

Rotación estelar

R. Gamen

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP

2020a

Índice

- 1 Determinación de la rotación.
- 2 Comportamiento a lo largo de la secuencia espectral.
- 3 Velocidad crítica

Aspecto de las líneas estelares

■ Causas intrínsecas (átomo):

- Ancho natural.
- Efecto Doppler (distribución de velocidad).
- Efecto Zeeman (campos magnéticos).
- Ensanchamiento colisional.
 - Efecto Stark (campos eléctricos).
 - Efecto Van Der Waals (partículas neutras).
- Estructura hiperfina.
- Estructura fina.

■ Causas extrínsecas:

- Turbulencias.
- Rotación estelar.
- Expansión de la atmósfera.

Rotación estelar:

TODAS LAS ESTRELLAS ROTAN.

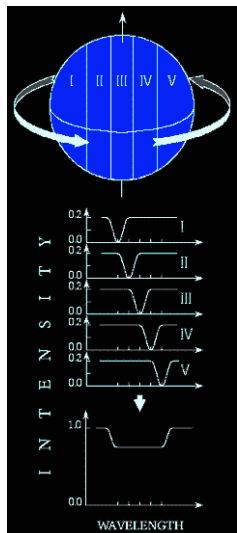
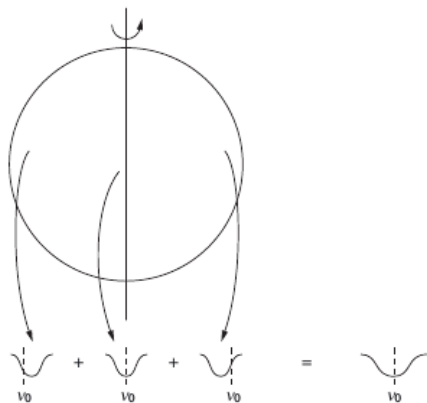
Todas las estrellas se forman a partir de una nube de gas y polvo que colapsa bajo su propia gravedad.

Este material tiene turbulencias a escalas tales que cuando se comienza a formar un “grumo”, este tiene un momento angular distinto de cero.

Mientras la nube colapsa, se conserva este momento angular.

A menor tamaño de la nube, mayor es la velocidad de rotación (“patinador sobre hielo”).

Rotación estelar:



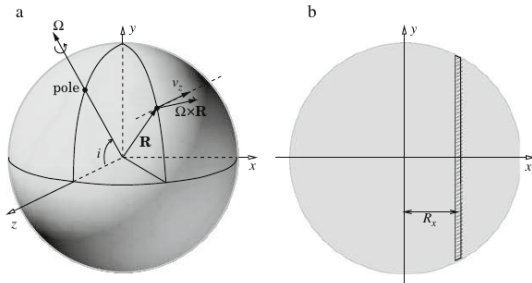
Rotación estelar:

La componente de la rotación en la dirección al observador depende de “ x ”:

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}. \quad (1)$$

As $\boldsymbol{\Omega}$ lies in the y - z plane, its coordinates can be written as $(0, \Omega_y, \Omega_z)$. Let (R_x, R_y, R_z) be the coordinates of the radius vector \mathbf{R} . The Doppler shift is due to the component of the velocity along the line of sight, i.e., the z -axis, namely v_z , and

$$v_z = -R_x \Omega \sin i. \quad (2)$$



Rotación estelar:

La línea espectral resultante será la sumatoria de las contribuciones de cada “banda” (con un dado corrimiento Doppler).

Matemáticamente:

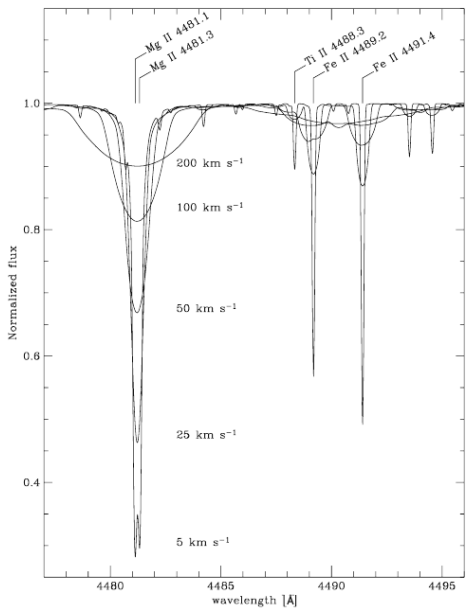
$$\alpha(\nu) = \int_{-VR_1}^{VR_2} \alpha_{\text{Lorentz}}\left(\nu - \nu \frac{V}{c}\right) f(V) dV \quad (1)$$

donde,

$$f(V) dV = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} e^{-\frac{mV^2}{2kT}} dV \quad (2)$$

Con algunas simplificaciones queda una función llamada de Voigt:

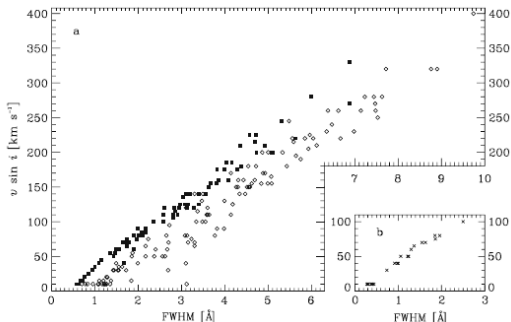
$$H(a, \nu) = \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{e^{-y^2}}{(\nu - y)^2 + a^2} \right] dy \quad (3)$$



Determinación de la rotación:

Técnicas **espectroscópicas** para determinar la rotación:

Calibración a partir del FWHM: Se miden los FWHM de líneas espectrales de estrellas estándares (Slettebak et al, 1975, ApJS, 29, 137). Entre O9–F9 (He I $\lambda 4471$, Mg II $\lambda 4481$, y Fe I $\lambda 4476$).



Determinación de la rotación:

Técnicas **espectroscópicas** para determinar la rotación:

Correlación: Se correlaciona el espectro a medir con un espectro “patrón” de baja rotación. El ancho de la función de correlación se relaciona con la rotación.

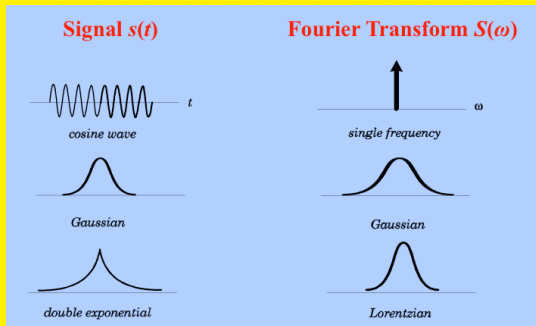
Síntesis espectral: Se calculan modelos teóricos (espectros sintéticos) para una gran número de combinaciones de diferentes parámetros, incluyendo la rotación. Similar a su uso en “abundancias”.

Transformada de Fourier: Se calcula la transformada (discreta) de Fourier del perfil de la línea. Las raíces de la transformada se relacionan con la velocidad de rotación (Simón-Díaz & Herrero, 2007, A&A, 468, 1063).

Transformada de Fourier:

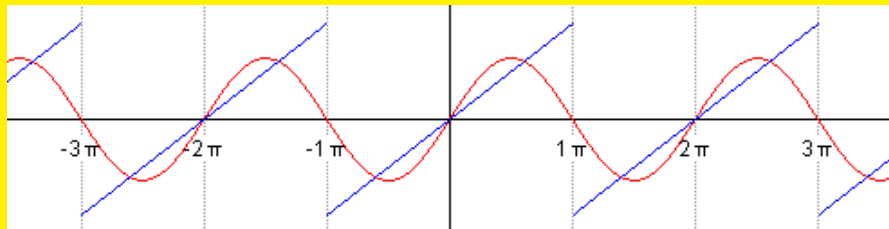
$$h(f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\lambda) e^{i2\pi\lambda f} d\lambda \quad (4)$$

Me da “cuenta” de las frecuencias “presentes” en una dada señal.

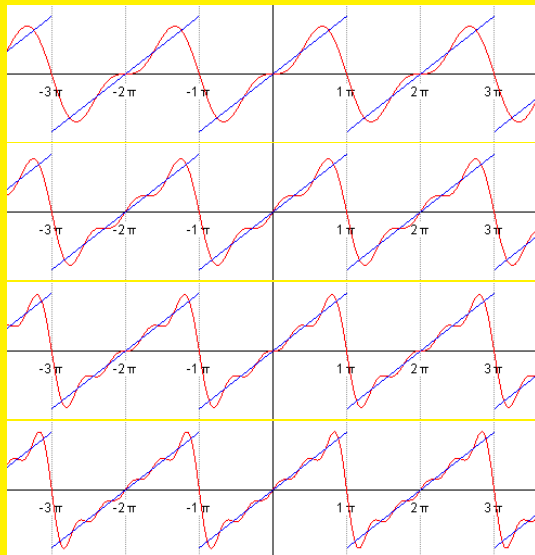


Transformada de Fourier:

Una señal puede ser considerada como un polinomio de funciones sinusoidales.



Transformada de Fourier:



Transformada de Fourier:

Las diferencias de “formas” del perfil pueden ser difíciles de detectar, pero en el dominio de f se ven amplificadas!

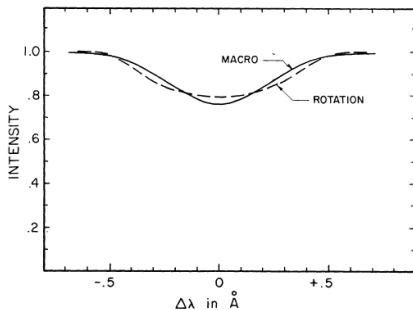
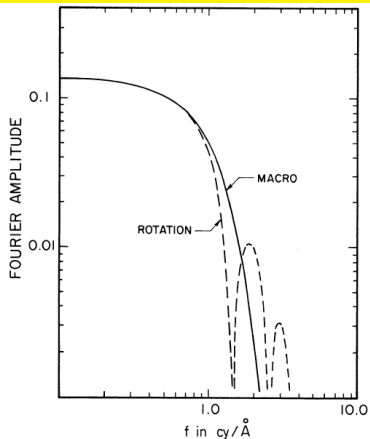


FIG. 1—The two theoretical line profiles are broadened by Gaussian macroturbulence having a dispersion of 15 km sec^{-1} (solid line) and rotation having $V \sin i$ of 22.5 km sec^{-1} (dashed line). The intrinsic profile is for a G star having a microturbulence of 2 km sec^{-1} . The transforms of these functions are shown in Figure 2.



Smith & Gray (1976, PASP, 88, 809).

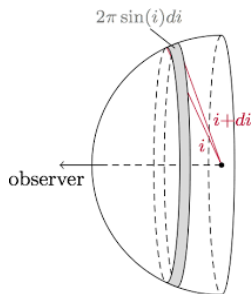
Cuando medimos “rotaciones” a partir de las líneas espectrales, estas medidas están acopladas a la inclinación i del eje de rotación.

Medimos $v \sin i$.

Aunque en algunos objetos podemos determinar i , en la mayoría, no. Podemos intentar algo estadísticamente. Suponemos que las i están distribuidas aleatoriamente (hay evidencias observacionales que esto es correcto).

Se puede **demostrar** que $\langle v \rangle = \frac{4}{\pi} \langle v \sin i \rangle$.

Probabilidad de tener una inclinación i



$$P(i) = \frac{2\pi \sin i di}{2\pi} \quad (5)$$

$$P(i) = \sin i di \quad (6)$$

$$\langle v \sin i \rangle = \int_0^{\pi/2} v \sin i P(i) di \quad (7)$$

$$\langle v \sin i \rangle = \int_0^{\pi/2} v \sin^2 i di \quad (8)$$

$$\langle v \sin i \rangle = \int_0^{\pi/2} v \left(\frac{1 - \cos 2i}{2} \right) di \quad (9)$$

$$\langle v \sin i \rangle = \langle v \rangle \left[\frac{i}{2} - \frac{\sin 2i}{4} \right]_0^{\pi/2} \quad (10)$$

$$\langle v \sin i \rangle = \frac{\pi}{4} \langle v \rangle \quad (11)$$

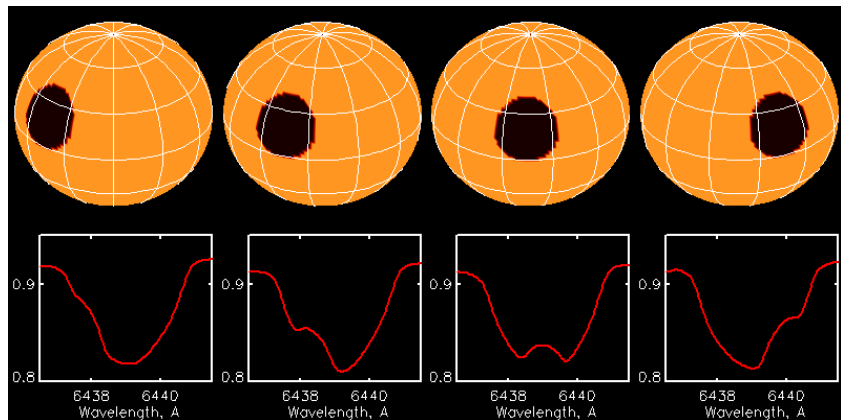
es decir:

$$\langle v \rangle = \frac{4}{\pi} \langle v \sin i \rangle \quad (12)$$

Determinación de la rotación:

Otras técnicas **espectroscópicas** para determinar la rotación:

Podemos medir rotaciones analizando cómo son afectadas las líneas espectrales por “inhomogeneidades” en la superficie estelar:



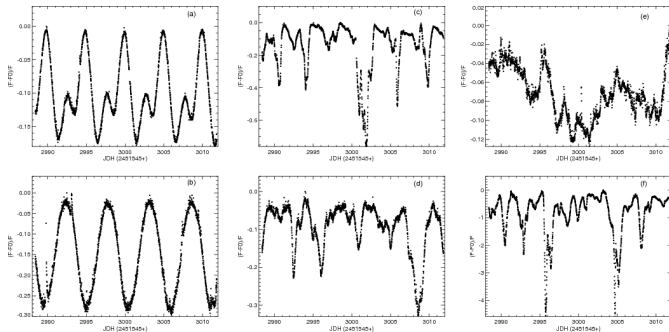
De esta forma medimos períodos rotacionales! (sin el $\sin i$).

Determinación de la rotación:

Podemos medir rotaciones analizando cómo son afectadas las líneas espectrales por “inhomogeneidades” en la superficie estelar:

Determinación de la rotación:

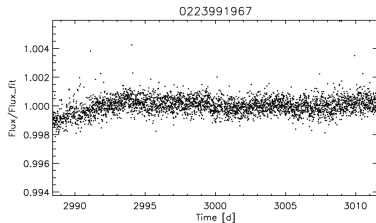
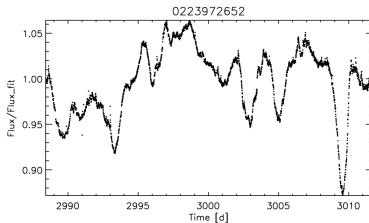
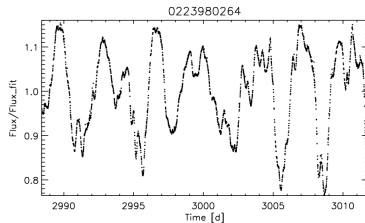
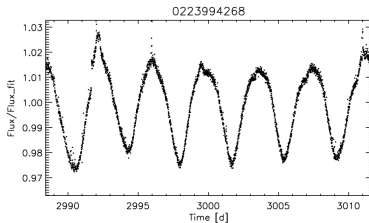
El mismo fenómeno se puede detectar fotométricamente! (más barato). Estas determinaciones no dependen de i . Se obtienen los P rotacionales. La distribución de los *starspots* (=manchas) producen un gran zoo de curvas de luz.



Confusión con tránsitos planetarios. Rotación diferencial ...

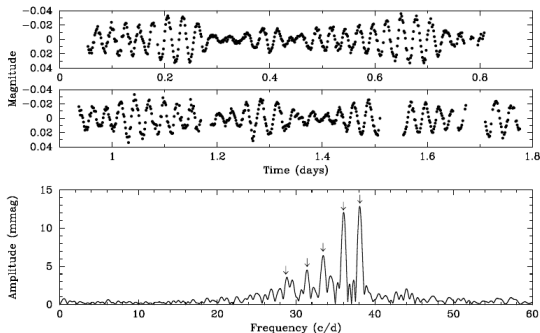
Determinación de la rotación:

Revolución! principalmente con *CoRot* (CONvection ROTation and planetary Transits), Kepler y ahora *TESS* (Transiting Exoplanet Survey Satellite).



Determinación de la rotación:

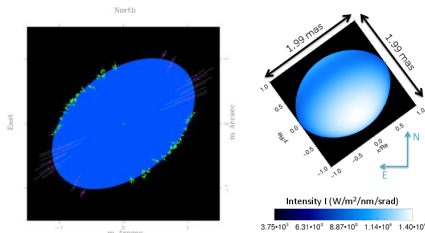
Las pulsaciones se manifiestan como variabilidad fotométrica, el estudio de las frecuencias presentes en dichas variaciones es la técnica que se llama astrosismología.



El espectro de oscilaciones de una estrella está relacionado con la rotación. **La rotación modifica los modos** en que una estrella puede pulsar (radial y noradial).

Determinación de la rotación:

La rotación deforma a las estrellas (radios ecuatoriales mayores a los polares). Interferometría!



Domiciano de Souza et al (2008, A&A, 407, 47) obtienen una relación de 1.56 ± 0.05 entre los ejes de la estrella Be Achernar (α Eridani). Utilizan VLT-VINCI.

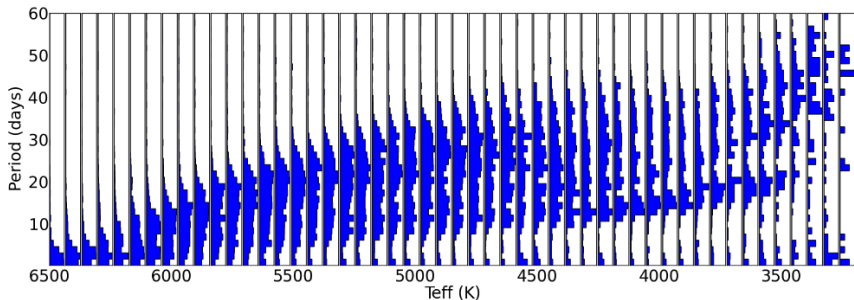
En 2014 (A&A, 569, A10) vuelven a medirlo esta vez con VLT (PIONIER y AMBER) y obtienen 1.352 ($6.78 R_{\odot} / 9.16 R_{\odot}$). La rotación es casi 300 km s^{-1} !

Determinación de la rotación:

Technique	Spectroscopy	Photometry	Interferometry	Sismology
Quantity	Vsini , $dV/d\theta$	Prot , $dProt/d\theta$	V_{eq} , inc, P.A. , ($dV/d\theta$)	Prot, $\Omega(r)$, (inc)
Accuracy	~10%	~0.1-10%	~10-30%(?)	?
Application	All stars	Spotted stars	Bright nearby stars	Bright stars
Limitations	Spectral resolution	Light curve duration and sampling	Fast rotators	Long-term continuous light curves
Instruments (e.g.)	ESO/HARPS, VLT/Flames	CCD mosaics; CoRot, Kepler	ESO/VLTI; GSU/Chara	CoRot, Kepler
Only 1 star has it all (V_{eq} , Prot, inc, P.A., $dP/d\theta$, $\Omega(r)$) : the Sun				

Determinaciones varias:

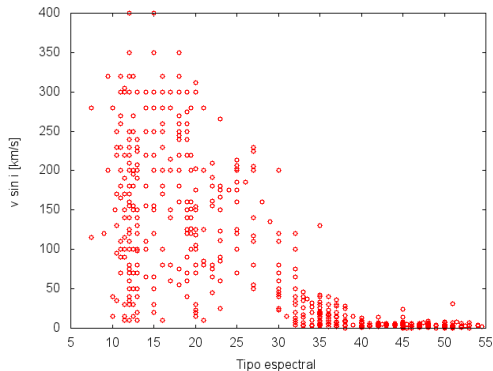
Mc Quillan et al (2014, ApJS, 211, 24) determinan P para 34 030 estrellas de secuencia principal.



Interacción con discos en estrellas de baja masa ...

Determinaciones varias:

Utilizando el catálogo de velocidades de rotación estelares (Glebocki & Gnacinski, 2005).



Cuán rápidamente puede rotar una estrella?

Velocidad crítica

Suponemos la estrella como un rotador rígido. Definimos la velocidad crítica como aquella donde la fuerza centrífuga iguala a la atracción gravitatoria:

$$F_g = G \frac{m m_*}{R_*^2} \quad (13)$$

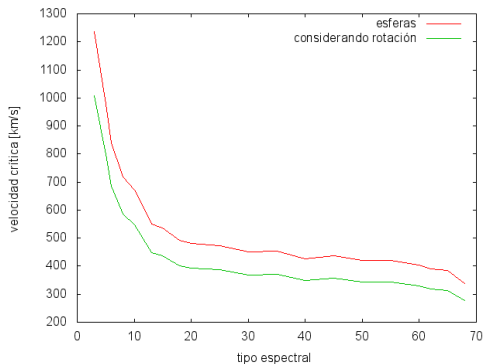
$$F_c = m \frac{V_c^2}{R_*} \quad (14)$$

$$\frac{V_c^2}{R_*} = G \frac{m_*}{R_*^2} \rightarrow V_c = \sqrt{\frac{G m_*}{R_*}} \quad (15)$$

Velocidad crítica

Considerando que cuando la estrella rota se deforma ... qué radio ponemos?:

$$V_c = \sqrt{\frac{2 G m_*}{3 R_*}} \quad (16)$$



La velocidad de rotación más alta jamás medida:

Una estrella tipo O en la LMC (Dufton et al, 2011).

THE VLT-FLAMES TARANTULA SURVEY: THE FASTEST ROTATING O-TYPE STAR AND SHORTEST PERIOD LMC PULSAR – REMNANTS OF A SUPERNOVA DISRUPTED BINARY?

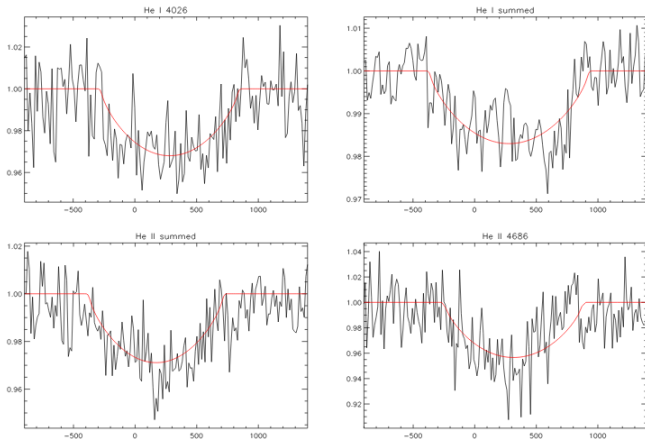
P.L. DUFTON¹, P.R. DUNSTALL¹, C.J. EVANS², I. BROTT³, M. CANTIELLO^{4,5}, A. DE KOTER⁶ S.E. DE MINK^{7*}, M. FRASER¹, V. HÉNAULT-BRUNET⁸, I.D. HOWARTH⁹, N. LANGER⁴, D.J. LENNON¹⁰, N. MARKOVA¹¹, H. SANA⁶, W.D. TAYLOR⁸

ABSTRACT

We present a spectroscopic analysis of an extremely rapidly rotating late O-type star, VFOTS102, observed during a spectroscopic survey of 30 Doradus. VFOTS102 has a projected rotational velocity larger than 500 km s^{-1} and probably as large as 600 km s^{-1} ; as such it would appear to be the most rapidly rotating massive star currently identified. Its radial velocity differs by 40 km s^{-1} from the mean for 30 Doradus, suggesting that it is a runaway. VFOTS102 lies 12 pcs from the X-ray pulsar PSR J0537-6910 in the tail of its X-ray diffuse emission. We suggest that these objects originated from a binary system with the rotational and radial velocities of VFOTS102 resulting from mass transfer from the progenitor of PSR J0537-691 and the supernova explosion respectively.

La velocidad de rotación más alta jamás medida:

Una estrella tipo O en la LMC (Dufton et al, 2011). La S/N es bastante pobre.



Sin embargo, hay otras estrellas que rotan aún más rápidamente: los púlsares de milisegundo. Dan una vuelta cada 0.001 s.

Si consideramos que sus radios son de unos pocos kilómetros, en su superficie, los neutrones ecuatoriales se mueven a velocidades cuasi relativistas ($P = 0.0014$ s y $R = 20$ km resulta en $V_{eq} \sim 90\,000 \text{ km s}^{-1} = 0.3 c$).

La deformación de la estrella por la rotación estelar introduce muchos otros elementos de investigación:

En sistemas binarios esta deformación hace que se deban introducir más términos (perturbadores) en la ecuaciones de la atracción gravitatoria. Fuerzas de mareas ...

No es lo mismo ver una estrella de polo que ecuatorialmente. Parámetros estelares pueden variar (T_{ef} , g) ...

La rotación estelar no solo afecta la forma de la estrella, tiene consecuencias sobre muchas otras cosas:

Pérdida de masa – discos circumestelares – estrellas Be ...

La rotación estelar no solo afecta la forma de la estrella, tiene consecuencias sobre muchas otras cosas:

Evolución estelar – la rotación no es constante durante la evolución –
 Mezcla de elementos: subida a la superficie de algunos ... bajada de otros

