

Determinação da distância à Pequena Nuvem de Magalhães pela observação de uma estrela cefeida

Este exercício é uma cópia modificada do exercício Determinação de distâncias no Universo, originalmente desenvolvido por Weronika Sliwa no âmbito do programa Hands-on Universe, e obtida através do link (<http://www.pt.euhou.net/index.php/exercicios-mainmenu-13>); uma versão em inglês, com título “How to determine astronomical distances using cepheids”, é disponível no link (<http://www.euhou.net/index.php/exercises-mainmenu-13/astronomy-with-salsaj-mainmenu-185/265-how-to-determine-astronomical-distances-using-cepheids>).

As modificações presentes nesta versão foram desenvolvidas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por Caroline Lacerda dos Santos, Maria de Fátima Oliveira Saraiva e Cássio Murilo Ávila.

Introdução: medir distâncias em Astronomia não é uma tarefa fácil...

Como medir as distâncias às estrelas? E às galáxias? O brilho com que enxergamos os astros não é uma medida confiável, pois esse brilho depende tanto de quão distante de nós está o astro quanto de quão brilhante ele é intrinsecamente, isto é, de quanta energia ele emite.

A primeira medição a uma estrela por um método confiável só se realizou no século XIX, em que se utilizou um método geométrico para medir as distâncias de algumas estrelas – o método da paralaxe. Mas esse método só pode ser aplicado a estrelas próximas (até cerca de 150 pc ~ 500 anos-luz).

No início do século XX, Henrietta Leavitt levou a cabo um estudo detalhado de uma classe especial de estrelas variáveis, as cefeidas, e descobriu que essas estrelas possuem características únicas que nos permitem usá-las como indicadores de distância. O método descoberto por Henrietta Leavitt foi essencial para se determinar, pela primeira vez, a distância à Grande Nuvem de Magalhães e a Andrômeda, o que provou que estas eram galáxias separadas da nossa Via Láctea. Os astrônomos passaram a utilizar as cefeidas para determinar grandes distâncias (até ~ 20 Mpc ~ 60 milhões anos-luz) e, a partir desse método, conseguiram e ainda conseguem determinar a distância a sistemas estelares na nossa galáxia e a galáxias próximas.

Qual a propriedade das cefeidas que permite usá-las para determinar distâncias?

Cefeidas, velas padrão

As **cefeidas** são estrelas supergigantes, muito mais luminosas do que o Sol, que estão em uma fase da vida em que são instáveis aumentando e diminuindo periodicamente o seu tamanho e sua temperatura superficial, o que faz com que sua luminosidade também varie. Por isso são chamadas variáveis pulsantes. Tipicamente, as cefeidas clássicas têm períodos de alguns dias. A figura 1 mostra a curva de luz de uma cefeida com período de 4,5 dias. Nesse período, a estrela varia seu brilho em 1 magnitude.

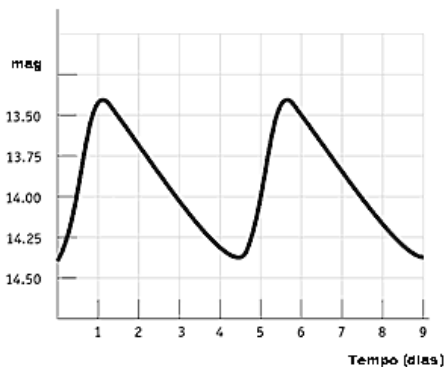


Fig. 1. Curva de luz de uma cefeida clássica típica, com período de 4,5 dias.

As cefeidas não têm todas o mesmo brilho intrínscico, e Leavitt descobriu que existe uma relação bem estreita entre sua **luminosidade média** - quantidade de energia emitida pela estrela em todas as direções por unidade de tempo – e o período de variabilidade da sua luminosidade. Essa relação se chama relação Período-Luminosidade, e está mostrada no gráfico da figura 2.

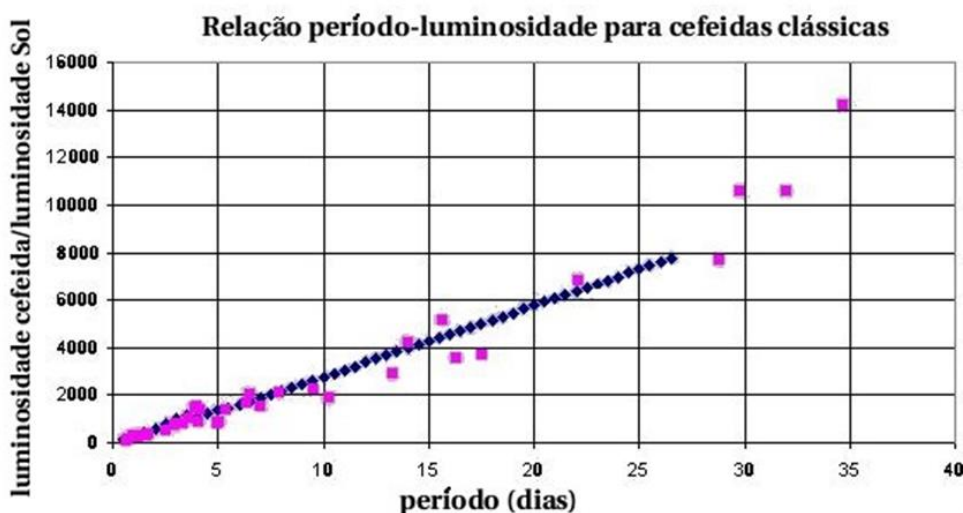


Fig.2 Luminosidade da cefeida (em unidades solares) como função do período de variabilidade.

Analisando o gráfico da figura 2, pode-se notar que as cefeidas mais luminosas têm seu período de variação mais longo do que as menos luminosas. Por exemplo:

- Para $L_{\text{cef}}/L_{\text{sol}} = 2\,000$, $P = 7$ dias, o que significa que uma cefeida cuja luminosidade é 2000 vezes a luminosidade do Sol ($L_{\text{cef}} = 2\,000 L_{\text{sol}}$), tem período de variabilidade de 7 dias.
- Para $L_{\text{cef}}/L_{\text{sol}} = 6\,000$, $P = 20$ dias, ou seja, uma cefeida 6000 vezes mais luminosa que o Sol ($L_{\text{cef}} = 6\,000 L_{\text{sol}}$) tem período de variabilidade de 20 dias.

Portanto, se observarmos uma cefeida e verificarmos que seu período de variabilidade é, por exemplo, 15 dias, olhando nesse gráfico saberemos que essa cefeida é, aproximadamente, 4 000 vezes mais luminosa do que o Sol.

Uma vez estabelecida a relação entre o período e a luminosidade média das cefeidas, basta medirmos o período de variabilidade de uma determinada cefeida para determinar a sua luminosidade média.

Na Terra, quando observamos uma cefeida (ou qualquer outra estrela), podemos medir o **fluxo** de energia luminosa que nos alcança – quantidade de energia por unidade de tempo e de área. Se já soubermos a luminosidade da estrela, então podemos determinar a distância a que ela se encontra através da relação abaixo:

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

em que F é o fluxo de energia da cefeida, L é a sua luminosidade e d é a distância a que ela se encontra de nós.

Assim, uma vez conhecida a luminosidade (L) e o fluxo (F) da estrela podemos determinar sua distância (d) isolando a distância na equação acima:

$$d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}} \quad (1)$$

Este método utiliza o mesmo princípio que é frequentemente utilizado para se medir distâncias à noite quando se vê uma luz distante: se soubermos (ou assumirmos) a potência da lâmpada, podemos avaliar a distância a que a lâmpada se encontra avaliando o brilho que nos chega.

Os astrônomos normalmente não medem a distância diretamente por essa fórmula, mas sim através de um parâmetro chamado “módulo de distância”, definido como a diferença entre a magnitude aparente e a magnitude absoluta do objeto observado. Para entender o significado desse parâmetro, precisamos antes entender o conceito de magnitude.

Magnitudes

O fluxo de energia luminosa que atinge nossa pupila quando olhamos para uma estrela é o que nos dá a sensação do quão brilhante a estrela é.

Há aproximadamente 2200 anos, o astrônomo grego Hiparco classificou as estrelas de acordo com seu brilho em seis classes de magnitude, atribuindo magnitude 1 às estrelas mais brilhantes do céu e magnitude 6 às estrelas mais fracas visíveis a olho nu.

Em meados do século 19, o astrônomo inglês Norman Pogson estabeleceu a escala de magnitudes que usamos atualmente. Nessa escala, as diferenças de magnitudes entre duas estrelas estão associadas à razão entre os fluxos de cada uma pela relação:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log(F_1/F_2) \quad (2)$$

em que m_1 é a magnitude da estrela 1, m_2 é a magnitude da estrela 2, F_1 , o fluxo de energia da estrela 1 e F_2 , o fluxo da estrela 2.

A equação (2) indica que as estrelas mais brilhantes visíveis a olho nu (que têm magnitude 1) são 100 vezes mais brilhantes do que as estrelas mais fracas visíveis a olho nu (que têm magnitude 6), pois se $m_1 = 1$ e $m_2 = 6$, a equação (2) fica:

$$1 - 6 = -2.5 \log \frac{F_1}{F_2}$$

Resolvendo a equação acima, temos:

$$\boxed{2 = \log \frac{F_1}{F_2}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{10^2 = \frac{F_1}{F_2}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{F_1 = 100F_2}$$

Portanto, a escala de magnitudes é uma escala logarítmica (assim como a escala Richter, utilizada para medir intensidades de terremotos). A variação em brilho de uma magnitude, mostrada no gráfico da figura 1, significa uma razão de brilho entre o máximo e o mínimo de 2,5.

A magnitude assim definida, e representada pela letra m , é chamada **magnitude aparente**, pois ela é associada ao brilho que enxergamos, e não ao “*brilho intrínseco*” da estrela, que é sua luminosidade.

Para comparar o brilho intrínseco entre dois objetos, os astrônomos introduziram o conceito de **magnitude absoluta**, representada pela letra M , definida como a *magnitude aparente que uma estrela estaria se estivesse à distância de 10 parsecs¹* de nós. As diferenças de magnitudes absoluta entre duas estrelas estão associadas às razões entre as luminosidades (L) das estrelas:

$$M_1 - M_2 = -2.5 \log(L_1/L_2) \quad (3)$$

em que M_1 é a magnitude absoluta da estrela 1, M_2 é a magnitude absoluta da estrela 2, L_1 , a luminosidade da estrela 1 e L_2 , a luminosidade da estrela 2. Se a estrela 1 é a cefeida da nossa observação, e a estrela 2 é o Sol, a relação fica:

$$M_{cef} - M_{Sol} = -2,5 \log \left(\frac{L_{cef}}{L_{Sol}} \right) \quad (4)$$

A magnitude absoluta do Sol é $M_{Sol} = 4,74$. Uma estrela cefeida que seja 6000 vezes mais luminosa do que o Sol terá magnitude absoluta:

$$M_{cef} = 4,74 - 2.5 \log 6000 \Rightarrow M_{cef} = -4,7$$

A diferença entre a magnitude aparente e a magnitude absoluta de uma estrela ($m - M$) é chamada de **módulo de distância** da estrela, pois seu valor depende só da distância a que a estrela se encontra.

$$m - M = -5 + 5 \log d \quad (5)$$

Portanto, se conhecemos a magnitude aparente de uma estrela, e temos meios de inferir sua magnitude absoluta, podemos estimar a distância da estrela pois, isolando d na equação (5), obtemos:

¹ O parsec (pc) é uma unidade de distância utilizada pelos astrônomos. Vale 3,26 anos-luz, ou aproximadamente 3×10^{13} km.

$$d = 10^{(m-M+5)/5} \quad (6)$$

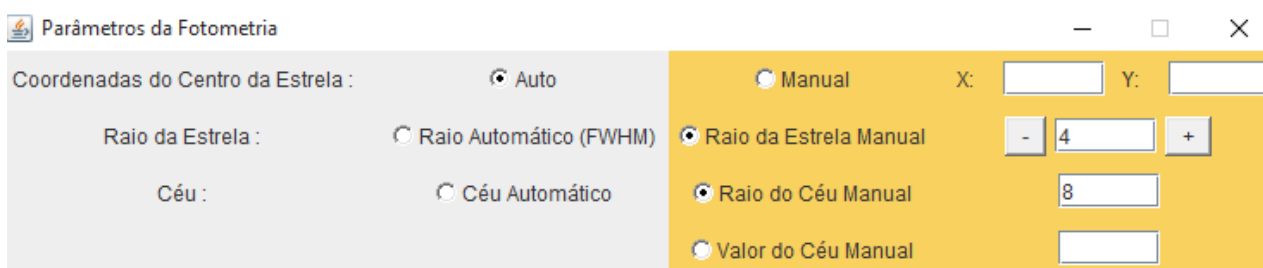
Fotometria

Para construir a curva de luz (gráfico do brilho da estrela versus tempo) de uma estrela precisamos medir o fluxo da estrela em datas diferentes. Isto é feito realizando fotometria nas diferentes imagens.

Em astronomia, fotometria é a técnica que mede o fluxo da radiação dos objetos astronômicos. Os CCDs (*charge-coupled device*, em português, *dispositivo de carga acoplada*) são *chips* semicondutores que captam imagens, eles registam a quantidade de fótons que chega em cada pixel, transformando cada fóton num sinal elétrico mensurável. Assim, o valor da intensidade de um pixel é uma medida dos fótons que lhe chegaram. Se somarmos a intensidade de todos os pixels que compõem a estrela na imagem, podemos pensar que temos uma medida do fluxo da estrela. Entretanto, em cada pixel, não chegou apenas a radiação da estrela, mas também a radiação difusa do céu, que vamos querer subtrair.

Para poder subtrair a contribuição do céu faz-se cada medida em duas etapas: primeiro, mede-se o fluxo dentro de uma circunferência com raio escolhido de modo a incluir apenas a estrela; em seguida, mede-se o fluxo dentro de um anel definido por uma circunferência com cerca de duas vezes o raio da circunferência escolhida para a estrela e a circunferência da estrela. Nesse anel, só estamos medindo a radiação do céu e serve para estimar a contribuição do céu na região próxima da estrela, que pode então ser descontado do fluxo medido no círculo contendo a estrela.

O software Salsa J, que vamos usar para fazer a fotometria das imagens, permite colocar manualmente os raios das circunferências da estrela e do céu, como está ilustrado na figura 3.



Parâmetros da Fotometria

Coordenadas do Centro da Estrela :	<input checked="" type="radio"/> Auto	<input type="radio"/> Manual	X: <input type="text"/>	Y: <input type="text"/>
Raio da Estrela :	<input type="radio"/> Raio Automático (FWHM)	<input checked="" type="radio"/> Raio da Estrela Manual	- <input type="text" value="4"/> +	
Céu :	<input type="radio"/> Céu Automático	<input checked="" type="radio"/> Raio do Céu Manual	<input type="text" value="8"/>	
		<input type="radio"/> Valor do Céu Manual	<input type="text"/>	

Figura3: Ilustração de como será feita a escolha dos parâmetros da fotometria.

Exercício:

Neste exercício, vamos aplicar o método das cefeidas para determinar a distância à Pequena Nuvem de Magalhães, uma das duas pequenas galáxias de forma irregular que orbitam a Via Láctea (ver figura 4). Tanto a Pequena Nuvem de Magalhães a quanto sua companheira maior, a Grande Nuvem de Magalhães, são visíveis a olho nu.



Figura 4. Fotografia mostrando a Pequena Nuvem de Magalhães(canto inferior esquerdo) e a Grande Nuvem de Magalhães (canto superior direito). Crédito: Anglo-Australian Observatory

Para determinar a distância à Pequena Nuvem de Magalhães analisaremos uma série de imagens de uma pequena região dessa galáxia onde se encontra uma estrela cefeida e algumas estrelas não variáveis que serão usadas como comparação.

As imagens que vamos utilizar estão na pasta “Cefeidas”, que você pode baixar clicando em [Imagens](#). Essas imagens, que estão em formato FITS, são observações do projeto OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) e foram efetuadas na banda espectral I, que cobre os comprimentos de onda entre $0,7 \mu\text{m}$ e $0,9 \mu\text{m}$ aproximadamente. A data de observação pode ser deduzida pelo nome do arquivo: por exemplo, CEP-43522-1999-10-24-03-25.FTS diz respeito à observação da cefeida 43522, efetuada em 24 de Outubro de 1999 pelas 3:25h.

Todas as imagens mostram a mesma zona do céu.

A Fig. 5 mostra a localização da cefeida, identificada pelo número 43522 e de três estrelas de luminosidade constante (estrela 43521, estrela 43541, estrela 43520), que serão usadas como estrelas de referência. A análise das imagens será feita com o software SALSA J, que você pode baixar em <http://www.pt.euhou.net/index.php/o-software-mainmenu-9/download-mainmenu-10>.

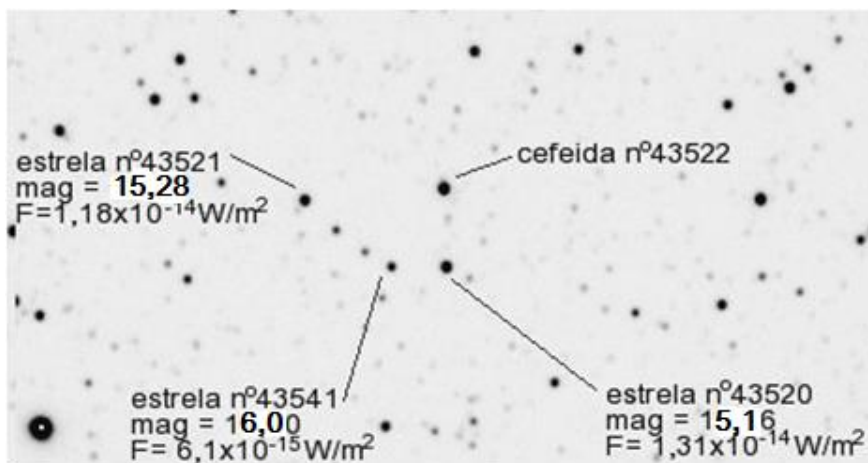


Fig.5. A localização da cefeida em estudo e das estrelas de referência usadas para comparação. As magnitudes (mag)² e os fluxos das estrelas de referência são dados.

O procedimento a ser seguido está descrito no arquivo [Cefeidas2-roteiro.pdf](#).

Esse roteiro traz os links para o Salsa J, para as imagens e também para duas planilhas excel (“Fotometria_cefeidasxref.xls” e “Cefeidas_planilha.xls”) que serão usadas no exercício.

Uma dessas planilhas utiliza a ferramenta **Solver** do **Excel**. Se essa ferramenta não aparece na guia Dados do excel, ela pode ser instalado selecionando Arquivo – Opções – Suplementos – Solver; clicar em “Ir” e marcar a caixa de diálogo na opção Solver.

Respostas esperadas para o roteiro (arquivo Cefeidas2_roteiro):

² As magnitudes estão adicionadas de uma constante de 0,5 em relação às magnitudes dadas na versão original da atividade, de maneira a reproduzir melhor o valor atualmente aceito para o módulo de distância da PNM.

1. Planilha auxiliar Fotometria_cefeidaxref.xls.

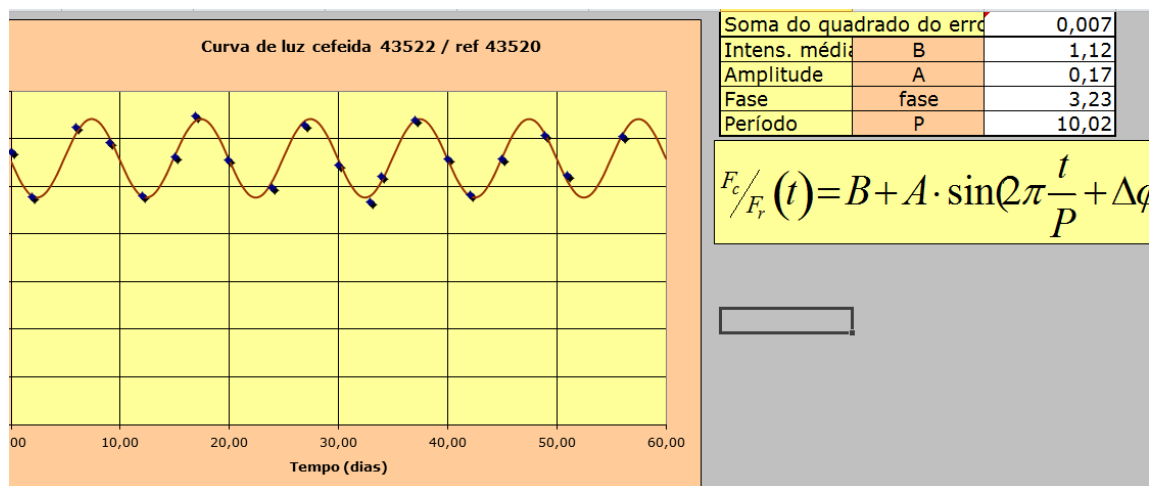
Imagem	Data	Hora	x	Y	Intensidade	intensidade	intensidade	intensidade
			cefeida	cefeida	Cefeida	ref 43520	ref 44521	ref 43541
Cep-43522-1999-10-24-03-23-25.fts	24/10/1999	03:23	251	109	77023	67262	55818	30080
Cep-43522-1999-10-26-01-41-23.fts	26/10/1999	01:41	240	128	60228	63044	53239	29300
Cep-43522-1999-10-30-02-07-12.fts	23/10/1999	02:07	219	123	88617	71055	60702	32832
Cep-43522-1999-11-02-03-17-50.fts	02/11/1999	03:17	229	126	85379	72220	60456	32487
Cep-43522-1999-11-05-03-11-00.fts	05/11/1999	03:11	209	106	65887	68546	58254	31238
Cep-43522-1999-11-08-04-07-00.fts	08/11/1999	04:07	208	95	76076	67728	56808	30696
Cep-43522-1999-11-10-01-42-37.fts	10/11/1999	01:42	197	83	90555	69921	58318	31644
Cep-43522-1999-11-13-00-40-34.fts	13/11/1999	00:40	197	115	74394	67056	55066	29797
Cep-43522-1999-11-17-01-22-04.fts	17/11/1999	01:22	170	118	65424	65703	51881	27520
Cep-43522-1999-11-20-01-19-30.fts	20/11/1999	01:19	139	45	84329	67026	54181	29173
Cep-43522-1999-11-23-02-55-34.fts	23/11/1999	02:55	164	66	77891	71613	56365	30628
Cep-43522-1999-11-26-01-22-41.fts	16/11/1999	01:22	144	116	68860	73820	59872	32663
Cep-43522-1999-11-27-00-48-33.fts	27/11/1999	00:48	215	111	63111	60480	49494	26080
Cep-43522-1999-11-30-03-15-26.fts	30/11/1999	03:15	152	77	74573	58347	49578	25555
Cep-43522-1999-12-03-02-39-09.fts	03/12/1999	02:39	115	43	70823	63603	51705	27729
Cep-43522-1999-12-05-02-44-18.fts	05/12/1999	02:44	144	116	65035	67340	57312	30301
Cep-43522-1999-12-08-02-25-59.fts	08/12/1999	02:25	115	30	76893	68955	57152	30090
Cep-43522-1999-12-12-01-10-52.fts	12/12/1999	01:10	113	44	76389	62877	52146	27840
Cep-43522-1999-12-14-02-08-45.fts	14/12/1999	02:08	149	70	66972	63979	53024	28438
Cep-43522-1999-12-19-03-23-16.fts	19/12/1999	03:23	100	28	80661	66615	55820	29309

Fig. 6. Recorte da planilha auxiliar preenchida para as três estrelas de comparação.

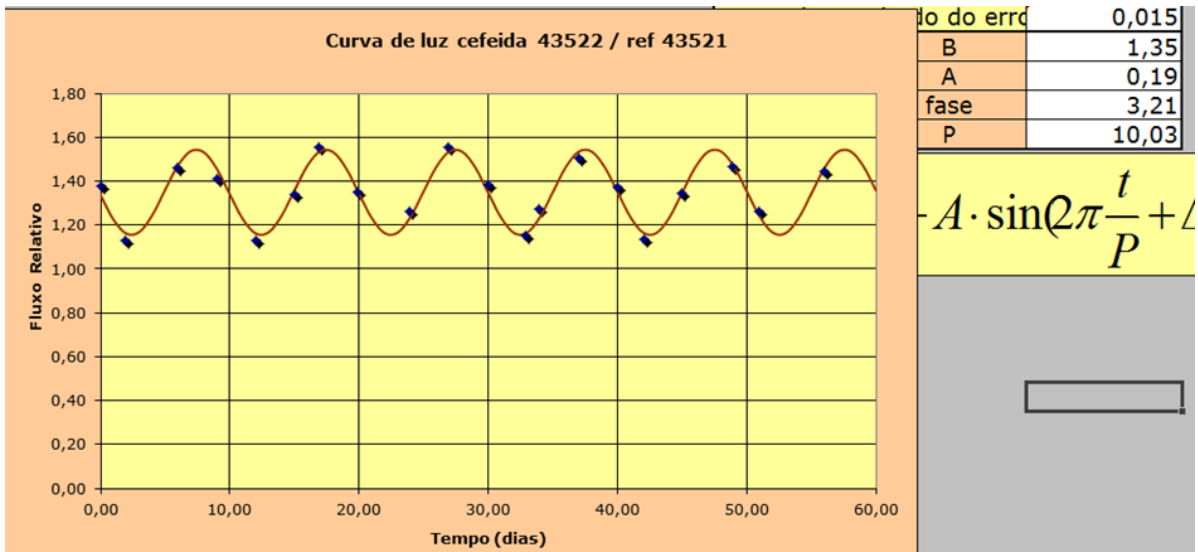
2. Curvas de luz e parâmetros do ajuste:

Pequenas diferenças em relação aos parâmetros aqui mostrados não são importantes, o único parâmetro que interessa é o período.

2.1 Curva da estrela de referência 43520



2.2 Curva da estrela de referência 43521



2.3 Curva da estrela de referência 43521

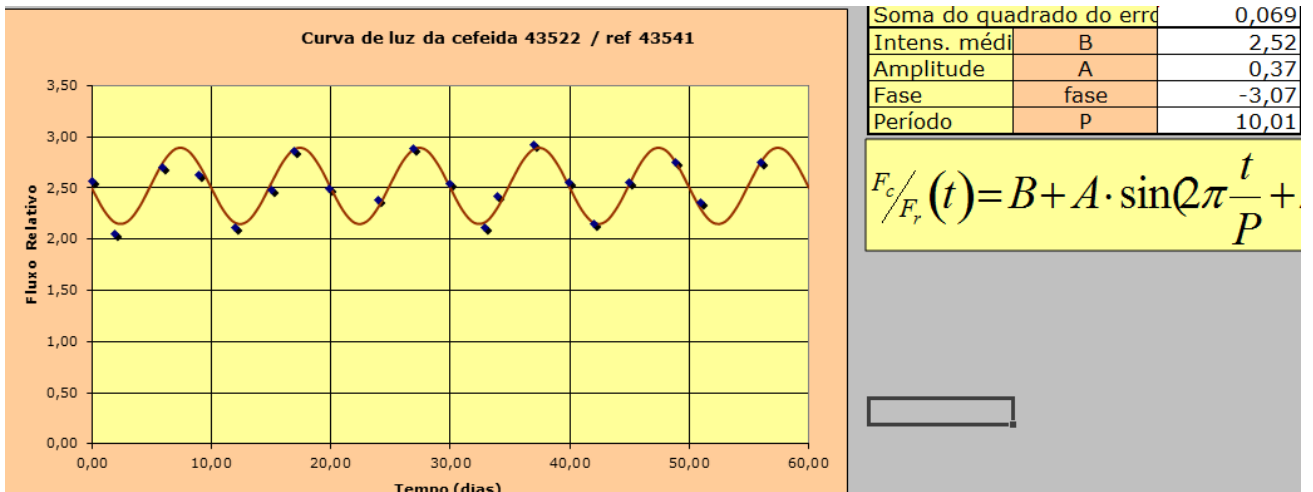


Fig. 7: Recortes das planilhas preenchidas usando as estrelas de referência 43520 (topo), 43521 (meio) e 43541 (em baixo).

- O período da cefeida é de 10 dias aproximadamente. O valor da coordenada vertical correspondente, no gráfico da relação período-luminosidade, fica um pouco abaixo de 3000. Qualquer valor entre 2500 e 3000 é aceitável.

$$L_{\text{cef}} / L_{\text{sol}} = 2500 - 3000$$

4. Magnitude aparente da cefeída:

Magnitude aparente da cefeída			
Estrela Ref.	m_{ref}	F_{cef}/F_{ref}	m_{cef}
43520	15,16	1,12	$15,16 - 2,5 \log 1,12 = 15,04$
43521	15,28	1,35	$15,28 - 2,5 \log 1,35 = 14,95$
43541	16,00	2,52	$16,00 - 2,5 \log 2,52 = 15,00$

5. Magnitude absoluta da cefeída:

Magnitude absoluta da cefeída	
Para $L_{cef}/L_{Sol} = 2500$	Para $L_{cef}/L_{Sol} = 3000$
$M_{cef} = 4,74 - 2,5 \log 2500 = -3,75$	$M_{cef} = 4,74 - 2,5 \log 3000 = -3,95$

6. Distância da cefeída:

Distância da cefeída			
Estrela Ref.	M_{cef}	$m - M$	d
43520	-3,75	$15,04 + 3,75 = 18,79$	$10^{(18,79+5)/5} = 57279 \text{ pc}$
	-3,95	$15,04 + 3,95 = 18,99$	$10^{(18,99+5)/5} = 62805 \text{ pc}$
43521	-3,75	$14,95 + 3,75 = 18,70$	$10^{(18,70+5)/5} = 54954 \text{ pc}$
	-3,95	$14,95 + 3,95 = 18,90$	$10^{(18,90+5)/5} = 60255 \text{ pc}$
43541	-3,75	$15,00 + 3,75 = 18,75$	$10^{(18,75+5)/5} = 56234 \text{ pc}$
	-3,95	$15,00 + 3,95 = 18,95$	$10^{(18,95+5)/5} = 61659 \text{ pc}$

Questões para discussão:

1. As distâncias encontradas estarão dentro do intervalo dado (entre 57000 e 65000 parsecs).
2. O diâmetro da Pequena Nuvem de Magalhães é de aproximadamente 7000 anos-luz, ou aproximadamente 2100 parsecs, logo essa é a máxima incerteza que o desconhecimento da localização da cefeida dentro da galáxia pode introduzir na determinação da distância da mesma.
3. Se parte da luz é absorvida, o fluxo observado fica diminuído. Se esse efeito não for corrigido, a distância determinada fica maior do que a real
4. Um erro de 0,5 na magnitude aparente da cefeida resulta numa distância aproximadamente 26% maior (se o erro na magnitude for para mais), ou 26% menor (se o erro na magnitude for para menos).

Comentários:

Embora os passos básicos para determinar a distância das cefeidas sejam simples e diretos, na prática a determinação fica complicada por uma série de detalhes que têm que ser levados em consideração e que introduzem incertezas. Um dos principais é a extinção da luz pela poeira interestelar entre o objeto e a Terra, que se mal corrigida pode levar a distâncias maiores ou menores; Outra é a calibração das medidas, que é fundamental para estabelecer a relação período-luminosidade nas diferentes bandas fotométricas.

Por uma questão didática, neste exercício adotamos uma calibração tal que as distâncias encontradas ficassem dentro da incerteza atualmente aceita na determinação da distância da Pequena Nuvem de Magalhães. Mas é importante saber que esse não é um assunto encerrado: os astrônomos continuam trabalhando para aprimorar a determinação dessa distância.