

Evolusi Bintang

John Percy

International Astronomical Union, University of Toronto (Canada)

Rangkuman

Artikel ini berisi informasi mengenai bintang dan evolusi bintang untuk para guru fisika/sains pada jenjang SMA. Artikel ini juga berisi materi yang dapat berkaitan dengan kurikulum mata pelajaran sains di sekolah dan terdapat beberapa aktivitas yang dapat dilakukan oleh para siswa yang berhubungan dengan materi ini.

Tujuan

- Dapat memahami evolusi bintang dan proses yang terjadi didalamnya
- Dapat memahami Diagram Hertzsprung-Russell
- Dapat memahami konsep magnitudo mutlak dan magnitudo semu

Pendahuluan

Evolusi bintang merupakan perubahan yang terjadi pada bintang, mulai dari kelahiran bintang, kehidupan bintang, hingga kematian bintang. Gaya gravitasi yang ada pada bintang, ‘memaksa’ bintang untuk meradiasikan energi. Untuk mengimbangi kehilangan energi akibat radiasi, bintang memproduksi energi dengan cara reaksi fusi nuklir yang menggabungkan elemen ringan menjadi elemen yang lebih berat. Reaksi nuklir ini secara perlahan mengubah komposisi kimia dan properti bintang. Akibatnya pada suatu ketika tidak terdapat lagi elemen yang dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir dan akhirnya bintang mati. Memahami sifat dan evolusi dari bintang dapat membuat kita untuk dapat lebih menyadari bagaimana evolusi dari Matahari kita, bintang yang membuat Bumi memiliki kehidupan. Dengan mempelajari sifat dan evolusi bintang dapat membantu kita untuk memahami asal-usul tatasurya dan bagaimana terciptanya atom dan molekul yang ada di alam semesta, hingga bagaimana terciptanya kehidupan. Kemudian muncul berbagai pertanyaan, seperti “Apakah bintang lain juga menciptakan cukup energi dan hidup cukup lama hingga dapat stabil dan dapat menciptakan kehidupan di planetnya?”, untuk menjawabnya maka penting bagi kita untuk mempelajari mengenai evolusi bintang.

Properti Matahari dan Bintang

Langkah pertama untuk mempelajari asal-usul dan evolusi dari Matahari dan bintang adalah dengan memahami propertinya. Para siswa harus lebih dahulu memahami bagaimana cara kita menentukan properti dari suatu bintang. Matahari merupakan bintang yang paling dekat dengan kita. Materi tentang Matahari sudah dibahas pada bab lain pada buku ini. Pada bab ini kita juga membahas Matahari karena Matahari juga merupakan bintang, sehingga saat mempelajari evolusi bintang, maka kita juga belajar tentang evolusi Matahari. Para siswa

harus paham mengenai properti, struktur, dan sumber energi dari Matahari, karena dengan kosep yang sama para astronom dapat menentukan struktur dan evolusi dari Bintang.

Matahari

Properti Matahari cukup mudah untuk ditentukan karena letaknya yang dekat dengan kita, dibandingkan dengan bintang-bintang lain yang sangat jauh. Jarak rata-rata Matahari ke bumi adalah $1.495978715 \times 10^{11}$ m; yang kita sebut dengan satuan astronomi (sa). Dengan melakukan pengamatan, maka kita bisa mengetahui jari-jari sudut Matahari (959.63 detik busur), dari jari-jari ini kemudian dapat dikonversikan kedalam jari-jari geometri yakni 696265 km. Fluks Matahari yang teramati adalah 1370 W/m^2 , dengan memperhitungkan jarak Bumi-Matahari maka total daya dari Matahari adalah $3.86 \times 10^{26} \text{ W}$.

Massa Matahari dapat ditentukan dengan melihat tarikan gravitasi Matahari terhadap planet-planet di tatasurya, dengan menggunakan hukum gravitasi Newton didapat massa Matahari sebesar 1.9891×10^{30} kg. Temperatur dari permukaan Matahari sekitar 5780 K. Periode rotasi Matahari sekitar 25 hari, namun bervariasi bergantung dengan lintangnya, dan Matahari bentuknya hampir bola sempurna. Matahari terdiri dari sebagian besar hidrogen dan helium. Pada aktivitas 2, siswa dapat melakukan pengamatan Matahari, bintang terdekat dari kita, untuk dapat memahami bagaimana bentuk bintang.

Bintang

Properti dari bintang yang paling mudah untuk diamati adalah kecerlangannya, atau biasa disebut magnitudo semu. Magnitudo merupakan besaran yang digunakan untuk menggambarkan kecerlangan bintang yang merupakan fungsi logaritmik dari fluks bintang yang kita terima di Bumi.

Skala magnitudo bintang dikembangkan oleh astronom Yunani Hipparchus (190-120 SM). Dia mengklasifikasikan bintang dengan magnitudo 1, 2, 3, 4, dan 5. Bintang yang lebih redup memiliki nilai magnitudo yang lebih besar atau lebih positif. Kemudian selanjutnya, diketahui ternyata indra penglihatan kita beraksi secara logaritmik terhadap cahaya, dan terdapat perbandingan kecerlangan yang tetap (2.512 kali) pada setiap perbedaan 1 magnitudo. Bintang yang paling terang ada di langit memiliki magnitudo -1.44. Sedangkan bintang teredup yang dapat diamati menggunakan teleskop paling besar adalah magnitudo 30.

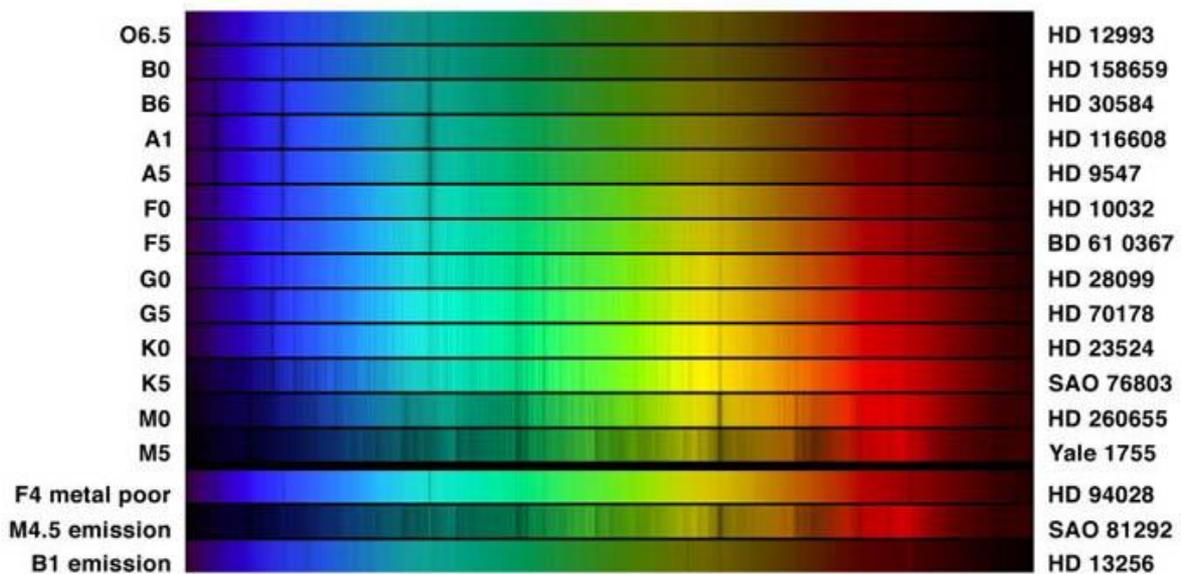
Kecerlangan, B , dari suatu bintang bergantung dengan kuat daya bintang atau luminositasnya, P , dan jaraknya, D . Kemudian berdasarkan hukum kuadrat kebalikan dari kecerlangan: kecerlangan sebanding dengan dayanya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya: $B = P/D^2$.

Pada bintang-bintang yang dekat, jarak bintang dapat dihitung menggunakan paralaks. Pada aktifitas 1, para siswa akan diberi kesempatan untuk melakukan demonstrasi yang dapat menggambarkan konsep paralaks, dan dapat menunjukkan bahwa paralaks berbanding terbalik dengan jarak dari objek yang kita lihat. Maka daya dari bintang dapat dihitung dari besarnya nilai kecerlangan dan menggunakan hukum kuadrat kebalikan dari kecerlangan. Bintang tidak memiliki warna yang sama, jika diperhatikan dengan teliti, bintang satu dengan lainnya akan

memiliki warna yang sedikit berbeda; yang paling jelas dapat dilihat pada bintang Rigel (beta Orionis) dan Betelgeuse (alfa Orionis) yang ada di rasi Orion (gambar 1). Pada aktivitas 3, siswa dapat melakukan pengamatan bintang di malam hari dan mendapatkan pengalaman menikmati keindahan langit di malam hari. Warna yang muncul di bintang diakibatkan oleh perbedaan temperatur yang diradiasikan bintang. Bintang yang lebih ‘dingin’ akan cenderung berwarna kemerahan, sedangkan bintang yang lebih panas akan berwarna kebiruan. Warna bintang dapat ditentukan dengan presisi menggunakan fotometer dengan filter warna, dan temperatur bintang kemudian ditentukan dari warnanya.



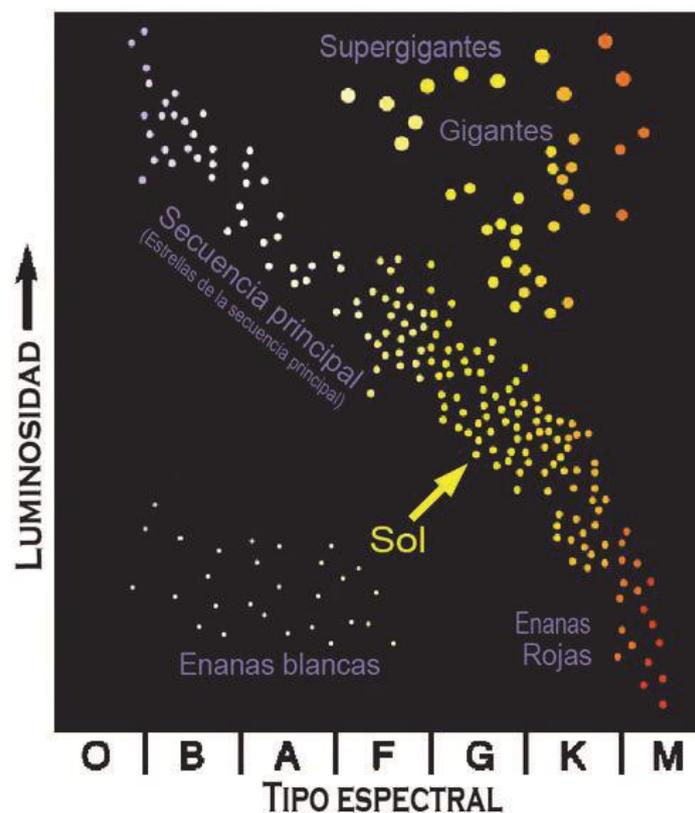
Gambar 1: Orion Constellation. Betelgeuse, bintang kiri atas, sejuk dan karenanya tampak kemerahan. Deneb, bintang kanan bawah, panas dan karenanya tampak kebiru-biruan. Nebula Orion muncul di bawah tiga bintang di tengah rasi bintang.



Gambar. 2: Spektrum banyak bintang, dari yang terpanas (O6.5: atas) hingga paling keren (M5: keempat dari bawah). Perbedaan penampilan spektra disebabkan oleh perbedaan suhu bintang-bintang. Tiga spektrum bawah adalah bintang-bintang yang aneh dalam beberapa hal. Sumber: Observatorium Astronomi Optik Nasional.

Temperatur bintang dapat ditentukan dari spektrumnya, yakni distribusi dari warna dan panjang gelombang dari cahaya bintang (gambar 2). Gambar ini menggambarkan keindahan dari warna cahaya yang dihasilkan oleh bintang. Cahaya yang dihasilkan bintang, sebelum sampai ke mata kita harus melewati atmosfer bintang terlebih dahulu, kemudian ion, atom, dan molekul pada atmosfer bintang akan menyerap beberapa cahaya pada panjang gelombang tertentu, akibatnya pada spektrum bintang muncul garis-garis gelap (gambar 2). Bergantung dengan temperatur atmosfer, atom dapat terionisasi, tereksitasi, atau terkombinasi menjadi molekul. Keadaan atom yang teramati, dalam spektrum, dapat memberikan informasi mengenai temperatur.

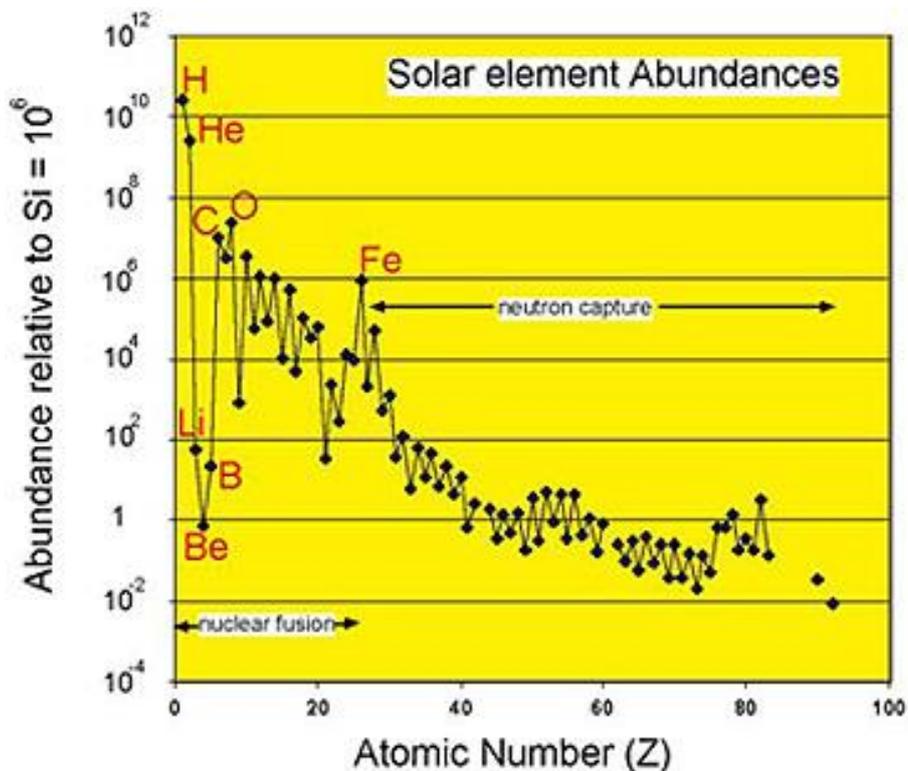
Seabad yang lalu, astronom menebak hubungan penting antara daya/luminositas yang dihasilkan bintang dengan temperatur bintang: setidaknya untuk sebagian besar bintang, luminositas bintang akan lebih besar untuk bintang yang lebih panas. Kemudian baru diketahui bahwa faktor yang paling mempengaruhi ternyata adalah massa bintang: bintang dengan massa besar memiliki luminositas dan temperatur yang lebih besar. Diagram luminositas-temperatur disebut diagram Hertzsprung-Russell (gambar 3). Sangat penting bagi para siswa untuk belajar membuat grafik ini (aktivitas 8) dan menginterpretasikannya dengan diagram Hertzsprung-Russell pada gambar 3.



Gambar 3: Diagram Hertzsprung-Russell, grafik kekuatan bintang atau luminositas versus suhu bintang. Untuk alasan historis, suhu meningkat ke kiri. Huruf OBAFGKM adalah jenis spektral deskriptif yang terkait dengan suhu. Garis-garis diagonal menunjukkan jari-jari bintang; bintang yang lebih besar (raksasa dan supergiant) berada di kanan atas, yang lebih kecil (kurcaci) berada di kiri bawah. Perhatikan urutan utama dari kanan bawah ke kiri atas. Sebagian besar bintang ditemukan di sini. Massa bintang sekuens utama ditampilkan. Lokasi

beberapa bintang terkenal juga ditampilkan. Sumber: University of California Berkeley. Sumber: Observatorium Astronomi Optik Nasional..

Tujuan besar utama dari astronomi adalah untuk menentukan luminositas bintang untuk berberbagai bintang. Kemudian, jika kita dapat mengamati bintang dengan tipe yang sama di tempat lain di alam semesta, maka astronom dapat menggunakan kecerlangannya, B , dan daya atau luminositasnya, P , untuk menentukan jaraknya menggunakan hukum kuadrat kebalikan: $B=P/D^2$. Spektrum bintang (dan nebula) dapat juga menunjukkan tentang bahan pembentuk bintang: kelimpahan kosmik (gambar 4). Bahan-bahan ini terdiri dari sekitar $\frac{3}{4}$ hidrogen, $\frac{1}{4}$ helium, 2% elemen berat, yang sebagian besar karbon, nitrogen dan oksigen



Gambar 4: Kelimpahan unsur-unsur di Matahari dan bintang-bintang. Hidrogen dan helium paling banyak. Lithium, berilium, dan boron memiliki kelimpahan yang sangat rendah. Karbon, nitrogen, dan oksigen berlimpah. Kelimpahan unsur-unsur lain sangat menurun dengan meningkatnya jumlah atom. Hidrogen 1012 kali lebih banyak daripada uranium. Elemen dengan jumlah proton yang genap memiliki kelimpahan yang lebih tinggi daripada elemen dengan jumlah proton yang ganjil. Unsur yang lebih ringan dari besi dihasilkan oleh fusi nuklir di bintang-bintang. Unsur yang lebih berat dari besi dihasilkan oleh penangkapan neutron dalam ledakan supernova. Sumber: NASA.

Sekitar setengah dari bintang-bintang yang ada di dekat Matahari merupakan bintang ganda – yakni dua bintang yang saling mengorbit satu sama lain. Bintang ganda merupakan objek yang penting untuk diteliti karena dari bintang ganda, astronom dapat menurunkan nilai massa suatu bintang. Massa satu bintang dapat dihitung dengan mengamati gerak bintang yang lainnya, begitu juga sebaliknya. Sirius, Procyon, dan Capella merupakan contoh dari bintang ganda. Terdapat juga bintang yang sistemnya terdiri dari lebih dari dua bintang: terdapat tiga atau lebih bintang yang saling mengorbit satu sama lain. Alfa Centauri, bintang

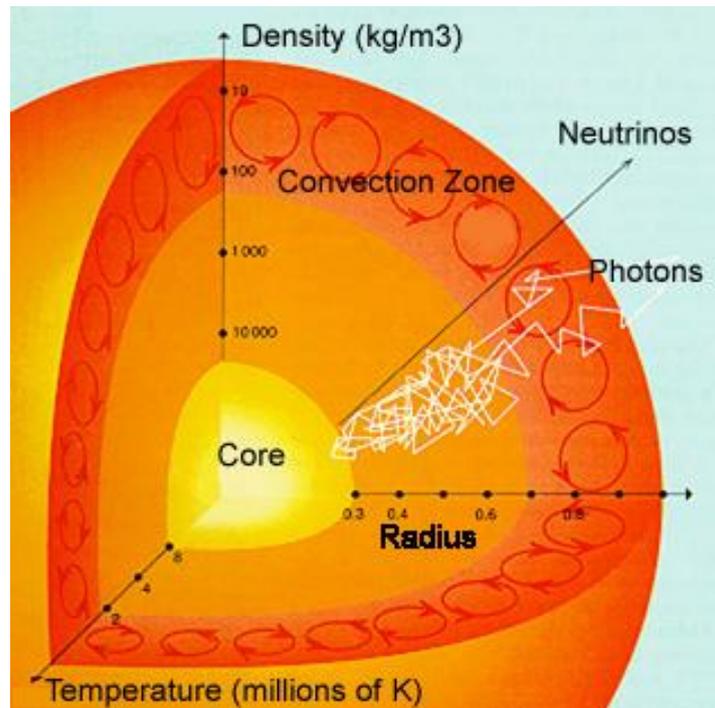
terdekat dari Matahari, merupakan sistem bintang yang terdiri dari tiga bintang Epsilon Lyrae merupakan sistem bintang dengan empat bintang.

Seperti yang telah disebutkan di atas, terdapat hubungan erat antara luminositas dan massa bintang: luminositas kira-kira sebanding dengan massa pangkat tiga. Hubungan ini disebut dengan hubungan massa-luminositas.

Massa bintang berada pada rentang 0.1 hingga 100 kali Massa Matahari. Luminositas bintang berada pada rentang 0.0001 hingga 1 juta kali luminositas Matahari. Bintang normal paling panas berada pada suhu sekitar 50000 K; sedangkan yang paling dingin memiliki suhu 2000 K. Ketika astronom melakukan survey bintang, mereka mendapati bahwa Matahari ternyata lebih besar dan terang dibandingkan dengan 95% bintang yang berada di sekitar Matahari. Bintang dengan massa besar dan terang jarang ditemui. Matahari bukan merupakan bintang biasa, yang ternyata merupakan bintang yang di atas rata-rata.

Struktur Matahari dan Bintang

Struktur Matahari dan bintang ditentukan sebagian besar dari gravitasi. Gravitasi menyebabkan fluida yang membentuk Matahari memiliki bentuk hampir bola. Jika kita meninjau bagian dalam Matahari, tekanan akan meningkat, karena ditekan oleh berat dari lapisan gas di atasnya. Berdasarkan hukum gas ideal, yang berlaku untuk gas ideal, kerapatan dan temperatur gas akan membesar jika tekanan membesar. Jika pada lapisan lebih dalam suhunya lebih panas, maka kalor akan mengalir ke arah luar, karena kalor akan mengalir dari suhu tinggi ke suhu lebih rendah. Proses transfer kalor ini dapat terjadi melalui radiasi atau konveksi. Ketiga prinsip di atas kemudian menghasilkan hubungan massa-luminositas. Jika kalor mengalir keluar dari Matahari, maka lapisan dalamnya temperaturnya menurun, dan gravitasi akan menyebabkan Matahari berkontraksi kecuali jika energinya diproduksi pada bagian inti dari Matahari. Namun ternyata Matahari tidak mengalami kontraksi, karena ditahan oleh tekanan radiasi yang ditimbulkan oleh proses fusi nuklir yang dijelaskan berikut.



Gambar 5: Potongan melintang Matahari, sebagaimana ditentukan dari model fisik. Di zona konveksi luar, energi diangkut oleh konveksi; di bawah itu, ia diangkut oleh radiasi. Energi dihasilkan dalam inti. Sumber: Institut Fisika Teoritis, Universitas Oslo.

Empat prinsip ini berlaku untuk semua bintang yang ada di alam semesta. Prinsip-prinsip ini dapat dituliskan kedalam persamaan-persamaan dan diselesaikan menggunakan komputer. Hal ini dapat digunakan untuk memodelkan Matahari dan bintang lainnya: memodelkan tekanan, kerapatan, dan aliran energi pada jarak tertentu dari pusat bintang. Pemodelan ini merupakan metode dasar yang digunakan astronom untuk mempelajari tentang struktur dan evolusi bintang. Model dibuat berdasarkan asumsi massa dan komposisi bintang; dan dari hal tersebut astronom dapat memprediksi radius bintang, luminositas, dan properti lain yang dapat diamati (gambar 5).

Astronom telah mengembangkan metode yang baik untuk menguji model yang mereka gunakan untuk memodelkan struktur Matahari dan bintang –helioseismologi atau untuk bintang lain, astroseismology. Matahari dan bintang ternyata bergetar dengan pola atau mode yang berbeda-beda. Hal ini dapat diamati dengan menggunakan instrumen yang sensitif dan membandingkannya dengan properti getaran yang diprediksi melalui model.

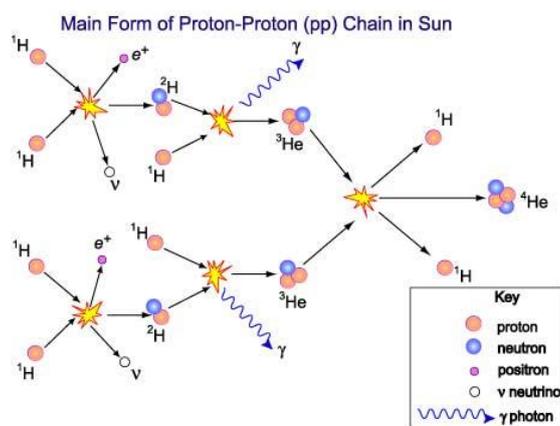
Sumber Energi Matahari dan Bintang

Para saintis bertanya-tanya selama beberapa abad mengenai sumber energi yang dimiliki oleh Matahari dan Bintang. Sumber utama yang paling mudah adalah berasal dari pembakaran dari suatu bahan bakar seperti minyak atau gas alam, namun karena daya dari Matahari yang sangat besar (41026 W), sumber energi ini hanya akan bertahan selama ribuan tahun. Namun, hingga beberapa abad yang lalu, manusia masih beranggapan bahwa usia Bumi dan alam semesta hanyalah beberapa ribu tahun.

Setelah Newton mengembangkan teori Gravitasi secara Umum, para ilmuwan kemudian menyadari bahwa bintang dan Matahari mungkin menciptakan energi dengan cara secara perlahan berkontraksi (menyusut). Energi potensial gravitasi dapat diubah menjadi panas dan radiasi. Sumber energi ini dapat bertahan hingga puluhan juta tahun. Namun, bukti geologi menunjukkan bahwa Bumi, dan juga Matahari ternyata jauh lebih tua dari ini. Pada akhir abad 19, ilmuwan menemukan radioaktif atau reaksi fisi nuklir. Namun, elemen radioaktif, ternyata sangat jarang ditemui baik di Bumi maupun Bintang, sehingga tidak dapat menyediakan energi selama milyaran tahun.

Hingga pada akhirnya, pada abad ke 20, para ilmuwan menyadari bahwa elemen ringan dapat mengalami reaksi fusi (penggabungan) menjadi elemen yang lebih berat yang disebut dengan reaksi fusi nuklir. Jika temperatur dan kerapatan cukup, maka proses ini dapat menghasilkan energi dengan jumlah sangat besar –lebih dari cukup untuk Matahari dan bintang. Elemen yang memiliki energi potensial fusi paling besar adalah hidrogen dan hidrogen merupakan elemen yang paling melimpah di Matahari dan bintang.

Pada bintang bermassa rendah seperti Matahari, fusi hidrogen terjadi melalui beberapa tahapan yang disebut dengan *pp chain*. Proton akan saling bergabung membentuk deuterium. Proton lain kemudian bergabung dengan deuterium untuk membentuk helium-3. Inti Helium-3 akan mengalami fusi untuk membentuk helium-4, isotop normal dari helium (gambar 6).

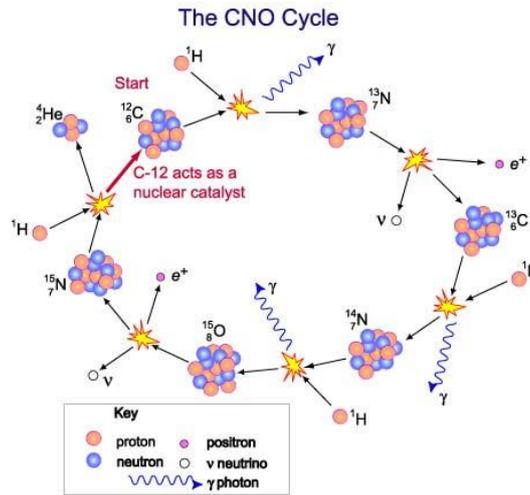


Gambar 6: Rantai reaksi proton-proton yang dengannya hidrogen menyatu menjadi helium di Matahari dan bintang bermassa rendah lainnya. Dalam gambar ini dan gambar berikutnya, perhatikan bahwa neutrino (ν) dipancarkan dalam beberapa reaksi. Energi dipancarkan dalam bentuk sinar gamma (sinar γ) dan energi kinetik inti. Sumber: Fasilitas Teleskop Nasional Australia.

Pada bintang massif, hydrogen akan bergabung membentuk helium melalui beberapa tahapan yang disebut dengan siklus CNO, yang menggunakan karbon-12 sebagai katalis (gambar 7). Hasil akhirnya adalah setiap empat inti hydrogen akan bergabung membentuk satu inti helium. Sebagian kecil dari massa hydrogen akan dikonversi menjadi energi.

Karena inti biasanya akan saling tolak menolak karena muatannya positif, maka reaksi fusi atau penggabungan hanya akan terjadi saat inti saling bertumbukan pada energi tinggi (temperature tinggi) dan terjadi secara sering (kerapatan tinggi).

Jika fusi nuklir memberi energi pada Matahari, maka reaksi fusi akan menghasilkan partikel sub-atomik yang disebut neutrino dalam jumlah banyak. Partikel ini biasanya akan menembus benda apapun tanpa berinteraksi dengan bendanya.



Gambar 7: Siklus CNO di mana hidrogen menyatu menjadi helium dalam bintang-bintang yang lebih masif daripada Matahari. Karbon-12 (bertanda "mulai") bertindak sebagai katalis; ia berpartisipasi dalam proses tanpa digunakan sendiri. Sumber: Australia National Telescope Facility.

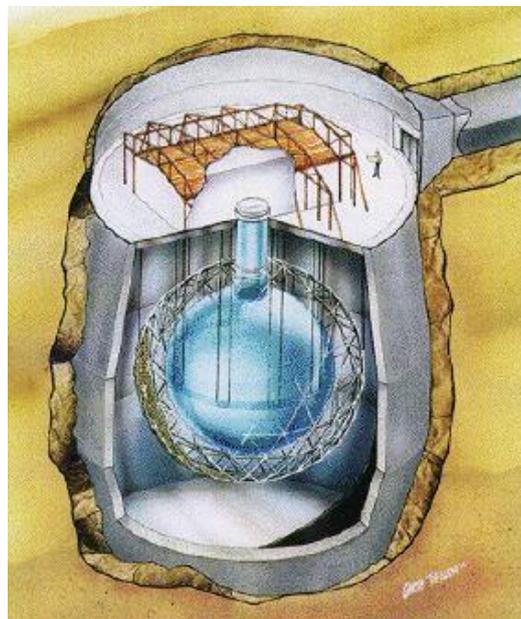


Fig. 8: The Sudbury Neutrino Observatory, where scientists confirmed the models of nuclear fusion in the Sun by observing the predicted flux of neutrinos. The heart of the observatory is a large tank of heavy water. The deuterium nuclei (see text) occasionally interact with a neutrino to produce an observable flash of light. Source: Sudbury Neutrino Observatory

Terdapat milyaran neutrino yang melewati tubuh kita setiap detiknya. Observatorium khusus neutrino dapat mendeteksi beberapa dari neutrino ini. Observatorium neutrino pertama hanya dapat mendeteksi sepertiga dari jumlah neutrino yang diperkirakan. Permasalahan neutrino ini bertahan selama 20 tahun, hingga akhirnya diselesaikan oleh Sudbury Neutrino Observatory

(SNO) di Kanada (gambar 8). Pusat dari observatorium merupakan sebuah tangka air besar yang berisi air berat –air yang sebagian intinya hidrogennya merupakan deuterium. Inti ini terkadang akan menyerap neutrino dan menghasilkan berkas cahaya. Terdapat tiga tipe neutrino, dua per tiga dari neutrino dari Matahari akan berubah menjadi tipe yang lain. SNO sensitif terhadap ketiga jenis neutrino sehingga dapat mendeteksi seluruh neutrino yang diprediksi teori.

The Lives of the Sun and Stars:

Metode penelitian sains merupakan konsep dasar dalam menjelaskan sains, sehingga kita harus mulai dari menjelaskan bagaimana para astronom dapat memahami evolusi bintang:

- Dengan menggunakan simulasi komputer yang berdasar hukum fisika yang telah dijelaskan sebelumnya.
- Dengan mengamati bintang di langit, yang mana bervariasi pada setiap tahap evolusi, kemudian tahapan itu akan disatukan pada suatu urutan evolusi bintang
- Dengan mengamati gugus bintang: sekumpulan bintang yang terbentuk dari satu awan debu dan gas, pada satu waktu namun dengan massa yang berbeda. Terdapat ribuan gugus bintang di galaksi kita. Hyades, Pleiades, dan sebagian besar bintang di Ursa Major sebenarnya adalah gugus bintang yang tidak dapat dilihat dengan mata telanjang. Gugus bintang merupakan “laboratorium alam”: sekelompok bintang terbentuk dari material yang sama pada tempat yang sama pada waktu yang bersamaan. Bintang-bintang ini hanya berbeda pada massanya. Karena gugus yang berbeda memiliki umur yang berbeda, kita dapat melihat sekumpulan bintang dengan massa yang berbeda akan terlihat pada usia yang berbeda setelah lahir.
- Dengan mengamati secara langsung tahapan evolusi yang terjadi secara cepat. Hal ini akan sangat jarang terjadi, karena tahap ini hanya terjadi pada sebagian kecil dari siklus kehidupan bintang..
- Dengan mempelajari perubahan periode dari bintang variabel. Perubahan yang terjadi sangat kecil, namun dapat diamati. Periode bintang ini bergantung dengan radius bintang. Ketika radius berubah akibat evolusi, periodenya maka juga akan ikut berubah. Perubahan periode dapat dihitung menggunakan pengamatan jangka panjang dan sistematis dari bintang

Metode pertama, menggunakan simulasi komputer, merupakan metode yang sama yang digunakan untuk menentukan struktur bintang. Setelah struktur bintang diketahui, maka kita dapat mengetahui temperatur dan kerapatan pada tiap titik di dalam bintang, dan kita dapat memperhitungkan bagaimana komposisi kimia dapat berubah akibat dari proses termal nuklir yang terjadi. Perubahan komposisi ini kemudian dapat dihubungkan dengan model selanjutnya yakni model evolusi bintang.

Bintang variabel berdenyut paling terkenal disebut sebagai Cepheids, yang diambil dari bintang Delta Cephei yang merupakan contoh bintang yang terang. Terdapat hubungan antara variasi periode dari bintang Cepheid dan luminositasnya. Dengan menghitung periodenya, astronomer dapat menentukan luminositas dan jarak dapat ditentukan dengan hukum kuadrat kebalikan dari kecerlangan. Cepheid merupakan alat yang penting untuk menentukan ukuran dan skala umur dari alam semesta.

Kehidupan dan Kematian Matahari dan Bintang

Fusi hidrogen merupakan proses yang sangat efisien. Proses inilah yang dapat menyebabkan bintang memancarkan cahaya selama hidupnya. Reaksi fusi terjadi paling cepat di daerah pusat bintang, diaman temperatur dan kerapatannya paling tinggi. Bintang kemudian membentuk inti helium yang kemudian mengembang kearah luar. Saat ini terjadi, inti bintang harys semakin panas semakin panas, dengan cara menyusut, supaya hidrogen disekitar inti helium bisa cukup panas untuk melakukan reaksi fusi. Hal ini menyebabkan lapisan luar dari bintang bisa mengembang –pelan kemudian menjadi cepat. Lalu bintang akan menjadi bintang raksasa merah, mencapai ukuran ratusan kali lebih besar dari Matahari. Kemudian pusat dari inti helium akan menjadi cukup panas untuk melakukan reaksi fusi helium menjadi karbon. Fusi ini akan mengimbangi tarikan ke dalam dari gravitasi, namun tidak akan terjadi terlalu lama, karena fusi helium tidak seefektif fusi hidrogen. Sekarang inti karbon akan menyusut, dan kemudian menjadi panas, dan lapisan luar bintang mengembang menjadi bintang yang lebih besar dari raksasa merah. Bintang yang paling masif akan mengembang menjadi ukuran yang jauh lebih besar lagi, menjadi bintang super raksasa merah.

Lamanya kehidupan bintang juga bergantung dengan massanya: bintang dengan massa rendah memiliki luminositas rendah dan memiliki waktu hidup yang sangat lama –puluhan milyar tahun. Massa dengan massa besar memiliki luminositas tinggi dan usia yang pendek –jutaan tahun. Sebagian besar bintang adalah bintang massa rendah dan massa hidupnya melebihi usia alam semesta sekarang.



Gambar. 9: Nebula Helix, sebuah nebula planet. Gas-gas di nebula dikeluarkan dari bintang selama fase evolusi raksasa merahnya. Inti bintang itu adalah katai putih panas. Itu bisa dilihat, samar-samar, di tengah nebula. Sumber: NASA.

Sebelum bintang mati, bintang akan akan kehilangan massa. Selama bintang menggunakan bahan bakar hidrogen terakhirnya dan kemudian helium, bintang akan membengkak menjadi bintang raksasa merah, lebih dari ratusan kali lebih besar dalam radius dari matahari, dan lebih dari milyaran kali lebih besar dalam volume dari Matahari. Pada aktivitas 4, siswa dapat membuat model skala, untuk menggambarkan perubahan ukuran dari bintang selama ia berevolusi. Gravitasi di lapisan luar pada rakasasa merah sangat kecil. Juga bintangnya akan menjadi tidak stabil untuk berdenyut, ekspansi dan kontraksi yang berirama. Karena ukuran rakasasa merah yang besar, membutuhkan berbulan-bulan hingga tahun utnuk menyelesaikan

satu siklus denyutan. Hal ini menyebabkan lapisan luar bintang kemudian lepas ke ruang angkasa, membentuk planetari nebula di sekitar bintang yang akan mati (gambar 9).

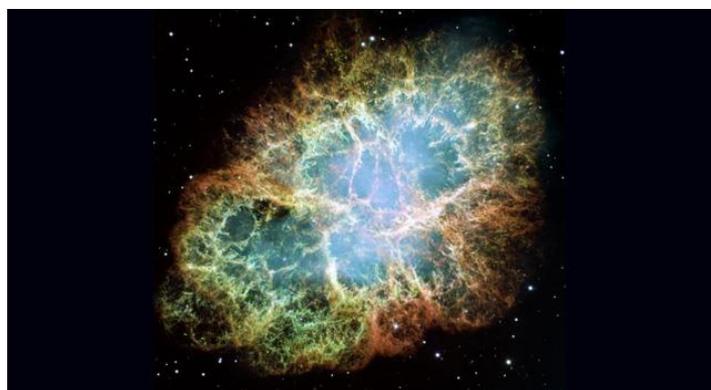
Gas didalam planetari nebula akan tereksitasi dan menjadi berpijar akibat dari cahaya ultraviolet dari inti bintang yang panas. Pada akhirnya, gas ini akan menjauh dari bintang dan bergabung dengan gas dan debu lain untuk membentuk nebula baru tempat di mana bintang baru akan terbentuk.

Kehidupan bintang masif sedikit lebih berbeda daripada bintang massa rendah. Pada bintang massa rendah, energi dipindahkan dari dalam keluar melalui radiasi. Pada inti bintang masif, energi ditransportasikan melalui konveksi, sehingga inti dari bintang tercampur seluruhnya. Setelah hidrogen terakhir terpakai didalam inti, bintang akan berubah secara sangat cepat menjadi raksasa merah. Untuk kasus bintang bermassa rendah perubahan ini terjadi secara perlahan.

Bintang harus memiliki massa lebih dari 0.08 kali dari massa Matahari. Jika tidak, maka bintang tidak akan cukup panas dan rapat pada bagian intinya untuk dapat membuat reaksi fusi hidrogen. Bintang yang paling masif memiliki massa hingga ratusan kali massa Matahari. Bintang yang lebih masif lagi akan sangat kuat hingga radiasinya sendiri akan menghentikannya untuk terbentuk, dan akan tetap stabil seperti itu.

Bintang Bermassa Rendah (Umum ditemukan)

Bintang dengan massa awal kurang dari delapan kali massa Matahari, proses kehilangan massa akan menyebabkan intinya menjadi 1.4 kali massa Matahari. Inti bintang ini tidak memiliki bahan bakar termonuklir. Tarikan kedalam dari gravitasi diimbangi oleh tekanan keluar dari elektron. Elektron mencegah penyusutan lanjutan karena terdapat Prinsip Larangan Pauli – hukum teori kuantum bahwa terdapat batas ambang jumlah elektron yang dapat ada pada suatu volume tertentu. Inti ini kemudian kita sebut sebagai bintang katai putih. Katai putih memiliki massa kurang dari 1.44 kali massa Matahari. Batas massa ini disebut batas Chandrasekhar, karena astronomer India-Amerika dan penerima Nobel Subrahmanyan Chandrasekhar menunjukkan bahwa bintang katai putih yang lebih masif daripada massa itu akan runtuh akibat massanya sendiri.



Gambar 10: Nebula Kepiting, sisa ledakan supernova yang direkam oleh para astronom di Asia pada tahun 1054 Masehi. Inti dari bintang yang meledak adalah bintang neutron yang berputar cepat, atau pulsar, di dalam nebula. Sebagian kecil dari energi rotasi ditransmisikan ke nebula, membuatnya bersinar. Sumber: NASA.

Bintang katai putih merupakan titik terakhir dari evolusi bintang pada umumnya. Bintang ini sangat umum ditemui di galaksi kita. Meskipun mudah ditemui namun bintang ini sangat sulit untuk diamati: karena bintangnya berukuran tidak lebih besar dari Bumi, meskipun panas, area radiatifnya sangat sempit. Luminositasnya ribuan kali lebih kecil daripada Matahari. Katai putih meradiasi hanya karena ia benda yang sangat panas, secara perlahan mendingin dengan meradiasikan energinya. Bintang terang seperti Sirius dan Procyon memiliki bintang katai putih yang mengorbit mengelilinginya. Bintang katai putih ini tidak memiliki sumber energi selain dari panas yang disimpannya. Mereka bekerja seperti bara api, yang secara perlahan mendingin. Setelah milyaran tahun, mereka akan mendingin seluruhnya dan menjadi dingin dan gelap.

Bintang Bermassa Besar (Jarang ditemukan)

Bintang masif dengan massa besar sangat panas dan terang, namun bintang ini sangat jarang ditemukan. Mereka memiliki umur yang sangat pendek hanya beberapa juta tahun. Inti dari bintang masif sangat panas dan cukup rapat untuk dapat mereaksi fusi elemen hingga menjadi besi. Inti besi tidak lagi memiliki energi yang tersedia, baik untuk fusi maupun fisi. Tidak lagi ada sumber energi untuk menjaga inti tetap panas dan menahan gaya gravitasi ke dalam. Gravitasi menyebabkan inti bintang runtuh dalam hitungan detik, mengubahnya menjadi bola yang berisi neutrons (atau materi aneh lain) dan melepaskan energi gravitasi yang sangat besar. Peristiwa ini menyebabkan lapisan luar dari bintang meledak sebagai supernova (gambar 10). Lapisan luar bintang ini dilontarkan dengan kecepatan hingga 10000 km/detik. Sebuah supernova, pada kecerlangan maksimumnya, dapat seterang satu galaksi yang berisi milyaran bintang. Baik Tycho Brahe dan Johannes Kepler, keduanya mengamati dan mempelajari supernova terang pada 1572 oleh Brahe dan 1604 oleh Kepler. Berdasarkan Aristotle, bintang merupakan benda yang sempurna dan tidak akan berubah; sedangkan Brahe dan Kepler membuktikan kebalikannya. Tidak ada supernova yang teramati di Galaksi kita selama 400 tahun. Sebuah supernova, terlihat dengan mata telanjang, teramati pada tahun 1987 di Awan Magellan Besar, sebuah satelit galaksi dari Bimasakti. Massa dari inti dari supernova nilainya lebih besar dari limit Chandrasekhar.

Proton dan elektron pada saat terjadi keruntuhan inti akan mengalami fusi dan membentuk neutron dan neutrino. Ledakan jumlah neutrino dapat dideteksi menggunakan observatorium neutrino. Selama massa dari inti kurang dari tiga kali massa Matahari, maka inti akan tetap stabil. Gaya gravitasi ke dalam akan diimbangi oleh tekanan kuantum dari neutron ke arah luar. Benda ini disebut sebagai bintang neutron. Diameternya sekitar 10 km dengan kerapatan 10^{14} kali kerapatan air. Bintang neutron dapat dilihat menggunakan teleskop sinar-X jika masih sangat panas, namun bintang neutron dulunya ditemukan menggunakan cara yang tidak biasa yakni dari suatu sumber denyutan gelombang radio yang disebut pulsar. Periode denyutannya sekitar satu detik atau bahkan kurang. Denyutannya dihasilkan oleh medan magnet kuat di bintang neutron yang di lontarkan pada kecepatan sangat tinggi akibat dari rotasi bintang yang sangat cepat.

Terdapat jenis lain dari supernova yang terjadi pada sistem bintang ganda ketika satu bintang mati dan menjadi katai putih. Ketika bintang kedua mulai mengembang, bintang ini dapat mengalirkan gas ke bintang katai putih pasangannya. Jika massa katai putih menjadi lebih besar dari limit Chandrasekhar maka katai putih akan ‘terbakar sangat cepat’; materialnya

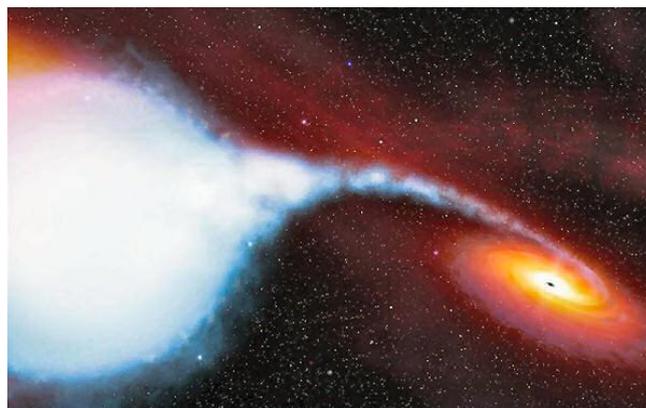
akan terfusi dan dalam waktu yang sangat singkat akan menjadi karbon, melepaskan cukup energi untuk menghancurkan bintang itu.

Pada ledakan supernova, semua elemen kimia yang diproduksi oleh reaksi fusi dilontarkan ke luar angkasa. Elemen yang lebih berat dari besi diproduksi saat ledakan, meskipun jumlahnya sedikit, karena neutron meradiasi inti yang lebih ringan yang dilontarkan.

Bintang Sangat Masif (sangat jarang)

Bintang dengan massa sangat besar sangat jarang ditemukan –satu bintang dari satu milyar. Bintang-bintang ini memiliki luminositas hingga jutaan kali luminositas Matahari dan umurnya sangat pendek. Bintangnya sangat masif sehingga saat bahan bakarnya habis, intinya akan runtuh, dan massanya lebih dari tiga kali massa Matahari. Gravitasinya sangat besar bahkan dapat melebihi tekanan kuantum dari neutron. Inti bintang akan terus menyusut hingga kerapatannya sangat rapat hingga gaya gravitasinya mencegah apapun bisa lepas, bahkan cahaya juga tidak bisa lepas. Lalu bintang ini menjadi benda yang disebut lubang hitam. Lubang hitam sama sekali tidak meradiasikan apapun, namun jika terdapat bintang normal didekatnya, bintang tetangga bisa bergerak mengorbit lubang hitam. Gerak dari bintang ini dapat diamati untuk mendeteksi lubang hitam dan mengestimasi massanya. Selanjutnya sejumlah gas dari bintang biasa dapat ditarik menuju lubang hitam dan akan memanas hingga terlihat menyala pada daerah sinar-X sebelum jatuh ke dalam lubang hitam (gambar 11). Lubang hitam merupakan sumber kuat dari sinar-X dan ditemukan menggunakan teleskop sinar-X.

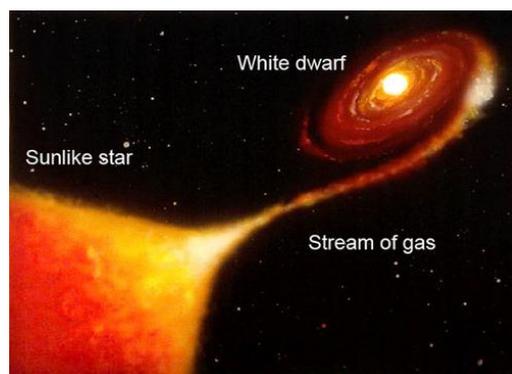
Pada pusat dari banyak galaksi, termasuk Bimasakti kita, astronom telah menemukan lubang hitam supermasif yang massanya jutaan hingga milyaran kali massa Matahari. Massanya dihitung dari efek yang diciptakannya terhadap bintang-bintang disekitarnya di dekat pusat galaksi. Lubang hitam supermasif kemungkinan terbentuk sebagai bagian dari proses pembentukan galaksi, namun belum jelas bagaimana ini bisa terjadi. Salah satu tujuan astronomi pada abad ke-21 adalah untuk memahami bagaimana bintang pertama, galaksi, dan lubang hitam supermasif ini dapat terbentuk, sesaat setelah lahirnya alam semesta



Gambar. 11: Konsepsi artist tentang sumber sinar-bintang-bintang Cygnus X-1. Ini terdiri dari bintang normal masif (kiri), dan lubang hitam (kanan), sekitar 15 kali massa Matahari, dalam orbit bersama. Beberapa gas dari bintang normal ditarik ke dalam piringan akresi di sekitar lubang hitam, dan akhirnya ke dalam lubang hitam itu sendiri. Gas-gas tersebut dipanaskan hingga suhu yang sangat tinggi, menyebabkan mereka memancarkan sinar-X. Sumber: NASA.

Bintang Variabel Kataklimisik

Sekitar setengah dari bintang yang ada di alam semesta adalah bintang ganda, dua atau lebih pada satu orbit. Seringkali orbitnya sangat besar dan dua bintang tidak akan saling mempengaruhi evolusi satu sama lain. Namun jika orbitnya cukup kecil, kedua bintang dapat berinteraksi, terutama jika salah satunya mengembang menjadi raksasa merah. Jika salah satu bintang mati menjadi katai putih, bintang neutron, atau lubang hitam, maka bintang normalnya akan mengalirkan materi ke dalam bintang yang sudah mati dan banyak hal menarik dapat terjadi (figure 12). Sistem bintang ganda bervariasi pada kecerlangannya, karena berbagai penyebab dan dikenal sebagai bintang variabel kataklismik. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bintang katai putih dapat meledak sebagai supernova jika cukup massa ditransfer kepadanya. Jika bintang normalnya mengalirkan materi yang kaya akan hidrogen kepada katai putih, maka materialnya dapat meledak melalui fusi hidrogen, sebagai nova. Materi yang jatuh ke dalam katai putih, bintang neutron, atau lubang hitam dapat menjadi sangat panas, karena terjadi perubahan energi potensial gravitasi menjadi panas, dan memproduksi radiasi energi tinggi seperti sinar-X. Pada gambaran artis dari lubang hitam (gambar 12) dapat dilihat bahwa terdapat piringan akresi dari gas di daerah sekitar lubang hitam dan aliran gas dari bintang normal mengalir menuju lubang hitam.



Gambar. 12: Bintang variabel bencana. Materi ditarik dari bintang normal (kiri) menuju katai putih (kanan). Itu menyerang cakram akresi di sekitar katai putih, yang menyebabkan kerlipan dalam kecerahan. Masalahnya akhirnya mendarat di katai putih, di mana ia bisa menyala atau meledak. Sumber: NASA.

Kelahiran Matahari dan Bintang

Kelahiran bintang sedang terjadi saat ini. Karena sebagian besar bintang masif hanya memiliki usia beberapa juta tahun, dan usia alam semesta lebih dari 10 milyar tahun, maka bisa diduga bahwa bintang masif ini baru lahir belum lama. Lokasi bintang masif ini menunjukkan suatu petunjuk: mereka ditemukan di dalam dan di dekat awan debu dan gas besar yang disebut nebula. Gas ini mengandung ion, atom, dan molekul, yang sebagian besar hidrogen, juga terdapat helium, dan terdapat elemen yang lebih besar namun dalam jumlah sangat sedikit. Sedangkan debunya terdiri dari butiran silikat dan grafit, dengan ukuran kurang dari satu mikrometer. Jumlah debu jauh lebih sedikit dari gas, namun debu memiliki peran penting di nebula. Debu menyebabkan molekul bisa terbentuk dengan cara melindunginya dari radiasi intens dari bintang terdekat. Permukaan debu dapat menyediakan katalis dalam pembentukan molekul. Nebula besar dan terang paling dekat adalah Nebula Orion (gambar 13). Bintang panas di nebula membuat atom gas nya berpendar. Debunya hangat dan akan

memancarkan radiasi inframerah. Debu juga akan menghalangi cahaya dari bintang dan gas dibelakangnya, menyebabkannya terlihat seperti tambalan di nebula.



Gambar. 13: Nebula Orion, awan besar gas dan debu tempat bintang (dan planet mereka) terbentuk. Gas bersinar oleh fluoresensi. Debu menghasilkan bercak-bercak penyerapan gelap yang bisa Anda lihat, terutama di kiri atas. Sumber: NASA

Gravitasi merupakan gaya yang sifatnya menarik, sehingga tidak mengejutkan jika beberapa bagian dari nebula secara perlahan mengkerut. Hal ini akan terjadi jika gaya gravitasi lebih besar daripada tekanan dari bagian turbulensi dari awan tersebut. Tahap pertama dari pengkerutan bisa juga dibantu oleh adanya gelombang kejut dari supernova yang terjadi di dekat awan atau akibat dari tekanan radiasi dari bintang masif didekatnya.

Setelah pengkerutan secara gravitasi dimulai, maka proses ini akan terus berlanjut. Sekitar setengah dari energi dari awan nebula ini dilepaskan akibat pengkerutan gravitasi, akan memanaskan bintang. Sedangkan setengahnya lagi akan diradiasikan keluar. Ketika temperatur bintang didalamnya mencapai 1.000.000 K, maka reaksi fusi termonuklir dari deuterium akan dimulai; ketika temperaturnya sedikit lebih panas lagi, reaksi fusi termonuklir hidrogen normal akan dimulai. Ketika energi yang diproduksi seimbang dengan energi yang diradiasikan, maka bintang secara 'resmi' sudah lahir.

Ketika penyusutan secara gravitasi pertama dimulai, materi yang ada memiliki rotasi yang sangat lambat (momentum sudut) akibat adanya turbulensi di awan. Selama proses penyusutan atau kontraksi berlangsung, akibat adanya hukum kekekalan momentum maka rotasi dari materi di awan gas itu juga akan bertambah. Efek ini dapat dilihat pada atlet ski es, dimana ketika atlet ingin berputar dengan kecepatan tinggi, mereka akan melipat tangannya kedalam sehingga rotasinya akan meningkat. Selama rotasi dari calon bintang ini berlangsung, gaya sentrifugal akan menyebabkan materi di sekitar bintang untuk memipih membentuk piringan. Bintang terbentuk di daerah dengan kerapatan tinggi di bagian tengah piringan. Planet terbentuk di dalam piringan itu, planet batuan terbentuk dekat dengan bintang dan planet gas dan es terbentuk di daerah yang dingin di tepian piringan. Di nebula seperti Nebula Orion, astronom telah mengamati bintang dengan berbagai jenis tahap pembentukan. Astronom telah mengamati piringan protoplanet dimana planet seperti tatasurya kita terbentuk. Dan pada tahun 1995 para astronom mulai menemukan planet-planet yang

mengorbit bintang lain yang mirip matahari. Bukti ini membuktikan bahwa terbentuknya planet ternyata normal dari hasil proses pembentukan bintang. Mungkin saja terdapat banyak planet mirip Bumi di luar sana, di alam semesta!

When the gravitational contraction first begins, the material has a very small rotation (angular momentum), due to turbulence in the cloud. As the contraction continues, "conservation of angular momentum" causes the rotation to increase. This effect is commonly seen in figure skating; when the skater wants to go into a fast spin, they pull their arms as close to their axis of rotation (their body) as possible, and their spin increases. As the rotation of the contracting star continues, "centrifugal force" (as it is familiarly but incorrectly called) causes the material around the star to flatten into a disc. The star forms in the dense centre of the disc. Planets form in the disc itself -rocky planets close to the star, and gassy and icy planets in the cold outer disc.

In nebulae such as the Orion Nebula, astronomers have observed stars in all stages of formation. They have observed protoplanets - protoplanetary discs in which planets like ours are forming. And starting in 1995, astronomers have discovered *exoplanets* or *extra-solar planets* -planets around other Sun-like stars. This is dramatic proof that planets really do form as a normal by-product of star formation. There may be many planets, like earth, in the universe!

Pustaka

- Bennett, Jeffrey et al, *The Essential Cosmic Perspective*, Addison-Wesley; one of the best of the many available textbooks in introductory astronomy,2005.
- Kaler, James B, *The Cambridge Encyclopaedia of Stars*, Cambridge Univ. Press, 2006.
- Percy, J.R, *Understanding Variable Star*, Cambridge University Press, 2007.

Sumber Internet

- American Association of Variable Star Observers. <http://www.aavso.org>. Education project: <http://www.aavso.org/vsa>
- Chandra X-Ray Satellite webpage. http://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar_ev/
- Kaler's "stellar" website. <http://stars.astro.illinois.edu/sow/sowlist.html>
- Stellar Evolution on Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution