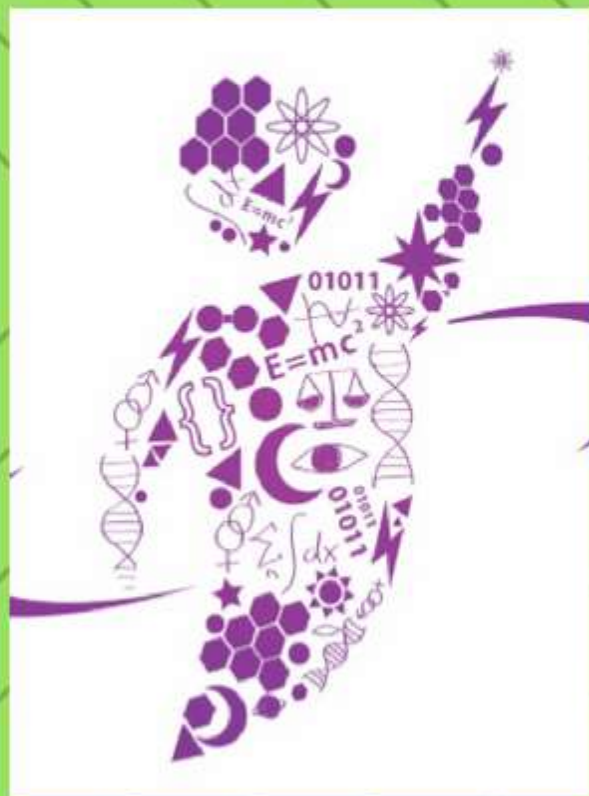


2019

SMA  
ASTRONOMI



**085223273373**

## FISIKA BINTANG

Pembahasan dalam fisika bintang akan terkait dengan struktur dan evolusi bintang. Struktur bintang menggambarkan keadaan bagian dalam bintang pada suatu waktu tertentu. Empat persamaan diferensial bisa digunakan untuk merepresentasikan struktur bintang secara kuantitatif:

Persamaan kesetimbangan hidrostatik

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM\rho}{r^2}$$

Persamaan kontinuitas massa

$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

Kekekalan energi

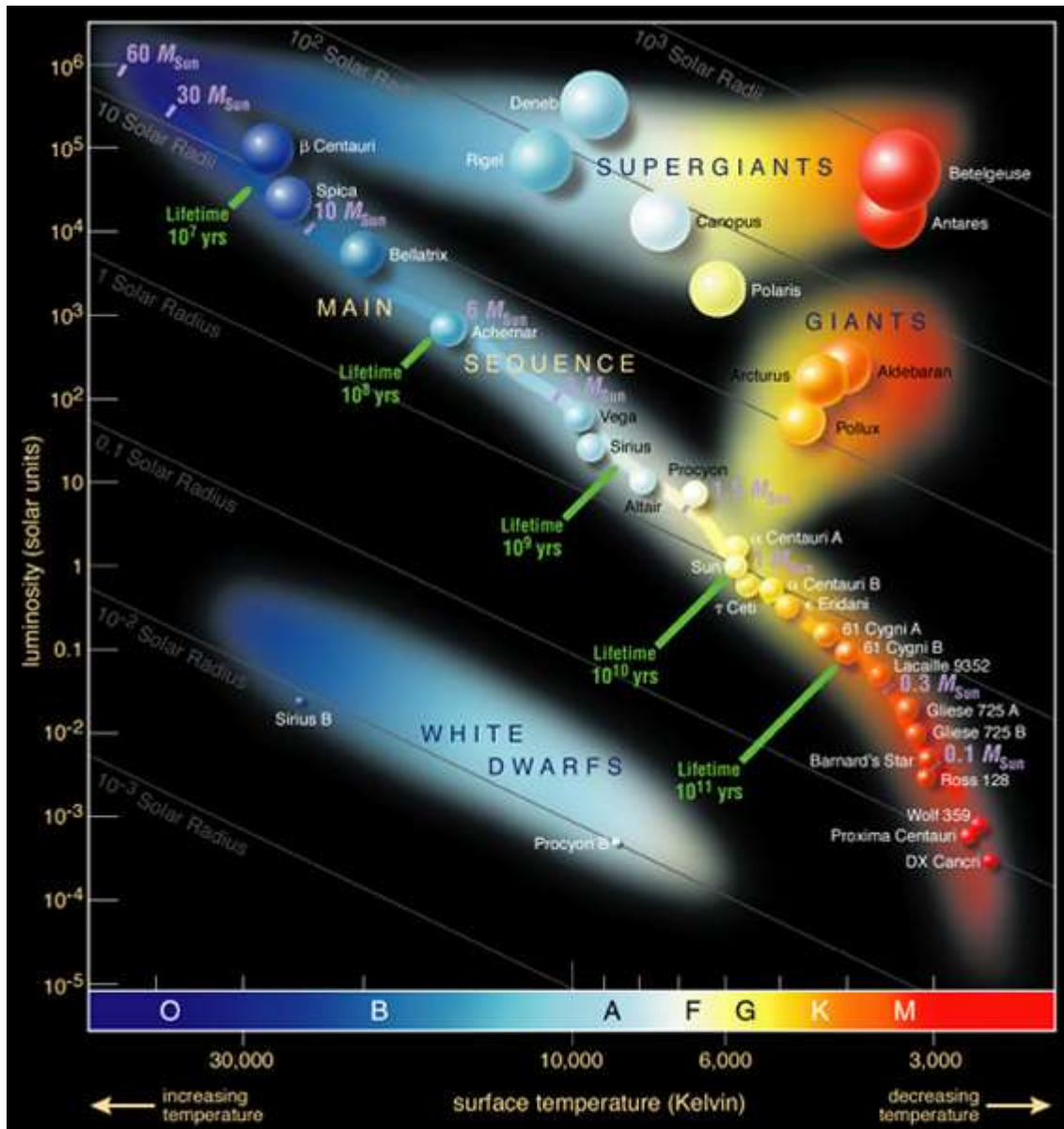
$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon$$

Transport energi

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4ac} \frac{\kappa \rho}{T^3} \frac{L}{4\pi r^2}$$

Dilengkapi dengan persamaan keadaan  $PV = NkT$  untuk pendekatan gas ideal. Seluruh persamaan di atas harus diselesaikan (diintegrasikan) secara simultan untuk memperoleh profil  $P(r), \rho(r), m(r)$ , serta  $T(r)$  mulai dari pusat hingga permukaan bintang. Dengan terjadinya reaksi fusi di pusat bintang, keadaan struktur bintang berubah dari waktu ke waktu. Perubahan ini terlihat sebagai evolusi bintang.

Antara tahun 1905 dan 1913, Hertzsprung dan Russel memeriksa distribusi luminositas bintang-bintang pada berbagai kelas spektrum (kelas O, B, F, dst.). Kelas spektrum bintang dikarakterisasi oleh temperatur bintang dan karena luminositas sebanding dengan pangkat empat temperatur serta kuadrat radius bintang, orang pada zaman itu mulanya mengira akan sebaran luas posisi bintang-bintang dalam distribusi itu. Hal yang terjadi ternyata tidak demikian. Bintang-bintang berkumpul di suatu daerah tertentu di diagram yang saat ini dikenal sebagai HR (Hertzsprung-Russel), lihat Gambar A.1. Diperoleh hasil secara empirik bahwa kombinasi sembarang  $T$  dan  $L$  (berimplikasi pada kombinasi antara  $R$  dan  $L$ ) ternyata tidak diijinkan. Sebagian besar bintang menempati pita sempit yang membentang dari bagian kiri atas ke kanan bawah. Pita sempit ini dinamakan deret utama. Bintang-bintang deret utama yang memiliki temperatur sama memiliki luminositas dan radius kurang lebih sama.



Gambar A.2: Diagram Hertsprung-Russel. Sumber: wikipedia

Selain deret utama, ada dua populasi binang lain. Di bagian atas deret utama, terdapat bintang raksasa dan maha raksasa. Untuk temperatur yang sama dengan deret utama, bintang kelas ini memiliki luminositas lebih terang, mengindikasikan jari-jarinya lebih besar. Jauh di bawah deret utama (kiri bawah), dengan warna spektrum putih, dikenal bintang katai putih. Terdapat variasi diagram HR. Sumbu temperatur misalnya, bisa digantikan dengan indeks warna dan kecerlangan semu mewakili luminositas, jika bintang-bintang yang dibahas berasal dari gugus yang sama.



Jejak evolusi bintang bisa digambarkan pula dari diagram HR. Bintang lahir dari keruntuhan gravitasi awan molekuler rapat yang dingin. Awan yang tengah runtuh ini membentuk fragmen-fragmen kecil yang masing-masing selanjutnya berkontraksi membentuk protobintang. Protobintang berotasi lebih cepat untuk mempertahankan momentum sudutnya. Temperatur protobintang memanaskan seiring kondensasi terjadi dan mereka dikelilingi oleh piringan protoplanet yang belakangan bisa membentuk planet. Proses ini terjadi jauh di bagian kanan diagram HR.

Temperatur pusat protostar yang sedang berkontraksi terus meningkat (di diagram HR bergerak ke kiri) hingga reaksi nuklir terjadi. Di titik ini, hidrogen dikonversi menjadi helium di inti dan bintang mulai menempati deret utama. Sembilan puluh persen waktu hidup bintang dihabiskan sebagai deret utama untuk membakar hidrogen menjadi helium.

Setelah hidrogen di inti habis dibakar menjadi helium, produksi energi berhenti dan inti mulai berkontraksi karena tekanan berkurang. Temperatur internal bintang naik kembali oleh kontraksi ini dan memicu pembakaran hidrogen di lapisan kulit inti yang sudah tidak berfusi lagi. Sementara itu, inti helium terus berkontraksi dan menaikkan temperatur, mengakibatkan percepatan laju pembakaran hidrogen di kulit inti. Akibat produksi energi secara cepat ini, bintang mengembang berukuran besar meningkatkan luminositasnya. Dalam tahap ini, bintang menjadi raksasa merah.

Lama kelamaan inti bintang mencapai temperatur yang cukup tinggi untuk membakar helium menjadi karbon. Jika massa bintang kurang dari 2,2 massa Matahari, seluruh bagian inti secara tiba-tiba membakar helium dengan cepat. Fenomena ini dinamakan *helium core flash*. Jika bintang lebih masif, pembakaran helium terjadi secara lebih 'damai'. Pada waktu yang sama, bintang terus membakar hidrogen di kulit yang mengelilingi inti. Bintang membakar helium menjadi karbon di intinya dalam selang waktu yang jauh lebih singkat dibanding pembakaran hidrogen menjadi helium. Setelah seluruh helium dikonversi, reaksi berhenti lagi, inti karbon mulai berkontraksi dan naik lagi temperaturnya, memicu pembakaran helium di lapisan yang mengelilingi inti, yang juga dikelilingi oleh lapisan pembakaran hidrogen. Proses yang selanjutnya terjadi bergantung pada massa bintang.

### **Bintang < 8 massa Matahari**

Inti inert karbon terus berkontraksi dan memanaskan tetapi tidak pernah mencapai temperatur yang cukup untuk memulai pembakaran karbon. Meskipun begitu, keberadaan dua lapisan pembakaran di luar inti memicu ketidakstabilan termal, yakni terjadinya pembakaran hidrogen dan helium yang tidak sefase satu sama lain, menyebabkan denyutan termal. Denyutan termal ini merupakan karakteristik bintang-bintang cabang raksasa asimtotik (AGB-*asymptotic giant branch*).

Inti karbon terus mengerut hingga tertahan oleh tekanan elektron terdegenerasi (seluruh tingkat energi yang mungkin terisi). Pengerutan lebih lanjut tidak mungkin terjadi, dalam tahap ini, inti bintang tidak ditahan lagi oleh tekanan gas. Inti bintang menjadi katai putih. Denyutan termal yang terjadi di bagian kulit mendorong lapisan luar bintang mengembang, menyebabkan kehilangan massa secara periodik. Secara bertahap, bagian luar bintang terhempas seluruhnya dan terionisasi oleh katai putih menyisakan objek yang dinamakan *planetary nebula*.

### **Bintang > 8 massa Matahari**

Inti yang berkontraksi kemudian mencapai temperatur untuk memulai pembakaran karbon dan mulai mem-fusinya menjadi neon. Proses pembakaran di inti diikuti oleh pengerutan inti dan pembakaran kulit ini berulang dalam sebuah rangkaian reaksi nuklir menghasilkan elemen lebih berat secara berturut-turut sampai besi terbentuk di inti. Besi tidak bisa difusikan menjadi elemen yang lebih berat tanpa menyerap lebih banyak energi. Oleh karena itu, setelah inti besi terbentuk, bintang kehabisan bahan bakar dan akhirnya runtuh oleh gravitasi dirinya sendiri. Massa inti bintang menentukan nasib akhir sisa bintang.

Jika inti bermassa kurang dari sekitar 3 massa Matahari, keruntuhan inti bisa dihentikan oleh tekanan neutron. Dalam hal ini inti bintang menjadi bintang neutron. Berhentinya pengerutan secara tiba-tiba menghasilkan gelombang kejut yang merambat kembali ke lapisan luar bintang, menghempaskannya dalam ledakan supernova.

Jika inti bermassa lebih dari 3 massa Matahari, tekanan neutron tetap tidak mampu menahan gravitasi sehingga keruntuhan akan terus terjadi sampai lubang hitam (*stellar black hole*) terbentuk. Gas yang dilemparkan menyebar ke medium antar bintang, memperkayanya dengan seluruh unsur yang terbentuk selama masa hidup bintang dan ledakan itu sendiri. Sisa-sisa supernova ini merupakan pusat-pusat distribusi kimiawi di alam semesta.

## **SOAL**

1. Energi yang diproduksi di pusat Matahari perlu waktu ... untuk mencapai permukaan dan kemudian diradiasikan ke luar.
  - a. 3 menit
  - b. 30 hari
  - c. Seribu tahun
  - d. Sejuta tahun
  - e. Semilyar tahun
  
2. Besaran-besaran berikut menentukan posisi bintang di diagram HR!
  1. Temperatur
  2. Massa
  3. Luminositas
  4. Metalisitas
  - a. Pernyataan 1, 2, 3 benar
  - b. Pernyataan 1 dan 3 benar
  - c. Pernyataan 2 dan 4 benar
  - d. Pernyataan 4 saja yang benar
  - e. Semua pernyataan benar
  
3. Di antara pernyataan berikut, yang benar adalah ....
  1. Bintang-bintang populasi II dan III yang saat ini masih ada rata-rata bermassa besar.
  2. Matahari termasuk bintang generasi II yang relatif kaya unsur metal.
  3. Temperatur bintang akan naik jika diberi suntikan energi tambahan.
  4. Bintang deret utama merah bermassa kecil menempati diagram HR di bagian kanan bawah.
  - a. Pernyataan 1, 2, 3 benar
  - b. Pernyataan 1 dan 3 benar
  - c. Pernyataan 2 dan 4 benar
  - d. Pernyataan 4 saja yang benar
  - e. Semua pernyataan benar
  
4. Jika kita tengah mengamati astronot masuk menuju lubang hitam, cahaya akan hilang perlahan-lahan karena ....
  - a. Mengalami pergeseran merah akibat gravitasi kuat.
  - b. Mengalami pergeseran biru akibat gravitasi kuat.
  - c. Warnanya tiba-tiba berubah menjadi hitam.
  - d. Cahaya terperangkap tidak bisa lepas dari lubang hitam.
  - e. Tidak ada pilihan jawaban yang tepat.

5. Pilih pernyataan yang benar!
- Ketidakstabilan termal dalam tahapan evolusi menyebabkan bintang menempati posisi di diagram HR yang dinamakan pulsar.
  - Planet-planet baru bisa terbentuk dari *planetary nebula*.
  - Emas, perak, dan plutonium terbentuk dalam ledakan dahsyat di akhir hidup bintang.
  - Seluruh unsur yang terdaftar dalam tabel periodik unsur saat ini bisa terbentuk secara alami melalui fusi di pusat bintang dan supernova.
  - Katai putih terlalu redup sehingga tidak bisa diamati melalui panjang gelombang visual.
6. Massa bintang deret utama yang lebih besar akan terletak di bagian ... bintang-bintang yang lebih kecil massanya dalam diagram HR.
- kanan atas
  - kiri atas
  - kanan
  - kiri
  - kanan bawah
7. Unsur terberat yang bisa dibentuk melalui fusi di inti bintang adalah besi.  
SEBAB  
Fusi inti besi menjadi inti-inti yang lebih berat termasuk reaksi endotermik.
- Pernyataan pertama dan kedua benar serta memiliki hubungan sebab akibat.
  - Pernyataan pertama dan kedua benar tetapi tidak memiliki hubungan sebab akibat.
  - Pernyataan pertama benar, kedua salah
  - Pernyataan pertama salah, kedua benar
  - Kedua pernyataan salah
8. Siklus CNO terjadi dalam bintang-bintang bermassa besar, produk akhir reaksi ini memberikan oksigen sebagai unsur terberatnya.  
SEBAB  
Siklus CNO hanya terjadi dalam kondisi tekanan dan temperatur sangat tinggi yang tidak bisa disediakan oleh bintang bermassa kecil.
- Pernyataan pertama dan kedua benar serta memiliki hubungan sebab akibat.
  - Pernyataan pertama dan kedua benar tetapi tidak memiliki hubungan sebab akibat.
  - Pernyataan pertama benar, kedua salah
  - Pernyataan pertama salah, kedua benar
  - Kedua pernyataan salah
9. Struktur pusat Matahari bisa dipelajari melalui pengamatan langsung radiasi pada panjang gelombang sinar-X.

**SEBAB**

Foton adalah partikel pembawa informasi tercepat dari pusat bintang.

- a. Pernyataan pertama dan kedua benar serta memiliki hubungan sebab akibat.
- b. Pernyataan pertama dan kedua benar tetapi tidak memiliki hubungan sebab akibat.
- c. Pernyataan pertama benar, kedua salah
- d. Pernyataan pertama salah, kedua benar
- e. Kedua pernyataan salah

10. Banyak bintang deret utama mengikuti hubungan massa luminositas  $M^3 \propto L$ . Jika bintang  $V$  bermassa 4 kali bintang  $W$ , maka kala hidup bintang  $W$  di deret utama ... kali bintang  $V$ .

- a.  $\frac{1}{16}$
- b.  $\frac{1}{4}$
- c. 4
- d. 16
- e. 64

11. Berikut adalah alasan tidak semua bintang neutron teramati sebagai pulsar, kecuali ....

- a. Kutub magnetik penyembur energi bintang neutron boleh jadi berimpit dengan kutub rotasinya.
- b. Lokasi Bumi mungkin berada di luar sapuan arah semburan gelombang elektromagnetik dari bintang neutron.
- c. Seiring dengan menuanya bintang neutron, laju rotasinya berkurang hingga suatu saat bisa terhenti.
- d. Bumi ada pada arah semburan jet yang berimpit dengan kutub rotasi bintang neutron.
- e. Tidak ada pilihan yang tepat.

12. Dalam evolusinya, sebuah bintang yang mulanya berada di pojok kanan atas diagram HR, secara cepat tiba-tiba posisinya berpindah ke pojok kiri bawah. Proses yang terjadi dalam waktu singkat itu adalah ....

- a. Temperatur bintang meningkat, radiusnya mengecil.
- b. Temperatur bintang turun, radiusnya mengecil.
- c. Temperatur bintang meningkat, radiusnya membesar.
- d. Temperatur bintang turun, radiusnya membesar.
- e. Temperatur bintang meningkat, luminositasnya membesar.

13. Berapa diameter Matahari jika ia tiba-tiba berubah menjadi lubang hitam? ( $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$  kg dan batas kecepatan di 'permukaan' lubang hitam sebesar kecepatan cahaya.)

- a. 2 km
- b. 3 km



- c. 4 km
  - d. 5 km
  - e. 6 km
14. Andai kamu diminta mengamati bayi-bayi bintang yang sedang terbentuk, pita panjang gelombang mana yang seharusnya kamu pilih?
- a. Inframerah
  - b. Cahaya tampak
  - c. Ultraviolet
  - d. Sinar X
  - e. Sinar gamma
15. Apa penyebab kenaikan temperatur saat pengerutan gravitasi terjadi?
- a. Medan magnet.
  - b. Reaksi fusi nuklir.
  - c. Tekanan meningkatkan temperatur.
  - d. Kontraksi gravitasi mengubah struktur atomik.
  - e. Transfer energi dari lapisan selubung luar ke bagian yang mengalami pengerutan gravitasi.
16. Star implosion occurs during ....
- a. Fusion
  - b. Supernova
  - c. Fragmentation
  - d. Pulsating phase
  - e. Star formation process
17. Reaksi triple alpha menghasilkan produk akhir berupa ....
- a. Helium
  - b. Karbon
  - c. Oksigen
  - d. Neon
  - e. Besi
18. Pilih pernyataan yang salah!
- a. Seluruh level energi elektron terendah pada materi terdegenerasi bintang katai putih terisi.
  - b. Materi terdegenerasi relativistik penyusun bintang neutron memiliki energi lebih besar daripada energi diamnya.
  - c. Prinsip larangan Pauli dilanggar oleh elektron rapat di dalam bintang katai putih.

- d. Materi terdegenerasi bisa memiliki tekanan tidak nol meskipun temperatur absolutnya nol.
  - e. Satu sendok teh material dari bintang neutron bisa bermassa lebih dari 10 ton.
19. Penyebab terjadinya pulsasi pada bintang AGB adalah ....
- a. Reaksi termonuklir di pusat bintang yang kadang berhenti dan kadang terjadi.
  - b. Perbedaan tekanan pendukung yang dihasilkan oleh selubung pembakar hidrogen dan helium yang terjadi secara bergantian.
  - c. Pergantian tekanan gas dan tekanan radiasi untuk menahan gravitasi diri bintang.
  - d. Reaksi fusi dan fisi di pusat bintang yang terjadi secara bergantian.
  - e. Reaksi fusi eksotermik dan endotermik yang terjadi secara bergantian.
20. Diagram HR dari pengamatan umumnya menunjukkan pita deret utama yang lebih tipis di bagian kanan bawah. Hal ini bisa diinterpretasikan sebagai ....
- a. Bintang deret utama bermassa kecil lebih sedikit jumlahnya dibanding bintang deret utama bermassa besar.
  - b. Bintang bermassa besar lebih mungkin terbentuk dibanding bintang bermassa kecil.
  - c. Pilihan a dan b benar
  - d. Pilihan a dan b salah
  - e. Salah satu dari a dan b benar