



1^a
*Reunião
Regional*

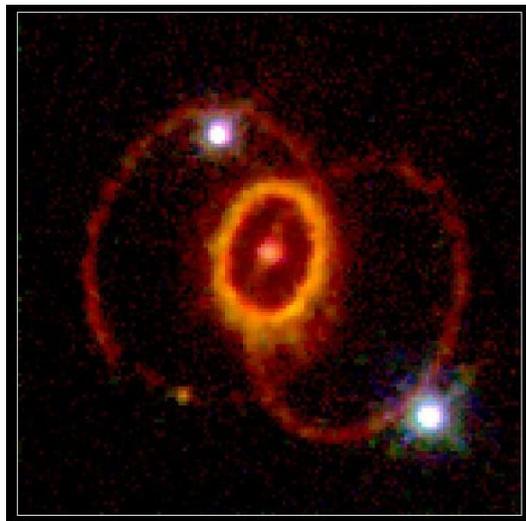
Educação, Cultura, Ciência para Cidadania

Uma Reunião dedicada aos Professores do Ensino
Médio e Fundamental

7 a 12 de Novembro de 2003

Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande, PB

Medindo a Distância da Supernova 1987A



A astronomia é uma ciência visual e acessível, o que a torna ideal para propósitos educacionais. Nos últimos anos o Telescópio Espacial Hubble (NASA/ESA) e os telescópios dos observatórios ESO em La Silla e Paranal (Chile), e Gemini¹ no Chile e Havaí, têm mostrado visões cada vez mais profundas e espetaculares do Universo. Entretanto, tais telescópios não apresentam somente imagens chocantes, eles são, também, ferramentas importantíssimas para os astrônomos. Esses telescópios possuem excelente resolução espacial e angular (imagens nítidas e bem resolvidas) que permitem aos astrônomos desvendar partes cada vez mais distantes do Universo e responder questões que estão há muito tempo sem respostas.

As análises de tais observações, muitas vezes altamente sofisticadas em detalhes, é algumas vezes suficientemente simples, a ponto de permitir aos estudantes do nível médio a oportunidade de repeti-las por si mesmos.



Figura 1: **Telescópio Espacial Hubble (NASA/ESA)**. De sua órbita em torno da Terra, esse instrumento tem apresentado imagens espetaculares do Universo.

¹O Brasil é membro integrante do consórcio que opera os telescópios Gemini. Para maiores detalhes ver <http://www.gemini.edu>

1 Introdução

SN 1987A é o nome de uma supernova famosa. A primeira parte do seu nome se refere ao tipo do evento – uma supernova, em seguida temos o ano em que foi observada pela primeira vez (1987) e finalmente o “A” denota que foi a primeira supernova descoberta naquele ano.

Supernovas

Uma supernova é uma explosão que indica a morte de certos tipos de estrelas. Existem basicamente dois tipos de supernovas, aqui trataremos somente das chamadas supernovas Tipo II – estrelas massivas que chegam ao final de suas vidas de um modo muito espetacular. SN 1987A é o resultado da explosão de uma dessas estrelas massivas.



Figura 2: **A Grande Nuvem de Magalhães (GNM)**. A GNM é uma pequena galáxia irregular, e um dos vizinhos mais próximos da Via Láctea. Ela é constituída por estrelas, poeira, gás. SN 1987A apareceu na GNM. Essa imagem foi obtida com o telescópio Schmidt do Observatório Austral Europeu (ESO) em La Silla, Chile.

Uma estrela massiva (tipicamente mais do que cinco massas solares) pode terminar sua vida em uma explosão após alguns milhões de anos. Durante a explosão grande parte do material que compõe a estrela é violentamente ejetado ao espaço. A velocidade do material

ejetado pode atingir velocidades de 10^7 m/s (3% da velocidade da luz). A casca do material em expansão permanece visível no meio interestelar por milhares de anos antes que eventualmente se extinga, deixando um resíduo visível conhecido como um *remanente de supernova*. Dentro da nebulosa a parte central da estrela original é comprimida a uma estrela de neutrons.

Todas as supernovas são muito brilhantes, com um brilho equivalente à energia total emitida pela luz de bilhões de sois. Acredita-se que as supernovas estão entre os objetos mais brilhantes de todo o Universo. Isto faz com que elas sejam vistas a grandes distâncias. Entretanto, supernovas são eventos raros. A taxa de ocorrência de supernovas é estimada como sendo de algumas poucas por galáxia por século.

Supernova 1987A

No dia 23 de fevereiro de 1987 uma supernova visível a olho nú apareceu na Grande Nuvem de Magalhães (GNM). A GNM é uma das galáxias vizinhas mais próximas da Via Láctea. Este foi um dos eventos mais excitantes da história da astronomia. SN 1987A foi a primeira supernova visível a olho nú nos últimos quase 400 anos.



Figura 3: **Surgimento da SN 1987A:** Na imagem da esquerda pode-se ver a Nebulosa da Tarantula após a explosão da supernova (apontada pela seta). A imagem da direita mostra a Nebulosa da Tarantula na GNM antes da explosão da Supernova 1987A no dia 23 de Fevereiro de 1987.

A Distância da Grande Nuvem de Magalhães

A determinação de distâncias no Universo é um dos problemas mais fundamentais em astronomia. Uma medida precisa da distância da SN 1987A, situada na GNM, pode ser usada para determinar a distância da própria GNM.

Todas as estrelas na GNM estão a aproximadamente a mesma distância de nós. Se pudermos encontrar a distância, D , da SN 1987A podemos, então, simultaneamente encontrar

a distância de todas os outros tipos de estrelas encontrados na GNM. Diversos outros tipos de objetos encontrados na GNM e em outras galáxias mais distantes podem, também, ser utilizados para medir distâncias. Isto significa que uma determinação mais precisa da distância da GNM seria um degrau para a determinação mais precisa da distância de outras galáxias mais distantes.

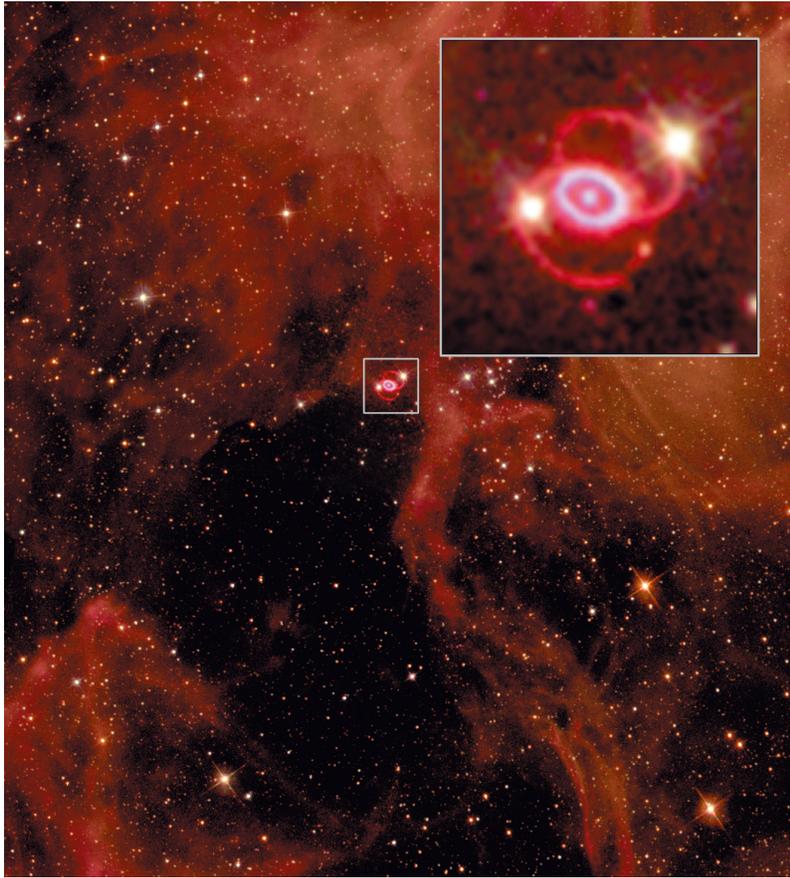


Figura 4: **Supernova 1987A.** SN1987A no centro (ampliada no detalhe) aparece atrás do residuo de três anéis de gás na GNM. Nesse exercício usaremos o anel central para determinar a distância da supernova e assim da GNM. Nessa imagem vê-se muitas estrelas jovens azuis – com 12 milhões de anos – assim como poeira e gás (vermelho escuro). Isso demonstra que a região em torno da supernova ainda é um berçario fértil de novas estrelas.

O Anel

As primeiras imagens de SN 1987A obtidas pelo telescópio espacial Hubble (NASA/ESA) foram feitas utilizando a Camera de Objetos Tenues (FOC/ESA) no dia 1278 após a explosão. O telescópio Hubble foi lançado em 1990, após o que requereu algum tempo para ser posicionado e ajustado no espaço, de tal maneira que não foi possível a obtenção de imagens antes disso. Além de ser de grande interesse intrínseco, SN 1987A apresentou-se como um desafio, mesmo para a alta resolução do telescópio Hubble. A imagem de SN 1987A mostra três nebulosas circulares envolvendo a supernova – um anel interno e dois anéis externos. Nesse exercício usaremos somente o anel interno. O anel está muito longe da supernova para ser material ejetado na explosão. Portanto tem que ter sido criado antes, provavelmente pelo material da estrela morrendo que foi transportado por vento estelar durante os últimos milhares de anos de sua vida. Não é claro, para nós, como o material foi modelado nesse tipo tão bem definido de anel fino, mas uma vez formado, o material do anel começou a iluminar-se tão logo um *flash* de luz ultravioleta da SN 1987A o atingiu.

É importante perceber que o anel estava presente antes da estrela explodir como uma supernova. Vamos admitir que o anel é um círculo perfeito, mas inclinado de um ângulo com

relação a uma linha unindo a Terra à supernova, de forma que ele é visto como uma elipse. Se o anel estivesse voltado de face para o observador, ele todo teria se iluminado simultaneamente quando atingido pelo *flash* da luz da supernova. Entretanto, como o anel está inclinado, a borda mais próxima aparentemente se iluminou primeiro (devido à velocidade finita da luz).

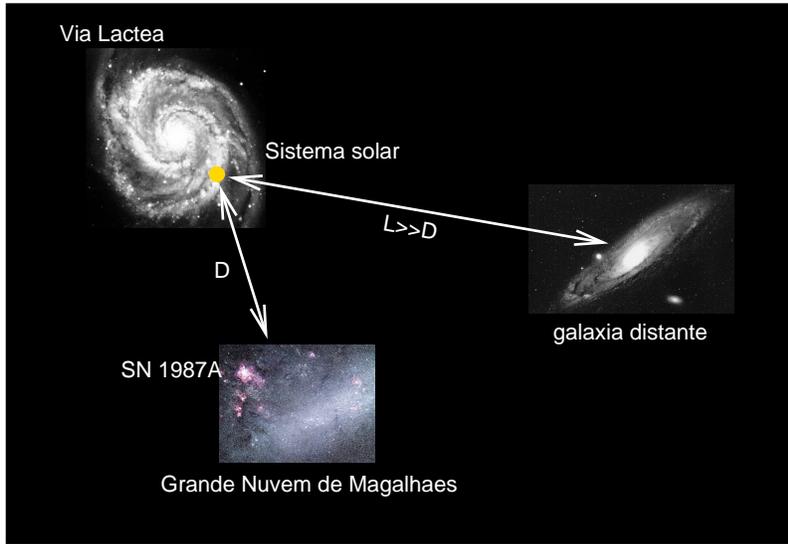
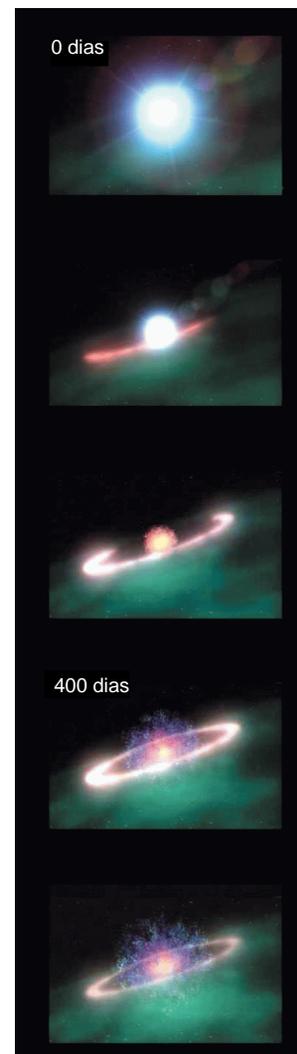


Figura 5: **Medindo a distância entre galáxias.** Se a distância da GNM puder ser determinada com maior precisão, então medidas de distâncias mais precisas também poderão ser obtidas para outras galáxias mais distantes.

Figura 6: **O Anel Ilumina-se.** Essa animação ilustra a luz procedente de SN 1987A atingindo o anel de matéria em torno da estrela. O anel atingiu brilho máximo por volta de 400 dias após a explosão. Observe que apesar da luz atingir todo o anel ao mesmo tempo, nós vemos as partes mais próximas iluminando-se primeiro (devido à velocidade finita da luz). Medindo-se a diferença de tempo entre o instante em que o ponto mais próximo começa a iluminar-se até que todo o anel esteja iluminado, é possível estimar a distância da SN 1987A. Essas imagens foram obtidas de uma sequência de animação feita pelo STScI/NASA.



2 Tarefas

Tarefa 1

Nosso primeiro objetivo é calcular o diâmetro angular do anel, isto é, o diâmetro aparente do anel em *segundos de arco*, como observado da Terra. A esse ângulo chamaremos α .

A posição relativa das estrelas 1, 2, e 3 na imagem de SN 1987A (Figura 8), são dadas como separações angulares (em segundos de arco) nos dados da tabela abaixo.

?

Relacione esses valores com medidas diretas feitas na imagem para determinar a escala da imagem (em segundos de arco/mm) sobre a página.

	Distância (mm)	Distância (segundos de arco)	Escala (segundos de arco/mm)
Estrela 2 relativo a estrela 1:		3.0	
Estrela 3 relativo a estrela 1:		1.4	
Estrela 3 relativo a estrela 2:		4.3	

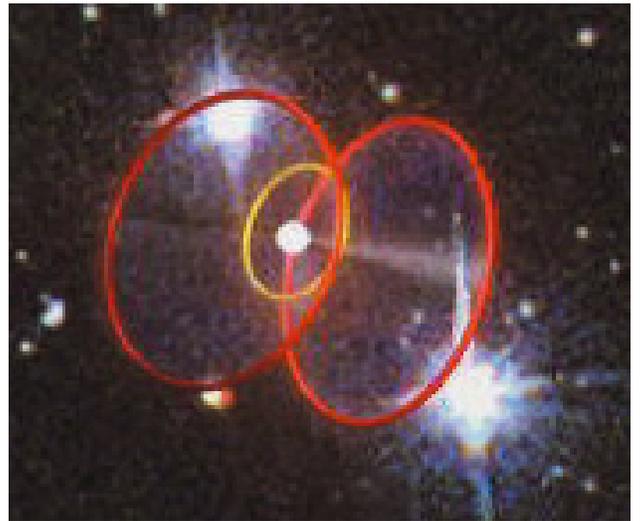
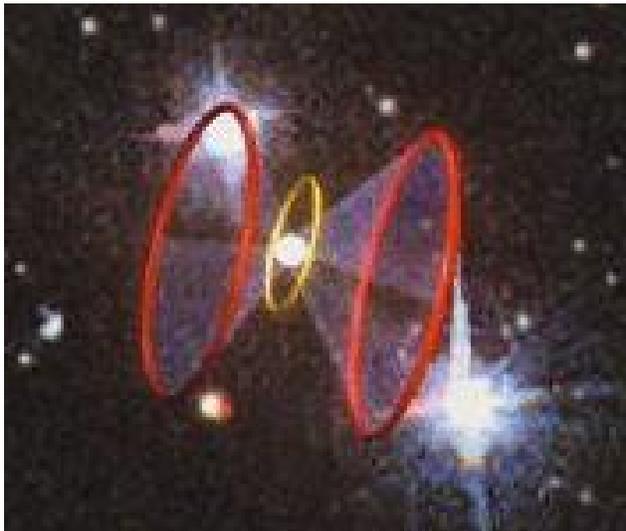


Figura 7: **Os anéis.** Se pudessemos ver SN 1987A de diferentes ângulos veríamos três anéis circulares com SN 1987A no centro do menor deles e os outros dois maiores em planos paralelos como na imagem da esquerda. Entretanto, do ponto de vista do telescópio Hubble os três anéis parecem estar no mesmo plano (direita) (cortesia de STScI/NASA).

Tarefa 2

Admite-se que o anel em volta de SN 1987A é perfeitamente circular – o fato dele parecer elíptico é devido à inclinação ou torção do anel (relativo ao plano do céu – o plano que é perpendicular a nossa linha de visada na direção da supernova).

?

Você pode medir, na imagem, o diâmetro angular do anel sem conhecer sua inclinação. Algumas pessoas vão dizer que isto é óbvio, enquanto outras terão que pensar sobre isso para ver que é verdade. Explique por que essa afirmação é verdadeira. Olhe a Figura 9 se necessário.

?

Meça o diâmetro do anel na Figura 8, use o fator de conversão que você encontrou na Tarefa 1 para converter sua medida para segundos de arco e, após isso, converta sua resposta para radianos. Se você não lembra como fazer para converter segundos de arco em radianos, veja o Apêndice, no final deste texto.

Tarefa 3

O ângulo de inclinação é chamado i . Se $i = 0^\circ$ ou $i = 180^\circ$ vemos um círculo, veremos uma linha se $i = 90^\circ$. Para qualquer outro valor de i entre 0° e 180° , vemos uma elipse.

?

Como você pode determinar i da medida dos eixos maior e menor da elipse? As Figuras 9 e 10 podem ajudá-lo a obter essa relação.

?

Meça os diâmetros angulares maior e menor da elipse e calcule o ângulo de inclinação, i , a partir da relação que você acabou de obter.

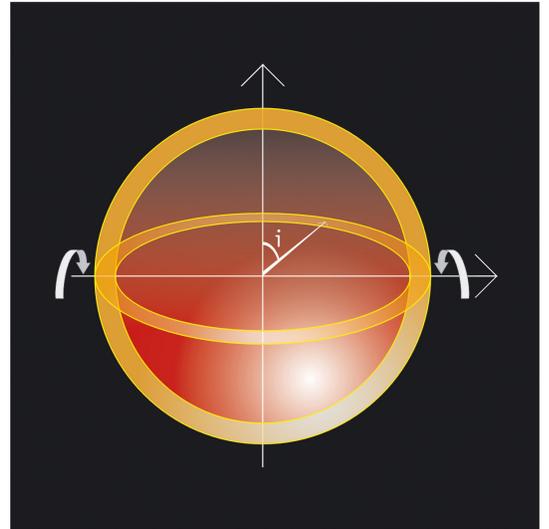


Figura 9: **Inclinação.** Um ângulo de inclinação, i , descreve a torção de um objeto, e.g. um anel, para fora do plano do céu.



Figura 10: **Determinação do ângulo de inclinação, i .** Imagine que estivéssemos olhando para o sistema de lado, tal que vissemos o anel com um ângulo de inclinação, i , relativo ao plano do céu (esse plano é perpendicular à linha de visada do observador). O ângulo de inclinação pode ser calculado de uma relação simples entre os eixos menor e maior da elipse observada. A parte do anel mais próxima, A , e a parte mais distante, B , estão indicadas.

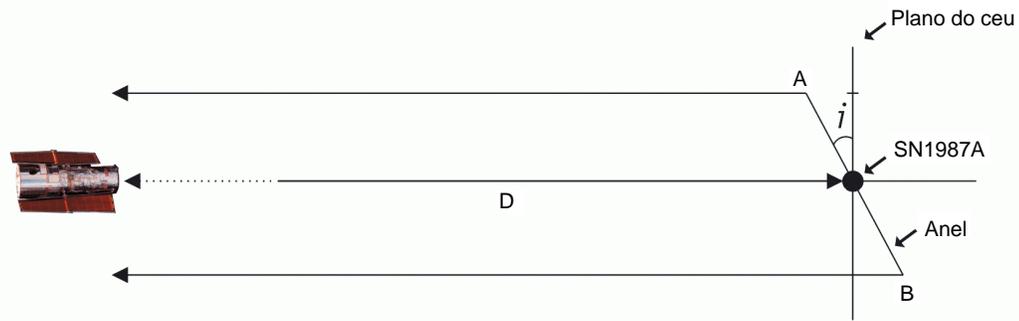


Figura 11: **O caminho da luz.** O *flash* de SN 1987A atinge todo o anel ao mesmo tempo. Tal que a parte mais próxima, *A*, e a mais distante, *B*, foram iluminadas no mesmo instante e elas emitiram simultaneamente luz em direção a Terra. A luz emitida de *B* teve que viajar mais devido a inclinação do anel.

Tarefa 4

Temos, agora, o diâmetro angular do anel e sua inclinação. Precisamos, no entanto, encontrar o diâmetro verdadeiro no plano do céu, d , para determinarmos a distância desejada.

A chave para encontrarmos o diâmetro verdadeiro do anel é o conhecimento da velocidade da luz.

Quando a supernova explode, ela emite um *flash* muito brilhante de luz. Esse *flash* expande-se através do espaço na velocidade da luz, c . Mais tarde, em algum instante de tempo, t segundos após a explosão, o *flash* iluminará o anel. Como admitimos que o anel é circular e iremos, também, admitir que seu centro coincide com o da supernova, todo o anel será iluminado simultaneamente, quando visto da supernova.

Considere como esse fato se apresenta quando visto da Terra. Apesar de todas as partes do anel “verem” o *flash* da supernova ao mesmo tempo, não vemos todo o anel iluminar-se simultaneamente porque o mesmo encontra-se inclinado. A parte do anel que se encontra voltada para nós irá iluminar-se primeiro, já que a luz desse ponto tem uma distância mais curta a percorrer até alcançar a Terra (veja a Fig. 11). Somente quando todo o anel estiver iluminado, quando visto da Terra, é que sua curva de luz atingirá seu máximo. A diferença em distância, entre os pontos mais próximo e mais afastado do anel, pode então ser calculada a partir do intervalo de tempo entre esses eventos na curva de luz. Portanto, o tempo transcorrido entre o instante em que começamos a ver o anel até que a curva de luz atinge seu máximo está intimamente relacionado à diferença de distância entre os pontos mais próximo e mais afastado do anel. A curva de luz para o anel da SN 1987A é mostrada na Fig. 12.

- ? Meça, na curva de luz da SN 1987A, o tempo t transcorrido entre os instantes em que o anel começou a brilhar até o que ele atingiu seu brilho máximo.
- ? Se o ângulo de inclinação fosse 90 graus, seria muito simples relacionar esse tempo ao diâmetro do anel — por que?

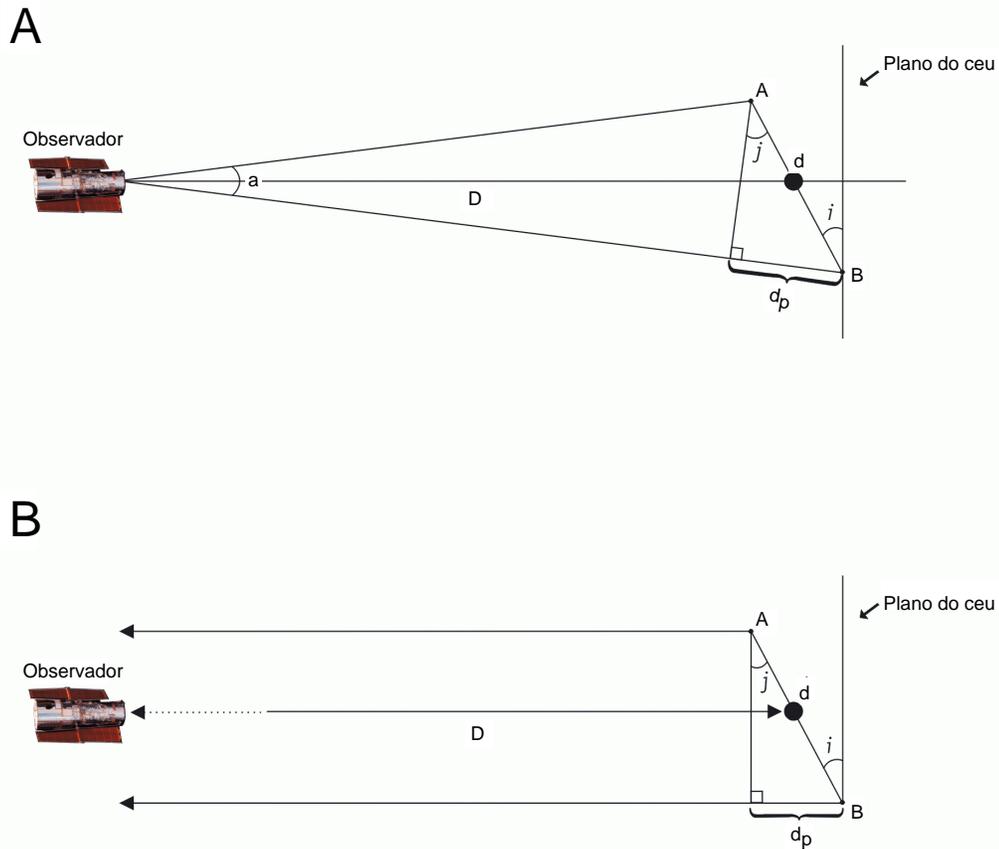


Figura 13: **Encontrando o diâmetro verdadeiro.** Com o auxílio dessa figura e os valores encontrados previamente, é possível determinar o diâmetro verdadeiro, d , do anel da supernova. Na figura superior (A) o esboço mostra a situação real, mas devido a grande distância da GNM é razoável admitir que as linhas conectando a Terra com A e com B sejam paralelas. Essa hipótese é ilustrada na figura inferior (B).

Tarefa 5

Para fazermos o próximo cálculo teremos que utilizar outra aproximação (veja as Figuras 13a e 13b).

Vamos admitir que as linhas que conectam a Terra aos pontos A e B , os pontos do anel mais distante e mais próximo da Terra, são paralelas. Essa hipótese é válida já que o diâmetro angular do anel, a , é muito pequeno quando comparado com a distância, D . Dessa forma, os ângulos i e j são iguais.

Observe o diagrama (Fig. 13) e use-o para encontrar as seguintes relações:

?

1. A diferença na distância percorrida pela luz vinda do ponto mais próximo do anel, A e do ponto mais afastado, B . Chamaremos essa distância d_p .
2. O diâmetro angular do anel, a (calculado na tarefa 2).
3. O ângulo de inclinação, i (calculado na tarefa 3).

- ? Encontre uma relação entre a diferença na distância, d_p , a velocidade da luz, c , e o tempo, t .
- ? Combine essas duas expressões para encontrar uma expressão para o diâmetro real do anel, d .
- ? Entre com os valores que você mediu ou calculou previamente nessa expressão, e encontre o diâmetro verdadeiro, d , do anel.

Tarefa 6

Você está pronto para o grande final!

- ? Use os valores de d e do ângulo a para determinar a distância da supernova, D . Use a aproximação de ângulos pequenos (Apêndice). Expresse sua resposta em kiloparsecs (no Apêndice você encontrará o fator de conversão de anos-luz para parsec).

A distância da supernova foi calculada por Panagia et al. (1991) a partir da versão original desses dados. O valor que eles encontraram é $D = 51,2 \pm 3.1$ kpc, sendo que eles mediram um ângulo de inclinação de $i = 42.8$ graus $\pm 2,6$ graus.

Se as suas respostas estão dentro de uma margem de erro de 20%, você fez medidas e cálculos precisos e pode se orgulhar de seu trabalho.

- ? Você é capaz de pensar em algumas razões pelas quais seus resultados diferem dos dos cientistas?

Nessa oficina não levamos em conta a questão dos dois anéis externos.

- ? Você poderia especular quanto a origem deles?

Leituras Adicionais

2.1 Artigos Científicos

Esses artigos podem ser obtidos no site:

http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html

- Fransson, C., Cassatella, A., Gilmozzi, R. Kirshner, R. P., Panagia, N., Sonneborn, G., and Wamsteker, W., 1989, ApJ, 336, 429-441: Narrow ultraviolet emission lines from SN 1987A Evidence for CNO processing in the progenitor.
- Gould, A., 1994, ApJ, 425, 51-56: The ring around supernova 1987A revisited. 1: Ellipticity of the ring.
- Panagia, N., Gilmozzi, R., Macchetto, F., Adorf, H.M., Kirshner, R.P. 1991, ApJ, 380, L23-L26: Properties of the SN 1987A circumstellar ring and the distance to the Large Magellanic Cloud.

- Jakobsen, P., Albrecht, R., Barbieri, C., Blades, J. C., Boksenberg, A., Crane, P., Deharveng, J. M., Disney, M. J., Kamperman, T. M., King, I. R., Macchetto, F., Mackay, C. D., Paresce, F., Weigelt, G., Baxter, D., Greenfield, P., Jedrzejewski, R., Nota, A., Sparks, W. B., Kirshner, R. P., Panagia, N., 1991, ApJ, 369, L63-L66: First results from the Faint Object Camera — SN 1987A.

Veja também os *Links* em :

<http://www.astroex.org/>

Esse exercício foi originalmente proposto por:

Emma Fosbury e Robert A.E. Fosbury

e é parte integrante da Série ESA/ESO de Exercícios de Astronomia, produzida pelo Centro de Informação da Agência Espacial Europeia (ESA) e pelo Observatório Austral Europeu (ESO).

Traduzido e adaptado por:

Gabriel Armando Pellegatti Franco
Departamento de Física – ICEx
Universidade Federal de Minas Gerais

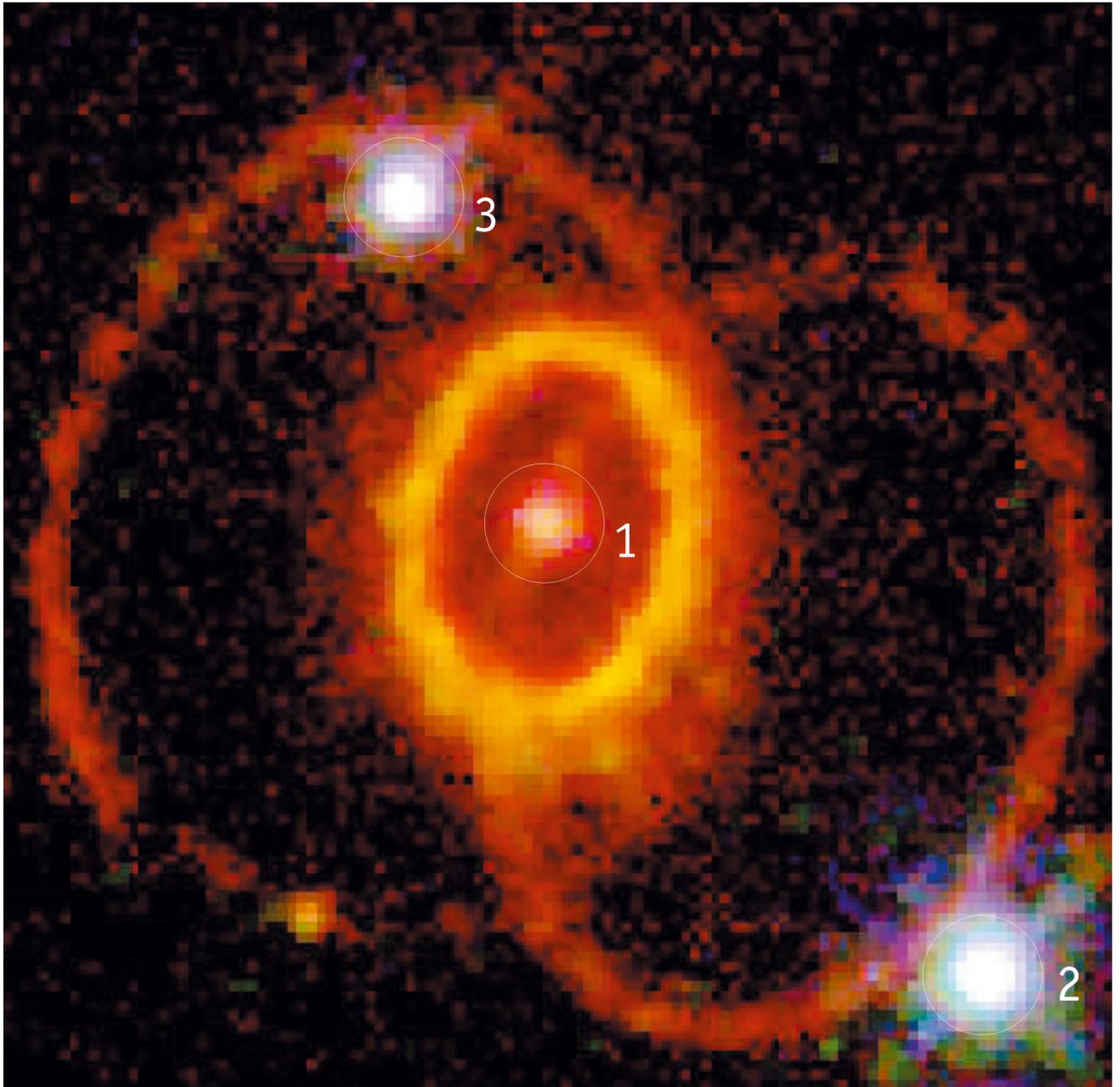


Figura 8: **Estrelas em torno da Supernova 1987A.** Essa imagem foi tomada em fevereiro de 1994 utilizando-se a Camera Planetária e Grande Angular 2 (WFPC2). WFPC2 tem produzido a grande maioria das imagens sensacionais do telescópio Hubble que têm sido disponibilizadas ao público nos últimos anos. Sua resolução e excelente qualidade são algumas das razões pelas quais a WFPC2 foi o instrumento mais utilizado durante os primeiros 10 anos de vida do telescópio Hubble. O filtro usado na camera deixa passar a luz vermelha emitida pelo hidrogênio gasoso – a linha $H\alpha$ da série de Balmer.

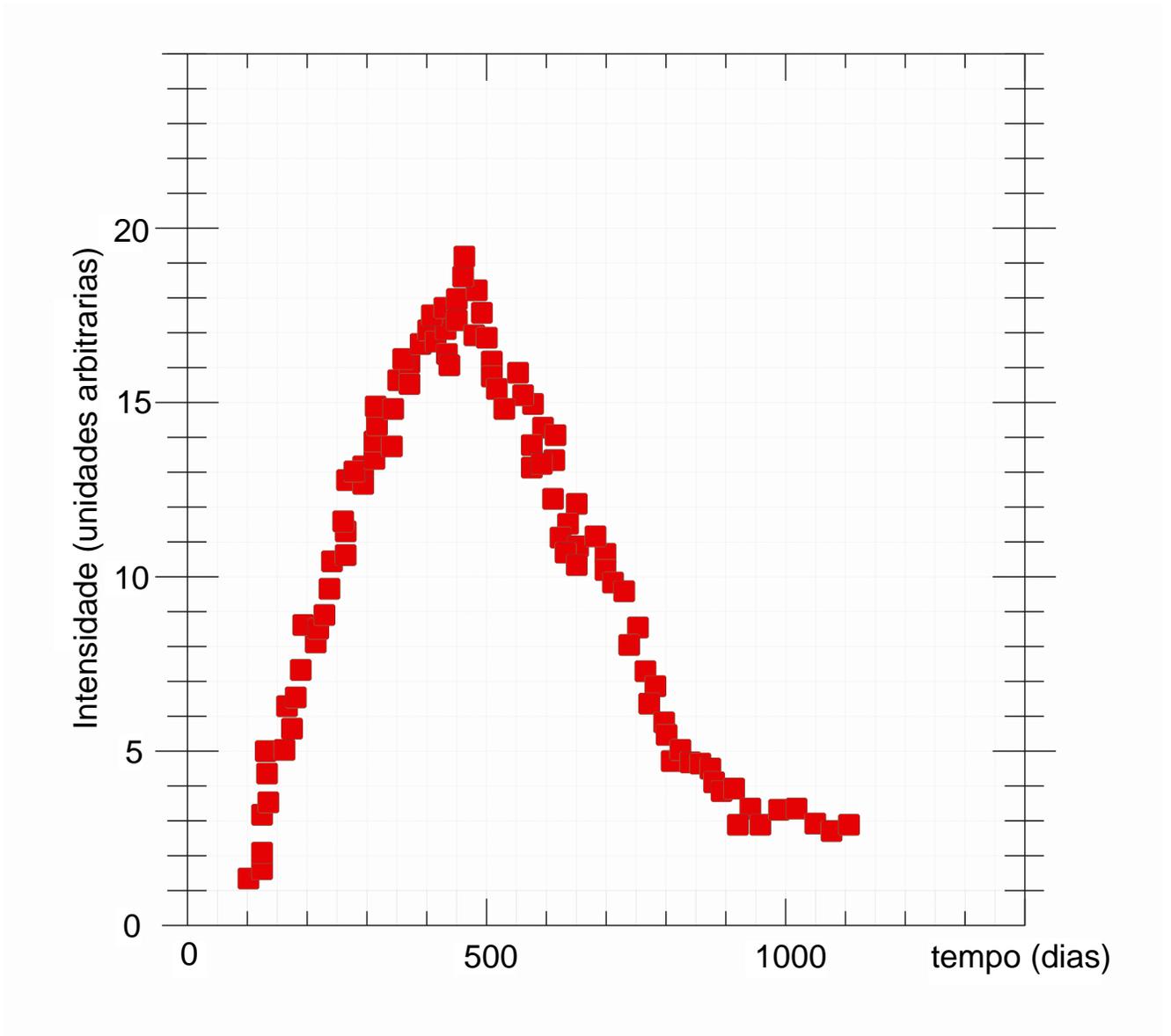


Figura 12: **Curva de luz do anel.** Nesse diagrama mostra-se medidas da luz total do anel que torna-se mais brilhante com o passar do tempo após a explosão da supernova. A intensidade total começa a aumentar quando a luz proveniente das partes mais próximas chegam até nós, e alcança um máximo quando o anel todo (como visto da Terra) está iluminado. Essas medidas foram feitas utilizando-se o *International Ultraviolet Explorer (IUE)* — outro telescópio espacial, que foi especialmente construído para observar na região ultravioleta do espectro eletromagnético.

Apêndice

Ângulos pequenos e grandes distâncias

Se b é pequeno quando comparado com c (veja Figura A1), podemos admitir que os dois lados maiores do triângulo têm o mesmo comprimento que sua linha central, c .

A partir das equações usuais de um triângulo retângulo obtemos:

$$\text{sen} \frac{\beta}{2} = \frac{b/2}{c}$$

Se estivermos lidando com ângulos muito pequenos, podemos usar a aproximação $\text{sen } x \approx x$, (**note que isso é verdade somente se o ângulo for medido em radianos**). Pode-se provar, matematicamente, que essa aproximação é muito boa para ângulos pequenos.

?

Teste a validade dessa aproximação calculando $\text{sen}(1^\circ)$, $\text{sen}(1')$, $\text{sen}(1'')$. Note que você tem, primeiro, que converter esses ângulos para radianos.

Podemos, então, obter uma relação simples entre b , c , e β , sem o uso de funções trigonométricas:

$$\frac{\beta}{2} = \frac{b/2}{c}$$
$$c = \frac{b}{\beta}$$

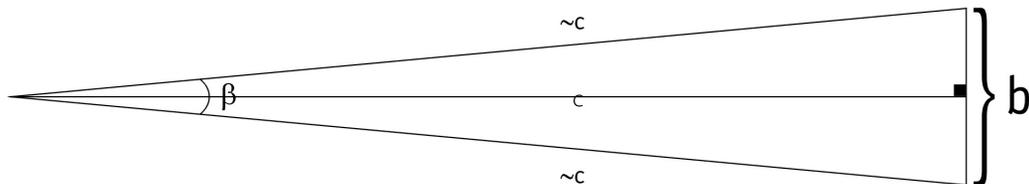


Figura A1: **Lidando com ângulos pequenos.** Se b é pequeno comparado com c , isso implica que β é um ângulo pequeno. Podemos, então, obter uma relação entre b , c , e β , sem o uso de funções trigonométricas.

Unidades e Dados Básicos

1 minuto de arco = $1' = 1/60$ de um grau = $2,9080 \times 10^{-4}$ radianos

1 segundo de arco = $1'' = 1/3600$ de um grau = $4,8481 \times 10^{-6}$ radianos

Velocidade da luz (c) = $2,997 \times 10^8$ m/s

1 parsec (pc) = $3,086 \times 10^{13}$ km = 3,26 anos-luz

1 kiloparsec (kpc) = 1000 parsec

1 Megaparsec (Mpc) = 10^6 parsec