

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

Este exercício é uma cópia levemente 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.

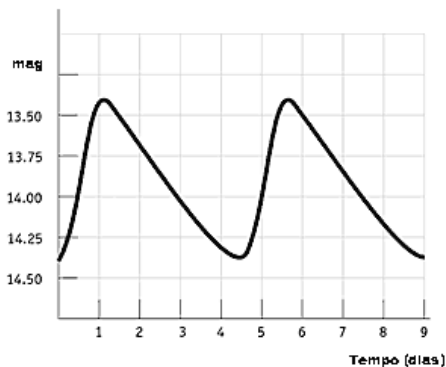


Fig. 1. Curva de luz de uma cefeida clássica típica, com período de 4,5 dias.

As cefeidas não têm todas o mesmo brilho intrínscio, 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.

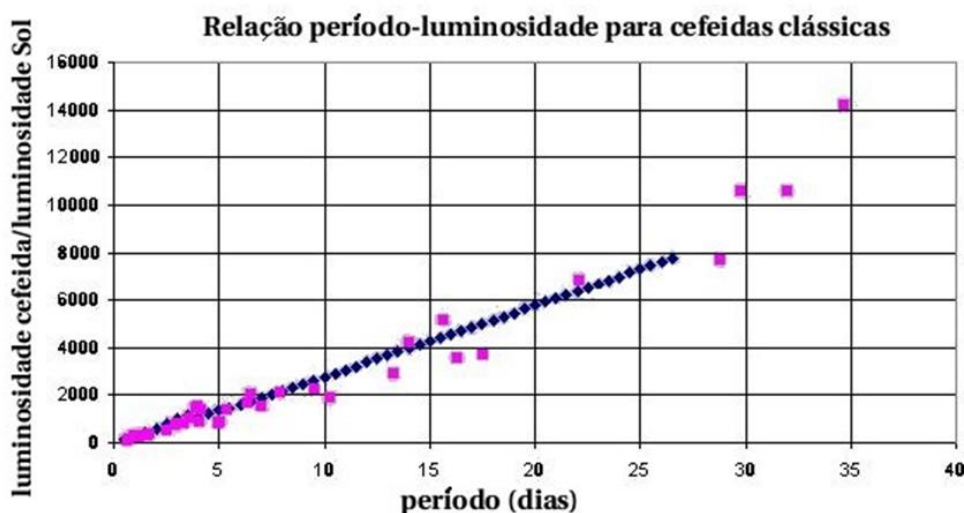


Fig.2 Luminosidade da cefeida (em unidades solares) como função do período de variabilidade.

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.

Exemplo de aplicação da equação (1):

A luminosidade do Sol é $L = 3,85 \times 10^{26}$ W, e o fluxo de energia solar que atinge uma unidade de superfície na Terra é $F = 1370$ W/m². Então, a distância a que se encontra o Sol é:

$$d = \sqrt{\frac{3,85 \cdot 10^{26}}{4\pi \cdot 1370}} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

Como medir o fluxo: Fotometria

Em astronomia, a fotometria é a técnica que mede o fluxo da radiação dos objetos astronômicos. Os CCDs registam a quantidade de fótons que lhes chega em cada pixel, transformando cada fóton num sinal elétrico mensurável. Assim, o valor da intensidade dum pixel é uma medida dos fótons que lhe chegaram. Se somarmos a intensidade de todos os pixels que compõe a estrela na imagem, podemos pensar que temos uma medida do fluxo da estrela, embora em unidades pouco significativas (ADUs – Analogic to Digital Units). Mas na verdade, em cada pixel, não chegou apenas a radiação da estrela, mas também a radiação difusa do céu, que vamos querer subtrair.

Quando se faz **Fotometria de Abertura**, o truque é considerar uma circunferência com um raio que inclua toda a estrela e somar a intensidade de todos os pixels dentro dessa circunferência. Em seguida, considerar o 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. Então, podemos subtrair a contribuição do céu, proporcionalmente à área da estrela, ao valor integrado da intensidade da área que a estrela ocupa.

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

O valor a que se chega ainda não é somente devido à radiação vinda da estrela. Há que ter em conta todas as contribuições instrumentais, tais como, o ruído do próprio CCD, a excitação térmica dos elétrons e um patamar eletrônico que existe sempre no CCD e que varia. E após corrigir todos estes fatores, se quisermos comparar com medições realizadas em outros dias e/ou com outros telescópios, é necessário calibrar para uma escala absoluta.

Quando não são necessários valores absolutos, pode-se recorrer à **Fotometria Relativa**, e tem-se o trabalho facilitado. Numa mesma imagem, as contribuições instrumentais e exteriores no CCD são as mesmas para todas as estrelas, de forma que a razão entre o fluxo de duas estrelas de brilho constante é sempre o mesmo, independentemente das circunstâncias das observações. Assim, a razão da fotometria de duas estrelas de brilho constante é também constante para dias diferentes e telescópios diferentes.

No caso da observação de uma cefeida, que é uma estrela de luminosidade variável, se realizarmos fotometria relativa a uma estrela de luminosidade constante que apareça na mesma imagem, a razão entre as fotometrias variará em dias diferentes apenas devido à variação da luminosidade da cefeida.

Assim podemos construir a curva de luz da cefeida baseando-nos na fotometria relativa da cefeida e de estrelas de referência.

Exercício: Para a realização do exercício é necessário o seguinte material:

- Software **SalsaJ**.
- Imagens da **cefeida 43522**, observada em diferentes datas (pasta “Cefeidas”).
- Identificação da **cefeida 43522** na figura abaixo:

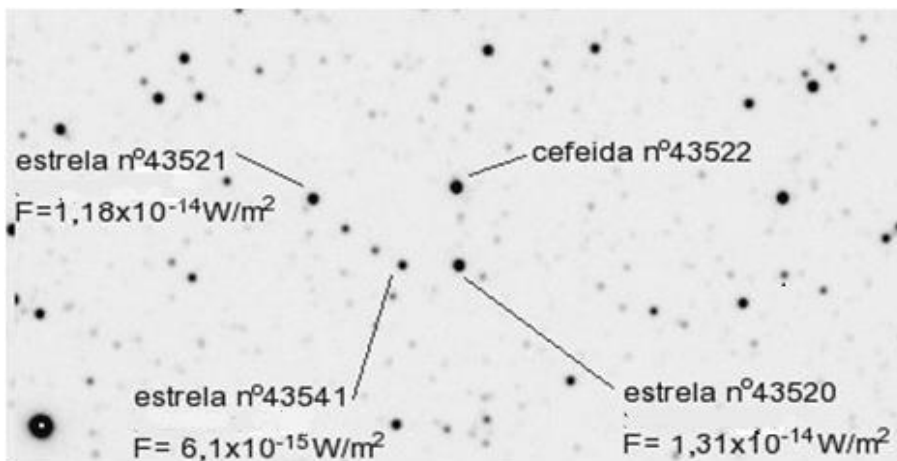


Fig.3. A localização da cefeida em estudo e das estrelas de referência usadas para comparação.

- Identificação de estrelas de referência no mesmo campo da cefeida (figura 3):
 - **Estrela 43521** $F = 1,18 \cdot 10^{-14} W/m^2$;
 - **Estrela 43541** $F = 6,1 \cdot 10^{-15} W/m^2$;
 - **Estrela 43520** $F = 1,31 \cdot 10^{-14} W/m^2$;
- Relação entre o período das cefeidas e a respectiva luminosidade (figura 2).
- Luminosidade do Sol $L_{Sol} = 3,85 \times 10^{26} W$.

- Planilha excel auxiliar: arquivo **Fotometria_cefeidasxref.xls**.
- Planilha excel **Cefeidas_planilha.xls**.
- **Solver** instalado no **Excel** (se não aparece na guia Dados do excel, escolher: Arquivo – Opções – Suplementos – escolher Solver e clicar em “Ir”, marcar a caixa de diálogo na opção Solver (a instalação será feita).

As imagens que se encontram na pasta **Cefeidas** (em formato FITS) são observações do [projeto OGLE](#) (Optical Gravitational Lensing Experiment). 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. 3 mostra a localização da cefeida 43522 e de estrelas de luminosidade constante (estrela 43521, estrela 43541, estrela 43520).

Todas as observações foram efetuadas na banda espectral I, que cobre os comprimentos de onda entre 0,7 μm e 0,9 μm aproximadamente.

O procedimento a ser seguido está descrito no arquivo [Cefeidas1-roteiro](#).

Respostas esperadas para o roteiro (arquivo Cefeidas1_roteiro):

SEGUNDO PASSO: Planilha auxiliar Fotometria_cefeidasxref.xls.

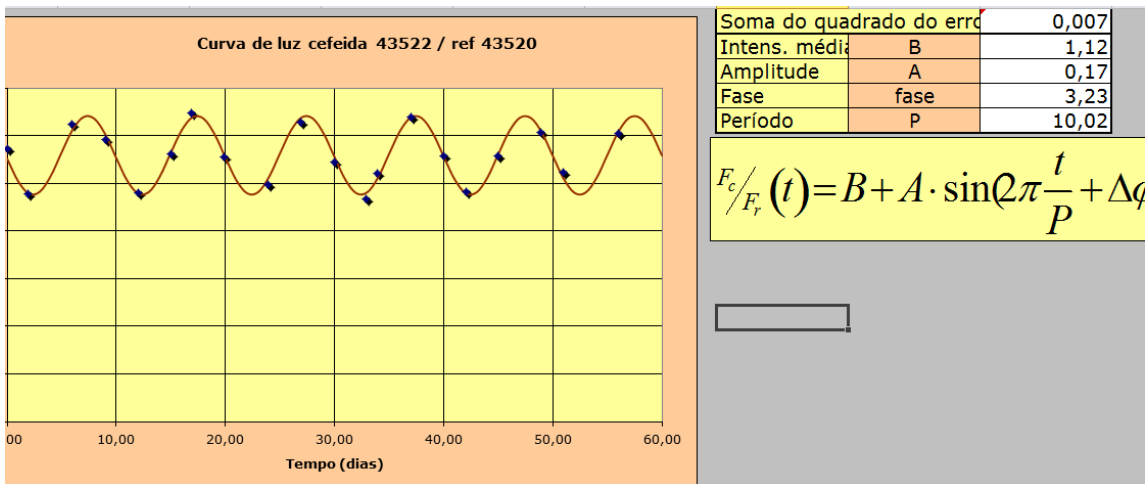
Imagem	Data	Hora	x	Y	Intensidade	intensidade	intensidade	intensidade
			cefeida	cefeida	Cefeida	ref 43520	ref 44521	ref 43541
Cep-43522-1999-10-24-03-23-25.fts	24/10/1999	03:23	251	109	77023	67262	55818	30080
Cep-43522-1999-10-26-01-41-23.fts	26/10/1999	01:41	240	128	60228	63044	53239	29300
Cep-43522-1999-10-30-02-07-12.fts	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. 4. Recorte da planilha auxiliar preenchida para as três estrelas de comparação.

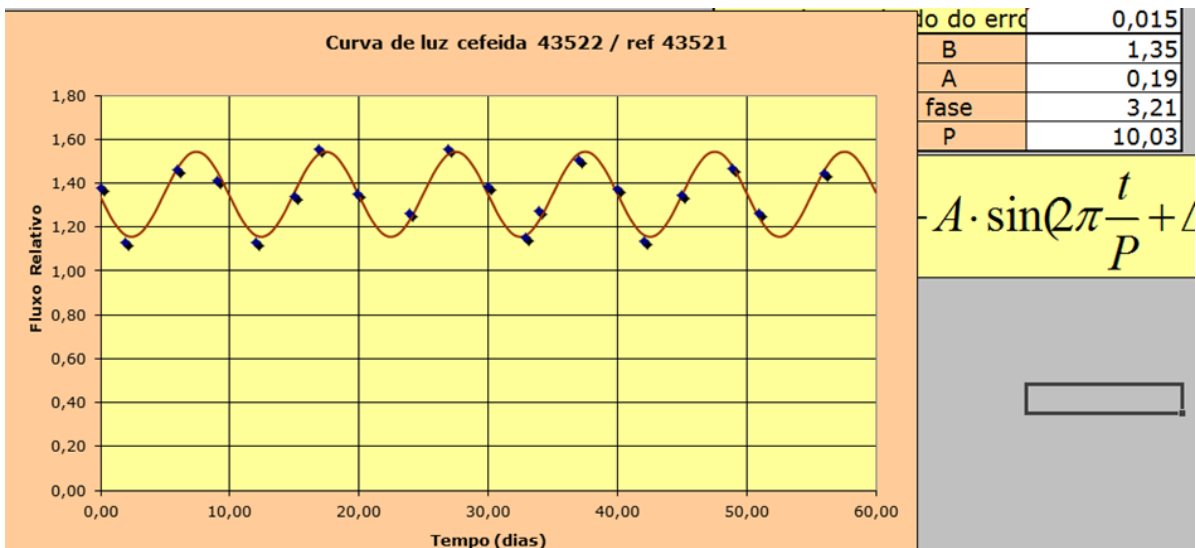
QUARTO PASSO: Curvas de luz e parâmetros do ajuste:

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

Curva da estrela de referência 43520



Curva da estrela de referência 43521



Curva da estrela de referência 43521

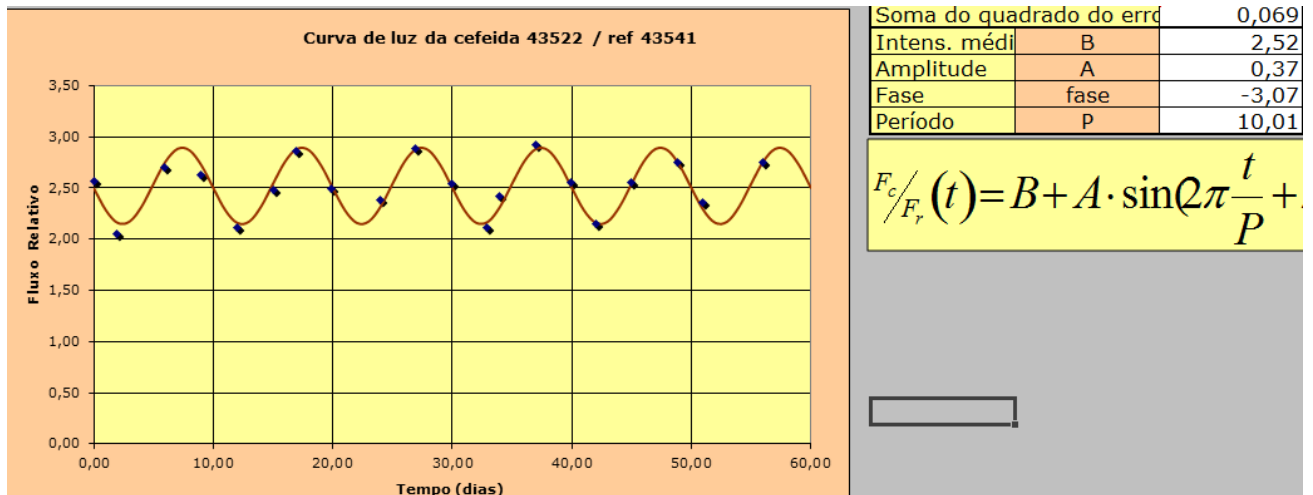


Fig. 5: Recortes das planilhas preenchidas usando as estrelas de referência 43520 (topo), 43521 (meio) e 43541 (em baixo).

QUINTO PASSO: Determinação da luminosidade da cefeida em luminosidades solares (L_{cef} / L_{sol})

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, de forma que qualquer valor entre 2500 e 3000 é aceitável.

- Para $L_{cef} / L_{sol} = 2500 \rightarrow L_{cef} = 2500 \times 3,85 \times 10^{26} \text{ W} = 9,6 \times 10^{29} \text{ W} \approx 1 \times 10^{30} \text{ W}$
- Para $L_{cef} / L_{sol} = 3000 \rightarrow L_{cef} = 3000 \times 3,85 \times 10^{26} \text{ W} = 1,15 \times 10^{30} \text{ W} \approx 1 \times 10^{30} \text{ W}$

SEXTO PASSO: Determinação do fluxo da cefeida.

Estrela Ref	F_{ref}	F_{cef}/F_{ref}	F_{cef}
43520	$1,31 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2$	1,12	$1,47 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2$
43521	$1,18 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2$	1,35	$1,59 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2$
43541	$6,1 \times 10^{-15} \text{ W/m}^2$	2,52	$1,53 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2$

SÉTIMO PASSO: Determinação da distância (d), usando $L_{\text{cef}} = 1 \times 10^{30} \text{ W}$

Estrela Ref	d (m)	d (anos-luz)	d(parsecs)
43520	$2,32 \times 10^{21}$	$\approx 245 \text{ 000}$	$\approx 75 \text{ 000}$
43521	$2,23 \times 10^{21}$	$\approx 236 \text{ 000}$	$\approx 72 \text{ 000}$
43541	$2,28 \times 10^{21}$	$\approx 241 \text{ 000}$	$\approx 74 \text{ 000}$

Questões para discussão:

1. As distâncias encontradas serão maiores do que 70000 parsecs, logo estarão bem fora do intervalo dado (entre 57000 e 65000 parsecs), ultrapassando o valor máximo em cerca de 10000 parsecs.
2. O diâmetro da Pequena Nuvem de Magalhães é de aproximadamente 7000 anos-luz, ou aproximadamente 2100 parsecs, logo esse 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, e a distância determinada fica maior do que a real. Esse é um efeito que pode ter contribuído significativamente para diferença entre o valor da distância determinada é o valor atualmente aceito.

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 pelas poeira interestelar entre o objeto e a Terra, que se não corrigida pode levar a distâncias maiores, e se superestimada pode levar a distâncias menores. Outro é a calibração das medidas, que é fundamental para estabelecer a relação período-luminosidade nas diferentes bandas fotométricas.