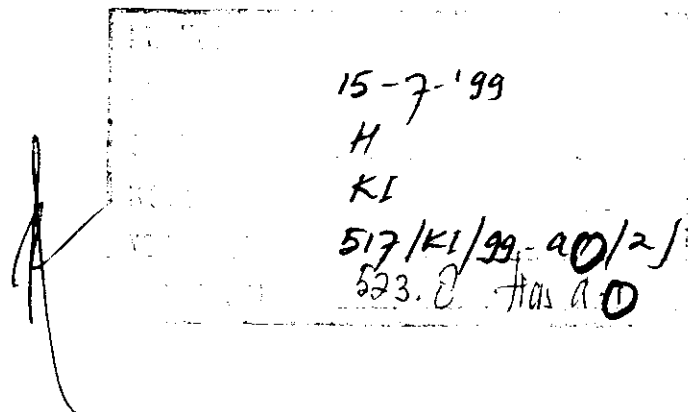


# ASPEK FISIKA BINTANG

OLEH : DRS. AMRAN HASRA



JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA  
FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN IPA  
INSTITUT KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN  
PADANG  
1998

# DAFTAR ISI

	<b>Hal</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Tata Surya dan Jagat Raya.....	1
1.2 Fisika dalam Jagat Raya .....	4
1.3 Jarak Bintang.....	9
<b>BAB II CAHAYA DAN WARNA BINTANG</b> .....	13
2.1 Cahaya Bintang.....	13
2.2 Magnitudo Bintang .....	17
2.3 Magnitudo Mutlak .....	18
2.4 Warna Bintang.....	20
2.5 Indek Bintang.....	22
2.6 Suhu Efektif.....	23
<b>BAB III SPEKTRUM BINTANG</b> .....	25
3.1 Spektrum Cahaya Bintang .....	25
3.2 Klasifikasi Spektrum Bintang.....	27
3.3 Diagram Hertzsprung Russel.....	29
<b>BAB IV ENERGI BINTANG</b> .....	36
4.1 Bahan Bakar Bintang.....	36
4.2 Reaksi Nuklir di dalam Bintang.....	39
<b>BAB V EVOLUSI BINTANG</b> .....	43
5.1 Asal Mula Bintang.....	43
5.2 Evolusi Awal.....	45
5.3 Evolusi di Deret Utama .....	47
5.4 Gugus Bintang .....	49
5.5 Evolusi Lanjut.....	50
5.6 Ledakan Bintang.....	52
5.7 Evolusi Bintang Ganda.....	62

## DAFTAR PUSTAKA

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Yang Maha Kuasa, yang mana berkat rahmat dan karuniaNya jualah buku ini dapat di selesaikan , seperti apa adanya.

Buku yang penulis beri judul “Aspek Fisika Bintang “ ini ditulis guna memenuhi kebutuhan buku-buku pelajaran di sekolah dan perguruan tinggi.

Dalam buku ini akan dibahas tentang aspek fisika dan jagat raya, cahaya dan warna bintang, spektrum bintang, energi bintang, dan evolusi bintang.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan-kekurangan dalam buku ini, untuk itu penulis mengharapkan lebih banyak saran serta petunjuk dari pembaca demi penyempurnaannya.

Akhirnya penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak berjasa dalam mempersiapkan buku ini.

Padang,      November 1998

Penulis

# BAB I

## PENDAHULUAN

Manusia sebagai makhluk yang paling sempurna diciptakan Tuhan, dikaruniai akal dan budi. Sebagai salah satu penghuni alam semesta ( jagat raya ) manusia selalu ingin tahu untuk mencari keterangan tentang segala sesuatu, yang pernah di lihat dan dialami tentang alam sekitarnya. Dengan mengamati bola langit yang penuh bintang bertaburan memancing rasa ingin tahu untuk mengungkap rahasia dari alam semesta.

Para ahli astronomi telah banyak memperoleh informasi dari bola langit baik melalui pengamatan langsung maupun melalui penelitian yang dilakukan di muka bumi atau di angkasa. Didasarkan atas semua informasi ini dapat disusun teori dan hukum sebagai jawaban dari berbagai pertanyaan dan permasalahan tentang jagat raya ini.

### 1.1 *Tata Surya Dan Jagat Raya*

Manusia yang bertempat tinggal dipermukaan bumi dapat merasakan bahwa bumi kita ini sangat luas sekali . Hal ini dapat dibayangkan karena jari-jari bumi panjangnya 6.370 km, dengan keliling khatulistiwa 40.000 km yang sama dengan 40 kali panjang pulau jawa.

Bumi yang merupakan salah satu dari planet anggota Tata Surya ( sistem matahari) beredar bersama planet lainnya mengelilingi matahari. Jarak rata-rata antara matahari dengan bumi diperkirakan 149.600.000 km dinamakan satu-satuan astronomik atau 1 astronomik unit ( Moh Ma'mur,T, 1995;91). Ada sembilan planet yang merupakan anggota tata surya, berturut-turut dari yang terdekat ke matahari yaitu : Merkurius, Venus, Bumi, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus Dan Pluto.

Tata Surya merupakan suatu sistem keluarga benda langit yang terdiri atas matahari, planet-planet, satelit-satelit, komet dan meteor sebagai salah satu bintang diantara miliaran bintang di jagat raya. Bintang-bintang membentuk kelompok dalam jumlah yang sangat banyak. Setiap kelompok terdiri atas jutaan bintang-bintang yang dikenal dengan nama galaksi. Galaksi dimana matahari kita sebagai salah satu bintang anggotanya dinamakan Bima Sakti ( Milky Way ).

Bima Sakti digambarkan berbentuk keping atau cakram dengan diameter 80.000 - 10.000 tahun cahaya dan tebalnya antara 3.000 - 15.000 tahun cahaya (Soendjojo.D, 1986;18). Matahari berada pada jarak 30.000 tahun cahaya dari salah satu ujungnya. Bahagian tengah galaksi ditempati oleh bintang-bintang raksasa dengan jari-jari mencapai 390 kali panjang jari-jari matahari. Bintang raksasa yang bernama Antares merupakan sebuah bintang yang berwarna merah paling terang yang terletak pada bagian perut rasi bintang Scorpio.



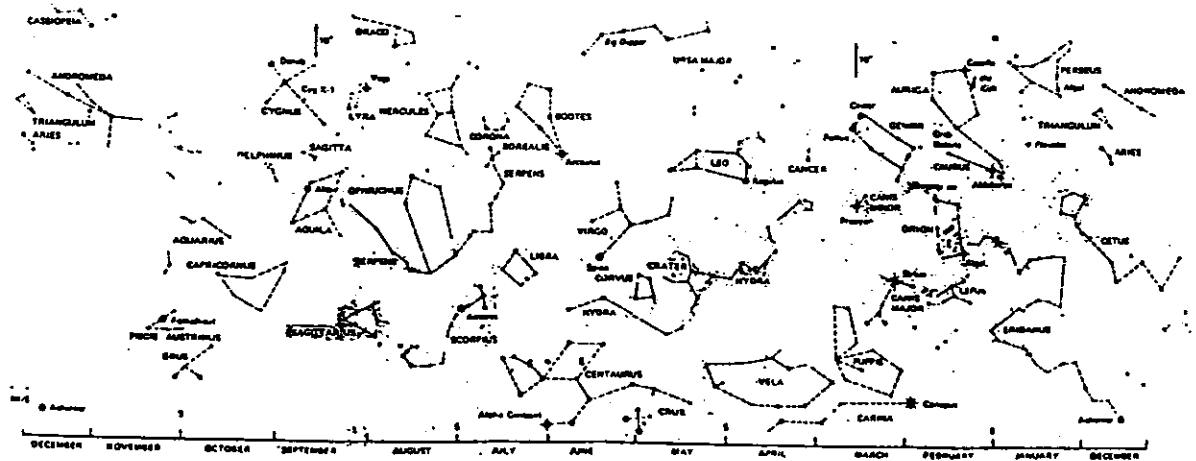
Gambar 1.1 Bagan Galaksi Bima Sakti dengan tempat matahari diantara bintang- bintang anggotanya ( Zim & Baker;112 ).

Galaksi lainnya yang dekat dengan galaksi Bima Sakti yaitu galaksi Andromeda dengan jarak 1,5 juta tahun cahaya dan galaksi Awan Magellan yang berjarak 170.000 tahun cahaya ( Winardi Sutantyo, 1983:9).

Dari bumi kita hanya dapat mengamati sebahagian saja dari galaksi bima Sakti. hal ini disebabkan karena kita berada didalamnya. Bagian dari bima sakti yang tampak itu merupakan bintang yang bertebaran di langit. Bintang-bintang ini dibebepara tempat kelihatan menggerombol. Gerombolan bintang ini disebut gugus bintang atas rasi bintang.

Nama-nama untuk gugus bintang diberikan sesuai dengan banyangan yang timbul dalam fantasi waktu melihat rasi bintang tersebut seperti Cancer, scorpio, Orion, Ursa Mayor, Cruk dan banyak lagi yang lainnya.

Ada 12 rasi bintang yang selalu lewat sekitar titik di tas kepala kita yang tinggal di daerah khatulistiwa. Deretan rasi bintang ini membentuk gelang yang dinamakan Zodiak yaitu Aries, Taurus, Gemini, Cancer, Leo, Virgo, Libra, Scorpio, Sagitarius, Aquarius dan Pisces. Waktu yang baik untuk mengamati bintang adalah pada malam hari yang cerah disaat tidak ada bulan. Dengan menggunakan peta bintang seperti gambar (1.2), kita dapat mengenal beberapa rasi bintang di langit



Gambar 1.2 Peta langit perbintangan ( Moh. Ma' mur. T, 1995:95 )

## 1.2 Fisika Dalam Jagat Raya

Hukum fisika dibuat orang untuk menjelaskan peristiwa alam yang diamati. Hukum fisika diciptakan oleh para cerdas pandai berdasarkan pengamatan dan percobaan di bumi. Berlakukah hukum itu dalam jagat raya yang maha besar ini .?

Bulan bergerak mengitari bumi dan apel jatuh kebumi adalah dua peristiwa yang berlainan. Namun Sir Isaac Newton ( 1642- 1727 ) mengemukakan, kedua peristiwa itu disebabkan oleh gaya yang sama, yaitu gaya gravitasi . Hukum gravitasi Newton mengatakan, antara dua benda yang massanya masing-masing  $m_1$  dan  $m_2$  dan keduanya terpisah oleh jarak  $r$ , terjadi gaya tarik menarik gravitasi yang besarnya dinyatakan oleh,

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (1.1)$$

$G$  sebuah tetapan yang disebut tetapan gravitasi.

Dari pengalaman, orang tahu apel jatuh ke bumi dengan percepatan  $g=9,8 \text{ m/s}^2$ .

Berdasarkan hukum mekanika Newton, yaitu gaya = massa x percepatan, pada apel bekerja gaya sebesar,

$$F = m.g, \quad (1.2)$$

Dimana  $m$  massa apel. Gaya ini tak lain gaya gravitasi antara bumi dan apel, yaitu,

$$F = \frac{G M m}{R^2} \quad (1.3)$$

Dalam persamaan ini,  $M$  massa bumi dan  $R$  jarak apel ke pusat bumi yang tak lain merupakan radius bumi karena apel jatuh di permukaan bumi. Dari persamaan (1.2) dan (1.3), diperoleh

$$M = \frac{g R^2}{G} \quad (1.4)$$

Diketahui  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ ;  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ Kg}^{-2}$ ;  $R = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

Maka massa bumi dapat kita hitung yaitu,

$$M = 5,96 \times 10^{24} \text{ Kg} \quad (1.5)$$

Bulan juga di tarik oleh bumi seperti halnya apel tadi. Mengapa bulan tidak jatuh? Jawabnya sederhana. Andaikan bulan tak mengalami gaya apapun, bulan akan bergerak lurus teratur. Bulan bergerak melingkar karena ada gaya yang bekerja padanya yang tak lain adalah gaya gravitasi bumi.

Sebuah benda dengan massa  $m$  dapat kita buat bergerak menurut lintasan lingkaran dengan radius  $a$  dan berkecepatan  $v$  bila pada benda itu diperlukan gaya yang mengarah ke pusat lingkaran yang besarnya.

$$F = \frac{mv^2}{a} \quad (1.6)$$

Gaya ini disebut gaya sentripetal. Dalam hal ini, gaya gravitasi antara bumi dan bulan bertindak sebagai gaya sentripetal itu tadi.

$$\frac{Mv^2}{a} = \frac{GMm}{a} \quad (1.7)$$

$a$  jarak bumi bulan,  $M$  massa bumi,  $m$  massa bulan. Bila bulan **mengitari** bumi dalam selang waktu  $P$  untuk putar maka  $V = 2\pi / P$ , ( $P$  disebut periode orbit bulan).

Maka persamaan (1.7) dapat ditulis dalam bentuk,

$$M = \frac{4\pi^2 a^3}{GP^2} \quad (1.8)$$



Dari pengamatan diketahui bahwa bulan mengitari bumi sekali dalam 27,3 hari; jadi  $P = 27,3 \times 3600$  sekon = 2.358.720 sekon. Sedangkan jarak bulan adalah  $384.000 \text{ Km} = 3.84 \times 10^8 \text{ m}$ . Dari rumus (1.8) kita dapat menghitung massa bumi.

$$M = 6,02 \times 10^{24} \text{ kg.} \quad (1,9)$$

Bandingkan persamaan (1.5) dan (1.9) yang ternyata cocok (perbedaan hanya disebabkan karena adanya pembulatan angka). Ini menunjukkan hukum gravitasi Newton berlaku universal, ia mengatur gerak jatuh apel maupun gerak orbit bulan.

Demikian pula gerak planet mengitari matahari juga disebabkan oleh gaya gravitasi, yaitu gaya antara planet itu dengan matahari. Dengan demikian persamaan (1.7) juga berlaku untuk planet, hanya saja  $a$  merupakan jarak planet ke matahari dan  $M$  massa matahari. Kita tulis persamaan (1.8) dalam bentuk lain,

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2} M \quad (1.10)$$

Harga  $a$  dan  $P$  tidak sama semua planet dalam tatasurya, namun karena semua planet mengitari matahari yang sama, ruas kanan persamaan (1.10) sama untuk semua planet. Jadi perbandingan  $a^3 / P^2$  akan sama untuk sembilan planet dalam tata surya.

Hal ini sudah diketahui oleh Johannes Kepler yang hidup seabad sebelum Newton. Tabel 1 berikut memberikan harga  $a$  dan  $P$  untuk semua planet.  $P$  dinyatakan dalam satuan tahun, sedang  $a$  dalam satuan astronomi (SA), yaitu jarak rata-rata bumi ke matahari (1 SA = 150 juta km). Perhatikan  $a^3 / P^2$  berharga satu untuk planet-planet itu. (bila ada perbedaan kecil hanya disebabkan karena pembulatan angka). Hal ini juga mendukung ke universalitas hukum gravitasi Newton.

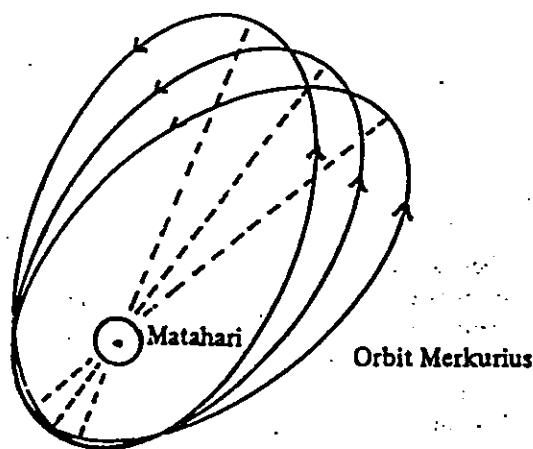
**Tabel 1**  
**Perida Dan Jarak Planet Ke Matahari**

<b>Planet</b>	<b>a (SA)</b>	<b>P(tahun)</b>
Merkurius	0,387	0,241
Venus	0,723	0,615
Bumi	1,000	1,000
Mars	1,524	1,881
Jupiter	5,203	11,862
Saturnus	9,546	29,458
Uranus	19,20	84,018
Neptunus	30,09	164,78
Pluto	39,5	248,4

Gerakan benda langit sebenarnya tidak sesederhana yang dilukiskan di atas. Lintasan atau orbit benda langit umumnya tidak berupa lingkaran melainkan berbentuk ellips. Selain itu suatu benda langit dapat mengalami gangguan pada gerakanya akibat tarikan benda-benda lainnya. Misalkan suatu komet yang mendekati matahari akan memperoleh gangguan pada gerakanya akibat tarikan gravitasi planet-planet disekitar matahari. Walaupun gerak benda langit ini rumit, hukum gravitasi Newton dapat menjelaskan gerak tersebut dengan cukup tepat. Hukum gravitasi Newton juga dapat menjelaskan gerak orbit bintang ganda, yaitu dua bintang berpasangan, bintang yang satu mengorbit bintang yang lain.

Namun hukum yang ampuh itu tidak sempurna. Planet Merkurius mengorbit matahari dengan lintasan berbentuk ellips yang eksentrisitasnya 0,2. Dari pengamatannya yang cermat, Le Verrier pada abad ke 19 mendapatkan panjang sumbu ellips orbit Merkurius tidak tetap arahnya. Sumbu panjang ini berputar dengan laju 43 detik busur per tahun ( lihat gambar 1.3). Pada mulanya Le Verrier menduga adanya planet lain yang dekat matahari dan mengganggu orbit Markurius. Le Verrier menghitung di mana kiranya planet baru berada. Seluruh observatorium di Eropa mencari planet itu, yang dinamakan Vulkan. Namun mereka tak berhasil. Akhirnya para astronomi berkesimpulan bahwa Vulkan tidak ada.

Baru pada awal abad ini, setelah Albert Einstein mengemukakan teori relativitas umumnya, gerak aneh planet Merkurius itu dapat dijelaskan. Dalam teori ini, yang juga disebut teori gravitasi Einstein, gravitasi menyebabkan melengkungnya “ ruang dan waktu” di sekitar suatu benda. Einstein membahas gerak orbit suatu benda berdasarkan geometri kelengkungan ruang dan waktu itu. Dengan tepat teori Einstein dapat menjelaskan perputaran sumbu panjang planet Merkurius.



Gambar 1.3 Pergeseran sumbu panjang ellips orbit Merkurius.

Toeri Newton tidak salah, namun kurang sempurna. Toeri Einsten menyempurnakannya. Tetapi sudah sempurnakah teori Einstein?

Eksperimen yang dilakukan dalam laboratorium di bumi tidak mencukupi. Manusia harus memperluas daya jangkauannya, bukan hanya di bumi dan sekitarnya, tetapi juga ke segala penjuru alam semesta ini.

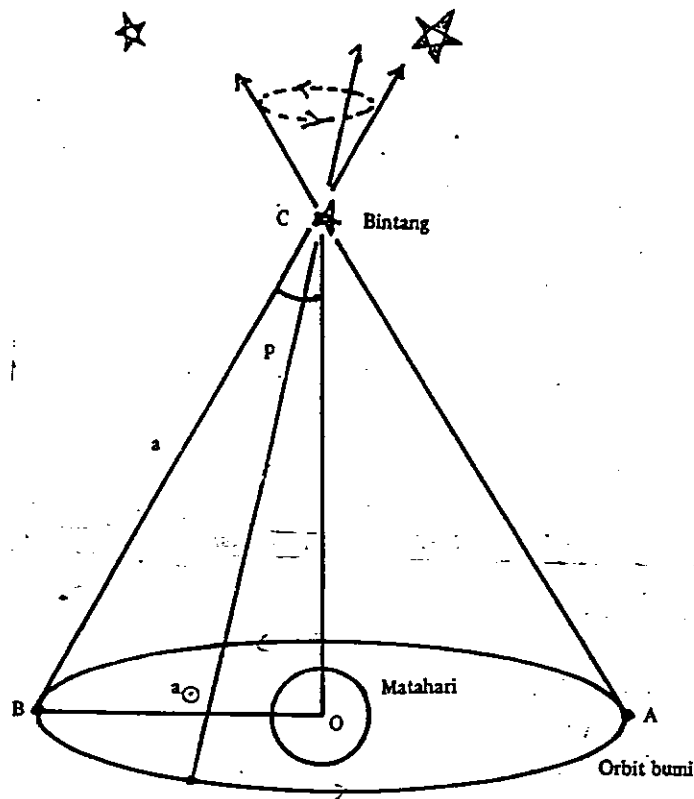
Dalam jagat raya dapat ditemui hal-hal yang tak mungkin dijumpai dalam laboratorium di bumi. Ruang hampa yang jauh lebih hampa dari ruang hampa laboratorium bumi terdapat dalam ruang antara bintang-bintang. Materi yang sangat mampat hingga per  $\text{cm}^3$  bermassa semilyar ton terdapat dalam bintang neutron. Medan gravitasi yang sangat kuat disekitar suatu black hole maupun melengkungkan "ruang-waktu" disekitarnya hingga suatu cahayapun tak dapat lepas. Tenaga dahsyat dari quasar tak pernah dapat dibayangkan dalam ukuran tenaga yang terkandung di bumi ini. Reaktor fusi ( penggabungan inti) yang stabil masih merupakan impian manusia. namun dalam alam semesta jumlah reaktor fusi tidak terhitung jumlahnya, yaitu dalam bintang-bintang.

Bahkan teori asal mula kehidupanpun sekarang dicari orang kesegala penjuru jagat raya. Bukan mustahil bila teknologi tinggi di masa akan datang berlandaskan pada pengetahuan yang lebih dalam tentang materi, ruang dan waktu yang digali bukan hanya di bumi ini saja.

### *1.3 Jarak Bintang*

Penentuan jarak bintang baru dapat dilakukan pada abad ke 19. Cara yang digunakan adalah cara paralaks trigonometri. Kita tahu bumi bergerak mengitari matahari dalam waktu setahun sekali keliling. Akibat gerak edar bumi, bintang yang dekat akan terlihat bergeser letaknya terhadap bintang yang jauh. Bintang tersebut terlihat seolah-olah menempuh lintasan berbentuk ellips yang sebenarnya merupakan pencerminan gerak bumi ( lihat gambar 1.4). sudut  $p$  dalam gambar disebut paralaks

bintang. Makin jauh letak suatu bintang makin kecil lintasan ellipsnya dan makin kecil pula paralaksnya.



Gambar 1.4 Paralaks sebuah bintang. Bila bumi bergerak dari A ke B bintang tampak bergeser letaknya sebesar dua kali paralaksnya.

Pada abad ke 16, Tycho Brahe mencoba mengamati paralaks bintang, waktu itu belum ada teropong, dengan alatnya Tycho Brahe tak berhasil mengamati adanya paralaks bintang. Maka ia berkesimpulan bahwa teori heliosentris Copernicus yang mengatakan Bumi mengitari Matahari tidak benar. Tetapi ia tidak memperhitungkan kurang-telitian alatnya.

Baru pada tahun 1838, F.W. Bessell berhasil menentukan paralaks bintang 61 Cygni. Ia mendapatkan paralaks bintang ini 0,3 detik. Bila kembali kita perhatikan Gambar 1.4 jarak suatu bintang dapat diketahui bila paralaksnya diketahui, yaitu dengan rumus,

$$\sin p = OB / BC = a_s / a \quad (1.11)$$

Di mana  $a_s$  jarak matahari,  $a$  jarak bintang. Karena  $p$  sudut yang kecil, maka kalau  $p$  dinyatakan dalam radian Pers. (1.10) dapat ditulis dalam bentuk.

$$P = a_s / a \quad (1.12)$$

Dengan menggunakan rumusan ini dapat dihitung jarak 61 Cygni, yaitu  $10^{17}$  m.

Bilangan sebesar ini sulit dibayangkan, seperti halnya kalau kita menyatakan jarak antara dua kota dalam satuan milimeter. Oleh karena itu sering digunakan satuan lain. Diketahui cahaya dalam ruangan hampa merambat dengan kecepatan  $3 \times 10^8$  m per sekon. Jarak yang ditempuh cahaya dalam setahun disebut satu tahun cahaya.

Mudah dihitung bahwa, 1 tahun cahaya =  $9,46 \times 10^{15}$ . Dengan satuan ini jarak 61 Cygni adalah 10 tahun cahaya.

Bintang yang tampak oleh mata dan dekat dengan kita setelah matahari adalah bintang  $\alpha$  Centauri yang paralaksnya  $0,75''$ . Dengan pers(1.12) dapat kita hitung jaraknya yaitu 4,35 tahun cahaya. Sebenarnya bintang yang terdekat dengan kita adalah Proxima Centauri. Paralaksnya  $0,76''$ , jadi hanya sedikit lebih dekat daripada  $\alpha$  Centauri. Tetapi cahaya bintang ini sangat lemah hingga tak tampak oleh mata bugil.

Dengan mengetahui jarak matahari dan bintang-bintang maka diperoleh bukti bahwa matahari sebenarnya sebuah bintang. Andaikan jarak matahari yang 150 juta km ( atau 8,5 menit cahaya) itu dijauhkan hingga 4,3 tahun cahaya seperti  $\alpha$  Centauri, maka matahari akan tampak kecil berkedip-kedip seperti bintang lainnya.

Sebaliknya bila bintang seperti  $\alpha$  Centauri didekatkan sedekat matahari, bintang ini akan tampak terang benderang seperti matahari.

Untuk membayangkan jarak bintang dan matahari, kita andaikan jarak bumi - matahari di kecilkan hingga 1 meter, dalam skala ini jarak bumi -  $\alpha$  Centauri adalah 260 kilometer.

Bila dalam pers (1.12) paralaks  $p$  dinyatakan dalam detik busur maka

$$P = 206265 a_s / a \quad (1.13)$$

( karena  $1 \text{ radian} = 206265''$  ).

Untuk menyatakan jarak bintang, astronomi sering menggunakan satuan parsec (pc). Satu parsec adalah jarak bintang yang paralaksnya 1 detik. Dari pers (1.12) jelas bahwa,

$$1 \text{ pc} = 206265 a_s = 206265 \text{ SA}, = 3,26 \text{ tahun cahaya} \quad (1.14)$$

( Winardi Sutantyo, 1983;64)

bila  $p$  dinyatakan dalam detik busur dan jarak dinyatakan dalam parsec maka pers (1.13) menjadi,

$$P = 1/a \quad (1.15)$$

Menentukan jarak bintang dengan paralaks trigonometri tidak mudah. Telah kita bicarakan, paralaks bintang terang yang terdekat dengan kita setelah matahari, yaitu Alpha Centauri, adalah  $0,75''$ . Sudut ini kecil sekali. Untuk membayangkan betapa kecilnya sudut yang dibentuk oleh ujung lidi sebesar 1 cm bila dilihat dari jarak 2 km. Jadi untuk mengukur paralaks trigonometri diperlukan alat-alat yang teliti. Cara ini hanya dapat dilakukan untuk bintang-bintang yang relatif dekat saja.

## BAB II

### CAHAYA DAN WARNA BINTANG

Disaat fajar telah tiba, kelihatan cahaya memerah di ufuk timur. Bintang-bintang yang tadinya bertaburan menghiasi langit malam, sedikit demi sedikit lenyap digantikan cahaya sang surya.

Pada siang hari kita tak dapat melihat bintang. Cahaya matahari dihamburkan atmosfer bumi mengalahkan cahaya bintang-bintang. Tetapi tidak tepat kalau dikatakan pada siang hari tak ada bintang yang dapat kita lihat karena matahari sebenarnya sebuah bintang.

#### 2.1 *Cahaya Bintang*

Bintang memancarkan energi yang antara lain berbentuk cahaya. Lensa atau cermin suatu teropong mengumpulkan energi dari bintang, kemudian memusatkannya ke titik fokus. Pada titik fokus dapat diletakkan film, atau alat lainnya untuk mempelajari cahaya yang datang dari jauh ini. Makin besar diameter lensa atau cermin suatu teropong, makin kuat daya kumpul cahayanya dan makin tinggi daya pisahnya menembus kedalaman jagat raya. Karena itu teropong bintang umumnya berukuran besar. Teropong yang besar berada di Rusia, garis tengah **cerminnya 6 m**

Ada bintang yang tampak terang dan ada pula yang terlihat lemah. Energi bintang yang tiba di bumi, pada permukaan seluas  $1 \text{ m}^2$  dalam selang waktu 1 detik, disebut fluks energi bintang itu. Sebuah bintang tampak terang bila fluks energinya besar.

Namun kuat cahaya bintang yang tampak oleh kita tidak merupakan ukuran terang sebenarnya bintang itu. Bisa saja suatu bintang sebenarnya memancarkan



energi yang relatif tidak banyak, tetapi tampak terang berhubungan letaknya yang dekat. Atau sebaliknya, sebuah bintang menghamburkan energi secara dahsyat namun dari bumi tampak lemah berhubung letaknya yang jauh.

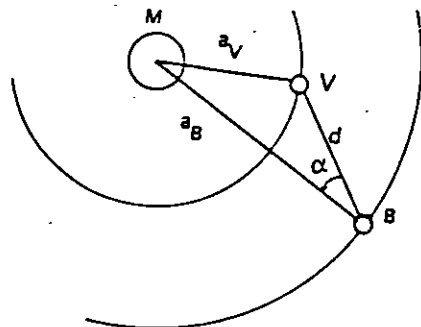
Energi yang dipancarkan bintang per detik disebut luminositas bintang. Bila Fluks merupakan pengukur kuat cahaya yang tampak dari bumi, luminositas merupakan pengukur kuat cahaya sebenarnya bintang itu.

Dinmisalkan Fluks suatu bintang E, luminositasnya L dan jaraknya a, maka

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

$$\text{atau : } L = 4\pi a^2 E \quad (\text{Soendjojo, D, 1936:24}) \quad (2.1)$$

Matahari adalah sebuah bintang. Karena letaknya yang dekat dengan bumi, maka Fluks energinya jauh lebih kuat dibandingkan dengan bintang-bintang lainnya. Jadi matahari bintang terdekat dengan kita. Berapa jauhnya? Perhatikan gambar 2.1 yang menggambarkan matahari dengan orbit bumi dan orbit venus.



Gambar 2.1 Orbit bumi dan venus mengelilingi matahari ( Winardi Sutantyo,1983;58)

Dari pengamatan diketahui bahwa periode bumi dalam orbitnya  $P_B = 365,25$  hari, sedang periode venus dalam orbitnya  $P_V = 224,7$  hari. Kita andaikan orbit bumi dan venus berupa lingkaran yang radiusnya masing-masing  $a_B$  dan  $a_V$ . Dari pers. 1.10 yaitu hukum Kepler ketiga, perbandingan  $a_V / a_B$  dapat dihitung.

$$a_V / a_B = (P_V / P_B)^{2/3} = f \quad (2.2)$$

Dari data di atas harga  $f$  diketahui, yaitu **0,72**. Pada gambar 2.1 Sudut  $\alpha$  jarak sudut Venus ke matahari dilihat dari bumi. Sudut  $\alpha$  dapat ditentukan setiap saat. Selanjutnya kita gunakan rumus cosinus dalam segitiga MBV,

$$A^2 = aB^2 + d^2 - 2 aB d \cos \alpha \quad (2.3)$$

$$F^2 a^2 B = a^2 B + d^2 - 2 daB \cos \alpha \quad (2.4)$$

Harga  $d$ , yaitu jarak bumi –Venus, dapat ditentukan dengan radar, yaitu dengan menentukan waktu yang diperlukan oleh gelombang radar untuk mencapai Venus dan kembali lagi ke bumi setelah dipantulkan Venus. Karena  $f$ ,  $\alpha$  dan  $d$  diketahui, maka jarak matahari ke bumi, yaitu  $a_3$ , dapat ditentukan.

Dalam hal sebenarnya tidak sesederhana di atas karena orbit bumi dan Venus berupa ellips, selain itu bidang orbit bumi dan Venus tidak sebidang (membentuk sudut  $3^\circ 23'$ ). Namun uraian di atas diharapkan **dapat memberikan** gambaran yang jelas. Selain itu, anggapan di atas tidak berbeda banyak dari kenyataan sebenarnya. Dari berbagai pengukuran diperoleh jarak rata-rata Matahari (sun) ke Bumi adalah :

$$a_e = 1.496 \times 10^{11} \text{ m} \quad (2.5)$$

atau sering dibulatkan sebagai 150 juta kilometer. Jarak ini disebut satu satuan astronomi (1 SA).

Dengan mengetahui jarak bumi – matahari kita dapat menentukan massa matahari dari Pers.1.10 yaitu :

$$M_s = 2 \times 10^{30} \text{ Kg} \quad (2.6)$$

Bila kita bandingkan dengan massa bumi (pers.1.5 dan 1.9), kita lihat massa Matahari kira – kira 300.000 kali massa bumi.

Fluks energi matahari yang tiba di bumi adalah

$$E_e = 1,95 \text{ kalori per cm}^2 \text{ per menit}$$

$$= 1,37 \times 10^3 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (2.7)$$

Harga ini disebut *terapan matahari*. Karena jarak bumi matahari diketahui, kita dapat menghitung luminositas matahari dengan Pers. (2.1) dan didapat :

$$L_s = 3,9 \times 10^{26} \text{ W.} \quad (2.8)$$

Dengan kata lain luminositas matahari  $3,9 \times 10^{26}$  kilowatt. Energi yang dipancarkan matahari dalam sedetik sama dengan energi yang dibangkitkan oleh semua pembangkit energi buatan manusia sekarang selama 3 juta tahun.

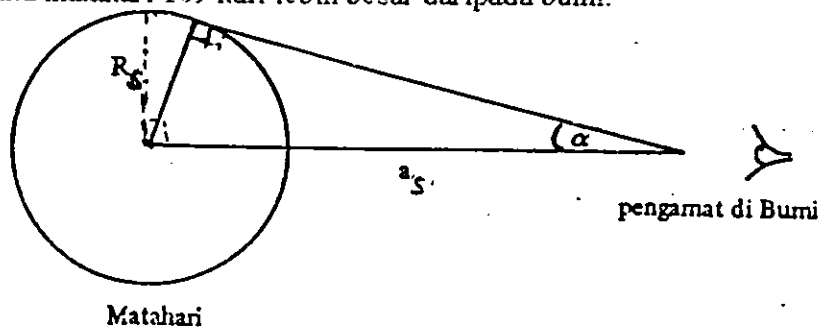
Berapakah besar matahari? Radius matahari dapat ditentukan bila radius sudut dan jaraknya diketahui. Perhatikan Gambar 2.2 radius sudut adalah sudut  $\alpha$  yang merupakan sudut pengamatan radius matahari. Jelaslah radius matahari dapat ditentukan dalam rumus,

$$R_s = a_s \tan \alpha. \quad (2.9)$$

Diketahui  $\alpha = 960''$ , jadi,

$$R_s = 6,96 \times 10^8 \text{ m.} \quad (2.10)$$

(sekitar 700.000 km). Dibandingkan dengan bumi yang radiusnya  $6,37 \times 10^6$  m, ternyata matahari 109 kali lebih besar daripada bumi.



Gambar 2.2. Radius sudut matahari

## 2.2 Magnitudo Bintang

Astronomi tak dapat terbang menuju bintang-bintang. Dilihat dengan teropong yang paling besar sekalipun, bintang-bintang hanya tampak sebagai titik-titik cahaya saja, tak ubahnya dilihat dengan mata bugil. Bedanya bintang tampak jauh lebih terang bila dilihat dengan teropong (lain halnya dengan bulan dan planet yang dapat dengan jelas dilihat permukaannya). Lalu bagaimana astronomi dapat mempelajari segala sesuatu tentang bintang ? Ini merupakan "cerita detektif" yang banyak liku-likunya.

Hipparchus pada abad ke dua sebelum Masehi membagi bintang dalam 6 kelompok berdasarkan terangnya. Bintang yang paling terang diberi magnitudo satu, yang kurang terang magnitudo dua, demikian seterusnya hingga bintang yang sangat lemah hampir tak terlihat diberi magnitudo enam. Jadi magnitudo merupakan ukuran terang bintang yang kita lihat dari bumi.

William Herschel mendapatkan bahwa kepekaan mata manusia bersifat logaritmis dan bintang yang bermagnitudo enam seratus kali lebih rendah dari pada yang bermagnitudo satu. Berdasarkan ini Pogson mendefinisikan skala magnitudo dengan lebih tegas. Misalkan bintang 1 bermagnitudo  $m_1$  dan fluks energinya  $E_1$  sedangkan bintang 2 bermagnitudo  $m_2$  dan fluks energinya  $E_2$ . Berdasarkan skala Pogson.

$$m_2 - m_1 = -2,5 \log E_2 / E_1 \quad (2.11)$$

Kita lihat bahwa dua bintang yang selisih magnitudonya lima mempunyai perbedaan fluks energi 100 kali. Perhatikan pula makin terang suatu bintang, makin kecil magnitudonya. Beberapa bintang diketahui tidak berubah-ubah cahayanya diukur magnitudonya dengan cermat dan digunakan sebagai standar magnitudo. Tabel di bawah ini memberikan magnitudo beberapa benda langit.

Tabel . 2

## Magnitudo Benda Langit

Benda langit	Magnitudo
Matahari	- 26.8
Bulan purnama	- 12,7
Jupiter	- 2
Sirius	1.4
Betelgeus	0,4
Aldebaran	0.8

Dalam tabel ini magnitudo untuk planet Venus dan Jupiter diberikan pada saat terangnya maksimum.

### 2.3 *Magnitudo Mutlak*

Seperti halnya fluks energi, magnitudo bintang merupakan pengukur terang suatu bintang yang kita lihat. Karena itu orang sering menyebutnya magnitudo semu (atau disingkat magnitudo saja).

Terang sebenarnya suatu bintang dinyatakan oleh *magnitudo mutlak*. Magnitudo mutlak suatu bintang adalah magnitudo bintang andaikan diamati dari jarak 10 pc. Karena definisi ini jaraknya ditentukan tetap, magnitudo mutlak merupakan pengukur terang sebenarnya atau luminositas bintang itu.

Misalkan suatu bintang jaraknya  $d$  parsec, magnitudonya  $m$  dan magnitudo mutlaknya  $M$ . Dari rumus Pogson,

$$m - M = -2,5 \log E/E_0 \quad (2.12)$$

$E_1$  menyatakan fluks energi bintang diamati dari bumi.  $E_2$  menyatakan fluks energi bintang bila diamati dari jarak 10 pc. Dari Pers. (2.11)

$$E_1/E_2 = (10/d)^2 \quad (2.13)$$

Jadi,

$$m - M = -5 + 5 \log d \quad (2.14)$$

Ingat  $d$  jarak bintang dalam parsec.

Dengan rumus Pogson, kita dapat pula membuktikan, bila bintang 1 magnitudo mutlaknya  $M_1$  dan luminositasnya  $L_1$ , dan bintang 2 magnitudo mutlaknya  $M_2$ , maka,

$$M_2 - M_1 = -2,5 \log L_2 / L_1 \quad (2.15)$$

Dengan Pers. (2.14) kita dapat menentukan magnitudo mutlak suatu bintang bila jaraknya di ketahui. Sebagai contoh magnitudo semu matahari  $m_s = -26,8$  dan jaraknya  $d_s = (1/206265)$  pc (lihat Pers. 1.13), dari Pers. (2.14) dapat dihitung magnitudo mutlak matahari  $M_s = 4,8$ .

Kita dapat pula menentukan magnitudo mutlak bintang Sirius. Jarak bintang ini 2,7 pc (atau 8,8 tahun cahaya) dan magnitudonya  $-1,44$ , maka magnitudo mutlaknya 1,4.

Bila dilihat dari bumi, matahari 13 milyar kali lebih terang dari pada Sirius. Tetapi sebenarnya luminositas Sirius 23 kali lebih besar dari pada matahari. Dengan kata lain, bila Sirius jaraknya didekatkan hingga sedekat matahari, kita akan melihatnya 23 kali lebih terang dari matahari.

## 2.4 Warna Bintang

Kita lihat warna bintang berbeda-beda. Matahari berwarna putih kekuning-kuningan, Sirius warna biru, Betelgeuse berwarna merah. Perbedaan warna ini menunjukkan perbedaan suhu bintang.

Teori radiasi atau pancaran energi mulai dikembangkan para ahli fisika pada akhir abad ke 19 dengan mempelajari sifat radiasi pemancar sempurna atau radiasi benda hitam. Yang dimaksud dengan benda hitam adalah benda yang mampu menyerap semua energi yang jatuh padanya. Suhu benda tersebut akan naik hingga mencapai suhu keseimbangan pada mana benda memancarkan energi dengan laju yang sama dengan laju energi yang di serapnya.

Bila radiasi dilewatkan pada suatu gelas prisma, radiasi akan terurai. Cahaya yang panjang gelombangnya pendek, akan disimpangkan / dideviasikan lebih besar dari pada yang panjang gelombang panjang. Jadi cahaya ungu mengalami penyimpangan lebih besar dari cahaya merah.

Ternyata radiasi tidak didistribusikan secara merata pada seluruh panjang gelombang. Energi radiasi sebagai fungsi panjang gelombang berbeda - beda bergantung pada suhu benda. Pada suhu yang rendah, energi paling besar dipancarkan pada panjang gelombang yang panjang. Karena itu benda berwarna kemerah-merahan. Sedang pada suhu yang tinggi, sebagian besar energi dipancarkan pada daerah panjang gelombang pendek hingga warna benda terlihat lebih biru.

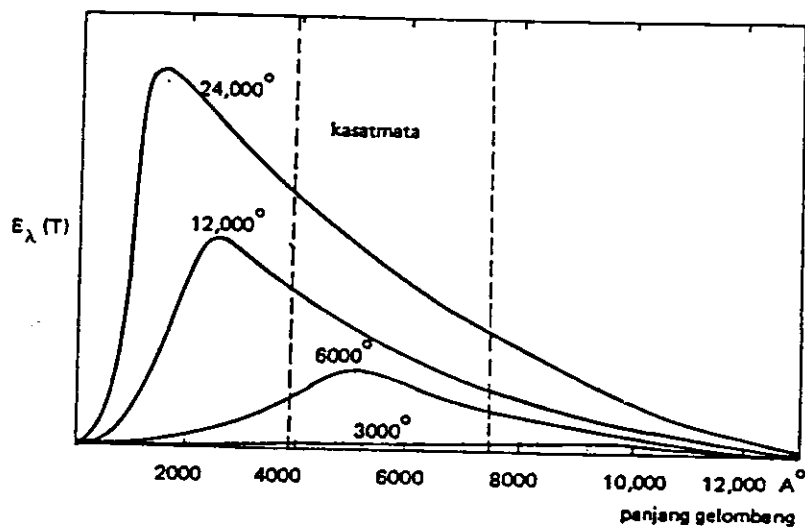
Pada awal abad ini Max Planck menerangkan gejala itu dengan teorinya yang mengatakan bahwa radiasi merupakan pancaran paket-paket energi yang disebut *photon*. Energi setiap photon adalah  $hc/\lambda$ , di mana  $\lambda$  panjang gelombang.  $h$  tetap

Planck ( $h = 6.6252 \times 10^{-34}$  Js) dan  $c$  kecepatan cahaya. Berdasarkan teorinya Planck menurunkan bahwa energi yang dipancarkan suatu benda hitam per  $m^2$  per detik dengan panjang gelombang antara  $\lambda$  dan  $\lambda + d\lambda$  adalah

$$E(\lambda, T) d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda \quad (2.16)$$

$k$  adalah tetapan Boltzmann ( $k = 1.38 \times 10^{-23}$  Jk<sup>-1</sup>),  $T$  suhu dinyatakan dalam derajat Kelvin. Pers. (2.16) disebut rumus Planck.

Gambar 2.3 menunjukkan energi yang dipancarkan benda hitam sebagai fungsi  $\lambda$  pada berbagai suhu. Perhatikan lebih tinggi suhu benda hitam, bagian terbesar energinya dipancarkan pada panjang gelombang yang lebih pendek.



Gambar 2.3 Intensitas spesifik benda hitam sebagai fungsi panjang gelombang (Winardi Sutanyo, 1983;55)

Walau bintang bukan pemancar sempurna atau benda hitam, pancaran energinya dengan baik dapat dijelaskan dengan teori radiasi benda hitam. Jadi dapat diperoleh kesimpulan bahwa bintang yang berwarna biru bersuhu tinggi sedang berwarna merah bersuhu rendah. Sebagai contoh suhu permukaan bintang biru Sirius



$10.000^{\circ}\text{K}$  sedang bintang merah Betelgeuse  $2.000^{\circ}\text{K}$  ( $\text{K}$  adalah derajat Kelvin,  $0^{\circ}\text{C} = 273^{\circ}\text{K}$ ).

## 2.5 Indeks Bintang

Kita tinjau dua buah bintang yaitu A dan B. Bintang A warnanya biru dan B berwarna kuning. Berdasarkan teori radiasi Planck, bintang A lebih panas daripada bintang B.

Pada mulanya magnitudo bintang ditentukan hanya dengan mata. Kita tahu mata terutama peka untuk cahaya kuning-hijau di daerah  $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ . Karena itu magnitudo bintang yang diukur dalam daerah panjang gelombang itu disebut *magnitudo visual* atau disingkat  $m_{\text{vis}}$ . Dengan perkembangan fotografi, magnitudo bintang kemudian ditentukan secara fotografis. Pada awal fotografi, emulsi film mempunyai kepekaan di daerah biru ungu disekitar  $\lambda = 4500 \text{ \AA}$ . Dalam daerah ini magnitudo disebut *magnitudo fotografis*, disingkat  $m_{\text{fot}}$ .

Kembali pada bintang A dan B. Jelas bintang A lebih terang pada pengamatan visual dibanding bila diamati secara fotografis, jadi  $m_{\text{vis}} < m_{\text{fot}}$  (ingat makin *terang* suatu bintang, makin *kecil* magnitudonya). Sebaliknya untuk bintang B,  $m_{\text{vis}} > m_{\text{fot}}$ .

Beda kedua magnitudo, yaitu  $(m_{\text{fot}} - m_{\text{vis}})$  disebut *indeks warna*. Bila tinggi air raksa dalam termometer dapat dipergunakan sebagai petunjuk suhu ruangan, indeks warna merupakan petunjuk suhu permukaan bintang. Suhu yang ditentukan dengan cara ini disebut *suhu warna*.

Pada pemotretan bintang sering digunakan pelat fotografis yaitu pelat kaca yang dilapisi emulsi fotografis. Pada mulanya pelat fotografis hanya peka untuk cahaya biru-ungu. Tetapi kemudian orang dapat membuat pelat yang peka untuk daerah panjang gelombang lain seperti daerah kuning, merah bahkan infra merah.

Pada tahun 1950, H.L. Johnson mengajukan suatu sistem magnitudo yang disebut sistem U.B.V. dinamakan U magnitudo semu pada daerah ultraviolet (di sekitar  $\lambda = 3700 \text{ \AA}$ ) B magnitudo pada daerah biru (sekitar  $\lambda = 4450 \text{ \AA}$ ), dan V magnitudo pada warna kuning (sekitar  $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ ). Selisih magnitudo U-B dan B-V merupakan indeks warna yang banyak digunakan. Dalam sistem ini magnitudo mutlak di tuliskan  $M_U$ ,  $M_B$  dan  $M_V$ .

## 2.6 Suhu Efektif

Dengan Pers. (2.16) kita dapat menghitung energi total yang dipancarkan oleh  $1 \text{ m}^2$  permukaan benda hitam perdetik, yaitu dengan mengintegrasikan untuk seluruh panjang gelombang.

$$S = \int_0^\infty E(\lambda, T) d\lambda \quad (2.17)$$

Hasil integral adalah

$$S = e T^4 \quad (2.18)$$

Dalam rumus ini,

$$\begin{aligned} e &= 2 \pi^4 k^4 / 15 c^2 h^3 \\ e &= 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{K}^{-4} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Pers. (2.18) disebut hukum Stefan-Boltzmann.

Bila kita mengandaikan bintang adalah sebuah benda hitam dengan radius R dan suhu permukannya T, maka luminositas bintang adalah :

$$\begin{aligned} L &= 4 \pi R^2 S \\ &= 4 \pi R^2 e T^4, \end{aligned} \quad (2.20)$$

Jadi suhu bintang dapat ditentukan bila luminositas dan radiusnya diketahui. Suhu yang ditentukan dengan cara ini disebut *suhu efektif* ( $T_e$ ). Karena bintang

sebenarnya bukan merupakan benda hitam sempurna. suhu warna dan suhu efektif umumnya tidak sama, tetapi perbedaannya tidak besar.

Pada bab 2.2 telah kita bicarakan bahwa luminositas matahari  $L_s = 3,9 \times 10^{26}$  W dan radius matahari  $R_s = 6,96 \times 10^8$  m. Dengan Pers. (2.20) dapat kita hitung suhu efektif matahari,

$$T_{e\odot} = 5800^{\circ}_2 \text{ K} \quad (2.21)$$

Pada suhu setinggi ini tak ada zat dalam keadaan padat atau cair. Matahari seluruhnya terdiri atas gas. Suhu di dalam matahari lebih tinggi lagi, suhu di pusat matahari sekitar 10 juta derajat.

## BAB III

### SPEKTRUM BINTANG

Karena letak bintang-bintang sangat jauh, cahaya bintang umumnya sangat lemah seriba di Bumi. Namun cahaya yang lembut dan bisu itu sebenarnya membawa banyak informasi tentang jagat raya dan isinya. Dituntut kemampuan manusia, seberapa jauh ia dapat menggali informasi itu.

#### *3.1 Spektrum cahaya bintang*

Pada sekitar tahun 1665, Newton menunjukkan bahwa cahaya putih sebenarnya merupakan campuran berbagai warna. Dengan melewatkan cahaya putih melalui cahaya prisma, warna putih itu akan terurai menjadi cahaya warna merah, oranye, kuning, hijau, biru dan violet. Uraian cahaya ini disebut spektrum.

Pada tahun 1802 Wollaston melihat adanya garis-garis gelap pada spektrum matahari. Fraunhofer melakukan pengamatan cermat pada garis itu dan berhasil mengkataloguskan 600 garis pada tahun 1815. Delapan tahun kemudian Fraunhofer melihat bahwa spektrum bintang juga mengandung garis-garis gelap serupa yang terdapat pada matahari. Hal ini menyokong pendapat bahwa matahari adalah sebuah bintang.

Selanjutnya orang mendapatkan bahwa garis-garis semacam itu dapat di buat di laboratorium. Pada tahun 1859 Kirchoff mengemukakan tiga hukum yang merupakan dasar spektroskopi (ilmu yang menelaah spektrum cahaya).

1. Bila suatu gas yang mampat dipajarkan maka garis itu memancarkan spektrum kontinu , artinya radiasi pada semua panjang gelombang dipancarkan.

2. Bila suatu gas yang merenggang dipijarkan maka hanya warna-warna tertentu, atau panjang gelombang tertentu saja yang dipancarkan. Misalkan dalam cahaya yang tampak mata, gas hidrogen memancarkan radiasi hanya pada panjang gelombang :

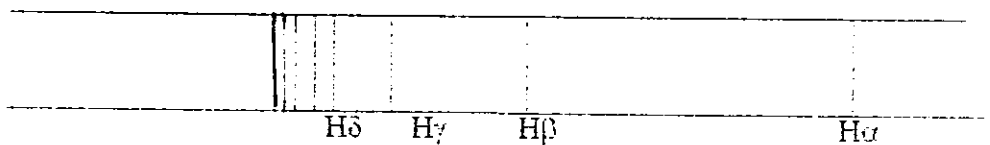
$$\lambda = 6562 \text{ \AA} \quad \text{disebut H } \alpha$$

$$\lambda = 4861 \text{ \AA} \quad \text{disebut H } \beta$$

$$\lambda = 4340 \text{ \AA} \quad \text{disebut H } \gamma$$

$$\lambda = 4101 \text{ \AA} \quad \text{disebut H } \delta$$

dan banyak lagi yang lainnya ( $1\text{\AA} = 1 \text{ Angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$ ). Spektrum itu dipancarkan sebagai garis-garis terang sebagaimana digambarkan pada gambar 3.1. Spektrum semacam ini disebut *spektrum emisi* atau spektrum *pancaran*. Letak garis-garis itu merupakan ciri khas gas yang memancarkannya. Unsur yang berbeda memancarkan kumpulan garis yang berbeda pula. Karena itu dengan hanya mengetahui panjang gelombang suatu set spektrum garis, orang dapat menebak gas apa yang memancarkannya.



Gambar. 3.1. Deret Balmer pada Spektrum Hidrogen  
(Winardi Sutantyo, 1983,75)

3. Bila seberkas cahaya putih dengan spektrum kontinu dilewatkan melalui gas yang dingin dan renggang (bertekanan rendah), gas tersebut akan menyerap cahaya tadi pada warna-warna, atau panjang gelombang tertentu. Akibatnya akan diperoleh spektrum diskontinu, yang berasal dari cahaya putih yang

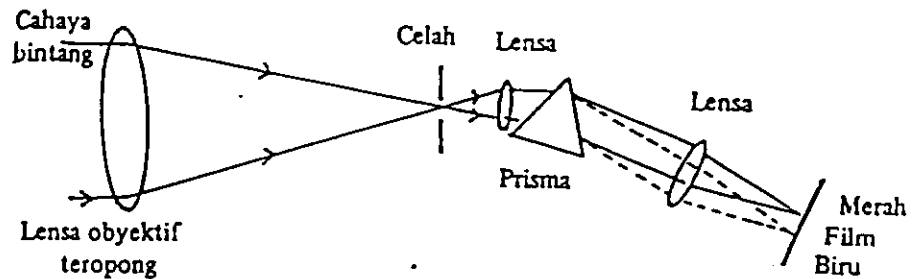
lewat itu, diseling-seling garis-garis gelap yang disebut *garis serapan* atau *garis absorpsi*. Panjang gelombang garis serapan itu sama dengan panjang gelombang garis pancaran andaikan gas tersebut dipijarkan.

Hukum Kirchhoff ini dapat menjelaskan spektrum bintang. Cahaya bintang berlatar belakang spektrum kontinu. Bagian bintang yang memancarkan spektrum kontinu disebut *fotosfir*. Fotosfir diselubungi oleh lapisan gas yang lebih dingin dan renggang yang merupakan atmosfer bintang. Lapisan gas ini, berdasarkan hukum Kirchhoff ketiga, menyerap radiasi dari fotosfir pada panjang gelombang tertentu dan membentuk garis-garis gelap atau garis absorpsi. Hal ini menerangkan terlihatnya garis-garis absorpsi pada spektrum matahari dan bintang lainnya. Dengan mempelajari garis-garis ini dapat diketahui unsur-unsur apa saja yang terdapat pada atmosfer bintang. Selain itu juga dapat diketahui keadaan fisis atmosfer itu, seperti suhunya, tekanannya dan banyak informasi lainnya.

Orang yang pertama kali mengenali beberapa garis pada spektrum bintang sebagai garis yang berasal dari unsur kimia yang diketahui di bumi adalah Sir William Huggins pada tahun 1864.

### 3.2. *Klasifikasi Spektrum Bintang*

Ada beberapa cara untuk mendapatkan spektrum bintang. Cara yang banyak dipakai sekarang adalah dengan spektrum celah yang prinsipnya digambarkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2. Prinsip kerja spektrograf celah

Bila spektrum berbagai bintang diamati, terlihat pola garis spektrumnya berbeda-beda. Bila seseorang menjumpai sesuatu yang beraneka ragam, cara terbaik untuk memahaminya adalah membuat klasifikasi. Pada tahun 1863 Angelo Secchi mengelompokkan spektrum bintang dalam 4 golongan dengan meninjau kemiripan susunan garis spektrumnya. Pemakaian fotografi dalam astronomi membuka kesempatan lebih luas untuk mempelajari spektrum bintang.

Dalam astronomi modern, spektrum bintang dibagi dalam kelas-kelas yang dinyatakan dengan huruf O, B, A, F, G, K, M. Untuk mengingat urutan kelas spektrum ini digunakan kalimat: "oh, be a fine girl kiss me" (Soendjojo, D, 1986; 21). Bintang kelas O, B dan A biasanya disebut bintang kelas awal, sedangkan bintang kelas K dan M disebut bintang kelas lanjut. Menurut Winardi Sutantyo (1986:88):

*"Ciri utama spektrum bintang pada setiap kelas dapat kita baca pada tabel di bawah ini, demikian juga temperatur permukaan dan warnanya.*

*Kelas O: Garis ion helium, garis oksigen, nitrogen, karbon, silikon dan lain-lain yang terionisasi beberapa kali terlihat. Garis hidrogen lemah. Temperatur >25000K. Warna biru.*

- Kelas B: Garis helium netral terlihat, garis hidrogen lebih jelas daripada kelas O. Juga terlihat garis karbon dan oksigen. Temperatur antara 25000-10000K. Warna biru.*
- Kelas A: Garis hidrogen yang terlihat pada kelas ini. Garis ion Mg, Si, Fe, Ca dan lain-lain terlihat. Garis logam netral terlihat lemah. Temperatur antara 10000-7500K. Warna biru.*
- Kelas F: Garis hidrogen lebih lemah dari kelas A tetapi masih jelas. Garis ion Ca, Fe, Cr masih terlihat. Garis logam netral terlihat. Temperatur antara 7500-6000K. Warna biru keputih-putihan.*
- Kelas G: Garis H lemah dari kelas F. Garis ion logam dan logam netral terlihat. Temperatur antara 6000-5000K. Warna putih kekuning-kuningan.*
- Kelas K: Garis logam netral jelas. Garis H lemah sekali. Pita molekul TiO terlihat. Temperatur antara 5000-3500K. Warna jingga kemerah-merahan.*
- Kelas M: Garis logam netral kuat. Pita molekul TiO jelas. Temperatur <3500 K. Warna merah”.*

Diantara kelas-kelas itu masih ada pembagian dalam sub-kelas. Misalkan antara kelas B dan A ada pembagian sub-kelas B0,B1,B2,B3,..... B9, A0.

Pada mulanya perbedaan pola spektrum ini diduga karena perbedaan susunan kimia atmosfer bintang. Tetapi kemudian diketahui bahwa penyebab utama adalah perbedaan suhu bintang. Sebagai contoh, unsur yang terbanyak terkandung di dalam bintang adalah hidrogen. Tetapi pada suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah, garis yang ditimbulkan hidrogen tampak lemah. Pada suhu 10.000<sup>3</sup> K, garis hidrogen tampak paling jelas.

Bintang kelas O, B dan A disebut bintang panas sedang bintang kelas F dan M disebut bintang dingin. Matahari tergolong bintang kelas G2.

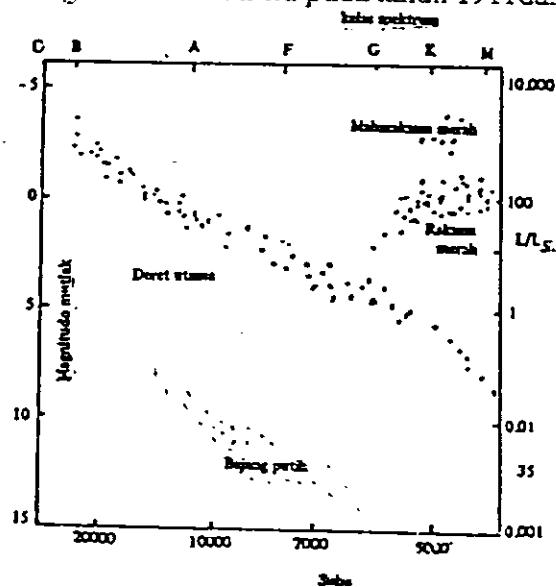
### 3.3. Diagram Herzprung Russell

Bintang-bintang yang bertaburan dilangit kelihatannya kecil saja. “Bintang kecil di langit yang tinggi”, demikian sebuah bait nyanyian anak-anak yang terkenal. Benarkah bintang-bintang itu kecil? Telah kita ketahui, bintang yang terdekat



dengan kita, yaitu matahari, ternyata jauh lebih besar dari bumi. Radius matahari 109 kali radius bumi. Bagaimakah besar matahari dibandingkan dengan bintang lainnya ?

Telah kita bicarakan bahwa sebuah bintang dapat kita tentukan jaraknya, kita dapat mengetahui magnitudo mutlak atau terang sesungguhnya bintang itu. Kita dapat pula menentukan kelas spektrum bintang itu. Hal ini dapat kita lakukan untuk banyak bintang. Selanjutnya kita dapat membuat grafik yang menyatakan hubungan antara magnitudo mutlak dan kelas spektrum. Diagram semacam ini disebut diagram *Hertzsprung Russell* (disingkat diagram HR), sesuai dengan nama dua astronom yang pertama kali membuat diagram semacam itu pada tahun 1911 dan 1913.



Gambar 3.3 Diagram Hertzsprung- Russell Bintang (Winardi Sutanyo, 1986;110)

Gambar 3.3 menunjukkan diagram HR bintang-bintang. Absis diagram menyatakan kelas spektrum, mulai kelas O,B, .....hingga kelas M. Telah kita bicarakan, kelas spektrum menyatakan suhu bintang, kelas O bintang yang panas, kelas M bintang yang dingin. Jadi kita dapat membuat dua skala untuk absis, yaitu skala kelas spektrum (atas) dan skala suhu (bawah). Perhatikan, suhu menurun ke arah kanan.

Ordinat mengatakan magnitudo mutlak bintang. Makin ke atas harganya makin kecil, berarti makin ke atas makin kuat terang sesungguhnya bintang itu. Juga untuk ordinat kita dapat membuat dua skala, yaitu skala magnitudo mutlak (kiri) dan skala luminositas dinyatakan dalam  $L_{\odot}$  (kanan). Perhatikan, bintang yang magnitudo mutlaknya  $-5$ , luminositasnya 10000 kali luminositas matahari. Hubungan antara magnitudo mutlak dan luminositas diberikan oleh Pers (2.15). Bintang yang berluminositas besar disebut *bintang raksasa* sedang yang berluminositas kecil disebut *bintang bajang (katai)*

Kita lihat dalam diagram HR, bintang-bintang menepati lajur-lajur tertentu. Yang terbanyak terletak dalam lajur yang membentang dari kiri atas ke kanan bawah. Lajur ini di sebut *deret utama*. Bintang -bintang mengikuti suatu hukum : makin tinggi suhu suatu bintang, makin besar energi yang dipancarkannya.

Namun ada perkecualian, ada lajur yang disebut raksasa merah (disebut raksasa karena sangat terang, dan merah karena suhunya rendah). Bintang-bintang dalam lajur ini sangat terang, umumnya 100 kali lebih terang dari matahari, namun suhunya rendah, kurang dari  $5000^{\circ}\text{K}$  (suhu matahari  $5800^{\circ}\text{K}$ ). Bagaimana hal ini mungkin?

Coba perhatikan kembali Pers. (2.20), yaitu.

$$L = 4\pi R^2 \epsilon T_e^4 \quad (3.1)$$

Dari rumus di atas kita lihat, sebuah bintang dapat mempunyai  $L$  yang besar, namun  $T_e$  yang rendah, bila  $R$  besar. Dari pers (3.1), diperoleh :

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left[ \frac{R}{R_{\odot}} \right]^2 \left[ \frac{T_e}{T_{e_{\odot}}} \right]^4 \quad (3.2)$$

Jadi sebuah bintang yang  $L = 100 L_{\odot}$  dan  $T_e = 200 \text{ K}$  mempunyai radius  $R = 84 R_{\odot}$ .

Bintang yang paling terang di rasi Scorpio adalah bintang Antares. Bintang ini berwarna merah, kelas spektrumnya M1, suhunya  $2.800^{\circ}\text{K}$ . Magnitudo mutlak Antares 4,7. Dari pers (2.15) dapat kita hitung luminositas Antares, yaitu  $L = 6300 L_{\odot}$ . Selanjutnya dapat kita hitung dari pers (3.2) bahwa radius Antares 364 kali radius Matahari. Andaikan matahari sebesar ini, planet Merkurius, Venus, Bumi dan Mars akan "tertelan" oleh matahari.

Bintang merah Betelgeuse di rasi Orion lebih besar lagi. Bintang ini berdenyut-denyut, radiusnya berubah-ubah antara tujuh ratus hingga seribu kali radius matahari. Dapat pembaca bayangkan sendiri besar bintang ini dibanding dengan bumi.

Bintang-bintang seperti Antares dan Betelgeuse ini disebut bintang *maharaksasa merah*.

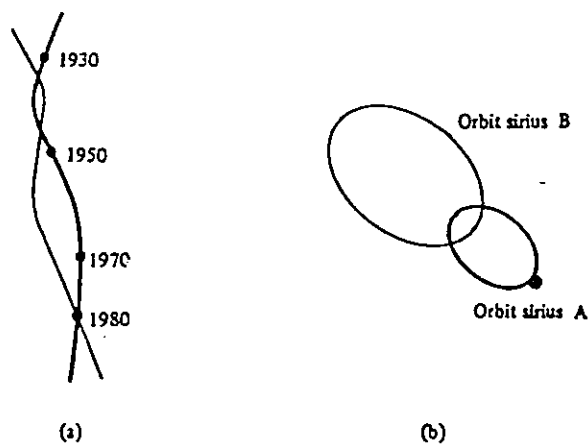
Ada bintang-bintang yang sifatnya berlawanan dengan bintang raksasa dan maharaksasa merah. Bintang 40 Eridani B misalnya. Bintang ini sangat lemah, luminositasnya hanya  $1/300$  luminositas matahari. Namun dari spektrumnya terlihat bahwa bintang ini sangat panas, spektrumnya kelas A0, suhunya  $10.000^{\circ}\text{K}$ . Bila kita gunakan pers.(3.2) dapat kita hitung bahwa bintang ini ternyata kecil, radiusnya hanya  $1/50$  radius matahari. Jadi bintang ini hanya dua kali lebih besar dari bumi. Ditinjau dari besarnya bintang ini lebih menyerupai planet dari pada bintang. Dalam diagram HR, bintang ini menempati bagian kiri bawah. Bintang semacam ini disebut bintang bajang putih. Ketika Russell pada tahun 1913 melihat letak 40 Eridani B dalam diagramnya, ia ragu-ragu. Russell membuat catatan bahwa spektrum bintang ini tidak jelas dan meragukan. Namun kemudian terbukti bahwa Russell benar, bintang bajang putih memang ada dalam alam raya ini. Bahkan kemudian orang

menemukan keanehan dari bintang-bintang ini yang sebelumnya tak pernah terbayangkan.

Bintang Sirius adalah bintang yang tampak paling terang di langit. Warnanya kebiru-biruan, kelas spektrumnya A1, jadi Sirius tergolong bintang yang panas. Dengan cara peralaks trigonometri dapat ditentukan jaraknya yaitu 2,7 pc (atau 8,8 tahun cahaya). Sirius termasuk salah satu bintang yang terdekat dengan kita.

Karena letaknya yang tak begitu jauh, orang dapat mengamati gerak bintang Sirius, walaupun untuk ini diperlakukan alat-alat yang teliti. Ternyata Sirius bergerak menempuh sudut lebih dari 1"pertahun.

Pada tahun 1834, F. W. Bessel di observatorium Konigsberg, Prusia, mengamati gerak Sirius, Bessel melihat keanehan, Sirius tidak bergerak lurus melainkan berkelok-kelok. Sebagai contoh garis tebal Gambar 3.4 (a) melukiskan gerak Sirius antara tahun 1930 dan 1980.



Gambar 3.4 (a) gerak pasangan bintang Sirius A dan B  
(b) orbit pasangan bintang Sirius A dan B

Bessel berkesimpulan, Sirius bukanlah bintang tunggal melainkan pasangan bintang ganda. Dalam sistem bintang ganda terdapat dua bintang yang bergerak

saling mengelilingi dalam orbit. Tepatnya, kedua bintang bergerak dalam orbit mengelilingi titik pusat gravitasinya atau titik pusat massanya. Gerak untuk kedua bintang Sirius itu dilukiskan dalam Gambar 3.4(b).

Sebagaimana lazimnya pada pasangan bintang ganda, bintang Sirius yang terang disebut Sirius A dan pasangan yang gelap disebut Sirius B. Dalam Gambar 3.4 (a), garis tebal menggambarkan gerak Sirius A dan garis tipis menunjukkan gerak Sirius B. Pembaca dapat membayangkan kedua bintang ini bagaikan pasangan yang asyik berdansa. Mereka berputar-putar, sekali putar dalam 50 tahun. Titik pusat gravitasi kedua bintang bergerak lurus. Gabungan gerak berputar dan gerak lurus ini menyebabkan kedua bintang tampak bergerak berkelok-kelok.

Pada tahun 1863, seorang ahli membuat teropong di Amerika bernama Alvan Clark ketika sedang mencoba teropongnya yang baru, berhasil melihat Sirius B untuk pertama kali. Sedemikian lemah cahaya Sirius B ini hingga hampir "tenggelam" dalam cahaya Sirius A yang terang benderang.

Dengan mengamati gerak orbit Sirius A dan Sirius B, orang dapat menentukan massa kedua bintang. Diperoleh massa Sirius A  $2,28 M_{\odot}$ , sedang massa Sirius B  $0,98 M_{\odot}$ .

Pada tahun 1914, W.S. Adams dari observatorium Mount Wilson di Amerika berhasil memperoleh spektrum Sirius B. Ternyata Sirius B bintang yang panas, spektrumnya kelas A5 atau suhu permukanya  $8700^{\circ} \text{K}$ , lebih panas dari matahari.

Tetapi cahaya bintang ini sedemikian lemah, luminositasnya  $1/580$  luminositas matahari. Dari Pers. (3.2) dapat dihitung bahwa radiusnya  $R=(1/55)R_{\odot}$ . Jadi Sirius B sebuah bintang bajang putih.

Tetapi kita ketahui massa bintang ini hampir sama dengan massa matahari, maka dapat kita hitung rapat massa rata-ratanya yaitu,

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \\ = 2.3 \times 10^5 \text{ kg m}^{-3} \quad (3.3)$$

Berarti rapat massanya hampir 250 kg per cm<sup>3</sup>! Sekotak korek api matahari bintang ini beratnya 5 ton.

Hasil ini sangat mengejutkan para astronom. Reaksi pada waktu itu: "Tutup mulut, jangan bicara yang bukan-bukan". Tetapi makin banyak bintang bajang putih ditemukan orang dan semuanya menunjukkan bahwa mereka bintang-bintang kecil yang sangat mampat.

Cara lain untuk mentest kemampuan bintang bajang putih adalah dengan teori gravitasi Einstein. Karena massanya yang besar dan radiusnya yang kecil, medan gravitasi di permukaan bintang ini sangat besar. Seorang yang beratnya di bumi 50 kg, andaikan berada di sana akan mempunyai berat 4 ton. Berdasarkan teori Einstein, radiasi yang dipancarkan di permukaan bintang bajang putih akan bergeser panjang gelombangnya kearah merah sebesar

$$\Delta\lambda = (GM/c^2R) \quad (3.4)$$

c kecepatan cahaya, G tetapan gravitasi. Peristiwa ini disebut pergeseran merah gravitasi.

Pada tahun 1954, D.M. Popper berhasil menentukan pergeseran merah gravitasi bintang bajang putih 40 Eridani B. Dalam batas kesalahan pengukuran, hasil yang diperoleh Popper sesuai dengan yang diharapkan dari Pers. (3.4)

## BAB IV

### ENERGI BINTANG

Dalam sebuah dongeng Yunani diceritakan bahwa Prometheus mencuri api dari matahari dan memberikannya pada manusia karena ia merasa kasihan atas kesengsaraan manusia di bumi. Akibatnya ia dihukum oleh dewa Zeus.

Barangkali Promentheus tak perlu mencuri api dari matahari kalau ia tahu bahwa matahari sebenarnya mengirim api atau energi itu secara berlimpah-limpah langsung ke bumi selama bermilyar tahun. Tabungan energi matahari ini antara lain kita jumpai dalam bentuk minyak, batubara, kayu, juga dalam bentuk makanan. Dari manah asal tenaga matahari.

#### *4.1 Bahan Bakar Bintang*

Berbeda dengan planet dan bulan yang dapat kita lihat karena memantulkan cahaya matahari, bintang-bintang termasuk matahari memancarkan cahaya sendiri. Telah kita bicarakan, energi yang dipancarkan matahari sangat besar menurut ukuran manusia. Luminositas matahari  $3.9 \times 10^{26}$  W. Energi yang dipancarkan matahari dalam sedetik sama dengan energi yang dibangkitkan oleh semua pembangkit energi buatan manusia selama beberapa juta tahun. Beberapa bintang bahkan memancarkan energi jauh lebih dahsyat dari matahari. Sebagai contoh, bintang Betelgeuse berluminositas lebih dari 10.000 kali matahari. Tak ada bahan bakar kimia yang dikenal di bumi, minyak misalnya, yang dapat menjelaskan pembangkitan energi yang sedemikian besar itu.

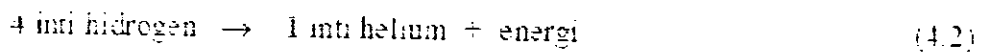
Sudah berapa lamakah matahari bersinar? Para ahli geologi menemukan adanya fosil-fosil sisa kehidupan yang berasal dari zaman 3,4 milyar tahun yang lalu. Jadi pada masa itu sudah ada kehidupan di bumi, walaupun bentuknya masih

sederhana yaitu berupa ganggang (algae). Ini merupakan bukti bahwa 3.4 milyar tahun yang lalu matahari telah ada dan menyinari bumi dengan keadaan yang tak berbeda jauh dengan keadaannya sekarang. Bila tidak, tak mungkin kehidupan dapat berlangsung di bumi. Jadi kita dapat berkesimpulan, sedikitnya umur matahari sudah 3.4 milyar tahun. Jika selama itu luminositas matahari sama dengan sekarang maka energi yang dipancarkan matahari adalah  $3.4 \times 10^{26} \text{ W}$ .

Menurut teori relativitas umum, gagasan bahwa pertambahan energi dalam bintang berasal dari pengubahan massa menjadi energi berdasarkan rumus Einstein

$$E = mc^2 \quad (4.1)$$

Pada tahun 1927 Eddington mengemukakan, energi akan dibebaskan bila mana 4 inti hidrogen bereaksi menjadi 1 inti helium dengan reaksi sebagai berikut :



Dengan mengambil sebagai standar massa atom  $0 = 16$  maka, massa 4 inti hidrogen =  $4 \times 1.00813 = 4.03252$ , massa 1 inti helium =  $4.00386$ .

Kita peroleh adanya massa yang hilang sebesar  $0.02866$ . Massa yang hilang inilah yang berubah menjadi energi.

Karena  $1.00813$  satuan massa ekuivalen dengan  $1.672 \times 10^{-27} \text{ kg}$ , maka massa yang hilang dalam reaksi diatas adalah  $4.7535 \times 10^{-29} \text{ kg}$ . Dengan rumus Einstein, yaitu Pers. (4.1), dapat kita hitung energi yang dibebaskan oleh setiap reaksi adalah  $4.27 \times 10^{-12} \text{ J}$ .

Luminositas matahari  $3.9 \times 10^{26} \text{ W}$ . Dapat hitung dengan rumus Einstein bahwa **Jumlah** massa matahari yang lenyap dan diubah menjadi energi adalah  $4.3 \times 10^9 \text{ kg s}^{-1}$  atau *4 juta ton per detik* ! Berapakah massa yang hilang per tahun dan berapa massa yang hilang selama umur matahari yang ditaksir telah 5 milyar tahun itu



Bilangan yang diperoleh tentu tak terbayangkan besarnya, tetapi bagi matahari ternyata hanya kecil saja. Selama 5 milyar tahun matahari telah kehilangan massa sebanyak  $6.5 \times 10^{22}$  kg untuk diubah menjadi energi. Hanya 0.03% dari massanya sekarang !

Hidrogen adalah unsur yang paling sederhana dalam alam karena hanya terdiri atas 1 inti yang disebut proton dan 1 elektron. Karena itu hidrogen merupakan unsur yang terbanyak dalam alam. Materi di dalam bintang umumnya sebagian besar terdiri atas hidrogen. Dan hidrogenlah yang merupakan "bahan bakar" utama di dalam bintang. Sungguh bahan bakar yang melimpah.

Reaksi inti yang mengubah hidrogen menjadi helium berlangsung dibagian bintang yang suhunya paling tinggi, pada awalnya terjadi di pusat bintang. Tentu saja lambat laun hidrogen di pusat bintang makin berkurang dan heliumnya makin bertambah. Pada suatu saat inti-inti helium yang terkumpul di pusat bintang akan bereaksi membentuk karbon. Akibat reaksi ini helium makin berkurang dan karbon bertambah. Pada saat ini, inti karbon akan bereaksi membentuk inti-inti yang lebih berat seperti oksigen dan neon. Demikian seterusnya, hingga akhirnya terbentuk inti-inti berat seperti besi dan nikel. Tentu saja pada suhu yang amat tinggi itu semua unsur berupa gas. Jadi dapat kita bayangkan pusat bintang merupakan "dapur yang memasak unsur ringan menjadi unsur berat ". Nanti akan kita bicarakan banyak bintang yang meledak hancur lebur pada akhir riwayatnya. Unsur berat yang dibentuk dalam bintang akan dicerai-beraikan dalam ruang alam semesta ini. Jagat raya ini makin dikotori oleh unsur-unsur berat akibat ledakan dan lontaran materi dari bintang. Bukan mustahil kalau unsur kimia yang membentuk tubuh kita ini, misalnya karbon, dulu "dimasak" di pusat suatu bintang.

## 4.2. Reaksi Nuklir Di Dalam Bintang

Inti suatu atom terdiri atas proton dan neutron yang disebut nukleon. Proton bermuatan listrik positif dan neutron tidak bermuatan. Misalkan jumlah proton di dalam inti adalah  $Z$  dan jumlah neutron  $N$ . Dengan kata lain jumlah nukleon dalam inti adalah  $A = Z + N$ . Bilangan  $Z$  disebut nomor atom unsur itu sedangkan  $A$  disebut nomor massa. Misalkan unsur itu kita sebut  $X$ . Dalam fisika inti unsur ini sering dituliskan.

$${}_Z X^A \quad (4.3)$$

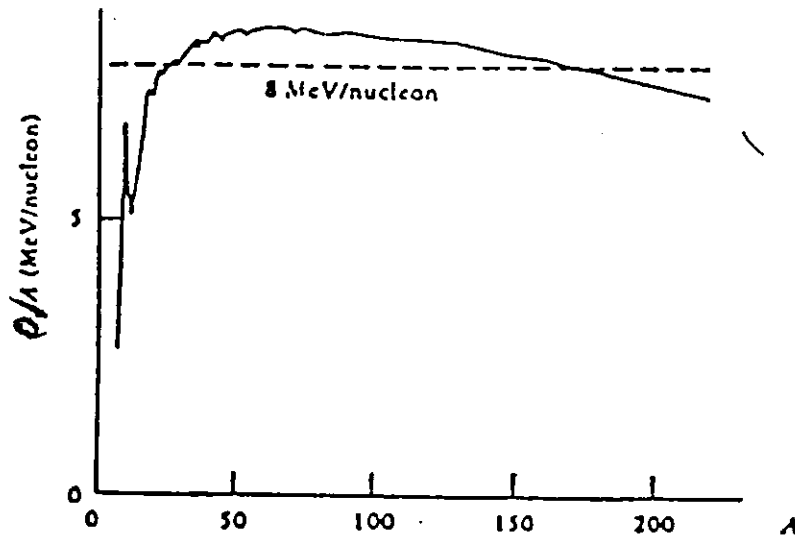
Contohnya  ${}_1\text{H}^1$  adalah hidrogen,  ${}_2\text{He}^4$  adalah helium,  ${}_6\text{C}^{12}$  karbon dan  ${}_8\text{O}^{16}$  oksigen.

Massa suatu inti ternyata lebih kecil dari massa nukleon yang membentuknya. Massa yang hilang ini ternyata merupakan energi yang mengikat nukleon di dalam inti. Bila beda massa  $m$ , energi ikat nukleon diberikan oleh rumus Einstein  $E = mc^2$ . Jadi suatu inti yang terdiri atas  $Z$  proton dan  $N$  neutron mempunyai energi ikat sebesar,

$$Q(Z,N) = [ Zm_p + Nm_n - m(Z,N) ] c^2 \quad (4.4)$$

Di mana  $m_p$  massa proton,  $m_n$  massa neutron dan  $m(Z,N)$  massa inti.

Jumlah energi ikatan ini belum memberikan besarnya daya ikat. Misalkan kita mempunyai lem yang banyak, tetapi kalau benda yang harus kita rekatkan juga banyak belum tentu daya rekatnya cukup kuat. Jadi daya ikat suatu inti lebih ditentukan oleh harga  $Q(Z,N)/(Z+N)$  atau energi ikat per nukleon. Bila harga ini kita plot terhadap  $A = Z + N$ , kita peroleh hasil seperti pada Gambar 4.1. Harga  $Q/A$  dinyatakan dalam MeV atau milion elektron volt ( $1\text{MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$ ).



Gambar 4.1 Energi ikat permukleon  $Q/A$  Vs nomor massa  $A$  (Eusminarto, 1993; 174)

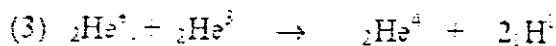
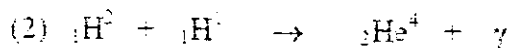
Reaksi yang terjadi bila inti ringan bergabung menjadi inti berat disebut *reaksi fusi*, sedangkan reaksi yang berlangsung karena inti berat terpecah menjadi inti ringan disebut reaksi fisi.

Kita lihat pada Gambar 4.1 harga  $Q/A$  naik dengan cepat untuk  $A$  kecil, mencapai maksimum pada  $A \approx 50 - 60$ , dan kemudian menurun. Harga  $A$  di mana  $Q/A$  mencapai maksimum berada pada inti-inti di sekitar besi dalam tabel periodik, unsur-unsur di ini disebut "kelompok besi", yang tergolong dalam kelompok ini antara lain besi, nikel, cobalt, kronium, titanium. Inti kelompok besi ini merupakan inti yang terikat kuat.

Bila inti di sebelah kiri harga maksimum mengalami reaksi fusi maka energi ikat per nukleonnya bertambah. Berarti beda massa inti dan massa nukleonnya bertambah besar. Pada reaksi ini akan dibebaskan energi.

Tetapi untuk inti di sebelah kanan maksimum halnya terbalik, reaksi fusi justru akan menyerap energi. Sedangkan reaksi fisi akan menghasilkan energi misalnya reaksi fisi yang berlangsung secara spontan pada inti uranium  ${}_{92}\text{U}^{235}$

Telah kita bicarakan bahwa pembangkitan energi di dalam bintang terutama diakibatkan oleh reaksi fusi hidrogen menjadi helium. Reaksi itu berlangsung dalam suatu rangkaian. Ada banyak rangkaian reaksi yang mengubah hidrogen menjadi helium. Untuk bintang bermassa kecil seperti matahari, reaksi yang berlangsung merupakan suatu rangkaian yang disebut reaksi *proton-proton*. Di pusat matahari reaksi proton-proton berlangsung pada suhu 20 juta derajat. Reaksi ini ditemukan oleh H.A. Bethe dan C.L. Critchfield pada tahun 1938. Rangkaian reaksi ini sbb :



( Winardi Sutantyo, 1983:162 )

Dalam reaksi ini  $e^+$  adalah positron (elektron bermuatan positif),  $\nu$  adalah neutrino (partikel yang tak bermuatan dan hampir tak bermassa),  $\gamma$  adalah radiasi elektromagnetis atau kuantum. Perhatikan bahwa reaksi (1) dan (2) hanya membentuk satu inti  ${}_2\text{He}^3$ , sedang pada reaksi (3) dua inti  ${}_2\text{He}^3$  bereaksi. Jadi reaksi (1) dan (2) harus berlangsung dua kali sebelum reaksi (3) dapat terjadi. Pembaca dapat membuktikan sendiri, pada hakekatnya rangkaian reaksi di atas adalah reaksi fusi hidrogen menjadi helium. Sebenarnya reaksi proton-proton dapat menempuh jalur yang lain melalui pembentukan inti berillium dan boron, tetapi tak akan kita bicarakan di sini.

Pada bintang bermassa besar, rangkaian reaksi yang berlangsung disebut reaksi siklus *karbon-nitrogen*. Reaksi ini ditemukan oleh Bethe pada tahun 1939. Berikut ini adalah rangkaian reaksi siklus karbon-nitrogen.

- (1)  ${}_{6}\text{C}^{12} + {}_{1}\text{H}^{1} \rightarrow {}_{7}\text{N}^{13} + \gamma$
- (2)  ${}_{7}\text{N}^{13} \rightarrow {}_{6}\text{C}^{12} + e^{+} + \nu$
- (3)  ${}_{6}\text{C}^{12} + {}_{1}\text{H}^{1} \rightarrow {}_{7}\text{N}^{14} + \gamma$
- (4)  ${}_{7}\text{N}^{14} + {}_{1}\text{H}^{1} \rightarrow {}_{8}\text{O}^{15} + \gamma$
- (5)  ${}_{8}\text{O}^{15} \rightarrow {}_{7}\text{N}^{15} + e^{+} + \nu$
- (6)  ${}_{7}\text{N}^{15} + {}_{1}\text{H}^{1} \rightarrow {}_{6}\text{C}^{12} + {}_{2}\text{He}^{4}$

( Winardi Sutantyo, 1983:162 )

Pada dasarnya rangkaian reaksi ini merupakan reaksi fusi hidrogen menjadi helium. Disini inti karbon dan nitrogen berlaku sebagai katalisator saja.

Dalam riwayat sebuah bintang, berbagai reaksi lainnya dapat berlangsung di dalam bintang, seperti reaksi fusi helium menjadi karbon, karbon menjadi oksigen dan banyak lagi yang lainnya.

## BAB V

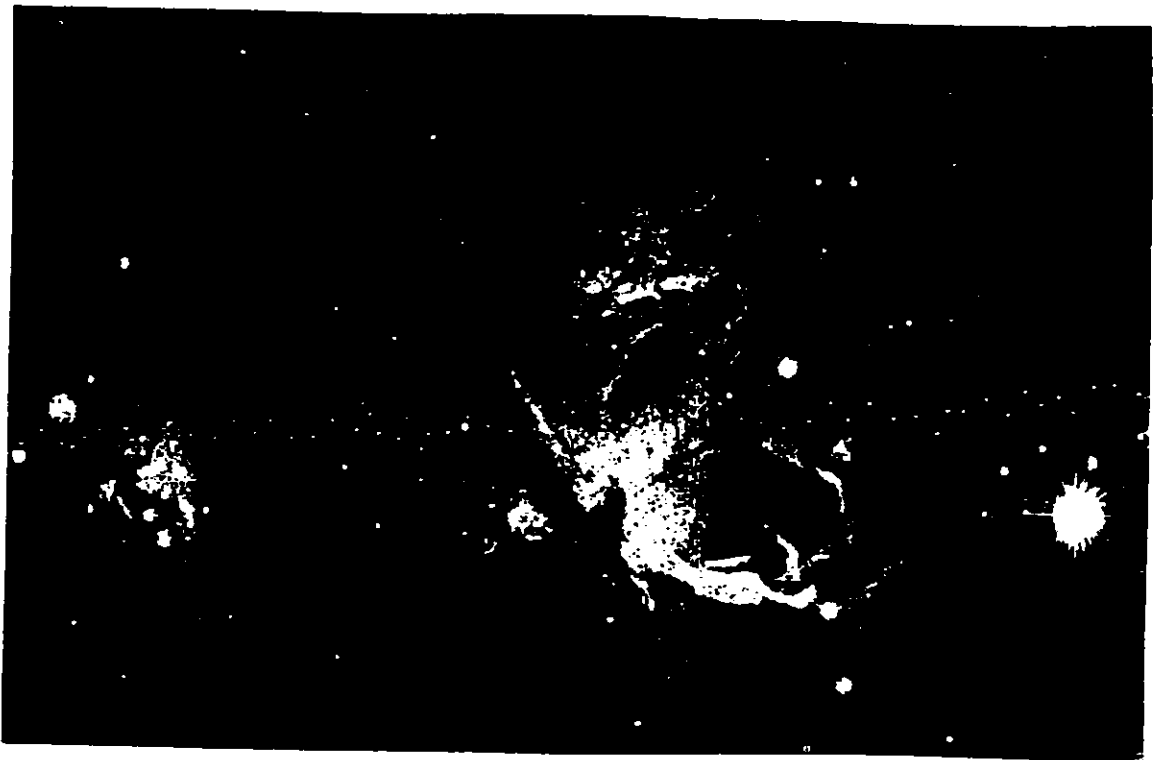
### EVOLUSI BINTANG

Proses yang dimulai dari terbentuknya bintang, kemudian berkembang dan pada akhirnya padam tak bersinar lagi disebut evolusi bintang. Proses ini berlangsung dalam waktu jutaan hingga milyaran tahun. Dapatkah para astronom dalam selang waktu hidupnya yang terbatas itu untuk memahami evolusi bintang?. Tampaknya sukar, namun kenyataannya sekarang banyak informasi tentang evolusi bintang dapat diungkapkan oleh para astronom.

Seorang astronom tidak perlu hidup jutaan atau semilyar tahun untuk mengikuti evolusi bintang dalam usaha memahaminya. Alam semesta ini dipenuhi oleh bintang dalam berbagai umur dan tahap evolusi. Pengamatan bermacam-macam bintang memungkinkan astronom untuk memperoleh gambaran yang utuh tentang evolusi bintang.

#### 5.1. Asal Mula Bintang

Ruang di antara bintang-bintang tidak kosong. Di situ terdapat gas dan debu yang disebut *materi antar bintang*. Di beberapa tempat kerapatan matahari antar bintang cukup besar hingga materi itu tampak sebagai *kabut antar bintang* atau *nebula*. Contohnya adalah nebula Orion pada Gambar 5.1



Gambar 5.1 Nebula Orion  
(Winardi Sutanyo, 1983;15)

Bintang-bintang berasal dari kabut antara bintang yang mengelompok dan mengerut. Pengerutan kabut gas ini terjadi karena gaya tarik gravitasi antara partikel-partikel gas di situ. Peristiwa ini disebut *kondensasi*: materi antar bintang.

Ditaksir pada awal kondensasi, massa kabut gas sekitar  $1000 M_{\odot}$ . Kondensasi ini akan terpecah menjadi kondensasi yang lebih kecil. Fragmen atau pecahan ini akan terpecah lagi hingga akhirnya terbentuk fragmen yang akan mengerut menjadi bintang. Peristiwa ini disebut *fragmentasi*.

Teori fragmentasi dibuktikan oleh kenyataan banyaknya bintang yang terdapat dalam kelompok, misalkan dalam gugus bintang. Gambar 5.2 menunjukkan suatu gugus bintang (gugus bola M5)



Gambar 5.2 Gugus Bola M5, di dalamnya terkandung lebih dari 1.000.000 bintang. (winardi Sutanyo, 1983;14)

### 5.2. *Evolusi Awal*

Fragmen gas ini mengerut terus. Pada proses pengerutan ini sebagian energi tersimpan sebagai energi panas, sebagian lagi dipancarkan keluar sebagai energi yang dapat kita amati. Sebuah bintang telah lahir.

Akhirnya suhu di pusat bintang menjadi cukup tinggi untuk berlangsungnya reaksi inti, yaitu reaksi yang mengubah hidrogen menjadi helium (lihat bab IV ). Reaksi ini disebut *pembakaran hidrogen*. Hendaknya jangan dikacaukan dengan istilah pembakaran dalam pengertian kita sehari-hari karena yang terjadi di sini reaksi inti bukan reaksi kimia. Ketika reaksi inti telah berlangsung, tekanan di pusat bintang menjadi cukup besar untuk menghentikan pengerutan. Bintang stabil pada tahap ini.

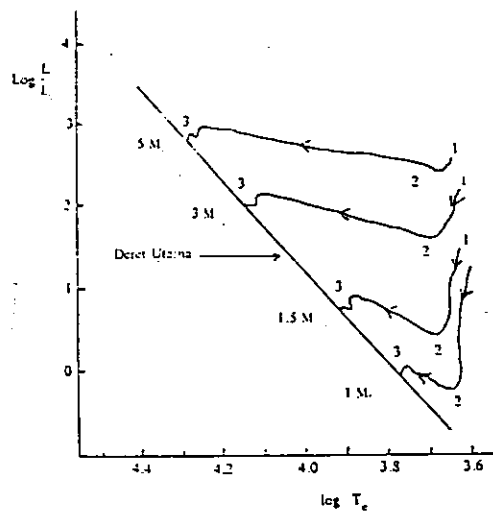
Pada saat itu kedudukan bintang dalam diagram HR di deret utama. Jadi deret utama merupakan tempat kedudukan bintang yang sedang “membakar” hidrogen di pusatnya.

Evolusi suatu bintang sering digambarkan dalam diagram HR. Seperti kita ketahui diagram HR menyatakan hubungan antara Luminosita dan suhu efektif



bintang. Dalam evolusinya, baik luminositas maupun suhu efektif bintang berubah, maka kedudukan bintang dalam diagram HR juga berubah. Dengan dikembangkannya teori evolusi bintang orang dapat menentukan jejak evolusi bintang dalam diagram HR.

Gambar 5.3 menunjukkan jejak evolusi bintang dengan berbagai massa menuju ke deret utama pada tahap evolusi awalnya. Jejak evolusi ini dihitung oleh Icko Iben. Di titik 3 bintang mencapai deret utama.



Gambar 5.3 Jejak evolusi bintang dengan berbagai masa menuju ke deret utama pada tahap evolusi awalnya

Sekarang matahari adalah bintang deret utama. Dengan mempelajari jejak evolusi bintang bermassa 1 M<sub>⊙</sub> pada gambar 5.3 kita dapat mengetahui keadaan matahari sebelum mencapai deret utama. Dahulu (di titik 1 misalnya) matahari berluminositas lebih besar dari sekarang sedang suhu efektifnya lebih rendah. Waktu itu di dalam matahari terjadi konveksi hingga energi dari dalam diangkut keluar dengan efisiensi hingga matahari jauh lebih terang dari sekarang.

Bintang yang massanya besar lebih cepat mencapai deret utama dari pada yang bermassa kecil. Tabel 3 berikut ini memberikan waktu yang diperlukan untuk mencapai deret utama untuk bintang dengan berbagai massa.

Tabel 3

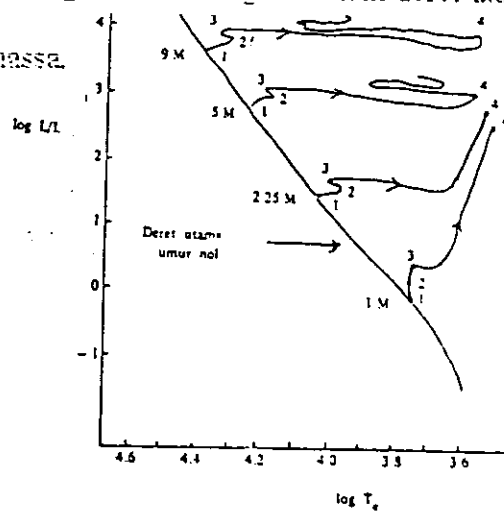
Waktu untuk mencapai deret utama untuk berbagai massa bintang

Massa ( $M_{\odot}$ )	Waktu (tahun)
15	$6.2 \times 10^5$
9	$1.5 \times 10^7$
5	$5.8 \times 10^8$
3	$2.5 \times 10^9$
1	$5.0 \times 10^{10}$

Diagram HR gugus bintang NGC 2264 (gugus nomor 2264 dalam New General Catalogue) menunjukkan bintang yang bermassa besar (yang terang) sudah berada di deret utama, tetapi bintang yang bermassa kecil (yang lemah) belum mencapai deret utama. Ini menandakan gugus tersebut masih sangat muda. Gugus tersebut berada di daerah yang penuh dengan kabut antar bintang.

### 5.3 Evolusi di deret utama.

Bintang menghabiskan 2/3 dari seluruh "massa hidupnya" di deret utama. Pada saat bintang baru saja mencapai deret utama, komposisi kimianya masih homogen (merata di dalam bintang). Saat itu dikatakan bintang berada pada *deret utama umur nol*. Pada gambar 5.4 digambarkan deret utama umur nol untuk bintang dengan berbagai massa.



Gambar 5.4 Deret utama umur nol untuk bintang dengan berbagai massa

Akibat berlangsungnya reaksi ini, hidrogen di pusat bintang makin berkurang sedang helium makin bertambah. Maka komposisi kimia di pusat bintang berubah sedikit demi sedikit. Struktur bintangpun berubah dengan perlahan. Bintang beringsut-ingsut meninggalkan deret utama umur nol dan bergerak ke kanan (dari 1 menuju ketitik 2).

Timbunan helium di pusat bintang disebut pusat helium. Reaksi inti berlangsung dalam lapisan yang menyelubungi pusat helium itu.

Schonberg dan Chandrasekhar menunjukkan bila massa pusat helium mencapai 10 hingga 15% massa bintang (disebut batas Schonberg-Chandra sekhar), pusat bintang mengerut dengan cepat. Terjadi perubahan struktur bintang yang mengakibatkan bintang mengembang. Bintang memuai dengan cepat menjadi bintang raksasa merah.

Gambar 5.4 menunjukkan jejak evaluasi bintang dengan berbagai massa yang dihitung oleh Icko Iben. Antara titik 1 dan 3 bintang berada pada tahap deret utama. Dititik 3 batas Schonberg-Chandrasekhar di capai, kemudian bintang mengembang ke titik 4.

Bintang yang bermassa besar menghamburkan energinya dengan boros. Luminositas bintang berbanding dengan pangkat tiga massanya. Bintang yang bermassa  $10 M_{\odot}$  memancarkan energi 1000 kali lebih cepat dari matahari. Jadi walaupun persediaan hidrogen dalam bintang bermassa besar lebih banyak, umur bintang lebih pendek karena bintang lebih boros.

Seperti telah dikemukakan, selama 2/3 seluruh waktu evolusinya bintang berada di deret utama. Tabel 4 berikut ini memberikan lama bintang di deret utama

untuk berbagai massa. Perhatikan lama waktu matahari di deret utama hampir 1000 kali lebih panjang dari bintang bermassa  $15 M_{\odot}$ .

Tabel 4.

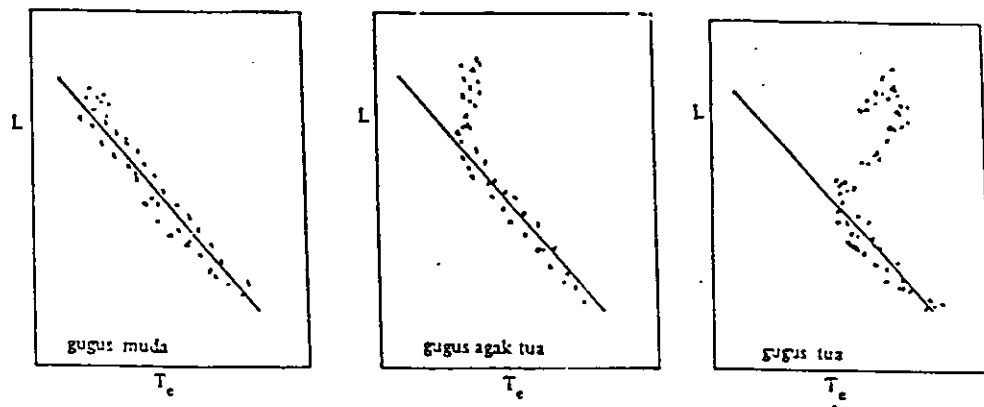
Lama bintang di deret utama untuk berbagai massa bintang

Massa ( $M_{\odot}$ )	Waktu (tahun)
15	$1.0 \times 10^7$
9	$2.2 \times 10^7$
5	$6.8 \times 10^7$
3	$2.4 \times 10^8$
1	$9.7 \times 10^8$

#### 5.4 Gugus Bintang

Kita dapat menganggap bintang dalam suatu gugus dilahirkan dalam waktu bersamaan. Karena itu umur semua bintang anggota gugus dapat di anggap sama. Gugus mengandung bintang dengan berbagai massa. Jadi walaupun umurnya sama, tahap evolusi bintang di dalam gugus dapat berbeda-beda. Bintang bermassa besar bisa sudah di tahap raksasa merah, sedang yang bermassa kecil masih di deret utama.

Gambar 5.5 menggambarkan diagram HR untuk 3 gugus bintang dengan umur berbeda-beda. Untuk gugus yang muda hampir semua bintang masih di deret utama. Untuk gugus yang agak tua bintang yang terang, atau yang bermassa besar, telah meninggalkan deret utama sedang yang bermassa kecil masih di deret utama. Untuk gugus yang lebih tua, lebih banyak bintang yang telah meninggalkan deret utama karena batas massa bintang meninggalkan deret utama lebih rendah. Jadi dengan mengamati diagram HR suatu gugus bintang orang dapat menaksir umur gugus tersebut.



Gambar 5.5 Diagram HR untuk 3 gugus bintang dengan umur berbeda-beda.

### 5.5. Evolusi Lanjut

Bintang mengembang menjadi raksasa merah ketika pusat helium mengerut dengan cepat. Akibat pengerutan ini suhu di pusat helium makin tinggi hingga akhirnya helium di situ bereaksi membentuk karbon. Pada Gambar 5.4 reaksi pembakaran helium terjadi di titik 4.

Pada bintang bermassa kecil seperti matahari, reaksi ini berlangsung bagaikan mesiu yang disulut. Pembangkitan energi meningkat sangat cepat. Struktur bintang berubah secara drastis dalam waktu yang amat pendek. Peristiwa ini disebut *kilatan helium* atau helium flash. Evolusi setelah kilatan helium tidak jelas karena terlampaui cepat untuk diikuti dengan komputer. Tetapi banyak bukti menunjukkan bintang seperti matahari pada akhir evolusinya mengerut menjadi bintang bajang putih.

Pada bintang bermassa  $3 M_{\odot}$  atau lebih, reaksi pembakaran helium berlangsung dengan stabil. Akibat reaksi ini karbon di pusat bintang-bintang bertambah dan terbentuk timbunan karbon yang disebut pusat karbon. Seperti halnya pusat-pusat helium tadi, pusat karbon mengerut akibat gaya gravitasi dan suhunya

meningkat. Pada suhu 600 juta derajat inti-inti karbon bereaksi membentuk inti yang lebih berat seperti oksigen, neon dan magnesium.

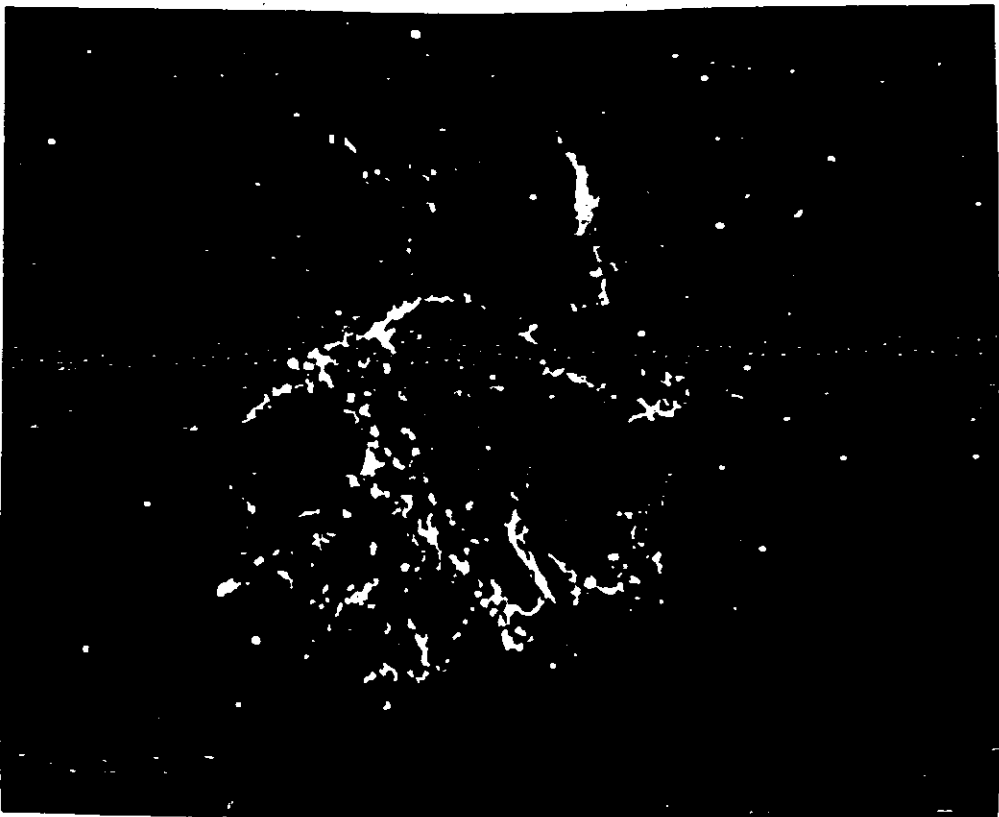
Bila massa bintang kurang dari  $5 M_{\odot}$  (atau kurang dari  $10 M_{\odot}$ , harga ini belum pasti), reaksi pembakaran karbon tidak stabil dan terjadi kilatan karbon yang sangat dahsyat. Seluruh bintang meledak hancur. Sebuah bintang yang meledak dengan dahsyat disebut *supernova*.

Pada bintang yang bermassa lebih dari  $10 M_{\odot}$ , reaksi pembakaran karbon berlangsung dengan stabil dan aman. Suhu dipusat bintang makin tinggi hingga mencapai semilyar derajat, pada gilirannya inti oksigen bereaksi membentuk unsur yang lebih berat seperti silikon, sulfur dan fosfat. Demikian secara berturut-turut terbentuk inti-inti yang lebih berat. Pada akhirnya di pusat bintang terbentuk inti seperti nikel dan besi (semuanya berbentuk gas karena suhu yang sangat tinggi).

Pada suhu beberapa milyar derajat inti besi akan pecah menjadi inti helium. Reaksi ini merupakan kebalikan reaksi yang terjadinya sebelumnya. Bila tadinya reaksi inti di dalam bintang merupakan reaksi fusi atau penggabungan inti ringan menjadi inti berat dengan di sertai pembebasan energi, sekarang inti besi terurai menjadi helium. Reaksi ini akan *menyerap* energi (lihat Bab IV). Akibatnya tekanan di pusat bintang turun dengan drastis karena lenyapnya sejumlah besar energi di situ. Pusat bintang runtuh kedalam. Bagian luar bintang yang masih kaya akan bahan bakar nuklir ikut runtuh kedalam dan suhunya naik dengan cepat. Terjadilah reaksi inti di situ. Reaksi yang dalam evolusi bintang yang normal memakan waktu jutaan tahun akan berlangsung dalam beberapa detik saja. Bagaikan bom nuklir raksasa bintang meledak dengan dahsyat, sebuah supernova terjadi.

## 5.6 Ledakan Bintang

Sejarah telah mencatat beberapa kali terjadi supernova. Yang terkenal adalah supernova yang terjadi pada tahun 1054, lebih dari 900 tahun yang lalu. Peristiwa ini tercatat oleh ahli bintang di Cina dan Jepang. Konon sedemikian terang bintang itu hingga dapat dilihat pada siang hari. Sangat beruntung ahli bintang kuno itu mencatat posisi bintang itu. Dengan alat-alat modern, sekarang orang melihat adanya kabut yang mengembang di situ (Gambar 5.6). Kabut ini disebut *Kabut Kepiting* (Crab Nebula).



Gambar 5.6. Kabut Kepiting (Winardi Sutantyo, 1983;16)

Telah kita bicarakan bintang meledak dapat di sebabkan oleh dua hal yaitu oleh kilatan karbon dan oleh runtuhnya pusat besi. Dalam hal kilatan karbon, bintang akan hancur seluruhnya. Tetapi dalam hal runtuhnya pusat besi, pusat bintang menjadi sangat mampat, jauh melebihi bintang bajang putih. Dalam materi semampat

ini, unsur-unsur pecah menjadi proton dan neutron sedangkan proton akan menangkap elektron membentuk neutron hingga sebagian besar materi terdiri atas neutron. Setelah ledakan, bagian luar bintang yang di sebut *bintang neutron*. Walaupun massa bintang neutron bisa melebihi massa matahari, radiusnya hanya sekitar 10 km (bandingkan dengan matahari yang radiusnya 7.00.000.km). Kerapatan bintang neutron dapat mencapai semilyar ton per  $\text{cm}^3$

Gagasan bahwa sisa bintang meledak dapat berupa bintang neutron sebenarnya sudah dikenalkan pada tahun 1934 oleh Baade dan Zwicky. Tetapi penemuan bintang neutron baru terjadi lebih dari 30 tahun kemudian.

Pada tahun 1967, Hewish dan rekan-rekannya di Cambridge, Inggris, menyelesaikan sebuah teleskop radio yang baru. Pada suatu hari seorang mahasiswa Hewish bernama Jocelyn Bell melihat suatu sumber radio yang berkedip-kedip. Kedipan ini terjadi sangat periodik, setiap kedipan terjadi setiap 1,33730113 detik. Sangat teliti, menyerupai detik-detik dari jam atom yang sangat cermat. Benda langit ini disebut *pulsar*.

Banyak teori diajukan untuk menerangkan denyutan rdio dari pulsar, misalnya pulsar adalah bintang bajang putih yang berdenyut. Tetapi hanya satu teori yang akhirnya tahan uji yaitu pulsar adalah bintang neutron yang berputar cepat. Gelombang radio dipancarkan pulsar hanya pada arah tertentu saja. Akibat perputaran pulsar, gelombang radio yang dipancarkannya tampak berkedip-kedip. Persis seperti cahaya lampu mercu suar atau lampu di atas ambulance.

Pada tahun 1969 ditemukan sebuah pulsar di Kabut Kepiting. Penemuan ini mendukung teori bahwa sisa ledakan bintang dapat berupa bintang neutron. Hewish



memperoleh hadiah Nobel fisika tahun 1974 karena penemuan pulsar.

Untuk memahami pulsar mengalami loncatan besar dengan ditemukannya pulsar di Nebula Kepiting yaitu suatu awan antar bintang yang bentuknya mengingatkan orang pada kepiting. Nebula Kepiting adalah sisa sebuah supernova yang terjadi pada tahun 1054. Supernova ini dicatat oleh astronom Cina pada zaman dinasti Sung dan juga oleh astronom Jepang. Konon sedemikian terang supernova ini hingga dapat dilihat pada siang hari. Pada tahun 1968 Staelin dan Reifenstein menemukan pulsar di tengah Nebula Kepiting itu. Pulsar ini dikenal sebagai pulsar Kepiting dan berdenyut dengan periode 0,033 detik. Selama beberapa tahun pulsar ditengah Kepiting merupakan pulsar yang tercepat denyutannya. Baru pada akhir 1982 ditemukan pulsar yang periode denyutannya 0,001 56 detik yaitu PSR 1937+21. Pulsar lain yang berdenyut cepat adalah pulsar Vela yang periodenya 0,088 detik dan pulsar PSR 1913+16 dengan periode 0,059 detik.

Pada mulanya diduga pulsar adalah bintang yang berdenyut. Namun bintang biasa tidak mungkin berdenyut secepat itu. Kemungkinannya hanyalah bintang bajang putih atau bintang neutron. Tetapi periode pulsar Kepiting dan pulsar Vela terlalu cepat untuk denyutan bintang bajang putih dan terlalu lambat untuk bintang neutron.

Teori lain mengemukakan bahwa perubahan pancaran radio yang berirama cepat itu disebabkan oleh gerak orbit. Dengan kata lain pulsar adalah anggota bintang ganda. Tetapi bila suatu bintang ganda harus berkeliling sedemikian cepat (tiga pulun kali setiap detik untuk pulsar

Kepiting), menurut teori Einstein akan terjadi pemancaran gelombang gravitasi. Akibat pemancaran ini pulsar itu akan bergerak dalam orbit spiral dan akhirnya bertumbukan dengan pasangannya. Teori ini tidak dapat menerangkan irama denyutan radio yang begitu mantap.

Teori yang berkembang menyatakan bahwa bajang putih seperti Sirius B harus berputar tiga puluh kali setiap detik seperti pulsar Kepiting maka permukaannya akan berputar dengan kecepatan melebihi cahaya. Suatu hal yang tidak mungkin. Jadi satu-satunya kemungkinan pulsar adalah *bintang neutron yang berputar cepat*. Gold mengemukakan bahwa pulsar memancarkan gelombang radio dari kutub magnetnya pada arah tertentu. Jadi seperti halnya lampu di atas mobil ambulans atau mercusuar, sinarnya tampak berkedip-kedip akibat putarannya. Penemuan pulsar di Nebula Kepiting yang merupakan sisa ledakan bintang adalah bukti yang meyakinkan bagi teori Baade dan Zwicky yang diajukan 34 tahun sebelumnya bahwa bintang neutron bisa dihasilkan oleh ledakan supernova.

Medan magnet bintang umumnya tidak terlampaui kuat. Contohnya, medan magnet di permukaan matahari kira-kira setara dengan medan magnet bumi yaitu beberapa gauss (kecuali pada beberapa daerah gelap yang dikenal sebagai *noda matahari*, disitu medan magnetnya beberapa ratus hingga beberapa ribu gauss). Tetapi bila suatu bintang mengalami keruntuhan gravitasi, medan magnet ikut terjerat oleh materi dan termampatkan hingga berlipat ganda kekuatannya. Pulsar memancarkan energi dalam bentuk

pancaran dwikutub magnet (*magnet dipole radiation*) dan pancaran partikel relativistik. Dalam hal ini energi yang dipancarkan per detik adalah :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{B^2 R^6}{6 c^3} \omega^4 \sin^2 \theta \quad (5.1)$$

(Winardi Sutantyo, 1983, 219)

dimana :

B = medan magnet di kutub magnet,

R = jari-jari

$\omega$  = kecepatan sudut rotasi

c = kecepatan cahaya dalam ruang hampa

$\theta$  = sudut antara sumbu rotasi dan sumbu magnet.

Tanda minus berarti pulsar kehilangan energi. Bila kita melakukan perhitungan hampiran dan hanya tertarik pada orde magnitudo besaran dalam rumus itu tetapi bukan harga eksaknya maka diambil  $\sin \theta \approx 1$ . Energi yang dipancarkan pulsar bersumber pada energi kinetik rotasinya, berarti :

$$\frac{dE}{dt} = I \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (5.2)$$

dimana I = momen inersia pulsar

Dengan penggabungan Persamaan 5.1 dan 5.2 diperoleh :

$$\frac{d\omega}{dt} = - \frac{B^2 R^6}{6 I c^3} \omega^3 \quad (5.3)$$

Bila P periode rotasi pulsar maka  $\omega = 2 \pi/P$ , jadi persamaan 5,3 dapat ditulis dalam bentuk :

$$B^2 = \left[ \frac{3 I c^3}{2 \pi^2 R^5} \right] P \frac{dP}{dt} \quad (5,4)$$

Persamaan ini dapat digunakan untuk menaksir medan magnet dipermukaan pulsar. Ambil sebagai contoh pulsar Kepiting. Dari pengamatan diketahui  $P = 0,331$  s dan  $dP/dt = 422,69 \times 10^{-15} \text{ ss}^{-1}$ . Dari teori struktur bintang neutron diketahui  $I \approx 10^{45} \text{ gr cm}^2$  dan  $R \approx 10^6 \text{ cm}$ . Bila harga ini kita masukkan ke persamaan 5,4 kita dapatkan  $B = 7,6 \times 10^{12}$  gauss. Untuk pulsar lain kita dapatkan harga yang setara. Umumnya medan magnet pulsar sekitar  $10^{12} - 10^{13}$  gauss, jauh lebih besar daripada bintang biasa.

Selanjutnya kita integrasikan persamaan 5.3 untuk  $t$  dari 0 hingga  $\tau$  dengan  $\tau =$  umur pulsar dan kita andaikan kecepatan sudut rotasi pulsar pada saat dilahirkan ( $\omega_0$ ) jauh lebih besar daripada kecepatan sudut rotasinya sekarang ( $\omega$ ) sehingga  $\omega_0^{-2}$  dapat diabaikan terhadap  $\omega^{-2}$ . Hasilnya adalah

$$\tau = - \frac{P}{(2 dP/dt)} \quad (5.5)$$

Bila kita masukkan harga  $P$  dan  $dP/dt$  pulsar Kepiting kita dapatkan  $\tau = 1241$  tahun. Hasilnya ternyata tidak jauh berbeda dengan umur sebenarnya pulsar itu (yang dilahirkan tahun 1054, yaitu saat terjadinya supernova). Mengingat persamaan 5.3 dan 5.5 hanya merupakan rumus hampiran saja, kesesuaian ini lebih meyakinkan kita akan kebenaran teori di atas.

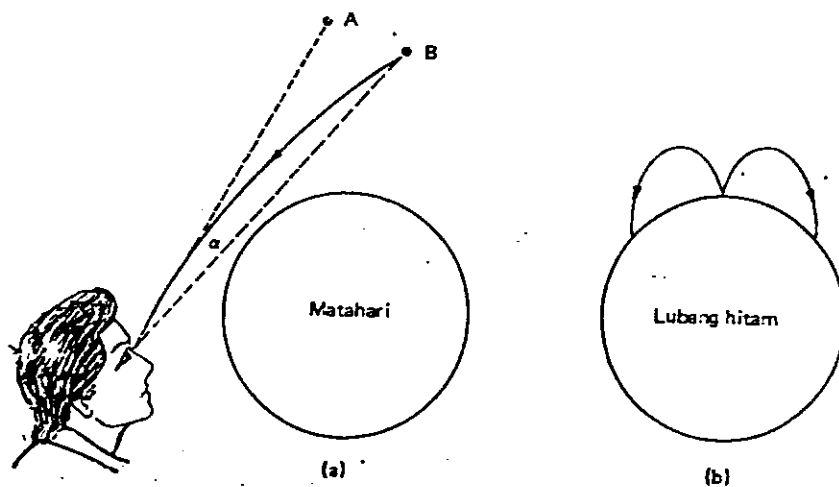
Sebelum ditemukannya pulsar ada masalah tentang Nebula Kepiting yang membingungkan para astronom. Sejak awal perkembangan astronom radio telah diketahui Nebula Kepiting memancarkan gelombang radio yang kuat. Dengan melihat spektrum pancaran radionya, I.S Shklovsky dari Rusia berkesimpulan bahwa pancaran radio ini disebabkan oleh pancaran energi elektron berkecepatan tinggi yang bergerak dengan tempuhan spiral dalam medan magnet. Pancaran semacam ini juga diamati orang dalam alat pemercepat atom synchrotron oleh karenanya disebut *pancaran synchrotron*. Bila memang demikian, cahaya yang dipancarkan nebula ini harus terpolarisasi (getaran listrik gelombang cahaya tidak acak melainkan mengarah ke arah tertentu, dalam hal ini tegak lurus arah medan magnet). Pengamatan dengan teleskop 5 meter oleh Baade membenarkan hal ini. Misalnya, pancaran synchrotron itu harus dihasilkan oleh elektron dengan energi kinetik yang sangat tinggi. Masa hidup elektron berenergi tinggi ini tidak lama jadi elektron tersebut tidak mungkin dihasilkan oleh ledakan supernova pada tahun 1054. Lalu dari mana asal elektron itu? Sebelum ditemukannya pulsar, yaitu pada tahun 1967, F. Pacini telah menghipotesiskan bahwa sebuah bintang neutron yang berputar cepat di

tengah Nebula Kepiting dapat menerangkan masalah ini. Energi elektron itu berasal dari energi kinetik rotasi bintang neutron. Penemuan pulsar di Nebula Kepiting dapat menguatkan hipotesis Pacini tersebut. Laju pancaran radio di Nebula Kepiting adalah  $4 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ . Bila kita menggunakan persamaan 5.2 dan memasukkan harga  $\omega$ ,  $d\omega/dt$  untuk pulsar Kepiting dan mengambil  $I=10^{45} \text{ g cm}^2$  akan didapat  $dE/dt = 4,6 \times 10^{38} \text{ egr s}^{-1}$ . Ternyata ini cocok dengan laju pancaran energi Nebula Kepiting.

Newton menggambarkan gravitasi sebagai daya tarik menarik antara dua benda. Teori gravitasi Newton dapat menerangkan banyak hal dengan cukup tepat. Tetapi ada beberapa hal yang tak dapat dijelaskan dengan teori Newton. Ternyata sumbu ellipsis orbit planet Merkurius tidak tetap arahnya melainkan berputar dengan laju  $43''$  per abad. Gerak ini disebut *gerak garis apside* planet Merkurius. Teori gravitasi Newton tidak dapat menerangkan peristiwa ini. Masalah ini baru terjawab setelah Einstein mengajukan teori gravitasinya.

Einstein berpandangan bahwa gravitasi tak lain adalah *kelengkungan ruang waktu* di sekitar suatu benda. Planet bergerak mengorbit matahari karena planet itu mengikuti kelengkungan ruang waktu di sekitar matahari. Makin besar massa suatu benda dan makin dekat ke benda itu makin besar kelengkungan ruang waktu di situ. Menurut teori Newton cahaya tidak terpengaruh oleh gravitasi karena cahaya tidak bermassa. Tetapi menurut teori Einstein gerak cahaya juga mengikuti kelengkungan ruang waktu itu hingga gerak cahaya di sekitar suatu benda tidak lurus lagi melainkan

dibelokkan. Hal ini dibuktikan pada pengamatan bintang yang arahnya di sekitar matahari pada saat terjadi gerhana matahari total (bila tidak sedang terjadi gerhana matahari total tentu bintang di sekitar matahari tidak terlihat karena tersilaukan oleh matahari). Ternyata arah bintang itu bergeser dari arahnya andaikan matahari tak di situ (Gambar 5.7). pergeseran ini sangat kecil yaitu sekitar  $1''{,}75$  untuk bintang yang dekat dengan tepi matahari. Harga ini sesuai dengan perhitungan teori Einstein.



Gambar 5.7.(a) Pembelokan cahaya di sekitar matahari : andaikan tak ada matahari arah bintang di B, tetapi oleh pengaruh gravitasi matahari cahaya dibelokkan hingga oleh pengamat tampak bergeser arahnya dengan sudut  $\alpha$  yaitu di A.  
 (b) Dipermukaan lubang hitam semua cahaya dibelokkan hingga tak dapat lepas  
 (Winardi Sutantyo, 1983;222)

Pada pembicaraan di atas kita simpulkan bila pusat suatu bintang mengalami keruntuhan gravitasi maka bagian luar bintang terlontar keluar dengan menghamburkan unsur berat yang dihasilkan oleh reaksi inti di dalam bintang. Pusat yang runtuh itu bisa menjadi bintang neutron yang dapat

diamati sebagai pulsar. Tetapi perhitungan teori menunjukkan bila bintang yang runtuh itu massanya lebih dari  $3 M_{\odot}$ , maka tekanan degenerasi elektron dan neutron tak akan mampu menghentikan keruntuhan gravitasi bintang. Bintang menjadi semakin mampat, medan gravitasi di permukaannya semakin kuat. Dengan begitu kelengkungan ruang waktu di sekitar bintang pun makin besar. K. Schwarzschild mendapatkan bila jari-jari bintang mencapai

$$R_s = \frac{2 GM}{c^2} \quad (5.6)$$

maka kelengkungan ruang waktu sudah sedemikian besarnya hingga cahaya pun tak dapat lepas dari permukaannya (Gambar 5.7.b). Bintang disebut *lubang hitam (black hole)* sedangkan  $R_s$  disebut jari-jari Schwarzschild.

Untuk menjadi lubang hitam, matahari yang jejariunya 700.000 km itu harus dikerutkan menjadi 3 km saja. Tetapi tentu saja jauh sebelum itu tekanan degenerasi elektron akan menghentikan pengerutan matahari pada jejari beberapa ribu km (sebagai bintang bajang putih). Seperti itulah disebutkan di atas agar suatu bintang dapat mengerut menjadi lubang hitam massanya harus paling sedikit  $3 M_{\odot}$ , agar tekanan degenerasi elektron maupun neutron tak mampu menahan pengerutan.

Karena lubang hitam menyedot kembali cahaya yang dipancarkannya maka lubang hitam tentu benda gelap yang sukar diamati. Memang begitu halnya bila lubang hitam itu merupakan benda tunggal. Apabila suatu lubang hitam atau bintang neutron merupakan anggota bintang ganda, dapatlah



terbentuk piringan materi di sekitarnya yang karena temperaturnya yang tinggi memancarkan sinar X.

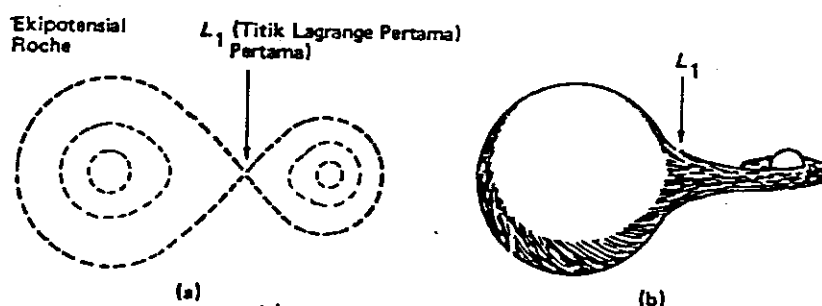
### 5.7. Evolusi Bintang Ganda

Evolusi bintang ganda yang berdekatan berbeda dengan evolusi bintang tunggal karena antara kedua bintang terjadi interaksi. Minat menelaah evolusi bintang ganda timbul setelah orang mengamati ‘paradoks Algol’, yaitu pada sistem bintang ganda berdekatan sering dijumpai komponen yang evolusinya telah lanjut justru merupakan bintang yang massanya lebih kecil. Ini bertentangan dengan faham evolusi bintang yang menyatakan bintang dengan massa lebih besar lebih cepat evolusinya. Pada tahun 1955 Crawford dan Kopal secara tersendiri mengemukakan bahwa ‘paradoks Algol’ dapat diterangkan bila antara kedua bintang terjadi perpindahan massa. Bintang yang evolusinya lanjut tadinya merupakan bintang yang massanya terbesar dalam sistem, tetapi karena terjadi perpindahan massa dari bintang itu ke pasangan bintang tersebut menjadi lebih kecil massanya. Mengapa bisa terjadi perpindahan massa? Sebelum membahas pertanyaan ini akan kita bicarakan terlebih dahulu tentang *permukaan ekipotensial* bintang.

Permukaan ekipotensial adalah tempat kedudukan titik yang potensial gravitasinya sama. Di dalam suatu bintang yang tidak berputar dan jauh dari bintang yang lain potensial gravitasi pada jarak  $r$  dari pusat adalah

$$\psi = \frac{G M(r)}{r} \quad (5.7)$$

$M(r)$  adalah massa yang dilingkupi oleh jejari  $r$ . Jelas untuk suatu harga  $r$  yang sama harga  $\psi$  akan sama pula. Jadi permukaan ekipotensial bintang ini berbentuk bola sempurna. Bila bintang berputar, permukaan ini tidak lagi berbentuk bola melainkan berbentuk sferoida (pepat pada kedua kutub rotasinya). Pada bintang ganda berdekatan, bintang yang satu akan terpengaruh oleh gravitasi bintang yang lain. Bentuk permukaan ekipotensial bintang akan lebih rumit. Gambar 5.8 a menggambarkan sekumpulan bidang ekipotensial di sekitar kedua bintang. Perhatikan bahwa permukaan ekipotensial di dekat pusat berbentuk hampir bola sempurna tetapi makin jauh dari pusat bentuknya makin menyimpang dari bentuk bola. Pada suatu harga potensial, permukaan ekipotensial kedua bintang saling bersinggungan di titik  $L_1$  yang disebut 'Titik Lagrange Pertama'. Di titik itu gaya total, yaitu jumlah gaya gravitasi kedua bintang dan gaya sentrifugal akibat kitaran orbit nol. Permukaan ekipotensial ini disebut *ekipotensial Roche*.



Gambar 5.8 (a) Kumpulan permukaan ekipotensial sistem bintang ganda.  
 (b) Proses perpindahan massa dalam sistem bintang ganda  
 (Winardi Sutantyo, 1983;224)

Bentuk bintang selalu mengikuti permukaan ekipotensialnya. Bila jejari bintang jauh lebih kecil daripada jarak antara kedua komponen bintang

ganda, bentuk bintang hampir berupa bola sempurna. Makin besar jejari bintang menyimpang dari bentuk bola juga makin besar.

Bintang yang bermassa lebih besar ber-evolusi lebih cepat dari pada pasangannya. Dalam sistem bintang ganda, bintang yang pada awalnya bermassa besar. Kita sebut *bintang primer* sedang yang bermassa kecil *bintang Sekunder*. Bintang primer lebih dahulu meninggalkan deret utama menuju ke tahap raksasa atau maharaksasa. Bintang mengembang, jejariya makin besar hingga akhirnya permukaan bintang mencapai ekipotensial Roche-nya. Kalau kita menuang air ke ember yang sudah penuh, permukaan air tidak akan bertambah tinggi melainkan akan tumpah keluar. Begitu pula bintang yang sudah mencapai ekipotensial Roche-nya. Walaupun bintang berusaha mengembang lebih besar permukaannya tidak akan melampaui potensial Roche-nya. Materi akan 'tumpah' melalu titik  $L_1$  dan masuk dalam wilayah gravitasi bintang sekunder hingga tertarik oleh bintang itu. Tejadilah aliran materi dari bintang primer ke bintang sekunder melalui titik  $L_1$  (Gambar. 5.8b). Akibatnya massa bintang primer semakin kecil dan sebaliknya massa bintang sekunder bertambah besar. Akhirnya perbandingan massa berbalik, yang tadinya bermassa besar sekarang kecil dan sebaliknya. Walaupun massanya menjadi lebih kecil, bintang yang evolusinya sudah lanjut itu tetap kita sebut bintang primer.

Bila dalam evolusi suatu bintang ganda massa total sistem dianggap tidak berubah, yaitu

$$M = M_1 + M_2 = \text{tetap} \quad (5.8)$$

( $M_1$  = massa bintang primer,  $M_2$  = massa bintang sekunder) dan momentum sudut orbit juga tetap, yaitu

$$J^2 = Ga \frac{(M_1 M_2)^2}{(M_1 + M_2)^2} = \text{tetap} \quad (5.9)$$

dengan  $a$  = jarak kedua bintang (orbit dianggap berbentuk lingkaran) maka jarak kedua bintang akan berubah sebagai fungsi  $M_1$  dan  $M_2$  mengikuti rumus

$$\frac{a}{a_0} = \left[ \frac{(M_1^0 M_2^0)^2}{(M_1 + M_2)^2} \right]^2 \quad (5.10)$$

dengan  $M_1 + M_2 = M_1^0 + M_2^0$ ,  $M_1^0$  dan  $M_2^0$  adalah massa awal masing-masing komponen. Dari persamaan dapat dihitung jarak sebagai fungsi  $M_1$ . Ternyata kedua bintang mendekat pada saat perpindahan massa mulai berlangsung sampai massa kedua bintang sama. Setelah itu jarak kedua bintang menjauh kembali. Oleh karena itu pada mulanya perpindahan massa berlangsung dengan deras karena dua pengaruh yang saling memperkuat : kedua bintang mendekat sedang jejari bintang yang kehilangan massa bertambah. Setelah perbandingan massa berbalik (aliran materi berlangsung dari bintang yang bermassa kecil ke yang bermassa besar) proses itu menjadi lambat. Kippenhahn dan Weigert mengemukakan, bila massa awal bintang primer kurang dari  $3 M_S$  maka setelah menjadi perpindahan massa, bintang primer akan ber-evolusi menjadi bintang katai putih. Bila massa awal bintang primer lebih besar dari  $3 M_S$ . Perpindahan massa itu berakhir bila pembakaran helium di pusat bintang mulai berlangsung karena pada saat itu bintang mengerut hingga permukaannya melepas dari ekipotensial Roche-nya.

Perhitungan teori menunjukkan saat itu bintang sudah kehilangan sebagian besar massanya, yang tinggal hanyalah pusat heliumnya. Bintang ini disebut *bintang helium*. Menurut van den Heuvel bila massa bintang helium itu lebih dari  $3 M_S$  (berarti mass bintang primer sebelum terjadi perpindahan massa harus lebih dari  $12 M_S$ ) bintang akan menempuh semua tahap pembakaran inti sampai berbentuk pusat besi di dalamnya. Pada pasal 5.5 telah kita bicarakan pusat besi akan mengalami keruntuhan gravitasi akibat penguraian inti besi menjadi inti helium. Bintang akan meledak sebagai supernova akibat keruntuhan gravitasi pusat bintang dan menjadi *bintang kompak* seperti bintang neutron atau lubang hitam.

Setelah terjadi ledakan supernova bintang ganda terdiri atas sebuah bintang kompak yang berpasangan dengan bintang biasa. Bintang biasa itu bermassa besar ( $\geq 10 M_S$ ) karena bintang ini telah menyedot massa pasangannya pada tahap perpindahan massa sebelumnya.

Telah diketahui bintang bermassa melontarkan materi seperti hasil pengamatan profil P Cygni pada spektrum bintang. Lontaran materi ini disebut *angin bintang* yang lanjutnya sekitar  $10^6 M_S$  per tahun untuk bintang maharaksasa kelas O. Kalau umur bintang beberapa juta tahun maka dalam evolusinya bintang bisa kehilangan materi beberapa kali massa matahari karena proses angin bintang. Semburan materi angin bintang ini bila lewat cukup dekat ke bintang kompak akan terperangkap dalam medan gravitasinya. Dengan kata lain bintang kompak menyedot materi angin

bintang yang berasal dari pasangannya. Materi yang tersedot membebaskan energi potensial gravitasinya sebesar

$$E = - G \frac{M^2}{R} \quad (5.11)$$

Laju energi potensial gravitasinya adalah :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{2 G M}{R} \frac{dM}{dt} \quad (5.12)$$

$M$  = massa bintang kompak dan  $R$  = jarak dari pusat ke tempat itu di bebaskan (dekat permukaan untuk bintang neutron atau sekitar 1,5 kali jari-jari Schwarzschild untuk lubang hitam). Karena  $M$  yang besar ( $> M_S$ ) dan  $R$  yang kecil. ( $\approx 10$  km), dihasilkan laju pancaran energi yang besar walaupun  $dM/dt$  kecil. Hal ini mudah dihitung, yaitu dengan laju penyedotan hanya sekitar  $10^{-9} M_S$  per tahun akan dihasilkan laju pancaran energi sekitar  $10^{37}$  erg per detik (10.000 kali lebih kuat dari luminositas matahari!). Jumlah energi yang sedemikian besar dibebaskan dari ruang yang sangat sempit di sekitar bintang kompak. Dari Hukum Stefan Boltzmann (Persamaan 2.20), kita tahu bila  $L$  besar dan  $R$  kecil maka  $T$  besar. Jadi temperatur di situ sangat tinggi, dapat mencapai beberapa juta tahun atau beberapa puluh juta derajat. Pada temperatur setinggi itu sebagian besar energi dipancarkan dalam bentuk sinar X. jadi kita mengharapkan bintang neutron dan lubang hitam dalam ganda dapat diamati sebagai sumber sinar X yang kuat.

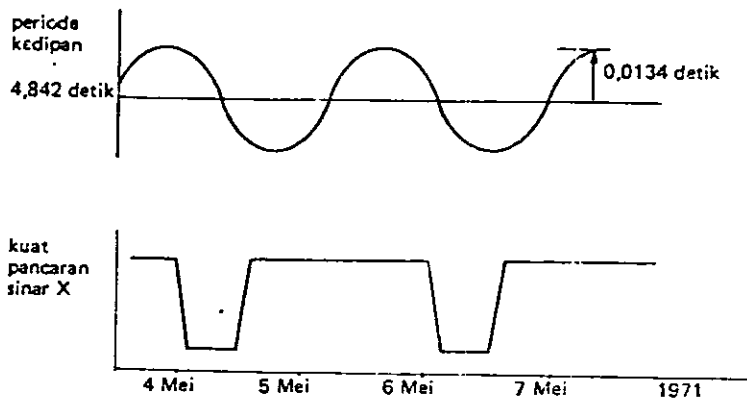
Astronomi sinar X berawal pada tahun 1962 dengan diluncurkannya roket yang membawa alat pengamat sinar X ke ketinggian 150 km oleh

kelompok di Massachusetts Institute Of Technology. Peluncuran itu berhasil menunjukkan adanya sumber sinar X yang kuat di rasi Scorpius yaitu Scorpius X-1. Namun loncatan besar bagi astronomi sinar X baru terjadi pada akhir tahun 1970. Pada waktu itu NASA meluncurkan setelit pertama yang sepenuhnya digunakan untuk mengamati sumber sinar X di antariksa. Setelit tersebut yang diluncurkan dari Kenya bernama Uhuru (yang artinya merdeka dalam bahasa Swahili). Pengamatan dengan setelit jauh lebih cermat daripada dengan roket atau balon karena kala hidup setelit jauh lebih lama. Uhuru menemukan tak kurang dari 339 sumber sinar X yang dikatalogkan dalam katalog Uhuru keempat. Banyak setelit sinar X diluncurkan oleh berbagai negara setelah Uhuru.

Salah satu penemuan Uhuru yang penting adalah ditunjukkan adanya sumber sinar X yang pancarannya berkedip-kedip, sama seperti pancaran radio dari pulsar. Sumber itu disebut *pulsar sinar X*. Contohnya antara lain : Hercules X-1 yang berkedip dengan periode 1,24 detik, Centaurus X-3 yang periode kedipannya 4,84 detik, dan sumber sinar X di Awan Magellan Kecil yaitu SMC X-1 yang berkedip setiap 0,72 detik. Dari pengamatan berbagai setelit sekarang telah ditemukan tak kurang dari 20 pulsar sinar X. Yang tercepat kedipannya A 0538-66 di Awan Magellan Besar yang periodenya 0,069detik. Pada umumnya periode pulsar sinar X lebih lambat dari pulsar radio. Banyak di antaranya yang berkedip dengan periode beberapa menit (periode terpanjang pulsar radio adalah 4,3 detik sedang periode terpanjang pulsar sinar X 835 detik)

Hasil penting Uhuru lainnya adalah ditunjukkan untuk pertama kali adanya *bintang ganda pancaran sinar X* yang salah satu di antaranya adalah Centurus X-3. Centurus X-3 adalah sebuah pulsar sinar X yang berkedip setiap 8,84 detik. Penegamatan Uhuru menunjukkan periode denyutan ini tidak tetap tetapi berubah, kadang-kadang lebih lambat, kadang-kadang lebih cepat. Yang menarik, perubahan ini berlangsung dengan irama yang teratur, yaitu berulang setiap 2,09 hari dengan amplitudo perubahan sebesar 0,0134 detik (gambar 5.9). Peristiwa ini dapat diterangkan kalau Centaurus X-3 anggota bintang ganda. Kita telah mengenal efek Doppler yaitu frekuensi getaran tampak lebih cepat kalau adanya mendekati kita dan tampak lebih lambat kalau bendanya menjauh. Bila dalam gerak orbitnya Centaurus X-3 mendekati kita, sebagai akibat efek Doppler periode kedipannya tampak lebih cepat, bila sedang menjauh periodenya tampak lebih lambat. Karena perubahan periode kedipan ini berirama dengan periode 2,09 hari, dapat disimpulkan kala edar Centaurus X-3 adalah 2,09 hari (gambar 5.9b). Penyebabnya karena pancaran sinar X selama beberapa sinar X terhalang ketika Centaurus X-3 lewat di belakang pasangannya. Dengan kata lain terjadi 'gerhana sinar X' setiap 2,09 hari. Kesamaan irama pada perubahan kedipan akibat efek Doppler dan terjadinya gerhana sinar X menunjukkan keduanya disebabkan oleh hal yang sama yaitu gerak Centaurus X-3 ini baru ditemukan pada tahun 1974 oleh Krzeminski dan merupakan bintang maharaksasa kelas O.





Gambar 5.9 : (a) Efek Doppler akibat gerak orbit menyebabkan periode kedipan Centaurus X-3 tampak berubah-ubah dengan periode 2,09 hari.  
 (b) Gerak orbit juga menyebabkan terjadinya ‘gerhana sinar X’ setiap 2,09 hari.  
 (Winardi Sutantyo, 1983;228)

Seperti kedipan pada pulsar radio, kedipan pulsar sinar X berasal dari bintang neutron yang berputar. Suatu bintang neutron atau lubang hitam yang merupakan anggota bintang ganda dapat diamati sebagai sumber sinar X bila bintang tersebut menyedot materi dari pasangannya. Ditemukannya bintang ganda yang salah satu anggotanya adalah pulsar sinar X merupakan bukti kebenaran teori ini. Teori ini sebenarnya sudah diajukan pada tahun 1967 oleh Zeldovich dan Guseynov, dan secara terpisah oleh Hayakawa dan Matsuko. Namun teori ini mengalami surut karena Scorpius X-1, yaitu bintang pemancaran sinar X yang diketahui waktu itu, tidak menunjukkan ciri bintang ganda. Teori ini menanjak kembali dengan ditemukannya bintang ganda pemancaran sinar X oleh setelit Uhuru.

Sumber sinar X lain yang menarik perhatian adalah Cygnus X-1 yang merupakan salah satu pemancaran sinar X terterang di langit. Sudah sejak awal perkembangan astronomi sinar X diketahui bahwa Cygnus X-1 berubah-ubah pancaran sinar X-nya. Perubahan ini sangat acak, sama sekali tidak mirip pulsar yang perubahannya berirama teratur. Pengamatan Schreier dan rekan-rekannya dengan Uhuru menunjukkan perubahan ini berlangsung sangat cepat, skala waktu perubahannya bisa lebih pendek dari 0,05 detik (artinya dalam selang waktu sependek itu terjadi perubahan pancaran sinar X yang cukup berarti). Hal ini menunjukkan Cygnus X-1 adalah sebuah bintang kompak. Benda yang berukuran sebesar bintang biasa tidak mungkin berubah pancarannya secepat itu. Kesimpulan ini cocok dengan faham yang mengatakan suatu bintang kompak dapat menjadi sumber sinar X bila merupakan anggota bintang ganda. Tetapi apakah Cygnus X-1 anggota bintang ganda? jawabnya ternyata agak berbelit.

Kesulitannya waktu itu adalah mencari bintang kasatmata yang merupakan pasangan Cygnus X-1. Pengamatan sinar X waktu itu hanya memberikan daerah di langit tempat sumber itu berada. Daerah itu disebut *kotak kesalahan*. Di dalam kotak kesalahan terdapat banyak bintang hingga sulit diketahui bintang mana yang merupakan pasangan Cygnus X-1. Pada tahun 1971 terlihat pancaran sinar X Cygnus X-1 menurun. Pada saat yang bersamaan beberapa astronom radio yaitu Breas dan Miley serta Hjellming melihat naiknya pancaran radio di daerah itu. Dengan teknik astronomi radio orang dapat menentukan letak sumber pancaran itu dengan lebih cermat.

Karena peristiwa perubahan pancaran sinar X dan radio berlangsung pada saat hampir bersamaan maka sumber kedua pancaran itu tentu benda yang sama. Pancaran radio itu ternyata berasal dari sebuah bintang maharaksasa kelas O yaitu HD 226 868. Pengamatan oleh Webster dan Murdin menunjukkan bahwa HD 226 868 ternyata adalah bintang ganda spektroskopi tunggal kala edar bintang ganda ini 5,6 hari. Dari berbagai pengamatan orang tak meragukan lagi HD 226 868 adalah pasangan Cygnus X-1. Harga fungsi massa sistem ini menunjukkan bahwa massa Cygnus X-1 harus lebih besar dari  $3 M_{\odot}$ . Bintang kompak dengan massa sebesar ini tentu sebuah lubang hitam. Bila ini benar maka cygnus X-1 adalah lubang hitam yang pertama ditemukan. Sumber sinar X lain yang diduga juga lubang hitam adalah Cygnus X-1. Tetapi bukti bahwa sumber ini sebuah lubang hitam belum menyakinkan seperti Cygnus X-1. Adanya lubang hitam lain di kemukakan oleh Cowley dan rekan-rekannya pada awal 1983, yaitu LMC X-3 yang terletak di Awal Magellan Besar. LMC X-3 merupakan sumber sinar X yang sangat kuat, luminositas sinar X-nya  $4 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$  dan sangat berubah-ubah, Warren dan Penhold menunjukkan pasangan kasatmata LMC X-3 adalah sebuah bintang deret utama kelas B3 yang ternyata merupakan bintang ganda spektroskopi bergaris tunggal dengan kala edar 1,7 hari. Cowley dan rekan-rekannya menunjukkan bahwa berdasarkan fungsi massa sistem tersebut massa LMC X-3 sedikitnya  $7 M_{\odot}$ . Jadi LMC X-3 adalah 'calon kuat' lubang hitam.

Ada perbedaan sifat antara pulsar sinar X dan pulsar radio. Periode rotasi pulsar radio semuanya melambat karena pemancaran energi pulsar radio bersumber pada energi kinetik rotasinya. Lain halnya pada pulsar sinar X yang memancarkan energinya karena menyedot massa dari bintang pasangannya. Karena massa yang disedot ini memberikan momentum sudutnya maka pulsar sinar X cenderung dipercepat rotasinya.

Ada perbedaan lain yang menyolok. Sebagian besar pulsar sinar X (bahkan diduga semuanya) adalah anggota bintang ganda. Tetapi di antara lebih dari 300 pulsar radio hanya tiga yang diketahui anggota bintang ganda. Hal ini menimbulkan pertanyaan, bukankah bintang neutron juga bisa dilahirkan dalam bintang ganda ? Mengapa bintang neutron dalam bintang ganda jarang dapat diamati sebagai pulsar radio ? Jawabnya diberikan oleh Maraschi dan Treves. Materi angin bintang dari pasangannya walaupun renggang sudah cukup untuk menyerap pancaran radio dari bintang neutron itu. Jadi agar radio, bintang pasangannya harus juga merupakan bintang kompak yang tidak membubuskan angin bintang.

Berikut ini akan kita bicarakan kembali pulsar radio. Sesuai kebiasaan kita sebut pulsar radio dengan pulsar saja. Sampai tahun 1974 (saat itu sudah ditemukan 105 pulsar) tak ada satu pun pulsar yang diketahui anggota bintang ganda. Pada tahun 1974 Taylor dan Hulse menemukan sebuah Pulsar yang periode kedipnya cukup cepat yaitu 0,095 detik. Tetapi berbeda dengan pulsar lainnya periode kedipan ini tampak tidak tetap, kadang-kadang lebih lambat, kadang-kadang lebih cepat. Ketika diikuti ternyata perubahannya berlangsung

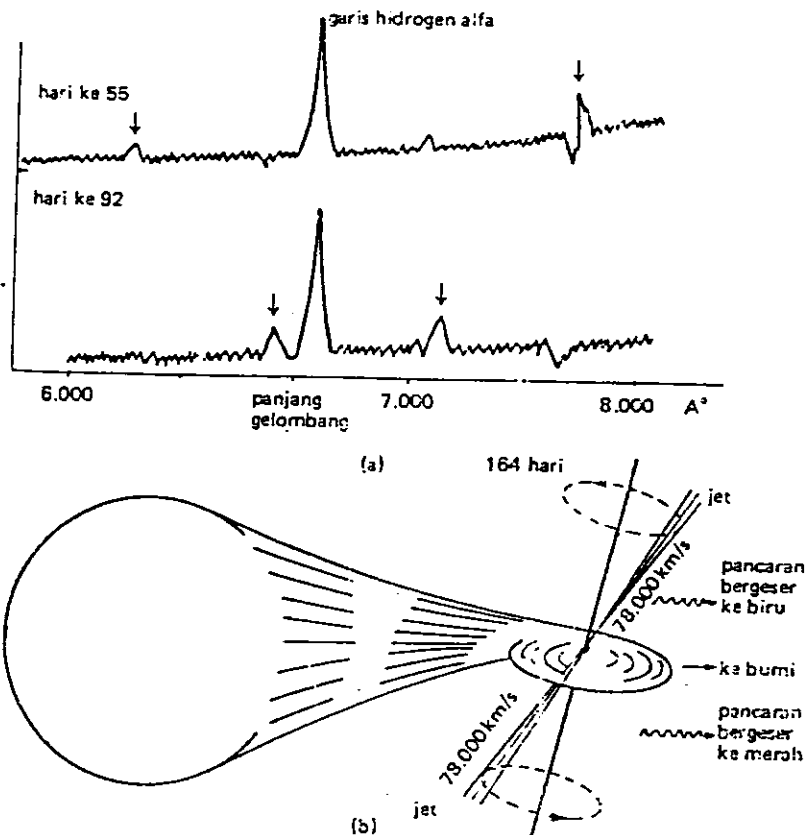
dengan teratur, sama seperti pada bintang ganda pemancar sinar X. perubahan periode kedipan ini dapat dijelaskan sebagai akibat efek Dopplet bila pulsar ini mengorbit pasangannya dengan kala edar 7 jam 45 menit. Pulsar ini dinamakan PSR 1913 + 16 dengan PSR berarti pulsar, 1913 berarti asensio rektanya 19 jam 13 menit, dan +16 berarti deklinasinya +16°. Banyak bukti menunjukkan bahwa pasangan PSR 1913 + 16 juga sebuah bintang neutron.

Teory relativitas Eistein mengatakan bila suatu benda mengorbit benda lain, terjadilah pancaran gelombang gravitasi dari sistem itu. Akibatnya bintang ganda itu akan kehilangan energi dan kedua bintang itu mendekat hingga kala edarnya pun makin cepat. Pada bintang ganda biasa efek ini sukar diamati karena amat kecil pengaruhnya. Lain halnya dengan pulsar ganda, kala edar kedua benda itu dapat ditentukan dengan sangat cermat karena pulsar memancarkan sinyal radionya bagaikan jam atom yang sangat tepat. Sering periode kedipan pulsar dapat ditentukan dengan ketelitian lebih dari 10 angka desimal (data yang diberikan oleh Taylor pada tahun 1980, periode kedipan PSR 1913+16 adalah  $0,059\ 029\ 995\ 269\ 5 \pm 8$  detik). Akibat gerak orbit terjadi efek Doppler pada periode kedipan itu. Dengan mengamati efek Doppler tersebut kala edar dapat ditentukan dengan cermat. Pengamatan oleh Taylor dan rekan-rekannya pada tahun 1980 menunjukkan kala edar sistem bintang ganda PSR 1913+16 makin cepat seseuai dengan yang diramalkan oleh teori Einstein. Ini merupakan bukti kebenaran teori Einstein.

Sekarang telah ditemukan tiga pulsar ganda yaitu PSR 1913+16 yang telah disebut di atas, PSR 0655+64 yang periode kedipannya 0,196 detik dan

kala edarnya 24,7 hari, dan PSR 0820+02 yang periode kedipannya 0,865 detik dan kala edarnya 114 hari.

Pada akhirnya dasawarsa yang lalu suatu pertemuan telah mencengangkan para astronom. Pada waktu itu bintang yang dalam Katalog Stephenson dan Sanduleak mempunyai nomor 443, yang karenanya dikenal dengan nama SS 433, diketahui merupakan sumber radio dan sekaligus juga sumber sinar X (walaupun lemah). Bintang ini berada di tengah suatu bekas supernova yang diduga terjadi 10.000 tahun yang lalu. Pada tahun 1978 Bruce Margon memotret spektrum bintang ini. Ia merasa heran ternyata setiap garis emisi hidrogen mempunyai tiga komponen. Komponen yang terang berada pada panjang gelombang diamnya (yaitu panjang gelombang kalau benda itu tidak bergerak hingga tak ada efek Doppler), komponen yang satu lagi berada disisi merah dan yang lain di sisi biru (gambar 5.10a). Kalau kedua komponen di sisi merah dan biru itu merupakan garis hidrogen yang mengalami pergeseran Doppler maka gas yang memancarkan garis spektrum tersebut harus bergerak dengan kecepatan yang sangat tinggi agar menghasilkan pergeseran yang sedemikian besarnya. Dapat ditentukan bahwa garis di sisi merah dihasilkan oleh materi yang menjauhi kita dengan



Gambar 5.10 : (a) Garis emisi hidrogen alfa SS 433 mempunyai dua komponen di sisi merah dan biru yang bergeser mondar-mandir.  
 (b) Timbulnya kedua komponen itu disebabkan oleh pancaran materi pada arah yang berlawanan oleh suatu bintang kompak. Bintang kompak itu menyedot materi dari bintang pasangannya.  
 (Wuinardi Sutantyo, 1983;232)

kecepatan 50.000 kilometer per detik (lebih dari 10 persen kecepatan cahaya!), sedangkan garis di sisi biru dihasilkan oleh materi yang terpancar ke arah kita dengan kecepatan 30.000 kilometer per detik. Kecepatan sebesar itu belum pernah diamati pada benda dalam galaksi kita. Sebagai contoh, gerak orbit bintang ganda umumnya hanya beberapa ratus kilometer per detik.

Beberapa ahli teori berhasil menerangkan peristiwa itu. SS 443 adalah sebuah bintang kompak yang memancarkan materi pada dua arah yang berlawanan, membentuk dua buah 'jet' seperti diperlihatkan pada gambar 5.10b. bintang kompak ini merupakan anggota bintang ganda dan menyedot materi bintang pasangannya. Materi yang tersedot itu membentuk piringan di sekitarnya. Yang menarik perhatian ialah dua garis emisi hidrogen di sisi merah dan biru yang tidak tetap tempatnya. Pada suatu saat kedua garis itu bergeser saling mendekati dan akhirnya bertemu, setelah itu keduanya kembali berpisah saling menjauhi. Gerak mondar-mandir kedua garis spektrum itu berlangsung dengan irama yang teratur. Kedua garis itu berjumpa dua kali setiap 164 hari. Peristiwa ini dapat dijelaskan kalau kedua jet itu tidak tetap arahnya terhadap kita melainkan *berpresesi* dengan periode 164 hari ( yaitu bergerak pada lintasan yang digambarkan dengan garis putus pada gambar 5.10b; gerak presesi ini menyerupai gerak mengoleng sumbu putar sebuah gasing). Bila kedua jet itu kebetulan terletak pada bidang langit (bidang yang tegak lurus arah pandang kita) maka kedua komponen garis emisi itu berimpit. Hal ini terjadi dua kali setiap 164 hari. Kalau ini benar, kita tentu berpikir bahwa kedua garis itu bertemu pada panjang gelombang diamnya. Tetapi kenyataannya bukan demikian, kedua garis bertemu di suatu panjang gelombang yang lebih merah dari panjang gelombang diam kedua garis itu. Beda antara titik temu dan panjang gelombang diam menunjukkan kecepatan 10.000 kilometer per detik. Kalau begitu apakah seluruh benda itu bergerak menjauhi kita dengan kecepatan sebesar itu ? Ternyata tidak, peristiwa itu



disebabkan oleh efek yang dalam mekanika relativistik disebut *efek Doppler transversal* (berdasarkan teori relativitas Einstein, cahaya yang dipancarkan oleh benda yang bergerak dengan kecepatan sangat tinggi walaupun arahnya *tegak lurus* arah garis pandang akan berubah panjang gelombangnya menjadi lebih panjang). Kedua jet itu dipancarkan dengan kecepatan 78.000 kilometer per detik. Tetapi kita tidak melihat kecepatan sebesar itu (maksimum hanya sekitar 50.000 kilometer per detik) karena arah pancaran jet itu tidak tepat mengarah ke kita. Kecepatan sebesar itu ternyata sama dengan kecepatan lepas (kecepatan yang diperlukan untuk lepas dari medan gravitasi) di permukaan bintang neutron. Ternyata ini bukan hal yang kebetulan. Hal ini lebih meyakinkan kita bahwa bintang yang memancarkan gas dalam sistem SS 433 itu adalah sebuah bintang neutron.

Para astronom telah dapat memberikan tafsiran yang meyakinkan tentang peristiwa yang terjadi di SS 433. Tetapi orang belum mengetahui dengan pasti mekanisme apa yang menyebabkan pancaran materi dalam bentuk dua jet yang berlawanan arah itu. Sebenarnya pancaran jet bukan peristiwa baru bagi para astronom. Sudah sejak lama para astronom mengamati pancaran jet semacam itu dari galaksi yang aktif. SS 433 merupakan 'tiruan' dalam skala yang jauh lebih kecil dari peristiwa yang jamak di alam semesta yang lebih besar. Anehnya, mengapa hanya ada satu benda seperti itu dalam galaksi kita? Mana yang lain ?

Kemajuan di bidang pengamatan astronomi telah mengungkapkan berbagai 'keanehan' yang sering tak pernah terbayangkan sebelumnya. Bila

mulanya astronom hanya mengamati benda antariksa melalui jendela optik atmosfer bumi, sekarang penglihatan mereka diperluas ke jendela radio, inframerah, ultraungu, sinar X, dan sinar gamma. Setiap langkah besar pada teknik pengamatan di daerah pandang yang tadinya tak terjangkau itu sering diikuti oleh penemuan yang menakjubkan. Sekarang informasi mengalir deras dari antariksa melalui berbagai peralatan modern. Hal ini menuntut kerja lebih keras bagi para astronom untuk menafsirkan semuanya itu.

Perlu disadari bahwa jagat raya ini penuh dengan misteri yang seringkali sulit dibayangkan oleh akal manusia, makhluk yang hidup di “sebutir debu bintang” yang bernama bumi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Depdikbud. 1980, *Bumi dan Antariksa* untuk SMA, Balai pustaka. Jakarta.
- Fusminarto. 1993. *Pokok-pokok Fisika Modern*. Depdikbud, Jakarta.
- Moh. Ma'mur Tanudidjaya, 1995, *Ilmu Pengetahuan Bumi dan Antariksa*, Depdikbud, Jakarta.
- P. Wayong dan Djenen Bale, 1977. *Bumi dan Antariksa* jilid Idan 2, Balai Pustaka Jakarta.
- Pasachoff, Jay M. 1979, *Astronomy from the Earth to the Universe*, Saunders College, Philadelphia.
- Soendjojo D, 1986, *Ilmu Pengerahuan Bumi dan Antariksa*, Karunika, Jakarta.
- Winardi Sutantyo, 1983, *Astrofisika Mengenal Bintang*, Penerbit ITB, Bandung.
- Zim. Herbets and Robert H. Baker, *Stars a Guide to the Constellations, Sun, Moon, Planets and Other Fetures of the Heavens*, Golden Press, New York.