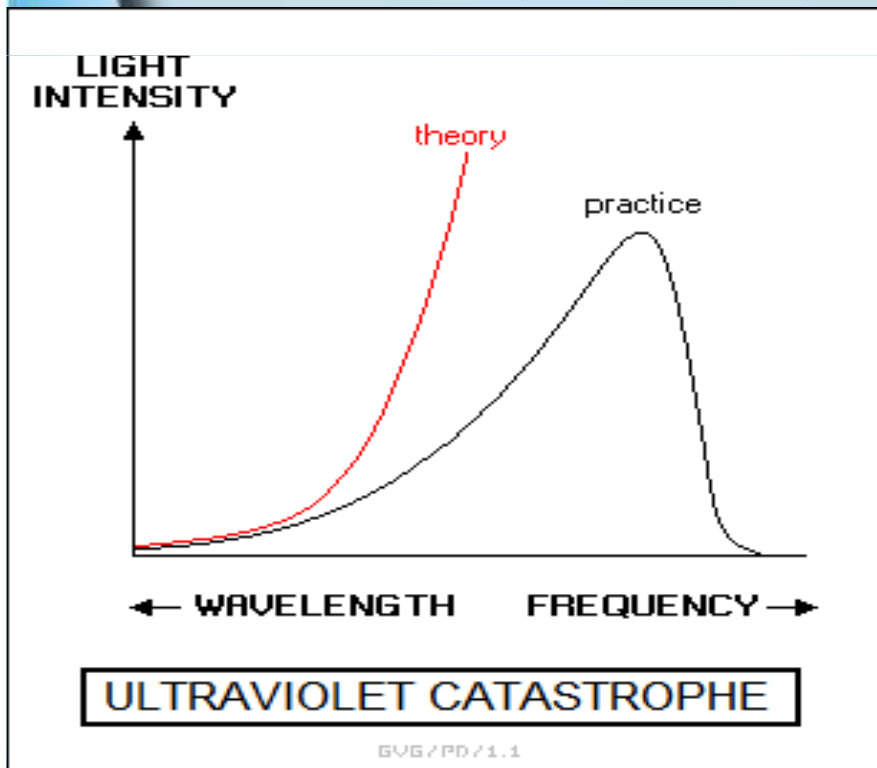
dengan  
 $\rho$  adalah rapat energi dan  $\nu$  adalah frekuensi.

# PLOT GRAFIK PENJELASAN TEORI RAYLEIGH-JEANS



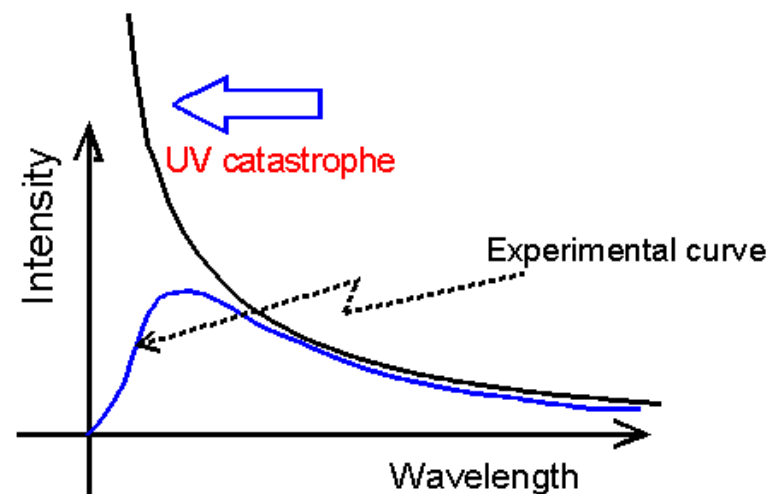
# BENCANA ULTRAVIOLET

Ternyata Hk. Rayleigh-Jeans tidak sesuai dengan data eksperimen, yaitu pada frekuensi rendah ( $\lambda$  besar) masih sesuai dengan eksperimen, tetapi pada frekuensi tinggi ( $\lambda$  kecil), yaitu pada daerah UV, rapat energinya menyimpang jauh menuju tak hingga ( $\equiv$  **bencana ultraviolet**).



## The Ultraviolet Catastrophe

Unfortunately, the theory disagree violently with experiment



# POSTULAT PLANCK

- ◆ Energi yang dapat dimiliki oleh osilator tidak kontinu melainkan berharga diskrit (*Quantization of energy*) yaitu kelipatan dari  $h\nu$  dengan  $h$  = konstanta Planck dan  $\nu$  = frekuensi getaran.
  - ◆ Sebaran energi osilator menganut distribusi Boltzmann yaitu bahwa kebolehjadian suatu osilator mempunyai energi antara  $\varepsilon$  dan  $(\varepsilon + d\varepsilon)$  adalah :

$$P(\varepsilon) d\varepsilon = \left[ \frac{e^{-\varepsilon/KT}}{kT} \right] d\varepsilon$$

# IMPLIKASI POSTULAT PLANCK

- ◆ Energi rata-rata osilator menurut Planck menjadi

$$\bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

- ◆ Sedangkan rapat energi dalam rongga adalah

$$\rho_{T(\nu)} d\nu = \bar{\varepsilon} N_{(\nu)} d\nu$$

$N_{(\nu)}$  = rapat mode getar gelombang EM di dalam rongga.

- ◆ Jumlah getaran per satuan volume dengan frekuensi antara  $\nu$  dan  $(\nu+d\nu)$  adalah

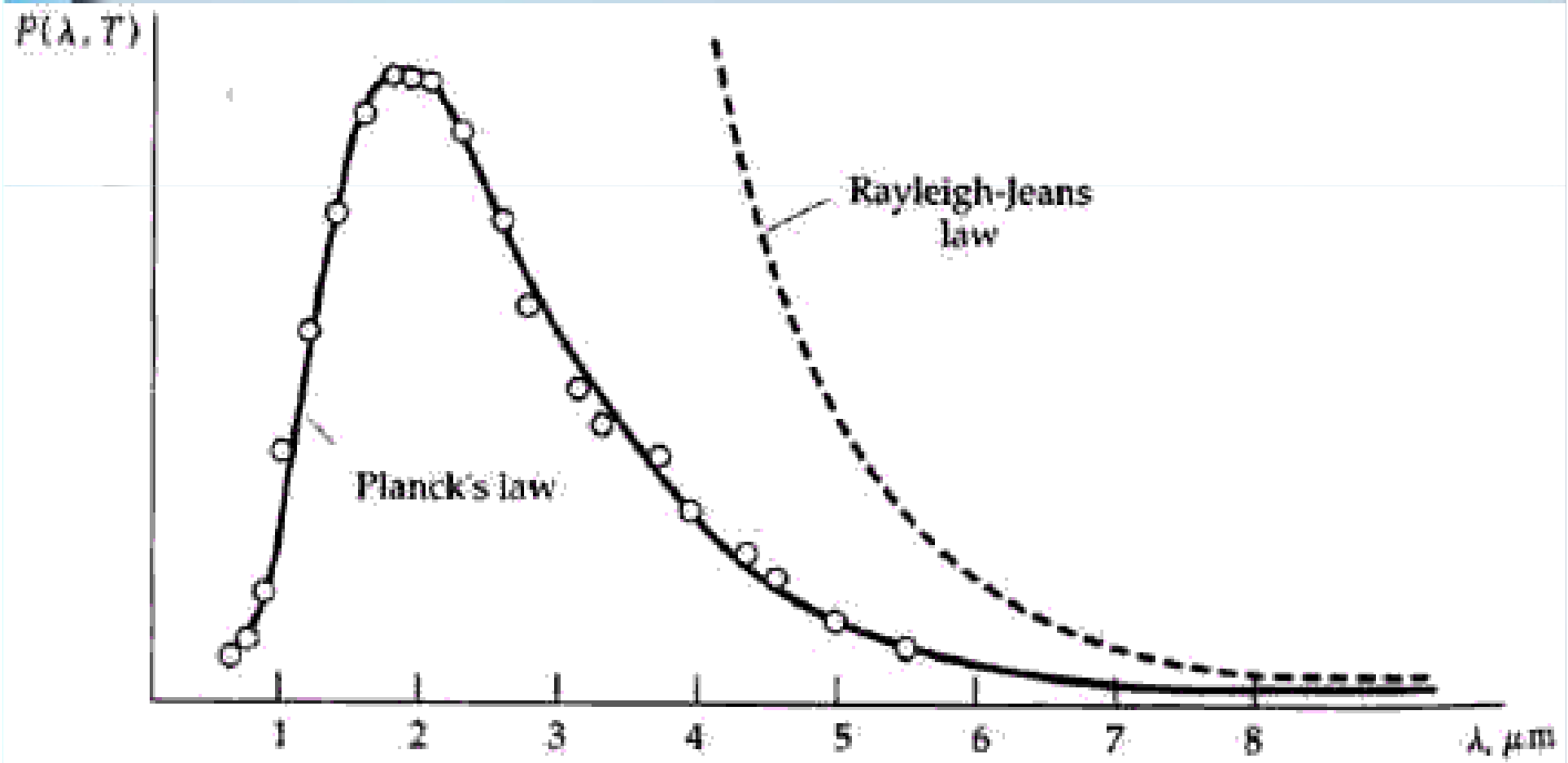
$$N(\nu) d\nu = [(8\pi\nu^2) / c^3] d\nu$$

- ◆ Sehingga rapat energi dalam rongga menurut Planck adalah

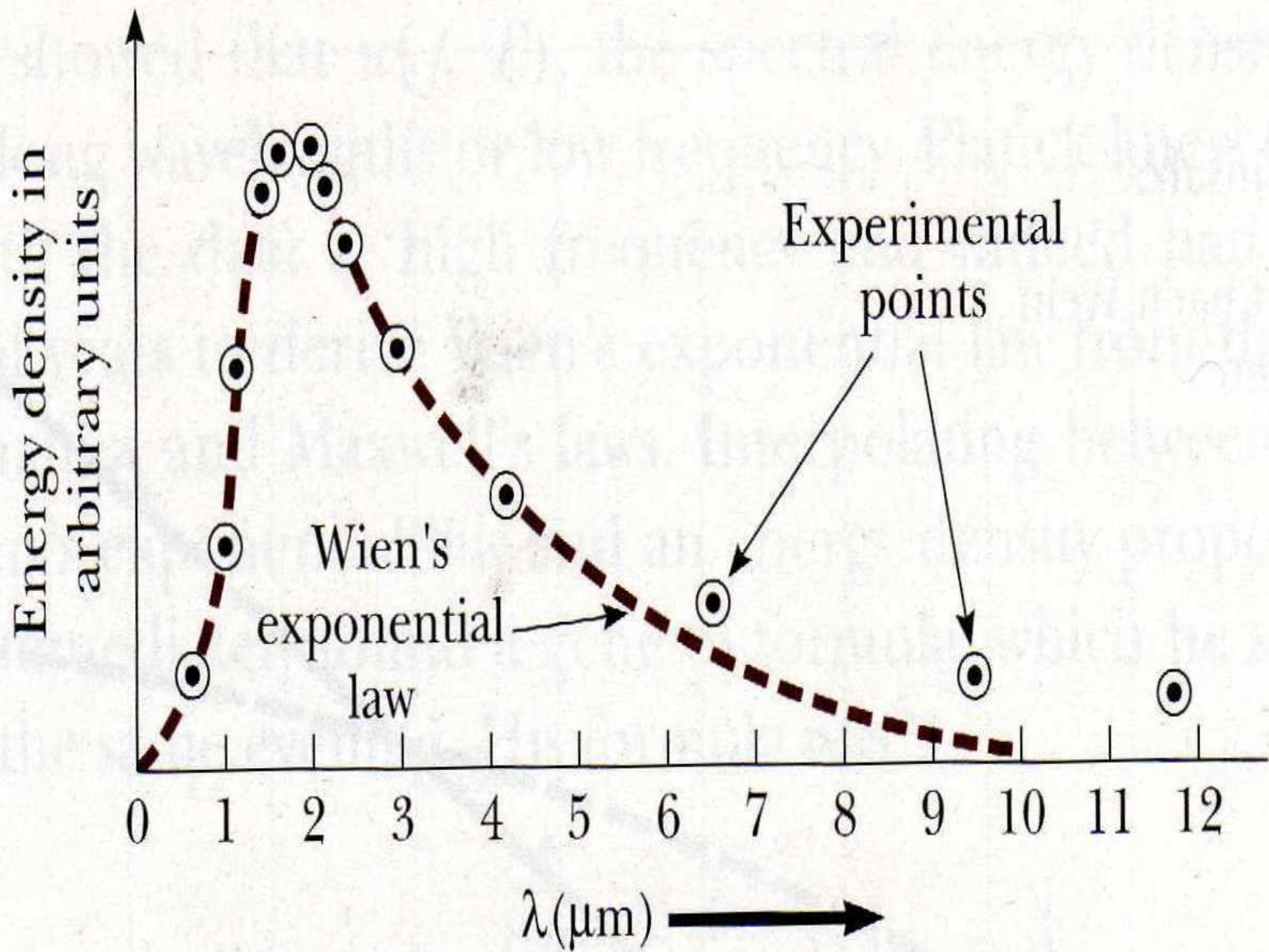
$$\rho_{T(\nu)} d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{(e^{h\nu/kT} - 1)} d\nu$$

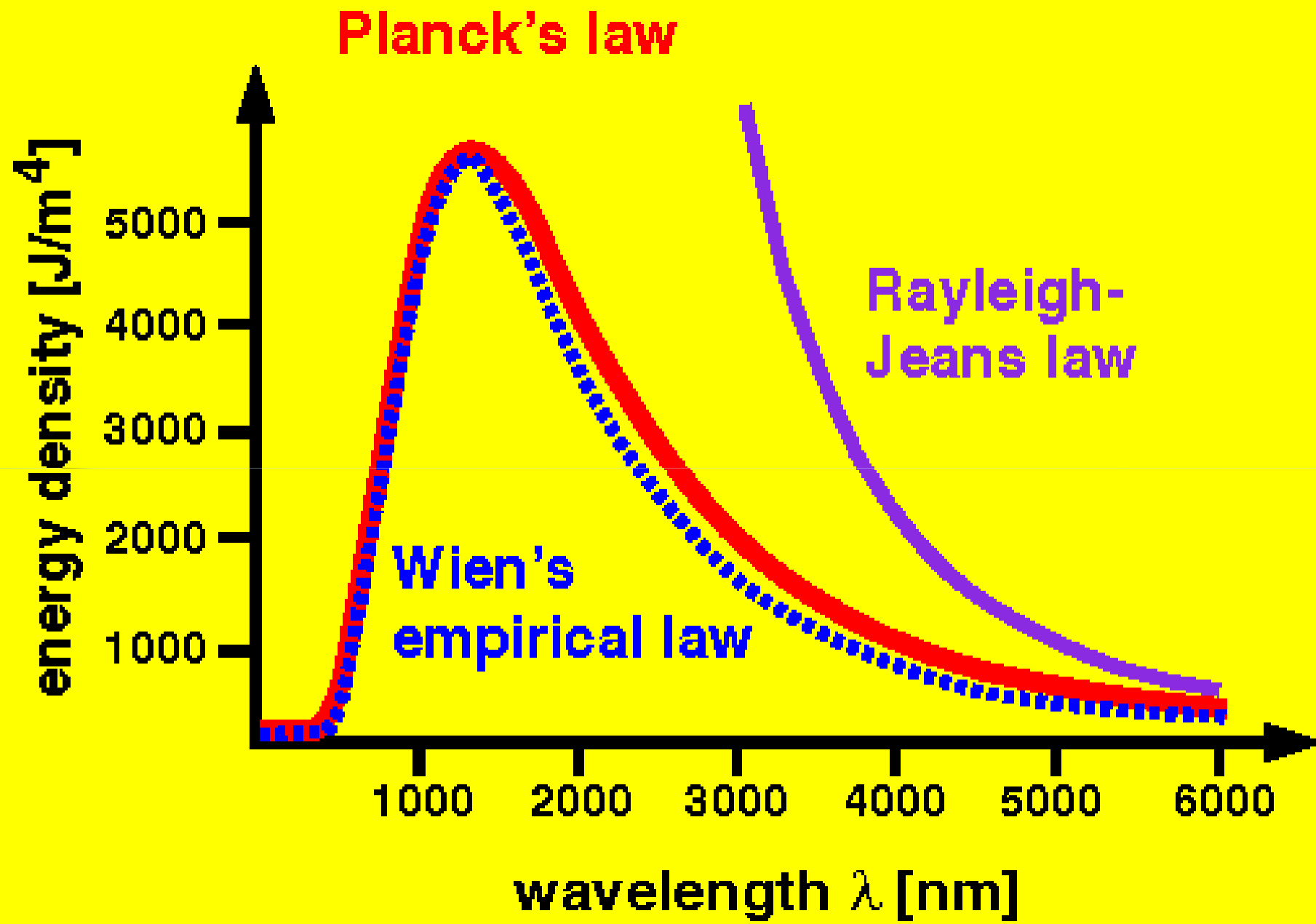
**PR 1**  
**Buktikan**  
**Persamaan**  
**ini.**

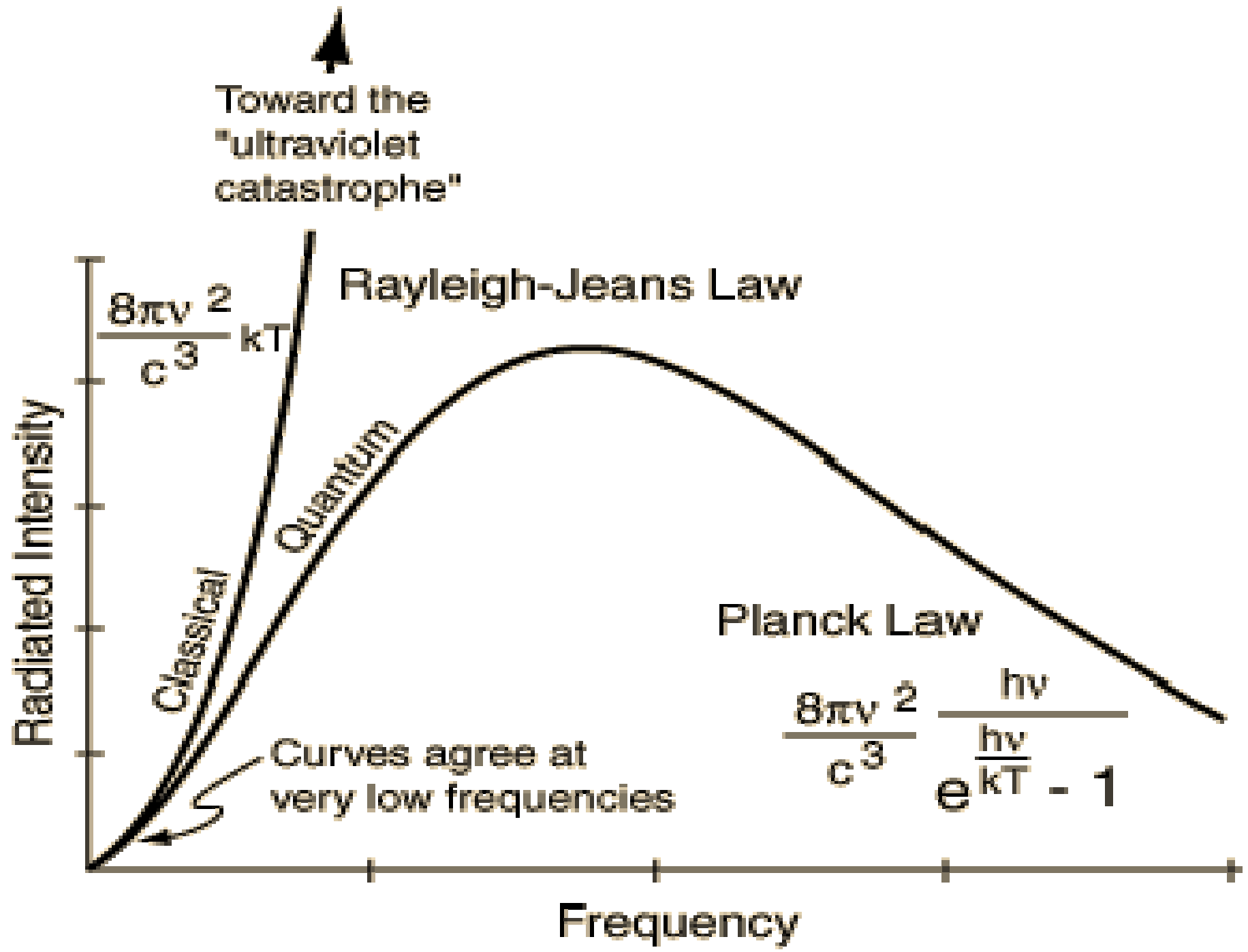
# PLOT GRAFIK HUBUNGAN RAPAT ENERGI TERHADAP FREKUENSI MENURUT PLANCK

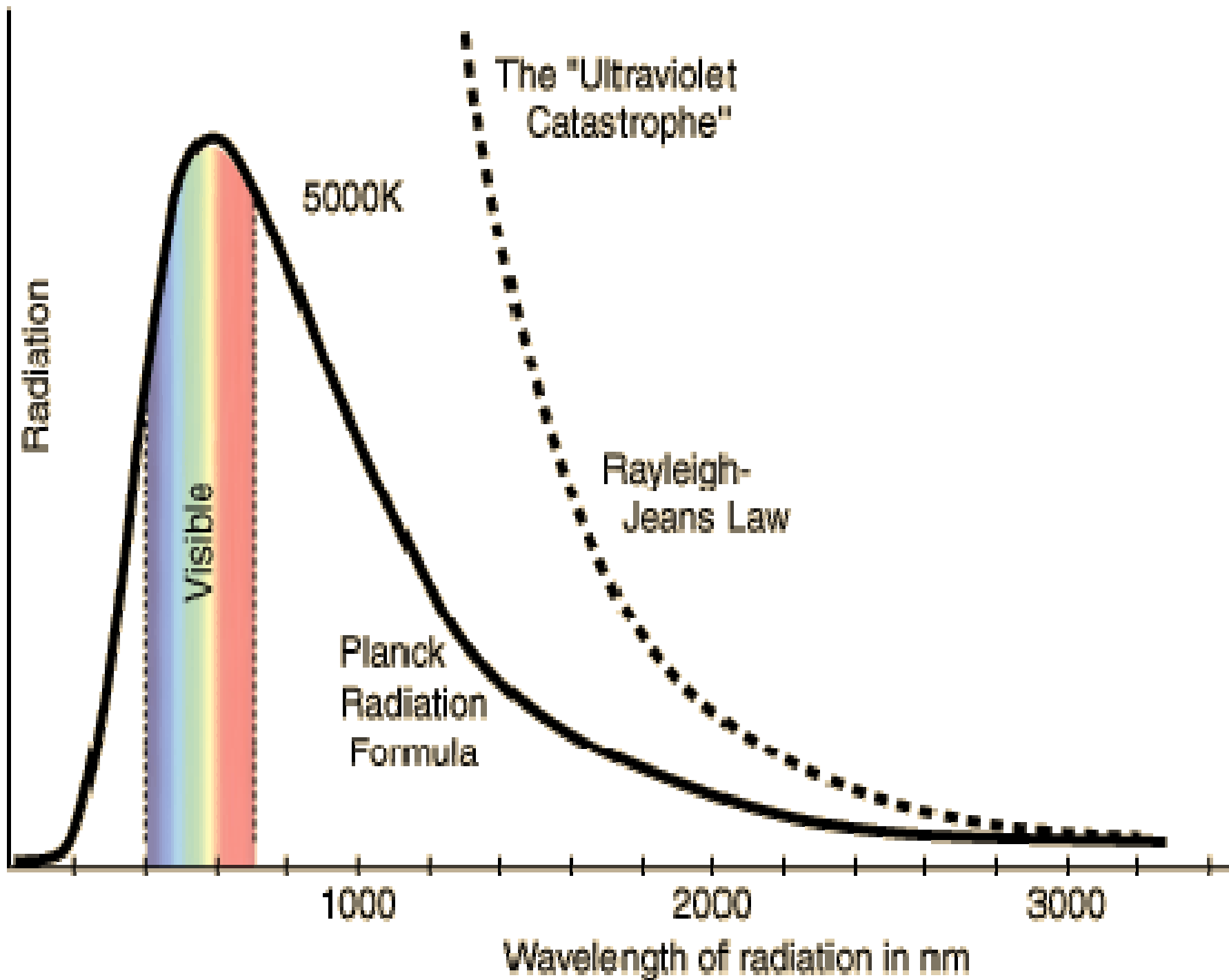












- ◆ Grafik yang dibuat berdasar rumusan teoritik Planck tepat berimpit dengan grafik hasil eksperimen baik untuk frekuensi tinggi (daerah UV) maupun untuk frekuensi rendah (daerah IR).
- ◆ Terbukti bahwa asumsi PLANCK adalah benar, yang dirumuskan dalam postulat “Energi osilator harmonik dengan frekuensi  $\nu$  terbatas pada harga yang merupakan kelipatan dari  $h\nu$ .”
  - ◆ Planck mendapat NOBEL tahun 1918.

# PENJELASAN TEORITIS PLANCK TERHADAP HUKUM STEFAN

- ◆ Berdasarkan rumusan rapat energi osilator dalam rongga dari Planck dan dengan memisalkan  $x = (h\nu)/(kT)$  atau  $\nu = xkT/h \Rightarrow d\nu = [kT/h] dx$ , maka

$$\rho_T(x)dx = \left( \frac{8\pi k^4}{c^3 h^3} \right) T^4 \frac{x^3 dx}{e^x - 1}$$

- ◆ Jumlah energi yang dikandung tiap satuan volume rongga sebuah benda hitam dalam seluruh spektrumnya:

$$J = \int_0^{\infty} \rho_T(x)dx = \left( \frac{8\pi k^4}{c^3 h^3} \right) \left[ \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \right] T^4$$

Berdasarkan persamaan tersebut terlihat bahwa energi radiasi total yang keluar dari lubang di dinding sebanding dengan pangkat empat suhu mutlaknya:

**PR 2**  
**Buktikan**

$$J \sim T^4 \text{ atau } J = \sigma T^4$$

Dengan  $\sigma =$  konstanta Boltzmann

$$\sigma = \frac{8\pi k^4}{c^3 h^3} \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^2}$$

# PENJELASAN TEORITIS PLANCK TERHADAP HUKUM PERGESERAN WIEN

- ◆ Fungsi  $\rho_T(x)$  melukiskan grafik setara dengan  $E(\lambda)$  dan memiliki harga maksimum pada  $x$  maksimum dimana letak maksimum ini dapat diperoleh dari:

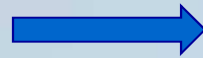
$$\frac{d\rho_{(x)}}{dx} = 0$$



$$\text{untuk } x = x_{\max} \rightarrow x = \frac{hc}{\lambda kT}$$

- ◆ Sehingga dapat dituliskan

$$\left[ \frac{hc}{\lambda kT} \right]_{\max} = x_{\max}$$



$$\lambda_{\max} \cdot T = \frac{hc}{kx_{\max}} = \text{konst}$$

Tepat sama sesuai Hk. Pergeseran Wien



# PENJELASAN TEORITIS PLANCK TERHADAP TEORI RAYLEIGH-JEANS

- ◆ Bila rumusan Planck tentang rapat energi osilator dalam rongga diubah dalam term panjang gelombang, maka

$$\rho_{(\lambda)} d\lambda = \frac{-8\pi hc}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

**PR 3**  
**Buktikan**

Faktor  $e^{hc/\lambda kT}$  dapat disederhanakan, sehingga diperoleh

$$\rho_{(\lambda)} d\lambda = \frac{-8\pi kT}{\lambda^4} d\lambda \text{ atau } \rho_{(\nu)} = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} kT$$

Tepat sama sesuai teori R-J