

LECTURE NOTES

ASTROFISIKA (FIS-239)

Denny Darmawan, M.Sc.
[\(darmawan@uny.ac.id\)](mailto:darmawan@uny.ac.id)

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA & ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA**

Textbook

- *Astronomy Today vol. 2* by Chaisson & McMillan
- *Introductory Astronomy & Astrophysics* by Zeilik & Gregory

Apa bedanya dengan Astronomi?

Namun saat ini, topik yang dipelajari dalam bidang astronomi mengarah ke kajian fisis, sehingga Astrofisika dapat dipandang sebagai kajian astronomi modern

ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

Prelude

© Denny Darmawan 2008

Penilaian

- 20% Tugas
- 20% Ujian Mid-Semester
- 60% Ujian Akhir Semester

Apa itu Astrofisika?

Cabang fisika yang mencoba memahami sifat dan perilaku benda langit dan alam semesta secara keseluruhan

Topik yang akan dipelajari

- Dasar-Dasar Astronomi
- Bintang
- Galaksi
- Semesta (Kosmologi)
- Tata Surya? *(TBA)

Apa bedanya dengan Astronomi?

Astronomi sebatas menggambarkan kedudukan dan sifat yang teramati dari benda langit sementara Astrofisika mencoba menjelaskan sifat fisisnya secara keseluruhan

Tahun 4 :	Condensed_Matter AMO	Astrofisika	HEP+Nuklir	Fisika_Terapan
Tahun 3 :	Zat_Padat	Atom	Inti_(Nuclear)	
Tahun 2 :	Relativitas	Elektromagnetisme+Optika	Mekanika_Kuantum	
Tahun 1 :	Komputasi_Fisika	Matematika_Fisika Kalkulus	Termodinamika+Mekanika_Statistik	Fisika_Dasar Metode_Eksperimen

- Tahun 1603, J. Bayer mengusulkan penamaan bintang berdasar urutan terangnya dalam sebuah rasi dengan label abjad Yunani dan nama genitif (turunan) rasinya:

α Cygni (Deneb) disingkat α -Cyg
 β Cygni (Albireo) disingkat β -Cyg
 α Orionis (Betelgeuse) disingkat α -Ori
 β Orionis (Rigel) disingkat β -Ori
 α Scorpii (Antares) disingkat α -Sco
 α Centauri (Rigel Kentaurus) disingkat α -Cen

Jika huruf Yunani habis, digunakan huruf Romawi kecil 'a' hingga 'z'

- Awal abad 18, John Flamsteed menyarankan penamaan bintang dengan penomoran dari timur ke arah barat suatu konstelasi, sehingga *Betelgeuse memiliki nama 58 Ori* dan *Rigel memiliki nama 19 Ori*
- Teknologi teleskop memungkinkan astronom mengkatalogkan bintang dan memberi penomoran sesuai katalognya
HD 95735 merupakan bintang yang berada dalam daftar nomor 95735 di katalog Henry Draper
- Saat ini penamaan bintang baru didasarkan pada koordinatnya di langit

Menyatakan Letak Bintang (Bola Langit)

- Ketika mengamati bintang di langit malam, kita dapat menganggap bahwa bintang-bintang ini menempel pada sebuah kubah langit.
- Akibat dari rotasi bumi. Bintang-bintang ini akan bergerak.
- Dari tempat di dekat ekuator bumi, maka bintang akan terbit dari timur dan tenggelam di barat.

Tampilan Langit Malam Ini (Feb. sekitar jam 19.00 WIB) di Arah Zenith



Tampilan Langit Malam Bulan Agustus (sekitar jam 21.00 WIB) di Arah Utara



Penamaan Bintang

- Selain memberi nama pada kelompok bintang, peradaban kuno juga memberi nama pada bintang terang di hampir setiap rasi
- Nama-nama bintang mayoritas berasal dari peradaban Arab kuno:
Betelgeuse (di rasi Orion) → Yad-Al-Jawza (=lengan Jawaz/Oriion)
Aldebaran (di rasi Taurus) → Al-Dabar-an (=pengikut)
Deneb (di rasi Cygnus) → Danab (=ekor) dst.

ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

DASAR-DASAR ASTRONOMI

© Denny Darmawan 2008

Konstelasi (Rasi) dan Asterism

- Sejak peradaban kuno, bintang-bintang yang berdekatan dan menyerupai bentuk tertentu dikelompokkan dan diberi nama.
- Kelompok bintang ini yang disebut sebagai **konstelasi (rasi)**
- Tahun 1928, International Astronomical Union meresmikan **88** rasi bintang
- Penamaan rasi mengikuti penamaan dari peradaban Yunani kuno

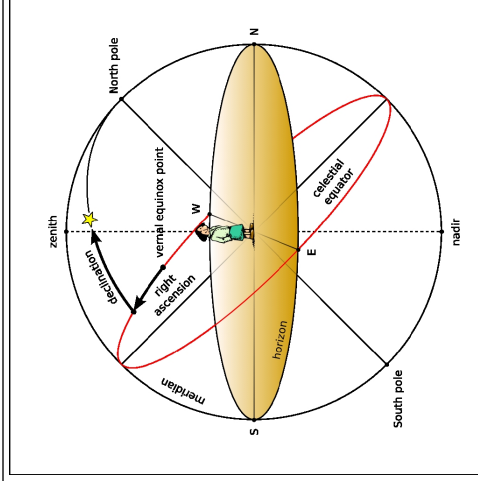
- Terdapat pula pengelompokan di luar 88 rasi resmi yang kemudian dinamakan **asterism**
- Rasi bintang yang dapat Anda lihat malam ini (Feb) sekitar jam 20.00 WIB:
Orion, Canis Major, Canis Minor, Taurus, Leo

Rasi di bulan Agustus:
Scorpio, Sagittarius, Crux, Cygnus

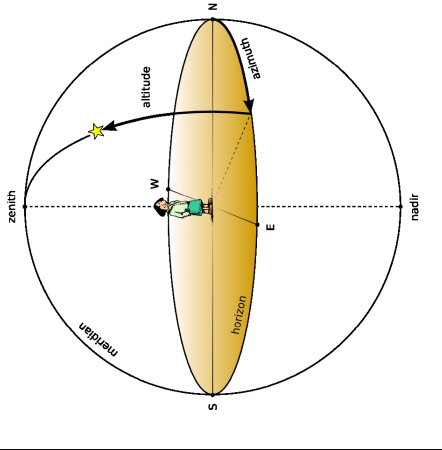
- Asterism yang dapat Anda lihat malam ini:
Pleiades, Summer triangle (Australia) a.k.a. Winter triangle (Eropa)

Asterism bulan Agustus:
Sailib Utara, Winter triangle (Australia) a.k.a. Summer triangle (Eropa)

- Kutub langit merupakan titik sentuh perpanjangan poros rotasi bumi pada bola langit.
- Deklinasi sepanjang ekuator langit bernilai 0°
- Kutub Langit Utara memiliki deklinasi 90° dan Kutub Langit Selatan memiliki deklinasi -90°
- RA diukur dari sebuah titik di langit yang disebut titik Aries yang analog dengan Kota Greenwich yang dijadikan penentu garis Bujur pada koordinat Bumi.
- RA diukur dari titik Aries ke arah Timur



- Titik aries disebut juga titik Vernal Equinox, yaitu titik pada ekuator langit yang menunjukkan posisi matahari pada tanggal 21 Maret
- Karena adanya presesi poros Bumi saat berotasi, maka letak kutub langit dan ekuator langit berubah-ubah. Sehingga koordinat ekuator suatu bintang selalu disertai dengan tahun pengamatannya.

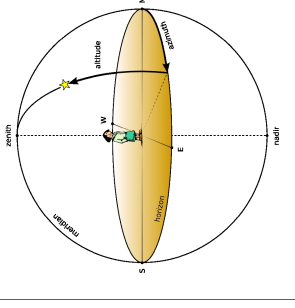


- Keunggulan tata koordinat horizon: Mudah digunakan dan dapat dengan cepat dibayangkan
- Kelemahan tata koordinat horizon: Tidak dapat digunakan untuk menggambarkan posisi bintang secara umum karena selalu berubah menurut waktu dan letak pengamatan

Tata Koordinat Equatorial (Right Ascension - Declination)

- Posisi bintang juga dinyatakan dengan 2 sudut, yaitu Asensio Rekta (RA) dan deklinasi (Dec)
- RA dan Dec menyatakan koordinat bola langit yang memiliki analogi dengan Bujur (longitude) dan Lintang (latitude) yang menyatakan koordinat Bumi.
- Ekuator langit merupakan perpotongan perpanjangan bidang ekuator bumi pada bola langit

- Zenith : Titik di atas kepala
- Nadir : Titik di bawah kaki
- Garis Meridian: Garis penghubung titik utara-zenith-titik selatan
- Horizon : batas melingkar antara langit dan bumi



- Untuk menyatakan posisi bintang, digunakan tata koordinat langit:
 - Tata koordinat horizon
 - Tata koordinat equatorial
 - Tata koordinat ekuatorial

Tata Koordinat Horizon (Altitude-Azimuth)

- Menunjukkan koordinat arah pandang (Azimuth) dan tinggi bintang (Altitude)
- Sudut Azimuth diukur dari titik Utara bergerak searah jarum jam (Utara-Timur-Selatan-Barat), sehingga Utara= 0° , Timur= 90° , Selatan= 180° , Barat= 270° .
- Sudut Altitude (tinggi) diukur dari horizon ke arah zenith, sehingga Zenith= 90° , Nadir= -90° .

ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

DASAR-DASAR ASTRONOMI 2

© Denny Darmawan 2008

Seberapa Jauh? (skala jarak)

- Skala jarak dalam Astronomi umumnya tidak dinyatakan dalam satuan SI (meter)
- Skala jarak yang sering digunakan:
 - Satuan Astronomi (SA) / Astronomical Unit (AU)
 - Tahun Cahaya (tc) / Light Year (ly)
 - Parsec

Seberapa jauh bintang/galaksi dari Bumi?

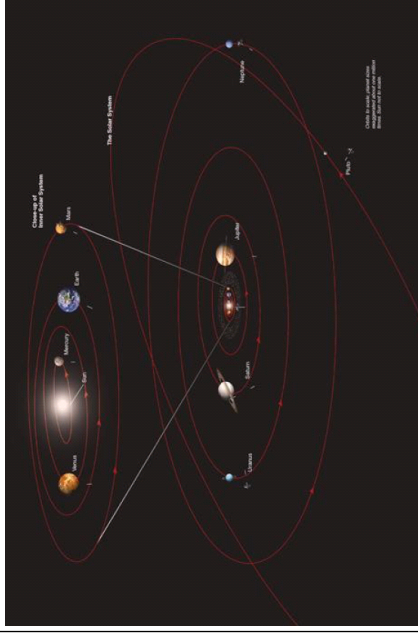
Seberapa luas ukuran galaksi/semesta kita?

Skala Bumi = Ribuan kilometer



Jejari Bumi = 6380 km

Diperbesar lebih jauh... Tata Surya



Jarak Rerata Bumi ke Matahari = 149,6 juta km
(Skala = Ratusan Juta Kilometer)

Satuan Jarak Dalam Skala Tata Surya:

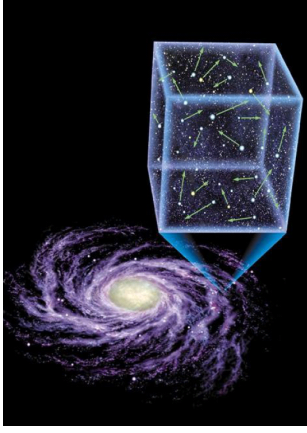
A.U. = Astronomical Unit = Satuan Astronomis (S.A.)

1 AU = Jarak Rerata Bumi-Matahari = 149,6 juta km = $1,496 \times 10^{11}$ meter

Matahari ke Venus = 0,7 AU = 104,7 juta km
ke Neptunus = 30,07 AU = 4,5 milyar km !

Diperbesar lebih jauh... Galaksi Bimasakti

Matahari adalah salah satu bintang dari jutaan bintang (sekitar 100 juta) yang membentuk Galaksi Bimasakti



Skala jarak yang lebih jauh : tahun cahaya (t.c.) / light year (l.y.)

1 tahun cahaya = Jarak yang ditempuh oleh cahaya selama 1 tahun

kelajuan cahaya = 3×10^8 meter/detik

1 tahun = $3,16 \times 10^7$ detik

1 tahun cahaya = $9,48 \times 10^{12}$ km = 63.000 AU

Ingat, 1 tahun cahaya adalah skala jarak, bukan skala waktu

Galaksi Andromeda berjarak 3 juta tahun cahaya dari Bumi

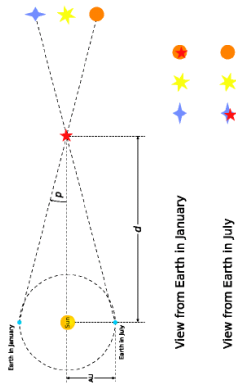
→ yang kita lihat adalah Galaksi Andromeda 3 juta tahun yang lampau!
 Bagaimana keadaannya saat ini? ...tunggu 3 juta tahun lagi!



Ketika mengamati semesta, kita sedang mengamati masa lalu!

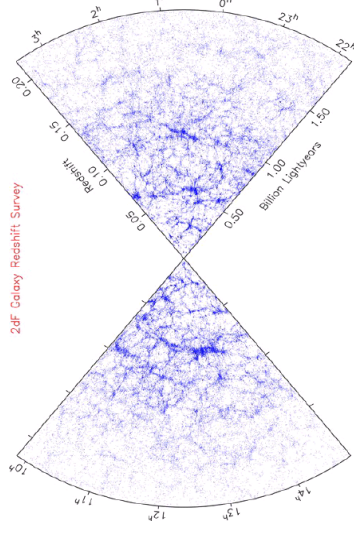
Mengukur Jarak via Paralaks

- Paralaks adalah pergeseran yang teramati dari suatu benda terhadap latar belakang akibat perubahan posisi pengamat
- Akibat gerak Bumi mengelilingi matahari, bintang terdekat nampak bergerak relatif terhadap bintang di latar belakang
- Gerakan ini yang disebut sebagai *stellar parallax* (paralaks bintang) atau *annual parallax* (paralaks tahunan)
- Karena jarak Bumi-Matahari diketahui, kita dapat mengukur jarak bintang dengan paralaks



p = sudut paralaks
 = setengah dari pergeseran maksimum posisi suatu bintang terhadap bintang latar belakang
 d = jarak Bumi ke bintang tersebut

Diperbesar lebih jauh... semesta kita yang baru bisa diketahui hingga kini...
 Setiap titik mewakili sebuah supercluster!



supercluster lokal: puluhan juta ke ratusan juta galaksi bimasakti: 100.000 ke



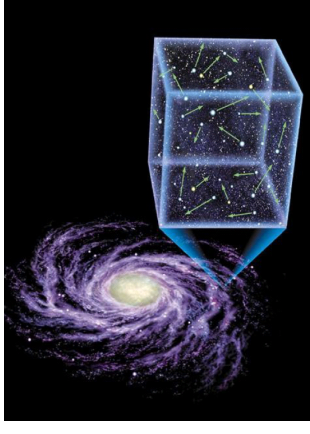
tahun cahaya bukan skala waktu melainkan skala jarak namun tahun cahaya dapat juga menunjukkan waktu

kelajuan cahaya = 3×10^8 meter/detik

dari Bumi ke bulan butuh waktu 1 detik
 dari Matahari ke Bumi 8 menit
 ke bintang terdekat (α -Centauri) 4 tahun

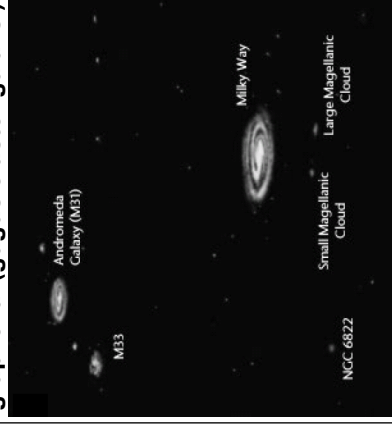
→ jarak ke α -Centauri = 4 tahun cahaya
 → saat ini Anda melihat α -Cen 4 tahun lampau!
 bagaimana α -Cen saat ini?... tunggu 4 tahun lagi

Diameter Galaksi Bimasakti = sekitar 100.000 tahun cahaya



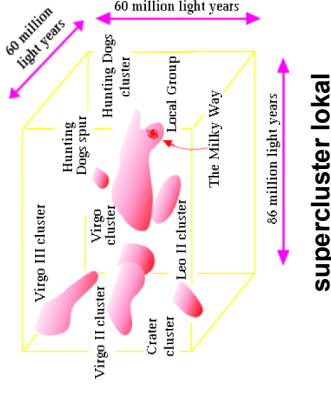
Jarak Matahari ke bintang terdekat \approx beberapa tahun cahaya

Diperbesar lebih jauh... grup lokal (gugus/cluster galaksi)



Jarak antar galaksi terdekat = beberapa juta tahun cahaya!

Diperbesar lebih jauh... Beberapa gugus galaksi membentuk Gugus Super (Supercluster) dari galaksi



supercluster lokal

Seberapa Terang?

- Bintang-bintang di langit malam memiliki tingkat terang yang berbeda. Ada yang bersinar terang, ada pula yang bersinar redup
- Hipparcus, astronom Yunani abad 129 SM, mengkatalogkan bintang berdasar terangnya ke dalam 6 kelompok
- Bintang paling terang diberi nilai (magnitudo) 1, sementara yang paling lemah diberi nilai (magnitudo) 6
- Ingat: semakin terang, magnitudo bintang justru semakin kecil!

- Magnitudo berdasar terang bintang yang terlihat di langit malam selanjutnya disebut **magnitudo tampak (apparent magnitude) / magnitudo semu**
- Herschel menemukan bahwa kepekaan mata akan intensitas sinar bersifat logaritmik
- Bintang yang bermagnitudo 1 diketahui 100 kali lebih terang dari bintang bermagnitudo 6
- Dengan kata lain, untuk dua bintang yang memiliki selisih magnitudo = 5 (6-1), akan memiliki rasio terang (intensitas) = 100

- Untuk dua bintang yang memiliki selisih magnitudo 1, akan memiliki rasio terang

$$I_A/I_B = \sqrt[5]{100} = 2,512$$

- Untuk dua bintang yang memiliki selisih magnitudo 2, akan memiliki rasio terang

$$I_A/I_B = (\sqrt[5]{100})^2 = 2,512^2$$

- Secara umum:

$$\frac{I_A}{I_B} = 2,512^{(m_B - m_A)} = 100^{(m_B - m_A)/5}$$

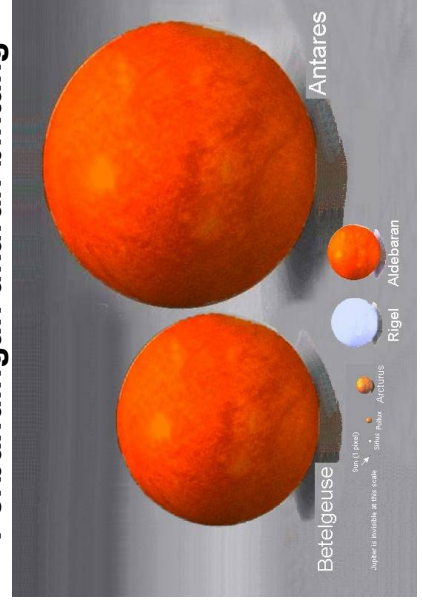
- Atau: $m_A - m_B = -2,5 \log(I_A/I_B)$
dikenal sebagai **skala Pogson**

Soal-Soal

- Bintang Proxima Centauri, bintang terdekat ke Bumi, memiliki sudut paralaks 0,77". Berapakah jarak bintang ini ke Bumi (dalam tc)
- Bintang Sirius memiliki sudut paralaks 0,377". Berapa jarak bintang ini dari Bumi (dalam tc)

- Proxima Centauri ~ 4,2 tahun cahaya
- Sirius ~ 8,6 tahun cahaya
- Meskipun merupakan bintang yang paling dekat ke Bumi, sangat sulit menemukan Proxima Centauri di langit malam karena terlalu redup
- Sementara Sirius yang merupakan bintang paling terang di langit malam, justru memiliki jarak yang lebih jauh dari Bumi dibanding Proxima Centauri
- Terang/redupnya bintang tidak bisa dijadikan indikator jaraknya dari Bumi

Perbandingan ukuran bintang



Jarak bintang dihitung melalui:

$$d = \frac{1 \text{ AU}}{\tan p} = \frac{1 \text{ AU}}{p}$$

p biasanya dinyatakan dalam detik busur, sementara dalam persamaan di atas dalam radian, sehingga harus kita ubah:

$$1^\circ = 60' \text{ (menit busur)} = 3600'' \text{ (detik busur)}$$

$$1 \text{ rad} = 57,3^\circ = 2,063 \times 10^5''$$

diperoleh:

$$d = \frac{2,063 \times 10^5}{p''} \text{ AU}$$

Didefinisikan satuan jarak baru: **parsec (parallax second)** disingkat pc

$$1 \text{ pc} = 2,063 \times 10^5 \text{ AU}$$

sehingga

$$d = \frac{1}{p''}$$

dengan d dinyatakan dalam pc

$$1 \text{ pc} = 3,262 \text{ tahun cahaya}$$

Sebuah bintang yang memiliki sudut paralaks 1" maka jaraknya dari Bumi adalah 1 pc

- Jarak terjauh yang bisa diukur melalui paralaks adalah 1600 tahun cahaya. Selebihnya, paralaks terlalu kecil untuk diukur.
- Diperlukan metode lain untuk mengukur jarak benda-benda langit

- Skala Pogson hanya menunjukkan selisih magnitudo berdasar rasio terang dua bintang
- Untuk keperluan praktis, digunakan bintang Vega (α -Lyrae) sebagai standar $m = 0$ (sebenarnya bernilai $m = 0,02$)
- Bintang yang lebih terang dari Vega memiliki m negatif dan yang lebih redup memiliki m positif
- Magnitudo terendah yang masih dapat dilihat oleh mata telanjang adalah $m = 6$
- Untuk mengukur terang suatu bintang secara akurat, astronom menggunakan **photometer**

Perbandingan magnitudo semu

Nama bintang	Magnitudo
Matahari	-26,80
Sirius	-1,46
Canopus	-0,72
Alpha Centauri	-0,27
Arcturus	-0,04
Vega	0,03
Capella	0,04
Rigel	0,12
Procyon	0,35
Achernar	0,46
Hadar	0,66
Betelgeuse	0,70
Altair	0,77
Aldebaran	0,85
Acrux	0,87
Antares	0,92
Spica	1,00

*) Perbandingan antara Matahari dan 16 bintang paling terang di langit malam

- Semakin panas benda, intensitas radiasi yang dipancarkan semakin besar
- Radiasi yang dipancarkan pada suhu tertentu akan memiliki intensitas maksimum pada panjang gelombang tertentu
- Fungsi Planck:

$$I_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

dengan

I = jumlah energi yang mengalir tegak lurus permukaan per m^2 , per detik, per steradian

h = tetapan Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ Js

k = tetapan Boltzman = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

c = kelajuan cahaya = 3×10^8 m/s

T = suhu dalam Kelvin

- Panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) dapat ditentukan dari $\frac{dI(\lambda)}{d\lambda} = 0$

Sehingga diperoleh
$$\lambda_{maks} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T} \text{ (meter)}$$

Persamaan ini dikenal sebagai **Hukum Wien**: semakin tinggi suhu benda, panjang gelombang maksimum yang dipancarkan semakin pendek

- Energi yang dipancarkan benda hitam ke semua arah tiap satuan waktu (Luminositas) dinyatakan oleh persamaan Stefan-Boltzmann:

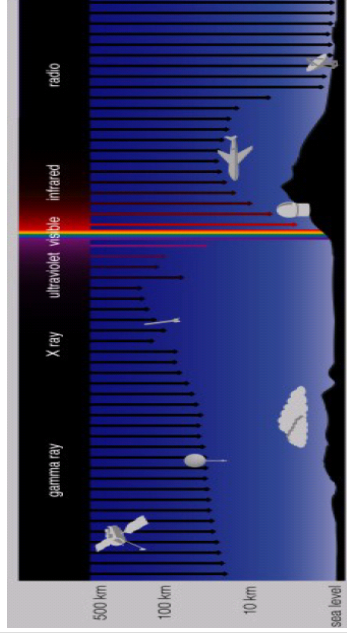
$$L = A \sigma T^4$$

dengan σ adalah konstanta Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ di sini T disebut sebagai *suhu efektif*

- Untuk benda hitam berbentuk bola, maka persamaan Stefan-Boltzmann dinyatakan sebagai:
$$L = 4 \pi R^2 \sigma T^4$$

- Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan bintang mencakup seluruh panjang gelombang, namun tidak semua bisa ditangkap di permukaan Bumi
- Atmosfer Bumi hanya meneruskan gelombang elektromagnetik pada panjang gelombang cahaya tampak dan gelombang radio. Sisanya diserap.
- Jadi dari permukaan Bumi hanya bisa diamati bintang dan benda langit pada panjang gelombang cahaya tampak dan radio (disebut jendela optik dan jendela radio)
- Sisanya? → perlu ditempatkan teleskop di luar atmosfer Bumi → HST, Chandra

Jendela optik dan jendela radio: daerah panjang gelombang radiasi elektromagnetik yang bisa diterima di permukaan Bumi. Sisanya diserap oleh atmosfer Bumi...



Radiasi Benda Hitam

- Benda Hitam = Benda yang mampu menyerap semua energi yang diterimanya (menyerap energi secara sempurna) → berwarna hitam dan juga sebaliknya: mampu memancarkan seluruh energi yang dimilikinya (pemancar sempurna) → benda hitam tidak selalu hitam!
- Radiasi yang dipancarkan oleh benda hitam disebut juga *radiasi benda hitam*
- Semua benda yang memiliki panas akan memancarkan radiasi benda hitam (termasuk bintang!)

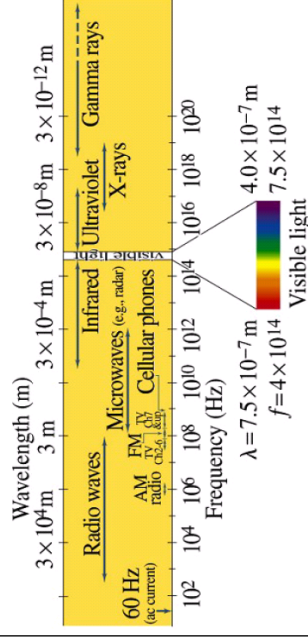
ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

FOTOMETRI BINTANG

© Denny Darmawan 2008

Bintang tidak bisa kita sentuh. Satu-satunya cara untuk mengetahui sifatnya hanya melalui gelombang elektromagnetik yang dipancarkannya

Spektrum gelombang elektromagnetik:



- Gelombang Radio : $\lambda > 10 \text{ cm}$
- Gelombang Mikro : $\lambda \approx 1 \text{ mm}$ hingga 10 cm
- Gelombang Infra Merah : $\lambda \approx 750 \text{ nm}$ hingga 1 mm
- Gelombang Optik (cahaya tampak) : $\lambda \approx 380 \text{ nm}$ hingga 750 nm
 merah : $\lambda \approx 630 \text{ nm} - 750 \text{ nm}$
 kuning : $\lambda \approx 570 \text{ nm} - 590 \text{ nm}$
 hijau : $\lambda \approx 510 \text{ nm} - 550 \text{ nm}$
 biru : $\lambda \approx 450 \text{ nm} - 480 \text{ nm}$
 ungu : $\lambda \approx 380 \text{ nm} - 420 \text{ nm}$
- Gelombang UV, X-ray, sinar gamma: $\lambda < 380 \text{ nm}$

- Dari skala Pogson:

$$m_A - m_B = -2,5 \log \left(\frac{F_A}{F_B} \right)$$

atau bisa dituliskan sebagai:

$$100^{(m_A - m_B)/5} = \frac{F_B}{F_A}$$

maka magnitudo mutlak suatu bintang

ditentukan dengan:

$$100^{(m - M)/5} = \frac{F_{1.0}}{F} = \left(\frac{d}{10 \text{ pc}} \right)^2$$

- Apabila magnitudo mutlak dari bintang diketahui, maka jarak bintang bisa ditentukan:

$$d = 10^{(m - M + 5)/5}$$

- Karena besaran $m - M$ menentukan jarak bintang, maka besaran ini dikenal sebagai **modulus jarak** yang dinyatakan sebagai:

$$m - M = 5 \log(d) - 5 = 5 \log \left(\frac{d}{10 \text{ pc}} \right)$$

- Contoh:

Magnitudo semu Matahari $m = -26,81$ dan jaraknya $d = 1 \text{ AU} = 4,848 \times 10^{-6} \text{ pc}$. Berapa magnitudo mutlaknya? modulus jaraknya?
 $M_{\text{Sun}} = m_{\text{Sun}} - 5 \log(d) + 5 = 4,76$

$$m_{\text{Sun}} - M_{\text{Sun}} = -31,57$$

Indeks Warna

- Magnitudo semu dan absolut yang kita pelajari sebelumnya diukur pada semua panjang gelombang cahaya yang dipancarkan bintang. Nilai ini sering disebut **magnitudo bolometrik** (m_{bol} dan M_{bol})
- Pada prakteknya, detektor hanya mengukur fluks pancaran pada panjang gelombang tertentu
- 'Warna' bintang dapat diukur menggunakan filter yang hanya meneruskan cahaya pada panjang gelombang tertentu

Contoh penerapan:

Betegeuse memiliki suhu permukaan 3400 K.

Pada spektrum apa intensitas radiasinya maksimum?

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T} \text{ (m K)} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{3400} \text{ (m)} = 8,53 \times 10^{-7} \text{ m}$$

intensitas radiasi maksimum pada panjang gelombang infra merah

Bagaimana dengan Rigel yang memiliki suhu permukaan 10010 K?

→ intensitas maksimum pada panjang gelombang UV

- Berdasarkan pengukuran satelit *Solar Maximum Mission* dan *SpaceLab*, diketahui fluks Matahari di atas permukaan atmosfer adalah: $F = 1368 \text{ watt/m}^2$ det (dikenal dengan tetapan *Matahari / solar constant*). Berapakah luminositas Matahari? Berapa suhu permukaan? ($R \approx 7 \times 10^8 \text{ m}$)

$$L = 4 \pi r^2 F$$

Dari dan karena jarak Bumi-Matahari (r) adalah $1 \text{ AU} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$, maka

$$L = 3,826 \times 10^{26} \text{ watt}$$

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

Dari diperoleh suhu permukaan

$$\text{Matahari } T_{\text{ef}} = 5785 \text{ K}$$

Magnitudo Mutlak

- Konsep **magnitudo semu** tidak dapat digunakan untuk menentukan sifat fisis suatu bintang kecuali terang/redupnya bintang itu relatif dari permukaan Bumi
- Agar magnitudo bintang dapat menunjukkan sifat fisis yang sebenarnya, dikenalkan konsep **magnitudo mutlak** (M), yaitu magnitudo suatu bintang jika diletakkan pada jarak 10 pc dari Bumi.
- Nilai magnitudo mutlak dapat ditentukan dari nilai magnitudo semunya

- Fluks energi, yaitu jumlah energi yang dipancarkan setiap m^2 permukaan benda hitam tiap detik, dinyatakan sebagai

$$F = \sigma T^4$$

sehingga

$$L = 4 \pi R^2 F$$

- Pada jarak r dari benda hitam, besarnya fluks energi yang diterima pengamat per satuan waktu adalah

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

di sini F disebut sebagai **fluks pancaran/radiant**

- Karena bintang dapat dianggap sebagai benda hitam (meskipun tidak 100%), maka hukum-hukum yang berlaku pada benda hitam dapat dikenakan juga pada bintang.

- Jumlah energi yang dipancarkan bintang beradius R dan bersuhu T_{ef} tiap detik ke semua arah (Luminositas bintang) adalah:

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

- Jumlah energi yang dipancarkan bintang tiap detik tiap satuan luas (Fluks radiant/pancaran):

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

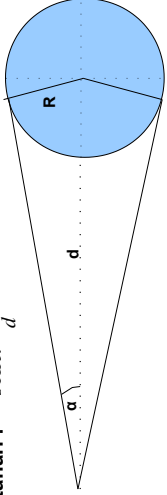
- Suhu efektif (T_{ef}) merupakan suhu lapisan paling luar dari suatu bintang (lapisan fotosfer)
- Fluks pancaran yang diterima/dilewati suatu permukaan per satuan luas per detik pada jarak r dari bintang dinyatakan dengan:

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

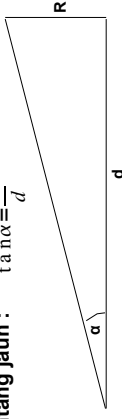
Di sini merupakan terang bintang yang kita lihat, sementara L menyatakan intensitas yang sebenarnya.

Semakin jauh suatu bintang, semakin redup cahayanya

Matahari : $\sin \alpha = \frac{R}{d}$



Bintang jauh : $\tan \alpha = \frac{R}{d}$



- karena α sangat kecil, maka dapat didekati dengan (dalam satuan sudut radian)

$$\alpha = \frac{R}{d}$$

- Jika digunakan garis tengah sudut $\delta = 2\alpha$ maka fluks pancaran pada jarak r dari bintang adalah:

$$F = \frac{\delta^2}{4} \sigma T_{ef}^4$$

untuk matahari:

$$F_0 = \frac{\delta_0^2}{4} \sigma T_{ef,0}^4$$

- Bandingkan fluks bintang dengan fluks Matahari diperoleh:

$$\frac{T_{ef}}{T_{ef,0}} = \left(\frac{F}{F_0} \right)^{1/4} \left(\frac{\delta_0}{\delta} \right)^{1/2}$$

Dari nilai logaritmanya:

$$\log \left(\frac{T_{ef}}{T_{ef,0}} \right) = 0,25 \log \left(\frac{F}{F_0} \right) + 0,50 \log \left(\frac{\delta_0}{\delta} \right)$$

Karena

$$m - m_0 = -2,5 \log \left(\frac{F}{F_0} \right)$$

kita peroleh:

- Contoh penerapan:

Bintang Sirius memiliki magnitudo semu U, B, V berturut-turut $-1,50; -1,46; -1,46$ sehingga

$$U - B = -1,50 - (-1,46) = -0,04$$

dan

$$B - V = -1,46 - (-1,46) = 0,00$$

maka Sirius lebih terang pada panjang gelombang ultraviolet

Koreksi bolometrik untuk Sirius $BC = -0,09$ sehingga magnitudo bolometrik nampaknya:

$$m_{bol} = V + BC = -1,46 + (-0,09) = -1,55$$

Dari ketiga bintang berikut, mana yang paling terang? mana yang paling panas? mana yang paling dingin?

Bintang	B	V	B-V
1	8,52	8,82	-0,30
2	7,45	7,25	0,20
3	7,45	6,35	1,10

- Indeks warna $U - B$ merupakan selisih magnitudo ungu dengan biru
- Indeks warna $B - V$ merupakan selisih magnitudo biru dengan visual
- Karena semakin terang suatu bintang magnitudonya semakin mengecil, maka sebuah bintang dengan indeks warna $B - V$ yang lebih kecil akan nampak lebih biru dibanding bintang dengan nilai $B - V$ yang lebih besar
- Untuk bintang standar Vega, $U = B = V$, sehingga jika suatu bintang memiliki $(B - V) > 0$, maka nampak lebih merah dibanding Vega. Jika $(B - V) < 0$ maka nampak lebih biru

- Jika jarak bintang diketahui, maka dapat ditentukan magnitudo warna mutlaknya (M_U, M_B dan M_V) berikut indeks warnanya
 $U - B = M_U - M_B$
 $B - V = M_B - M_V$
- Selisih antara magnitudo bolometrik dan magnitudo visual disebut sebagai koreksi bolometrik / **Bolometric correction (BC)**
 $BC = m_{bol} - V = M_{bol} - M_V$
- Selain sistem UBV dari Johnson dan Morgan, dikenal juga sistem lain seperti: Sistem UGR dari Becker, Sistem $UBVY$ dari Stromgren dan Sistem $UVBGR$ dari Stebbins-Withford

Mengukur suhu efektif bintang

- Dari besaran fluks pancaran pada jarak r dari bintang :

$$F = \frac{L}{4 \pi r^2} = \frac{4 \pi R^2 \sigma T_{ef}^4}{4 \pi r^2} = \left(\frac{R}{r} \right)^2 \sigma T_{ef}^4$$

- Radius bintang R dapat ditentukan dari radius sudut bintang (α) :

$$\tan \alpha = \frac{R}{r}$$

- Jika magnitudo bintang yang teramati dari atas atmosfer adalah $m_{0\lambda}$ dan magnitudo bintang yang teramati dari Bumi adalah m_λ maka

$$m_{0\lambda} - m_\lambda = -2,5 \log \frac{F_{0\lambda}}{F_\lambda} = -2,5 \log e^{\tau_\lambda} = -1,086 \tau_\lambda$$

atau $m_\lambda - m_{0\lambda} = 1,086 \tau_\lambda$

yang menunjukkan bahwa ketika melewati atmosfer, cahaya bintang mengalami pelemahan sebesar $1,086 \tau_\lambda$

- Karena jarak zenith θ selalu berubah menurut waktu pengamatan, maka nilai pengurangan intensitas cahaya bintang juga bergantung pada waktu pengamatan.

- Untuk itu digunakan bintang standar sebagai pembandingan untuk menentukan magnitudo sebuah bintang

- Karena $ds = \sec \theta dx$ maka

$$\tau_\lambda = \int_x^0 \sigma_\lambda \sec \theta dx = \sec \theta \int_x^0 \sigma_\lambda dx = \tau_{0\lambda} \sec \theta$$

dengan $\tau_{0\lambda}$ adalah τ_λ pada arah zenith ($\theta = 0$)

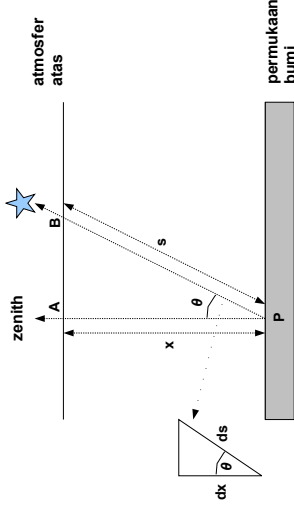
- Diperoleh persamaan Pogson

$$m_\lambda - m_{0\lambda} = 1,086 \tau_{0\lambda} \sec \theta$$

- Untuk menentukan nilai $\tau_{0\lambda}$ bintang standar diamati pada dua posisi, sehingga akan diperoleh

$$\tau_{0\lambda} = \frac{m_{\lambda 1} - m_{\lambda 2}}{1,086 (\sec \theta_1 - \sec \theta_2)}$$

- Dalam menentukan magnitudo sebuah bintang dengan mempertimbangkan pelemahan oleh atmosfer, diusahakan bintang standar berada di dekat bintang yang diamati



- Titik P adalah posisi pengamat di Bumi
- Cahaya bintang menembus atmosfer sepanjang s dengan membentuk sudut θ terhadap arah zenith
- Sudut θ disebut jarak zenith (sudut zenith)
- Besarnya penyerapan ditunjukkan oleh nilai koefisien absorpsi σ_λ (bergantung pada panjang gelombang)
- Pengurangan intensitas cahaya dapat dinyatakan sebagai

$$dF_\lambda = -F_\lambda \sigma_\lambda ds$$

- Tanda negatif menunjukkan fluks yang berkurang dengan bertambahnya jarak
- Dengan mengintegralkan dari $F_{0\lambda}$ (fluks di atas atmosfer) hingga F_λ (fluks di permukaan Bumi) diperoleh:

$$F_\lambda = F_{0\lambda} e^{-\tau_\lambda}$$

dengan
$$\tau_\lambda = \int_x^0 \sigma_\lambda ds$$

menyatakan ketebalan optis atmosfer Bumi sepanjang s

$$\log T_{ef} = \log T_{ef_0} - 0,1(m - m_0) + 0,5(\log \delta_0 - \log \delta)$$

untuk Matahari: $T_{ef} = 5785 \text{ K}$, $\delta = 1920''$ dan $m_0 = -26,79$, sehingga diperoleh:

$$\log T_{ef} = 2,726 - 0,5 \log \delta - 0,1m$$

Jadi, apabila magnitudo semu dan diameter sudut bintang diketahui, suhu efektif bintang dapat ditentukan.

PRI

- Bintang Dschubba yang berada di rasi Scorpio memiliki suhu permukaan 28000 K dan jejari $5,16 \times 10^9 \text{ m}$. Jika jaraknya dari Bumi 180 pc, tentukan:

- Luminositas bintang
- Magnitudo bolometrik mutlak
- Magnitudo bolometrik semu
- Modulus jarak
- Fluks pancaran di permukaan bintang
- Fluks pancaran di permukaan Bumi
- Panjang gelombang maksimum λ_{max}

Absorpsi oleh Atmosfer Bumi

- Karena atmosfer menyerap sebagian cahaya yang menembusnya, maka intensitas cahaya yang teramati dari permukaan Bumi akan berbeda dengan intensitas cahaya yang teramati di atas atmosfer Bumi
- Pengamatan terhadap magnitudo bintang dari permukaan Bumi harus dikoreksi terhadap penyerapan ini

- Normalnya, materi antar bintang memiliki $R=3,2$ sehingga $A_V = 3,2 E_{BV}$
- Semakin besar harga R , absorpsinya semakin meningkat

• Umumnya, nilai yang ditemukan adalah

$$A_B = 1,31 A_V \text{ dan } A_U = 1,53 A_V$$

sehingga

$$A_B - A_V = E(B - V) = 0,31 A_V$$

$$\text{dan } A_U - A_B = E(U - B) = 0,22 A_V$$

atau

$$E(U - B) = 0,72 E(B - V)$$

• Contoh penerapan:

Sebuah bintang memiliki $V = 10,0$ dan $B = 10,5$. Warna intrinsiknya $(B - V)_0 = 0$ dan $M_V = 0,8$.

Jika materi antar bintang di depannya normal, tentukan jarak sebenarnya bintang tersebut

$$E_{BV} = (B - V) - (B - V)_0 = 0,5$$

$$A_V = R E_{BV} = 3,2 (0,5) = 1,6$$

$$\text{karena } A_V = V - V_0 \text{ maka } V_0 = V - A_V = 8,4$$

$$\text{Dari rumus Pogson: } V = M_V - 5 + 5 \log d + A_V$$

$$10,0 = 0,8 - 5 + 5 \log d + 1,6$$

$$d = 331,13 \text{ pc}$$

- Jika magnitudo bintang yang sebenarnya (magnitudo intrinsik) adalah $m_{0\lambda}$ dan magnitudo bintang yang teramati dari Bumi adalah m_λ maka besarnya penyerapan oleh materi antar bintang adalah

$$m_\lambda - m_{0\lambda} = 1,086 \tau_\lambda = A_\lambda$$

dengan A_λ disebut sebagai **besaran absorpsi**, yang menunjukkan bahwa ketika melewati materi antar bintang, cahaya bintang mengalami pelemahan sebesar $1,086 \tau_\lambda$

- Akibat adanya penyerapan oleh materi antar bintang, skala Pogson dinyatakan dengan:

$$m_\lambda = M_\lambda - 5 + 5 \log d + A_\lambda$$

- Pada pengamatan dalam 2 panjang gelombang yaitu λ_1 dan λ_2 , besaran absorpsinya adalah

$$m_{\lambda_1} - m_{0\lambda_1} = A_{\lambda_1} \quad \text{dan} \quad m_{\lambda_2} - m_{0\lambda_2} = A_{\lambda_2}$$

dapat dinyatakan sebagai

$$(m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}) - (m_{0\lambda_1} - m_{0\lambda_2}) = A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2}$$

atau

$$(m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}) - (m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2})_0 = A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2}$$

- nilai $(m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2})$ disebut sebagai **warna intrinsik** dan $A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2}$ disebut sebagai **ekses warna** (color excess) dilambangkan dengan $E_{\lambda_1\lambda_2}$

- Didefinisikan rasio absorpsi sebagai

$$R = A_{\lambda_1} / E_{\lambda_1\lambda_2} \text{ maka } A_{\lambda_1} = R E_{\lambda_1\lambda_2}$$

- Untuk magnitudo B dan V :

$$E_{BV} = E(B - V) = (B - V) - (B - V)_0$$

$$V - V_0 = A_V$$

$$B - B_0 = A_B$$

$$A_V = R E_{BV} \text{ atau } A_V = R E(B - V)$$

$$V = M_V - 5 + 5 \log d + A_V$$

- Contoh penerapan:

Untuk mengamati magnitudo sebuah bintang (bintang program), digunakan sebuah bintang standar sebagai pembanding. Dari pengamatan terhadap bintang standar diketahui pada jarak zenit 35° magnitudo semunya $9,2$ dan pada jarak zenit 15° magnitudo semunya $9,0$. Jika pada jarak zenit 25° magnitudo semu bintang program $8,9$ maka tentukan magnitudo bintang ini sebelum mengalami pelemahan intensitas oleh atmosfer Bumi

Untuk bintang standar

$$\tau_0 = \frac{m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}}{1,086(\sec \theta_1 - \sec \theta_2)} = \frac{9,2 - 9,0}{1,086(\sec 35^\circ - \sec 15^\circ)}$$

$$= 0,99$$

Untuk bintang program

$$m_0 = m - 1,086 \tau_0 \sec \theta$$

$$= 8,9 - 1,086 (0,99)(\sec 25^\circ)$$

$$= 8,9 - 1,19 = 7,71$$

Absorpsi Oleh Materi Antar Bintang

- Ruang antar bintang bukanlah ruang hampa, melainkan dipenuhi oleh materi antar bintang yang dapat melemahkan cahaya bintang akibat adanya absorpsi
- Absorpsi oleh materi antar bintang disebut juga dengan efek pemerahan (*reddening*) karena cahaya bintang menjadi lebih merah dari yang sebenarnya
- Koreksi magnitudo ditentukan dengan cara yang sama dengan koreksi akibat pelemahan intensitas cahaya oleh atmosfer Bumi

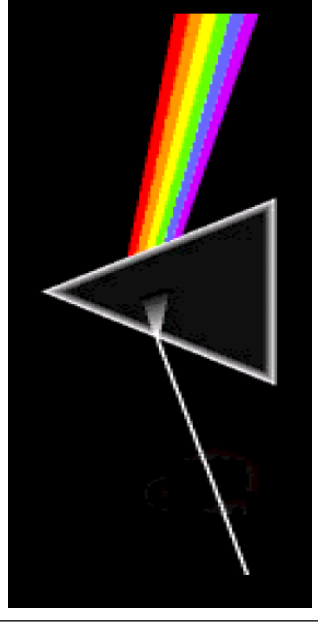
ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

SPEKTROSKOPI BINTANG

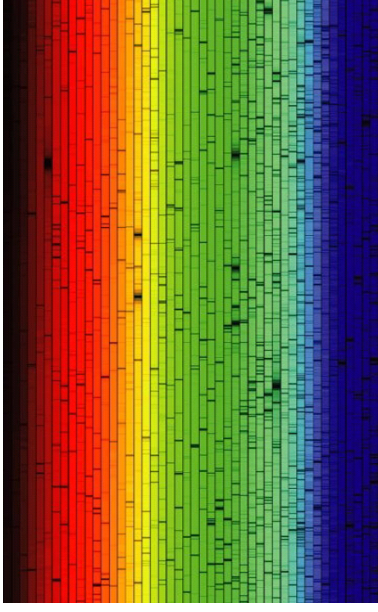
© Denny Darmawan 2008

- Ketika berkas sinar Matahari dilewatkan melalui gelas prisma, akan nampak uraian warna yang dikenal sebagai *spektrum*
- Wollaston pada 1804 menemukan adanya garis gelap pada spektrum Matahari
- Pengamatan yang lebih teliti oleh Fraunhofer menunjukkan bahwa terdapat lebih dari 600 garis gelap pada spektrum Matahari yang kemudian disebut **garis Fraunhofer**
- Fraunhofer pada 1814 menemukan bahwa spektrum bintang juga memiliki garis-garis gelap serupa Matahari

Berkas sinar Matahari akan diuraikan ke dalam bentuk spektrum warna oleh gelas prisma



Garis Fraunhofer pada spektrum Matahari



Hukum Kirchhoff tentang Pembentukan Spektrum

1. Apabila suatu benda dalam wujud padat, cair atau gas dipijarkan pada tekanan tinggi, benda tersebut akan memancarkan radiasi pada semua panjang gelombang. Spektrumnya disebut sebagai **spektrum kontinyu**



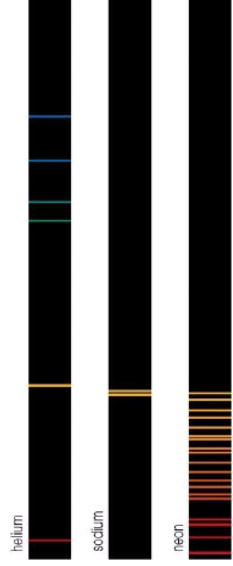
2. Gas bertekanan rendah jika dipijarkan akan memancarkan radiasi hanya pada panjang gelombang tertentu. Spektrum yang diperoleh berupa garis-garis terang yang disebut **garis emisi**



3. Bila berkas cahaya putih dengan spektrum kontinyu dilewatkan melalui gas yang dingin dan bertekanan rendah, maka gas tersebut akan menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu. Spektrum yang diperoleh berupa spektrum kontinyu dari cahaya tersebut dengan diselingi garis-garis gelap yang disebut **garis serapan/absorpsi**



Setiap unsur kimia memancarkan spektrum emisi yang khas (analog dengan "sidik jari")



Spektrum Pada Atom Hidrogen

- Hidrogen merupakan unsur paling sederhana di alam (terdiri atas 1 proton dan 1 elektron)
- Ketika dipijarkan, gas Hidrogen akan memancarkan radiasi dengan spektrum emisi (garis-garis terang) yang khas
- J.J. Balmer menemukan bahwa panjang gelombang garis-garis ini memenuhi

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

dengan $R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ adalah tetapan Rydberg untuk atom Hidrogen

Bintang Berdasar Spektrum

- Kelas : B
- Warna : Biru keputih-putihan
- Suhu : 11 000 – 30 000 K
- Ciri : Garis absorpsi dari Helium netral. Garis Hidrogen lebih jelas dibanding kelas O
- Contoh : Bintang Rigel dan Spica

- Bintang memancarkan radiasi pada semua panjang gelombang sehingga memiliki spektrum kontinyu
- Bagian bintang yang memancarkan spektrum kontinyu (yang berarti berupa gas bertekanan tinggi) disebut sebagai **fotosfer**
- Fotosfer diselubungi lapisan gas yang lebih dingin dan renggang sehingga memberikan radiasi dengan spektrum absorpsi
- Dengan mengamati spektrum absorpsi radiasi bintang, dapat diperkirakan kandungan unsur kimia di atmosfer bintang tersebut

- n adalah bilangan bulat ≥ 3 (3, 4, 5, ... dst)
- Deretan garis terang ini kemudian dikenal dengan **Deret Balmer** di daerah visual
- Untuk $n = 3$ diperoleh garis Balmer pertama, H_{α} , dengan $\lambda = 656 \text{ nm}$
- Untuk $n = 4$ diperoleh garis Balmer kedua, H_{β} , dengan $\lambda = 486 \text{ nm}$, dst.
- Semakin besar n diperoleh λ yang semakin mengecil
- **Batas Deret Balmer** adalah $n = \infty$ dengan $\lambda = 365 \text{ nm}$

Bintang Berdasar Spektrum

- Kelas : A
- Warna : Putih
- Suhu : 7 500 – 11 000 K
- Ciri : Garis absorpsi Hidrogen tampak kuat
- Contoh : Bintang Sirius dan Vega

Klasifikasi Bintang

- Selain menggolongkan bintang berdasar magnitudo, astronom juga mengelompokkan bintang berdasar spektrumnya
- Penggolongan berdasar spektrum diawali oleh Angelo Sechihi pada tahun 1863. Penggolongan yang digunakan saat ini berdasarkan sistem dari Annie J. Cannon
- Spektrum bintang digolongkan ke dalam kelas yang dapat dinyatakan dengan huruf sebagai:
O B A F G K M
- Penggolongan ini berdasar suhu permukaan bintang

- Selain Deret Balmer, diremukan deret yang lain pada spektrum Hidrogen
- Secara umum:
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$
- Untuk $m=1$ diperoleh deret Lyman di daerah UV
- Untuk $m=2$ diperoleh deret Balmer di daerah visual
- Untuk $m=3$ diperoleh deret Paschen di daerah IR
- Untuk $m=4$ diperoleh deret Brackett di daerah IR
- Untuk $m=5$ diperoleh deret Pfund di daerah IR

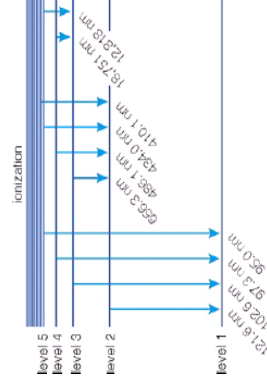
Bintang Berdasar Spektrum

- Kelas : F
- Warna : Putih kekuningan
- Suhu : 6 000 – 7 000 K
- Ciri : Garis Hidrogen tampak lebih lemah dibanding kelas A. Garis absorpsi kalsium terionisasi mulai tampak.
- Contoh : Bintang Canopus, Procyon, Polaris

Bintang Berdasar Spektrum

- Kelas : O
- Warna : Biru
- Suhu : > 30 000 K
- Ciri : Garis absorpsi dari Helium terionisasi, Garis Hidrogen juga tampak tapi lemah
- Contoh : Bintang-bintang di sabuk Orion (Alnitak dan Mintaka)

Garis-garis emisi terjadi ketika elektron tereksitasi ke level yang lebih tinggi akibat menyerap foton dengan energi yang sesuai kemudian kembali ke level semula dengan melepaskan foton kembali



Bintang Dengan Spektrum Khusus

Terdapat banyak bintang yang tidak dapat digolongkan ke dalam kelas O, B, A, F, G, K & M

- Bintang Wolf-Rayet (WR)
 - Spektrumnya mirip bintang kelas O, namun dengan garis emisi yang lebar dari unsur He, N, C dan O terionisasi tinggi
 - Terbagi 2 grup: WR yang memiliki garis emisi He dan N (bintang WN = WR dengan N) dan yang memiliki garis emisi He, C dan O (bintang WC = WR dengan C)
 - Suhu efektif bintang WR mencapai 40000 – 50000 K

• Bintang P-Cygni

- memiliki garis emisi kuat dari H dan He yang berdampingan dengan garis absorpsi pada gelombang pendek
- diperkirakan mengalami efek pelontaran massa
- Bintang B emisi (Be)
 - Spektrumnya mirip bintang kelas B namun memiliki garis emisi pada deret Balmer H_α dan H_β , garis He dan terkadang garis logam terionisasi
- Bintang kelas A yang aneh/*peculiar* (Ap)
 - Spektrumnya mirip bintang kelas A namun dengan garis Si, Sr, Cr dan Eu yang kuat

• Bintang kelas A metalik (Am)

- Spektrumnya mirip bintang kelas A atau kelas F awal ditambah garis-garis yang kuat dari unsur-unsur berat
- Hampir semua bintang Am adalah bintang ganda
- Bintang Barium (Ba)
 - Spektrumnya mirip bintang kelas G awal atau K awal ditambah garis Barium (Ba) dan Strontium (Sr) yang kuat
- Bintang T Tauri
 - Spektrumnya mirip bintang kelas F atau M ditambah garis emisi kuat dari H, Ca terionisasi 2 kali dan K

- Klasifikasi tersebut masih dapat dibagi lagi ke dalam 10 sub kelas:

O₀, O₁, O₂, ..., O₉

B₀, B₁, B₂, ..., B₉

A₀, A₁, A₂, ..., A₉

.

M₀, M₁, M₂, ..., M₉

Kelas Berdasar Luminositas

- Adams dan Kohlschutter pada tahun 1913 menunjukkan bahwa ketebalan garis spektrum dapat digunakan untuk menentukan luminositas bintang
- Berdasar fakta ini, Morgan dan Keenan (MK) membagi bintang ke dalam kelas luminositas:
 - Kelas Ia** : bintang maharaksasa sangat terang
 - Kelas Ib** : bintang maharaksasa kurang terang
 - Kelas II** : bintang raksasa terang
 - Kelas III** : bintang raksasa
 - Kelas IV** : bintang subraksasa
 - Kelas V** : bintang deret utama

- Penggolongan berdasar luminositas dikenal juga sebagai penggolongan Morgan-Keenan atau penggolongan MK

- Dengan adanya kelas spektrum dan juga kelas luminositas, dalam penulisan keduanya digabungkan:

- **G2 V** : adalah bintang deret utama dengan kelas spektrum G2. Contoh: Matahari
- **A2 Ia** : adalah bintang maharaksasa sangat terang dengan kelas spektrum A2. Contoh: Deneb
- **M2 Ib** : adalah bintang maharaksasa kurang terang dengan kelas spektrum M2. Contoh: Betelgeuse

Bintang Berdasar Spektrum

- Kelas : G
- Warna : Kuning
- Suhu : 5 000 – 6 000 K
- Ciri : Garis absorpsi Hidrogen lebih lemah dibanding kelas F. Garis Kalsium terionisasi tampak kuat.
- Contoh : Matahari, Capella, Alpha Centauri

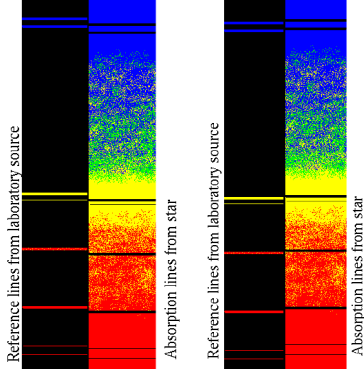
Bintang Berdasar Spektrum

- Kelas : K
- Warna : Oranye
- Suhu : 3 500 – 5 000 K
- Ciri : Garis absorpsi dari logam netral dan terionisasi satu kali.
- Contoh : Bintang Arcturus dan Aldebaran

Bintang Berdasar Spektrum

- Kelas : M
- Warna : Merah
- Suhu : 2 500 – 3 000 K
- Ciri : Garis absorpsi molekuler tampak kuat
- Contoh : Bintang Betelgeuse dan Antares

$\Delta\lambda$ positif berarti sumber bergerak menjauh, $\Delta\lambda$ negatif berarti sumber bergerak mendekat



Pelebaran Garis Spektrum

Garis spektrum tidak tajam, namun memiliki ketebalan tertentu. Hal ini bisa diakibatkan oleh:

- Pelebaran alamiah
- Pelebaran Doppler
- Pelebaran tumbukan
- Efek Zeeman

Namun, selain pengaruh internal atom unsur, pelebaran garis spektrum juga dapat diakibatkan oleh pengaruh luar, misal:

- Rotasi bintang
- Pengembangan selubung (kasus P-Cygni)
- Turbulensi di atmosfer bintang

Efek Doppler

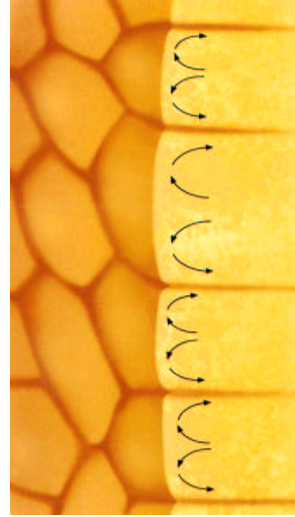
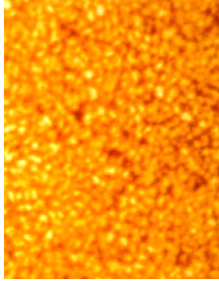
- C. Doppler tahun 1842 menunjukkan bahwa jika sumber cahaya bergerak mendekat, maka frekuensinya meningkat (λ memendek) dan sebaliknya (dikenal dengan **efek Doppler**)
- Jika λ_0 adalah panjang gelombang diam (sumber dan pengamat berada pada kecepatan yang sama) dan λ adalah panjang gelombang yang diamati, $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ adalah pergeseran Doppler, maka untuk kecepatan radial v_r , jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya c , berlaku:

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} c$$

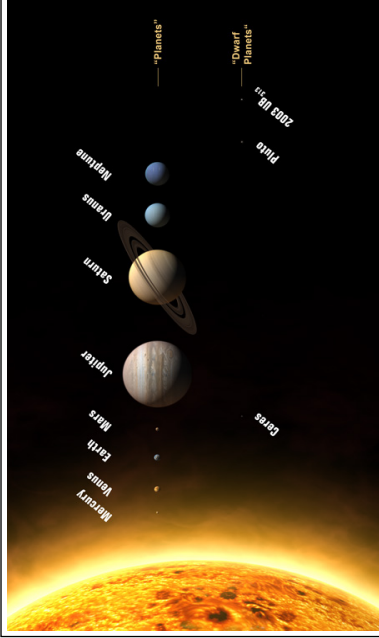
Fotosfer

- Merupakan lapisan atmosfer matahari yang terlihat dari Bumi (pada daerah λ tampak)
- Memiliki suhu sekitar 6000 K
- Ketebalan sekitar 500 km
- Cahaya yang dipancarkan lapisan di bawah fotosfer terhalang oleh gas di fotosfer sehingga tidak dapat lolos dari Matahari
- Spektrum absorpsi yang teramati di Bumi menunjukkan unsur-unsur yang ada di fotosfer

- Citra fotosfer menunjukkan adanya **granula** = mirip butiran terang dengan tepi gelap
- Pola dari granula disebut sebagai **granulasi**
- Tiap granula berumur 10-20 menit sebelum diganti yang baru
- Pusat granula ratusan kali lebih panas dibanding tepinya



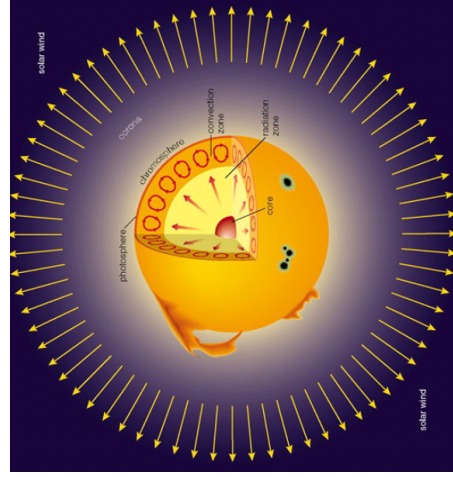
Pusat granula bergerak naik dan tepinya tenggelam dengan kelajuan 1 km/s = proses konveksi



Perbandingan ukuran Matahari dengan planet-planet di tata surya

Anatomi Matahari

- Secara umum terbagi menjadi 2 bagian:
 - Atmosfer matahari (Struktur luar)
 - Struktur dalam
- Struktur dalam terbagi ke dalam 3 bagian:
 - Inti matahari
 - Zona radiasi
 - Zona konveksi
- Atmosfer terbagi ke dalam 3 lapisan:
 - Fotosfer
 - Kromosfer
 - Korona



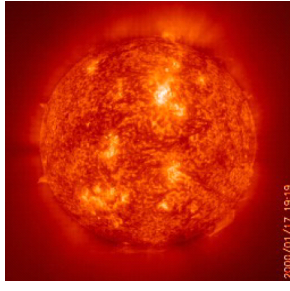
ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

MATAHARI

© Denny Darmawan 2008

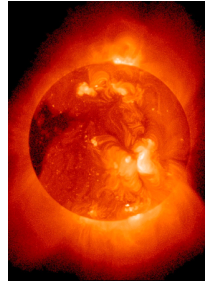
'Data Diri' Matahari

- Jarak dari Bumi: 1 AU (150 juta km)
- Diameter sudut dari Bumi: 0,53°
- Periode rotasi: 25 hari (di ekuator) 31 hari (di kutub)
- Jejari: 696 ribu km
- Massa: 2×10^{30} kg
- Kerapatan: 1409 kg/m³



'Data Diri' Matahari

- Luminositas: $3,8 \times 10^{26}$ watt
- Suhu inti: 15 juta K
- Suhu permukaan: 5800 K
- Suhu bintang: 4000K
- Tipe Spektra: G2 V
- Magnitudo mutlak: 4.83
- Magnitudo semu: -26,74

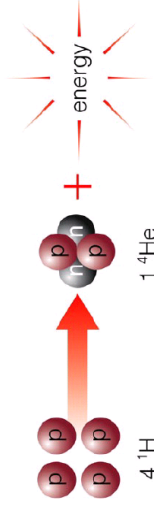


Struktur Dalam

- Bagian yang tak bisa diamati dari Bumi karena cahayanya terhalang oleh atmosfer Matahari
- Pada inti matahari, terjadi reaksi fusi yang membangkitkan energi bagi Matahari
- Energi yang dihasilkan diradiasikan keluar ke permukaan Matahari
- Di permukaan terjadi proses konveksi: materi yang lebih panas bergerak naik sementara materi yang lebih dingin tenggelam

Reaksi Fusi

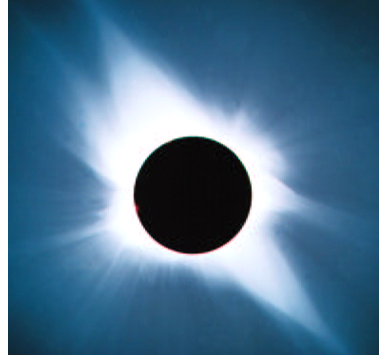
- Reaksi dimana massa unsur setelah penggabungan lebih kecil dibanding massa total dari partikel sebelum digabung
- Selisih massa diubah ke bentuk radiasi
- Reaksi fusi hanya terjadi pada lingkungan bersuhu ekstrem tinggi
- Inti-inti atom cenderung saling tolak (bermuatan sejenis), dibutuhkan suhu tinggi agar inti-inti tersebut dapat bergabung (gaya elektrostatis vs gaya kuat)
- Laju fusi sangat bergantung pada suhu



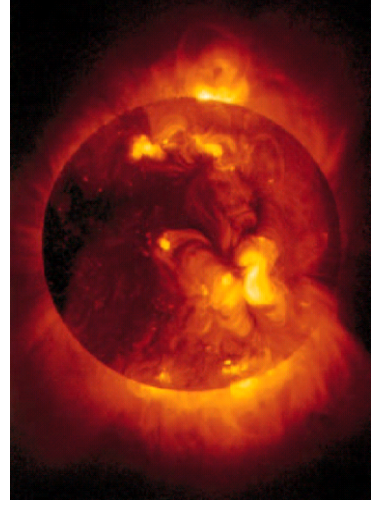
Hidrogen mengalami fusi menghasilkan Helium melalui rantai proton-proton

Korona

- Memiliki ketinggian hingga 12 jejari Matahari!
- Memiliki suhu dari 50 ribu K (di dekat kromosfer) hingga 3 juta K (bagian luar korona)
- Memancar radiasi pada λ sinar-X
- Bagian luar korona terlalu panas untuk ditahan Matahari. Terlepas sebagai **angin Matahari** (**solar wind**) berupa semburan proton dan elektron (Hidrogen terionisasi)
- Masih merupakan misteri mengapa suhu justru meningkat dengan semakin tingginya korona



Korona yang teramati secara visual pada saat gerhana Matahari



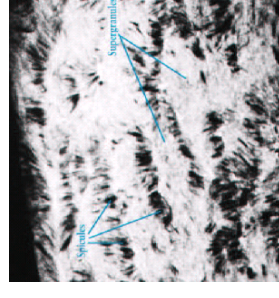
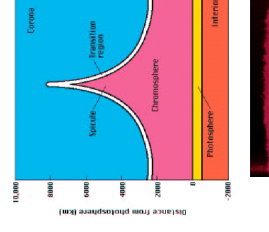
Korona yang teramati pada spektrum sinar-X

Kromosfer

- Memiliki ketebalan sekitar 2000 km
- Memiliki suhu 10 ribu – 1 juta K
- Memancar radiasi pada λ ultraviolet
- 1000 kali lebih redup dibanding Fotosfer
- Hanya terlihat secara visual dari Bumi selama gerhana Matahari
- Memancarkan spektrum emisi (= lapisan berkerapatan rendah)
- Diamati dengan filter khusus yang bekerja pada λ tertentu (monokromatik) = filter H_α dan Ca^{2+}



Kromosfer yang teramati sebagai lapisan tipis warna pink saat gerhana Matahari

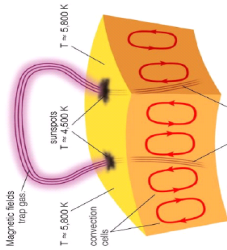
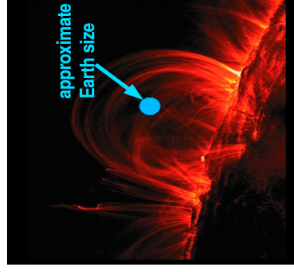


- Terdapat fenomena **spikula** = semburan gas dingin yang terlepas hingga ribuan km
- Muncul sepanjang batas **granula-super**

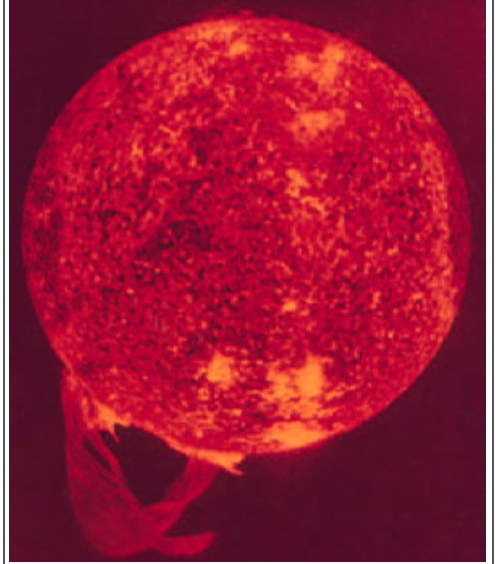


- Di awal siklus, bintik mulai muncul di lintang 35° dari ekuator
- Di akhir siklus, bintik berada di lintang 5°
- Plot posisi bintik terhadap lintang menghasilkan diagram kupu-kupu Maunder
- Diketahui tahun 1645-1715 cacah bintang Matahari sangat sedikit (Maunder minimum), bersamaan dengan adanya suhu ekstrem dingin di Eropa dan Amerika Utara

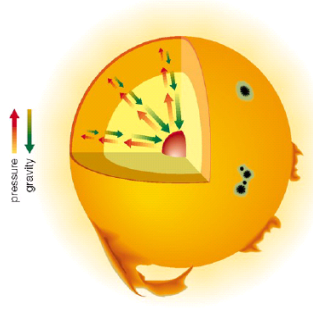
Bintik Matahari merupakan badai magnetik yang terjadi di permukaan Matahari



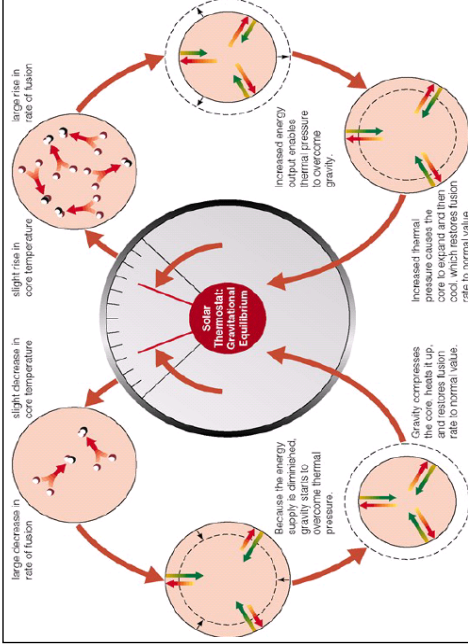
Kromosfer dan Korona di atas bintang akan terganggu, ditunjukkan dengan adanya gas yang terjebak pada medan magnet dari bintang matahari (prominensa)



Bagaimana Matahari Memperoleh Keseimbangan ?

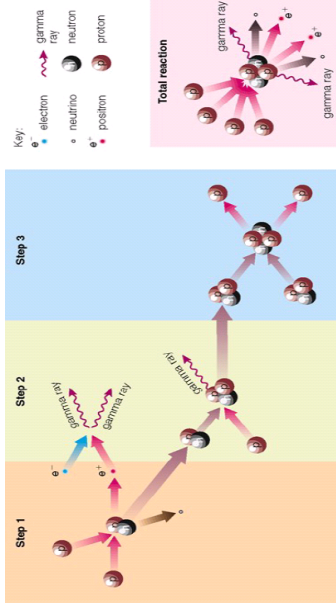
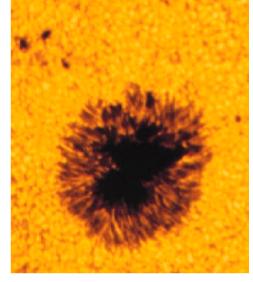


- Karena adanya keseimbangan gravitasi
- Material yang berada di atas disokong oleh tekanan di bawahnya
- Semakin ke bawah, tekanan semakin meningkat



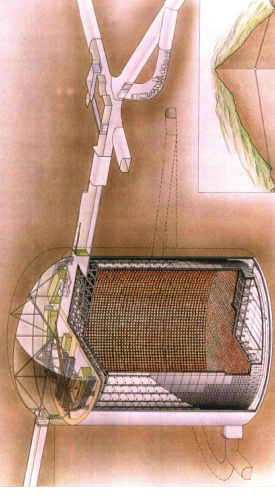
Bintik Matahari

- Titik-titik gelap pada fotosfer Matahari
- Terdiri atas **umbra** di tengah bintik dan **penumbra** di tepinya
- Nampak gelap karena bersuhu lebih rendah dibanding sekitarnya
- Suhu umbra sekitar 4200 K (fotosfer 6000 K)
- Berukuran hingga 2 kali diameter Bumi



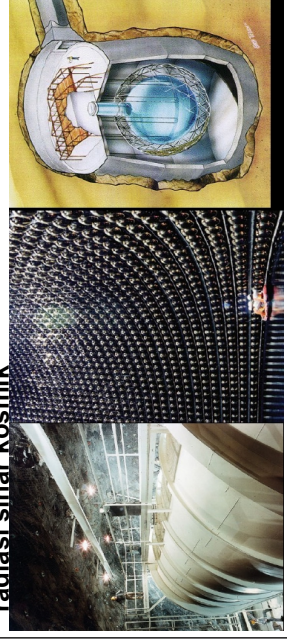
4 proton (H) bergabung menjadi: 1 He + 2 positron + 2 neutrino + 2 sinar gamma

Bagaimana membuktikan keberadaan fusi di inti matahari?



Berburu neutrino: partikel 'hantu' yang memiliki massa sangat kecil dan sulit berinteraksi dengan apapun, dihasilkan 2 partikel setiap reaksi fusi inti di Matahari

Diperlukan detektor raksasa, karena interaksi neutrino yang sangat jarang, dan berada di bawah permukaan tanah untuk melindungi dari radiasi sinar kosmik



Homestake mine, U.S.
SuperKamiokande, Jepang
SNO, Canada

Jenis Bintang Ganda

- Bintang Ganda Visual
 - Kedua bintang dan jarak pisahnya dapat diamati melalui teleskop
 - Contoh: Mizar di Ursa Mayor dan Alpha Centauri
- Bintang Ganda Astrometri
 - Salah satu bintang terlalu redup untuk dapat diamati, namun gerak mengorbit bintang yang terang dapat dilihat
 - Contoh: Sirius

Menentukan Massa Bintang

- Massa bintang tidak akan dapat ditentukan dari cahayanya
- Untuk mengetahui massa bintang dapat digunakan **bintang ganda (binary star)**, pasangan bintang yang saling mengorbit
- Mayoritas bintang yang dapat kita amati merupakan bintang ganda
- Massa bintang dapat diketahui dari gerak orbitnya

Bintang Ganda Spektroskopi

- Tampak sebagai bintang tunggal karena jarak pisahnya terlalu dekat untuk dapat diamati melalui teleskop, dan hanya dapat diketahui dari spektrumnya
- Contoh: HD80715
- Bintang Ganda Gerhana
 - Jarak pisah tidak dapat diamati secara visual, namun intensitas cahaya salah satu bintang meredup saat pasangannya lewat di depannya (relatif ke Bumi)
 - Contoh: Algol (β Persei)

Diagram H-R

- Setelah mengetahui luminositas, suhu, ukuran, jarak dan massa kita dapat melihat gambaran besar dari bintang-bintang yang teramati di langit
- Untuk dapat melihat pola dari mayoritas bintang, data yang kita peroleh dikumpulkan dalam sebuah diagram
- **Diagram HR (Hertzsprung-Russel)**, mengelompokkan bintang berdasarkan suhu dan luminositasnya

ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

BINTANG

© Denny Darmawan 2008

- Bintang terlalu jauh untuk diamati sifatnya
- Pengamat hanya mengandalkan informasi yang dibawa oleh cahaya dari bintang
- 5 sifat yang dapat diketahui
 - Beberapa banyak energi yang dipancarkan
 - Beberapa besar ukuran bintang
 - Beberapa panas
 - Beberapa jauh
 - Beberapa massive
- Dari ke-5 sifat tadi, kita bisa mendapatkan gambaran besar mengenai sifat-sifat umum dari bintang

- Beberapa jauh?
 - Dihitung dari paralaks bintang
- Beberapa terang (banyaknya energi yang dipancarkan)?
 - Dari magnitudo semu dan jaraknya dari bumi, dapat ditentukan magnitudo intrinsik dan luminositasnya
- Beberapa panas?
 - Dapat diketahui dari spektrumnya
 - Dapat juga dihitung dari magnitudo semunya
- Beberapa besar?
 - Dapat diketahui dari suhu dan luminositasnya
- Beberapa massive?

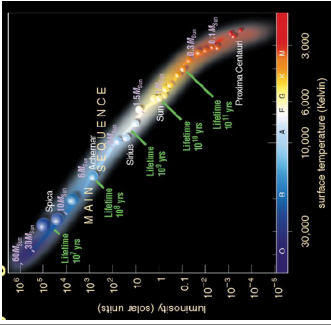
- Pada bintang ganda, gerak orbitnya mengitari sebuah titik yang disebut **pusat massa**
- Pusat massa tidak selalu berada tepat di tengah jarak antar kedua bintang, namun lebih dekat ke bintang yang massive
- Perbandingan jarak kedua bintang ke pusat massa sama menunjukkan perbandingan massa kedua bintang ($M_1 r_1 = M_2 r_2$)
- Sama dengan konsep pesawat sederhana yang Anda pelajari di sekolah dasar: *jangkat-jungkit!*
- Bintang bermassa lebih besar memiliki orbit yang lebih pendek (karena lebih dekat ke pusat massa).

- Dari hukum Kepler 3:

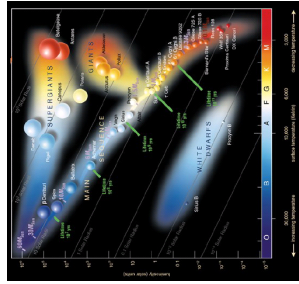
$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{P^2}$$

- M_1 = massa bintang 1
- M_2 = massa bintang 2
- a = jarak rerata kedua bintang (dalam AU)
- P = periode orbit (dalam tahun)
- Contoh penerapan:
Sebuah sistem bintang ganda memiliki periode orbit 32 tahun dan jarak pisah 16 AU. Berapa total massa sistem tersebut?
Jawab: $16^3/32^2 = 4$ x massa Matahari

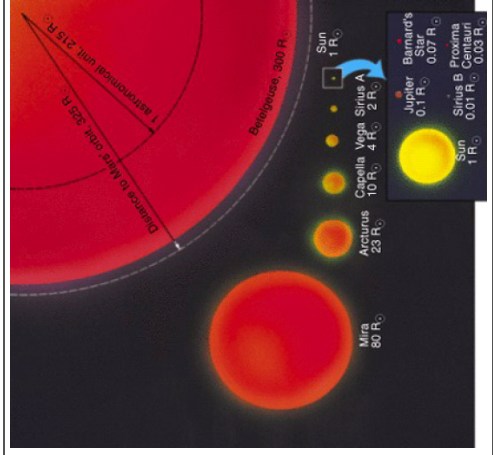
- semakin lama Hidrogen semakin habis, bintang tidak selamanya ada di deret utama!
- Usia Matahari di deret utama = 10 milyar tahun)
- Untuk bintang besar dan panas = beberapa juta tahun
- Semakin massive, semakin terang dan usianya semakin pendek



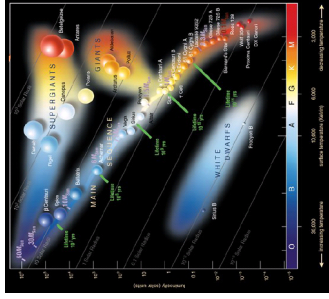
Bintang Maha Raksasa (Supergiant) dan Raksasa (Giant)



- Merupakan bintang yang kehabisan Hidrogen
- Inti mengecil, memanas dan memicu fusi lanjut
- Atmosfer mengembang
- Bintang raksasa terang karena ukurannya
- Maha raksasa = berukuran besar, bersuhu panas hingga dingin
- Raksasa = ukuran besar, suhu agak dingin



Grup Pada Diagram HR



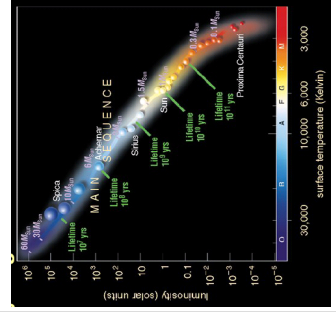
- Maharaksasa
 - sangat besar & terang
 - bersuhu panas hingga dingin
- Raksasa
 - besar dan terang
 - agak dingin
- Deret Utama
 - mayoritas bintang
 - besar hingga kecil
 - panas hingga dingin
- Katai Putih
 - kecil, terang, panas

Diagram HR memberikan kelas bintang berdasarkan luminositas:

- Kelas I : Maha raksasa
- Kelas II : Raksasa Terang
- Kelas III: Raksasa
- Kelas IV: Sub-raksasa
- Kelas V : Deret utama

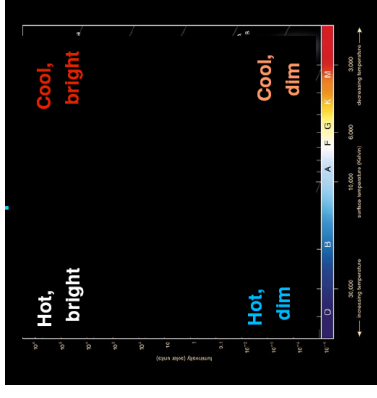
katai/kerdil putih (*white dwarf*) dikelaskan sebagai wd

Bintang Deret Utama

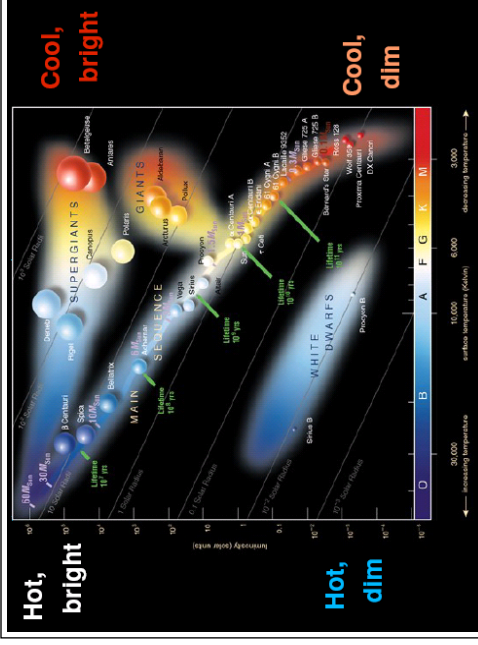


- merupakan bintang dengan Hidrogen sebagai bahan bakar utama
- Posisi pada kurva bergantung massa bintang
- Semakin besar massa, semakin terang (untuk menyokong massa yang besar butuh fusi lebih banyak agar tekanan keluar cukup besar)

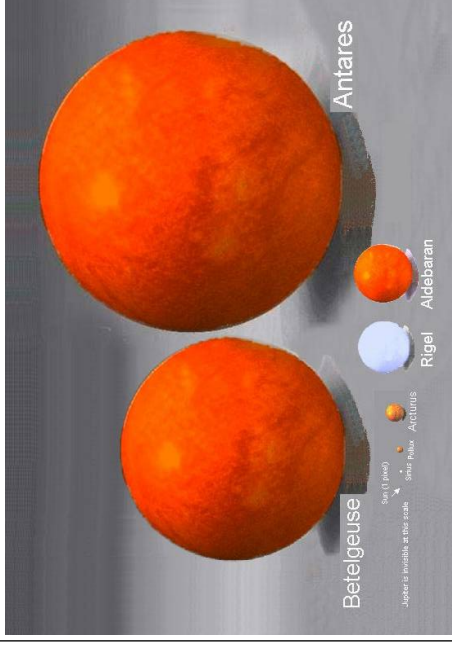
Sumbu-y menunjukkan luminositas bintang (juga magnitudo mutlak) dalam skala logaritmik



Sumbu-x menunjukkan suhu bintang (dan juga kelas spektrumnya) dalam skala logaritmik

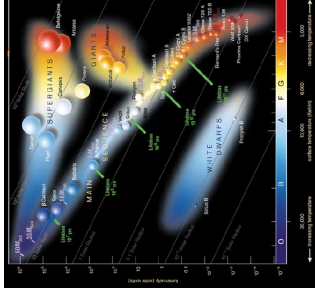


- Pada ordinat diagram HR, semakin ke atas luminositas semakin besar
- Pada absis diagram HR, semakin ke kanan, suhu semakin berkurang
- Suhu bintang akan menentukan luminositasnya, namun juga ditentukan oleh jejari bintangnya.
- Jejari bintang dapat diamati dari posisinya pada diagram HR!
- Pada nilai suhu yang sama, semakin tinggi luminositas, jejari bintang semakin besar.



Bintang Katai Putih (White Dwarf)

- Bintang yang kehabisan bahan bakar nuklirnya dan tidak lagi mampu melakukan reaksi fusi
- Gravitasi yang tidak ditahan tekanan fusi menyebabkan kolaps dan memanas
- Berukuran kecil dan panas, namun semakin lama semakin dingin



Contoh Katai Putih: Sirius B

- **Sirius A** : terang pada cahaya tampak, redup pada spektrum sinar-x
- **Sirius B** : redup pada cahaya tampak, terang pada spektrum sinar-x. Panas namun berukuran serupa Bumi

Jenis Bintang Ganda

- Bintang Ganda Visual
 - Kedua bintang dan jarak pisahnya dapat diamati melalui teleskop
 - Contoh: Mizar di Ursa Mayor dan Alpha Centauri
- Bintang Ganda Astrometri
 - Salah satu bintang terlalu redup untuk dapat diamati, namun gerak mengorbit bintang yang terang dapat dilihat
 - Contoh: Sirius

Menentukan Massa Bintang

- Massa bintang tidak akan dapat ditentukan dari cahayanya
- Untuk mengetahui massa bintang dapat digunakan **bintang ganda (binary star)**, pasangan bintang yang saling mengorbit
- Mayoritas bintang yang dapat kita amati merupakan bintang ganda
- Massa bintang dapat diketahui dari gerak orbitnya

Bintang Ganda Spektroskopi

- Tampak sebagai bintang tunggal karena jarak pisahnya terlalu dekat untuk dapat diamati melalui teleskop, dan hanya dapat diketahui dari spektrumnya
- Contoh: HD80715
- Bintang Ganda Gerhana
 - Jarak pisah tidak dapat diamati secara visual, namun intensitas cahaya salah satu bintang meredup saat pasangannya lewat di depannya (relatif ke Bumi)
 - Contoh: Algol (β Persei)

Diagram H-R

- Setelah mengetahui luminositas, suhu, ukuran, jarak dan massa kita dapat melihat gambaran besar dari bintang-bintang yang teramati di langit
- Untuk dapat melihat pola dari mayoritas bintang, data yang kita peroleh dikumpulkan dalam sebuah diagram
- **Diagram HR (Hertzsprung-Russel)**, mengelompokkan bintang berdasarkan suhu dan luminositasnya

ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

BINTANG

© Denny Darmawan 2008

- Bintang terlalu jauh untuk diamati sifatnya
- Pengamat hanya mengandalkan informasi yang dibawa oleh cahaya dari bintang
- 5 sifat yang dapat diketahui
 - Beberapa banyak energi yang dipancarkan
 - Beberapa besar ukuran bintang
 - Beberapa panas
 - Beberapa jauh
 - Beberapa massive
- Dari ke-5 sifat tadi, kita bisa mendapatkan gambaran besar mengenai sifat-sifat umum dari bintang

- Beberapa jauh?
 - Dihitung dari paralaks bintang
- Beberapa terang (banyaknya energi yang dipancarkan)?
 - Dari magnitudo semu dan jaraknya dari bumi, dapat ditentukan magnitudo intrinsik dan luminositasnya
- Beberapa panas?
 - Dapat diketahui dari spektrumnya
 - Dapat juga dihitung dari magnitudo semunya
- Beberapa besar?
 - Dapat diketahui dari suhu dan luminositasnya
- Beberapa massive?

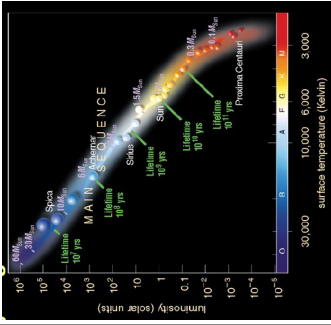
- Pada bintang ganda, gerak orbitnya mengitari sebuah titik yang disebut **pusat massa**
- Pusat massa tidak selalu berada tepat di tengah jarak antar kedua bintang, namun lebih dekat ke bintang yang massive
- Perbandingan jarak kedua bintang ke pusat massa sama menunjukkan perbandingan massa kedua bintang ($M_1 r_1 = M_2 r_2$)
- Sama dengan konsep pesawat sederhana yang Anda pelajari di sekolah dasar: *jangkat-jungkit!*
- Bintang bermassa lebih besar memiliki orbit yang lebih pendek (karena lebih dekat ke pusat massa).

- Dari hukum Kepler 3:

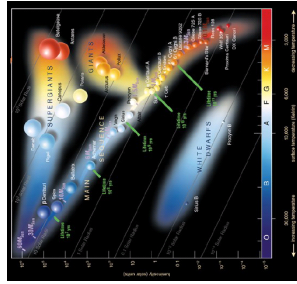
$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{P^2}$$

- M_1 = massa bintang 1
- M_2 = massa bintang 2
- a = jarak rerata kedua bintang (dalam AU)
- P = periode orbit (dalam tahun)
- Contoh penerapan:
Sebuah sistem bintang ganda memiliki periode orbit 32 tahun dan jarak pisah 16 AU. Berapa total massa sistem tersebut?
Jawab: $16^3/32^2 = 4$ x massa Matahari

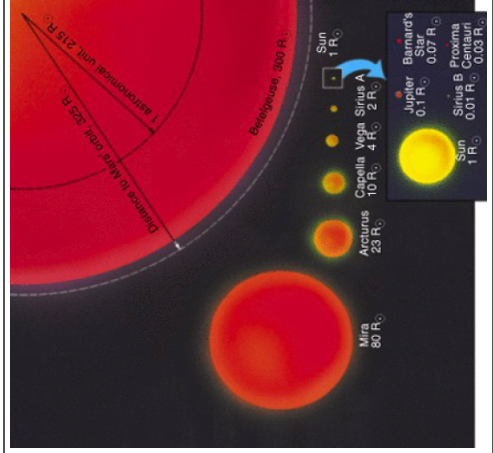
- semakin lama Hidrogen semakin habis, bintang tidak selamanya ada di deret utama!
- Usia Matahari di deret utama = 10 milyar tahun)
- Untuk bintang besar dan panas = beberapa juta tahun
- Semakin massive, semakin terang dan usianya semakin pendek



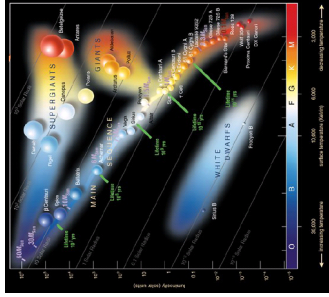
Bintang Maha Raksasa (Supergiant) dan Raksasa (Giant)



- Merupakan bintang yang kehabisan Hidrogen
- Inti mengecil, memanas dan memicu fusi lanjut
- Atmosfer mengembang
- Bintang raksasa terang karena ukurannya
- Maha raksasa = berukuran besar, bersuhu panas hingga dingin
- Raksasa = ukuran besar, suhu agak dingin



Grup Pada Diagram HR



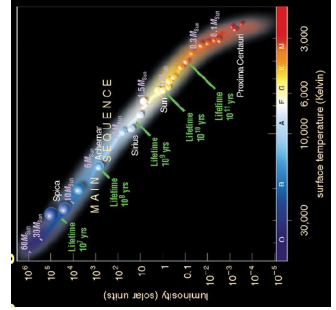
- Maharaksasa
 - sangat besar & terang
 - bersuhu panas hingga dingin
- Raksasa
 - besar dan terang
 - agak dingin
- Deret Utama
 - mayoritas bintang
 - besar hingga kecil
 - panas hingga dingin
- Katai Putih
 - kecil, terang, panas

Diagram HR memberikan kelas bintang berdasarkan luminositas:

- Kelas I : Maha raksasa
- Kelas II : Raksasa Terang
- Kelas III: Raksasa
- Kelas IV: Sub-raksasa
- Kelas V : Deret utama

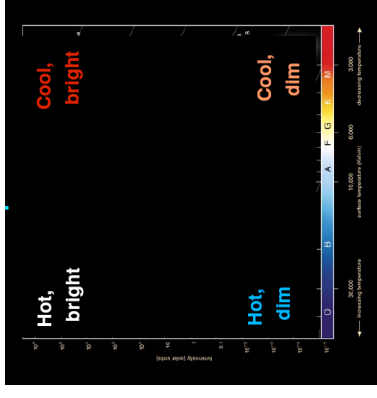
katai/kerdil putih (*white dwarf*) dikelaskan sebagai wd

Bintang Deret Utama

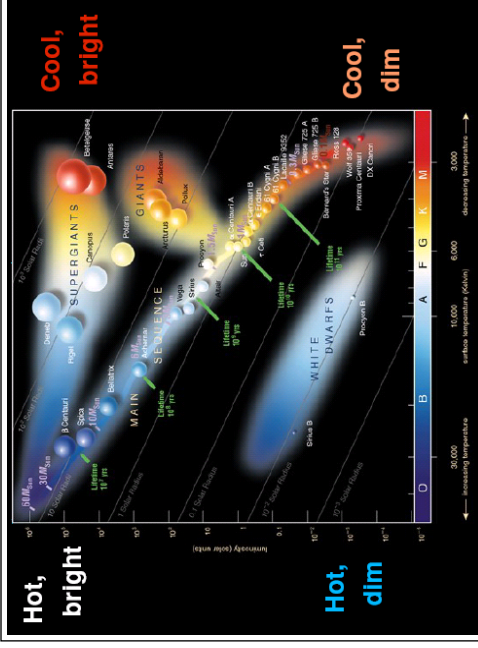


- merupakan bintang dengan Hidrogen sebagai bahan bakar utama
- Posisi pada kurva bergantung massa bintang
- Semakin besar massa, semakin terang (untuk menyokong massa yang besar butuh fusi lebih banyak agar tekanan keluar cukup besar)

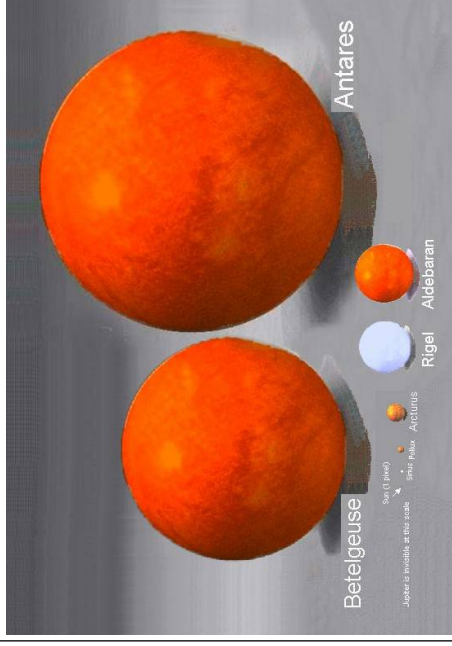
Sumbu-y menunjukkan luminositas bintang (juga magnitudo mutlaknya) dalam skala logaritmik



Sumbu-x menunjukkan suhu bintang (dan juga kelas spektrumnya) dalam skala logaritmik

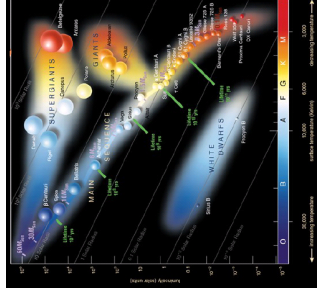


- Pada ordinat diagram HR, semakin ke atas luminositas semakin besar
- Pada absis diagram HR, semakin ke kanan, suhu semakin berkurang
- Suhu bintang akan menentukan luminositasnya, namun juga ditentukan oleh jejari bintangnya.
- Jejari bintang dapat diamati dari posisinya pada diagram HR!
- Pada nilai suhu yang sama, semakin tinggi luminositas, jejari bintang semakin besar.



Bintang Katai Putih (White Dwarf)

- Bintang yang kehabisan bahan bakar nuklirnya dan tidak lagi mampu melakukan reaksi fusi
- Gravitasi yang tidak ditahan tekanan fusi menyebabkan kolaps dan memanas
- Berukuran kecil dan panas, namun semakin lama semakin dingin



Contoh Katai Putih: Sirius B

Sirius A : terang pada cahaya tampak, redup pada spektrum sinar-x

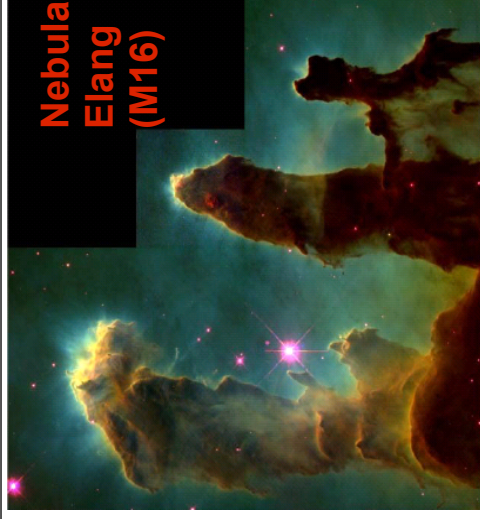
Sirius B : redup pada cahaya tampak, terang pada spektrum sinar-x. Panas namun berukuran serupa Bumi

- Materi antar bintang juga nampak dari garis serapan sempit Kalsium dan Natrium pada spektrum beberapa bintang-bintang kelas O dan B
 - bintang kelas O dan B terlalu panas untuk memiliki spektrum Kalsium dan Natrium
 - garis serapan bintang umumnya lebar karena adanya pelebaran Doppler akibat suhu bintang yang sangat panas
- Keberadaan materi antar bintang juga dapat diketahui dari pengamatan pada panjang gelombang inframerah, sinar-X dan radio

Pembentukan Bintang

- Semuanya berawal dari gravitasi!
- Umumnya awan antar bintang memiliki suhu 10-30 K dengan kerapatan tertinggi 1000 atom/cm³
- Pada suhu ini, hidrogen berada pada fase molekul (dikenal dengan nama **awan molekuler**)
- Diduga kuat, bintang lahir dari awan ini ketika bagian paling rapat dari awan ini tidak stabil dan berkontraksi ke dalam akibat gravitasi

- Umumnya awan molekul stabil secara gravitasi
- Namun, kestabilan ini akan terganggu oleh adanya tekanan dari gelombang kejut (*shock wave*)
- Awan antar bintang tidak akan kolaps dan membentuk bintang sebelum dipicu oleh tekanan gelombang kejut!
- Semesta dipenuhi dengan gelombang kejut!
- Sumber gelombang kejut:
 - Ledakan supernova
 - Lahirnya bintang massive
 - Lengan spiral galaksi



- Jika sebuah bintang cukup panas, gas yang ada di dekatnya dapat terionisasi menghasilkan **nebula emisi**
- Nebula emisi = nebula dengan spektrum emisi, biasanya menunjukkan garis-garis Balmer yang cukup kuat → hidrogen melimpah!
- Terkadang sinar dari sebuah bintang terhambur oleh partikel debu di nebula, sehingga nampak nebula berwarna biru (= **nebula pantulan**)
- Keberadaan nebula yang tebal dan rapat dapat diketahui dari terhalangnya sinar dari bintang-bintang jauh → nampak sebagai awan gelap



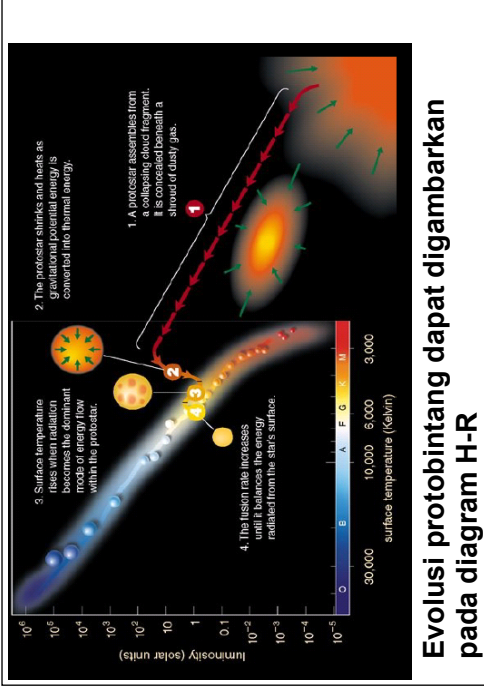
ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

EVOLUSI BINTANG 1 (KELAHIRAN)

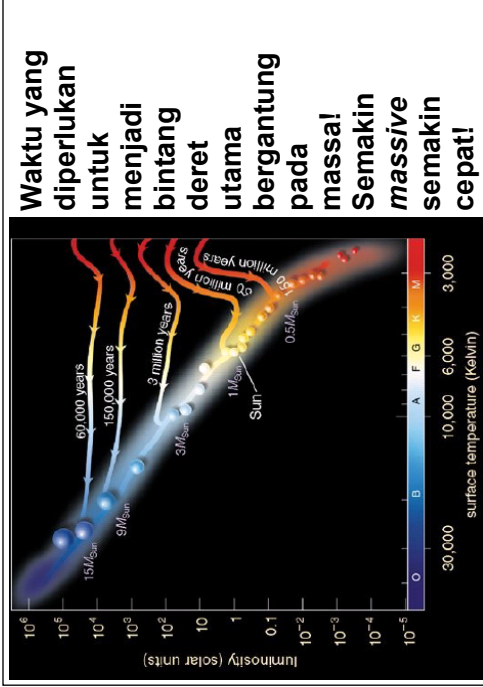
© Denny Darmawan 2008

- Ruang antar bintang diisi oleh materi yang kemudian disebut sebagai materi antar bintang (*interstellar medium*)
- 75% massa materi antar bintang adalah hidrogen, 25% adalah helium
- Terkadang materi antar bintang nampak sebagai awan gas dan debu yang disebut **nebula**
- Berdasarkan pengamatan, di sekitar awan tebal dari gas dan debu, biasanya ditemukan bintang-bintang muda
- Dugaan: bintang lahir dari awan gas dan debu!

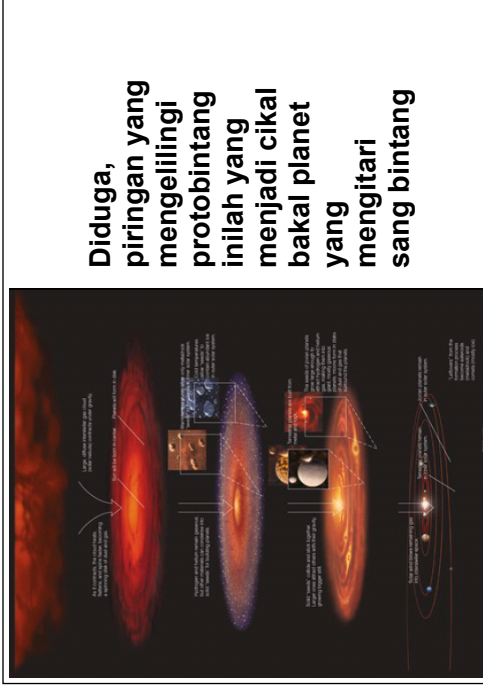
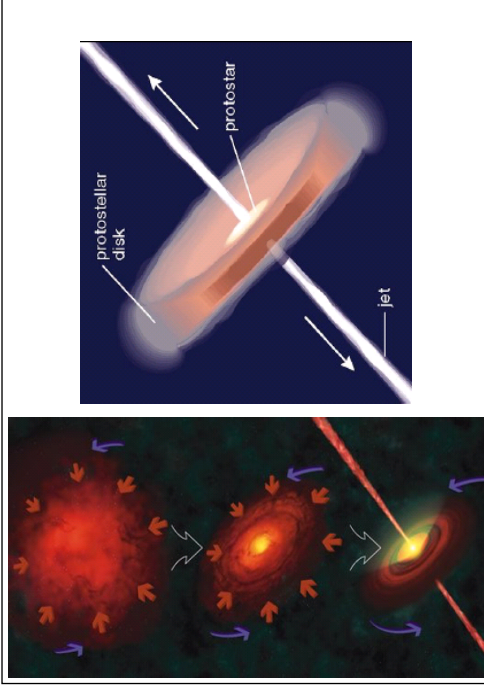




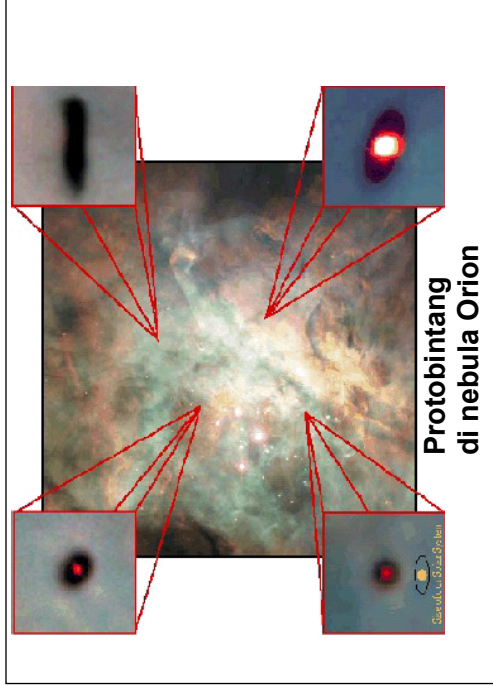
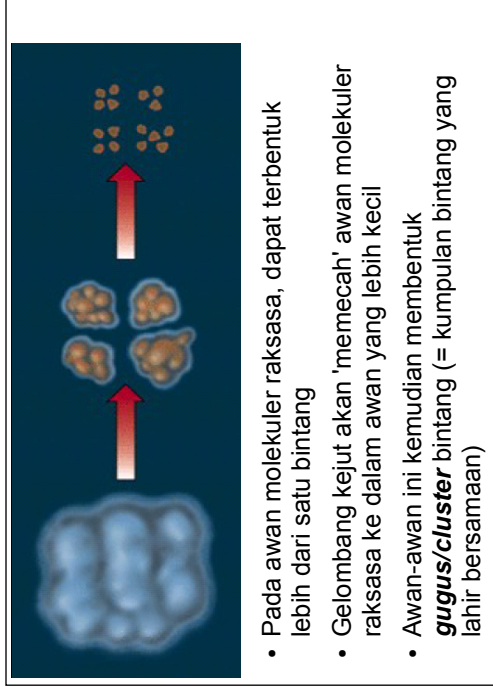
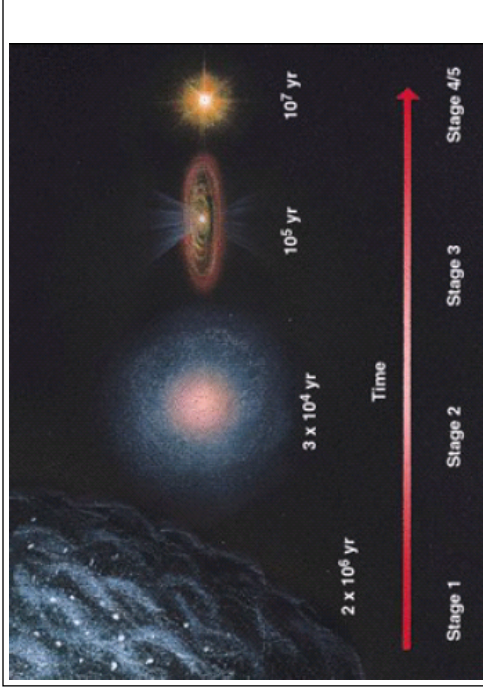
Evolusi protobintang dapat digambarkan pada diagram H-R



Waktu yang diperlukan untuk menjadi bintang deret utama bergantung pada massa! Semakin massive semakin cepat!



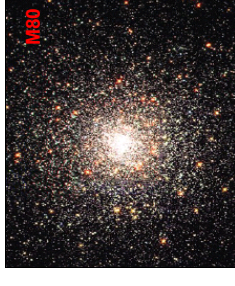
- Ketika pecahan awan antar bintang kolaps, suhu di tengah pecahan meningkat
- Bagian tengah akan memanaskan dan berubah menjadi **protobintang** (cikal bakal bintang) yang diselubungi gas berdebu (nebula kepompong)
- Detail evolusi protobintang sulit diamati karena terhalang gas dan debu
- Suhu inti protobintang terus meningkat hingga memicu reaksi fusi di tengah bintang dan menahakan terjadinya kolaps lebih lanjut
- Setelah mampu menyingkirkan gas debu yang menyelimutinya, protobintang berubah menjadi bintang deret utama



- Protobintang tidak dapat teramati selama 'dibungkus' awan gas dan debu (nebula 'kepompongnya')
- Panas dari protobintang akan memanasi awan yang menyelimutinya → nebula kepompong akan memancarkan radiasi inframerah → keberadaan protobintang dapat diketahui
- Contoh protobintang: Bintang kelas T Tauri
- Biasanya pada protobintang juga ditemukan semburan gas (jet) dikenal sebagai **benda Herbig-Haro (HH)**
- Semburan gas diduga berasal dari piringan yang berputar di sekeliling protobintang

Tipe gugus bintang:

- Gugus terbuka:
 - berukuran sedang (30 tahun cahaya)
 - berkumpul agak longgar
 - biasa ditemukan di piringan galaksi
- Gugus globular:
 - berukuran besar (1 juta bintang, 60-100 t.c.)
 - berkumpul rapat, 'terikat' oleh gravitasi
 - biasa ditemukan di piringan dan halo galaksi



Apa yang terjadi ketika massa protobintang kurang massive untuk memicu reaksi fusi? (biasa terjadi jika massanya kurang dari 8% massa Matahari)

- Protobintang 'gagal' menjadi bintang
- Protobintang mendingin dan kolaps lebih lanjut akan dihentikan oleh *tekanan degenerasi* ('tekanan kuantum')
- Dihasilkan katai/kerdil coklat (***brown dwarf***) a.k.a. 'bintang gagal'
- Contoh: Gliese (GL) 229 dan Gliese 623 (katai coklat dengan massa 50 kali massa Jupiter)

- Dalam beberapa jam, keadaan terdegenerasi akan melemah akibat meningkatnya suhu inti dan inti bintang kembali mengembang akibat tekanan fusi
- Untuk bintang yang cukup *massive*, reaksi fusi helium terjadi sebelum inti mengalami degenerasi
- Inti bintang sekarang dipenuhi dengan 'abu' fusi helium, yaitu karbon dan oksigen
- Untuk bintang *massive* > 3 kali massa matahari, suhu inti bisa mencapai 600 juta K dimana fusi karbon dapat terpicu
- Fusi lanjut akan berhenti ketika yang dihasilkan adalah besi!

Matinya bintang bermassa ringan

- Massa bintang < 0.4 kali massa matahari
- Biasa dikenal sebagai katai merah (*red dwarf*)
- Struktur dalam bintang seluruhnya merupakan zona konveksi
- Helium tidak berkumpul di tengah inti, namun "teraduk" oleh proses konveksi dan tersebar ke seluruh bagian
- Ketika hidrogen habis, helium berkontraksi, memanaskan dan menjadi katai putih → tidak akan pernah menjadi bintang raksasa merah!

Matinya bintang bermassa sedang

- Massa bintang 0.4 hingga 4 kali massa matahari (termasuk matahari sendiri)
- Ketika hidrogen habis, inti kolaps dan kulit mengembang → bintang raksasa merah
- Kolapsnya inti meningkatkan suhu inti dan memicu fusi helium menghasilkan karbon
- Ketika helium habis, suhu inti tidak cukup panas untuk memicu fusi karbon
- Inti kolaps dan menjadi katai putih

Ketika bintang 'sekarat' ...

- 'Bahan bakar' utama bintang adalah hidrogen yang mengalami reaksi fusi
- Hasil utama reaksi fusi adalah helium yang tidak dapat 'terbakar' pada suhu < 100 juta K
- Helium menumpuk pada inti bintang seolah 'abu' reaksi fusi hidrogen
- Ketika hidrogen habis, gravitasi tidak mampu 'disokong' oleh tekanan fusi, bintang kolaps ke dalam → suhu inti meningkat

- Memanasnya suhu inti ikut memanaskan suhu 'kulit' yang melapisi inti (mengandung hidrogen yang belum bereaksi)
- Sementara inti kolaps ke dalam, tingginya suhu pada kulit akan memicu reaksi fusi pada kulit bintang → lapisan luar bintang mengembang dan mendingin → bintang raksasa merah!
- Bintang bermassa setara Matahari diperkirakan akan berubah menjadi raksasa merah dengan jejari hingga 100 kali jejari Matahari
- Bintang yang lebih *massive* akan menjadi maharaksasa dengan jejari hingga 1000 kali jejari matahari

- Ketika kulit bintang mengembang dan mendingin, inti bintang terus kolaps dan memanaskan...
- Proses kolaps akan menyebabkan atom-atom helium berada pada keadaan *ter-degenerasi* dan mulai 'menahan' proses kolaps lebih lanjut
- Ketika inti bintang mencapai suhu > 100 juta K, reaksi fusi lanjut mulai terpicu, fusi helium yang menghasilkan karbon dan oksigen
- Reaksi fusi helium tidak akan mengembangkan inti karena berada dalam keadaan terdegenerasi
- Tingginya suhu akibat fusi helium akan memicu **kilat helium (*helium flash*)**

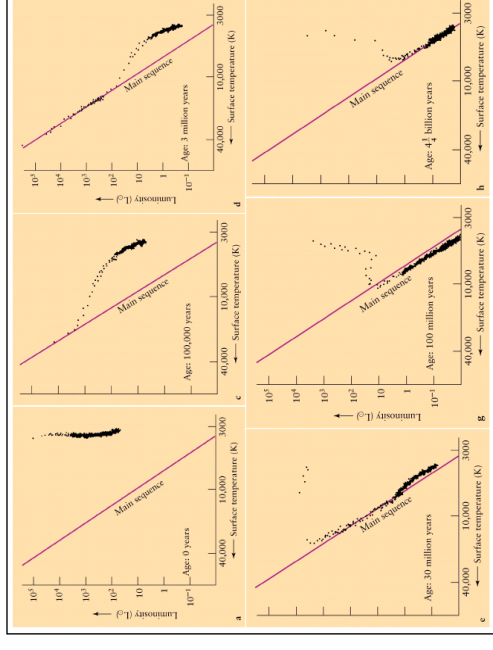
ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

EVOLUSI BINTANG 2 (KEMATIAN)

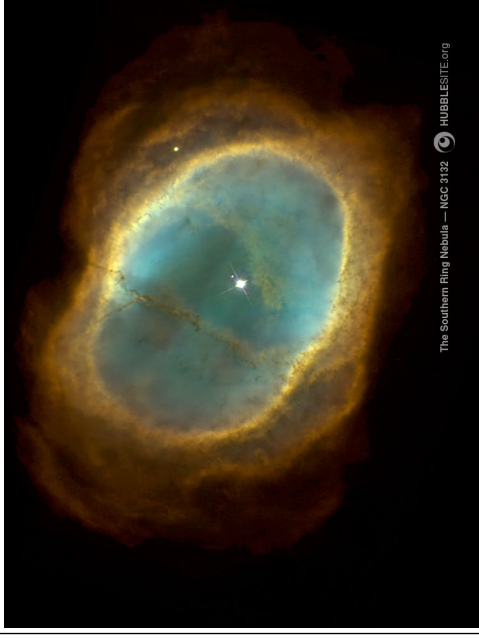
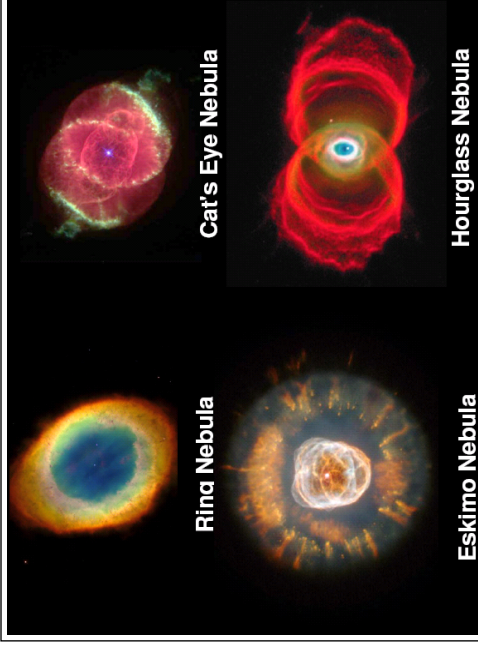
© Denny Darmawan 2008

Nasib bintang ditentukan oleh massanya!

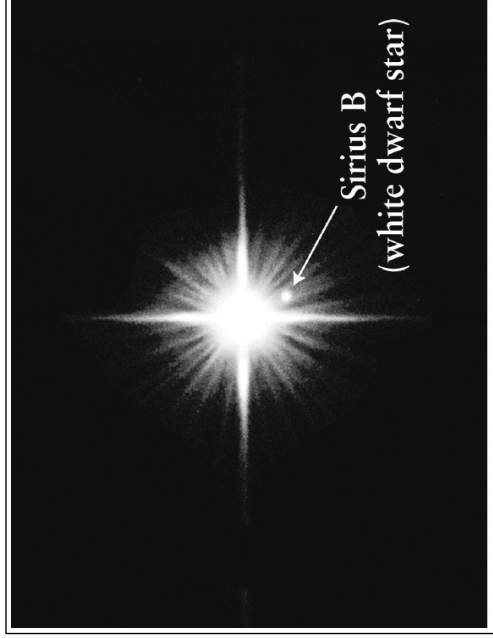
- Semakin besar massa protobintang, maka tekanan di bagian tengah semakin besar → suhu semakin tinggi → semakin cepat terpicu reaksi fusi dan menjadi bintang deret utama
- Semakin besar massa bintang, maka semakin besar reaksi fusi yang diperlukan untuk 'melawan' kontraksi gravitasi → hidrogen semakin cepat habis → usia semakin pendek
- Semakin besar massa bintang, maka tekanan di inti semakin tinggi → suhu semakin panas dan memungkinkan reaksi fusi unsur berat



- Ketika bintang menjadi raksasa merah, sebagian materi pada lapisan luar terlepas sebagai 'angin bintang'
- Semakin lama lapisan luar yang dilepas semakin banyak namun tidak dapat teramati karena tidak terionisasi
- Akhirnya, lapisan terdalam dan terpanas akan lepas dan mengionisasi gas yang terlepas sebelumnya → **nebula planetari (planetary nebula)**
- Tidak ada kaitannya dengan planet, hanya saja nebula planetari yang pertama ditemukan penampakkannya mirip planet uranus atau neptunus

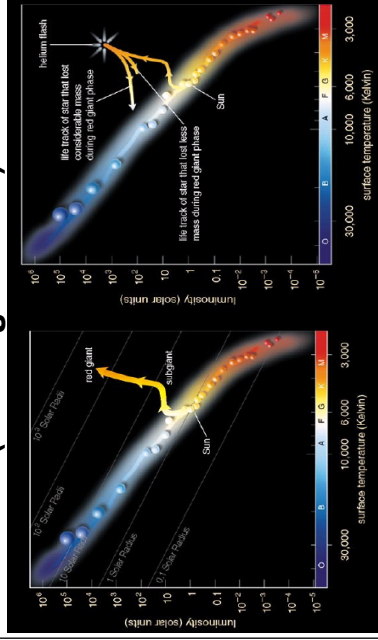


- Sementara lapisan luar menghasilkan nebula planetari, inti bintang terus kolaps dan menghasilkan katai putih
- Massa rerata setara massa matahari dengan suhu 25 ribu K dan ukuran 92% diameter bumi
- Dengan kerapatan $3 \times 10^6 \text{ g/cm}^3$, satu sendok teh material katai putih berbobot 15 ton!
- Kontraksi gravitasi katai putih tidak disokong oleh reaksi fusi, namun oleh degenerasi
- Suhu katai putih akan terus menurun hingga padam sebagai **katai hitam**, berupa kristal karbon dan oksigen raksasa

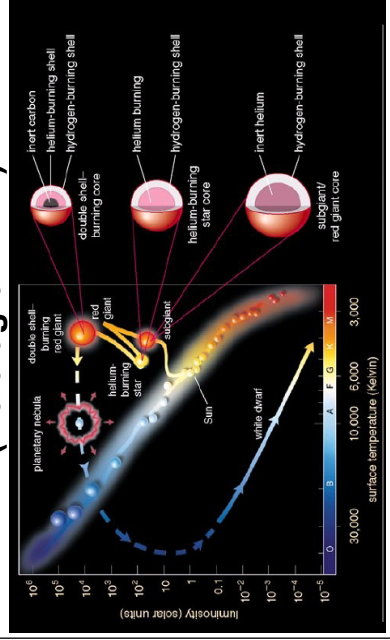


- Andaikan katai putih diberi tambahan massa, maka gravitasi akan memampatkan ukurannya
- Jika mencapai massa total 1,4 massa matahari, katai putih akan termampatkan hingga jejari 0! → **batas Chandrasekhar**
- Bintang bermassa lebih dari 1,4 tidak akan pernah menjadi katai putih kecuali jika 'kehilangan massa' selama berevolusi!

Nasib matahari kita (via diagram H-R)

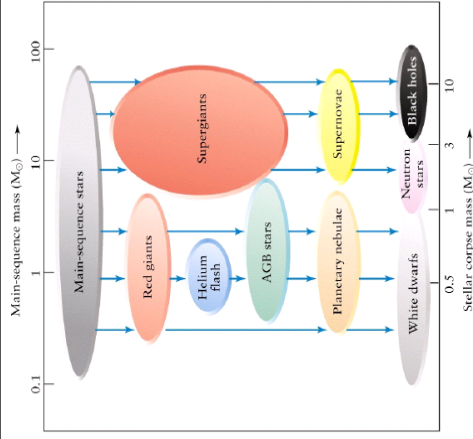


Nasib matahari kita (via diagram H-R)

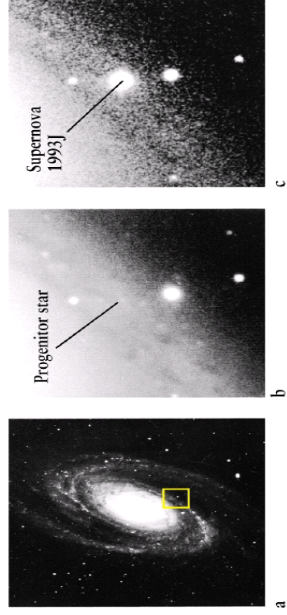


2 Jenis Supernova

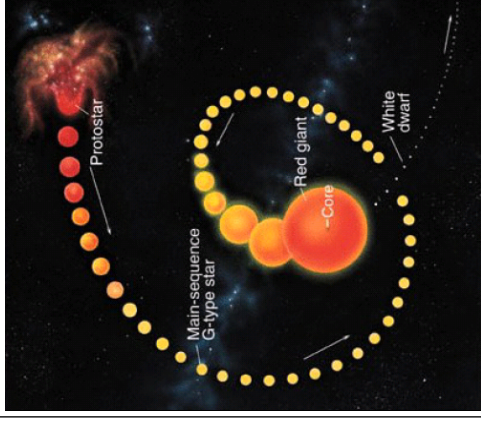
- **Supernova Tipe I**
 - Lebih terang, mencapai 4 milyar kali lebih terang dari matahari
 - Tidak mengandung spektrum hidrogen
 - Berasal dari kolapsnya katai putih
- **Supernova Tipe II**
 - Terangnya mencapai 0.6 milyar kali lebih terang dari matahari
 - Mengandung spektrum hidrogen
 - Berasal dari kolapsnya bintang raksasa merah



- Ketika yang tersisa di inti adalah besi, reaksi fusi lanjut tidak dapat dilakukan, besi menyerap elektron yang seharusnya menahan kontraksi via fase degenerasi untuk kemudian pecah menjadi inti yang lebih kecil
- Inti kolaps hebat dalam waktu kurang dari 1 detik menjadi **bintang neutron** atau **lubang hitam** sementara lapisan luar meledak sebagai **supernova**
- Ketika atom besi pecah, neutrino akan terhambur keluar
- Kemunculan supernova dapat diprediksi beberapa menit sebelumnya dari 'banjir neutrino' di langit

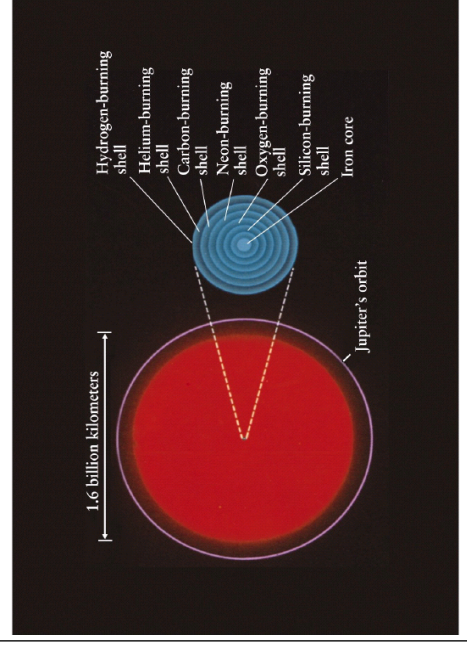


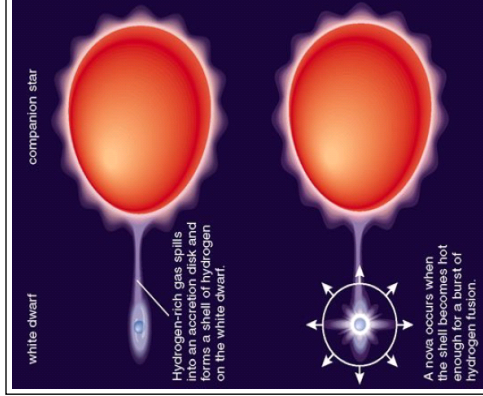
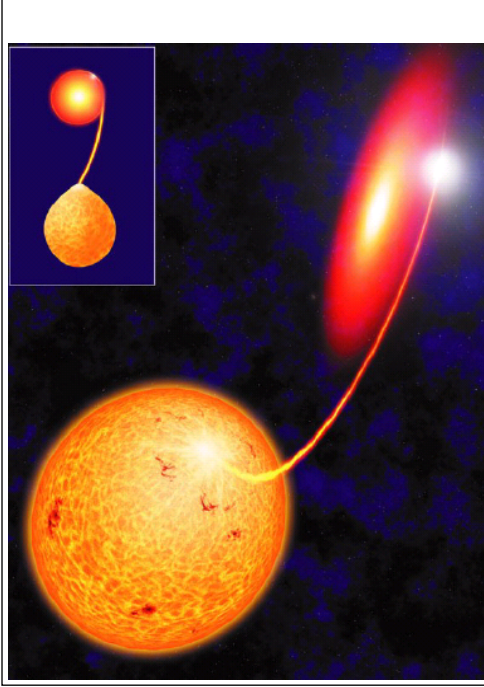
'Perjalanan hidup' matahari kita...



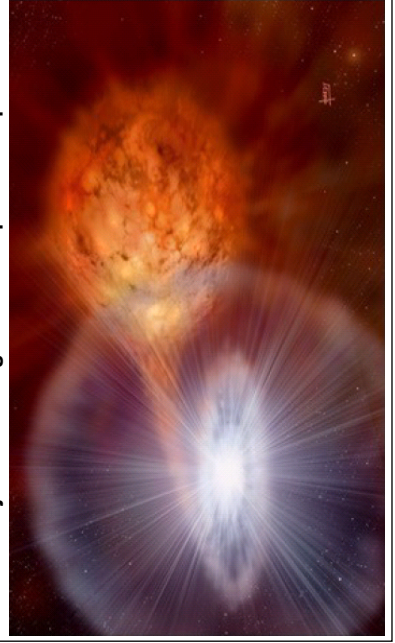
Matinya bintang massive

- Memiliki massa > 4 kali massa matahari
- Mampu memicu reaksi fusi karbon pada suhu 1 milyar K
- Untuk beberapa bintang, gas karbon telah mengalami degenerasi sebelum terjadi fusi, sehingga akan menghasilkan **ledakan karbon** saat fusi karbon terpicu (mirip kilat helium namun lebih hebat)
- Ketika karbon habis di inti, inti berkontraksi dan karbon di kulit akan ikut 'terbakar', begitu seterusnya untuk fusi lanjut lain → diperoleh struktur berlapis





Apabila akibat tambahan massa menyebabkan massa total melebihi batas Chandrasekhar, ledakan fusi karbon terjadi dan menghasilkan Supernova Tipe I



Katai Putih

- Merupakan 'jasad' dari bintang bermassa ringan hingga sedang
- Berupa inti mati, tidak lagi mengalami fusi → Tidak ada tekanan termal dari dalam
- Mengandung 'abu' fusi lanjut (Karbon atau Oksigen)
- Tidak lagi mengalami kontraksi oleh gravitasi karena adanya tekanan degenerasi elektron
- Umumnya berukuran sama dengan bumi namun dengan massa sebuah bintang → kerapatan tinggi

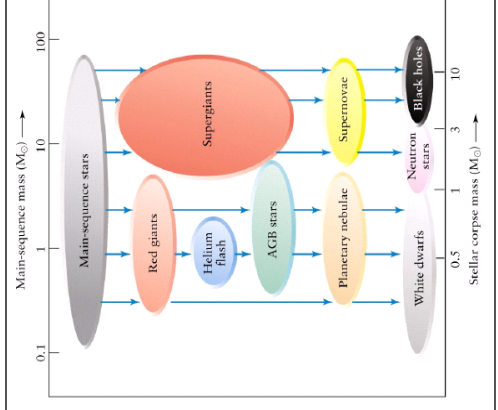
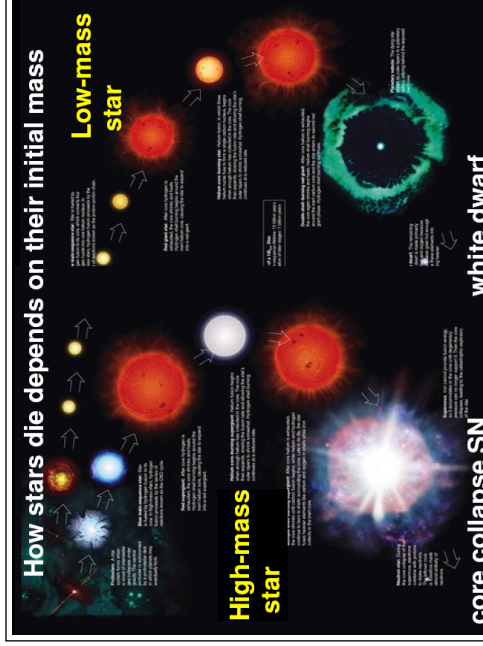
Sirius A dan Sirius B

- Semakin *massive* katai putih, ukurannya semakin kecil
- Massa besar → kontraksi besar → kerapatan tinggi → tekanan degenerasi tinggi
- Berakhir sebagai katai hitam
- Namun, jika massa katai putih > 1,4 kali massa matahari (batas Chandrasekhar), tekanan degenerasi dapat dikalahkan oleh gravitasi → katai putih terus mengalami kontraksi
- Katai putih dapat 'bangkit lagi' apabila memiliki pasangan dan terjadi perpindahan massa

ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

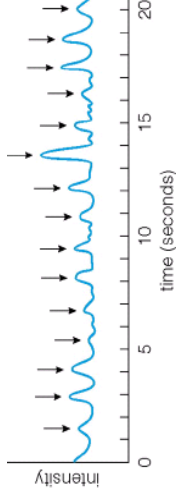
EVOLUSI BINTANG 3

© Denny Darmawan 2008



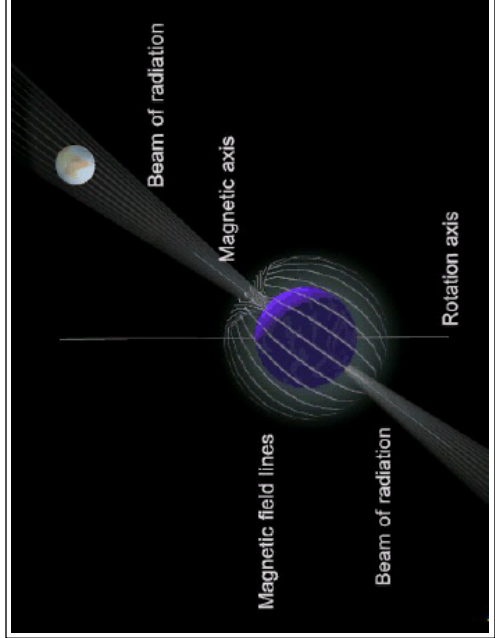
- Bintang neutron yang berotasi memancarkan berkas radiasi yang menyapu ruangan
- Ketika berkas ini menyapu pada arah pandang dari Bumi, diperoleh lonjakan intensitas

→ **teori mercusuar**



• Teori Mercusuar pulsar:

- bintang neutron berotasi cepat
- medan magnetiknya yang kuat membangkitkan medan listrik di sekitarnya
- medan listrik yang cukup kuat di kutub magnetik akan memaksa elektron di permukaan keluar dan dipercepat
- Elektron yang mengalami percepatan akan memancarkan foton pada arah yang sama dengan arah gerak elektron
- Foton dipancarkan dalam berkas sempit yang keluar dari kutub magnet bintang neutron
- Jika sumbu magnetik miring terhadap sumbu rotasi, berkas sinar akan 'menyapu' daerah sekitarnya



Bintang neutron merupakan benda teoretik, adakah di alam... ?

Apa yang terjadi jika tekanan degenerasi elektron tidak sanggup menahan kontraksi gravitasi?

Bintang Neutron

- Merupakan 'jasad' dari bintang massive setelah melewati ledakan supernova
- Ketika massa bintang >1,4 massa matahari, inti bintang terus runtuh hingga degenerasi elektron tidak sanggup melawan gravitasi
- Inti atom pecah dengan memancarkan sinar gamma menghasilkan neutron dan proton. Proton bergabung dengan elektron menghasilkan neutron
- Diperoleh bintang stabil dengan gravitasi yang ditahan oleh degenerasi neutron

- Neutron memiliki massa beberapa kali massa matahari yang dimampatkan hingga jejari 10 km
- Materi bintang neutron sebesar kristal gula akan memiliki bobot 100 juta ton di bumi
- Diduga, massa bintang neutron kurang dari 2-3 kali massa matahari
- Memiliki suhu sangat panas (sehingga akan memancar pada spektrum sinar-x), berputar cepat dan memiliki medan magnet yang kuat

Pulsar

- Ditemukan pertama kali pada November 1967 oleh Jocelyn Bell pada spektrum gelombang radio
- Merupakan kependekan dari **pulsing star**
- Memiliki periode rotasi 0,033 – 3,75 detik
- Menjadi kandidat utama bintang neutron!
- Beberapa ditemukan di dalam sisa-sisa ledakan supernova (termasuk di Nebula Kepiting)



- Tidak semua sisa supernova memiliki pulsar dan tidak semua pulsar berada di dalam sisa supernova:
 - berkas radiasi tidak menyapu Bumi
 - terlempar dari posisi semula akibat ledakan supernova yang tidak simetris
 - pulsar dapat terdeteksi selama 10 juta tahun, namun sisa supernova hanya bertahan selama 50 ribu tahun

Apa yang terjadi jika tekanan degenerasi neutron tidak sanggup menahan kontraksi gravitasi?

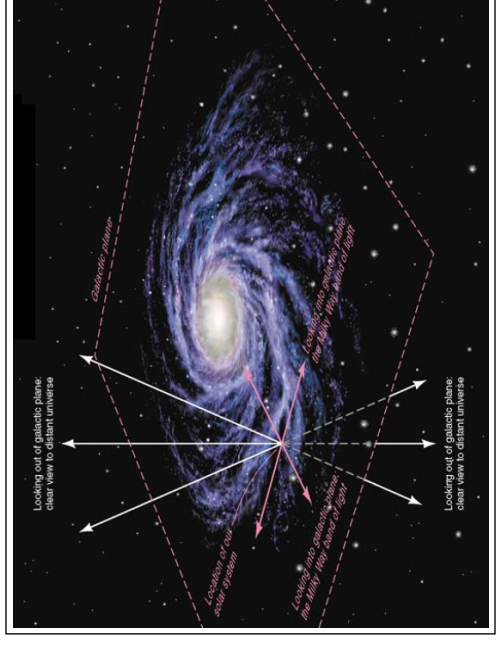
Lubang Hitam

ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

GALAKSI

© Denny Darmawan 2008

Galaksi Bima Sakti



Struktur

Komponen utama penyusun galaksi bima sakti:

- Komponen piringan (disk component)
- Komponen bola (spherical component)

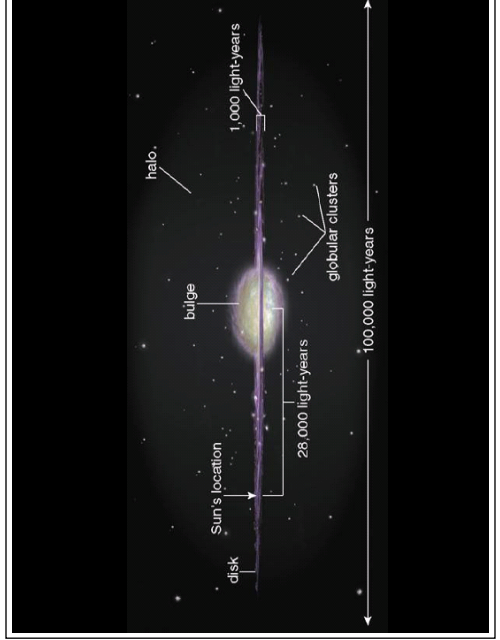
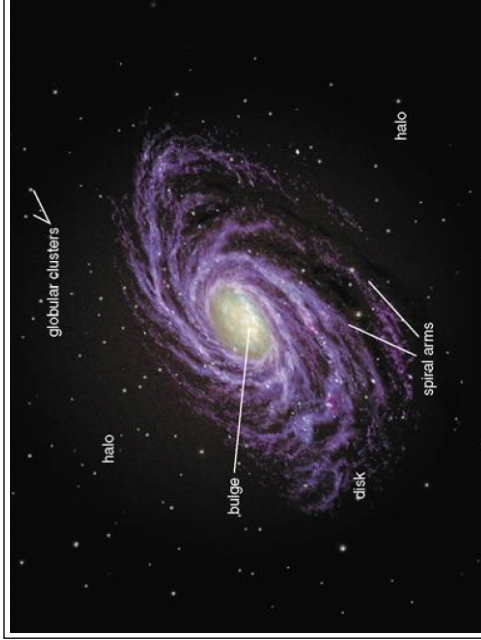
Piringan Galaksi

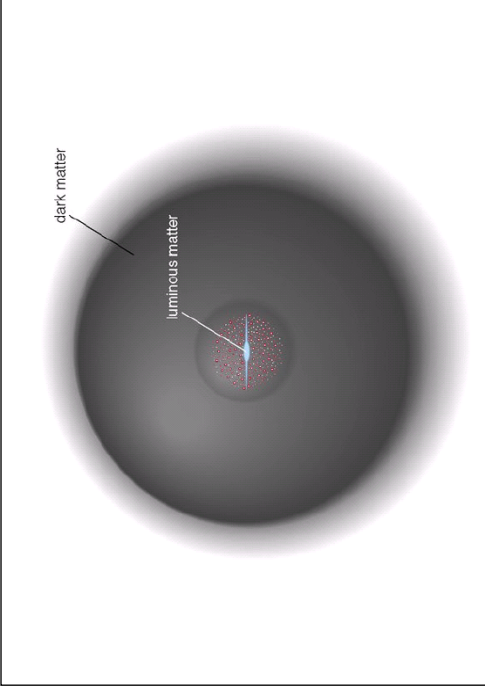
- mengandung semua materi yang berada di bidang rotasi (bintang, gugus bintang terbuka, gas dan debu galaksi)
- merupakan tempat terbentuknya bintang
- cenderung nampak biru akibat kandungan gas dan debu
- ukuran yang sebenarnya tidak diketahui pasti karena batasnya yang tidak jelas
- matahari berada pada jarak 8.5 kpc dari pusat galaksi

Bola Galaksi

- tersusun atas halo dan penjolan (bulge) galaksi
- halo merupakan awan sferis dari bintang dan gugus globular
- halo mengandung bintang sebanyak 2% bintang di piringan galaksi dan sedikit gas dan debu
- tidak ada bintang baru yang terbentuk di halo galaksi
- mayoritas bintang di halo galaksi adalah bintang tua dan dingin

- penjolan inti (*nuclear bulge*) merupakan awan bintang yang mengelilingi pusat galaksi
- diameter penjolan inti sekitar 2 kpc dan agak pekat
- hanya bisa diamati pada panjang gelombang tinggi (infrared atau radio)
- mengandung sedikit gas dan debu, bintang-bintang tua dan dingin seperti di halo galaksi





Populasi Bintang

Terdapat 2 tipe bintang dalam galaksi:

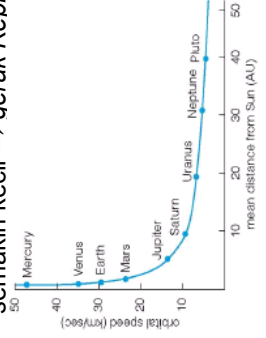
- Bintang Populasi I:
 - berada pada piringan galaksi (dikenal dengan *bintang populasi piringan*)
 - kandungan unsur berat (di atas helium, biasa disebut "logam") melimpah
 - memiliki orbit melingkar di bidang galaksi
 - umumnya berupa bintang-bintang muda (termasuk matahari)

- Bintang Populasi II:

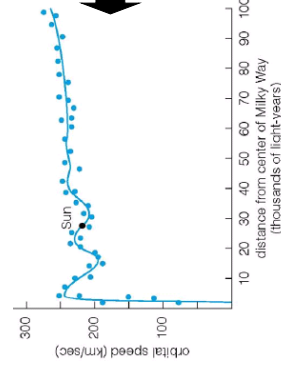
- berada pada halo, penjolan inti dan gugus globular (dikenal dengan *bintang populasi halo*)
- sedikit mengandung "logam"
- memiliki orbit elips
- merupakan bintang-bintang tua

Andaikan massa galaksi terpusat di tengah, maka dari Hukum Kepler III diperoleh hubungan:

Semakin jauh dari pusat galaksi, kelajuan orbit semakin kecil → *gerak Keplerian*



hubungan kelajuan orbit terhadap jejari orbit dalam tata surya



hubungan kelajuan orbit terhadap jejari orbit dalam galaksi bima sakti

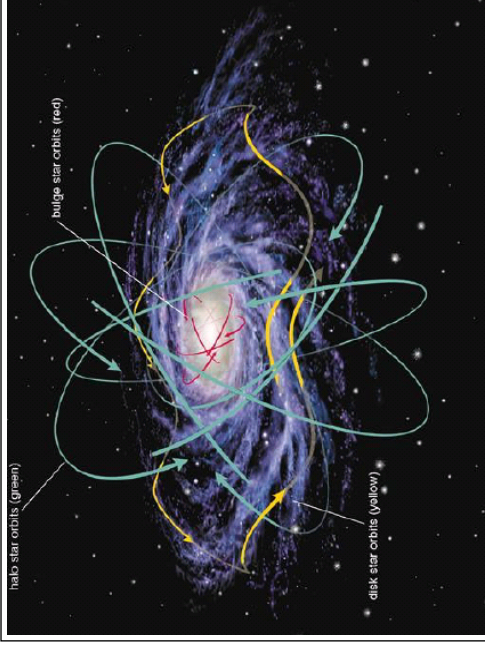
- Pada galaksi bima sakti, semakin jauh dari pusat, kelajuan meningkat!
- Massa galaksi tidak terkumpul di tengah, namun di luar!

- Sebagian besar massa galaksi berada di luar tepian galaksi, namun tidak ada bagian yang nampak di luar galaksi

- Materi bisa jadi merupakan materi yang tidak memancarkan cahaya → **materi gelap (dark matter)**

- Model teoretis rotasi piringan galaksi menunjukkan bahwa materi gelap berada di halo gelap (*dark halo*) yang melingkupi galaksi, dikenal sebagai **korona galaksi**

- Diduga halo gelap melebar hingga 7 kali jejari galaksi yang nampak dan mengandung 10 hingga 100 kali massa galaksi yang nampak



Massa Galaksi

- Setiap bintang di dalam galaksi berotasi mengelilingi pusat galaksi (galaksi berotasi!)
- Gerak rotasi galaksi menunjukkan massa galaksi
- Dari Hukum Kepler III:
$$M_r = \frac{4 \pi^2 r^3 v^2}{GT} = \frac{v^2 r}{G}$$

M_r = massa di dalam radius r

G = konstanta gravitasi Newton

v = kelajuan orbit

T = periode orbit

- Diketahui kelajuan orbit matahari adalah 220 km/dek ke arah rasi Cygnus

- Dengan jarak matahari ke pusat galaksi yang sejauh 8,5 kpc, diperoleh periode orbit matahari selama 240 juta tahun

- Dari Hukum Kepler III diperoleh massa galaksi yang ada di dalam orbit matahari sekitar 100 milyar massa matahari

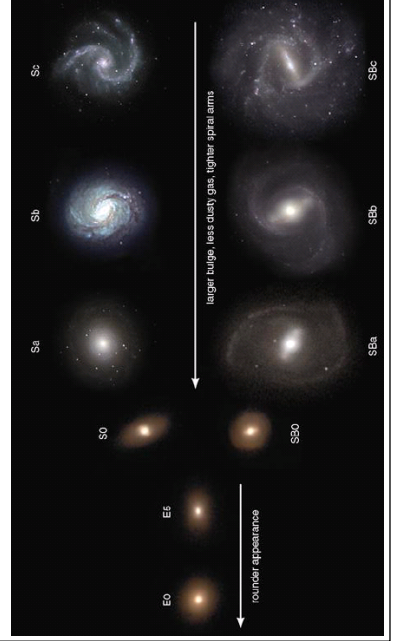
- Karena hanya massa di dalam orbit matahari, maka 100 milyar massa matahari adalah batas bawah massa galaksi bima sakti

Hubble Deep Field 2002

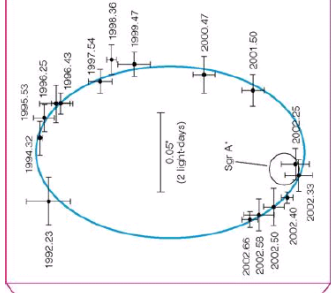
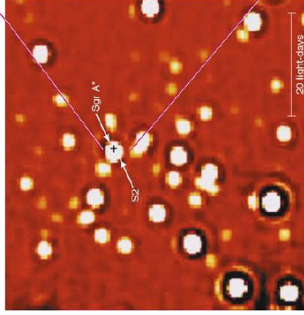


- Dibagi ke dalam 3 kelas utama (+1)
 - Galaksi Eliptik
 - Galaksi Spiral
 - Galaksi Spiral Berbatang (Barred spiral)
 - Galaksi Tak Beraturan (Irregular)
- Dapat ditunjukkan dengan **Diagram garpu tala Hubble** (*Hubble Tuning Fork Diagram*)

Diagram Garputala Hubble

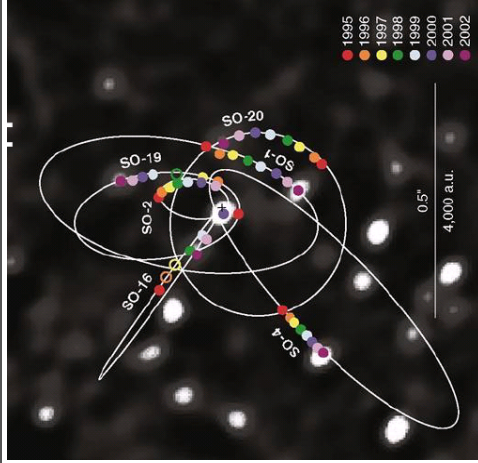


Pengamatan pada spektrum infra merah



Gerak bintang-bintang di sekitar Sgr A*

Gerak bintang di sekitar Sgr A*



Morfologi Galaksi

Siklus Pembentukan Unsur

- Gas awal pembentuk galaksi mengandung 80% hidrogen dan 20% helium
- Bintang-bintang awal yang terbentuk mengandung sedikit sekali unsur "logam" (bintang populasi II)
- Ketika sebagian bintang-bintang ini mati dan meledak sebagai supernova, kandungan unsur "logam" mulai mengisi galaksi
- Awan molekuler pembentuk bintang berikutnya mulai memiliki kandungan "logam" (bintang populasi I)

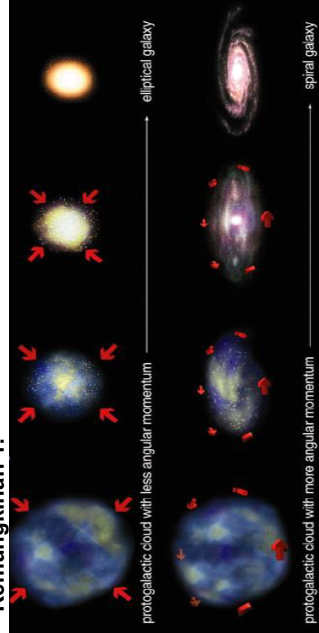
Inti Galaksi

- Merupakan daerah yang tidak dapat diamati pada panjang gelombang optik
- Hanya dapat diamati pada panjang gelombang infra merah dan radio
- Dikenal sebagai Sagitarius A* (Sgr A*)
- Jejari sekitar 4 AU
- Pemancar energi yang kuat
- Mengandung 3 – 4 juta massa matahari
- Diduga berupa lubang hitam massive!

Lokasi	Populasi I			Populasi II		
	Extreme	Intermediate	Intermediate	Intermediate	Extreme	Extreme
Logam (%)	Lengan Spiral	Piringan	Penjolan Inti	Halo		
Bentuk orbit	3	1,6	0,8	< 0,8		
Usia rerata (ttn)	Lingkaran	Agak elips	Elips	Sangat elips		
	100 juta	0,2 – 1 milyar	2 – 10 milyar	10 – 14 milyar		

Elips vs Spiral

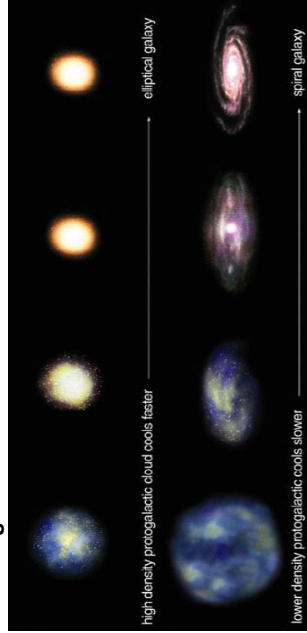
Kemungkinan 1:



Awan dengan momentum sudut besar menjadi spiral

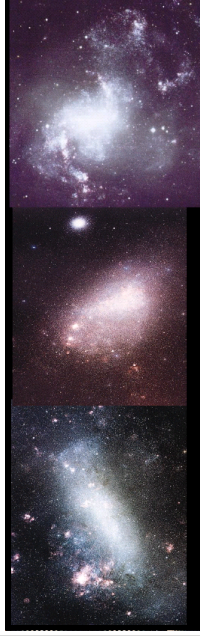
Elips vs Spiral

Kemungkinan 2:



Awan dengan kerapatan lebih tinggi mendingin cepat menjadi bintang sebelum piringan terbentuk

Galaksi Tak Beraturan



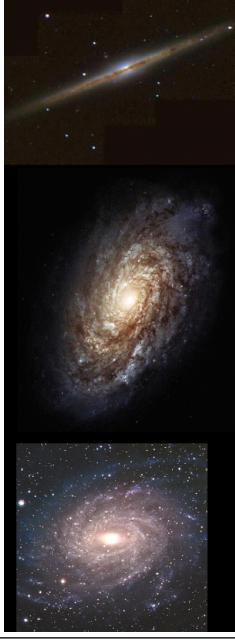
- Tidak memiliki lengan maupun penjolan
- Mengandung gas dan debu, bintang muda dan tua

Galaksi Eliptik



- Kandungan gas dan debu sedikit
- Agak kekuningan atau kemerahan karena lebih banyak mengandung bintang tua
- Berukuran kecil hingga raksasa

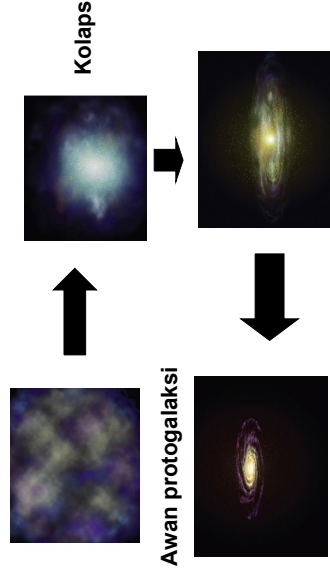
Galaksi Spiral



- memiliki 2 komponen utama: bola dan piringan
- lengan spiral nampak kebiruan karena kandungan bintang muda serta gas dan debu
- mengandung bintang tua dan muda
- biasa ditemukan di grup kecil

Pembentukan Galaksi

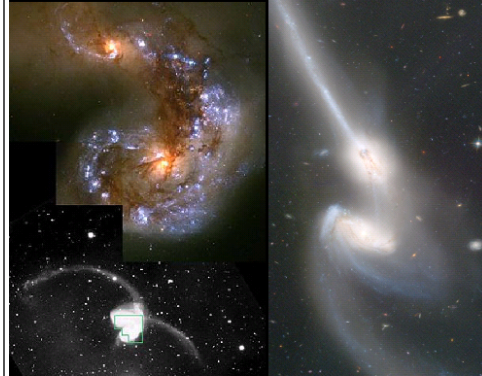
Proses Pembentukan Galaksi



Siklus pembentukan unsur

Berotasi dan memipih

Tabrakan antar galaksi juga dapat membentuk galaksi elips atau tak beraturan

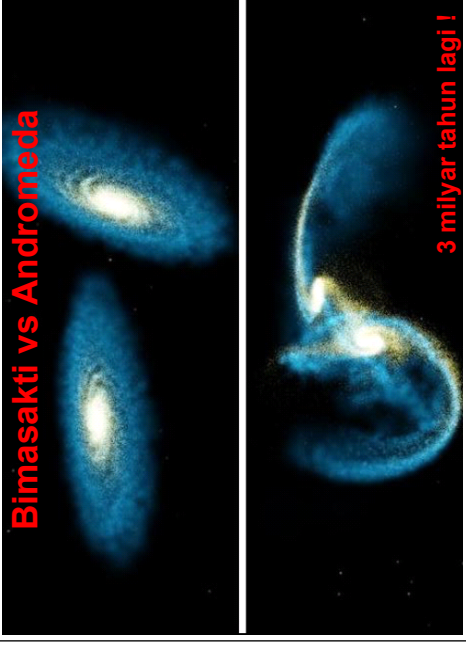


Galaksi Spiral Berbatang



- mengandung batang yang tumbuh dari inti
- galaksi Bimasakti diduga masuk dalam kategori ini

Bimasakti vs Andromeda

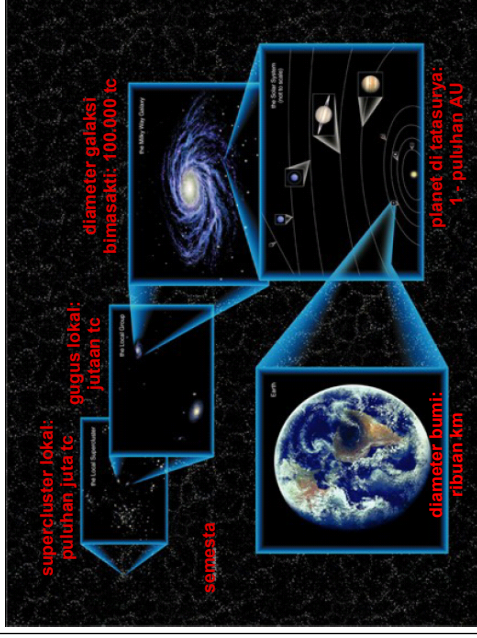


3 milyar tahun lagi!

ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

KOSMOLOGI

© Denny Darmawan 2008



- Semesta (*universe*) bisa jadi tak berhingga luasnya, namun jejari semesta yang teramati (*observable universe*) berjejari 10 hingga 20 milyar tahun cahaya (berhingga)
- Berarti umur semesta kita 10 hingga 20 milyar tahun

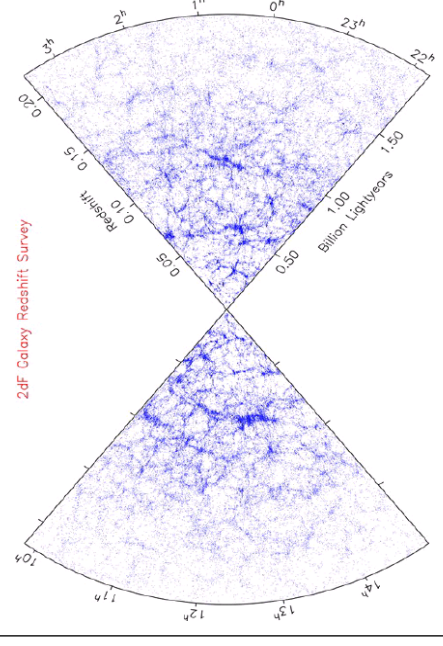
Asumsi Dasar Kosmologi

- **Homogeneity**
materi tersebar merata di seluruh ruang semesta (berlaku pada distribusi skala besar)
- **Isotropy**
semesta nampak sama pada semua arah (berlaku pada distribusi skala besar)
- **Universality**
hukum fisika berlaku di seluruh tempat di semesta

Prinsip Kosmologi

Semua tempat di seluruh semesta memiliki sifat umum yang sama

- Didasarkan pada asumsi homogenitas dan isotropi
- Tidak ada tempat yang istimewa di semesta
- Tidak ada pusat semesta, tidak ada tepian semesta



Paradoks Olber (1826)

Jika semesta dipenuhi dengan bintang, sehingga kemana pun kita memandang kita akan menemukan bintang yang sinarnya memancar ke bumi. Langit malam seharusnya sama terangnya dengan langit siang.

Namun, mengapa langit malam tetap gelap?

Solusi Paradoks Olber

- Diajukan Edgar Allan Poe di tahun 1848
- **Langit malam nampak gelap karena umur semesta belum tua tak berhingga (diciptakan pada suatu masa)**
- Cahaya dari bintang yang paling jauh bisa saja belum mencapai bumi
- Semakin jauh kita memandang, kita dapat memandang saat-saat awal semesta, sebelum bintang mulai bersinar

Paradoks Olber (1826)

Jika semesta dipenuhi dengan bintang, sehingga kemana pun kita memandang kita akan menemukan bintang yang sinarnya memancar ke bumi. Langit malam seharusnya sama terangnya dengan langit siang.

Namun, mengapa langit malam tetap gelap?

Solusi Paradoks Olber

- Diajukan Edgar Allan Poe di tahun 1848
- **Langit malam nampak gelap karena umur semesta belum tua tak berhingga (diciptakan pada suatu masa)**
- Cahaya dari bintang yang paling jauh bisa saja belum mencapai bumi
- Semakin jauh kita memandang, kita dapat memandang saat-saat awal semesta, sebelum bintang mulai bersinar

Kelengkungan Ruang Waktu

- *Teori relativitas umum Einstein* mengusulkan bahwa keberadaan massa dapat menyebabkan melengkungnya ruang-waktu
- Kelengkungan ruang-waktu dapat terdeteksi sebagai medan gravitasi
- Teori ini memprediksikan bahwa semesta dapat memiliki kelengkungan umum yang akan menentukan geometri dan pengembangan semesta
- Terdapat 3 kemungkinan kelengkungan ruang-waktu

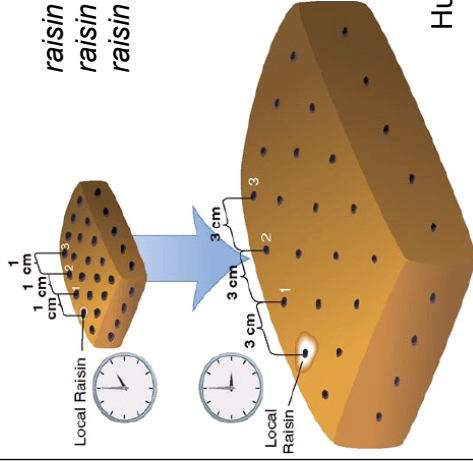
1. Kelengkungan Nol

- Gambaran pada dimensi 2:
 - nampak sebagai ruang datar (flat)
 - dua garis sejajar yang digambar di dalam ruang ini tidak akan pernah bersinggungan
 - luas lingkaran tepat dinyatakan sebagai πr^2
- Pada dimensi 3, volume bola tepat dinyatakan sebagai $\frac{4}{3} \pi r^3$
- Galaksi jauh akan nampak terdistribusi merata \rightarrow cacah sebanding dengan r^2 (2D) atau r^3 (3D)
- Dikenal dengan **semesta datar (flat universe)**, tanpa batas dan volume takberhingga

2. Kelengkungan Positif

- Gambaran pada dimensi 2:
 - nampak sebagai ruang pada permukaan bola (sferis)
 - dua garis sejajar akan bertemu di suatu titik
 - luas lingkaran bernilai kurang dari πr^2
- Pada dimensi 3, volume bola dalam ruang ini kurang dari $\frac{4}{3} \pi r^3$
- Galaksi jauh akan nampak semakin sedikit \rightarrow cacah kurang dari r^2 (2D) atau r^3 (3D)
- Dikenal sebagai **semesta tertutup (closed universe)**, tanpa batas tapi volume berhingga

raisin 1: 2 cm/jam
raisin 2: 4 cm/jam
raisin 3: 6 cm/jam



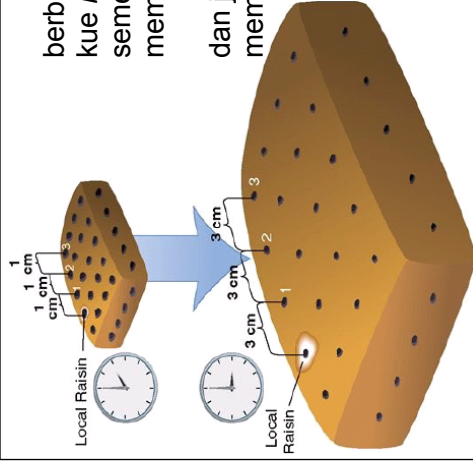
semakin jauh raisin-nya, kelajuannya semakin besar

Hukum Hubble!

berbeda dengan kue *raisin*, alam semesta tidak memiliki tepian!

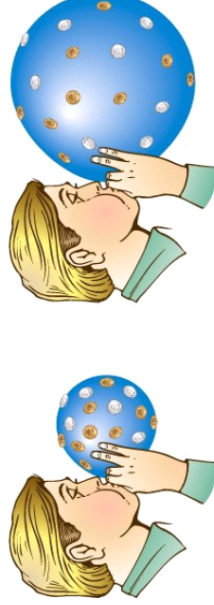
dan juga tidak memiliki pusat!

bayangkan kue *raisin* dengan ukuran takhingga!



Andaikan semesta berhingga, tepian dan pusat semesta tetap tidak ada!

Analogi: balon yang ditiup



bayangkan semesta berupa permukaan 2-D balon, tanpa tepian, tanpa pusat... tapi berhingga!

Pengembangan Semesta

- Alam semesta mengembang!
- Didasarkan pada pergeseran merah dari spektrum galaksi yang diamati Hubble tahun 1929
- Hukum Hubble: *galaksi bergerak menjauhi bumi dimana kelajuannya sebanding dengan jaraknya*

$$v = H d$$

v = kelajuan galaksi, H = tetapan Hubble, d = jarak galaksi dari bumi

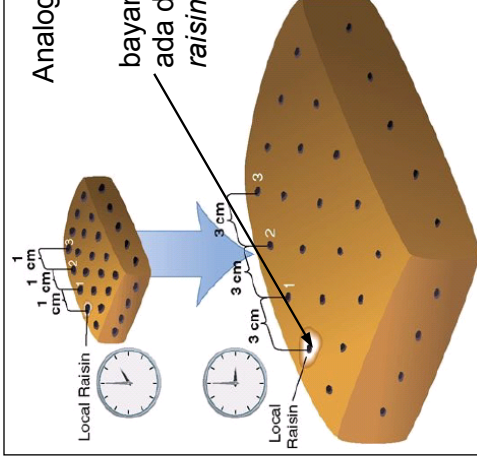
- Dari tetapan Hubble, dapat ditentukan umur semesta sebagai

$$T = \frac{1}{H}$$

(dikenal dengan **waktu Hubble**)

- Hasil pengamatan terkini menunjukkan nilai tetapan Hubble di antara 60 – 70 km/s /Mpc
- Nilai ini bersesuaian dengan umur semesta selama 16 dan 14 milyar tahun
- Ingat, bumi bukan pusat mengembangnya semesta, hanya acuan pengamatan saja
- Alam semesta mengembang tanpa pusat!

Analogi : *raisin cake*



bayangkan Anda ada di salah satu *raisin*

ketika kue dipanggang, *raisin* saling menjauh (*raisin*-nya sendiri tidak membesar)

• era galaksi

- setelah $t = 1$ milyar tahun, bintang dan galaksi mulai terbentuk

Kronologi ini diterima luas dengan ramalan yang telah terbukti:

- Prosentase Helium di semesta mendekati angka yang diprediksi nukleosintesis
- Ketika semesta mulai tampak, radiasinya dapat teramati pada λ mikro \rightarrow radiasi latar gelombang mikro kosmik (CMBR)

• Big Bang tidak terjadi pada suatu titik tertentu di semesta, namun terjadi di semua titik, di semua arah

- Pada jarak terjauh yang bisa teramati, yang terlihat adalah saat di mana semesta dipenuhi oleh gas panas
- Benda langit terjauh yang teramati (pada λ optik) adalah quasar dengan pergeseran merah = 5, sementara gas panas dari Big Bang mengalami pergeseran merah = 1000
- Cahaya yang dipancarkan pada Big Bang akan sampai di Bumi pada semua arah sebagai radiasi IR dan Radio pendek (radiasi latar primordial)

Radiasi Latar Primordial

- Ditemukan sebagai 'noise' oleh Penzias dan Wilson (1960)
- Diukur secara teliti oleh satelit COBE (1989) dan WMAP (2003)
- Teramati sebagai radiasi benda hitam pada suhu 2,73 K
- Karena adanya pergeseran merah sebesar 1000, maka gas awal memancarkan radiasi pada suhu 3000 K

3. Kelengkungan Negatif

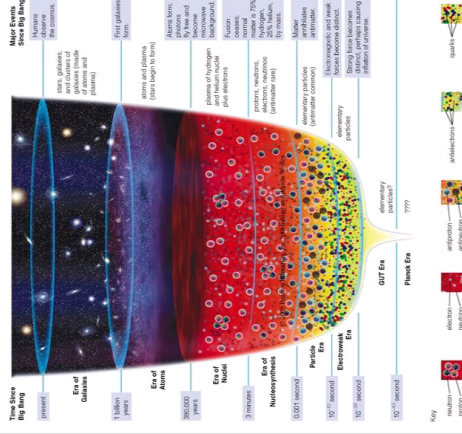
- Gambaran pada dimensi 2:
 - nampak sebagai ruang berbentuk pelana kuda (*saddle*)
 - dua garis sejajar akan semakin menjauh di kejauhan
 - luas lingkaran bernilai lebih dari πr^2
- Pada dimensi 3, volume bola akan bernilai lebih dari $\frac{4}{3} \pi r^3$
- Galaksi jauh akan nampak semakin banyak \rightarrow cacah lebih besar dari r^2 (2D) atau r^3 (3D)
- Dikenal sebagai **semesta terbuka** (*open universe*) tanpa batas dan volume takberhingga

Jika semesta mengembang, tentunya ada saat di mana semua berada pada sebuah titik yang sama...

Teori Dentuman Besar (Big Bang)

- Karena kelajuan cahaya berhingga (3×10^8 m/s), galaksi jauh yang teramati bukan keadaan galaksi saat ini, namun keadaan galaksi saat cahaya mulai lepas dari galaksi tersebut
- **waktu lihat balik** (*look-back time*): Galaksi Andromeda berjarak 2 juta tahun cahaya, maka waktu lihat baliknya 2 juta tahun
- semakin jauh benda langit yang teramati, semakin besar waktu lihat baliknya, dan kita dapat melihat keadaan semesta saat awal

Sejarah Big Bang



• waktu Planck (10^{-43} detik pertama)

- fluktuasi energi kuantum memicu fluktuasi medan gravitasi
- belum banyak yang bisa kita ketahui untuk era ini dan era sebelumnya

• era GUT (Grand Unified Theory)

- 4 gaya dasar di alam semesta menyatu
- berakhir pada detik ke 10^{-38}

• era partikel

- radiasi dan partikel tercipta dan terahiliasi
- quark bergabung membentuk proton dan neutron
- berakhir pada $t = 0,001$ s

• era nucleosynthesis

- proton dan neutron bergabung membentuk nukleon (75% hidrogen dan 25% helium)
- berakhir pada $t = 3$ menit

• era inti

- semesta berisi plasma (inti terionisasi) dan radiasi
- semesta terus mengembang dan mendingin
- ketika suhu semesta mencapai 3000 K pada $t = 380$ ribu tahun, elektron mulai bergabung dengan inti (rekombinasi) dan semesta mulai nampak

• era atom

- semesta terisi campuran atom netral dan plasma
- berlangsung selama 1 milyar tahun

Bukan keduanya!

Nasib semesta ternyata tidak hanya ditentukan oleh gravitasi saja, namun juga oleh sesuatu yang belum juga dipahami... **energi gelap** (**dark energy**)!

yang menyebabkan semesta mengembang dipercepat! (dan nasib yang belum jelas...)

Akhir Semesta

- Kelengkungan semesta akan ditentukan oleh kerapatan semesta
- Jika kerapatan semesta sama dengan kerapatan kritis $4 \times 10^{-30} \text{ gr/cm}^3$, ruang-waktu akan datar
- Jika kerapatan semesta kurang dari kerapatan kritis, semesta memiliki kelengkungan negatif dan terbuka
- Jika kerapatan semesta lebih besar dari kerapatan kritis, semesta memiliki kelengkungan positif dan tertutup

Andaikan nasib semesta hanya ditentukan oleh gravitasi saja...

- Semesta datar dan terbuka akan mengembang selamanya
- Keberadaan materi akan menyebabkan pengembangan semesta melambat, namun tidak akan pernah berhenti
- Semesta tertutup akan mengalami pengembangan yang melambat hingga berhenti, dan akhirnya berkontraksi baik di mana semua materi dan energi akan dimampatkan seperti semula (Big Crunch)

Berapakah kerapatan semesta kita?

Total dari materi yang terlihat dan materi gelap (*dark matter*) diperkirakan menyumbang 30% dari kerapatan kritis

Jadi, karena kerapatan semesta kurang dari kerapatan kritis, bagaimana nasib semesta, apakah terus mengembang, atau kolaps kembali?

ASTROFISIKA (FIS 239 – 2 sks)

EPILOG

© Denny Darmawan 2008

Apa yang belum kita ketahui?

- **Apakah tata surya kita satu-satunya?** adakah tata surya lain? seberapa banyak?
- **Adakah kehidupan dan peradaban lain selain di Bumi?** ataukah Bumi merupakan planet 'terpilih'? dan peradaban manusia adalah peradaban satu-satunya di semesta?
- **Apa yang terjadi di dalam lubang hitam?** apakah benar merupakan penghubung ke semesta lain?

- Materi ujian diambil dari seluruh materi yang telah diberikan
- Terdiri atas soal hitungan dan essay
- Menyumbang 50% dari nilai akhir Anda!
- Persiapkan dari sekarang!

Apa yang telah kita ketahui?

- **Hukum alam bersifat universal** baik di Bumi, maupun di galaksi lain, berlaku hukum fisika yang sama
- **Matahari merupakan sebuah bintang biasa** merupakan bintang tipe G biasa yang dikelilingi 8 planet dan tidak ada yang istimewa dengan posisi, gerak atau komposisinya
- **Bintang terorganisir ke dalam galaksi, dan galaksi ke dalam gugus bintang** → galaksi → gugus/cluster → supercluster → semesta

- **Alam semesta sangat luas** jarak pisah antar galaksi mencapai ratusan ribu tahun cahaya
- **Alam semesta memiliki permulaan** diciptakan (lewat dentuman besar) sekitar 10 – 20 milyar tahun yang lalu. Umur tata surya kita 5 milyar tahun, sekitar 1/3 umur semesta
- **Alam semesta berevolusi** kerapatan dan komposisi semesta berubah terhadap waktu
- **Kebanyakan materi di semesta tidak nampak** materi gelap dan energi gelap mendominasi semesta

- **Apa itu materi gelap (dark matter)?** berupa apa? terbuat dari apa? bagaimana mencarinya? bagaimana distribusinya?
- **Bagaimana akhir dari semesta kita?** mengembang selamanya? ataukah kembali kolaps?

Ujian Akhir Semester