

# DETECÇÃO DO EXOPLANETA HD 189733B PELO MÉTODO DE TRÂNSITO

## Autores:

**Suzanne Faye** (Lycée Chaptal, Paris, France) e  
**Michel Faye** (Licée Louis Le Grand, Paris, France)

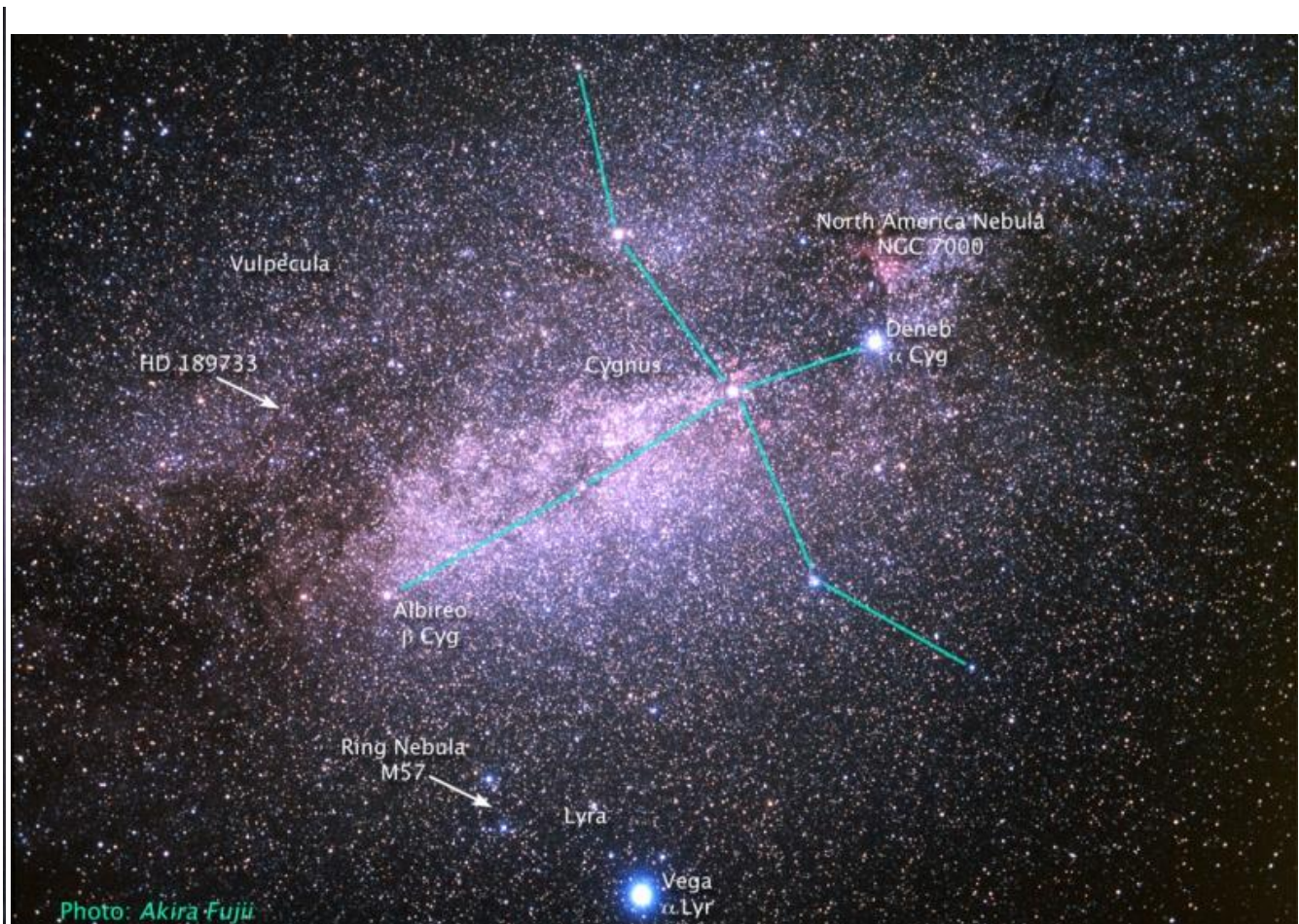
## Traduzido e adaptado por:

**Cássio Murilo Ávila** e

**Maria de Fátima Saraiva** (Departamento de Astronomia, Instituto de Física, UFRGS)

O exoplaneta orbitando a estrela HD 189733 foi descoberto em 5 de Outubro de 2005 pelo método de trânsito na França. O exoplaneta é classificado como um planeta Joviano, mais precisamente como um Júpiter quente, orbitando muito próximo da sua estrela com um curto período de 2,2 dias. Está a aproximadamente 63 anos-luz de distância, na constelação da Raposa (Vulpecula, em latim).

A figura abaixo (fonte: <http://apod.nasa.gov/apod/ap080321.html>), é uma imagem profunda do céu, centrada na constelação de Cisne, no hemisfério norte. A localização da estrela HD 189733, à esquerda da figura, está indicada.



A idéia desta atividade é entender o método de trânsito e como ele pode ser interpretado a partir dos dados obtidos com as imagens.

## Sinopse

- 1 – O que é um exoplaneta (planeta extrassolar)?
- 2 – Instruções para o software SalsaJ.
- 3 – Análise de dados: Plotar o gráfico da variação da luminosidade e identificar o sinal de trânsito.
- 4 – Interpretação dos resultados: Foco no método de trânsito.
- 5 – Aplicação de física e astrofísica.

## 1 - O que é um exoplaneta (planeta extrassolar)?

De maneira simples, é um planeta orbitando uma estrela fora do sistema solar.

Até 26 de março de 2010, 442 exoplanetas foram detectados (<http://exoplanet.eu/catalog.php>). Eles são classificados de acordo com sua massa, natureza, tamanho, etc.

A detecção de exoplanetas é difícil por causa da enorme distância entre o observador e o planeta. Ainda assim há diferentes métodos de detecção e os mais efetivos são:

**Velocidade radial:** o primeiro método usado para detectar um exoplaneta (por M. Mayor e D. Queloz em 1995) e ainda o mais eficiente. O método permite descobrir informação sobre a massa do planeta. No site do EU-HOU (<http://www.pt.euhou.net/>) você pode encontrar um exercício sobre a detecção de exoplanetas por este método.

**Método de trânsito:** complementar ao método da velocidade radial. Ele revela a variação da luminosidade da estrela quando o planeta passa na frente dela. Além disso, o raio do planeta pode ser determinado por este método, e assim sua classificação.

## 2 – Instruções para o software SalsaJ

### O software para manuseio de imagem e dados: SalsaJ

É um programa comum para tratamento de imagens. No caso desta atividade, vamos trabalhar com imagens obtidas pelo telescópio SPITZER.

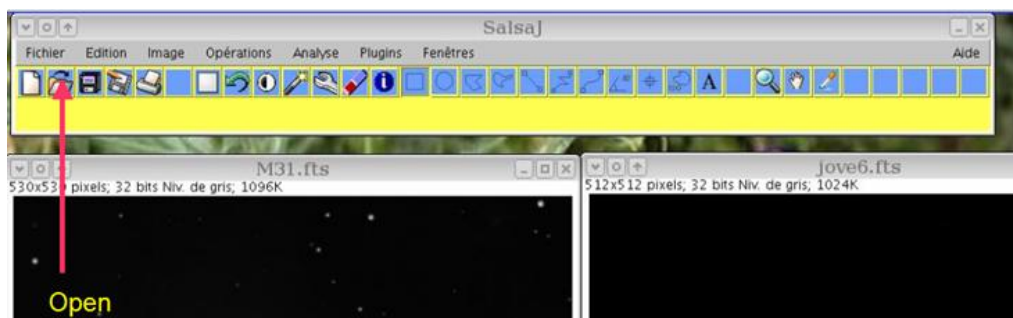
O objetivo é analisar a luminosidade da estrela e achar a informação relativa a existência de um planeta orbitando ela.

### 1º passo: Inicie o software e abra as imagens

Abra o software 'SalsaJ' (baixar em:

[http://www.pt.euhou.net/index.php?option=com\\_content&task=view&id=7&Itemid=9](http://www.pt.euhou.net/index.php?option=com_content&task=view&id=7&Itemid=9))

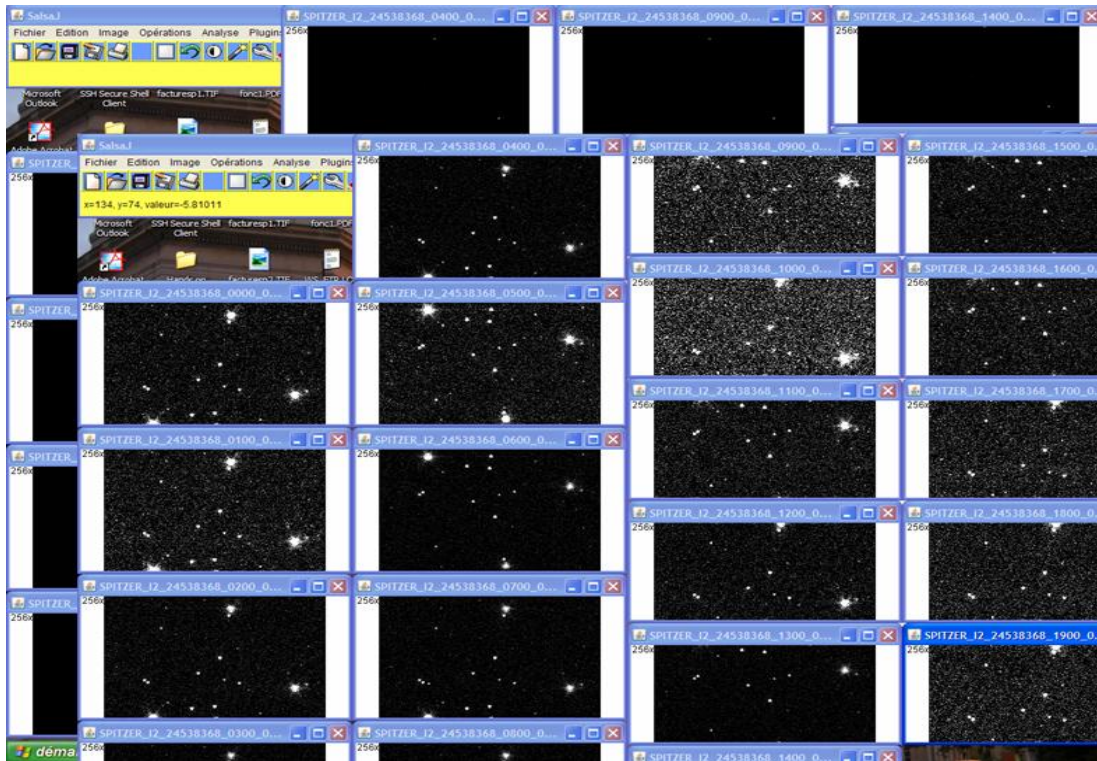
Clique no botão 'abrir arquivos (ou abrir ficheiro)' e procure pelos 20 arquivos .fits (baixar o pacote com as vinte imagens em [http://www.euhou.net/docupload/files/Exercises/Exoplanet\\_transit/20image\\_spitzer.zip](http://www.euhou.net/docupload/files/Exercises/Exoplanet_transit/20image_spitzer.zip) ou uma por uma em <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/GTTP/exercicios/Exoplaneta/imagens>).



As imagens estão num formato que podem ser reconhecidas apenas pelo software SalsaJ, então é normal que você não consiga visualizá-la como faz com imagens jpeg ou gif.

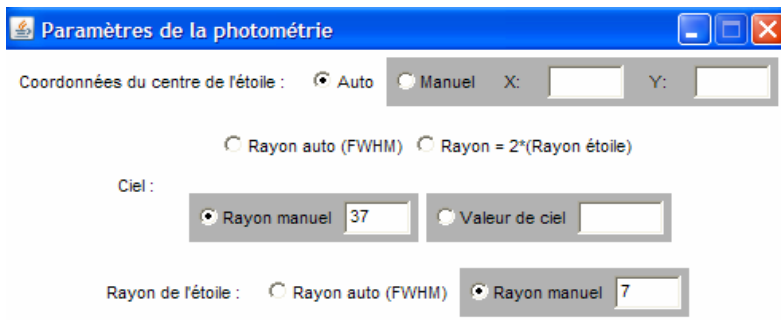
### 2º passo: Manuseio das imagens

Para cada imagem, clique na janela referente à imagem e depois no botão **Luminosidade/Contraste** (o botão com um círculo metade escurecido e metade claro) e então em **Auto** na janela que abriu. Você não precisa fechar a janela que se abre ao clicar no botão, pode deixá-la aberta e ir mudando apenas a janela referente à imagem, depois clicando em botão auto. Agora podemos visualizar o conteúdo das 20 imagens.



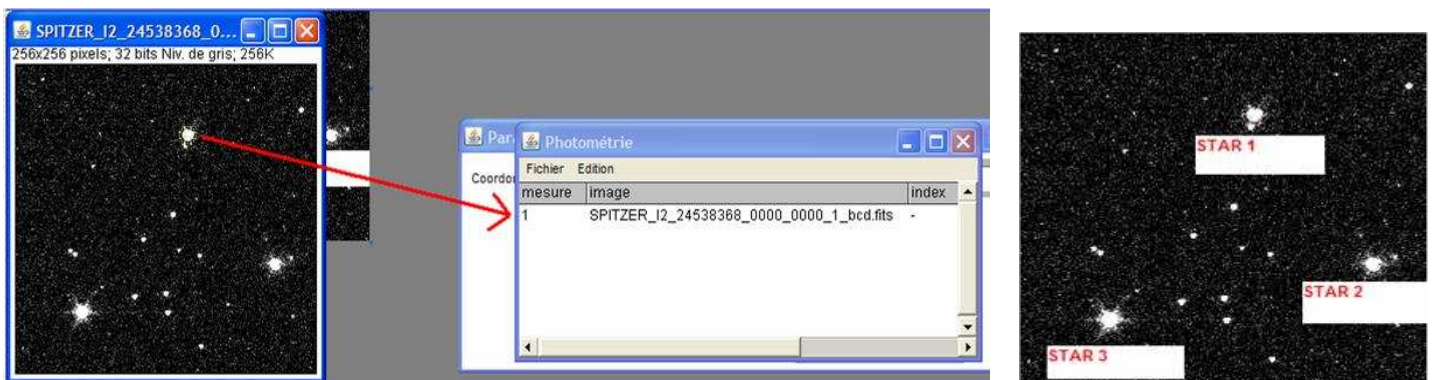
### 3º passo: Fazer medidas fotométricas

Abra ‘**Analysis (Analisar)**’ e depois ‘**Photometry parameters (parâmetros de fotometria)**’ e arranje os parâmetros as seguinte maneira:



Esta janela deve permanecer aberta, pois ao fechá-la perde-se as modificações feitas na configuração dos parâmetros para a fotometria.

Abra ‘**Analysis (Analisar)**’ e depois ‘**Photometry (Fotometria)**’. Mova o cursor até a estrela e clique nela para fazer a medida de luminosidade (intensidade).



Faça o mesmo para cada uma das três estrelas em todas imagens. Podemos nomear as três estrelas como mostramos na figura da direita, para podermos identificar seus dados mais tarde: Estrela 1 (Star 1), Estrela 2 (Star 2) e Estrela 3 (Star 3). É preferível (mas não obrigatório) realizar a fotometria na ordem correta das

imagens, para facilitar a construção da tabela que faremos a seguir. É possível identificar a ordem pelo número no nome da imagem. Por exemplo, primeiro SPITZER\_I2\_24538368\_0000\_0000\_1, depois SPITZER\_I2\_24538368\_0100\_0000\_1 e assim sucessivamente, como no exemplo abaixo. Depois de realizar a fotometria para as três estrelas você pode fechar a janela da imagem.

**Portanto, no final obtemos 60 medidas de luminosidade: por exemplo**

medida	imagem	índice	x	y	intensidade	raio do céu	
1	SPITZER_I2_24538368_0000_0000_1_bcd.fits	-	146	197	31040.22	7	0.97
2	SPITZER_I2_24538368_0000_0000_1_bcd.fits	-	221	90	39022.15	7	0.90
3	SPITZER_I2_24538368_0000_0000_1_bcd.fits	-	56	50	62343.10	7	1.14
4	SPITZER_I2_24538368_0100_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30916.48	7	1.10
5	SPITZER_I2_24538368_0100_0000_1_bcd.fits	-	221	90	39018.06	7	1.28
6	SPITZER_I2_24538368_0100_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62273.46	7	1.56
7	SPITZER_I2_24538368_0200_0000_1_bcd.fits	-	146	197	31075.01	7	0.95
8	SPITZER_I2_24538368_0200_0000_1_bcd.fits	-	221	90	39042.47	7	1.35
9	SPITZER_I2_24538368_0200_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62313.83	7	1.45
10	SPITZER_I2_24538368_0300_0000_1_bcd.fits	-	146	198	30935.88	7	1.39
11	SPITZER_I2_24538368_0300_0000_1_bcd.fits	-	221	90	38971.70	7	1.22
12	SPITZER_I2_24538368_0300_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62394.79	7	1.43
13	SPITZER_I2_24538368_0400_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30694.31	7	1.02
14	SPITZER_I2_24538368_0400_0000_1_bcd.fits	-	221	90	38923.76	7	1.52
15	SPITZER_I2_24538368_0400_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62290.79	7	1.74
16	SPITZER_I2_24538368_0500_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30698.17	7	1.36
17	SPITZER_I2_24538368_0500_0000_1_bcd.fits	-	221	90	39107.76	7	1.10
18	SPITZER_I2_24538368_0500_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62385.62	7	1.49
19	SPITZER_I2_24538368_0600_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30990.42	7	0.95
20	SPITZER_I2_24538368_0600_0000_1_bcd.fits	-	221	90	38888.00	7	1.33
21	SPITZER_I2_24538368_0600_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62299.40	7	1.69
22	SPITZER_I2_24538368_0700_0000_1_bcd.fits	-	146	198	31054.50	7	1.48
23	SPITZER_I2_24538368_0700_0000_1_bcd.fits	-	221	90	38859.33	7	1.13
24	SPITZER_I2_24538368_0700_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62615.40	7	1.47
25	SPITZER_I2_24538368_0800_0000_1_bcd.fits	-	146	198	30574.83	7	1.06
26	SPITZER_I2_24538368_0800_0000_1_bcd.fits	-	221	90	38962.50	7	1.42
27	SPITZER_I2_24538368_0800_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62184.96	7	1.58
28	SPITZER_I2_24538368_0900_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30145.64	7	1.24
29	SPITZER_I2_24538368_0900_0000_1_bcd.fits	-	221	90	38971.94	7	1.08
30	SPITZER_I2_24538368_0900_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62262.88	7	1.67
31	SPITZER_I2_24538368_1000_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30145.59	7	1.23
32	SPITZER_I2_24538368_1000_0000_1_bcd.fits	-	221	90	39125.91	7	1.16
33	SPITZER_I2_24538368_1000_0000_1_bcd.fits	-	56	50	62121.98	7	1.37
34	SPITZER_I2_24538368_1100_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30217.67	7	1.22
35	SPITZER_I2_24538368_1100_0000_1_bcd.fits	-	221	90	38953.57	7	1.30
36	SPITZER_I2_24538368_1100_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62222.92	7	1.36
37	SPITZER_I2_24538368_1200_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30207.84	7	0.78
38	SPITZER_I2_24538368_1200_0000_1_bcd.fits	-	221	90	38978.35	7	0.93
39	SPITZER_I2_24538368_1200_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62416.59	7	1.69
40	SPITZER_I2_24538368_1300_0000_1_bcd.fits	-	146	198	30218.08	7	0.99
41	SPITZER_I2_24538368_1300_0000_1_bcd.fits	-	221	90	38961.54	7	1.24
42	SPITZER_I2_24538368_1300_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62306.19	7	1.83
43	SPITZER_I2_24538368_1400_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30538.14	7	0.89
44	SPITZER_I2_24538368_1400_0000_1_bcd.fits	-	221	90	39144.38	7	1.41
45	SPITZER_I2_24538368_1400_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62314.87	7	1.63
46	SPITZER_I2_24538368_1500_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30788.83	7	1.18
47	SPITZER_I2_24538368_1500_0000_1_bcd.fits	-	221	90	39057.52	7	1.32
48	SPITZER_I2_24538368_1500_0000_1_bcd.fits	-	56	50	62108.29	7	1.74
49	SPITZER_I2_24538368_1600_0000_1_bcd.fits	-	146	197	30773.23	7	0.96
50	SPITZER_I2_24538368_1600_0000_1_bcd.fits	-	221	90	38982.07	7	1.37
51	SPITZER_I2_24538368_1600_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62325.13	7	1.55
52	SPITZER_I2_24538368_1700_0000_1_bcd.fits	-	146	198	30955.64	7	1.11
53	SPITZER_I2_24538368_1700_0000_1_bcd.fits	-	221	90	39067.67	7	1.50
54	SPITZER_I2_24538368_1700_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62017.58	7	1.63
55	SPITZER_I2_24538368_1800_0000_1_bcd.fits	-	146	198	30927.16	7	1.21
56	SPITZER_I2_24538368_1800_0000_1_bcd.fits	-	221	90	39155.81	7	1.56
57	SPITZER_I2_24538368_1800_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62098.63	7	1.64
58	SPITZER_I2_24538368_1900_0000_1_bcd.fits	-	146	197	31029.53	7	1.21
59	SPITZER_I2_24538368_1900_0000_1_bcd.fits	-	221	90	39027.56	7	1.24
60	SPITZER_I2_24538368_1900_0000_1_bcd.fits	-	55	50	62620.78	7	1.46

### 3 – Análise de dados: Plotar o gráfico da variação da luminosidade e identificar o sinal de trânsito

Os dados referentes às luminosidades devem ser colocados na planilha do EXCEL, como no exemplo abaixo. A planilha do EXCEL também é útil para plotar os gráficos, mas você pode usar qualquer software que faça esse trabalho e com o qual tenha maior familiaridade.

#### 1º passo: Coloque as medidas para as três estrelas

Chamamos de L1, L2 e L3 as luminosidades (Intensidades) referentes, respectivamente, às estrelas 1, 2 e 3 (intensidade de luz recebida). Aqui é imprescindível que a linha 1 corresponda à imagem SPITZER\_I2\_24538368\_0000\_0000\_1\_bcd.fits, a linha 2 à imagem SPITZER\_I2\_24538368\_0100\_0000\_1\_bcd.fits, e assim por diante, de maneira que baste incrementar o tempo em 640 de uma linha à outra.

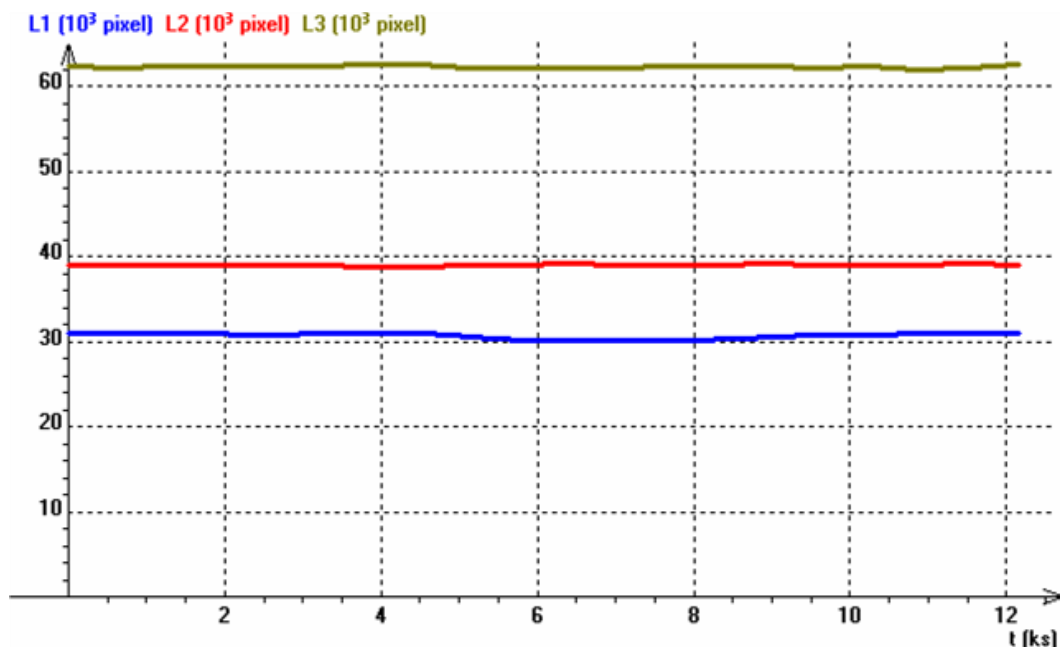
	L 1	L 2	L 3	Tempo (s)
1	31040	39022	62343	0
2	30916	39018	62273	640
3	31075	39042	62313	1280
4	30935	38971	62394	1920
5	30694	38923	62290	2560
6	30698	39107	62385	3200
7	30990	38888	62299	3840
8	31054	38859	62615	4480
9	30574	38962	62184	5120
10	30145	38971	62262	7560
11	30145	39125	62121	6400
12	30217	38953	62222	7040
13	30207	38978	62416	7680
14	30218	38961	62306	8320
15	30538	39144	62314	8960
16	30788	39057	62108	9600
17	30773	38982	62325	10240
18	30955	39067	62017	10880
19	30927	39155	62098	11520
20	31029	39027	62620	12160

**Comentário:** números decimais são insignificantes, pois a escala de luminosidade é da ordem de  $10^4$  e as medidas não são muito precisas.

**Tempo:** para saber o tempo para cada imagem clique em **Image (Imagem)** e depois em **Information (Informação)**. No terceiro conjunto de informações (Time and Exposure Information), a primeira linha traz a data e a hora em que a observação foi feita. Comprando as diferentes imagens você verá que o tempo entre duas imagens consecutivas é de 640 segundos.

#### 2º passo: Plote os gráficos da luminosidade com o tempo para cada estrela

Começamos plotando o gráfico para a luminosidade em função do tempo para cada estrela, assim obtendo:



Percebemos que as curvas L1 e L2 são praticamente constantes, mas a curva L1 apresenta uma queda sutil na intensidade entre aproximadamente 6000 s e 8000 s. Essa queda é uma propriedade do trânsito de um planeta na frente de sua estrela.

### **3º passo: Determinação das diferenças entre a luminosidade em cada tempo e a luminosidade média.**

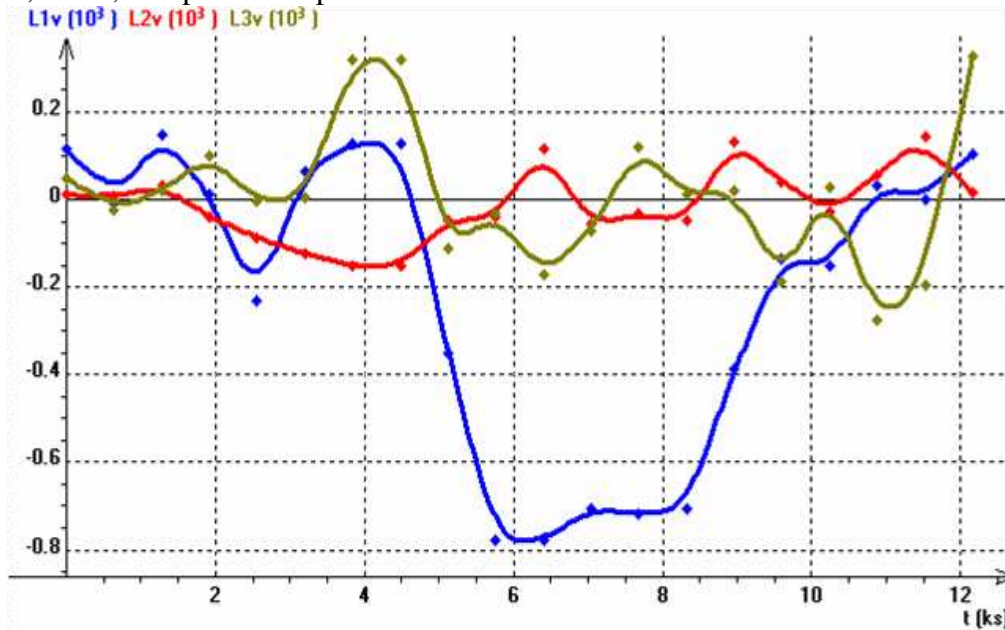
Para cada estrela, para todos os tempos, calculamos a diferença entre a intensidade medida em um certo tempo e intensidade média:  $L1v = L1 - L1m\u00e9dia$ ,  $L2v = L2 - L2m\u00e9dia$ ,  $L3v = L3 - L3m\u00e9dia$ .

		ESTRELA 1		ESTRELA 2		ESTRELA 3	
	Tempo	L1	L1v	L2	L2v	L3	L3v
1	0	31040	115	39022	11	62343	48
2	640	30916	-9	39018	7	62273	-22
3	1280	31075	149	39042	31	62313	18
4	1920	30935	9	38971	-40	62394	99
5	2560	30694	-231	38923	-88	62290	-5
6	3200	30698	-227	39107	96	62385	90
7	3840	30990	64	38888	-123	62299	4
8	4480	31054	128	38859	-152	62615	320
9	5120	30574	-351	38962	-49	62184	-111
10	5760	30145	-780	38971	-40	62262	-33
11	6400	30145	-780	39125	114	62121	-174
12	7040	30217	-708	38953	-58	62222	-73
13	7680	30207	-718	38978	-33	62416	121
14	8320	30218	-707	38961	-50	62306	11
15	8960	30538	-387	39144	133	62314	19
16	9600	30788	-137	39057	46	62108	-188
17	10240	30773	-152	38982	-29	62325	30
18	10880	30955	29	39067	56	62017	-278
19	11520	30927	2	39155	144	62098	-197
20	12160	31029	104	39027	16	62620	325
m\u00e9dia		*30925		39011		62295	

**Coment\u00e1rio:** para a estrela 1 fazemos a m\u00e9dia apenas com as medidas de 1 a 8, pois a partir da\u00ed come\u00e7a o tr\u00e2nsito.

#### 4º passo: Superposição dos três novos gráficos

Da mesma maneira descrita antes, podemos plotar estes gráficos na mesma planilha. Podemos, então, compará-los e perceber o sinal resultado do trânsito.

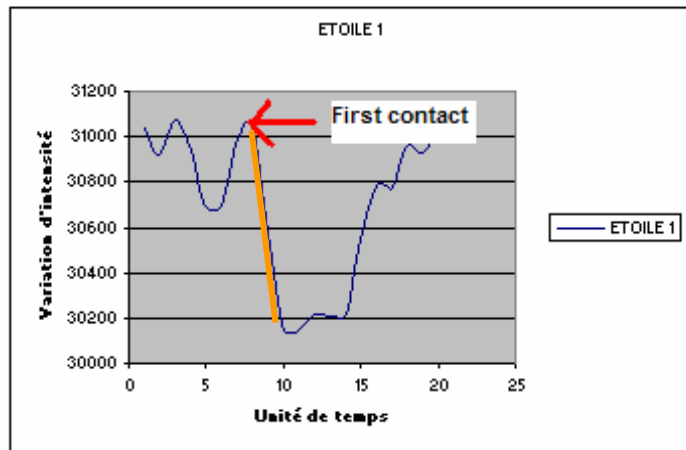
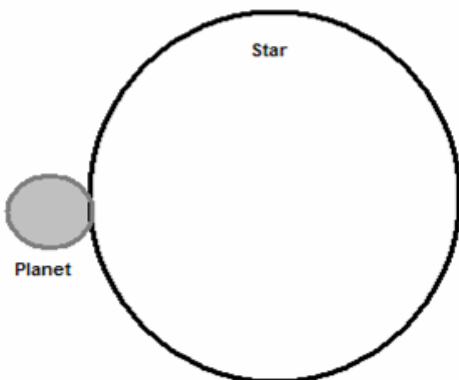


Enquanto os gráficos das estrelas 2 e 3 são caracterizados por uma variação relativamente pequena em sua intensidade, o gráfico da estrela 1 é marcado por uma queda de intensidade mais acentuada que se mantém por um certo período de tempo.

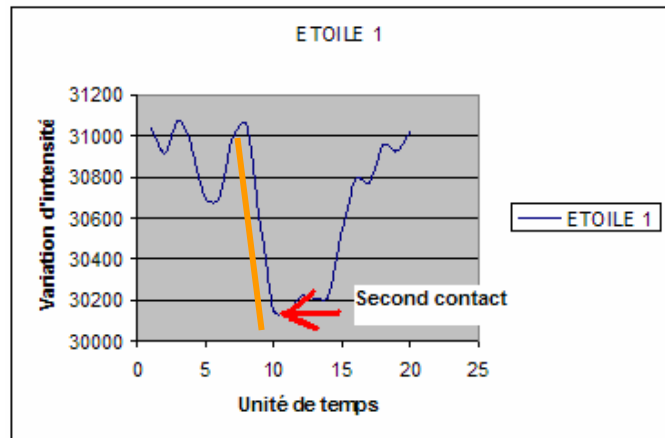
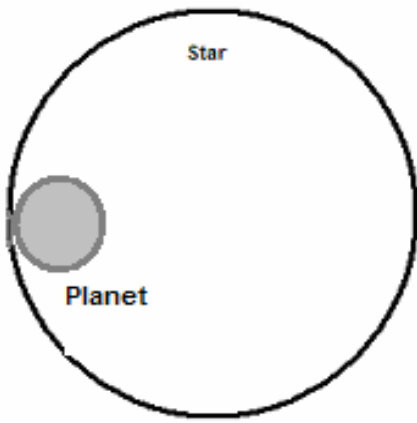
#### **4 – Interpretação dos resultados: Foco no método de trânsito**

Durante o trânsito há 4 “contatos” característicos, que são os instantes em que a borda do planeta toca a borda da estrela em um único ponto.

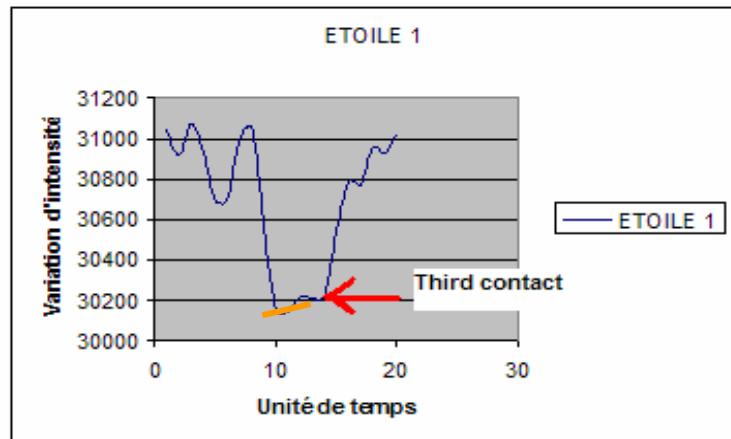
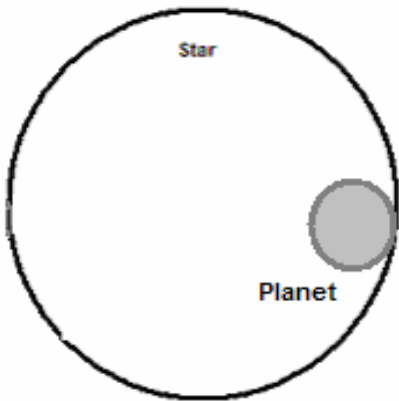
##### **1- Primeiro contato: o planeta está inteiramente fora da estrela, se movendo para dentro**



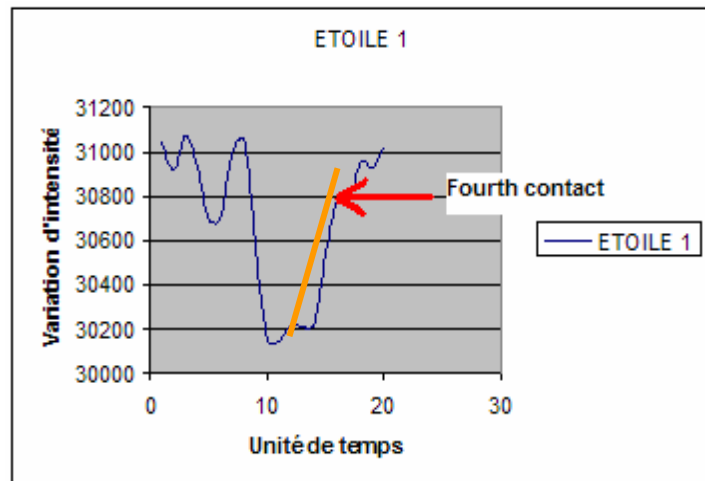
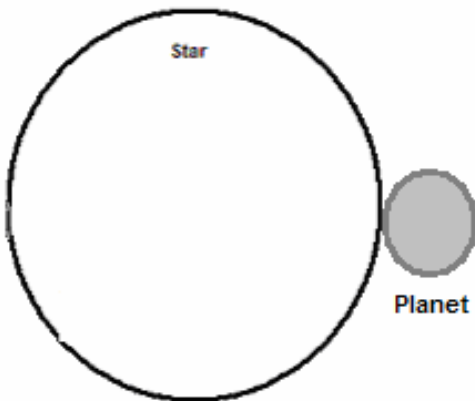
##### **2- Segundo contato: o planeta está inteiramente dentro da estrela, se movendo ainda mais para dentro**



**3- Terceiro contato: o planeta está inteiramente dentro da estrela, se movendo para fora**

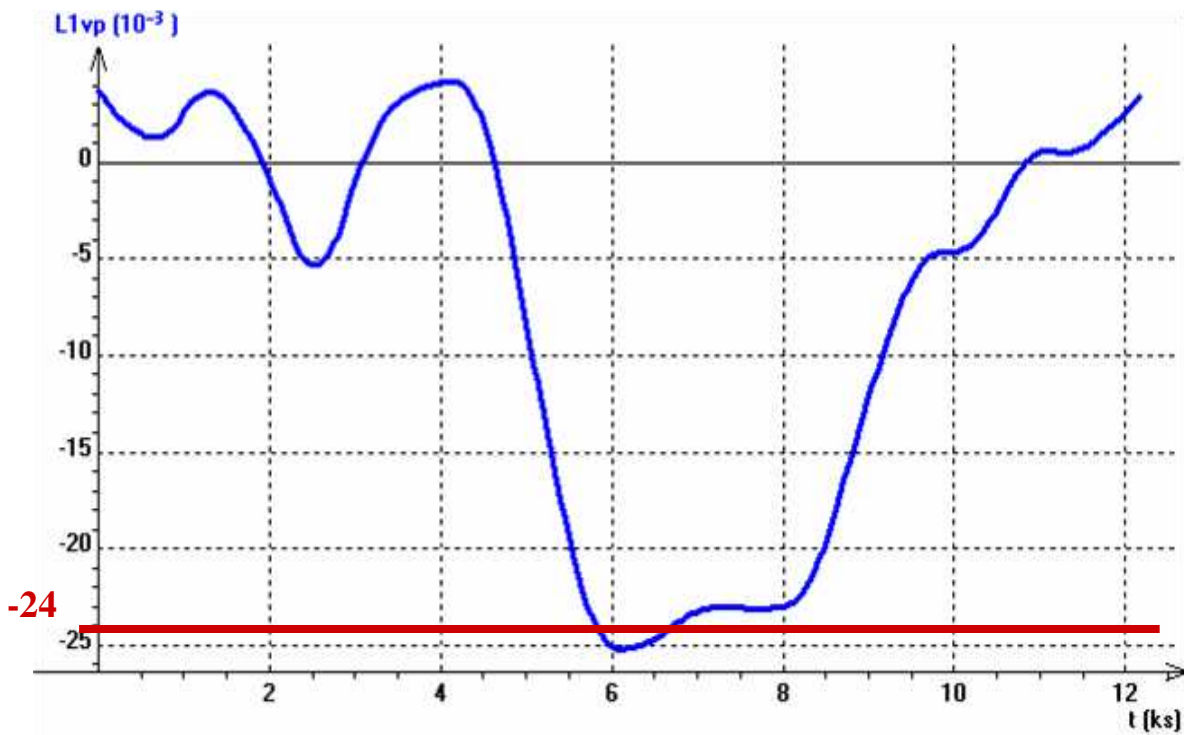


**4- Quarto contato: o planeta está inteiramente fora da estrela, se movendo para fora**



**5- Gráfico: proporção da perda de luminosidade durante o trânsito**

Plotamos o gráfico para  $L1v = L1v/L1média$



## 5 – Aplicação de Física e Astrofísica!

### 1- Achar $r/R$

$r$  é o raio do exoplaneta (HD 189733b)

$R$  é o raio da estrela (HD 189733)

Quando o trânsito é máximo, isto é, quando o exoplaneta está inteiramente na frente da estrela, a luminosidade é mínima. Pelo gráfico acima vemos que a máxima perda é 2,4%. A diminuição da luminosidade corresponde à fração da área da estrela que ficou encoberta pelo planeta durante o trânsito. Portanto, a perda de luminosidade (que vamos representar pela letra  $\alpha$ , é igual à razão entre a área do planeta e a área da estrela:

$$\frac{s}{S} = \frac{\pi r^2}{\pi R^2} = \alpha$$

$$\frac{r}{R} = \sqrt{\alpha} = 0,15 \text{ (na verdade } r/R = 0,148)$$

$$r = 0,15 R \text{ ou } R = 6,5 r$$

### 2- Achar $a$

$a$  é a distância entre a estrela e o exoplaneta

O período  $T$  do exoplaneta é  $T = 2,2$  dias =  $1,9 \times 10^5$  s

Podemos achar esse período facilmente: é, por exemplo, o tempo entre dois trânsitos consecutivos. Se o Spitzer continuar olhando durante 4,5 dias esta estrela podemos achar  $T$ .

A massa da estrela é aproximadamente a massa solar:  $2 \times 10^{30}$  kg (a massa real é 0,8 massa solar).

Com a terceira lei de Kepler obtemos:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}, \text{ com } G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ (em unidades do SI)}$$

$$a = (GMT^2 / 4\pi^2)^{1/3}$$

$$a = 5,0 \times 10^9 \text{ m} = 5,0 \times 10^6 \text{ km (na verdade } a = 4,7 \times 10^6 \text{ km)}$$

### 3- O trânsito acontece na linha do equador da estrela ou não?

Fazemos a hipótese que a órbita é circular, isto é,  $e = 0$ . (na verdade  $e = 0,001$ )

Do gráfico  $L1vp = f(t)$  observamos um tempo no qual o trânsito é máximo, pois  $L1vp$  permanece mínimo por um tempo. Temos, então, 3 partes:

Contato 1 para contato 2: de 4,7000s para 5,8000s. Tempo decorrido 1100s: distância  $2r$

Contato 2 para contato 3: de 5,8000s para 8,6000s. Tempo decorrido 2800s: distância  $D$  (máxima,  $2(R-r) = 11r$ )

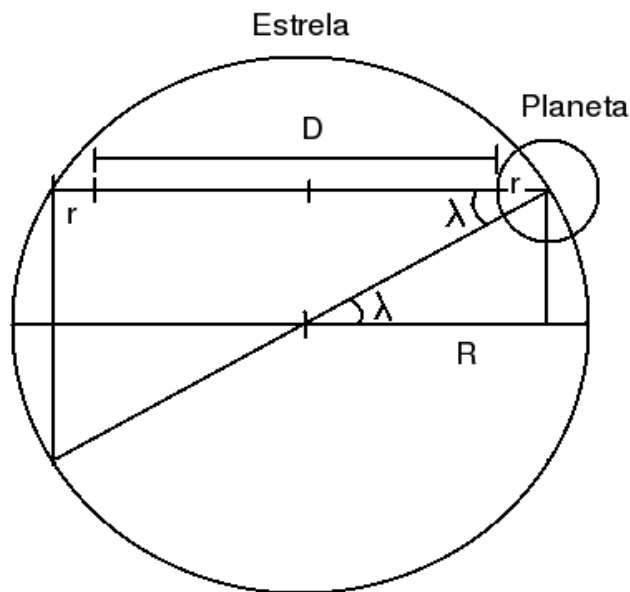
Contato 3 para contato 4: de 8,6000s para 9,7000s. Tempo decorrido 1100s: distância  $2r$

Supondo velocidade constante, temos que

$$2r/1100 = D/2800$$

$$D = 2r \times 2800/1100 = r \times 57/11 = 5,1r < 11r, \text{ logo o trânsito não está no equador.}$$

Latitude  $\lambda$  :



$$\cos\lambda = \frac{(D + 2r)}{2R} = \frac{7,1r}{13r}$$

$$\lambda = \cos^{-1}(0,5461) = 57^\circ$$

### 4- Valores de r e R

**Valor de r:**

A velocidade orbital do planeta é  $2\pi \frac{a}{T}$ . Assumindo que essa velocidade é uniforme, ela se mantém em todos os intervalos de tempo, logo:

$$\frac{2r}{1100} = \frac{5,1r}{2800} = 2\pi \frac{a}{T}$$

$$r = 1100\pi \frac{a}{T} = \frac{1100\pi 5,0 \times 10^9}{1,9 \times 10^5}$$

$$r = 9 \times 10^7 \text{ m} = 9 \times 10^4 \text{ km (na verdade } r = 8,31 \times 10^4 \text{ km)}.$$

Comparando com o raio da Terra, de  $6,37 \times 10^3 \text{ km}$ , e de Júpiter, de  $7,1 \times 10^4 \text{ km}$ , vemos que esse planeta é quase do tamanho de Júpiter, sendo muito maior do que a Terra.

### Valor de R:

$$R = 6,5 r = 6,5 \times (9 \times 10^7)$$

$$R = 5,9 \times 10^8 \text{ m} = 5,9 \times 10^5 \text{ km} = 0,84 R_{\text{sol}} \text{ (na verdade } R = 5,5 \times 10^5 \text{ km} = 0,79 R_{\text{sol}})$$

### 5- Valor de m

Se o exoplaneta é do tipo Joviano sua densidade é aproximadamente a mesma de Júpiter:  $\rho = 1,3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

$$m = \rho \frac{4\pi r^3}{3} = 1,3 \times 10^3 \frac{4\pi(9 \times 10^7)^3}{3}$$

$$\mathbf{m = 4 \times 10^{27} \text{ kg}}$$

se tomarmos  $r = 8,3 \times 10^7 \text{ m}$

$$m = \rho \frac{4\pi r^3}{3} = 1,3 \times 10^3 \frac{4\pi(8,3 \times 10^7)^3}{3}$$

$$\mathbf{m = 3 \times 10^{27} \text{ kg (na verdade } m = 2,15 \times 10^{27} \text{ kg)}$$

o que nos dá uma boa medida da ordem de grandeza da massa.