

# Kehidupan Bintang

**Alexandre Costa, Beatriz García, Ricardo Moreno, Rosa M. Ros**

International Astronomical Union, Escola Secundária de Loulé (Portugal),  
Universidad Tecnológica Nacional-Regional Mendoza (Argentina), Colegio  
Retamar (Madrid, Spain), Technical University of Catalonia (Barcelona, Spain).

## Rangkuman

Untuk memahami kehidupan bintang kita perlu terlebih dahulu memahami apa itu bintang, bagaimana bintang berevolusi, dan apa perbedaan antara bintang satu dan lainnya. Melalui percobaan yang sederhana, memungkinkan kita untuk menjelaskan kepada para siswa pekerjaan yang telah dilakukan para ilmuwan untuk mempelajari komposisi dari bintang, dan juga membuat beberapa model yang sederhana.

## Tujuan

Workshop ini merupakan pelengkap dari kelas evolusi bintang NASE, menyediakan berbagai aktivitas dan demonstrasi yang berfokus untuk memahami evolusi bintang. Tujuan utamanya adalah untuk:

- Dapat memahami perbedaan antara magnitudo semu dan magnitudo mutlak
- Dapat memahami diagram Hertzsprung-Russell dengan menciptakan diagram warna-magnitudo
- Dapat memahami konsep seperti supernova, bintang neutron, pulsar, dan lubang hitam

## Aktivitas 1: Konsep Paralaks

Paralaks merupakan konsep yang digunakan untuk mengukur jarak di astronomi. Kita akan melakukan aktivitas sederhana yang dapat membantu kita untuk memahami apa itu paralaks. Yang harus dilakukan adalah menghadap pada jarak tertentu ke arah tembok yang memiliki sesuatu seperti: lemari, meja, pintu, lukisan, foto, dll. Rentangkan tangan di depan dan acungkan jempol secara vertikal (figure 1a dan 1b)

Pertama pejamkan mata kiri anda, lihat contoh dengan meletakkan jari anda di tengah gambar. Tanpa menggerakkan jari anda, tutup mata kanan dan buka mata kiri. Maka jari anda akan bergerak, jari anda tidak lagi berada ditengah namun sudah berpindah ke tepi.

Untuk alasan ini maka kita mengamati langit dari dua kota yang saling berjauhan, benda yang dekat seperti bulan, akan bergeser relatif terhadap bintang latar belakangnya, yang letaknya lebih jauh. Pergeseran ini semakin besar jika jarak dari dua tempat pengamatan semakin jauh. Jarak ini disebut sebagai garis dasar.



Fig. 1a: With your arm extended look at the position of your thumb relative to the background object, first with the left eye (closing the right one) and then, Fig. 1b, look with the right eye (with the left eye closed).

## Perhitungan jarak menggunakan paralaks

Paralaks merupakan perubahan kenampakan posisi suatu objek ketika dilihat dari lokasi yang berbeda. Posisi dari bintang yang dekat relatif terhadap bintang latar belakang akan terlihat berubah ketika dilihat dari dua lokasi yang berbeda.

Maka dari itu kita dapat menentukan jarak dari bintang dekatnya.

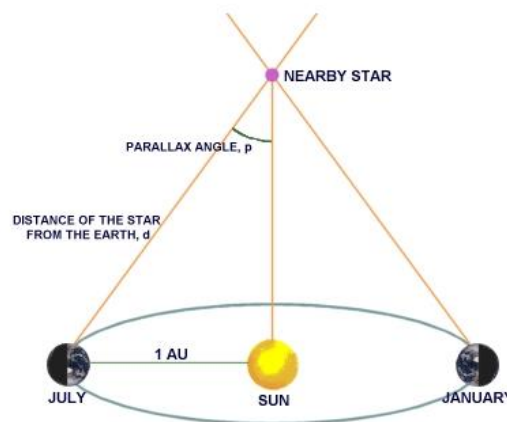


Fig. 2: The parallax angle  $p$  is the angular shift one sees when observing a star from two locations that are one Earth-Sun distance apart.

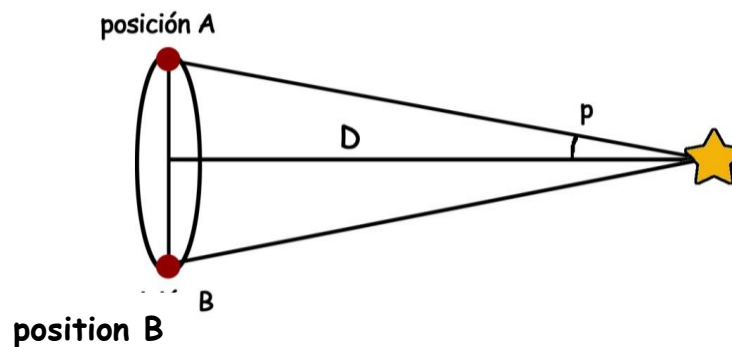


Fig. 3: By measuring the parallax angle,  $p$ , it is then possible to calculate the distance  $D$  to the object.

Sebagai contoh, jika kita mengamati bintang dekat dengan acuan bintang latar belakang dari dua posisi A dan B dari orbit Bumi (figure 3), dipisahkan waktu selama 6 bulan, maka kita dapat menghitung jarak bintang D menggunakan:

$$\tan p = \frac{AB/2}{D}$$

Karena p adalah sudut yang sangat kecil, maka nilai tangen dapat diaproksimasi dengan sudut yang diukur dalam radian, sehingga:

$$D = \frac{AB/2}{p}$$

Alas dari segitiga AB/2 merupakan jarak Bumi-Matahari yakni 150 juta km. Jika kita memiliki paralaks pada sudut p, dan jarak bintang dalam km, maka  $D=150.000.000/p$ , dengan sudut p dalam radian. Sebagai contoh, jika sudut p dalam detik busur, maka jarak bintang adalah:

$$D = \frac{150\,000\,000}{2\pi/(360\,60\,60)} = 30939\,720\,937\,064\text{ km} = 3,26\text{ a.l.}$$

Satuan ini merupakan satuan yang sering dipakai dalam astronomi profesional (a.l sama dengan tahun cahaya). Jika anda melihat bintang dengan paralaks 1 detik busur, maka jaraknya adalah 1 parsek (paralah sekon, pc),  $1\text{pc} = 3.26$  tahun cahaya. Paralaks yang bernilai kecil menunjukkan jarak bintang yang lebih jauh. Hubungan antara jarak dalam pc) dan paralaks (dalam detik busur) adalah:

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

Kesederhanaan dari persamaan ini merupakan alasan kenapa persamaan ini sering digunakan. Sebagai contoh, bintang terdekat dari kita adalah Proxima Centauri, yang memiliki paralaks 0.76 detik busur, yang artinya memiliki jarak 1.31 pc, sama dengan 4.28 tahun cahaya. Pengamatan paralaks pertama dilakukan pada bintang 61 Cygni di Bessel pada tahun 1938. Meskipun pada waktu itu dicurigai bahwa bintangnya sangat jauh sehingga tidak dapat dilakukan pengukuran jarak dengan akurat.

Saat ini kita menggunakan paralaks untuk mengukur jarak bintang yang jaraknya kurang dari 300 tahun cahaya dari kita. Lebih dari itu, sudut paralaks bisa diabaikan, sehingga kita butuh metode lain untuk menentukan jarak. Namun metode ini pada dasarnya berdasarkan perbandingan dengan bintang lain yang jaraknya sudah diketahui menggunakan paralaks. Paralaks memberikan dasar untuk metode pengukuran jarak lain di astronomi, tangga jarak kosmik. Paralaks merupakan dasar anak tangga dari tangga penentuan jarak.

## Aktivitas 2: Hukum Kuadrat-kebalikan

Percobaan sederhana dapat digunakan untuk memahami hubungan antara luminositas, kecerlangan, dan jarak. Percobaan ini akan menunjukkan bahwa magnitudo semu atau magnitudo nampak merupakan fungsi dari jarak. Seperti yang telah ditunjukkan pada figure 4, anda akan menggunakan bohlam dan sebuah kartu atau kardus dengan sebuah lubang kotak di

tengahnya. Kartu dengan lubang ditengahnya diletakkan pada satu sisi dekat lampu. Cahaya lampu kemudian akan memancar ke segala arah. Sejumlah cahaya melewati lubang dan akan menerangi layar yang diletakkan sejajar dengan kartu. Layar memiliki kotak-kotak dengan ukuran yang sama dengan lubang di kartu. Jumlah total dari cahaya yang melewati lubang dan mencapai layar tidak bergantung dengan jarak layar terhadap lubangnya. Meskipun begitu, ketika kita meletakkan layar lebih jauh, sejumlah cahaya yang sama harus melingkupi area yang lebih luas, sehingga konsekuensinya kecerlangan di layar akan meredup. Untuk mensimulasikan sebuah sumber titik dan mengurangi bayangan, kita juga dapat menggunakan kartu ketiga dengan lubang yang diletakkan sangat dekat dengan lampu. Harap berhati-hati untuk tidak meletakkan kartu terlalu lama dekat dengan lampu karena bisa terbakar.

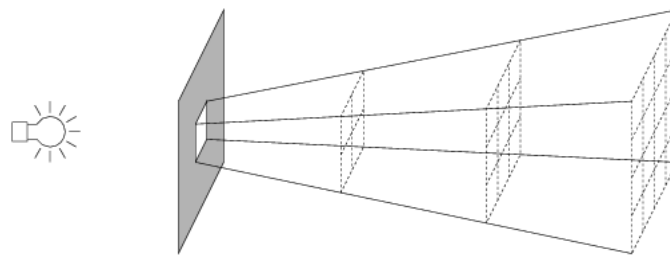


Fig. 4: Experimental setup

Kita mengamati bahwa ketika jarak antara layar dan lampu menjadi dua kali lipat lebih jauh, are yang disinari oleh cahaya menjadi empat kali lebih luas. Hal ini mengimplikasikan bahwa intensitas cahaya (cahaya yang datang per satuan luas) menjadi seperempat dari nilai aslinya. Jika jarak menjadi tiga kali lipat lebih jauh, maka daerah yang disinai akan menjadi sembilan kali lebih luas, sehingga intensitas cahaya akan menjadi sepersembilan dari nilai awalnya. Maka dari itu, kita dapat mengatakan jika intensitas memiliki hubungan kebalikan dengan kuadrat dari jarak sumber cahaya. Dengan kata lain, intensitas berbanding terbalik dengan luas daerah yang di sinari oleh cahaya, yang mana berupa permukaan bila dengan luas  $4\pi D^2$ .

## Sistem Magnitudo

Bayangkan bintang seperti lampu bohlam. Kecerlangannya bergantung dengan daya dari bintang atau lampu dan juga jaraknya dari kita. Hal ini dapat dibuktikan dengan meletakkan selembar kertas berlawanan dengan lampu: jumlah cahaya yang mencapai kertas bergantung dengan daya lampu dan juga jarak antara kertas dan lampu. Cahaya dari lampu menyebar secara merata pada sebuah permukaan bola, yang memiliki luas  $4\pi R^2$ , dengan R merupakan jarak antara dua benda. Sehingga jika kita membuat jaraknya (R) dua kali lebih jauh antara lampu dan kertas (figure 5), maka intensitas yang mencapai kertas bukan menjadi setengahnya, tapi seperempatnya (daerah dimana cahaya di distribusikan menjadi empat kali lebih besar). Dan jika jaraknya dijadikan tiga kali lipat, intensitas yang mencapai kertas menjadi sepersembilannya (daerah tempat cahaya jatuh menjadi sembilan kali lebih besar).

Kecerlangan dari bintang dapat didefinisikan sebagai intensitas (aliran) dari energi yang mencapai suatu luas sebesar satu meter di permukaan Bumi (Figure 5). Jika luminositas (atau power) dari bintang adalah L, maka::

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

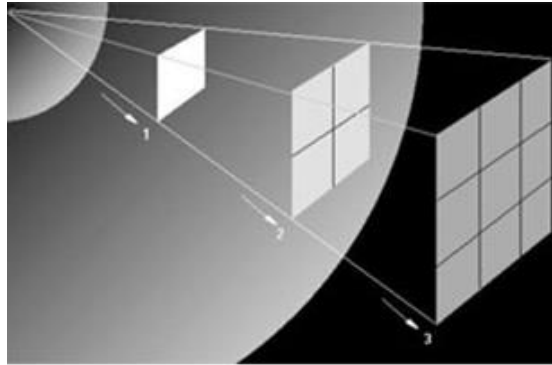


Fig. 5: The light becomes less intense the further away it is

Karena kecerlangan bergantung kepada intensitas dan jarak bintang, maka kita dapat melihat bintang yang sebenarnya redup namun jaraknya dekat dapat terlihat sama terangnya dengan bintang yang terang namun jaraknya jauh.

Hipparchos dari Samos, pada abad kedua sebelum masehi membuat katalog bintang pertama. Dia mengklasifikasikan bintang paling terang sebagai bintang bermagnitudo 1, dan bintang paling redup bintang magnitudo 6. Dia menciptakan sistem pembagian kecerlangan bintang yang hingga saat ini masih dipakai, meskipun sedikit dimodifikasi skalanya agar pengukuran yang dilakukan lebih presisi dibandingkan pengukuran yang dulu dilakukan dengan mata telanjang.

Bintang dengan magnitudo 2 lebih terang dibandingkan dengan bintang magnitudo 3. Terdapat bintang yang memiliki magnitudo 0, bahkan terdapat bintang yang memiliki magnitudo negatif, yakni Sirius, yang memiliki magnitudo-1.5. Bahkan Venus memiliki magnitudo lebih terang lagi -4, bulan purnama magnitudonya -13 dan Matahari memiliki magnitudo -26.8.

Nilai ini disebut sebagai magnitudo nampak, atau magnitudo semu  $m$ , karena merupakan kecerlangan bintang yang nampak jika dilihat dari Bumi. Skala ini memiliki aturan bahwa bintang dengan magnitudo 1 maka akan 2.51 kali lebih terang dibandingkan bintang magnitudo 2, dan bintang magnitudo 2 lebih terang 2.51 kali dari bintang magnitudo 3, dan seterusnya. Hal ini berarti bahwa jika ada perbedaan 5 magnitudo antar dua bintang akan menunjukkan bahwa bintang dengan magnitudo yang kecil akan 100 kali lebih terang dibandingkan dengan magnitudo yang besar. Hubungan ini dapat ditulis secara matematika menggunakan persamaan:

$$\frac{B_1}{B_2} = (\sqrt[5]{100})^{m_2 - m_1} \quad \text{or} \quad m_2 - m_1 = 2.5 \log\left(\frac{B_1}{B_2}\right)$$

Magnitudo semu  $m$  diukur bergantung dengan fluks cahaya yang masuk ke teleskop dari bintang. Bahkan,  $m$  dihitung dari fluks  $F$  dan konstanta  $C$  (yang tergantung pada unit aliran dan pita pengamatan) melalui ekspresi:

$$m = -2.5 \log F + C$$

Persamaan ini memberi tahu kita bahwa semakin besar fluks, semakin besar negatif bintang akan terjadi. Magnitudo mutlak  $M$  didefinisikan sebagai magnitudo semu  $m$  jika objek tersebut dilihat pada jarak 10 parsek dari pengamat.

Untuk mengubah magnitudo semu menjadi magnitudo mutlak maka kita perlu tahu jarak bintang tersebut. Kadang-kadang hal ini menjadi masalah karena jarak di astronomi merupakan salah satu parameter yang sulit untuk ditentukan secara akurat. Namun, jika jarak dalam parsek  $d$  diketahui, maka magnitudo mutlak  $M$  dapat dihitung menggunakan persamaan:

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

## Warna Bintang

Sudah diketahui bahwa bintang memiliki warna yang berbeda-beda. Dengan menggunakan mata telanjang kita dapat membedakan warna yang berbeda-beda pada bintang, namun perbedaan warna ini makin jelas saat bintang di amati menggunakan binokuler dan fotografi. Bintang diklasifikasikan berdasarkan warnanya; klasifikasi ini yang disebut sebagai tipe spektrum, dan diberi tnda huruf yakni: O, B, A, F, G, K, M. (figure 6).



Fig. 6: Spectral Types of Stars, according their colors

Berdasarkan hukum Wien (figure 7), bintang dengan intensitas maksimum berada pada daerah cahaya biru akan memiliki temperatur yang lebih tinggi, sedangkan bintang yang puncak.

Intensitas maksimumnya berada pada daerah merah maka temperaturnya lebih rendah. Dengan kata lain, warna dari bintang mengindikasikan temperatur permukaan dari bintang tersebut.

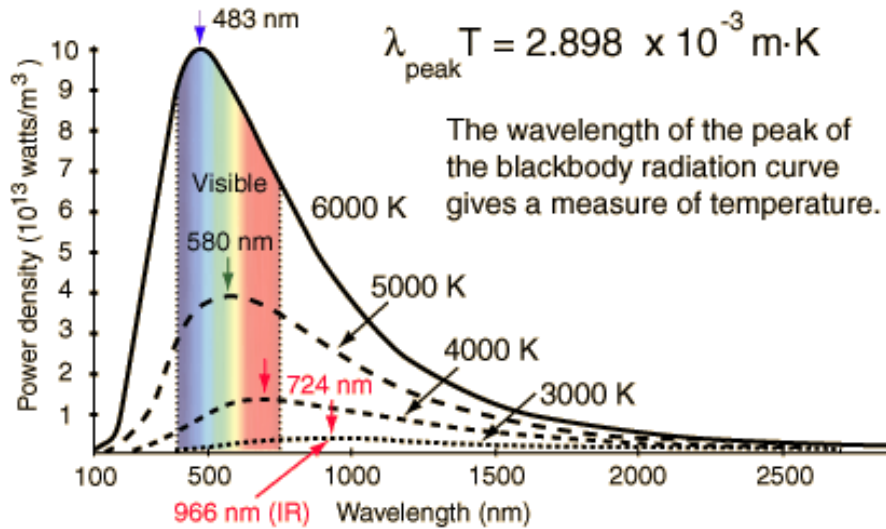


Fig. 7: If the temperature increases, the peak of the star’s intensity moves from the red to the blue.

### Aktivitas 3: Warna Bintang

Pertama, kita akan menggunakan lampu bohlam dengan resistor yang bermacam-macam untuk menggambarkan radiasi benda hitam. Dengan meletakkan filter warna diantara lampu dan spektroskop, pada siswa dapat mempelajari panjang gelombang yang dipancarkan lampu yang melewati filter. Dengan membandingkan cahaya ini dengan cahaya langsung dari lampu, siswa dapat mendemonstrasikan bahwa filter menyerap panjang gelombang tertentu. Kemudian, siswa dapat menggunakan alat yang mirip seperti pada figure 8a, yang memiliki sinar biru, merah, dan hijau, dan diberikan potensiometer, alat ini berguna untuk dapat lebih memahami warna dari bintang. Alat ini dapat dibuat menggunakan lampu, dengan tabungnya dibuat dari kertas asturo hitam, dan lampunya diselimuti beberapa lembar filter dengan warna biru, merah, hijau. Dengan menggunakan alat ini, kita dapat menganalisis figure 8b dan mencoba untuk menghasilkan efek dari kenaikan temperatur bintang. Pada temperatur rendah bintang hanya mengemisikan cahaya merah dengan jumlah yang signifikan.

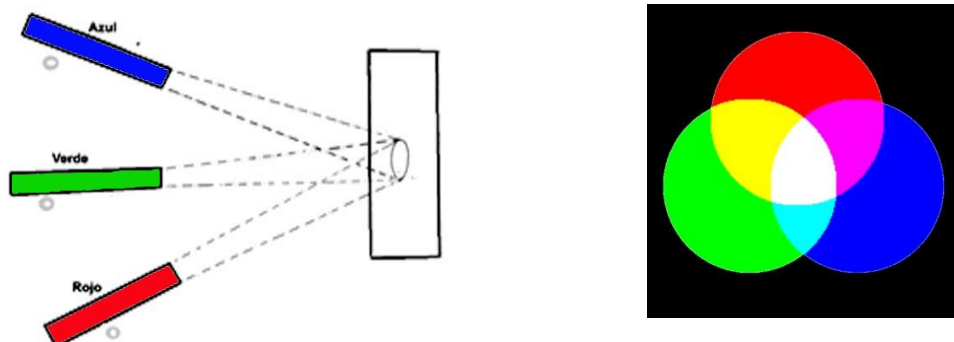


Fig. 8a: Device to explain the star color, Fig. 8b: Projection to explain the color of stars and the production of white color.

Jika temperaturnya naik maka akan ada juga emisi gelombang yang dapat menembus filter hijau. Ketika kontribusi gelombang yang lebih pendek ini menjadi lebih besar maka warna bintang akan berubah dari oranye menjadi kuning. Seiring dengan kenaikan temperatur, panjang gelombang yang melewati filter biru juga menjadi dominan sehingga warna bintang akan menjadi putih. Jika intensitas dari gelombang biru semakin bertambah dan menjadi lebih signifikan daripada panjang gelombang lain, maka bintang akan menjadi biru. Untuk menunjukkan langkah terakhir ini, penting untuk menurunkan intensitas dari lampu merah dan hijau jika kita menggunakan daya maksimum dari lampu untuk menghasilkan warna putih.

## Bagaimana kita bisa tahu bahwa bintang berevolusi?

Bintang dapat diletakkan pada diagram Hertzsprung-Russell (figure 9), yang merupakan plot antara intensitas (luminositas atau magnitudo mutlak) terhadap temperatur atau warna bintang.

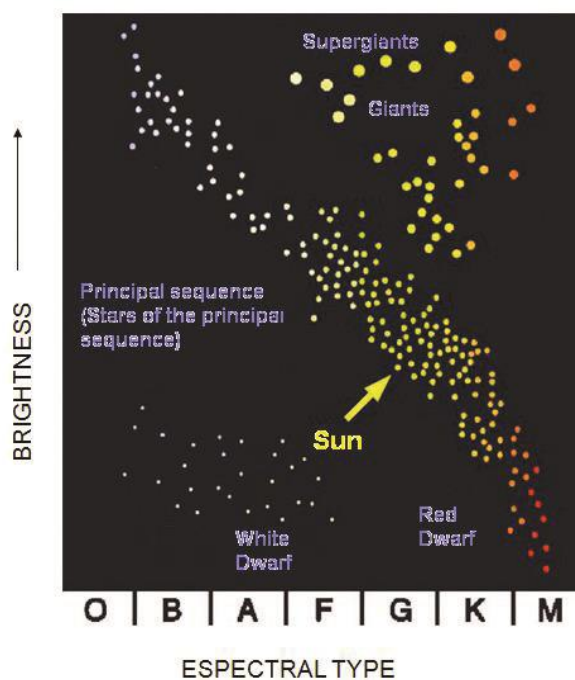


Fig. 9a: H-R Diagram, Fig. 9b: The Sun will shed its external atmosphere and will convert into a white dwarf, like that which exists in the center of this planetary nebula

Bintang yang dingin memiliki luminositas lebih rendah (posisinya di sebelah kanan bawah); bintang panas lebih terang dan intensitasnya lebih tinggi (bagian kiri atas di plot). Lintasan bintang yang membentuk deret bintang mulai dari temperatur dingin/luminositas rendah hingga ke temperatur panas/luminositas tinggi yang dikenal sebagai Deret Utama. Beberapa bintang sudah berevolusi terbelah dahulu akan keluar dari daerah deret utama. Bintang yang sangat panas, namun memiliki luminositas rendah adalah katai putih. Bintang yang memiliki temperatur rendah namun sangat terang dikenal sebagai super raksasa.



Seiring dengan berjalannya waktu, bintang dapat berevolusi dan berpindah posisi di diagram HR. Sebagai contoh, Matahari (center) pada akhir hidupnya akan mengembang dan menjadi raksasa merah. Matahari kemudian akan melepaskan lapisan luarnya dan kemudian menjadi katai putih seperti figure 9b.

### Aktivitas 4: Usia dari gugus bintang

Analisis gambar (figure 10) dari gugus Jewel Box atau Kappa Crucis, di rasi Crux atau salib selatan..



Fig. 10: Image of the Jewel Box cluster

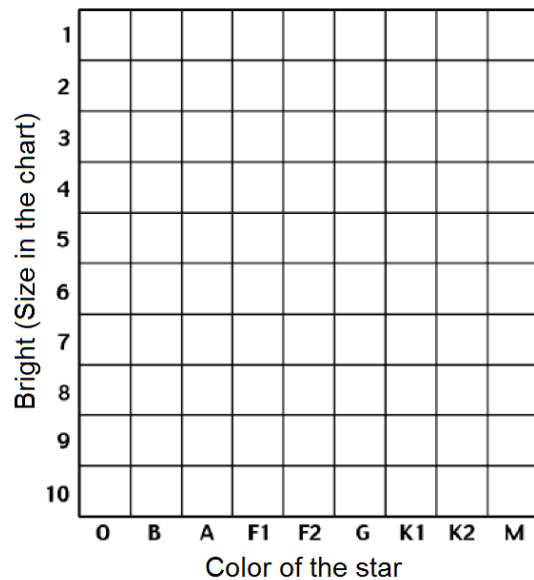


Fig. 11: Worksheet

It is obvious that the stars are not all the same color. It is also difficult to decide where the cluster of stars ends. On figure 10, mark where you think the edge of the cluster is.

Cukup jelas bahwa bintang tidak memiliki warna yang sama. Kita juga sulit untuk menentukan batas dari gugus bintang tersebut. Pada figure 10, tandai di mana kira-kira batas dari gugus tersebut.

Pada gambar yang sama (figure 10), tandai dengan tanda X kira-kira dimana pusat dari gugus itu berada. Kemudian gunakan penggaris untuk mengukur dan menggambar kotak dengan sisi sepanjang 4cm di sekitar pusat gugus. Ukur kecerlangan bintang yang paling dekat dengan pojok kiri atas dari kotak anda, dengan membandingkan ukurannya dengan pembanding yang ada di figure 10. Gunakan juga pembanding warna yang ada di figure 10 untuk menentukan warna bintang. Tandai titik pada warna dan ukuran pada lembar kerja warna-kecerlangan (figure 11).

Perlu diingat bahwa warna berada pada sumbu x sedangkan kecerlangan (ukuran) berada pada sumbu y. Setelah menandai bintang pertama, lanjutkan proses pengukuran kecerlangan (ukuran) dan warna untuk seluruh bintang yang ada diseluruh kotak berukuran 4 cm itu.

Bintang pada gugus Jewel Box seharusnya akan memunculkan pola tertentu pada figure 11. Pada figure 10, terdapat bintang yang berada di depan dan belakang gugus yang sebenarnya bukan anggota dari gugus tersebut. Astronom biasanya menyebutnya sebagai 'bintang medan'. Jika anda memiliki waktu, coba estimasikan seberapa banyak bintang medan yang masuk kedalam kotak 4cm yang tadi digunakan untuk analisis, dan perkirakan warna dan kecerlangannya. Untuk melakukan ini, tentukan lokasi bintang medan pada diagram warna-magnitudo dan tandai dengan 'x' kecil. Perlu diketahui bahwa bintang medan memiliki distribusi acak pada grafik dan tidak membentuk bentuk apapun.

Sebagian besar bintang berlokasi pada suatu garis di grafik yang memanjang dari pojok kiri atas hingga kanan bawah. Semakin kecil massa bintang, maka temperaturnya juga rendah dan akan terlihat merah. Bintang yang paling masif atau massanya paling besar merupakan bintang yang paling panas dan akan terlihat berwarna biru. Deretan bintang yang membentuk garis di diagram warna-magnitudo ini disebut sebagai "deret utama". Bintang pada deret utama ditempatkan pada kelas-kelas yang dimulai dari kelas O (bintang yang paling terang, paling masif, dan paling panas; 40000 K) hingga kelas M (bintang redup, massa paling rendah, dan temperaturnya yang rendah; sekitar 3500 K).

Disebagian besar masa hidup bintang, gaya yang menghasilkan energi bintang juga berperan untuk menyetabilkan bintang agar tidak runtuh. Ketika bintang kehabisan bahan bakar, maka kesetimbangannya tidak terpenuhi lagi dan gaya gravitasi yang besar akan menyebabkan bintang runtuh dan mati.

Perpindahan bintang dari fase deret utama ke fase keruntuhan merupakan bagian dari siklus bintang yang disebut sebagai fase "raksasa merah". Bintang raksasa merah bisa terang karena memiliki diameter yang bisa membesar dari 10 hingga 300 kali lebih besar dari Matahari. Raksasa merah juga merah karena temperatur permukaannya rendah. Pada lembarkerja bintang ini diklasifikasikan sebagai bintang K atau M, namun bintang ini sangat terang. Bintang yang paling masif menghabiskan bahan bakarnya lebih cepat dibandingkan bintang dengan massa yang rendah, sehingga bintang dengan massa besar lebih cepat meninggalkan fase deret utama untuk menjadi raksasa merah. Karena ukurannya yang sangat besar, dapat mencapai 1000 kali diameter Matahari, massa raksasa merah dengan massa antara 10 hingga 50 massa Matahari disebut sebagai "Super raksasa merah" (atau jika berasal dari bintang kelas O disebut "Maharaksasa merah"). Raksasa merah mengembang dan mendingin, menjadi merah dan terang, sehingga berlokasi di daerah kanan atas dari diagram magnitudo warna. Semakin gugus tua, maka semakin banyak juga bintang yang meninggalkan deret utama untuk menjadi raksasa merah. Sehingga, usia dari gugus dapat ditentukan dengan melihat warna dari bintang paling besar dan terang yang masih ada di deret utama.

Banyak bintang di gugus yang tua telah berevolusi melebihi fase raksasa merah: mereka menjadi katai putih. Katai putih sangat kecil, ukurannya seukuran Bumi. Katai putih juga sangat redup, sehingga tidak bisa terlihat pada gambar gugus Jewel Box ini.

Dapatkan anda mengestimasi umur dari gugus bintang Jewel Box dari grafik figure 11 dengan membandingkan dengan gambar gugus pada usia berbeda yang ditunjukkan oleh figure 12a, 12b, dan 12c.

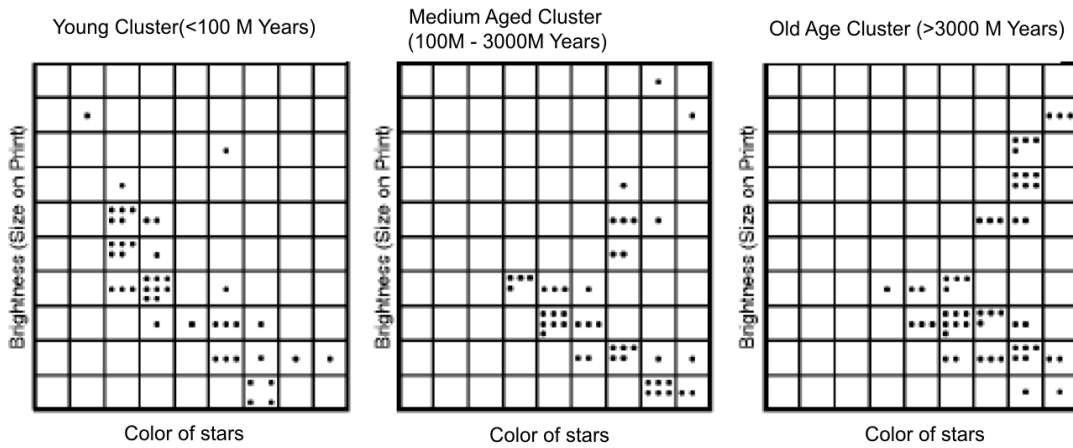


Fig. 12a, 12b, and 12c: Reference cluster HR diagrams

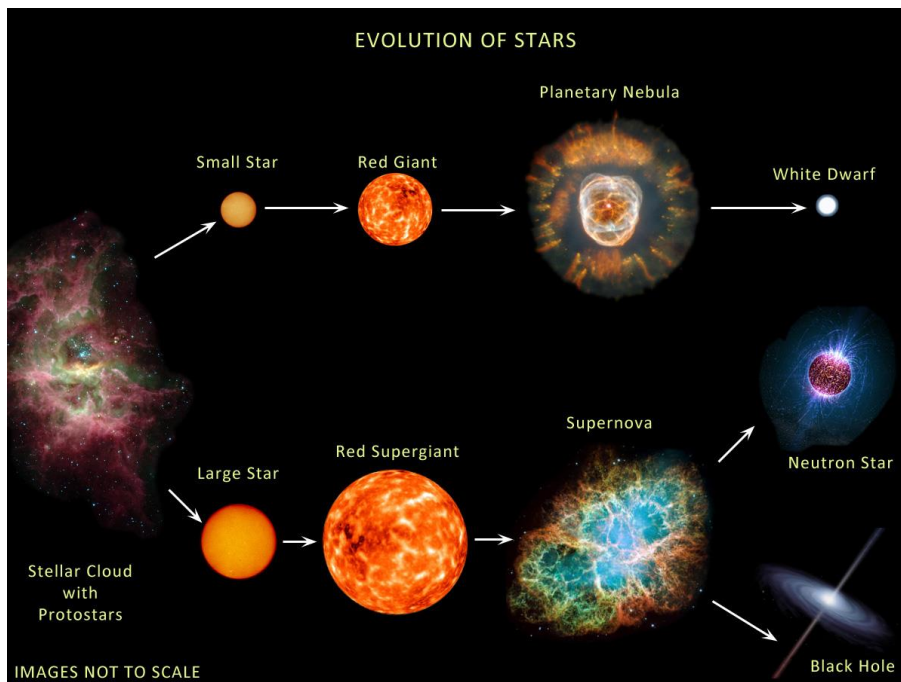


Fig. 13: Evolution of stars according their masses.

## Kematian Bintang

Akhir hidup dari bintang bergantung dengan massanya ketika dia hidup, seperti yang ditunjukkan oleh figure 13.

Pada titik tertentu pada evolusi gugus bintang, bintang masif akan menghilang dari diagram Hertzsprung-Russell. Saat bintang bermassa rendah akan berevolusi menjadi katai putih, bintang masif ini akan berakhir menjadi sebuah fenomena yang paling dahsyat di alam semesta yaitu supernova. Sisa dari peristiwa semacam ini akan menghasilkan objek yang tidak memiliki emisi termal (pulsar dan lubang hitam) sehingga tidak akan terlihat pada diagram HR.

## Apa itu supernova?

Supernova adalah akhir hidup dari bintang dengan massa besar. Deret utama bintang dikarakteristikan oleh adanya fusi hidrogen untuk memproduksi helium, dan seerusnya hingga dapat memproduksi karbon dan elemen berat lainnya. Produk akhir dari proses ini adalah besi. Fusi dari iron tidaklah mungkin terjadi karena reaksinya akan membutuhkan energi yang lebih besar dibandingkan dengan energi yang dilepaskannya.

Fusi dari elemen yang berbeda akan terus berlangsung hingga bahan bakarnya habis. Fusi ini terjadi dari pusat ke arah luar, sehingga setelah beberapa waktu, bintang akan memiliki beberapa struktur berupa lapisan yang wujudnya seperti bawang (figure 14b), dengan elemen yang lebih berat berada pada lapisan yang lebih dalam.

Bintang dengan massa 20 massa matahari memiliki beberapa tahap ini:

- 10 juta tahun membakar Hidrogen di inti (deret utama)
- 1 juta tahun membakar Helium
- 300 tahun membakar Karbon
- 200 hari membakar Oksigen
- 2 hari untuk membakar Silikon: kemudian terjadi ledakan Supernova

Ketika bintang memiliki inti besi, reaksi nuklir tidak lagi mungkin terjadi. Tanpa adanya tekanan radiasi dari fusi untuk mengimbangi gravitasi, bintang akan runtuh, tanpa adanya kemungkinan pembakaran nuklir. Selama terjadinya keruntuhan, inti atom dan elektron akan ditekan satu sama lain dan membentuk neutron dan bagian tengah bintang akan menjadi bintang neutron.



Fig. 14a: Remains of a supernova

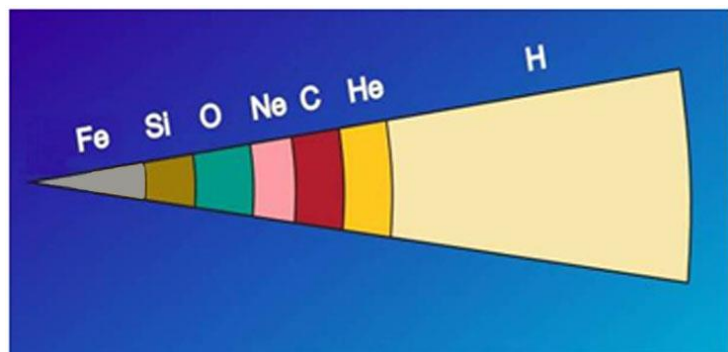


Fig. 14b: Layer structure of the interior of a star before exploding into a supernova

Bintang neutron sangat rapat sehingga satu sendok teh saja akan memiliki berat seperti gedung sebesar satu kota. Ketika neutron dimampatkan, tidak ada lagi penyusutan yang dapat terjadi. Partikel jatuh dari lapisan luar bintang ke arah pusat pada kecepatan hingga

seperempat kecepatan cahaya kemudian menumbuk inti neutron dan langsung berhenti. Hal ini kemudian menyebabkan lapisan luar bintang akan terpantul kembali dalam bentuk gelombang kejut, hasilnya adalah salah satu proses yang paling energetik yang diketahui di alam semesta (figure 14a): bintang tunggal yang meledak dapat lebih terang dari seluruh galaksi yang terdiri dari milyaran bintang.

Selama proses pemantulan ini, energi yang dihasilkan sangat besar hingga elemen yang lebih berat dari besi dapat terbentuk (seperti timah, emas, uranium, dll). Elemen ini terbentuk secara dahsyat selama ledakan dan dilontarkan keluar bersama dengan materi dari lapisan luar bintang. Pada pusat dari materi yang terlontar ini terdapat sisa berupa bintang neutron yang berputar dengan sangat cepat, atau jika massa bintang awalnya sangat besar, dapat menjadi lubang hitam.

## Aktivitas 5: Simulasi ledakan supernova

Ketika bintang meledak sebagai supernova, atom ringan yang berada pada lapisan luar akan jatuh menuju elemen yang lebih berat di bagian dalam bintang dan kemudian akan terpantul akibat dari inti yang padat. Model sederhana dapat digunakan untuk menggambarkan proses ini dengan mudah dan juga menarik, dengan menggunakan bola basket dan bola tenis, dengan menjatuhkan keduanya secara bersamaan pada permukaan yang padat seperti lantai (figure 15). Pada peragaan ini, lantai berfungsi sebagai inti bintang yang sangat rapat, bola basket menggambarkan atom berat yang memantul dari inti, dan bola tenis menggambarkan atom yang lebih ringan.



Fig. 15: We dropped at the same time both a tennis ball and a basketball.

Untuk melakukan peragaan ini, pegang bola basket pada ketinggian setinggi mata dengan bola tenis tepat di atasnya, sebisa mungkin tepat di atasnya. Jatuhkan keduanya secara bersamaan. Mungkin anda akan menduga bahwa bola akan memantul pada ketinggian yang sama, atau mungkin lebih rendah. Namun setelah dicoba, ternyata hasilnya sangat menarik.

Ketika anda menjatuhkan dua bola tersebut, keduanya akan sampai di lantai pada waktu yang bersamaan. Bola yang besar akan memantul dengan kecepatan yang sama saat dia menyentuh lantai. Pada saat itu, bola basket mengalami tumbukan dengan bola tenis yang juga jatuh dengan kecepatan yang sama dengan bola basket. Bola tenis akan terpantul dari bola basket

dengan kecepatan yang lebih tinggi dari saat bola tenis menumbuk bola basket, sehingga hasilnya pantulan bola tenis akan memantul jauh lebih tinggi. Jika eksperimen ini diulangi, menggunakan banyak bola yang ringan, maka pantulannya akan lebih menarik.

Pada peragaan ini, bola tenis akan memantul hingga dua kali dari ketinggian awal. Perlu diperhatikan untuk berhati-hati jika melakukan percobaan ini di dalam ruangan.

Eksperimen ini dapat dilakukan di dalam kelas namun disarankan untuk dilakukan di luar ruangan. Dapat dilakukan dari tempat yang tinggi, namun akan menyulitkan untuk memastikan bahwa bolanya akan dapat lurus secara vertikal, yang efeknya bola tenis akan terpantul pada arah yang susah diperkirakan.

Beberapa toko mainan atau toko di museum menjual mainan yang bernama “Astro Blaster” yang berdasarkan prinsip ini. Mainan ini terdiri dari empat bola karet pada ukuran berbeda-beda yang disatukan oleh satu sumbu. Bola yang lebih kecil akan memantul saat bola yang besar jatuh ke tanah. Mainan ini dapat ditemukan di <http://www.exploreco.es>

## Apa itu bintang neutron?

Bintang neutron merupakan sisa dari bintang masif yang telah runtuh dan telah melepaskan lapisan luarnya melalui ledakan supernova. Bintang neutron biasanya tidak lebih besar dari beberapa kilometer. Seperti namanya, bintang neutron terdiri dari neutron yang terkumpul hingga kerapatannya sangat tinggi: satu sendoknya dapat memiliki massa jutaan ton.

Bintang neutron terbentuk jika sisa ledakan supernovanya memiliki massa 1.44 hingga 8 massa matahari.

## Apa itu pulsar?

Pulsar merupakan bintang neutron yang berputar dengan kecepatan sangat tinggi (figure 16). Ketika bintang masif runtuh, lapisan luarnya jatuh kepusat dan mulai berputar dengan cepat akibat adanya hukum kekekalan momentum sudut. Hal ini mirip seperti pemain ski yang akan berputar lebih cepat saat melipat tangannya kedalam.

Medan magnet bintang menghasilkan emisi sinkrotron elektromagnetik kuat pada arah sumbu rotasinya. Namun karena sumbu magnetiknya tidak selalu sejajar dengan sumbu rotasi (seperti Bumi) bintang neutron yang berotasi akan mirip dengan mercusuar kosmik raksasa. Jika emisi ini kebetulan mengarah ke bumi, maka kita akan mendeteksi denyutan dengan interval yang sama.

Pada tahun 1967, Jocelyn Bell (Burnell) dan Antony Hewish menemukan pulsar pertama. Sinyal denyutan datang dari satutitik di langit diaman tidak ada benda yang terlihat berdenyut di panjang gelombang tampak. Denyutan yang cepat dan berulang ini berdenyut beberapa kali per detik dengan sangat presisi.



Ketika pertama kali dideteksi, pulsar diduga merupakan sinyal dari makhluk asing. Kemudian semakin banyak sumber radio yang berdenyut ditemukan, termasuk yang berada di tengah Crab Nebula. Ilmuwan tahu bahwa nebula ini dihasilkan oleh supernova dan akhirnya dapat menjelaskan asal muasal pulsar. Pulsar PSR B1937+21 merupakan salah satu pulsar dengan frekuensi tercepat yang diketahui yakni berputar lebih dari 600 kali per detik. Ukurannya sekitar berdiameter 5km dan jika berputar 10% lebih cepat maka akan pecah akibat gaya centrifugal. Hewish kemudian memenangkan hadiah Nobel pada tahun 1974.

Pulsar lain yang menarik adalah pulsar pada sistem bintang ganda PSR 1913+16 pada rasi Eagle. Gerak orbit yang sama dari bintang pada medan gravitasi yang sangat kuat menyebabkan sedikit keterlambatan pada emisi cahaya yang sampai ke Bumi. Russell Hulse dan Joseph Taylor mempelajari sistem ini dan mengkonfirmasi banyak prediksi tentang teori relativitas, termasuk emisi gelombang gravitasi. Keduanya mendapat hadiah Nobel pada tahun 1993 untuk penelitiannya.



Fig. 16: Un pulsar es una estrella de neutrones en rotación

## Aktivitas 6. Simulasi Pulsar

Pulsar merupakan bintang neutron yang sangat masif dan berotasi sangat cepat. Pulsar mengemisikan radiasi namun sumbernya tidak lurus dengan sumbu rotasinya, akibatnya berkas radiasi yang dihasilkan akan berputar seperti lampu mercusuar. Jika gelombang ini mengarah ke Bumi, maka kita akan melihat sinyal denyutan dengan frekuensi beberapa kali per detik.

Kita dapat membuat simulasi pulsa dengan senter (figure 17a) yang diikat pada tali. Jika kita nyalakan senternya dan memutarkannya (figure 17b), maka kita akan melihat cahayanya saat senter menghadap ke kita (figure 17c).

Jika kita memiringkan senternya menjadi tidak horisontal, maka kita tidak lagi dapat melihat cahaya senter dari posisi yang sama. Sehingga kita hanya dapat mengamati emisi dari pulsar ini saat kita sejajar dengan baik dengan rotasinya.



Fig. 17a: Assembly, Fig. 17b: Spinning the flashlight, Fig.17c: As it spins we observe the beam of light in a periodic way

## Apa itu lubang hitam?

Jika kita melempar batu ke atas, gravitasi akan memperlambatnya hingga batunya jatuh kembali ke tanah. Jika kita melempar dengan kecepatan tinggi, batu akan terbang lebih tinggi kemudian jatuh. Jika kecepatan awalnya 11 km/detik, yakni kecepatan lepas Bumi, maka batu akan terlempar dan tidak lagi kembali jatuh ke tanah (asumsikan tidak ada gesekan udara).

Jika Bumi mengalami penyusutan dan tetap mempertahankan massanya, maka kecepatan lepas di permukaannya akan meningkat karena kita lebih dekat dengan pusat Bumi. Jika Bumi menyusut hingga radius 0.8 cm, kecepatan lepasnya akan menjadi lebih besar daripada kecepatan cahaya. Karena tidak ada yang lebih cepat dari cahaya, maka tidak ada yang dapat lepas dari permukaannya, bahkan cahaya. Maka Bumi akan menjadi lubang hitam dengan ukuran sebesar kelereng.

Secara teori, mungkin bagi lubang hitam untuk memiliki massa yang sangat kecil. Namun kenyataannya, hanya ada satu mekanisme yang dapat memampatkan massa hingga pada kerapatan yang sangat tinggi, yaitu keruntuhan gravitasi. Agar keruntuhan gravitasi dapat terjadi, dibutuhkan massa yang sangat besar. Kita telah mempelajari bahwa bintang neutron merupakan sisa dari bintang bermassa 1.44 hingga 8 massa matahari. Namun, jika massa bintang awalnya lebih besar lagi, maka gravitasi menjadi lebih kuat lagi hingga interior bintang akan terus mengalami keruntuhan hingga menjadi lubang hitam. Tipe lubang hitam seperti ini akan memiliki massa beberapa kali lebih besar dibandingkan Matahari kita. Kerapatan lubang hitam sangatlah rapat. Sebuah kelereng yang terbuat dari materi serapat itu akan memiliki berat sebesar Bumi.

Meskipun kita tidak dapat melihatnya secara langsung, kita tau beberapa kandidat lubang hitam di alam semesta dari emisi yang dihasilkan materi yang berotasi disekitar lubang hitam dengan kecepatan tinggi. Sebagai contoh, dipusat galaksi kita kita tidak dapat melihat apa-apa, namun kita dapat melihat sebuah cincin yang terbentuk dari gas yang berputar mengelilingi pusat dengan kecepatan tinggi. Penjelasan yang mungkin dari peristiwa ini hanyalah terdapat massa yang sangat besar yang ada di tengah dari cincin tersebut, yang beratnya mencapai tiga hingga empat milyar massa Matahari. Benda ini hanya mungkin



berupa lubang hitam, dengan radius Schwarzschild sedikit lebih besar dari Matahari. Tipe lubang hitam ini, yang berlokasi di pusat banyak galaksi, disebut sebagai lubang hitam supermasif.

## Aktivitas 7. Simulasi kurvatur ruang dan lubang hitam

Mudah untuk mensimulasikan kurvatur ruang dua dimensi yang dihasilkan oleh lubang hitam, yakni dengan menggunakan kain yang elastis (Lycra) (figure 18) atau kain gauze.



Fig. 18: The tennis ball's trajectory isn't a straight line but a curve.

Pertama rentangkan kain tersebut. Kemudian gelindingkan bola kecil atau kelereng di sepanjang kain. Hal ini menggambarkan bagaimana foton dari cahaya bergerak yakni dengan membentuk lintasan yang lurus tanpa adanya kurvatur. Kemudian jika kita letakkan bola yang berat ditengah kain dan menggelindingkan bola kecil maka bola kecil akan bergerak melengkung. Percobaan ini mensimulasikan berkas cahaya pada ruang yang melengkung akibat adanya gravitasi. Seberapa besar lengkungan yang ditempuh bola bergantung dengan seberapa dekat cahaya melewati benda yang bermassa tersebut dan bergantung dengan massa benda tersebut. Sudut belok ini tegak lurus dengan massa dan berbanding terbalik dengan jarak. Jika kita melonggarkan kainnya, maka akan mensimulasikan sumur gravitasi yang lebih dalam, hingga membuat bolanya semakin susah untuk lepas. Hal ini dapat menggambarkan model dari lubang hitam.

## Pustaka

- Broman, L., Estalella, R. Ros. R.M, *Experimentos en Astronomía*. Editorial Alhambra Longman, Madrid, 1993.
- Dale, A.O., Carroll, B.W, *Modern Stellar Astrophysics*, Addison-Wesley Publ. Comp., E.U.A, 1996.

- Moreno, R, *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp. Madrid, 2008.
- Pasachoff, J.M, *Astronomy: From the Earth to the Universe*, 6th Edition, Cengage, USA, 2002.
- Rybicki, G.B., Lightman, A.P, *Radiative Processes in Astrophysics*, John Wiley & Sons, EUA, 1979.
- Zeilik, M, *Astronomy-The Evolving Universe*, 8<sup>th</sup> Ed., John Wiley & Sons, USA, 1997.