Siete pasos para descubrir una estrella enana

Del Doppler a los exoplanetas

EU-HOU Nápoles Septiembre 23th 2006

EU- HOU OHP – France May 2009

Ejercicio Propuesto por:

Roger FERLET, Instituto de Astrofísica de París, Francia ferlet@iap.fr

Michel FAYE, Liceo Louis Le Grand, París, Francia mfaye2@wanadoo.fr

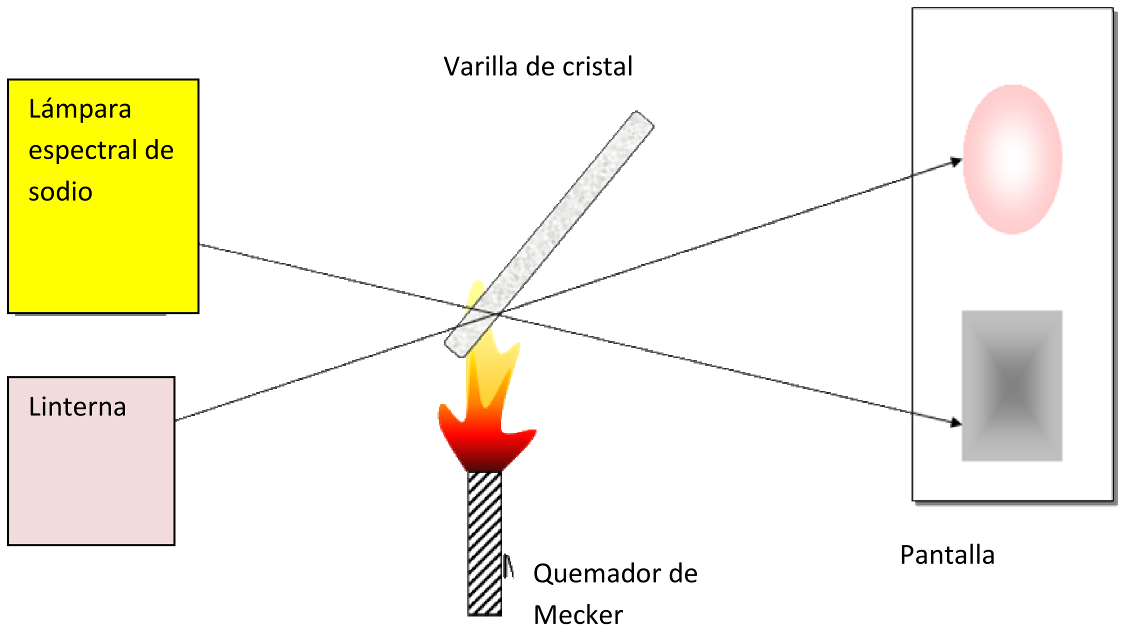
Suzanne FAYE, Liceo Chaptal, París, Francia mfaye@club-internet.fr

1er. Paso : ESPECTROSCOPIA

1.1 Una estrella emite un espectro continuo debido a las reacciones nucleares, con líneas de absorción debidas a la atmosféra de la estrella.

Veremos 11 espectros de una estrella binaria, en fechas diferentes ; estudiaremos la parte del espectro que rodea las líneas de sodio ; se han escogido las líneas de sodio porque se puede experimentar fácilmente con lámparas de sodio o con sal común.

1.2 Experimento :



La varilla de cristal contiene cloruro de sodio (NaCl) ; cuando se calienta a alta temperatura, produce una luz de sodio que absorbe la luz de la lámpara espectral de sodio, mientras que la luz de la linterna no cambia. Este fenómeno se llama **resonancia de las líneas de sodio.**

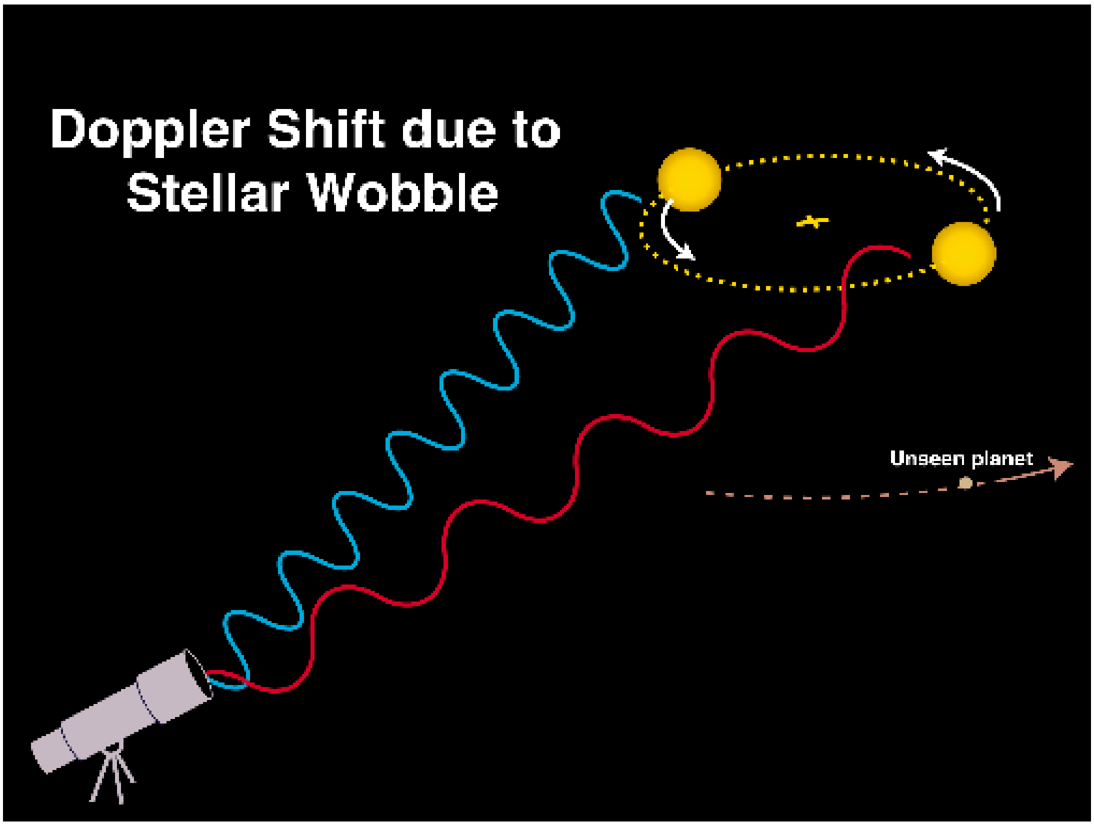
1.3 Abre la imagen fic01.fit

Tenemos 11 imágenes.fit, con las 11 fechas siguientes

Número del espectro	Fecha (días)
1	0
2	0.974505
3	1.969681
4	2.944838
5	3.970746
6	4.886585
7	5.924292
8	6.963536
9	7.978645
10	8.973648
11	9.997550

El intervalo entre dos fechas es aproximadamente de un día.

Cada objeto de un sistema binario se desplaza alrededor de su baricentro. Por lo tanto, las líneas del espectro se mueven según cada objeto se aleja o acerca respecto del observador (efecto Doppler).



2. ANIMACIÓN DE LAS LÍNEAS DEL ESPECTRO

UTILIZA images.fit

Nota: images.fit (fit=fits=fts) se usan para la animación

images.dat se usan para los espectros ópticos

He aquí el procedimiento para tener una visión global del desplazamiento Doppler cuando la estrella se desplaza alrededor del baricentro:

Abre SalsaJ (pulsa en el icono SalsaJ)

Pulsa en **archivo**, a continuación **abrir** en el menú

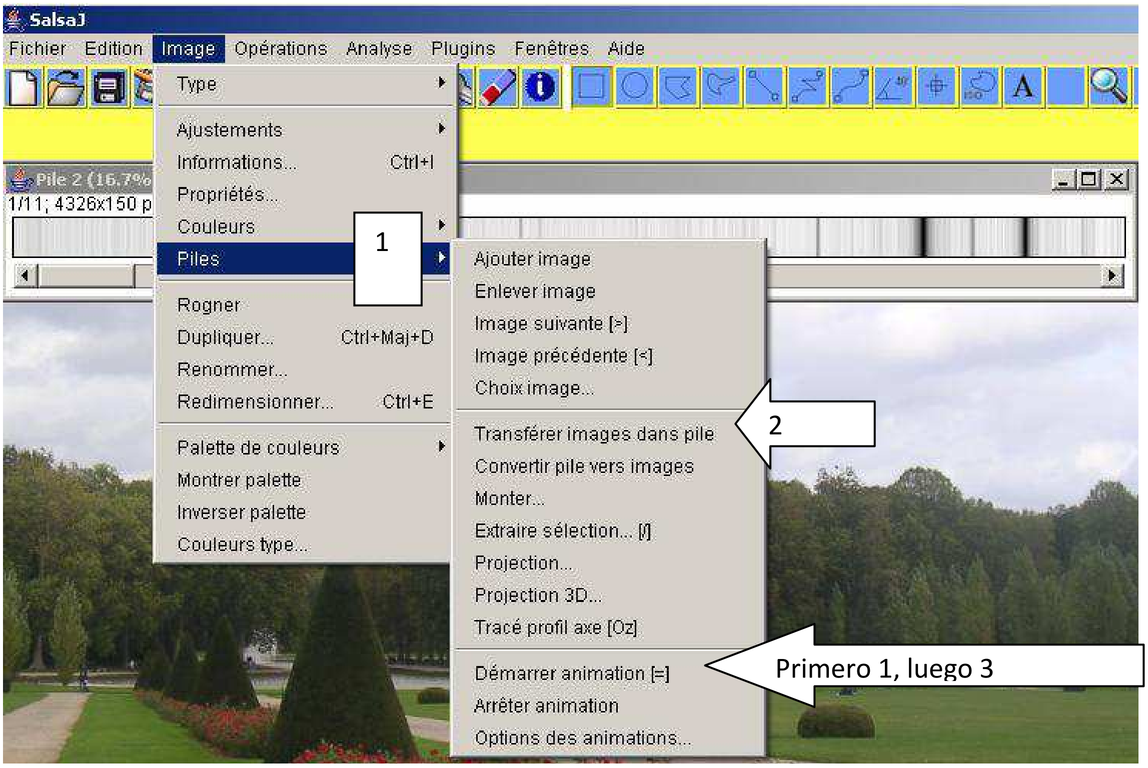
Entra en la carpeta: ***binary system***

Selecciona las 11 imágenes de images.fit desde fic01.fit a fic11.fit: pulsa *mayúscula* para seleccionar las11 images.fit a la vez

Open (abrir) estas 11 imágenes y a continuación

Pulsa en Imágenes: se desplegará un menú
Pulsa en Apilado: obtienes un nuevo menú
Pulsa en Transferir Imágenes a Apilados

Pulsa de Nuevo en Imágenes/Apilados/Comenzar animación



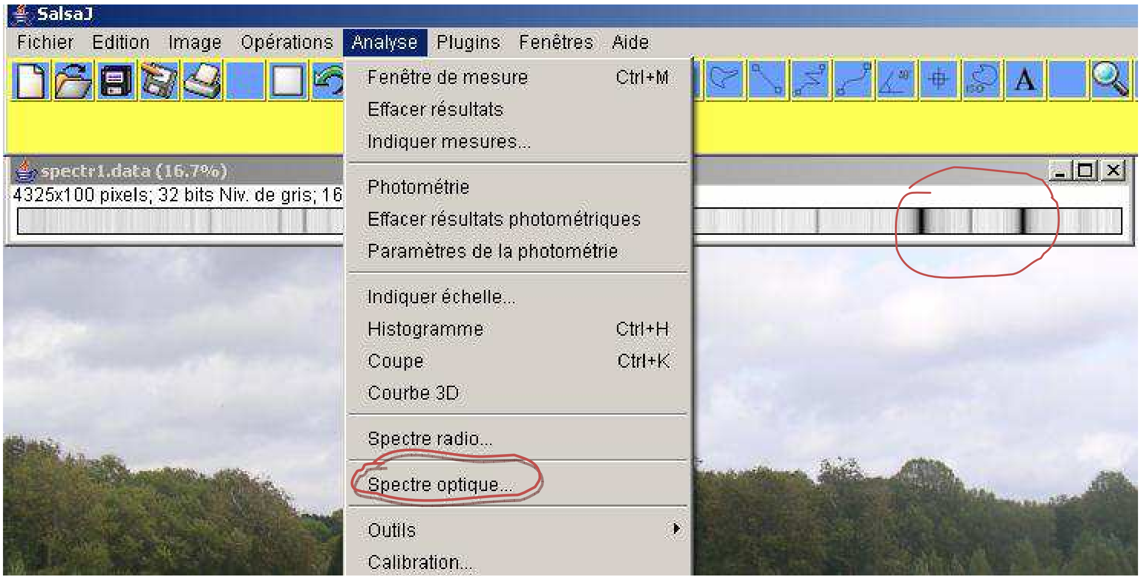
Comprueba el efecto Doppler durante la rotación de la estrella alrededor del baricentro del sistema binario, después cierra.

3. MEDIDA DE LA LONGITUD DE ONDA λ Y DEL FLUJ0 DEL ESPECTRO ÓPTICO

Utiliza images.dat

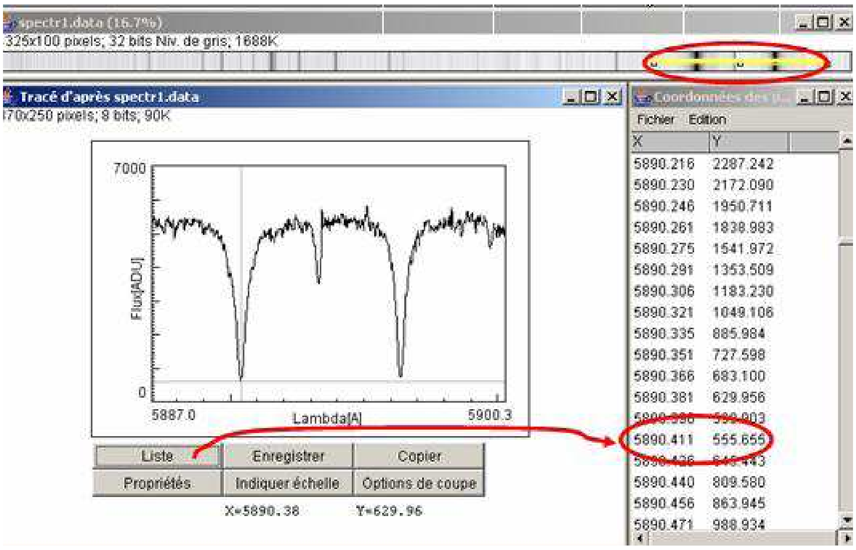
3.1 Investigación del espectro 1: spetrc1.data

Pulsa en **Análisis/espectro óptico**/sistema binario/spectr1.data



3.2 Flujo frente a longitud de onda: ϕ=f(λ)

Spect1.dat image/Pulsa en **seleccionar línea recta**, dibuja una línea recta desde el **doblete** de **Na** (para obtener una línea horizontal, presiona *mayúsculas* mientras la dibujas) / Pulsa en **Análisis/dibujar perfil**: obtendrás ϕ=f(λ)



Observamos:

2 profundas líneas de absorción del sodio
Una más pequeña (NiI) que no usaremos

Con el ratón (o equivalente) mide la absorción de sodio en las longitudes de onda del doblete ($1Å=10^{-10}m$).
Mira el valor en la curva o en la lista de:

λ_1	=	5890,411 Å	λ_2	=	5896,366 Å

Compara estos valores con los de referencia (las líneas de sodio de nuestro laboratorio)

λ_{NaD1}	=	5889,950 Å	λ_{NaD2}	=	5895,924 Å

Loa diferencia entre los valores de referencia y el medido por nosotros es el efecto Doppler.

3.3 Los once espectros: spectr i.data, i del 1 al 11

Repetir la misma operación que con spectr 1.data con el resto de los espectros.

LISTA DE RESULTADOS

Espectro	Fecha t (días)	λ1 -λNa1 (Å)	VE = c .(λ1 -λNa1)/ λNa1 (km/s)
1	0	0.461	23.48
2	0.974505	0.546	27.81
3	1.969681	0.541	27.56
4	2.944838	0.355	18.08
5	3.970746	0.064	3.26
6	4.886585	-0.135	-6.88
7	5.924292	-0.308	-15.69
8	6.963536	-0.312	-15.89
9	7.978645	0.186	9.47
10	8.973648	0.106	5.40
11	9.997550	0.368	18.74

Espectro	Fecha t (días)	λ1 (Å)	λ2 (Å)
1	0	5890,411	5896,366
2	0.974505	5890,496	5896,511
3	1.969681	5890,491	5896,446
4	2.944838	5890,305	5896,274
5	3.970746	5890,014	5896,029
6	4.886585	5889,815	5895,800
7	5.924292	5889,642	5895,597
8	6.963536	5889,638	5895,621
9	7.978645	5889,764	5895,793
10	8.973648	5890,056	5896,042
11	9.997550	5890,318	5896,303

Nota: Interpolando podemos mejorar la precisión.

4º PASO: CALCULAR LA VELOCIDAD RADIAL DE LA ESTRELLA CON EL DESPLAZAMIENTO DOPPLER

$$\Delta\lambda / \lambda = v_{rad}/c$$

$\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_{Nai}$; i = 1 o 2, λ_{Nai} es la longitud onda en el laboratorio y λi la longitud de onda del sodio medida en el espectro de la estrella que se desplaza.

V_{rad}= velocidad de proyección de la estrella en la línea de visión; incluye la velocidad en el baricentro + movimiento de la estrella alrededor del baricentro del sistema.

C= velocidad de la luz

Usando Na D1 (λ_1):

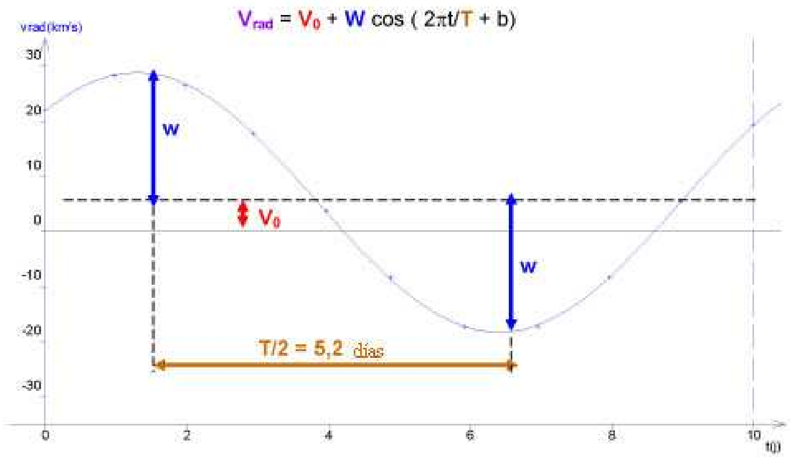
Se puede hacer lo mismo con Na D2; si operamos bien, se observarán algunas diferencias entre los resultados de las dos líneas; por ello, se puede mejorar la precisión usando ambas líneas y obteniendo la media.

Precisión: con una línea 4,2%
Con dos líneas 2%

El error de las medidas será menor cuantas más líneas se utilicen. Esto es útil para medir pequeñas velocidades, tales como las variaciones en la velocidad radial de las estrellas causada por exoplanetas.

5º paso: Velocidad radial de la estrella, como una función de fecha

Con una hoja de cálculo, Regressi (existe una versión gratis en la web), Excel…, proponemos un modelo para $v=V_E=f(t)$. Representar la V_{rad} en la función de la fecha
Con Regressi por ejemplo, introduce variables t (día) y $v=V_E$ (km/s)
Probamos: $V_{observado} = V_{rad} = V_0 + W^* \cos(2^*\pi^*t/T)+b)$
OK
Pulsa entonces Adjust (ajustar), y anota que T=10.34 días.



Con nuestro modelo, obtenemos que:

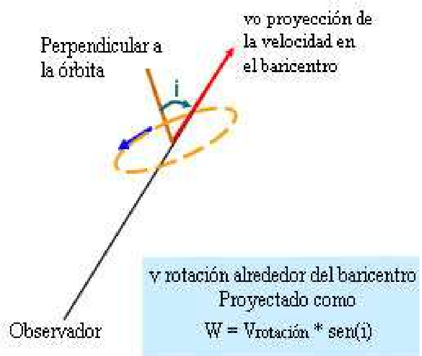
V_0 =5.9 km/s

W=23.2 km/s

Precisión: 4.4%

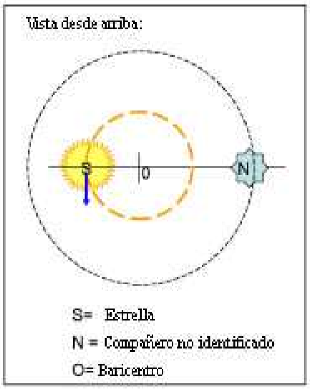
Debido a que la órbita puede estar inclinada con un ángulo "i" con respecto a la dirección de visión, W es el límite más bajo de la velocidad de rotación de la estrella: V= W/sen i

Procederemos con sen(i)=i



6º paso: Determinar la m de la compañera en el sistema binario

Masa de la Tierra, planeta telúrico:
$M_T = 6.10^{24}$ kg
Masa de Júpiter, planeta gigante:
$M_J = 2.10^{27}$ kg
Masa del Sol:
$M_{Sol} = 2{,}0.10^{30}$ kg



Suponemos órbitas circulares y aplicamos la ley de Kepler

T es el periodo
La masa visible de la estrella S es MLa masa de la estrella compañera es m
Llamamos O al baricentro del sistema binario
Queremos calcular la masa m de la estrella compañera

- **Ley de Kepler :** $\mathbf{T^2/(SN)^3 = 4\,p^2/[G\,(M_S + m_N)]}$
- **Baricentro:** $\mathbf{SN = [(M_S + m_N)\,/m_N]OS}$
- **Órbita circular :** $\mathbf{V_{Star} = 2\,p\,OS/T = W\ /\ \sin(i)}$

De ahi que :	$\mathbf{2p\,G\,m_N^{\ 3} = v_{star}^{\ 3}\,T\,(m_N + M_S)^2}$

También se puede escribir: $r[(W.T/2\pi sen\ i)+ r]^2 = G\ M\ T^2 / 4\pi^2$

Datos: $G = 6.67.10^{-11}$ uSI; sen i = 1
$W = 23.1$ km/s ; $T=10.34$ días $\approx 9.0.10^5$ s
$M = 1.05\ M_{solar} = 1{,}05.2{,}0.10^{30} = 2.1.10^{30}$kg

Cálculo con calculadora [sen(i)= 1, y órbita circular], obtenemos

$$\mathbf{M_N = 0.275\ M_{Estrella} = 5{,}8\ .\ 10^{29}\ kg}$$

$R=OE= 3{,}31.10^9$ m $r = ON = 0.275\ R = 1{,}2.10^{10}$,

La compañera es una estrella enana que emite luz casi invisible ¡☺¡

Nota al pie: Si tomamos Sen i= T, el valor R está infravalorado. Si el seno de i es menor, R aumenta, r decrece, por lo que m aumenta. Por tanto, sen i = 1 da un límite menor en m.

7º paso: Descubrir un exoplaneta con el desplazamiento doppler de una estrella

Datos:

- Masa de la Tierra, planeta telúrico: $M_T = 6\ .10^{24}$ kg
- Masa de Júpiter, planeta gigante: $M_J = 2\ .10^{27}$ kg

- Masa del Sol : $M_{Sol} = 2{,}0.10^{30}$ kg

- Masa de una planeta telúrico = $M_{Sol}\ /10^{6}$
- Masa de una planeta gigante = M_{Sol} / 1000

- **Velocidad de un planeta telúrico = mm/s a dm/s**
- **Velocidad de un planeta gigante = m/s a 100 m/s**

- Periodos de rotación de la mayoría de los exoplanetas : 3 a 3000 días

Estimación:

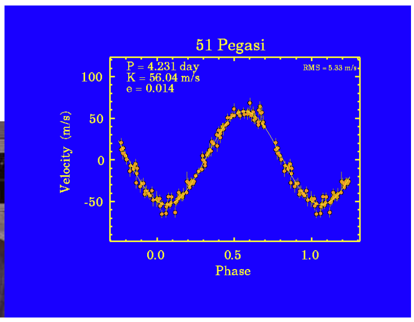
$$\boxed{2p\ G\ m_N^{\ 3} = v_{estrella}^{\ 3}\ T\ (m_N + M_S)^2}$$

En un exoplaneta, incluso en uno gigante, la masa m es bastante menor que la de masa de una estrella M; podemos entonces deducir:

$m = K.\ V\ .\ T^{1/3}.\ M^{2/3}$ con constante $K = (1/2\pi G)^{1/3}$

El exponente más elevado de arriba es 1 (V^{-1}), y sólo 1/3 para Y, 2/3 para M ; por ello, el factor principal es V.
Una velocidad 1000 veces menor induce una masa 1000 veces más pequeña, por lo que un periodo 1000 más corto, induce una masa m 10 veces menor.

Descubrimiento del primer exoplaneta (Mayor, Queloz et al., 1995)



Masa de la estrella M = Msol = $2{,}0.10^{30}$ kg
Velocidad de rotación de 51 Pegaso Estrella : V = 60 m/s
Periodo de la estrella 51 Pegaso Estrella : T = 4,2 días.
El compañero llamado 51 Pegasi B orbita la estrella:
$m_{compañero} = K.\ V\ .\ T^{1/3}.\ M_{Estrella}^{\ 2/3}$
con $K = (\ 1/\ 2\pi G\ )^{1/3}$

Obtenemos: $m_{compañero}=9{,}1.10^{26}$kg ,o sea, 0.45 $M_{Jupiter}$

Lo que contribuye a probar que 51-Pegasi B es un exoplaneta gigante

El método doppler para detectar exoplanetas necesitas miles de líneas del espectro de la estrella para alcanzar una precisión m/s: funciona con los exoplanetas gigantes.
Aún (2006) no podemos detectar un desplazamiento doppler debido a un exoplaneta telúrico: la velocidad radial es demasiado pequeña ¡¡¡