PENGENALAN ASTROFISIKA

Hukum Pancaran

Untuk memahami sifat pancaran suatu benda kita hipotesakan suatu pemancar sempurna yang disebut benda hitam (*black body*)

- **Pada keadaan kesetimbangan termal, temperatur benda hanya ditentukan oleh jumlah energi yang diserapnya perdetik**
- **Suatu benda hitam tidak memancarkan seluruh gelombang elektromagnet secara merata. Benda hitam bisa memancarkan cahaya biru lebih banyak dibandingkan dengan cahaya merah, atau sebaliknya.**

Menurut Max Planck (1858 – 1947), suatu benda hitam yang temperaturnya T akan memancarkan energi berpanjang gelombang antara λ dan $\lambda + d\lambda$ dengan intensitas spesifik $B_\lambda(T)\, d\lambda$ sebesar

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \ldots (i)$$

fungsi Planck

Intensitas spesifik **(*I*) = Jumlah energi yg mengalir pada arah tegak lurus permukaan per cm^2 per detik, per steradian**

h = Tetapan Planck = 6,625 x 10^{-27} erg det

k = Tetapan Boltzmann = 1,380 x 10^{10} erg/ ^oK

c = Kecepatan cahaya = 2,998 x 10^{10} cm/det

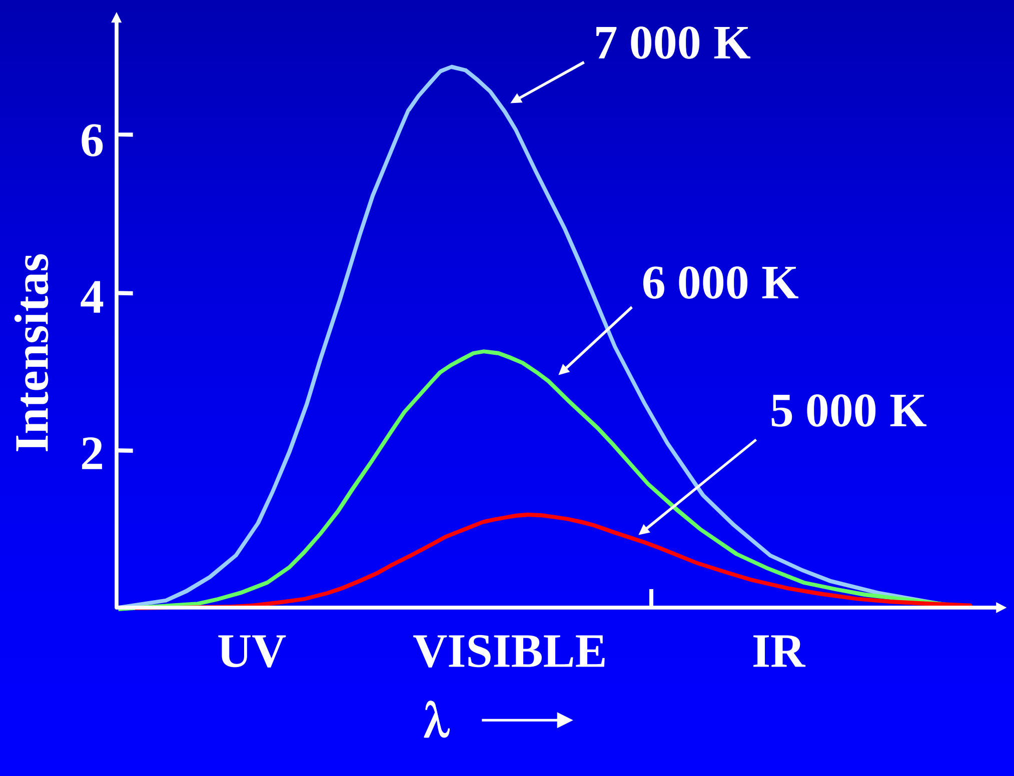
T= Temperatur dalam derajat Kelvin (^oK)

Apabila dinyatakan dalam frekuensi fungsi Planck menjadi :

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2}\,\frac{1}{e^{h\nu/kT}-1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (ii)$$

Distribusi energi menurut panjang gelombang

(*Spektrum Benda Hitam*)

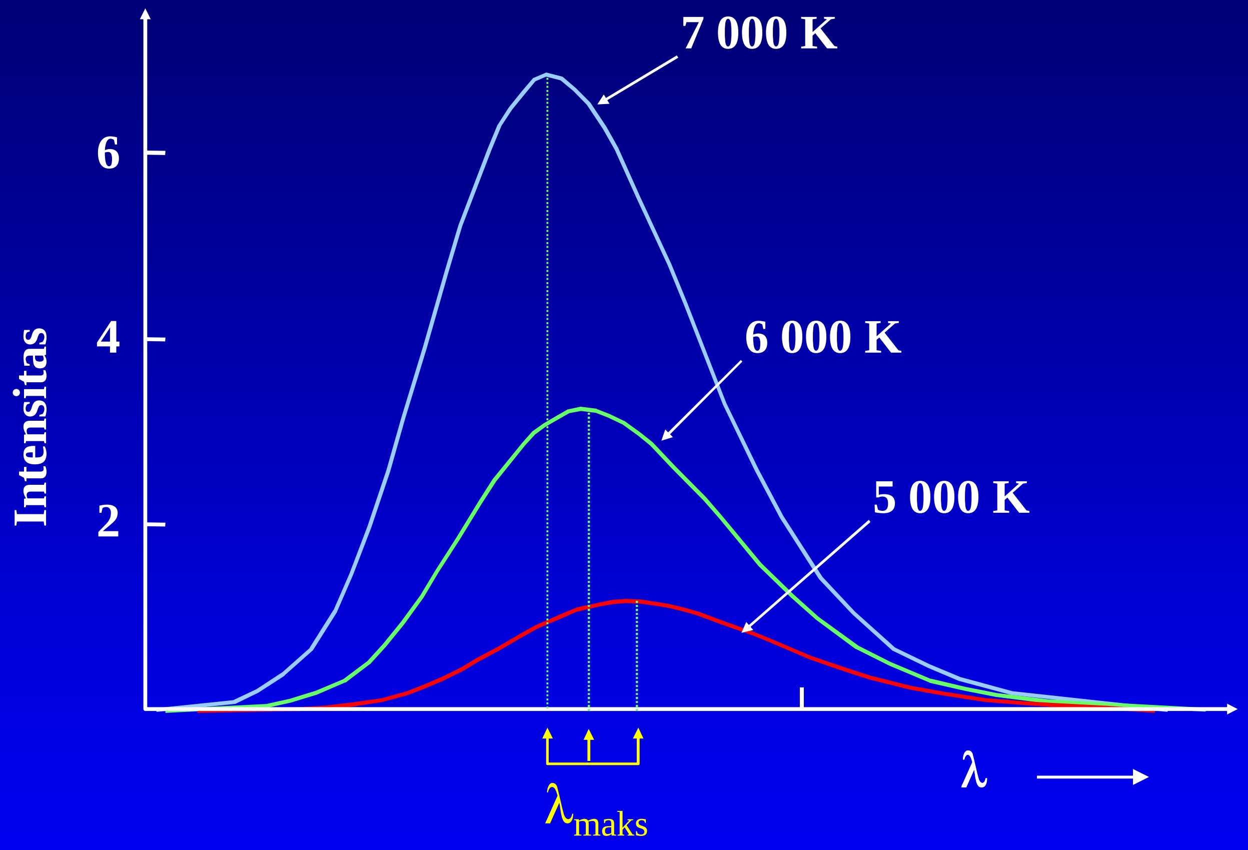


Panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) pancaran benda hitam dapat ditentukan dengan menggunakan *Hukum Wien* yaitu

$$\lambda_{maks} = \frac{0{,}2898}{T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (iii)$$

λ_{maks} dinyatakan dalam cm dan T dalam derajat Kelvin

- **Dari hukum Wien ini menyatakan bahwa makin tinggi temperatur suatu benda hitam, makin pendek panjang gelombangnya**
- **Hal ini dapat digunakan untuk menerangkan gejala bahwa bintang yang temperaturnya tinggi akan tampak berwarna biru, sedangkan yang temperatur-nya rendah tampak berwarna merah.**



$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{0{,}2898}{T}$$

Contoh :

Dari hasil pengamatan diperoleh bahwa puncak spektrum bintang A dan bintang B masing-masing berada pada panjang gelombang 0,35 μm dan 0,56 μm. Tentukanlah bintang mana yang lebih panas, dan seberapa besar perbedaan temperaturnya

Jawab : $\lambda_{\text{maks A}} = 0{,}35\ \mu m$, $\lambda_{\text{maks B}} = 0{,}56\ \mu m$

Jadi bintang A mempunyai λ_{maks} lebih pendek daripada bintang B. Menurut hukum Wien, bintang A lebih panas daripada bintang B

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{0{,}2898}{T} \Longrightarrow T = \frac{0{,}2898}{\lambda_{\text{maks}}}$$

Untuk bintang A : $T_A = \dfrac{0{,}2898}{\lambda_{\text{maks A}}} = \dfrac{0{,}2898}{0{,}35}$

Untuk bintang B : $T_B = \dfrac{0{,}2898}{\lambda_{\text{maks B}}} = \dfrac{0{,}2898}{0{,}56}$

$$\frac{T_A}{T_B} = \left(\frac{0{,}2898}{0{,}35}\right)\left(\frac{0{,}56}{0{,}2898}\right) = 1{,}6$$

Jadi temperatur bintang A lebih panas 1,6 kali daripada temperatur bintang B :

Cara lain : $\lambda_{maks} = \dfrac{0{,}2898}{T} \Longrightarrow T = \dfrac{0{,}2898}{\lambda_{maks}}$

Bintang A : $\lambda_{maks} = 0{,}35\ \mu m = 0{,}35 \times 10^{-4}$ cm

$$T_A = \frac{0{,}2898}{0{,}35 \times 10^{-4}} = 8\ 280\ \mathrm{K}$$

Bintang B : $\lambda_{maks} = 0{,}56\ \mu m = 0{,}56 \times 10^{-4}$ cm

$$T_A = \frac{0{,}2898}{0{,}56 \times 10^{-4}} = 5\ 175\ \mathrm{K}$$

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{8280}{5175} = 1{,}6$$

Jadi bintang A 1,6 kali lebih panas daripada bintang B

Energi total yang dipancarkan benda hitam dapat ditentukan dengan mengintegrasikan persamaan (*i*)

$$B(T) = \int_0^\infty B_\lambda(T)\, d\lambda \quad \Rightarrow \quad \boxed{B(T) = \frac{\sigma}{\pi} T^4} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (iv)$$

Hukum Stefan-Boltzmann

$$\sigma = \frac{2\, k^4\, \pi^5}{15\, h^3\, c^2} = 5{,}67 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2}\text{ K}^{-4}\text{ s}^{-1}$$

konstanta Stefan-Boltzmann

Dari intensitas spesifik $B_\lambda(T)$ dapat ditentukan jumlah energi yang dipancarkan oleh setiap cm^2 permukaan benda hitam per detik ke semua arah, yaitu

$$F = \pi B(T) = \sigma T^4 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (v)$$

Fluks energi benda hitam

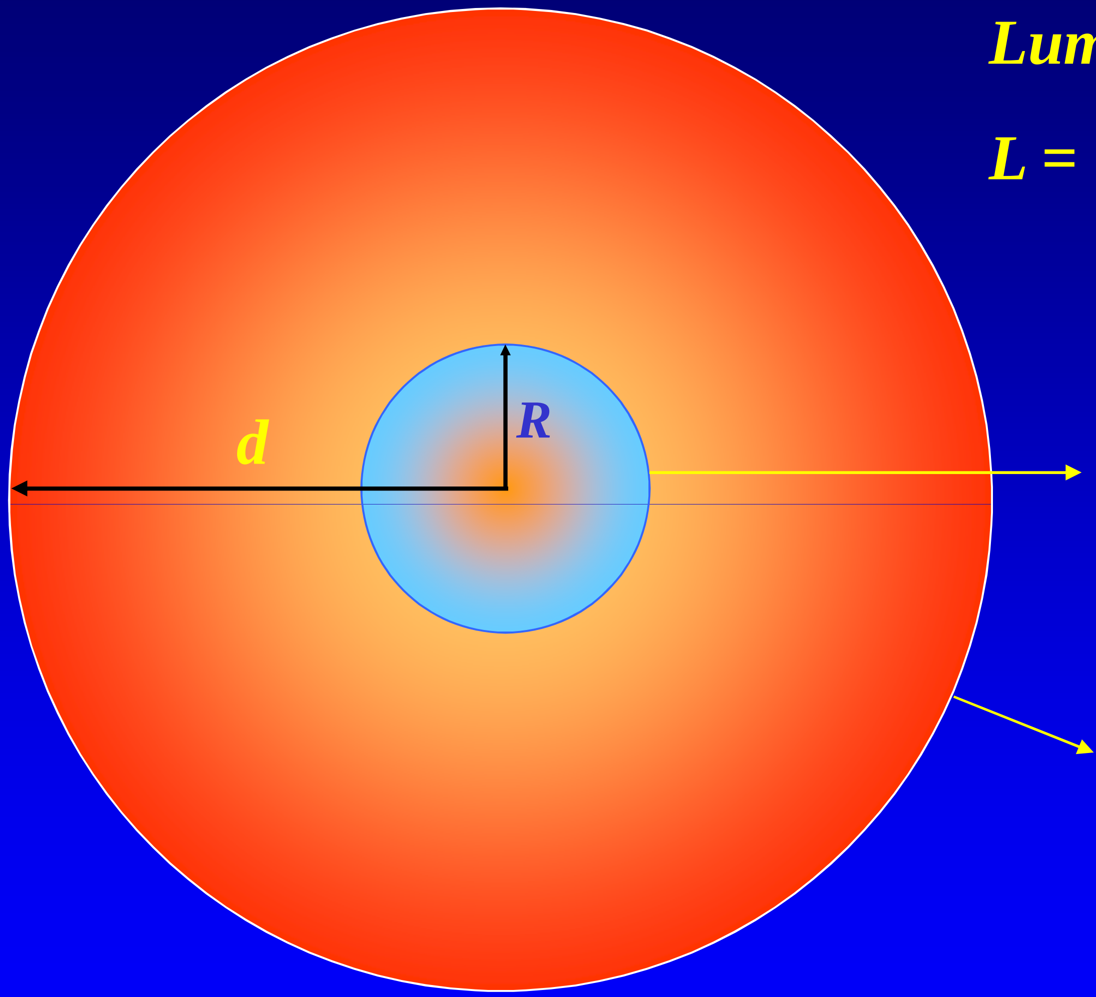
Apabila suatu benda berbentuk bola beradius R dan bertemperatur T memancarkan radiasi dengan sifat-sifat benda hitam, maka energi yang dipancarkan seluruh benda itu ke semua arah perdetik adalah,

$$L = 4\pi R^2 F = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (vii)$$

Luminositas benda

Temperatur efektif

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^{\ 4}$$



Luminositas :

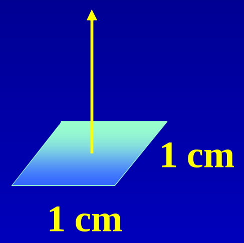
$$L = \underbrace{4\pi R^2}_{\text{Luas permukaan bola}} F = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$\text{Fluks } F = \frac{L}{4\pi R^2}$$

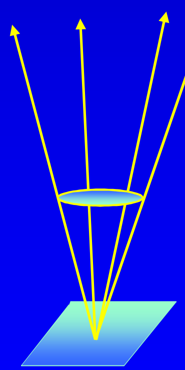
$$\text{Fluks } E = \frac{L}{4\pi d^2}$$

Resume

Intensitas spesifik $B(T) = I$

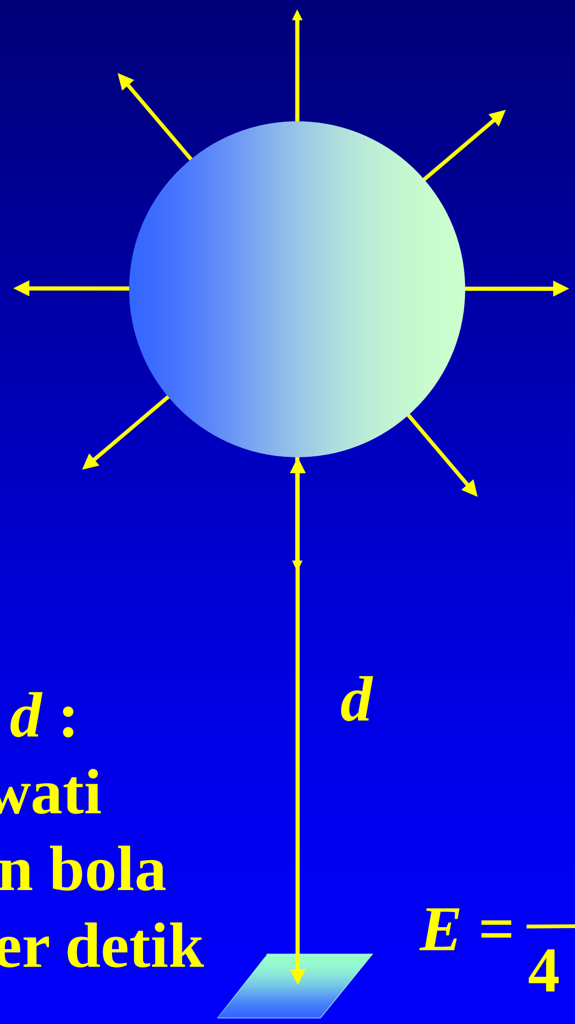


Fluks $F = \sigma T^4$



Fluks pada jarak d :
Energi yang melewati sebuah permukaan bola yang beradius d per detik per cm^2

Luminositas $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$



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

Bintang sebagai Benda Hitam

Bintang dapat dianggap sebagai benda hitam, oleh karena itu semua hukum-hukum yang berlaku pada benda hitam, berlaku juga untuk bintang.

- **Intensitas spesifik (*I*) :** $B_\lambda(T) = \dfrac{2hc^2}{\lambda^5} \dfrac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$

  Jumlah energi yang dipancarkan bintang pada arah tegak lurus permukaan per cm^2 per detik per steradian

- **Fluks (*F*) :** $F = \pi B(T)$

$$F = \pi I$$

$$F = \sigma T^4$$

$$F = \frac{L}{4\pi R^2}$$

Jumlah energi yang dipancarkan oleh setiap cm^2 permukaan bintang per detik ke semua arah

- **Luminositas (*L*) :** $L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^{\ 4}$

Energi yang dipancarkan oleh seluruh permukaan bintang yang beradius *R* dan bertemperatur T_{ef} per detik ke semua arah

- **Fluks pada jarak *d* (*E*) :** $E = \dfrac{L}{4\,\pi\, d^2}$

Energi bintang yang diterima/melewati permukaan pada jarak *d* per cm^2 per detik (*E*)

Pers. $E = \dfrac{L}{4\,\pi\, d^2}$

- **Disebut juga hukum kebalikan kuadrat (*invers square law*) untuk kecerlangan (brightness). Karena persamaan ini menyatakan bahwa kecerlangan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya**
- **Makin jauh sebuah bintang, makin redup cahayanya**

Contoh :

Berapakah kecerlangan sebuah bintang dibandingkan dengan kererlangan semula apabila jaraknya dijauhkan menjadi 3 kali dari jarak semula.

Jawab :

Misalkan d_A jarak semula dan kererlangannya adalah E_A. Jarak sekarang adalah d_B = 3 d_A dan kererlangannya adalah E_B. Jadi,

$$\left.\begin{aligned} E_A &= \frac{L}{4\,\pi\, d_A^{\,2}} \\ E_B &= \frac{L}{4\,\pi\, d_B^{\,2}} \end{aligned}\right\} E_B = E_A \left(\frac{d_A}{d_B}\right)^2 = E_A \left(\frac{d_A}{3d_A}\right)^2 = \frac{1}{9}\, E_A$$

Setelah jaraknya dijauhkan 3 kali jarak semula kecerlangan bintang menjadi lebih redup sebesar 1/9 kali kecerlangan semula.

Contoh :

Bumi menerima energi dari matahari sebesar 1380 W/m^2. Berapakah energi dari matahari yang diterima oleh planet Saturnus, jika jarak Matahari-Saturnus adalah 9,5 AU ?.

Jawab :

Misalkan energi matahari yang diterima di Bumi adalah E_A = 1380 W/m^2 dan jarak Bumi-Matahari adalah d_A = 1 AU.

Misalkan energi matahari yang diterima di Saturnus adalah E_B dan jarak Saturnus-Matahari adalah d_B = 9,5 AU. Jadi

$$E_B = E_A \left(\frac{d_A}{d_B}\right)^2 = 1380 \left(\frac{1}{9,5}\right)^2 = 15,29 \text{ W/m}^2$$

Hubungan magnitudo dengan fluks

$$m = -2{,}5 \log E + \text{tetapan} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{(}\textit{i}\textbf{)}$$

magnitudo semu — *fluks*

Rumus Pogson

Apabila bintang berada pada jarak 10 pc, maka magnitudo bintang disebut magnitudo mutlak (*M*), dan persamaan (*i*) menjadi,

$$M = -2{,}5 \log E' + \text{tetapan} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{(}\textit{ii}\textbf{)}$$

magnitudo mutlak

$$E = \frac{L}{4\pi d^2} \quad \text{dan} \quad E' = \frac{L}{4\pi 10^2} \quad \ldots\ldots\ldots \textbf{(}\textit{iii}\textbf{)}$$

Kurangi pers (*i*) dengan pers (*ii*), maka diperoleh,

$$m - M = -2{,}5 \log E/E' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (iv)$$

Masukan harga *E* dan *E'* dalam pers (*iii*) ke pers (*iv*), maka diperoleh,

$$m - M = -2{,}5 \log \left(\frac{L}{4\pi d^2} \frac{4\pi 10^2}{L} \right)$$

$$\underbrace{m - M}_{\textit{modulus jarak}} = -5 + 5 \log d \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (v)$$

d* dalam *pc

Besaran-besaran fisik dan geometri bintang seperti luminositas, radius dan juga massa, biasanya dinyatakan dalam besaran matahari.

Contoh :

Bintang μ Gem : $R_* = 73{,}2\ R_\odot$

$L_* = 840{,}4\ L_\odot$

Besaran Matahari :

Massa : $M_\odot = 1{,}98 \times 10^{33}$ gr

Radius : $R_\odot = 6{,}96 \times 10^{10}$ cm

Luminositas : $L_\odot = 3{,}96 \times 10^{33}$ erg s^{-1}

Temperatur Efektif : $T_{ef\,\odot} = 5\,800\ ^{o}K$

Magnitudo visual absolut $M_{v\odot} = 4{,}82$

Magnitudo bolometrik absolut $M_{bol\odot} = 4{,}75$

Contoh :

Dari hasil pengukuran diperoleh bahwa permukaan seluas 1 cm^2 di luar atmosfer bumi menerima energi yang berasal dari matahari setiap detiknya sebesar 1,37 x 10^6 erg/cm^2/s. Apabila diketahui jarak Bumi-Matahari adalah 150 juta kilometer, tentukanlah luminositas matahari.

Jawab :

$E_\odot = 1{,}37 \times 10^6$ erg /cm^2/s → *Konstanta Matahari*

$d = 1{,}50 \times 10^{13}$ cm

$$E = \frac{L}{4\pi d^2} \Longrightarrow L_\odot = 4\pi d^2 E_\odot$$

$$= 4\pi (1{,}50 \times 10^{13})^2 (1{,}37 \times 10^6)$$

$$= 3{,}87 \times 10^{33} \text{ erg/s}$$

Contoh :

Luminositas sebuah bintang 100 kali lebih terang daripada matahari, tetapi temperaturnya hanya setengahnya dari temperatur matahari. Berapakah radius bintang tersebut dinyatakan dalam radius matahari ?

Jawab : Untuk bintang : $L_* = 4\pi R_*^2 \sigma T_{ef*}^4$

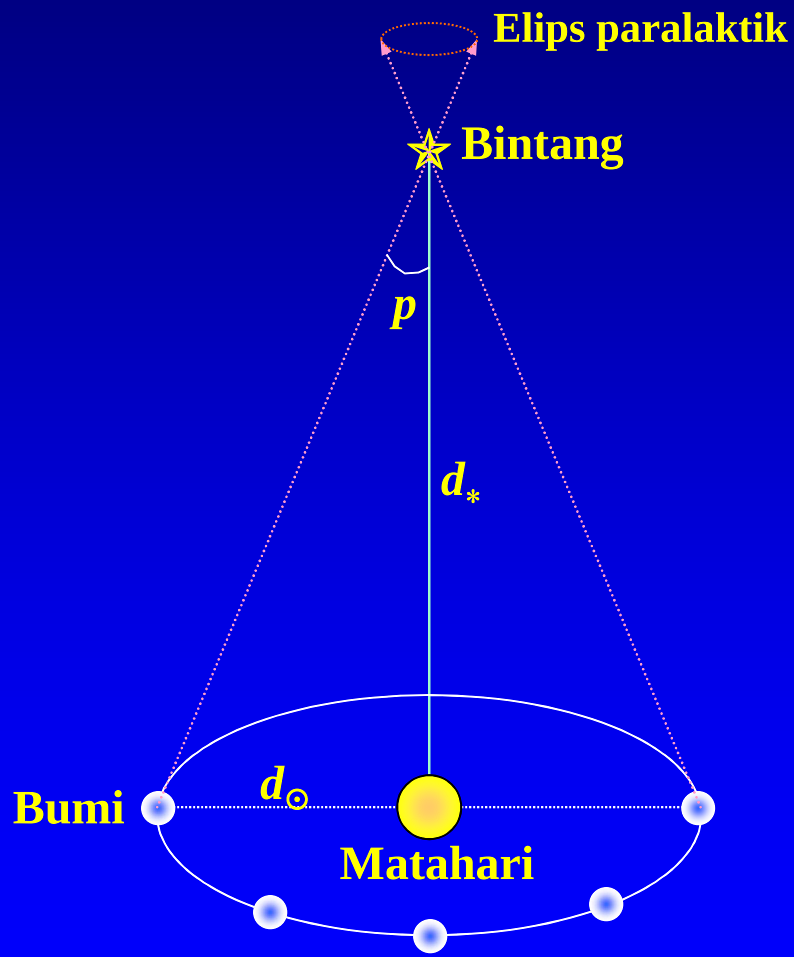
Untuk Matahari : $L_\odot = 4\pi R_\odot^2 \sigma T_{ef\odot}^4$

$L_* = 100\, L_\odot$, $T_{ef*} = 0{,}5\, \sigma T_{ef\odot}$

$$\frac{R_*}{R_\odot} = \left(\frac{L_*}{L_\odot}\right)^{1/2} \left(\frac{T_{ef\odot}}{T_{ef*}}\right)^2 = \left(\frac{100\, L_\odot}{L_\odot}\right)^{1/2} \left(\frac{T_{ef\odot}}{0{,}5\, T_{ef\odot}}\right)^2$$

$$= (100)^{1/2} \left(\frac{1}{0{,}5}\right)^2 = (10)(4) = 40$$

Jarak Bintang



Jarak bintang-bintang yang dekat dapat ditentukan dengan cara paralaks trigonometri

$d_\odot$ = Jarak Matahari-Bumi
= 1,50 x 10^{13} cm = 1 AU
(AU = Astronomical unit)

d_* = Jarak Matahari - Bintang

p = Paralaks Bintang

$\tan p = d_\odot / d_*$ . . . . (i)

Karena *p* sangat kecil, maka pers (*i*) dapat dituliskan,

$$p = d_{\odot} / d_{*} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (ii)$$

***p* dalam radian**

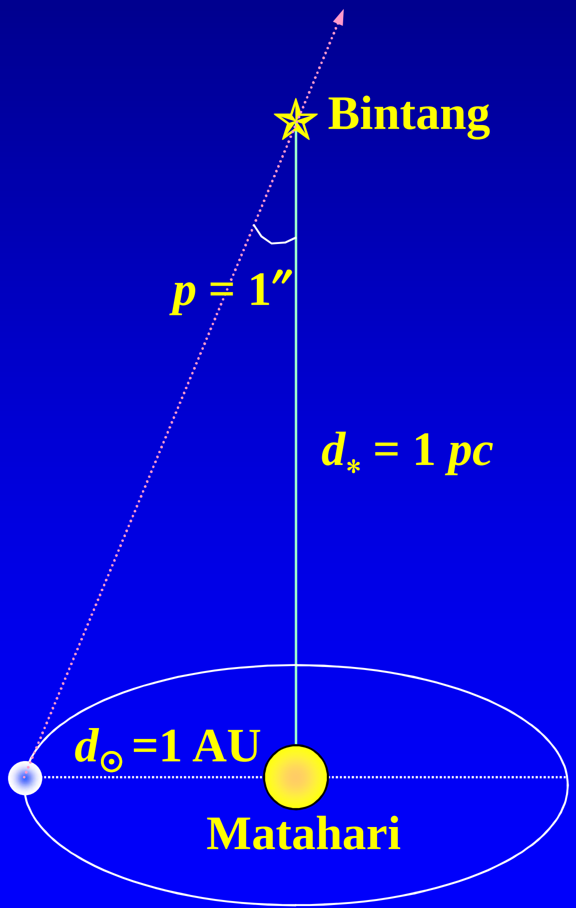
Apabila *p* dinyatakan dalam detik busur dan karena 1 radian = 206 265″ , maka

$$p = 206\,265\, d_{\odot}/d_{*} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (iii)$$

Jika jarak dinyatakan dalan AU, maka d_{*} = 1 AU sehingga pers. (*iii*) menjadi,

$$p = 206\,265/d_{*} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (iv)$$

Selain AU, dalam astronomi digunakan juga satuan jarak lainnya yaitu satuan *parsec* disingkat *pc*.



- **Satu parsec (*parallax second*) didefinisikan sebagai jarak sebuah bintang yang paralaksnya satu detik busur.**
- **Dengan demikian, jika $p = 1''$ dan $d_* = 1\ pc$, maka dari persamaan (*iv*) diperoleh,**

$$1\ pc = 206\ 265\ \text{AU}$$

$$= 3{,}086 \times 10^{18}\ \text{cm} \quad \ldots\ldots\ldots (v)$$

Satuan lain yang sering digunakan dalam astronomi untuk menyatakan jarak adalah tahun cahaya (ly = *light year*)

- **Kecepatan cahaya per detik adalah 2,997925 x 10^{10} cm/s**
- **1 tahun = 365,25 hari = 365,25 x 24 jam x 60 menit x 60 detik = 3,16 x 10^{7} detik**

Jadi 1 ly = (3,16 x 10^{7})(2,997925 x 10^{10})

= 9,46 x 10^{17} cm . . . . (*v*)

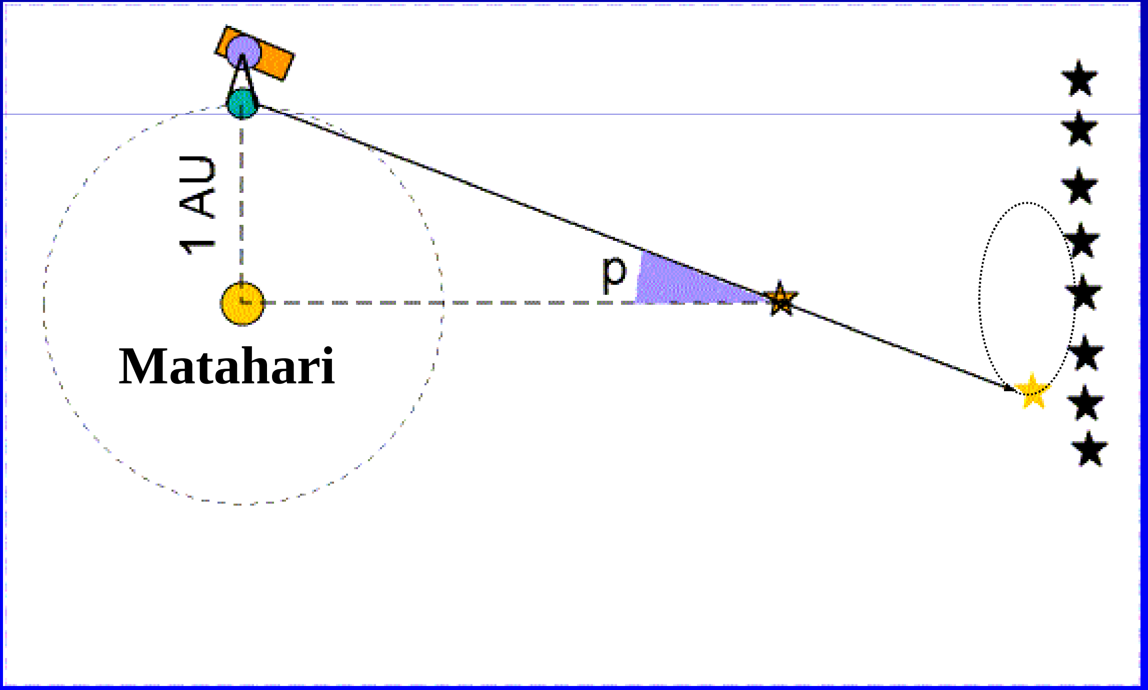
Dari persamaan (*iv*) dan (*v*) diperoleh,

1 pc = 3,26 ly . . . . (*vi*)

Apabila paralak dinyatakan dalam detik busur dan jarak dinyatakan dalam pc, maka pers (*iv*) menjadi,

$$p = 1/d_{*} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (vii)$$

Animasi paralaks



Bintang-bintang yang terdekat dengan matahari yang sudah ditentukan paralaksnya

Bintang	Paralaks (″)	Jarak (pc)	Jarak (ly)
Proxima Centauri	0,76	1,31	4,27
Alpha Centauri	0,74	1,35	4,40
Barnard	0,55	1,81	5,90
Wolf 359	0,43	2,35	7,66
Lalande 21185	0,40	2,52	8,22
Sirius	0,38	2,65	8,64

Hubungan paralaks dengan magnitudo

Dari persamaan modulus jarak yaitu,

$$m - M = -5 + 5 \log d$$

dan persamaan paralaks yaitu, $p = 1/d_*$ dapat diperoleh,

$$m - M = -5 - 5 \log p$$

dapat ditentukan dari kelas luminositasnya

Dari pers. terakhir, jika *M* diketahui dan *m* dapat diamati, maka *p* dapat ditentukan (atau jarak bintang dapat ditentukan). Demikian juga sebaliknya, jika *m* dan *p* dapat ditentukan, maka *M* dapat dicari.

Contoh :

Magnitudo mutlak sebuah bintang adalah $M = 5$ dan magnitudo semunya adalah $m = 10$. Jika absorpsi oleh materi antar bintang diabaikan, berapakah jarak bintang tersebut ?

Jawab :

$m = 10$ dan $M = 5$, dari rumus Pogson

$$m - M = -5 + 5 \log d$$

$$\text{diperoleh, } 10 - 5 = -5 + 5 \log d$$

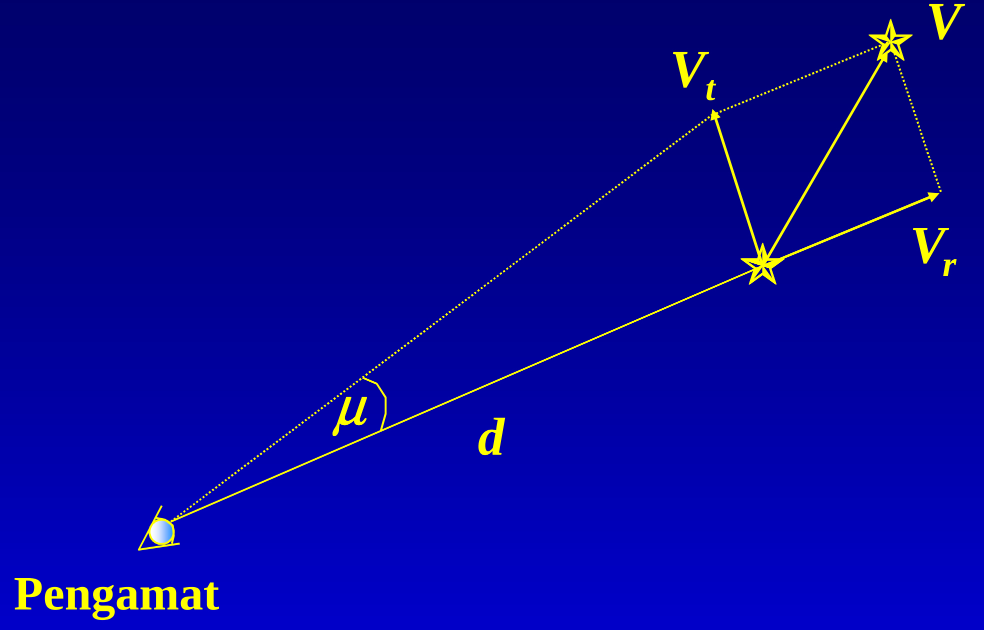
$$5 \log d = 10$$

$$\log d = 2 \longrightarrow d = 100\ pc$$

Gerak Bintang

Bintang tidak diam, tapi bergerak di ruang angkasa. Pergerakan bintang ini sangat sukar diikuti karena jaraknya yang sangat jauh, sehingga kita melihat bintang seolah-olah tetap diam pada tempatnya sejak dulu hingga sekarang

Laju perubahan sudut letak suatu bintang disebut gerak sejati (*proper motion*). Gerak sejati bisanya diberi simbol dengan μ dan dinyatakan dalam setik busur pertahun. Bintang yang gerak sejatinya terbesar adalah bintang Barnard dengan μ = 10″,25 per tahun (dalam waktu 180 tahun bintang ini hanya bergeser selebar bulan purnama)



Hubungan antara kecepatan tangensial (V_t) dan gerak sejati :

$$V_t = \mu d \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (i)$$

d = jarak bintang. Apabila μ dinyatakan dalam detik busur per tahun, d dalam parsec dan V_t dalam km/s, maka

$$V_t = 4{,}74\,\mu d \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \; (ii)$$

$$V_t = 4{,}74\,\mu/p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \; (iii)$$

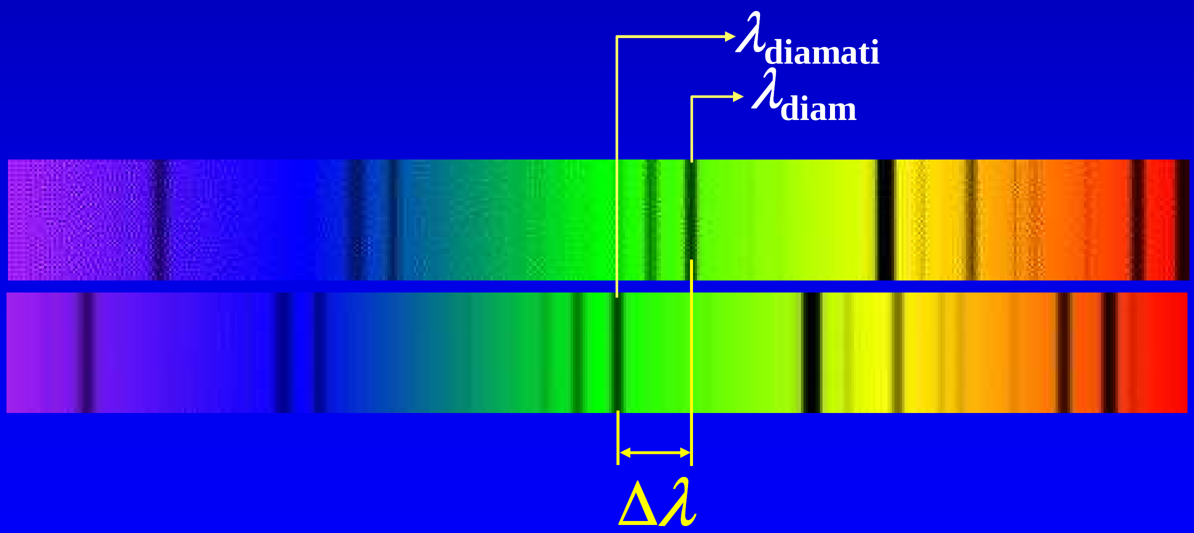
p paralaks bintang dalam detik busur.

Selain gerak sejati, informasi tentang gerak bintang diperoleh dari pengukuran kecepatan radial, yaitu komponen kecepatan bintang yang searah dengan garis pandang

Kecepatan radial bintang dapat diukur dari efek Dopplernya pada garis spektrum dengan menggunakan rumus :

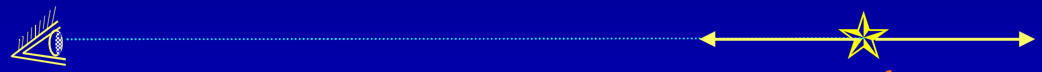
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V_r}{c} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{(\textit{iv})}$$

$\lambda = \lambda_{\mathrm{diam}}$, V_r = **kecepatan radial,** c = **kecepatan cahaya**



$$\Delta\lambda = \lambda_{\mathrm{diamati}} - \lambda_{\mathrm{diam}}$$

V_r berharga negatif. garis spektrum bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih pendek ***pergeseran biru***



pergeseran merah **V_r berharga positip. garis spektrum bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih panjang**

Karena V_t dapat ditentukan dari per (*iii*) dan *Vr* dapat ditentukan dari pers (*iv*), maka kecepatan linier bintang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

$$V^2 = V_t^2 + V_r^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (v)$$

Contoh :

Garis spektrum suatu elemen yang panjang gelombang normalnya adalah 5000 Å diamati pada spektrum bintang berada pada panjang gelombang 5001 Å. Seberapa besarkah kecepatan pergerakan bintang tersebut ? Apakah bintang tersebut mendekati atau menjauhi Bumi ?

Jawab : $\lambda_{\text{diam}} = 5000$ Å dan $\lambda_{\text{diamati}} = 5001$ Å

$\Delta \lambda = \lambda_{\text{diamati}} - \lambda_{\text{diam}} = 5001 - 5000 = 1$ Å

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V_r}{c}$$

$$V_r = c\,\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (3 \text{ x } 10^5)\left(\frac{1}{5000}\right) = 60 \text{ km/s}$$

Karena kecepatannya positif maka bintang menjauhi pengamat

Animasi kecepatan radial untuk sistem bintang ganda