

Вращение звезд

Вращение Солнца

Johannes Fabricius
(1587-1617)



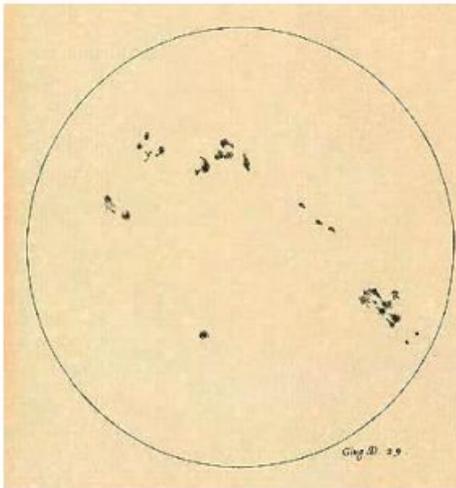
Christoph Scheiner
(1575-1650)



Galileo Galilei
(1564-1642)



1611 Фабрициус обнаружил движение пятен на солнце в течение двух недель. Шнейдер предположил, что это объясняется наличием планет. Началась долгая война «пятна-планеты»



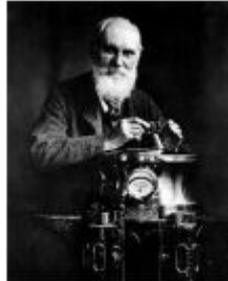
1612 Галилей подтвердил идею Фабрициуса

Солнце вращается дифференциально!

Scheiner
(1575-1650)



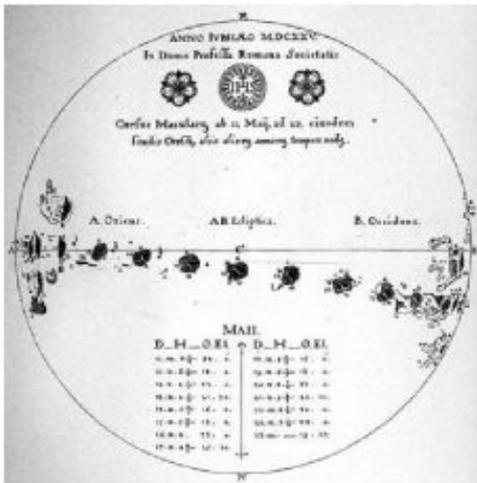
Carrington
(1826-1875)



Spörer
(1822-1895)



Faye
(1814-1902)



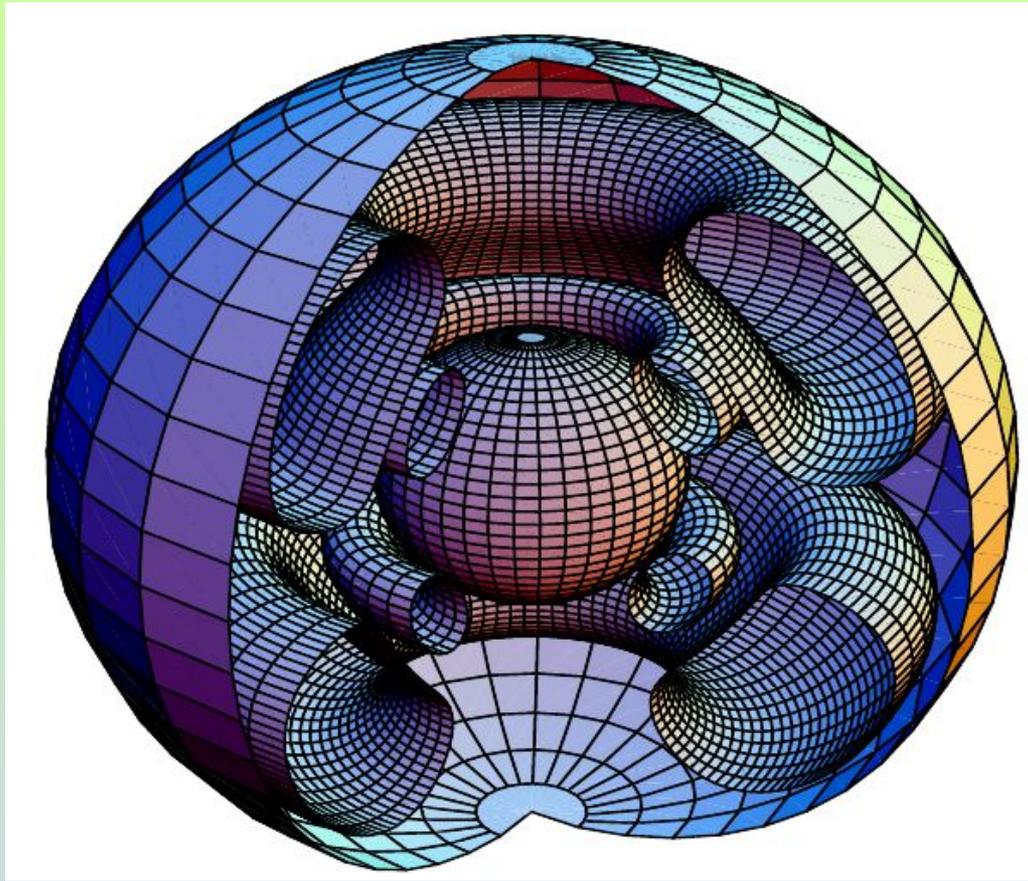
1630: Шейнер показал, что пятна около экватора вращаются быстрее

1850: Каррингтон, Шперер и Фей предложили закон вращения – зависимость угловой скорости от широты

$$\omega = 14^{\circ}37' - 3^{\circ}10' \sin^2 \varphi$$

Важность изучения вращения:

- - Перемешивание: вращение вызывает циркуляционные потоки и неустойчивость, которая перераспределяет тяжелые элементы и угловую инерцию в пределах звезды. В частности, круговорот и турбулентность, возможно, взаимодействуют, чтобы вынудить тяжелые элементы распространяться к поверхности. Это вызывает дополнительное перемешивание и турбулентность в звезде и вызывает обогащение атмосферы звезды и явление пекулярных звезд,



- Изменение равновесной конфигурации: угловая скорость вращения добавляется к центробежной силе, изменяя форму поверхности звезды и ее температуру по поверхности - повышение температуры на полюсах и понижение температуры на экваторе.

- Изменяет положение звезды на ДРГ.

Вращение изменяет
положение звезды на ДРГ

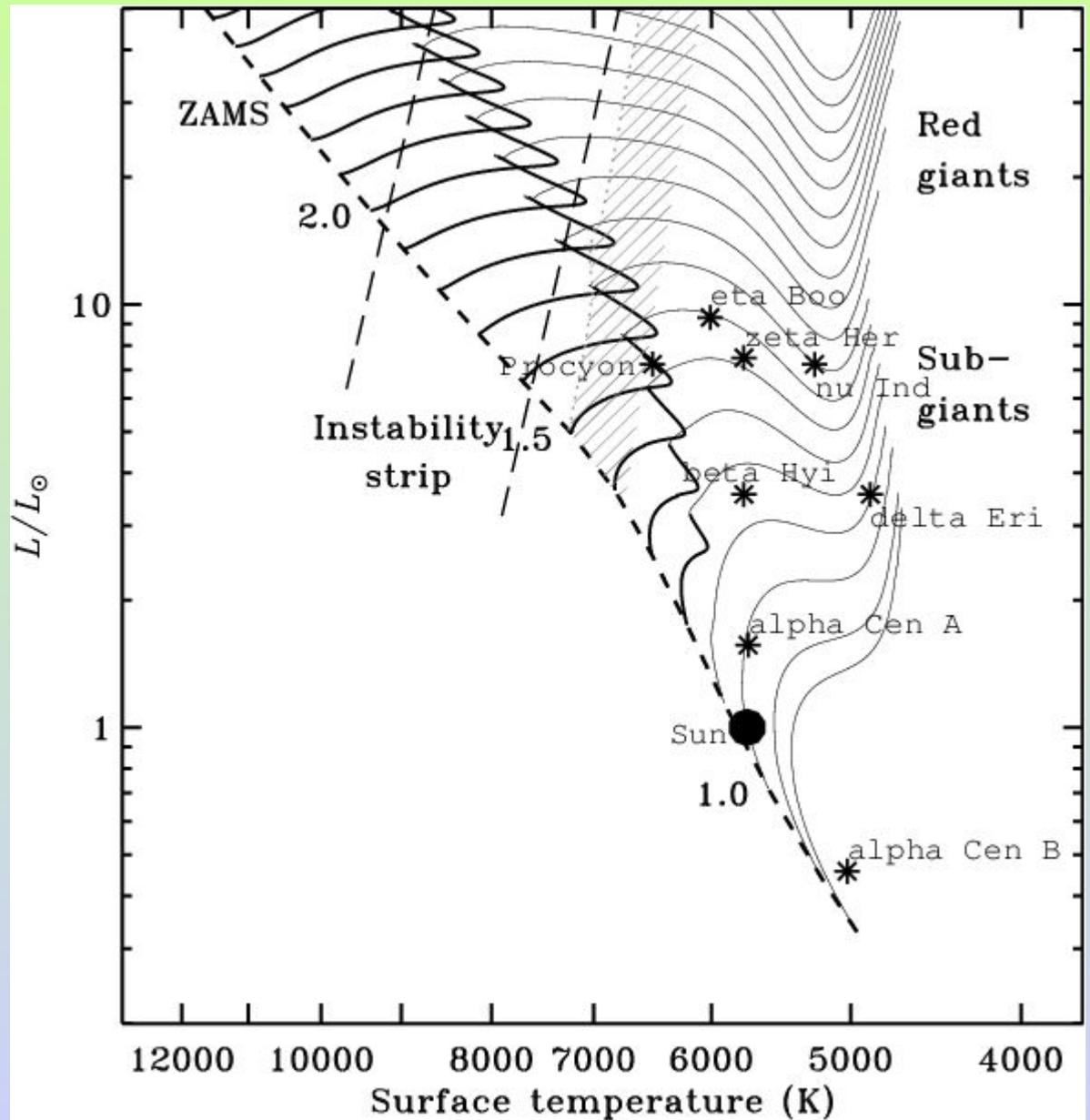


Table 1. Definitions of physical quantities related to stellar rotation.

Quantity	Symbol	Units	Solar value
Projected linear velocity	$v \sin i = V_{eq} \sin i$	km s^{-1}	$V_{eq,\odot} \simeq 1.9 \text{ km s}^{-1}$
Rotational period	$P_{rot} = \frac{2\pi R_*}{V_{eq}}$	days	$P_{eq,\odot} \simeq 26 \text{ d}$
Angular velocity	$\Omega_* = \frac{V_{eq}}{R_*} = \frac{2\pi}{P_{rot}}$	s^{-1}	$\Omega_\odot = 2.8 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$
Critical velocity	$V_{crit} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{GM_*}{R_*}}$	km s^{-1}	$V_{crit,\odot} \simeq 360 \text{ km s}^{-1}$
Latitudinal differential rotation	$\Omega(\theta) = \Omega_{eq} - \Delta\Omega \sin^2 \theta$	s^{-1}	$\Delta\Omega_\odot = 4.8 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
Moment of inertia	$I = \frac{8\pi}{3} \int_0^{R_*} r^4 \rho(r) dr$	g cm^2	$I_\odot = 6.4 \cdot 10^{53} \text{ g cm}^2$
Angular momentum	$J = \frac{8\pi}{3} \int_0^{R_*} r^4 \rho(r) \omega(r) dr$	$\text{g cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$J_\odot^\dagger = 1.8 \cdot 10^{48} \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Specific angular momentum	$j = (J/M)$	$\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$j_\odot = 9 \cdot 10^{14} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
	N.B. If $\omega(r) = \Omega_*$, $J = I\Omega_* = k^2 M_* R_*^2 \Omega_*$, where kR_* is the stellar radius of gyration [‡]		$k_{conv,\odot}^2 = 0.008$ $k_{rad,\odot}^2 = 0.061$

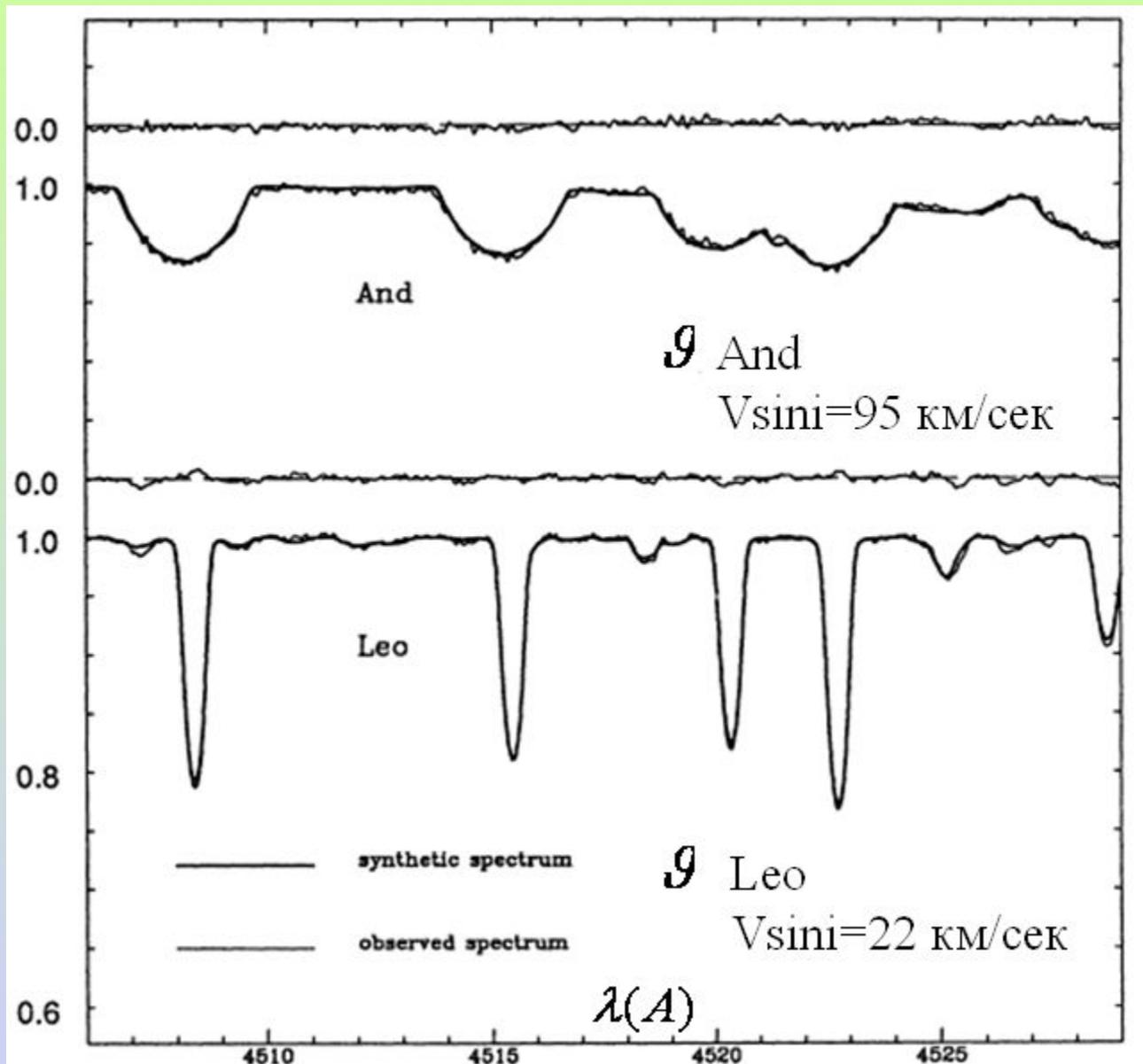
Используемые методы

Метод	Спектроскопия	Фотометрия	Интерферометрия	Сейсмология
Точность	10%	0.1%	10-30%	?
Применение	Все звезды	Звезды с пятнами	Яркие близкие звезды	Яркие звезды
Величины	$V \sin i, dV/d\phi$	$P_{rot}, dP_{rot}/d\phi$	$V_{eq}, (dV/d\phi), i$	$P_{rot}, \omega(r), i$
Ограничение	Спектральное разрешение	Длительность кривой блеска	Быстрые ротаторы	Долговременная кривая блеска (без перерывов)

Только для одной звезды (Солнца) мы имеем все параметры : $V_{eq}, P_{rot}, I, dP/d\theta, \omega$

Как узнать, что звезда вращается:

- вращение уширивает все линии в спектре,**
- уширение линий больше для длинноволновой области спектра,**
- если наблюдаются мультиплетные линии, то отношения их эквивалентных ширин будут всегда равны известным теоретическим отношениям для линий мультиплетов независимо от скорости вращения.**



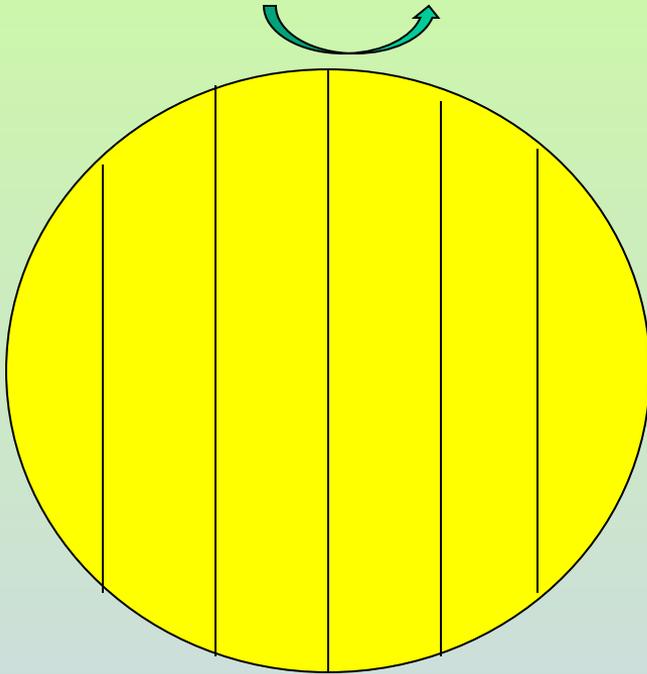
Первое приближение в теории:

- звезда сферически симметричная,
- потемнение диска к краю отсутствует,
- вращение твердотельное,
- исходный профиль линии (т.е. в отсутствии вращения) намного уже, чем профиль с вращением.

Второе приближение в теории:

- учет потемнения диска к краю,
- учет дифференциального вращения,
- учет изменения формы звезды (при быстром вращении,
- учет гравитационного потемнения диска,
- зависимость силы линии от широты и углового расстояния от лимба.

Вращение звезды



- Каждая полоса вращается со своей скоростью
- От каждой полосы исходит излучение, смещенное из-за вращения по частоте (эффект Доплера): правая половина диска дает красное смещение
- левая - синее смещение по частоте
- суммарное по всему диску излучение дает спектральную линию, уширенную как в синюю так и в красную стороны

$$\vec{V} = [\vec{\omega} \times \vec{r}]$$

$$\vec{\omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = \omega(0, \omega \sin i, \omega \cos i)$$

$$\vec{r}(x, y, z) = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ x & y & z \end{vmatrix} = \hat{i}V_x - \hat{j}V_y + \hat{k}V_z$$

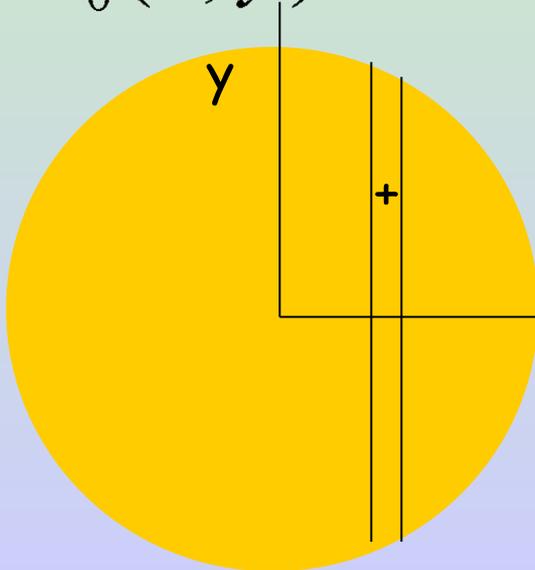
$$V_z = (y\omega_x - x\omega_y) = -x\omega \sin i = -x \frac{V}{R} \sin i$$

$$I(x, y, v - v_0 \pm v_0 \frac{xV}{cR} \sin i)$$

$$\bar{r} = \frac{\int_{-1}^1 dx \int_0^{\sqrt{1-x^2}} I\left(x, y, \nu - \nu_0 \pm \nu_0 \frac{xV}{c} \text{Sini}\right) dy}{\int_{-1}^1 dx \int_0^{\sqrt{1-x^2}} I_0(x, y) dy}$$

$I_0(x, y) \rightarrow$ ИНТЕНСИВНОСТЬ В КОНТИНУУМЕ

Каков профиль в спектре
невращающейся звезды r ?

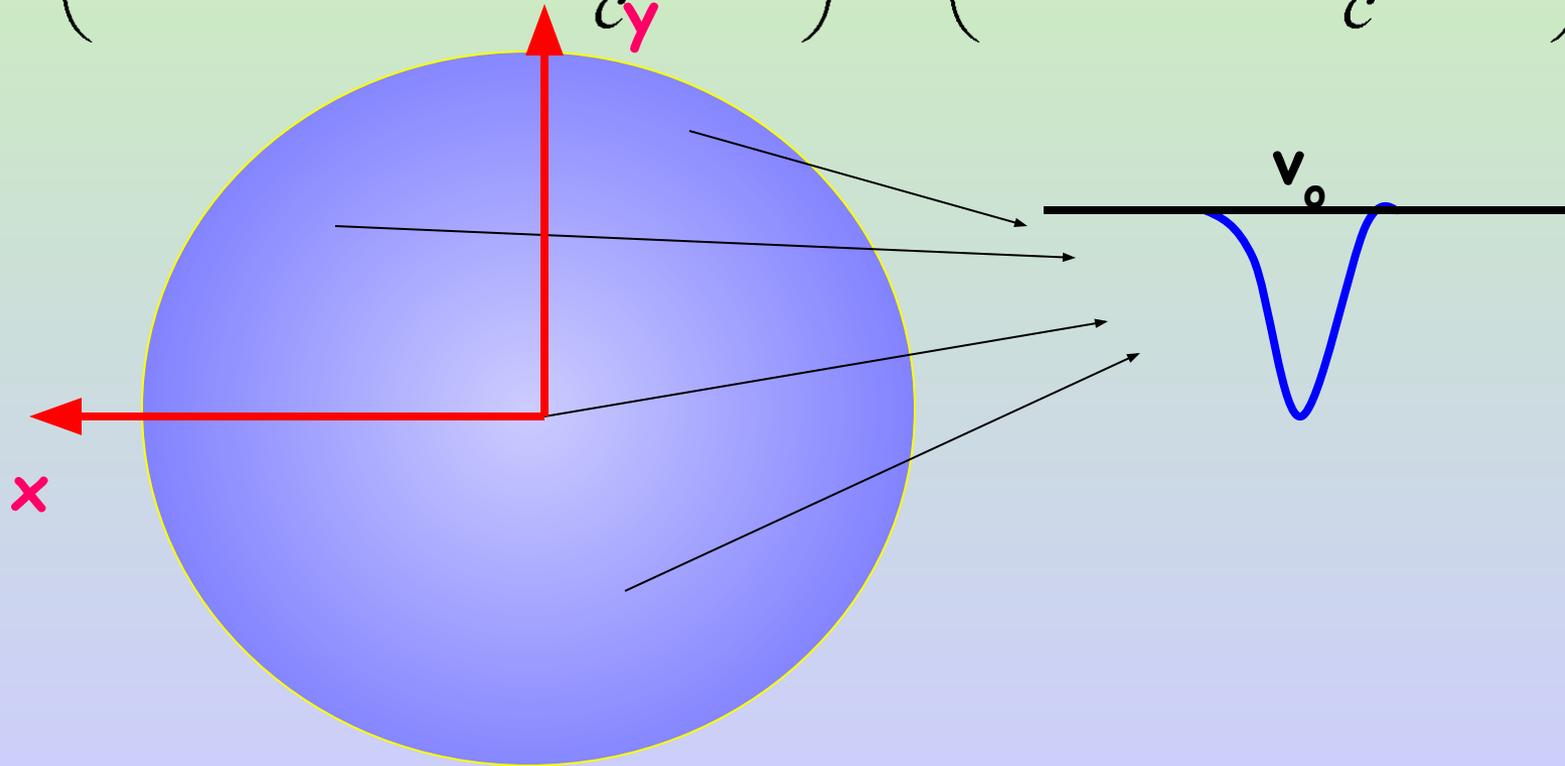


$$r(x, y, \nu - \nu_0) = \frac{I(x, y, \nu - \nu_0)}{I_0(x, y)}$$

Основное предположение метода: излучение в
линии в спектре не вращающейся звезды
одинаково для всех точек диска

$$I(x, y, \nu - \nu_0) = r(\nu - \nu_0) I_0(x, y)$$

$$I\left(x, y, \nu - \nu_0 \pm \nu_0 \frac{xV}{c} \operatorname{Sini}\right) = r\left(\nu - \nu_0 \pm \nu_0 \frac{xV}{c} \operatorname{Sini}\right) I_0(x, y)$$



$$\bar{r}(v - v_0) = \frac{\int_{-1}^1 dx \int_0^{\sqrt{1-x^2}} r\left(v - v_0 \pm v_0 \frac{xV}{c} \text{Sini}\right) I_0(x, y) dy}{\int_{-1}^1 dx \int_0^{\sqrt{1-x^2}} I_0(x, y) dy}$$

$$\bar{r}(v - v_0) = \int_{-1}^1 r\left(v - v_0 \pm v_0 \frac{V}{c} x \text{Sin } i\right) A(x) dx$$

$$A(x) = \frac{\int_0^{\sqrt{1-x^2}} I_0(x, y) dy}{\int_{-1}^1 dx \int_0^{\sqrt{1-x^2}} I_0(x, y) dy}$$

$$t = \frac{v - v_0}{v_0 \frac{V}{c} \text{Sini}} \Rightarrow \bar{r}(t) = \int_{-1}^1 r(t \pm x) A(x) dx$$

Законы потемнения:

$$I_0(x, y) = \text{const} (1 + \beta \text{Cos} \theta)$$

$$I_0(x, y) = \text{const} (1 - \beta' + \beta' \text{Cos} \theta)$$

$$I_0(x, y) = \text{const} (1 + a(1 - \text{Cos} \theta) - (1 - \text{Cos}^2 \theta))$$

$$I_0(x, y) = \text{const} (1 + c(1 - \text{Cos} \theta) - d(1 - \sqrt{\text{Cos} \theta}))$$

$$I_0(x, y) = \text{const} (1 - e(1 - \text{Cos} \theta) - g(1 - \text{Cos} \theta \ln \text{Cos} \theta))$$

$$A(x) = \frac{3}{3 + 2\beta} \left[\frac{2}{\pi} \sqrt{1 - x^2} + \frac{\beta}{2} (1 - x^2) \right]$$

$$\bar{r}(t) = \int_{-1}^1 r(t-x)A(x)dx \quad (1)$$

Как найти $r(t-x)$ - профиль линии в спектре невращающейся звезды ?

Первый метод:

- по каталогам ищем звезду с нулевой скоростью. Эта звезда должна иметь спектральный класс и класс светимости, близкие к исследуемой звезде,
- выбираем исследуемую линию в спектре этой звезды,
- определяем ее профиль и подставляем в (1).

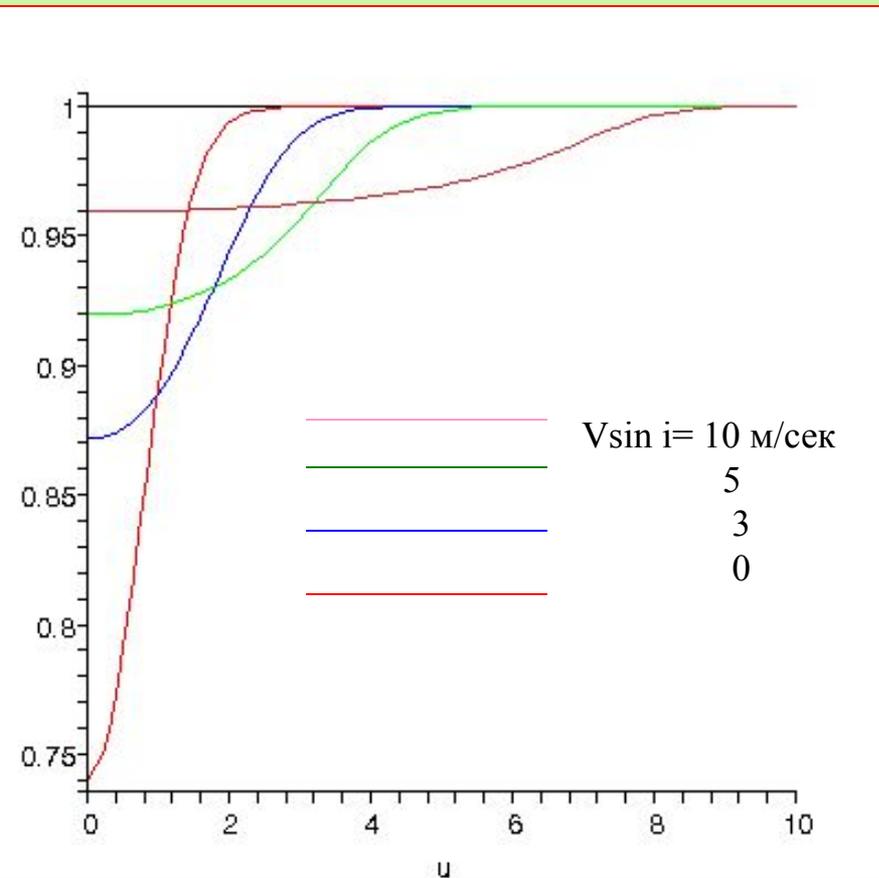
Второй метод:

- для звезды надо определить T_{eff} и $\log g$,
- по моделям рассчитать профиль линии.

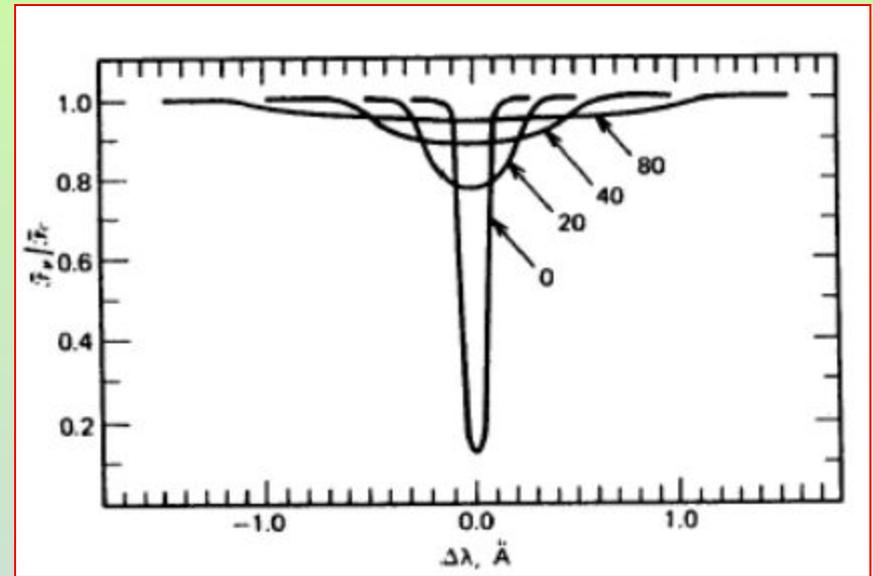
Рекомендации для пользователей:

- для O9-B8 звезд использовать линию HeI 4471A**
- для B8-F0 звезд использовать MgII 4481 A**
- для F0-F8 звезд использовать FeI 4476 A**

Профили при разных $V \sin i$



На рисунке показано изменение профиля слабой линии Fe I в зависимости от скорости вращения



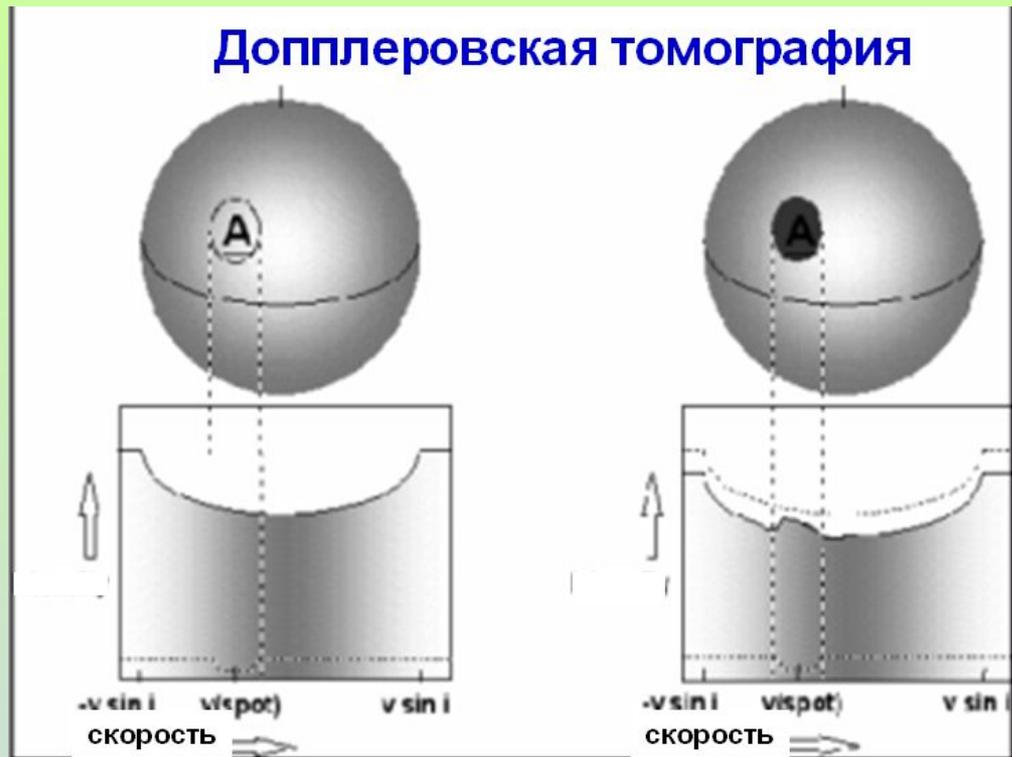
На рисунке показано изменение профиля сильной линии Fe I в зависимости от скорости вращения в км/сек

Схематическое изображение влияния звездных пятен на вид линии поглощения в спектре звезды.

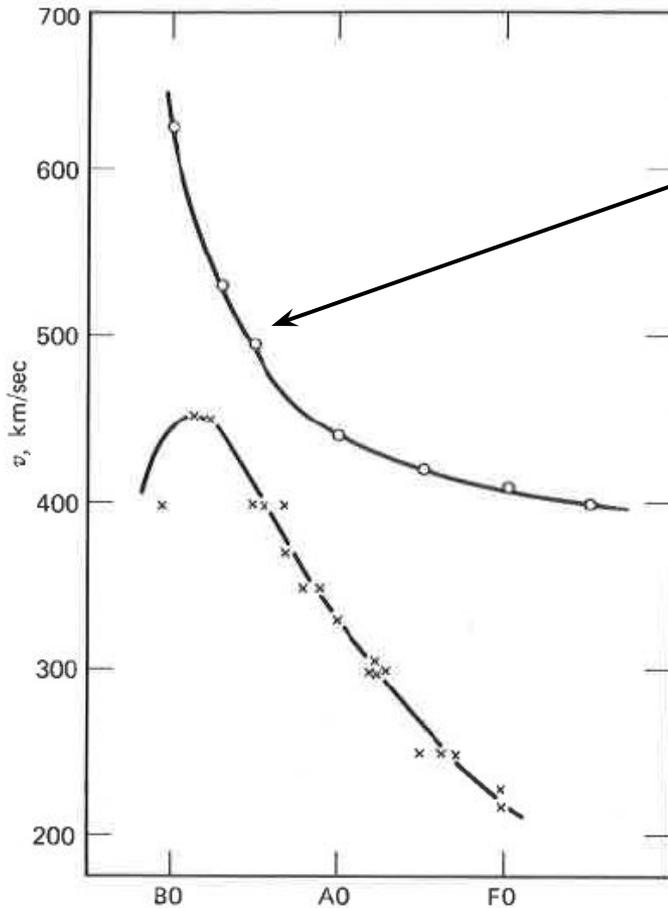
По горизонтали — длина волны (увеличивается слева направо) и соответствующая ей скорость движения пятна на поверхности, *по вертикали* — интенсивность света данной длины волны.

В излучении каждого участка поверхности имеется только узкая линия поглощения, сдвинутая на

длину волны, соответствующую $v \sin i$. Когда на этом участке появляется пятно, свет всех длин волн, приходящий с этого участка, ослабевает, но свет, который и так уже был ослаблен линией поглощения, ослабевает меньше. Таким образом, каждое пятно соответствует подъему на наблюдаемой зависимости интенсивности от длины волны, который появляется на коротковолновом краю линии и сдвигается в длинноволновый при вращении. Если пытаться описать линию ее обычным профилем, то, наоборот, будет казаться, что она вся сдвигается сначала в красную, а потом в синюю сторону.



Быстровращающиеся звезды



- **Критическая скорость**

$$V_{crit} = \sqrt{\frac{GM}{R}} = 437 \left(\frac{M / M_{sun}}{R / R_{sun}} \right)^{1/2} \text{ км сек}^{-1}$$

- **Самое близкое приближение теоретической кривой приходится на В-звезды. Это Ве-звезды**

Fig. 17.22. The fastest rotation rates are shown by the x's. The theoretical break-up velocities (top curve) approach the observed relation most closely in the B-star range. (Data from Slettebak (1966).)