

# Vida das estrelas

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

União Astronómica Internacional, Escola Secundária de Loulé (Portugal),  
Universidade Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina), Colégio Retamar  
(Madrid, Espanha), Universidade Politécnica da Catalunha (Barcelona, Espanha)

## Resumo

Para compreender a vida das estrelas é necessário entender de que são constituídas, a que distância se encontram, como evoluem e quais as diferenças entre elas. Através de simples experiências é possível ensinar aos alunos os procedimentos que os cientistas realizaram para estudar a composição das estrelas e também construir alguns modelos simples.

## Objetivos

Esta oficina complementa a palestra geral da Evolução Estelar apresentando diferentes atividades e demonstrações centradas no conhecimento da evolução estelar. Os principais objetivos são:

- Entender a diferença entre a magnitude aparente e magnitude absoluta.
- Entender o diagrama de Hertzsprung-Russell fazendo um diagrama cor-magnitude.
- Compreender os conceitos de supernova, estrela de neutrões, pulsar e buraco negro.

## Atividade 1: Conceito de Paralaxe

A paralaxe é um conceito usado para calcular distâncias em astronomia. Vamos realizar uma atividade muito simples que nos permitirá entender o conceito. Colocamo-nos em frente a uma parede, a uma certa distância, em que hajam pontos de referência: armários, quadros, portas, etc. Esticamos o braço à nossa frente e estendemos o dedo polegar, verticalmente (figuras 1a e 1b).

Se fecharmos o olho direito veremos o dedo, por exemplo, sobre o centro de um quadro. Sem mover o dedo, abrimos o olho direito e fechamos o esquerdo. O dedo agora aparece deslocado sobre o fundo: já não coincide com o centro, mas sim com a borda do quadro.

Por esta razão, quando observamos o céu a partir de duas localizações afastadas, os corpos próximos, por exemplo, a Lua, aparece deslocada em relação às estrelas do fundo, que estão bem mais longe. O deslocamento é maior quanto mais separado estão os lugares de onde se recolhem as observações. Essa distância é denominada linha de base.



Fig. 1a: Com o braço estendido olhamos a posição do polegar em relação ao fundo, primeiro com o olho esquerdo (fechando o direito) e depois ao contrário.

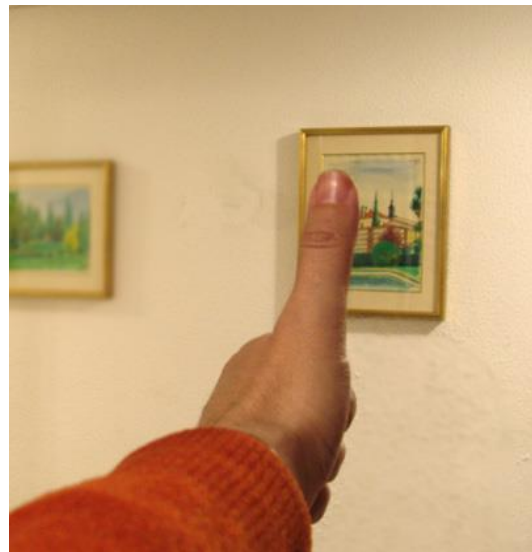


Fig. 1b: Observamos com o olho direito (com o esquerdo fechado).

## Cálculo de distâncias às estrelas por Paralaxe

Paralaxe é a mudança aparente na posição de um objeto quando é observado de diferentes posições. A posição de uma estrela próxima sobre o fundo bem mais longínquo parece mudar quando é vista de dois lugares diferentes. Desta forma podemos determinar a distância das estrelas próximas.

Para que a paralaxe seja apreciável, é considerada como distância base a maior possível, que é o diâmetro da órbita terrestre em redor do Sol (figura 2).

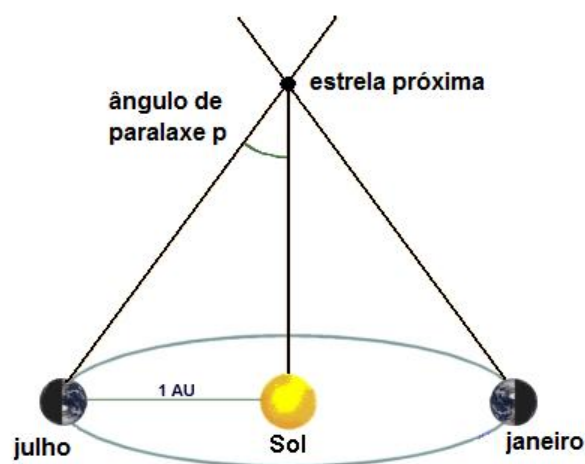


Fig. 2: O ângulo de paralaxe  $p$  é o ângulo verificado quando se observa uma estrela a partir de duas localizações à distância Terra-Sol uma da outra.

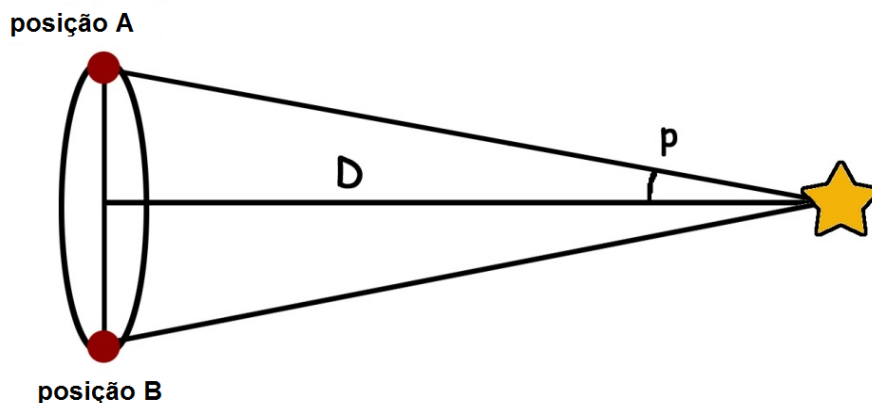


Fig. 3: Conhecido o ângulo  $p$ , é possível calcular a distância  $D$  ao objeto.

Por exemplo, se observarmos uma estrela próxima relativamente ao fundo estrelado, de duas posições  $A$  e  $B$  da órbita terrestre (figura 3), separadas por seis meses, poderemos calcular a distância  $D$  à que se encontra a estrela próxima, deduzindo:

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

Como  $p$  é um ângulo muito pequeno, a sua tangente pode ser aproximada ao ângulo medido em radianos:

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

A base do triângulo  $AB/2$  é a distância Terra-Sol, ou seja, 150 milhões de km. Se soubermos o ângulo de paralaxe  $p$ , a distância até à estrela em quilômetros será  $D = 150\,000\,000 / p$ , com o ângulo  $p$  expressado em radianos. Por exemplo, se o ângulo  $p$  é um segundo de arco, a distância da estrela será:

$$D = \frac{150\,000\,000}{\frac{2\pi}{360 \times 60 \times 60}} = 30\,939\,720\,937\,064 \text{ km} = 3,26 \text{ a.l.}$$

Esta é a unidade de distância usada em astronomia profissional. Se uma estrela for observada com uma paralaxe de um segundo de arco, dir-se-á que está a 1 parsec (pc), que equivale a 1 pc = 3,26 anos-luz. Quanto menor for a paralaxe, maior é a distância da estrela. A relação entre distância (em pc) e paralaxe (em segundos de arco) é:

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

A simplicidade desta expressão é a razão pela qual se usa tanto. Por exemplo, a estrela mais próxima é Próxima Centauri, possui uma paralaxe de  $0''76$  pois está a uma distância de 1,31 pc, o que equivale a 4,28 a.l. A primeira observação de paralaxe de uma estrela (61 Cygni) foi realizada por Bessel em 1838. Mesmo que se suspeitasse da distância longínqua das estrelas, até aquela ocasião não foi possível medir com precisão apropriada a distância das estrelas.

Atualmente, a paralaxe é usada para medir distâncias de estrelas que distam até uns 300 anos-luz. Além dessa distância, a paralaxe é desprezável, pelo que é necessário usar outros métodos que se baseiam, geralmente, na comparação de estrelas longínquas com outras, cuja distância é conhecida por paralaxe. A paralaxe fornece a base para outras medidas de distância em astronomia, uma escada de distância cósmica. Portanto, o conceito de paralaxe é a base desta escada.

## Atividade 2: Lei da inversa do quadrado

Uma simples experiência pode ser útil para compreender a relação entre a luminosidade, o brilho e a distância a que se encontra uma fonte luminosa. Desta forma será possível compreender que a magnitude aparente é uma função da distância. Como demonstrado no diagrama da figura 4, utilizará uma lâmpada e uma cartolina (ou caixa) com uma abertura quadrada num dos lados da lâmpada. A luz da lâmpada é irradiada em todas as direções. Uma certa quantidade de luz passa através da abertura e incide numa tela móvel colocada paralelamente à cartolina. A tela deverá ter desenhados quadrados do mesmo tamanho que o buraco na cartolina. A quantidade total de luz que passa através da abertura na cartolina, e que chega à tela, não depende da distância entre a cartolina e a tela. Porém, quando colocamos a tela mais longe, esta quantidade fixa de luz irá cobrir uma área maior, e conseqüentemente o brilho sobre a tela diminui. Para simular uma fonte pontual, e diminuir as sombras nas margens do quadrado de luz, pode-se utilizar uma terceira cartolina com um buraco, bem próxima da lâmpada (não é possível usá-la por muito tempo, pois pode queimar).

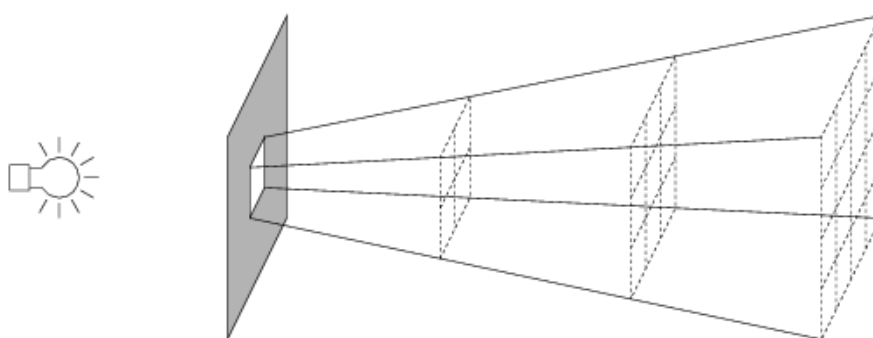


Fig. 4: Fundamento da experiência.

Observamos que, quando a distância passa a ser o dobro, a área sobre a qual incide luz passa a ser quatro vezes maior, logo a intensidade luminosa (a luz que chega por unidade de área) passará a ser um quarto. Se a distância triplicar, a área sobre a qual incide a luz passa a ser nove vezes maior, logo a intensidade luminosa passará a ser um nono. Desta forma, é fácil afirmar que a intensidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância à fonte, ou seja, é

inversamente proporcional à área total que a radiação atravessa, que é uma esfera de área  $4 \pi D^2$ .

## O sistema de magnitudes

Imaginemos que uma estrela é como uma lâmpada acesa. O brilho que vemos depende da sua luminosidade e da distância de onde a vemos. Isto é possível de comprovar colocando uma folha de papel em frente à lâmpada: a quantidade de luz que chega dependerá da potência da lâmpada e da distância da folha até a lâmpada. A luz da lâmpada repartir-se-á pela superfície de uma esfera, cuja área é  $4 \pi R^2$ , em que  $R$  é a distância entre os dois objetos. Por isso, se duplicarmos a distância ( $R$ ) entre a folha de papel e a lâmpada (figura 5), a intensidade com que chega não é a metade, mas a quarta parte (a área da esfera pela qual a luz é repartida é quatro vezes maior). E se a distância for triplicada, a intensidade com a que chega ao papel é a nona parte (a área da esfera pela qual a luz é repartida é nove vezes maior).

O brilho de uma estrela pode ser definido como a intensidade (ou fluxo) de energia que chega a uma área de um metro quadrado situado na Terra (figura 5). Se a luminosidade (ou potência) da estrela é  $L$ , então:

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

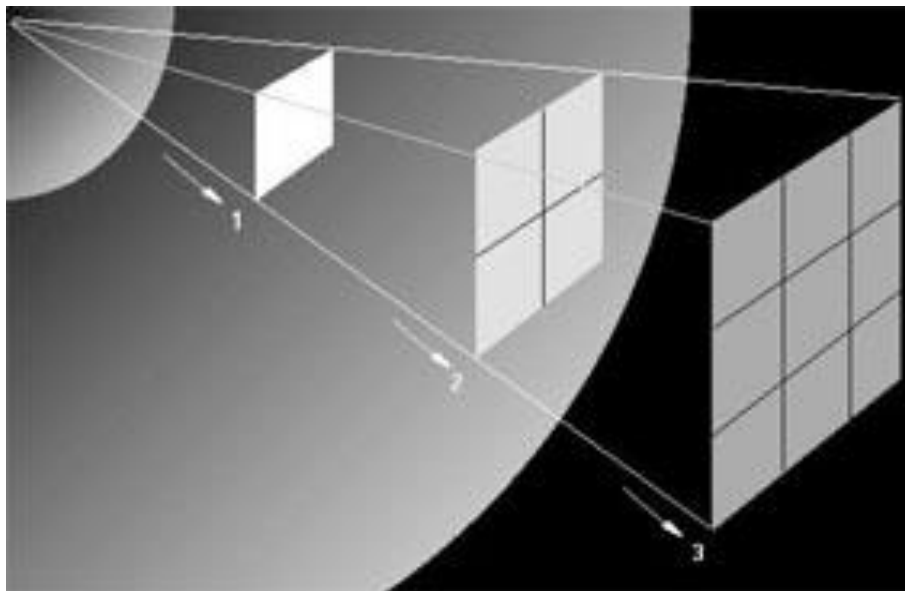


Fig. 5: A luz chega com menos intensidade quanto mais afastado estiver da fonte.

Como o brilho depende da luminosidade e da distância à estrela, podemos observar com o mesmo brilho uma estrela pequena e próxima e outra mais luminosa e longínqua.

Hiparco de Samos, no século II a.C., criou o primeiro catálogo de estrelas. Classificou as mais brilhantes como de 1ª magnitude e as mais fracas, de 6ª magnitude. Inventou um sistema de divisão de brilhos das estrelas que ainda está vigente, embora levemente aperfeiçoado com medidas mais precisas que as tidas a olho nu.

Uma estrela de magnitude 2 é mais brilhante que uma de magnitude 3. Há inclusive estrelas de magnitude 0 e de magnitude negativa, como Sírio, que possui magnitude -1,5. Prolongando a escala, Vénus chega a adquirir magnitude -4, a Lua cheia -13, e o Sol -26,8.

Esses valores são denominados magnitudes aparentes,  $m$ , já que medem o brilho que aparentam as estrelas vistas da Terra. Esta escala usa a regra de que uma estrela de magnitude 1 é 2,51 vezes mais brilhante que outra de magnitude 2, e esta 2,51 ( $=\sqrt[5]{100}$ ) vezes mais brilhante que uma outra de magnitude 3, etc. Esta significa que uma diferença de 5 magnitudes entre duas estrelas é equivalente a  $2,51^5 = 100$  vezes mais brilho. Esta relação matemática pode ser expressa como:

$$\frac{B_1}{B_2} = (\sqrt[5]{100})^{m_2 - m_1}$$

ou

$$m_2 - m_1 = 2,5 \log \left( \frac{B_1}{B_2} \right)$$

A magnitude aparente,  $m$ , de uma estrela é uma medida relacionada com o fluxo,  $F$ , de luz (mensurável com um fotómetro e equivalente ao brilho  $B$ ) que chega aos telescópios de uma estrela e de uma constante  $C$  (que depende das unidades de fluxo e da banda de observação):

$$m = -2,5 \log F + C$$

A expressão anterior permite verificar que quanto maior for o fluxo, mais negativa será a magnitude. A magnitude absoluta,  $M$ , é a magnitude aparente,  $m$ , que teria um objeto se estivesse a uma distância de 10 parsecs.

Para converter a magnitude aparente em magnitude absoluta é necessário conhecer a distância exata à estrela. Muitas das vezes isto é um problema, pois determinar as distâncias em astronomia costuma ser difícil. Mas, se for conhecida a distância à estrela em parsecs,  $d$ , é conhecida, a magnitude absoluta,  $M$ , da estrela pode ser calculada através da equação:

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

## As cores das estrelas

É um facto que as estrelas apresentam diversas cores. A olho nu distinguem-se variações entre elas, mas as diferenças entre cores são mais evidentes quando as estrelas são observadas com binóculos ou fotografadas. As estrelas são classificadas de acordo com a sua cor, classificação da sua classe espectral, e são denominadas como: O, B, A, F, G, K, M. (figura 6).



Fig. 6: Tipos espectrais de estrelas conforme as cores.

De acordo com a Lei de Wien (figura 7), ao analisar a luz que chega de uma estrela, o máximo da intensidade da emissão é mais azul quanto maior for a temperatura, e mais vermelha quanto mais fria. Dito de outra forma, a cor da estrela indica-nos a temperatura da estrela à sua superfície.

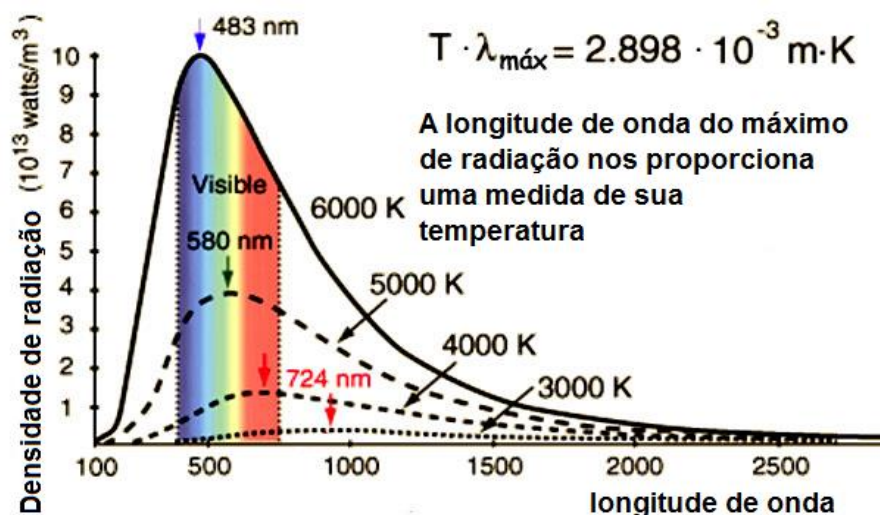


Fig. 7: Quando a temperatura da estrela aumenta, o máximo de intensidade desloca-se do vermelho para o azul.

### Atividade 3: Cores das estrelas

Primeiro, irá usar um simples lâmpada de incandescência com uma resistência variável para ilustrar a radiação de um corpo negro. Colocando filtros coloridos entre a lâmpada e o espectroscópio, os estudantes podem examinar o comprimento de onda da luz transmitida através do filtro. Por comparação com o espectro da lâmpada, os estudantes podem demonstrar que os filtros absorvem determinados comprimentos de onda. Depois, os estudantes podem usar um aparelho semelhante ao apresentado na figura 8a, que contém uma lâmpada azul, uma vermelha e uma verde, equipadas com potenciômetros, para compreender a cor das estrelas. Este instrumento pode ser construído com lâmpadas, onde os tubos são feitos de cartão preto, e a abertura oposta da lâmpada coberta com folhas de celofane colorido. Usando este aparelho podemos analisar a figura 7 e tentar reproduzir o efeito da temperatura estelar. A baixa temperatura a estrela emite luz vermelha em quantidade significativa.

Se a temperatura aumentar também haverá emissão de comprimentos de ondas que passam pelo filtro verde. À medida que esta contribuição se torna mais importante a cor da estrela passará pelo laranja e o amarelo. À medida que a temperatura aumenta os comprimentos de onda que passam pelo filtro azul tornam-se importantes e, devido a isso, a cor da estrela torna-se branca. Se

a intensidade dos comprimentos de onda azul continuar a crescer e ficar significativamente maior do que a intensidade dos comprimentos de ondas que passam nos filtros vermelho e verde, a estrela torna-se azul. Para demonstrar esse último passo será necessário reduzir a intensidade das lâmpadas vermelha e verde se usou a intensidade máxima para produzir o branco.

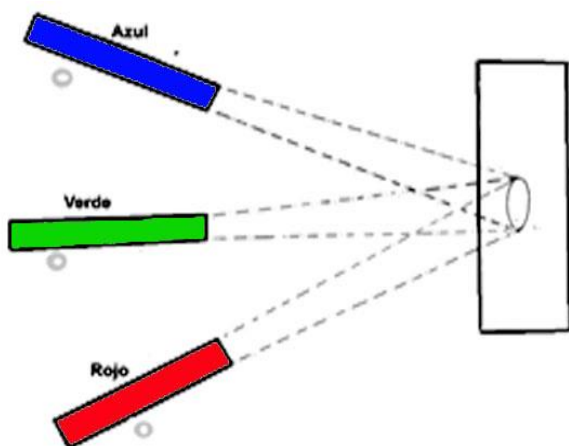


Fig. 8a: Esquema do aparelho para explicar a cor das estrelas.

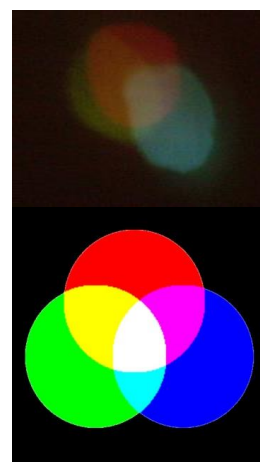


Fig. 8b: Aspecto da projeção para explicar a luz de cor branca.

## Como sabemos que as estrelas evoluem?

As estrelas podem ser agrupadas num diagrama de Hertzsprung-Russell (figura 9a) que relaciona a intensidade das estrelas (luminosidade ou magnitude absoluta) em função da temperatura, ou cor, das estrelas. As estrelas frias terão pouca luminosidade (em baixo à direita, no diagrama) e as muito quentes terão alta luminosidade (em cima à esquerda, no diagrama). Esta distribuição de estrelas forma uma sequência de estrelas desde as de baixa temperatura (baixa luminosidade) até às de alta temperatura (alta luminosidade), e é conhecida como Sequência Principal. Algumas estrelas afastam-se da Sequência Principal. Estrelas muito quentes mas com baixa luminosidade são anãs brancas. Estrelas de baixa temperatura e alta luminosidade são conhecidas por supergigantes.

Com o tempo, uma estrela pode evoluir e “movimentar-se” no diagrama H-R. Por exemplo, o Sol (no centro), no final da sua vida aumentará de tamanho e passará a ser uma gigante vermelha. Depois ejetará a camada externa e converter-se-á numa anã branca, como a da figura 9b.



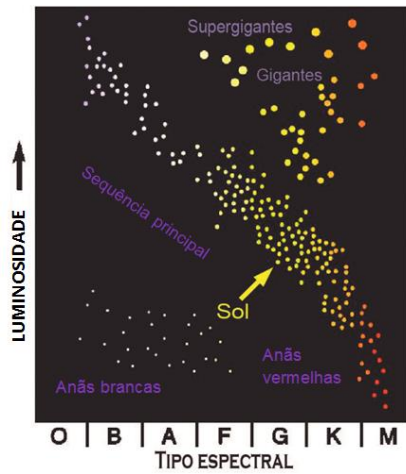


Fig. 9a: Diagrama H-R.



Fig. 9b: O Sol expulsará a sua camada externa e converter-se-á numa anã branca, como a que está no centro desta nebulosa planetária.

### Atividade 4: A idade dos cúmulos abertos

Examine a fotografia da figura 10, da Caixa de Joias, ou Kappa Crucis, na constelação Cruzeiro do Sul.



Fig. 10: Imagem da Caixa de Joias.

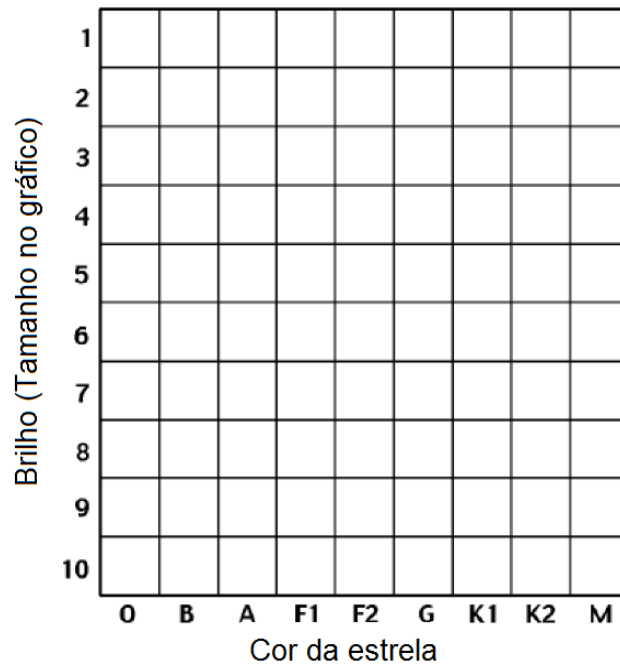


Fig. 11: Folha de Trabalho.

É evidente que as estrelas não são todas da mesma cor. Também é difícil decidir onde acaba o aglomerado de estrelas. Sobre a figura 10, marque o lugar onde acha que o aglomerado termina, ou onde está o seu limite.

Na mesma figura 10, indique com um “X” o lugar onde acha que se encontra o centro do aglomerado estelar e utilize uma régua para medir e desenhar um quadrado de 4 cm de lado em torno desse centro. Meça o brilho da estrela mais próxima do canto superior esquerdo do seu quadrado, a partir da comparação com a guia na margem da figura 10. Estime a cor da estrela com a ajuda da guia de cores de comparação localizada na margem da figura 10. Marque esta estrela, desenhando um ponto no quadriculado da figura 11.

Note que a cor é na abscissa e que o brilho (tamanho) é na ordenada. Após marca a primeira estrela, proceda de modo a medir e marcar, cor e brilho (tamanho) de todas as estrelas dentro do quadrado de 4 cm.

As estrelas da Caixa de Joias deverão aparentar um certo padrão no gráfico criado na figura 11. Na imagem da figura 10, aparecem estrelas que se encontram à frente e atrás do aglomerado aberto mas não fazem parte dele. Os astrónomos denominam essas estrelas como “estrelas de campo”. Caso tenha tempo estime quantas estrelas de campo foram incluídas no quadrado de 4 cm de lado e avalie a sua cor e o seu brilho. Para fazer isto, localize as estrelas de campo no diagrama cor-magnitude, indicando-as com um x minúsculo, em vez de um ponto. Observe que as estrelas de campo distribuem-se no gráfico de forma aleatória, não parecendo formar nenhum padrão.

A maioria das estrelas está distribuída numa faixa do gráfico que vai do canto superior esquerdo até ao canto inferior direito. As estrelas menos massivas são mais frias e são vermelhas. As estrelas mais massivas são quentes, azuis, e brilhantes. Esta “banda” formada pelas estrelas denomina-se Sequência Principal. Estas estrelas são classificadas de O (as mais brilhantes, mais massivas e de maior temperatura: aproximadamente 40 000 K) a M (as menos brilhantes, de pouca massa e baixíssima temperatura: aproximadamente 3 500 K).

Durante a maior parte da vida de uma estrela, as mesmas forças internas que produzem energia da estrela também a impedem de colapsar sobre si mesmo. Quando o combustível da estrela acaba, este equilíbrio acaba e as imensas forças de atração gravitacional da estrela causa o seu colapso e morte.

A transição de uma estrela entre a sequência principal e o colapso é uma parte de seu ciclo denominado “gigante vermelha”. As gigantes vermelhas são brilhantes porque possuem um diâmetro entre 10 e mais de 300 vezes maiores que o Sol. São vistas como vermelhas porque a sua temperatura à superfície é baixa. No diagrama são classificadas como estrelas K ou M mas são muito brilhantes. As estrelas mais massivas esgotam o seu combustível muito rapidamente e são as primeiras que abandonam a sequência principal para se transformar em gigantes vermelhas. Devido à sua enorme dimensão, que pode ser mais do que 1 000 vezes a dimensão do diâmetro do Sol, as gigantes vermelhas das estrelas com massas compreendidas entre 10 e 50 massas solares são conhecidas como “supergigantes vermelhas” (hipergigantes vermelhas no caso das que tiveram origem numa estrela de classe O). As gigantes vermelhas expandem-se e arrefecem, tornando-se brilhantes e vermelhas e, por isso, estão localizadas na região superior direita do diagrama. À medida que o aglomerado envelhece, uma maior quantidade de estrelas abandonará a sequência principal para se transformar em gigantes vermelhas. Os astrónomos afirmam que a idade do cúmulo pode ser determinada pela cor da estrela mais brilhante, a mais massiva, que ainda permanece na sequência principal.

Muitas estrelas de aglomerados velhos evoluíram do estado de gigantes vermelhas para outro, tornando-se anãs brancas. As anãs brancas são muito pequenas, aproximadamente do tamanho da Terra. Também são pouco brilhantes e por isso não é possível vê-las nesta imagem da Caixa de Joias.

Será possível estimar a idade do aglomerado aberto Caixa de Joias (figura 10) por comparação do gráfico 11 com gráficos de aglomerados de diferentes idades, representados nas figuras 12a, 12b e 12c?

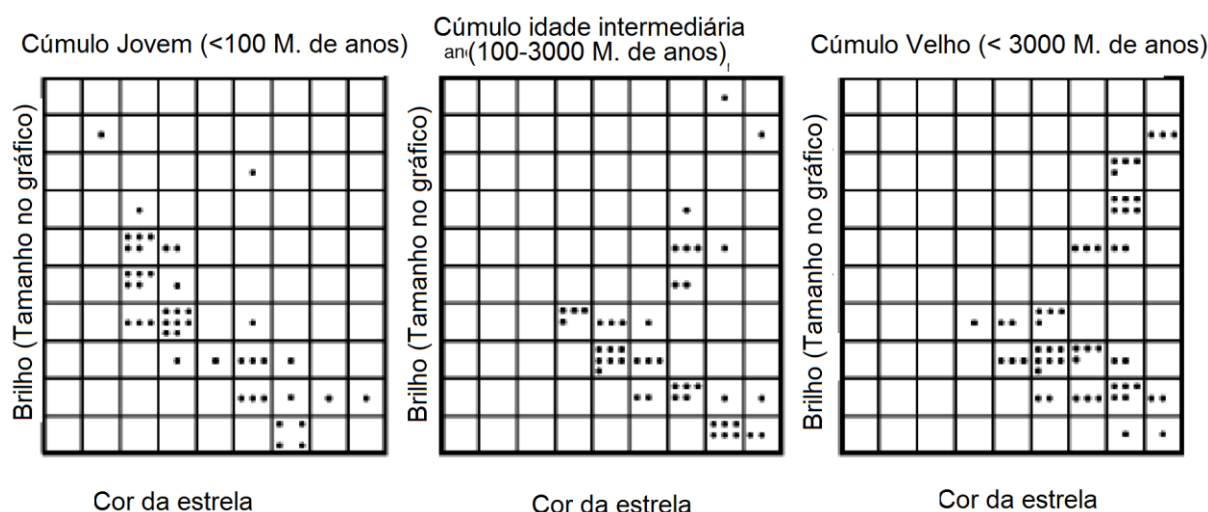


Fig. 12a, 12b e 12c: Diagramas H-R de aglomerados de referência.

Conhecendo o diagrama H-R e a relação entre a cor (temperatura superficial), o brilho (ou luminosidade) das estrelas e a idade das estrelas, é possível explicar a evolução dos aglomerados. Pode-se comparar as vidas relativas das estrelas O/B com as A/F/G e as K/M. Pode-se observar que estrelas com a mesma massa evoluem da mesma forma, mesmo em diferentes aglomerados. Desta forma é possível observar a idade de diferentes aglomerados usando o diagrama H-R. Por isso pode-se afirmar que a figura 12a é de um aglomerado jovem (há estrelas O e B na sequência principal e sabemos que estas estrelas evoluem rapidamente para supergigantes vermelhas), e que a figura 12c corresponde a um aglomerado velho (com estrelas K e M na sequência principal e muitas estrelas gigantes vermelhas).

Poderíamos perguntar: Qual seria o lugar que corresponderia ao Sol no diagrama Hertzsprung-Russell? O Sol é uma estrela com temperatura superficial de 5 870 K e, por isso, amarela. Corresponde à classe tipo G2 (abscissas). Encontra-se na sequência principal, no qual o hidrogénio é fundido, no seu núcleo, para se transformar em hélio. Isto coloca-o na classe de luminosidade V, com muitas outras estrelas da sequência principal.

## Morte das estrelas

O final de uma estrela depende da massa da nebulosa inicial, como pode ser observado na figura 13.

Num determinado momento da evolução dos aglomerados estelares, as estrelas de maior massa desaparecem do diagrama de Hertzsprung-Russell. Enquanto as menos massivas vão evoluir para anãs brancas, as maiores vão dar origem a um dos mais violentos fenômenos do Universo: uma supernova. Os resíduos que sobram destes fenômenos não possuem emissão térmica (pulsares e buracos negros) e por isso não são visíveis no diagrama de Hertzsprung Russell.

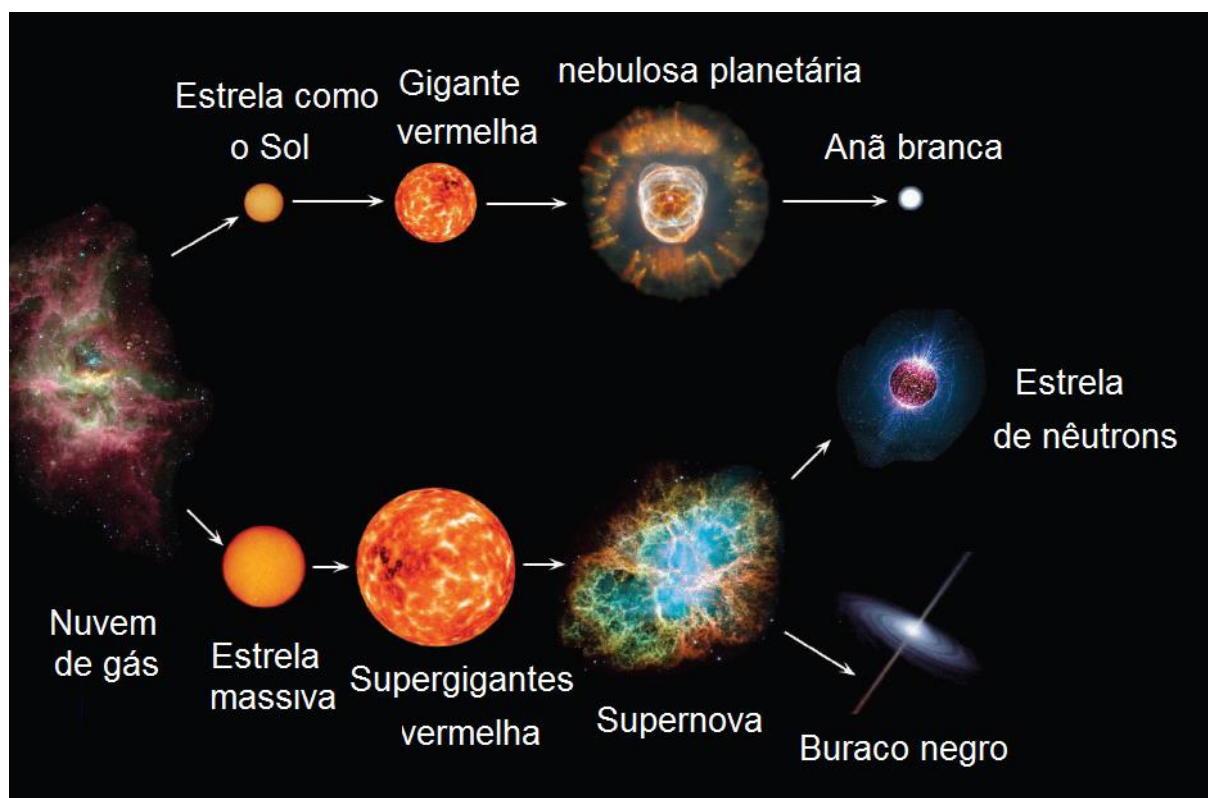


Fig. 13: Evolução das estrelas conforme sua massa.

## O que é uma supernova?

É a morte de uma estrela muito massiva. A sequência principal de uma estrela é caracterizada pela fusão do hidrogénio para produzir hélio, passando depois à produção de carbono e elementos cada vez mais pesados. O produto final é o ferro. A fusão do ferro não é possível porque esta reação requer energia, ao contrário de a produzir.

A fusão de diferentes elementos prossegue até que os reagentes se esgotem. Estas fusões ocorrem fora do núcleo pelo que, passado algum tempo, a estrela adquire uma estrutura em capas, chamada estrutura de cebola (figura 14b), com elementos mais pesados nas camadas mais próximas do núcleo.



Fig. 14a: Restos de uma supernova.

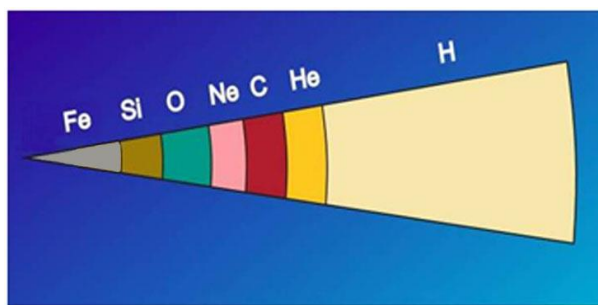


Fig. 14b: Estrutura em camadas do interior de uma estrela antes de explodir como uma supernova.

Uma estrela de 20 massas solares apresenta as seguintes fases:

- 10 milhões de anos a queimar hidrogênio no seu núcleo (sequência principal);
- 1 milhão de anos a queimar hélio;
- 300 anos a queimar carbono;
- 200 dias a queimar oxigênio;
- 2 dias a consumir silício: a explosão da supernova é iminente.

Quando, finalmente, a estrela tem um núcleo de ferro, não são possíveis mais reações nucleares. Sem a pressão de radiação da fusão para equilibrar a gravidade, o colapso da estrela é inevitável, sem a possibilidade mais ignições nucleares. Durante o colapso, os núcleos atômicos e os elétrons agrupam-se formando neutrões e a parte central do núcleo torna-se uma estrela de neutrões.

As estrelas de neutrões são tão densas que um colher de chá pesaria tanto como todos os edifícios de uma grande cidade. À medida que os neutrões são compactados mais nenhuma contração ocorre. A queda de partículas a partir das camadas mais exteriores da estrela, a velocidades da ordem da quarta parte da velocidade da luz, atingem o núcleo e são subitamente paradas. Isto causa um ressalto, produzindo uma onda de choque que é um dos processos mais energéticos que são conhecidos no Universo (figura 14a): uma só estrela em explosão pode brilhar mais que uma galáxia inteira, composta por bilhões de estrelas.

Durante este ressalto as energias são tão grandes que alguns elementos mais pesados que o ferro são criados (como o chumbo, o ouro, o urânio, etc.). Estes elementos emergem violentamente durante a explosão e são ejetados juntamente com todo o material da estrela. No centro do material ejetado permanece uma estrela de neutrões girando a grande velocidade ou, se a estrela era suficientemente massiva, um buraco negro.

## Atividade 5: Simulação da explosão de uma supernova

Quando uma estrela explode como supernova, os átomos leves das camadas exteriores caem em direção aos átomos mais pesados do interior e, finalmente, ressaltam no núcleo central maciço. Um modelo simplificado para o ressalto dos átomos pesados contra o núcleo maciço, e o destes contra os mais ligeiros que surgem por trás, caindo das camadas superficiais dessa gigantesca cebola (figura 14b), pode ser representado de forma fácil, e um tanto espetacular, com uma bola de basquete e uma bola de ténis, deixando-as cair juntos sobre um terreno duro

(figura15). Neste modelo, o solo representa o núcleo maciço da estrela de neutrões, a bola de basquete seria um átomo pesado que ressalta do núcleo e empurra o átomo leve que vem por trás, representado pela bola de ténis.



Fig. 15: Deixamos cair ao mesmo tempo uma bola de basquete e uma de ténis.

Para realizar o modelo, coloque a bola de basquete à altura dos olhos e sobre ela a bola de ténis, o mais vertical possível. Largue as duas ao mesmo tempo. Pode prever que a altura de ressalto seja igual à altura de partida, ou até menor, devido à fricção e à energia dissipada para o chão. No entanto, o resultado é bem diferente.

Ao largar as duas bolas, elas chegam quase ao mesmo tempo ao solo. A bola grande ressalta elasticamente e retrocede praticamente com a mesma velocidade com que chegou. Nesse momento choca com a pequena bola de ténis, que desce com a mesma velocidade com a que a bola de basquete sobe e a pequena sai disparada com grande velocidade para acima, atingindo uma altura muito mais alta do que a que foi largada. Se esta experiência for repetida usando um maior número de bolas, ou bolas mais leves, as velocidades de ressalto serão fantásticas.

No modelo apresentado, a bola pequena chega a ultrapassar o dobro da altura inicial de queda das duas. De fato, é necessário ter cuidado para que não quebre nada, no caso de realizar a experiência dentro de um edifício.

Esta experiência pode ser realizada em sala ou em outro lugar fechado, ainda que seja preferível fazê-la ao ar livre. Pode ser realizado de uma janela alta, mas é difícil que as bolas caiam perfeitamente verticais e podem ressaltar com grande força em direções imprevisíveis.

Em algumas lojas de brinquedos, ou lojas de Museus de Ciência, são vendidos brinquedos conhecidos como “Astro Blaster”, baseados no mesmo princípio. Consiste em quatro pequenas bolas de borracha, de diferentes tamanhos, unidos por um eixo. A bola menor sai disparada depois do sistema atingir o solo.

## **O que é uma estrela de neutrões?**

Uma estrela de neutrões é o que resta de uma estrela muito massiva que colapsou e que lançou as suas camadas numa explosão de supernova. As estrelas de neutrões não são, normalmente, maiores que algumas dezenas de quilómetros. Como o próprio nome indica, consistem num aglomerado de neutrões empilhados com uma densidade incrível: um simples dedal desta matéria pesaria milhões de toneladas.

Uma estrela de neutrões é formada se a supernova tiver entre 1,44 e 8 massas solares.

## **O que é um pulsar?**

Um pulsar é uma estrela de neutrões que gira com extraordinária rapidez (figura 16). Quando uma estrela massiva colapsa, as camadas exteriores caem na direção do núcleo e começa a girar devido à conservação do momento angular. É semelhante ao acelerar da velocidade de rotação de um patinador quando este recolhe os braços.

O campo magnético da estrela cria fortes emissões eletromagnéticas na direção do seu eixo. Mas como o eixo do campo magnético não costuma coincidir com o eixo de rotação (tal como o que acontece na Terra), esta emissão gira como um gigantesco farol cósmico. Se o jato de emissão está direcionada para a Terra, detetamos pulsações a um ritmo muito regular.

Em 1967, Hewish e Bell descobriram o primeiro pulsar, Os pulsos provinham de ponto no espaço onde não se observava nada em luz visível. A rápida repetição de pulsos era impressionante – várias vezes por segundo com uma precisão espantosa.



Fig. 16: Um pulsar é uma estrela de nêutrons em rotação.

Primeiro acreditava-se que os pulsares poderiam ser sinais de extraterrestres inteligentes. Depois foram descobertas mais fontes rádio pulsantes, incluindo no centro da nebulosa do Caranguejo. Os cientistas sabiam que esta nebulosa foi produzida por uma supernova e puderam, finalmente, explicar a sua origem. O pulsar PSR B1937+21 é um dos pulsares mais rápidos conhecidos e gira mais de 600 vezes por segundo. Tem aproximadamente 5 km de diâmetro e se girasse apenas 10% mais rápido seria destruído pela força centrífuga. Hewish ganhou o Prémio Nobel da Física em 1974.

Outro pulsar muito interessante é o sistema binário, chamado PSR 1913+16, na constelação de Águia. O movimento orbital mútuo em campos gravitacionais tão intensos produz pequenos atrasos nas emissões que recebemos. Russel Hulse e Joseph Taylor estudaram este sistema e confirmam muitas previsões da teoria da relatividade, incluindo a emissão de ondas



gravitacionais. Estes dois americanos receberam o Prémio Nobel da Física em 1993 por esses estudos.

## Atividade 6: Simulação de um pulsar

Um pulsar é uma estrela de neutrões, muito maciça, que gira rapidamente. Emite radiação, mas a fonte não está totalmente alinhada com o eixo de rotação, pelo que a emissão gira como um farol. Se o feixe estiver orientado para a Terra, o que vemos é uma radiação que pulsa várias vezes por segundo.

Podemos simular um pulsar com uma lanterna (figura 17a) amarrada a uma corda presa ao teto. Se ligarmos e a girarmos (figura 17b), veremos a luz de forma intermitente cada vez que a lanterna apontar na nossa direção (figura 17c).

Se inclinar um pouco a lanterna para que não fique horizontal, deixará de ver o feixe de luz, a partir da mesma posição. Por isso, apenas observamos a emissão de um pulsar se estivermos bem alinhados com a sua rotação.



Fig. 17a: Montagem.

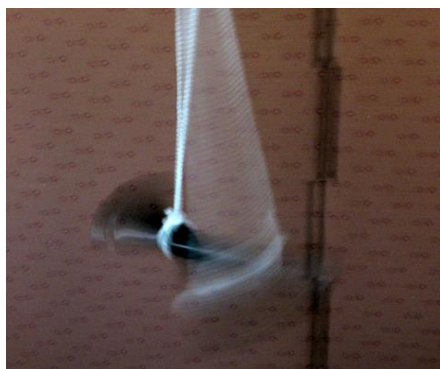


Fig. 17b: Giramos a lanterna.



Fig. 17c: Vemos sua luz de forma intermitente.

## O que é um buraco negro?

Se lançarmos uma pedra para cima, a força da gravidade irá desacelerá-la até que regresse novamente ao solo. Se a velocidade com que a lançarmos for maior, a pedra irá atingir alturas superiores antes de cair. Se a velocidade inicial for 11 km/s, a velocidade de escape da Terra, a pedra não voltaria a cair (desprezando o atrito do ar).

Se a Terra se contraísse mas mantivesse a sua massa, a velocidade de escape à sua superfície seria maior, já que estaríamos mais próximos do centro da Terra. Caso se concentrasse até um raio de 0,8cm, a velocidade de escape seria maior que a velocidade da luz. Como nada pode ultrapassar a velocidade da luz, nada escaparia da sua superfície, nem sequer a luz. A Terra ter-se-ia convertido num buraco negro do tamanho de um berlinde.

Teoricamente, pé possível que existam buracos negros de massas muito pequenas. No entanto só é conhecido um mecanismo que concentre tanta massa na densidade necessária: o colapso gravitacional. Para que isso aconteça são necessárias massas muito grandes. Já vimos a

formação de estrelas de neutrões como restos de estrelas de 1,44 a 8 massas solares. Se estrela originária é ainda mais massiva, a gravidade é tão forte que o seu interior continua a colapsar sobre si mesma até se tornar num buraco negro. Por isso, este tipo de buraco negro terá uma massa várias vezes maior que o nosso Sol. A sua densidade de um buraco negro é impressionante. Um berlinde feito da sua matéria pesaria tanto como toda a Terra.

Apesar de não os conseguirmos observar diretamente, conhecemos diversos candidatos a buracos negros no Universo graças à emissão de material por outros objetos visíveis que giram na sua órbita, a grande velocidade. Por exemplo, mesmo no centro da nossa galáxia não vemos nada, mas detetamos um anel de gases que gira em redor do centro a velocidades incríveis. A única explicação possível é que lá exista uma enorme e invisível massa, várias vezes superior à do Sol. Isso apenas pode ser um buraco negro, com o raio de Schwarzschild ligeiramente superior ao do Sol. Este tipo de buracos negros, estão situados no centro de muitas galáxias, são denominados buracos negros supermassivos.

### Atividade 7: Simulação da curvatura do espaço e de um buraco negro

É muito simples simular a curvatura do espaço causada por um buraco negro usando um pedaço de tecido elástico: lycra (figura 18) ou com um grande pedaço de malha para fixar compressas.



Fig. 18: A trajetória da bola de ténis não é em linha reta, é uma curva

Primeiro, estender o tecido ou a malha. Agora, lançar uma bola mais leve (ou um berlinde) ao longo do tecido. Isto representa um fotão de luz e a sua trajetória simula a trajetória retilínea de um raio de luz na ausência de curvatura. Mas, se colocamos uma bola pesada (ex: um balão cheio de água) e lançarmos a bola mais leve (ou o berlinde), a sua trajetória no tecido será uma curva, simulando a trajetória de um raio de luz num espaço curvo causado pela presença de uma massa gravítica. O grau do desvio da trajetória é proporcional à massa e inversamente

proporcional à distância. Se afrouxarmos um pouco a tensão do tecido, é produzida um poço gravitacional maior, do qual é difícil a bola leve sair. Torna-se um modelo de buraco negro.

## **Bibliografia**

- Broman, L., Estalella, R. Ros. R.M, *Experimentos en Astronomía*, Ed. Alhambra Longman, Madrid, 1993.
- Dale,A.O., Carrol,B.W, “*Modern Stellar Astrophysics*”, Addison-Wesley Publ. Comp., EUA, 1996.
- Moreno, R, *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp. Madrid, 2008.
- Pasachoff, J.M, *Astronomy: From the Earth to the Universe*, 4th Edition, Saunders College Publishing, EUA, 1995.
- Rybicki,G.B., Lightman, A.P, *Radiative Processes in Astrophysics*, John Wiley & Sons, EUA, 1979.
- Zeilik, M., Gregory, S.A., Smith, E.V.P, *Introductory Astronomy and Astrophysics*, 3<sup>rd</sup> Ed., Saunders College Publishing, EUA, 1992.