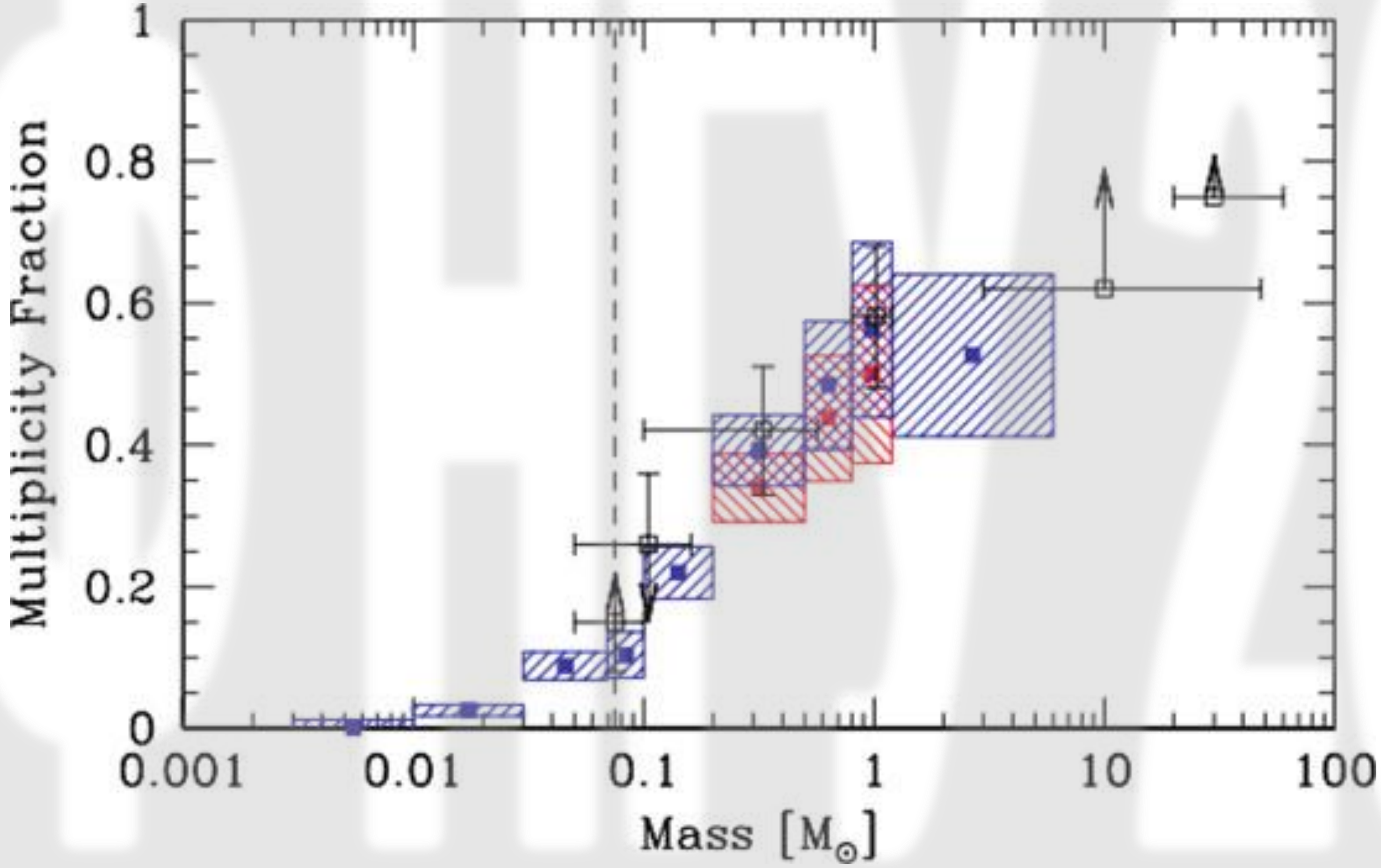
Лекция 8
Двойные звезды
ФФ НГУ, 2024

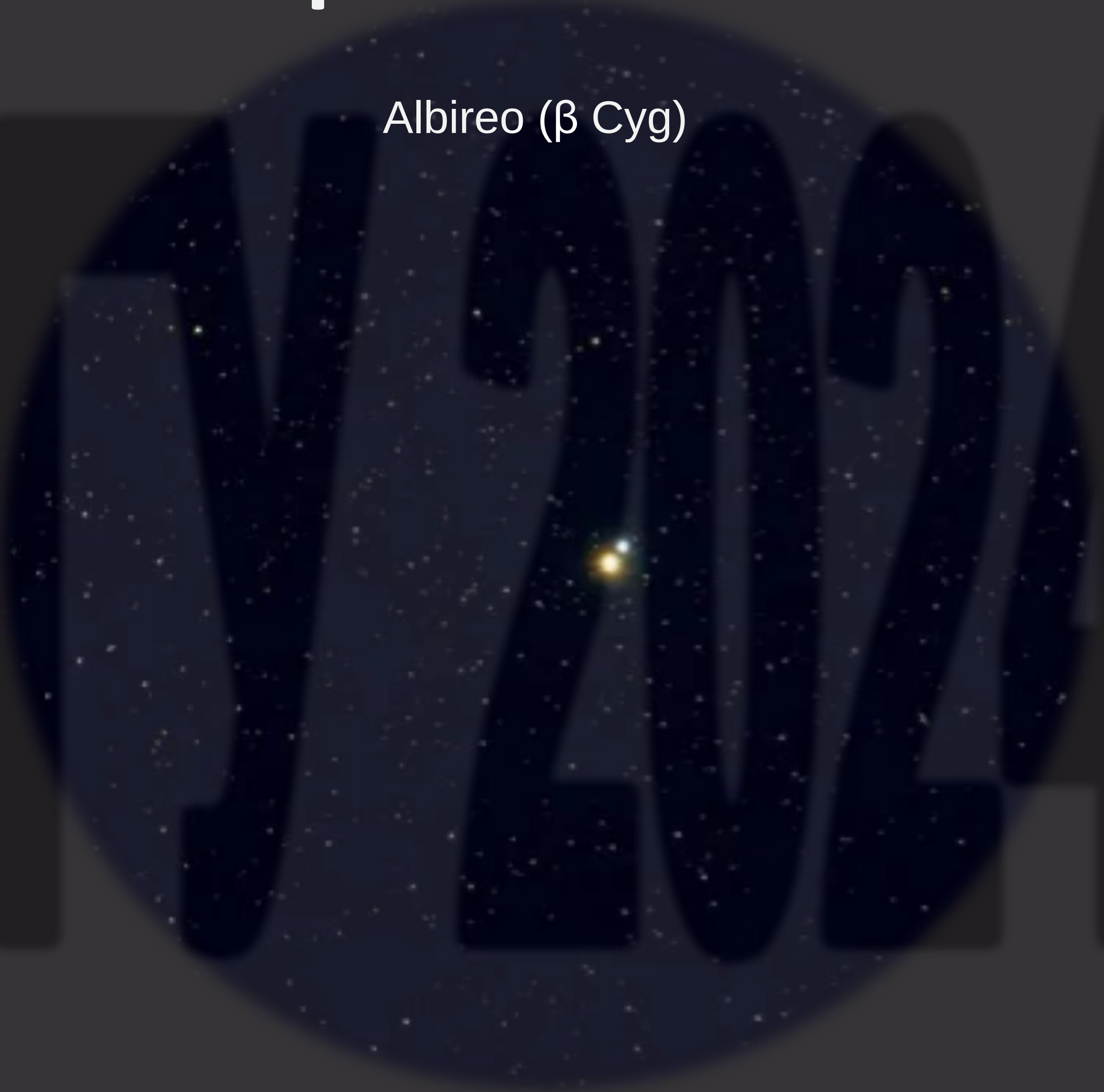
Доля кратных систем

Поскольку звезды, как правило, образуются в крупных ассоциациях, естественно ожидать, что доля кратных систем будет значительной.



Доля кратных звездных систем в зависимости от массы основной звезды: черные точки – результат наблюдений, красные и синие квадраты – численное моделирование. (Bate, 2009).

Красивые визуальные кратные системы


Albireo (β Cyg)

Чем интересны двойные звезды?

Особое значение для астрофизики имеют «тесные» двойные системы:

Период обращения достаточно мал, чтобы точно измерить за «разумное» время.

Сравнительно просто измерить орбитальную скорость (эффект Доплера).

Знание периода и скоростей позволяет получить информацию о массах отдельных звезд в системе.

В случае очень тесных систем между компонентами возможен обмен веществом, что приводит к большому разнообразию физических процессов в системе.

Всем этим условиям удовлетворяют двойные системы, относящиеся к затменным и/или спектроскопическим двойным.

Классификация двойных звезд

Исторически сложившаяся система классификации двойных звезд больше относится к методике их наблюдения, чем к физическому содержанию вопроса. Некоторые двойные системы могут относиться к более чем одному классу одновременно.

Оптически двойные (optical) – звезды не связаны физически, а просто находятся почти на одном луче зрения.

Визуально двойные (visual) – звезды образуют физически связанную систему и могут быть разрешены (видны по отдельности) в телескоп.

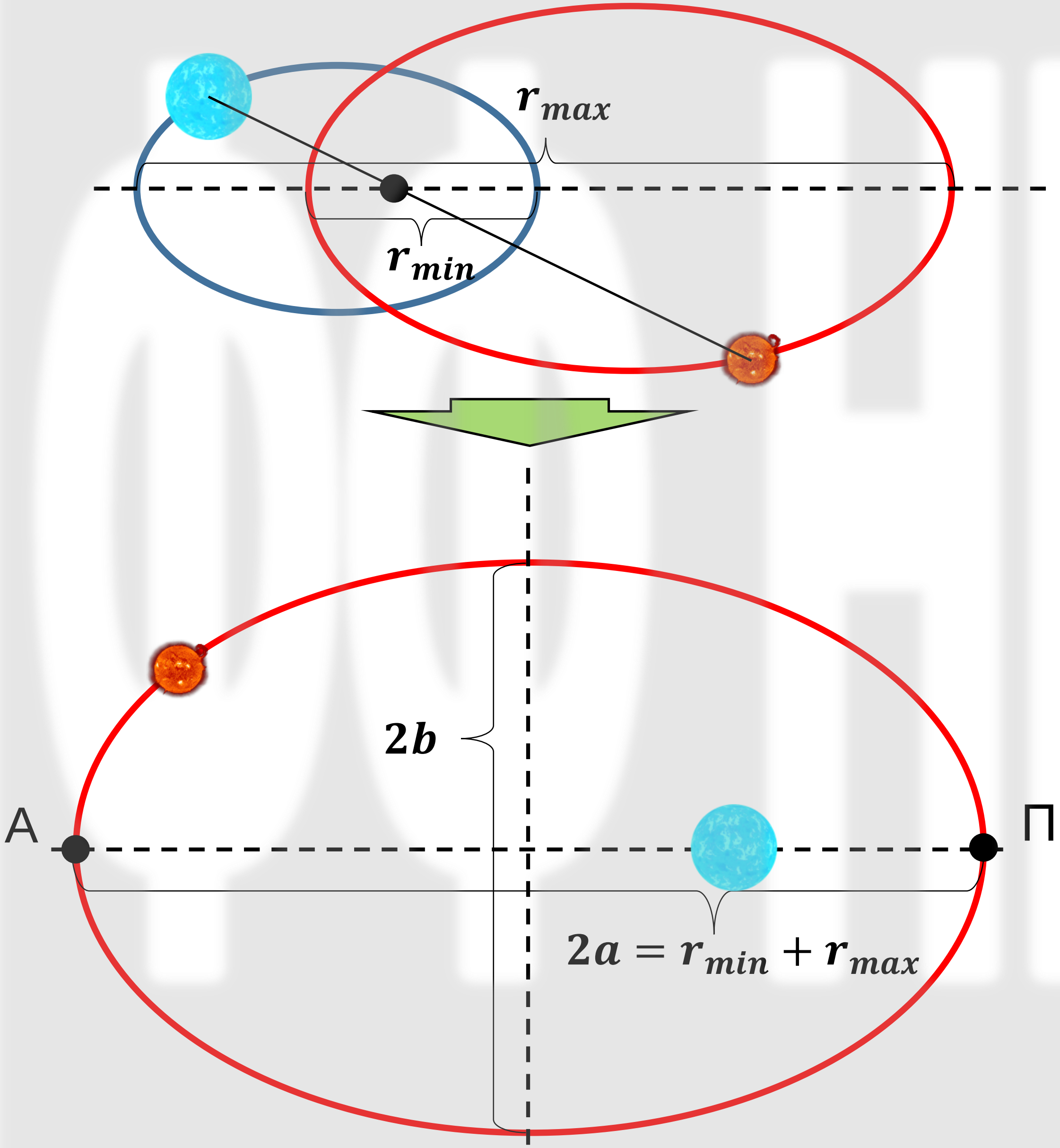
Астрометрические двойные (astrometric) – наличие второй (как правило, гораздо менее яркой) звезды оказывает периодическое влияние на видимое положение звезды.

Затменные двойные (eclipsing) – плоскость орбиты звезд образует малый угол с лучом зрения, в результате чего происходят периодические затмения одной из звезд.

Спектрально двойные (spectrometric) – в результате вращения вокруг общего центра масс происходят периодические смещения спектральных линий.

Некоторые классы имеют более детальное деление на подклассы.

Законы Кеплера



I) движение происходит по эллипсам, в одном из фокусов которых находится центр масс системы

III) Квадрат периода пропорционален кубу большой полуоси

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} a^3 \qquad e^2 = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2$$

А – апоастр

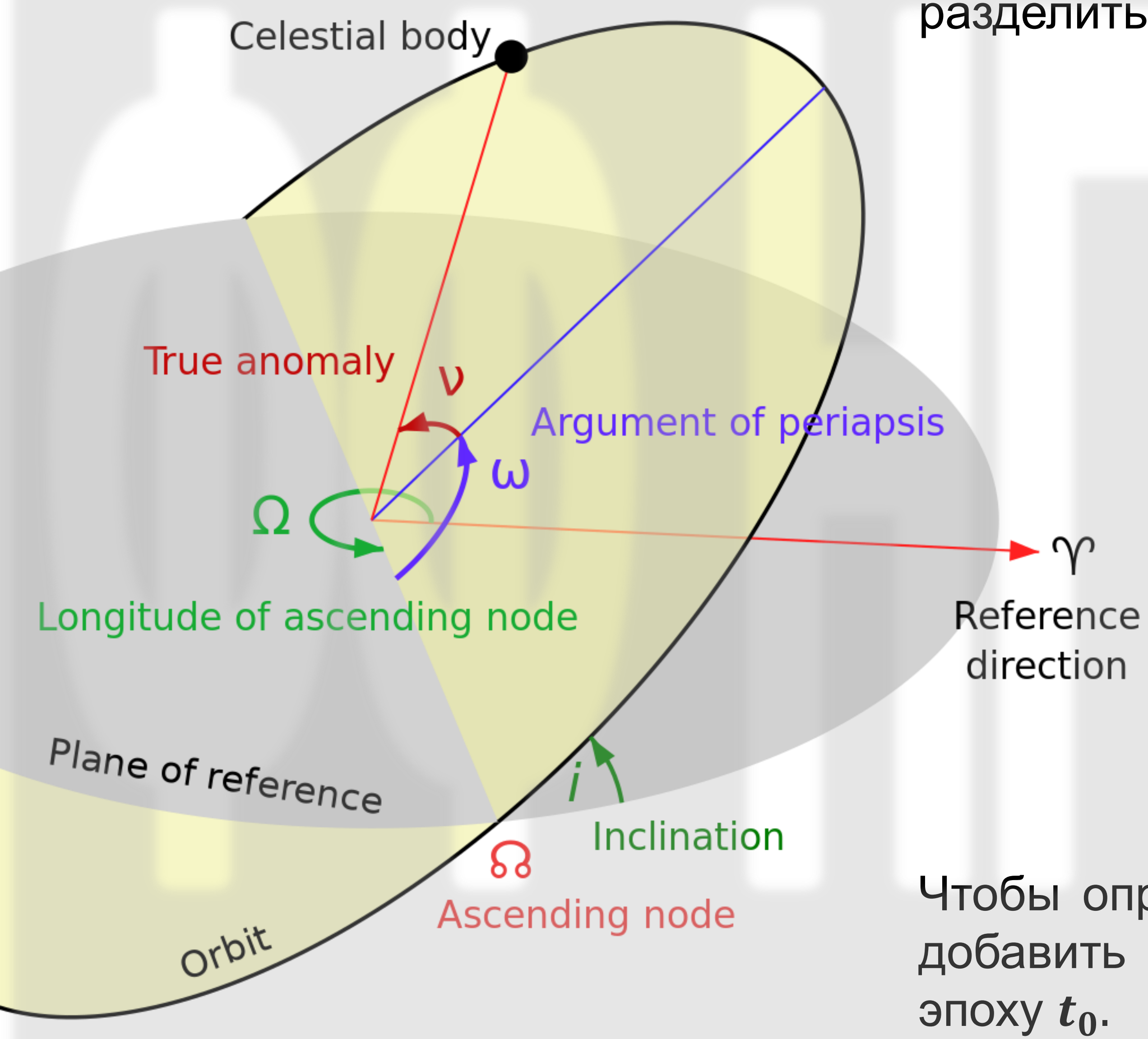
П – периастр

P – период

a, b – большая и малая полуоси

e – эксцентриситет

Элементы орбиты



Элементы относительной обиты двух массивных тел можно разделить на три группы:

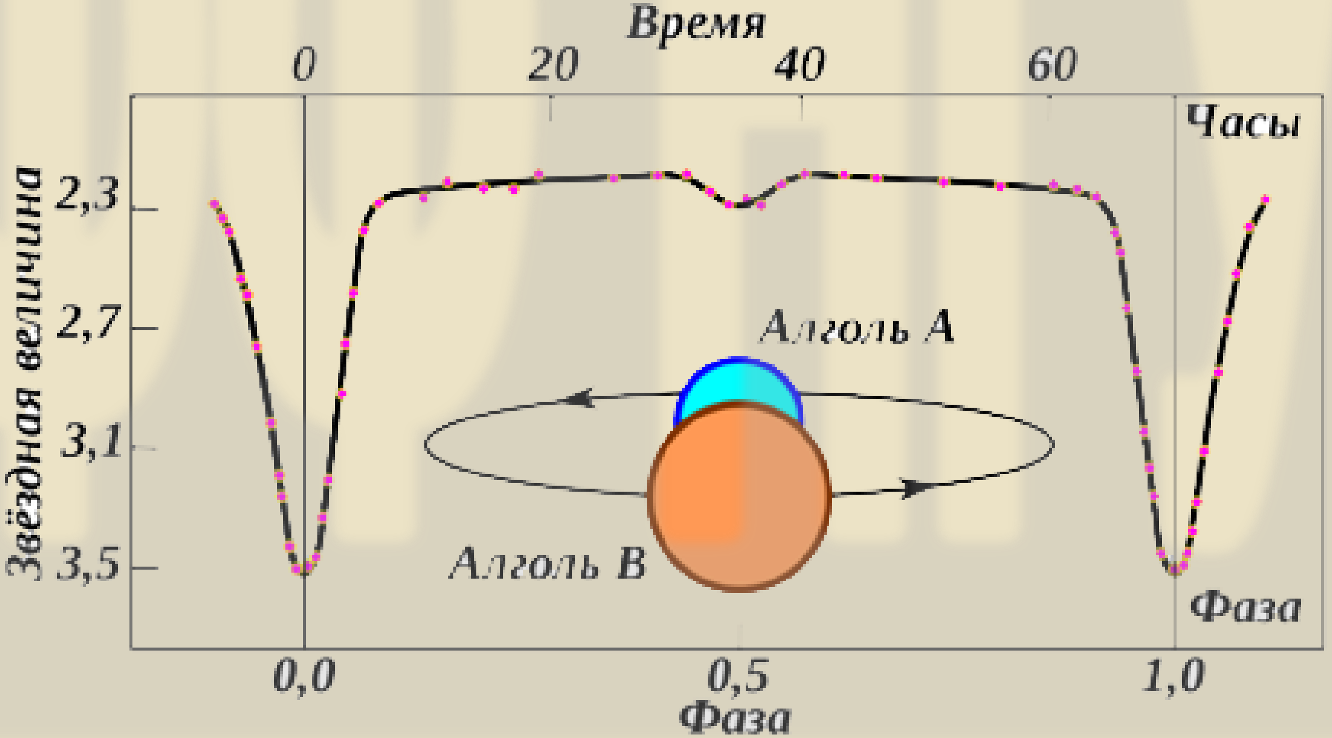
- форма самой орбиты
  - – большая полуось, $\boldsymbol{a}$
  - – эксцентриситет, $\boldsymbol{e}$
- ориентация плоскости орбиты в пространстве
  - – наклонение, $\boldsymbol{i}$
  - – долгота восходящего узла, $\boldsymbol{\Omega}$
- ориентация орбиты в плоскости
  - – аргумент периастра, $\boldsymbol{\omega}$

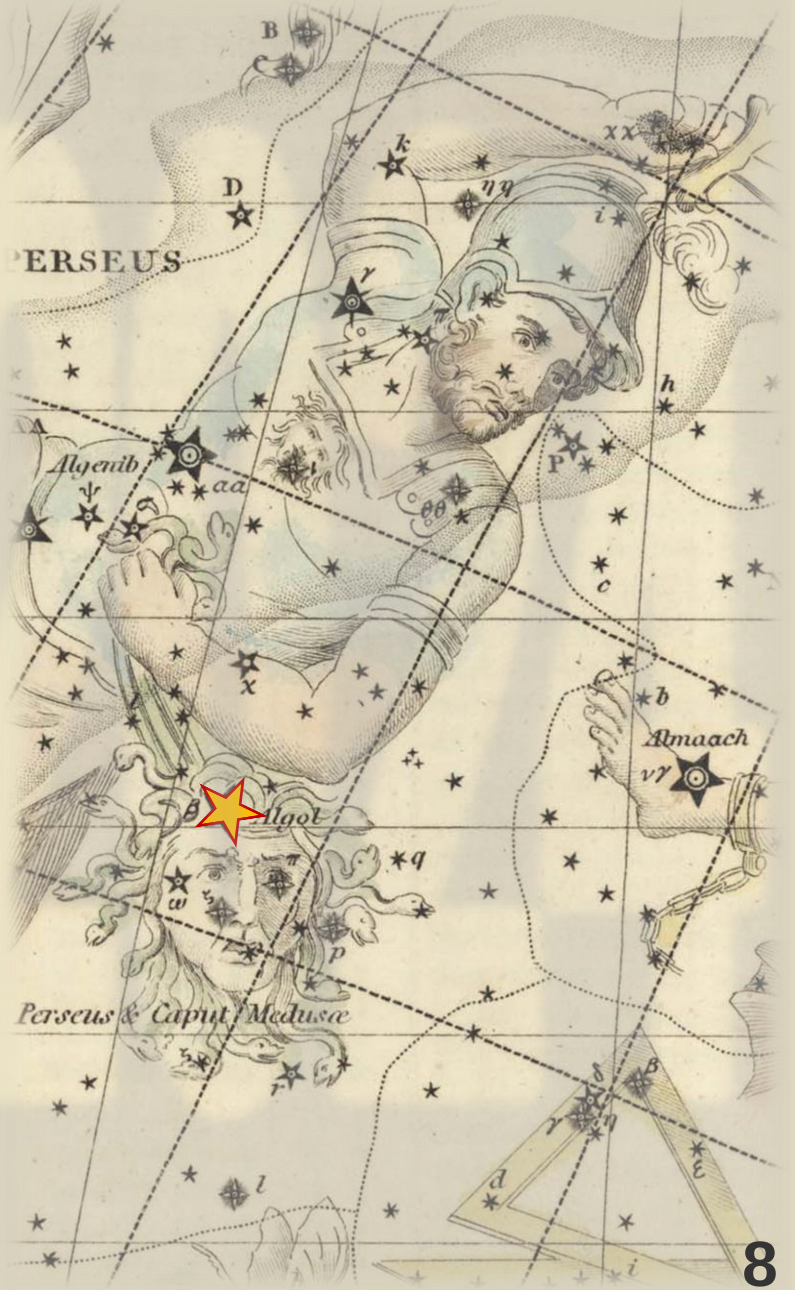
Чтобы определить положение тела на орбите необходимо добавить начальное положения: истинную аномалию $\boldsymbol{\nu}$ на эпоху $\boldsymbol{t_0}$.

Затменные двойные

Первой (Montanari, 1667; Goodricke, 1783) открытой звездой такого типа была звезда Алголь (ал-гуль – злой дух), она же β Персея (β Per). Переменность блеска этой звезды, вероятно, была замечена еще в древности (египтяне, арабы, греки).

В 1783 английский астроном John Goodricke обнаружил периодичность изменения блеска и предложил объяснение – затмение звезды другим объектом (звездой).

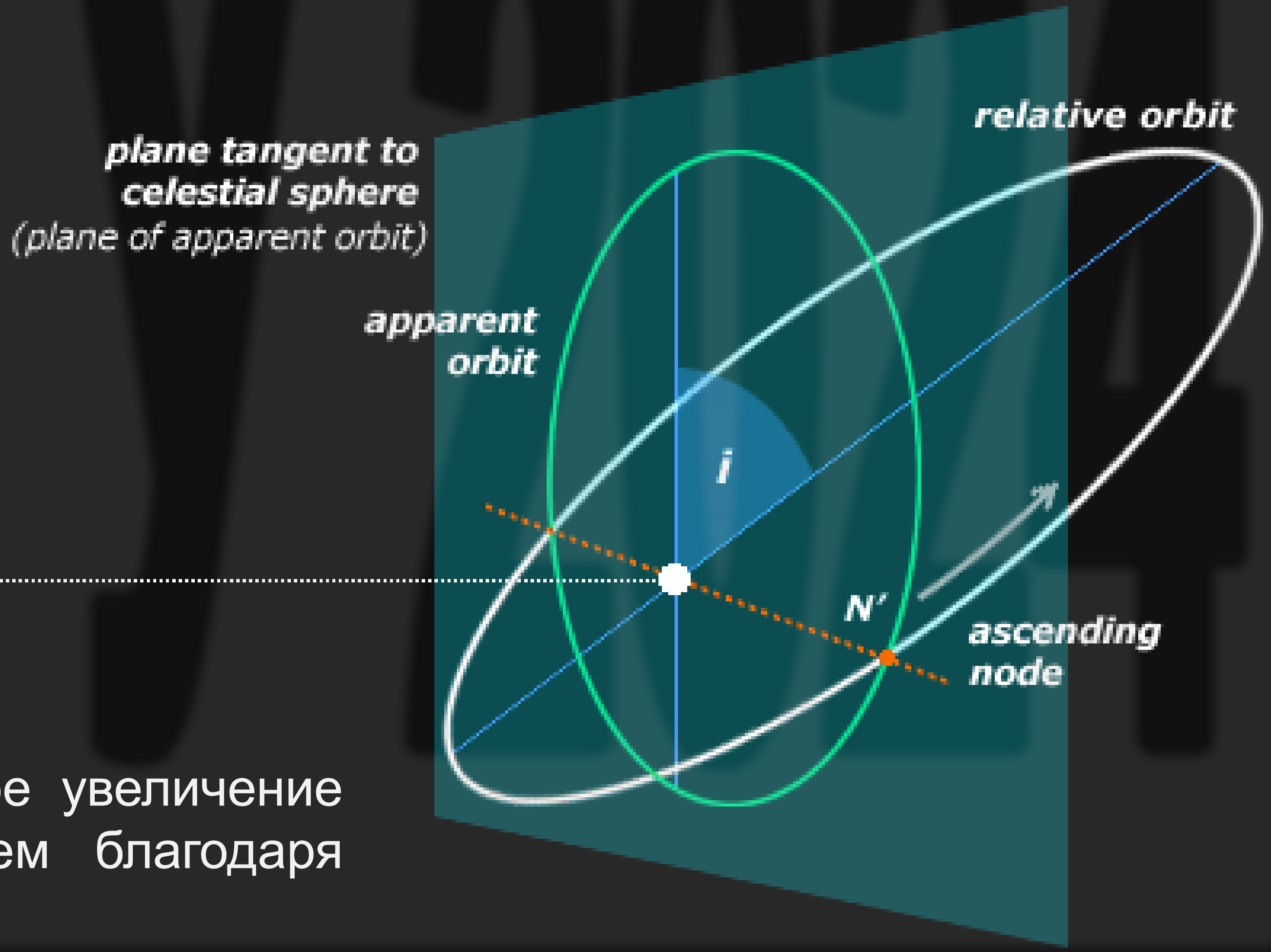




Астрометрические двойные

Для астрометрических двойных возможно (по крайней мере в принципе) определение всех параметров орбиты системы.

Двойная система бурых карликов с массами всего 35 M_J и 29 M_J.



В ближайшее время ожидается существенное увеличение статистики астрометрических кратных систем благодаря измерениям спутника GAIA.

Массы звезд двойной системы

Из астрометрических наблюдений визуальных двойных можно, в принципе, полностью определить параметры орбит обеих звезд. При практическом применении, основная неопределенность возникает в измерении угла i наклонения плоскости орбиты к плоскости, касательной к небесной сфере.

$$(*) \qquad \frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{a_2 \cos i}{a_1 \cos i} = \frac{\widetilde{a_2}}{\widetilde{a_1}}$$

a_1 и a_2 – расстояния от звезд до центра масс системы (большие полуоси в случае эллиптических орбит), которые могут быть выражены как в абсолютных единицах (если известно расстояние до системы) или в угловых.

Из третьего закона Кеплера:

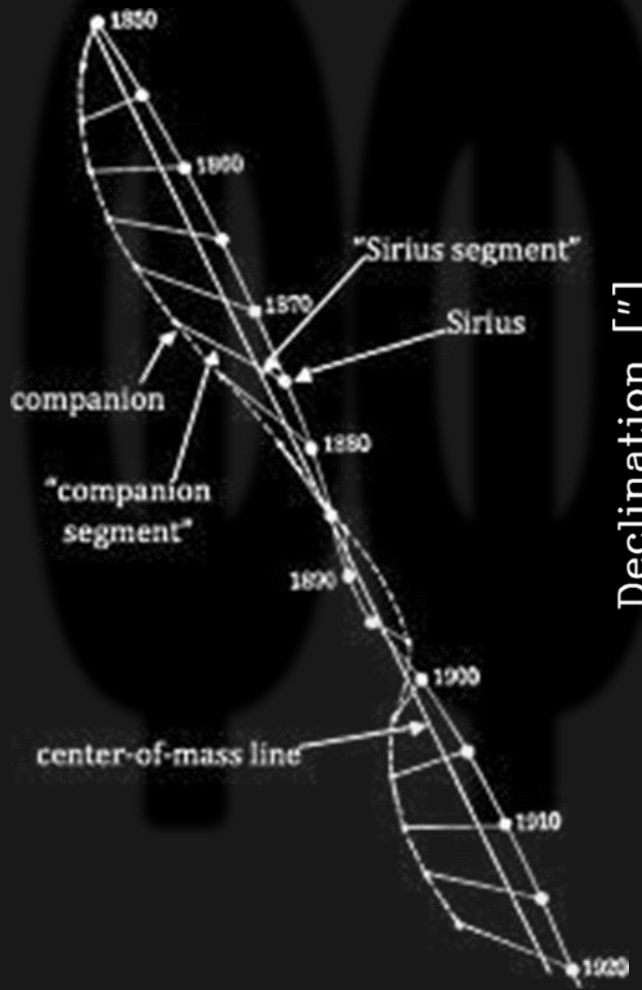
$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} a^3, \qquad a = a_1 + a_2$$

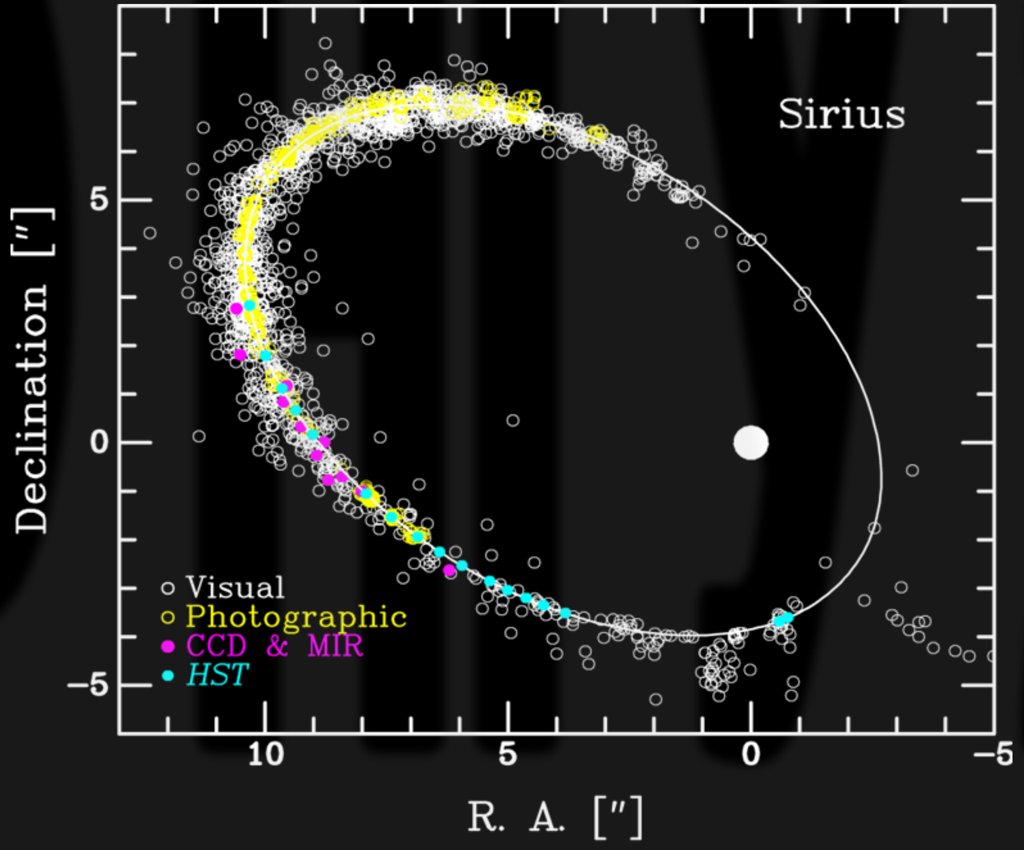
$$(**) \qquad m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{G}\left(\frac{d}{\cos i}\right)^3 \frac{\tilde{a}^3}{P^2}$$

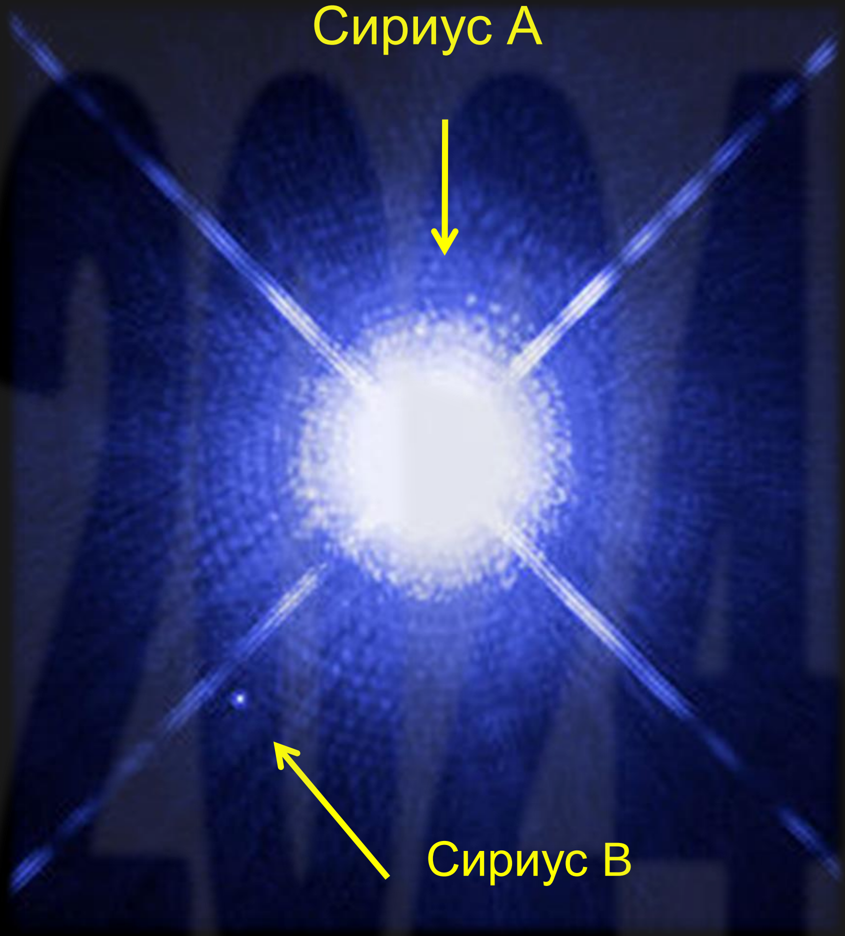
Если удается измерить расстояние и угол наклонения, то из (*) и (**) можно определить массы обеих звезд.

Астрометрические двойные

В 1844 году Фридрих Бессель, проанализировав астрометрические данные, пришел к выводу, что Сириус имеет невидимый спутник.



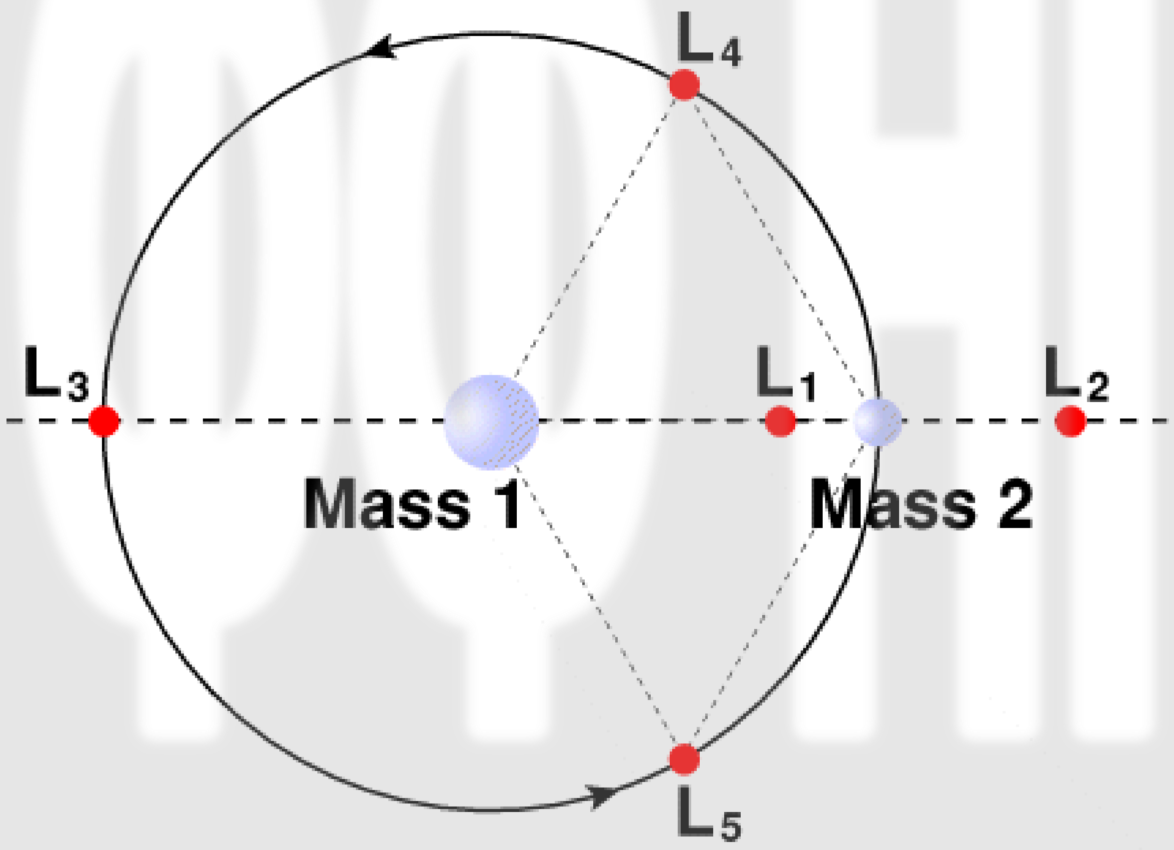




В 1862 его удалось различить визуально.

Точки Лагранжа

В системе двух гравитационно связанных тел существует 5 точек, где комбинация сил тяготения и центробежной «силы» (задачу удобно решать во вращающейся системе, где два массивных тела покоятся, предполагая круговую орбиту) равна нулю.



Точки L1, L2 и L3 всегда точки неустойчивого равновесия.

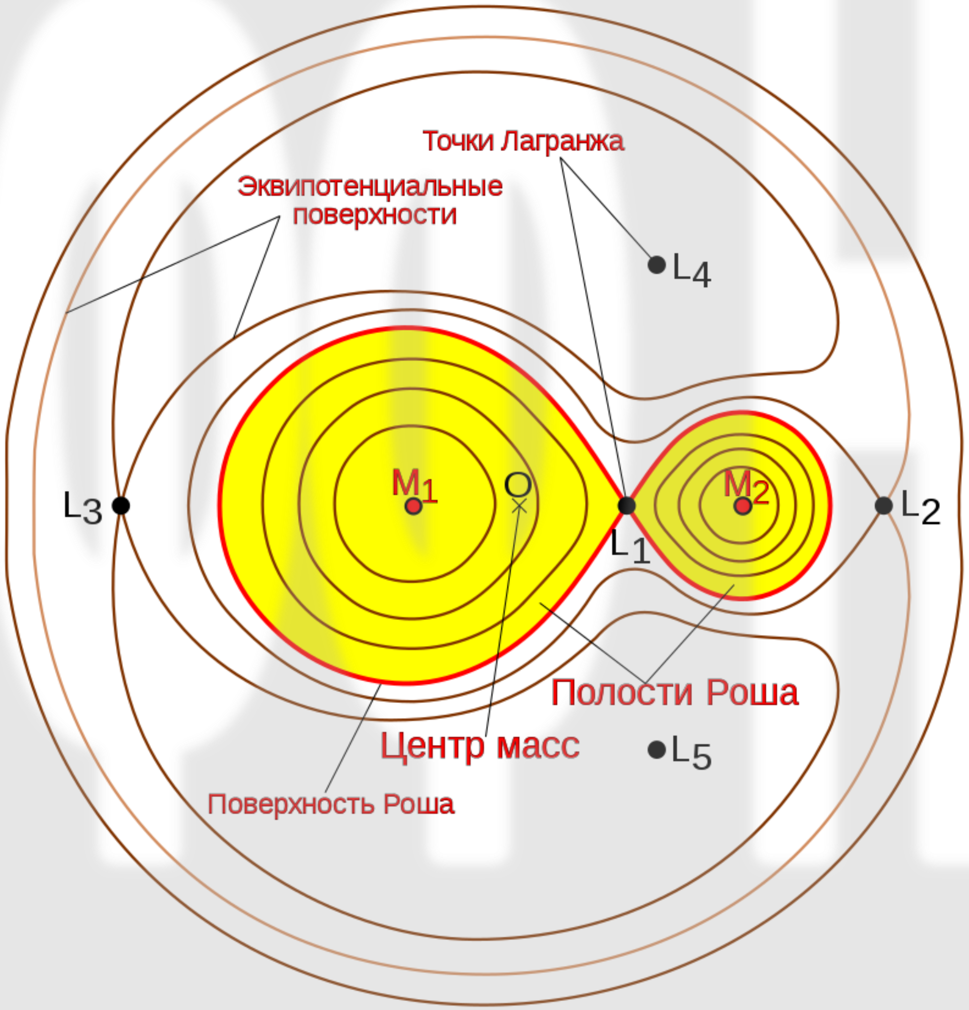
Точки L4 и L5 будут точками устойчивого равновесия, если выполняется условие:

$$\frac{M_1}{M_2} > \frac{25}{2}\left(1 + \frac{\sqrt{23 \cdot 27}}{25}\right) \simeq 24.96$$

farside.ph.utexas.edu/teaching/336k/Newton/node126.html

Полость Роша

Полость Роша – область вокруг звезды в двойной системе, ограниченная эквипотенциальной поверхностью, проходящей через точку Лагранжа L1.

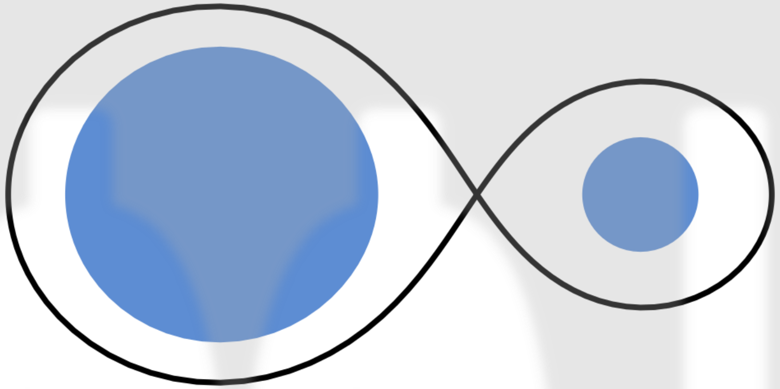


При сравнимых значениях M_1 и M_2, расстояние от центров звезд до точки Лагранжа L1 можно оценить по приближенной формуле:

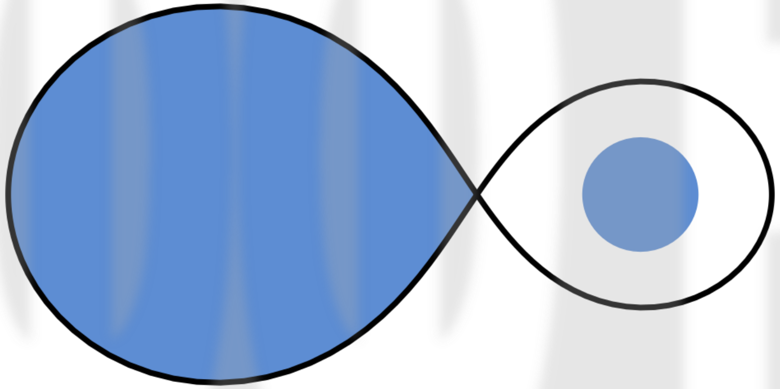
$$r_{1,2} \simeq a\left(\frac{1}{2} + 0.227\lg\frac{M_{1,2}}{M_{2,1}}\right)$$

В тесных двойных системах расстояния от звезд до точки Лагранжа L1 может быть достаточно мало, так что на поздних этапах эволюции более массивная звезда системы, расширяясь, заполнит свою полость Роша, и начнется переток вещества на менее массивную звезду.

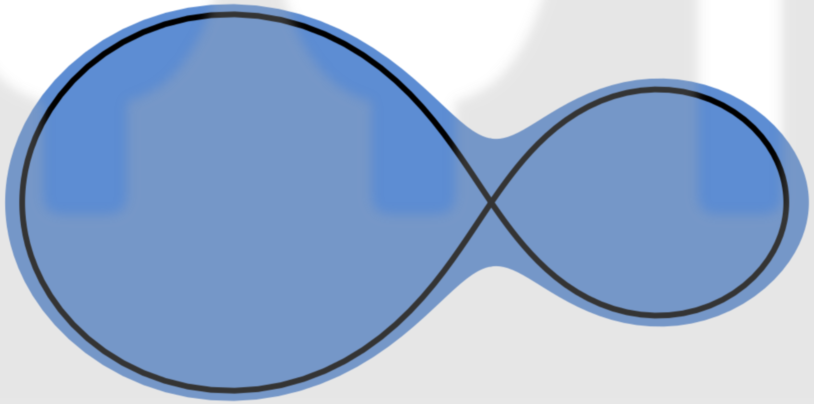
Тесные двойные системы



Если радиусы звезд много меньше, чем расстояния от их центров до L1, такая двойная система называется **разделенной** (detached binary).



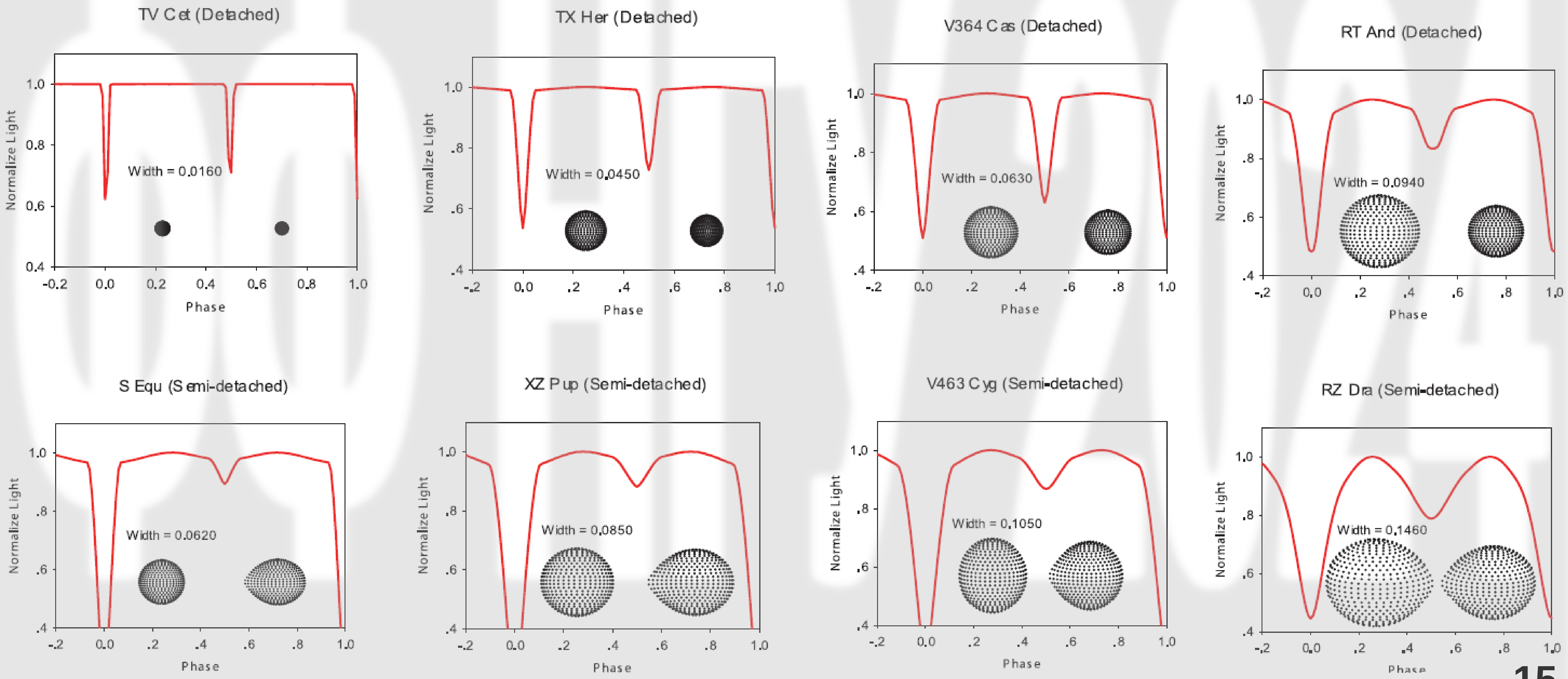
Если одна из звезд заполнила свою полость Роша, система называется **полуразделенной** (semidetached).



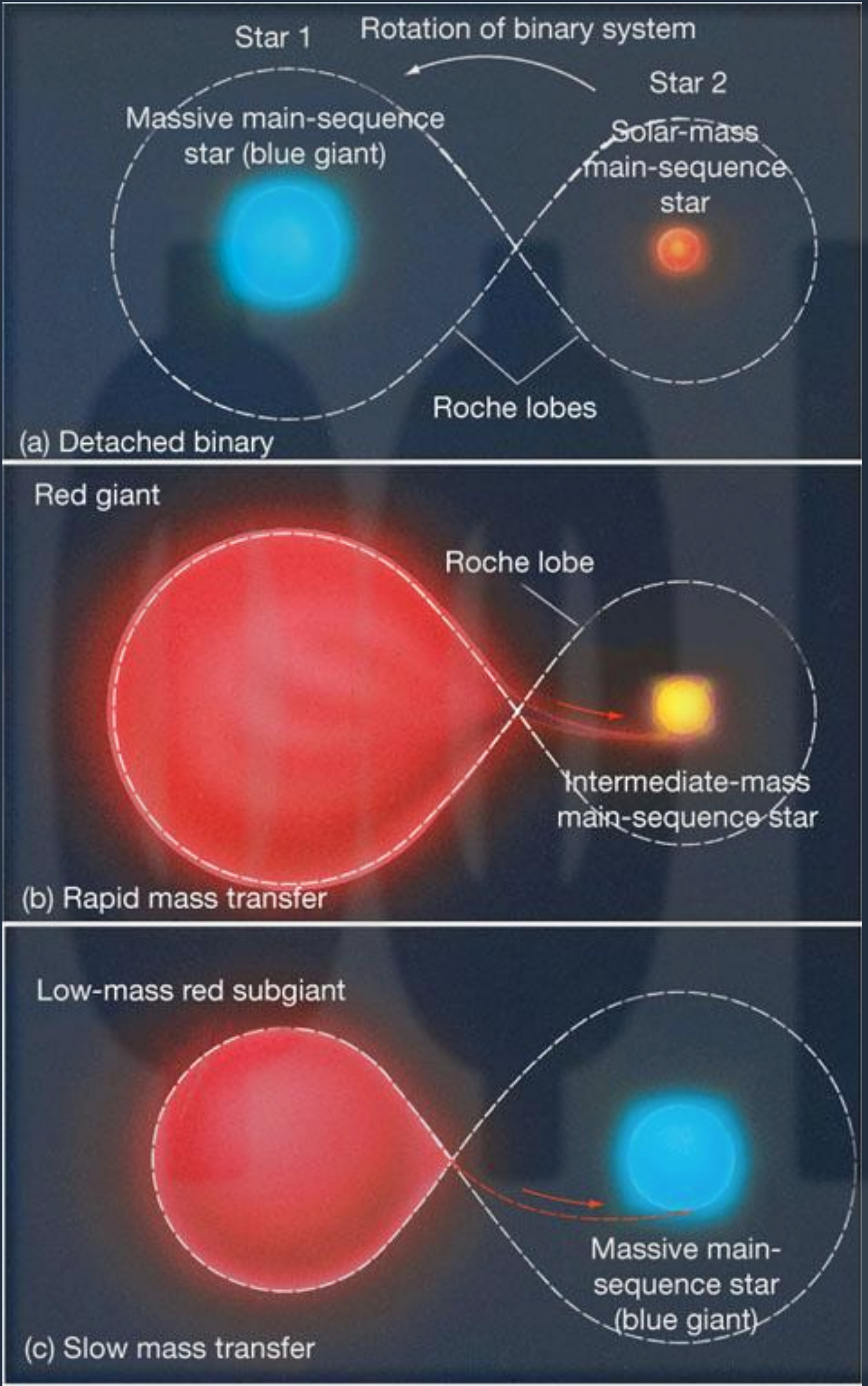
Если обе звезды заполнили свои полости Роша, система называется **тесной** (contact binary).

Тесные затменно двойные системы

Степень «разделенности» затменной двойной системы можно определить по форме кривой блеска.



Парадокс Алголя



В XX веке при изучении системы Алголя выяснилось, что менее массивная звезда выглядит эволюционно более старой, чем более массивная, что противоречит модели эволюции звезд.

На начальной стадии звезда 1 более массивная, поэтому быстрее сжигает водород в ядре, сходит с главной последовательности и превращается в красный гигант.

Расширяясь, звезда 1 заполняет свою полость Роша, и через точку L1 вещество ее внешних слоев начинает перетекать на звезду 2. При соответствующих условиях масса второй звезды может превысить массу первой.

Приток дополнительной массы на звезду 2 смещает ее по ГП, приводит к перестройке внутренней структуры, что делает ее более «молодой» и при этом более массивной, чем теперь есть звезда 1.

Гелиевые белые карлики

Согласно моделям звездной эволюции, гелиевые белые карлики могут оставаться лишь после эволюции звезд с массой $\lesssim 0.5M_\odot$ (более массивные звезды образуют C-O или O-Ne-Mg белые карлики), и поскольку их время жизни намного превышает текущий возраст Вселенной, то наблюдаться они не должны. Но они (очень редко) наблюдаются…

Возможное объяснение состоит в том, что начальная звезда типа Солнца состояла в тесной двойной системе и на стадии перехода на ветвь гигантов (т.е. до начала горения гелия в ядре) потеряла существенную долю массы из-за перетока вещества на вторую звезду.

В результате потери массы условия для горения гелия не были достигнуты, и гелиевое ядро сразу перешло в разряд белых карликов.

Двойные звезды в скоплениях

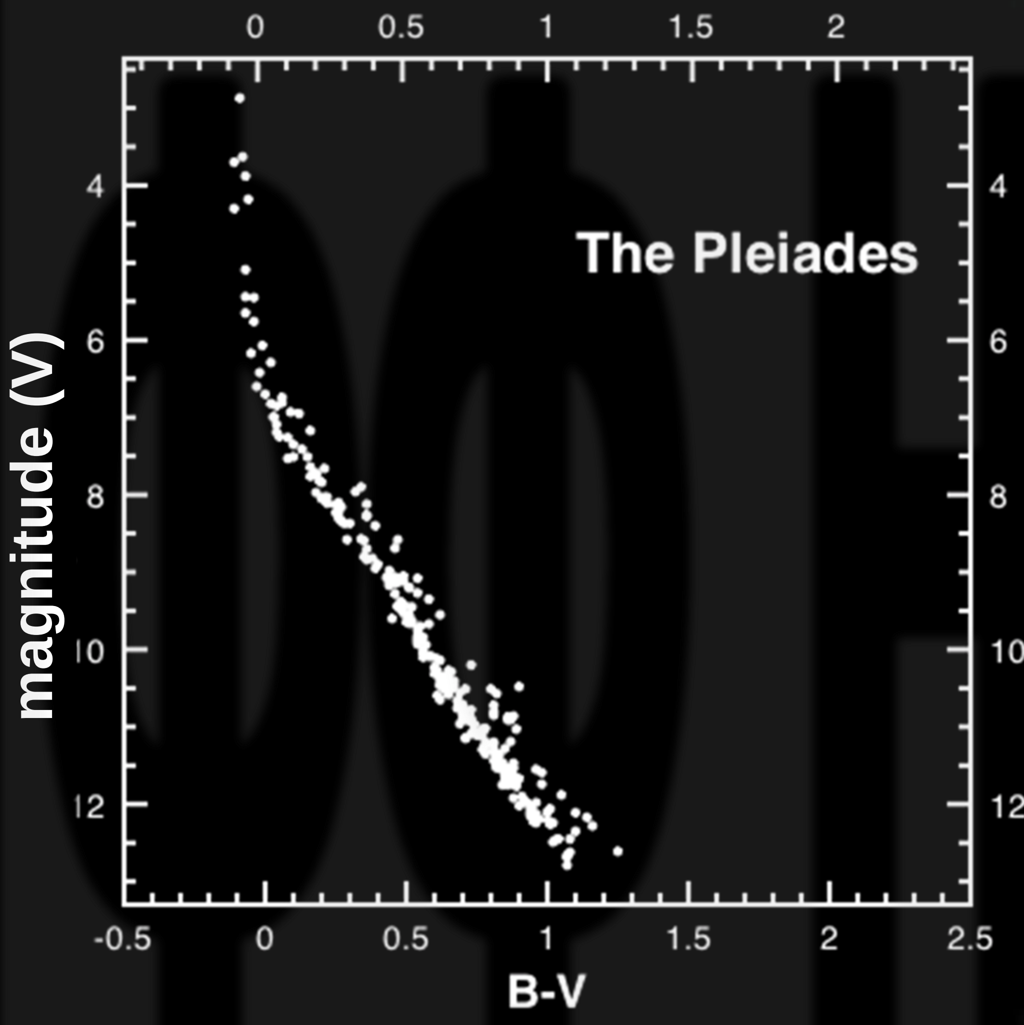
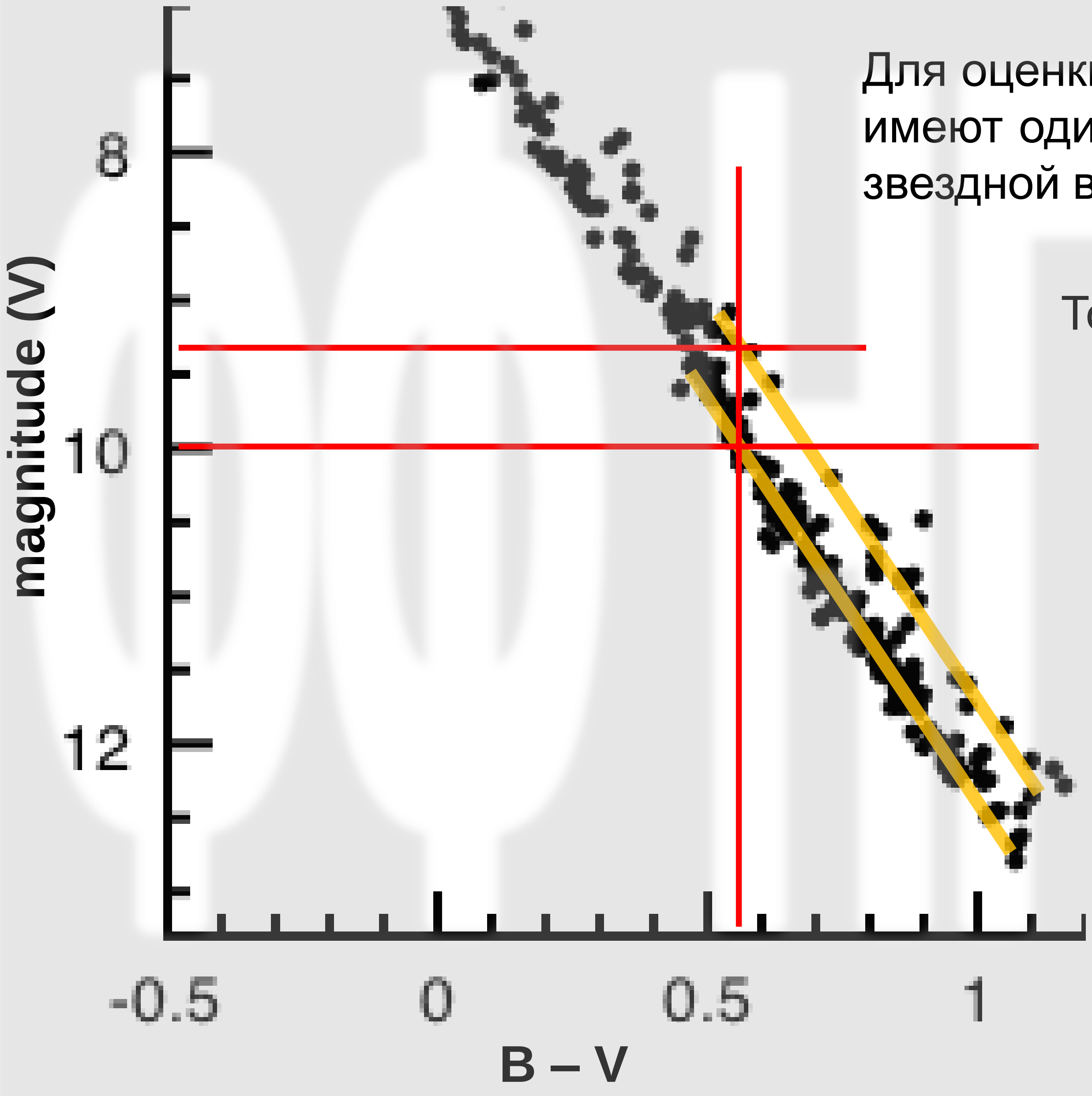


Диаграмма цвет-звездная величина для 270 звезд скопления Плеяды: “*Investigation of the Pleiades cluster. IV. The radial structure.*”, Raboud, D., Mermilliod, J.-C. *A&A.*, **329**, 101 (1998).

Диаграмма цвет – «раздвоение» ГП



Для оценки предположим, что обе звезды в двойной системе имеют одинаковую светимость $\boldsymbol{L}$, что соответствует видимой звездной величине $\boldsymbol{m}$.

Тогда видимая звездная m' величина системы будет

$$\boldsymbol{m'} = -2.5\lg\frac{2L}{L_0} = -2.5\lg\frac{L}{L_0} - 2.5\lg 2$$

$$\simeq \boldsymbol{m} - 0.753$$

То есть видимая звездная величина системы будет **меньше** примерно на 0.753, что хорошо согласуется с наблюдаемым смещением «побочной» полосы на диаграмме Г-Р.

Эффект Доплера

Продольный эффект Доплера в СТО:

$$\frac{V_r}{c} = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1} \qquad z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

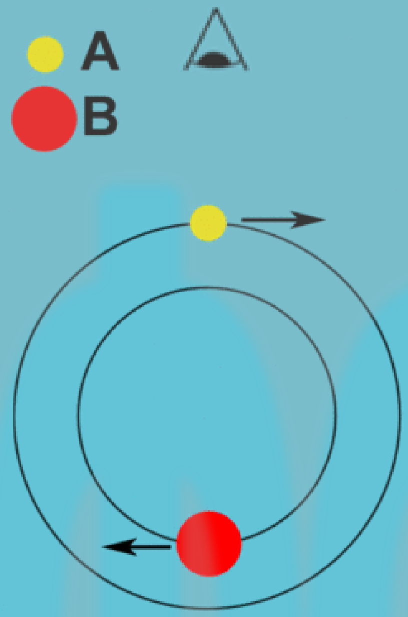
В нерелятивистском случае $V_r \ll c$ и $z \ll 1$, тогда

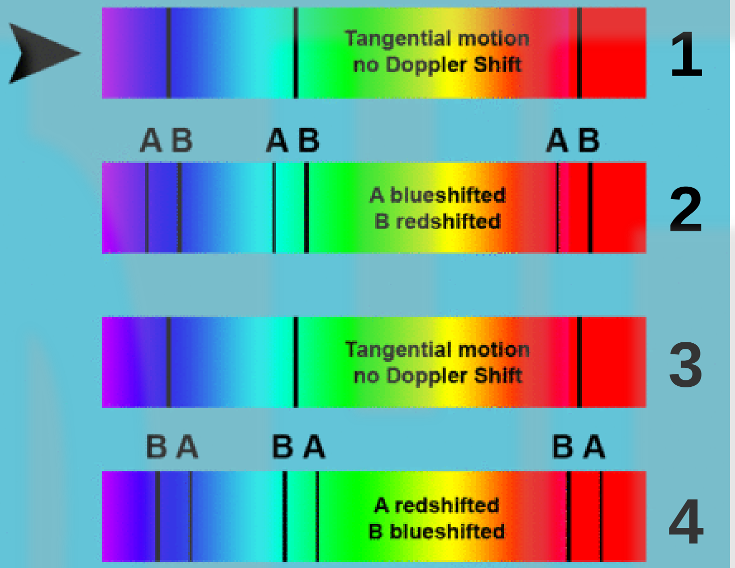
$$\boxed{V_r \simeq cz = c\frac{\Delta\lambda}{\lambda}}$$

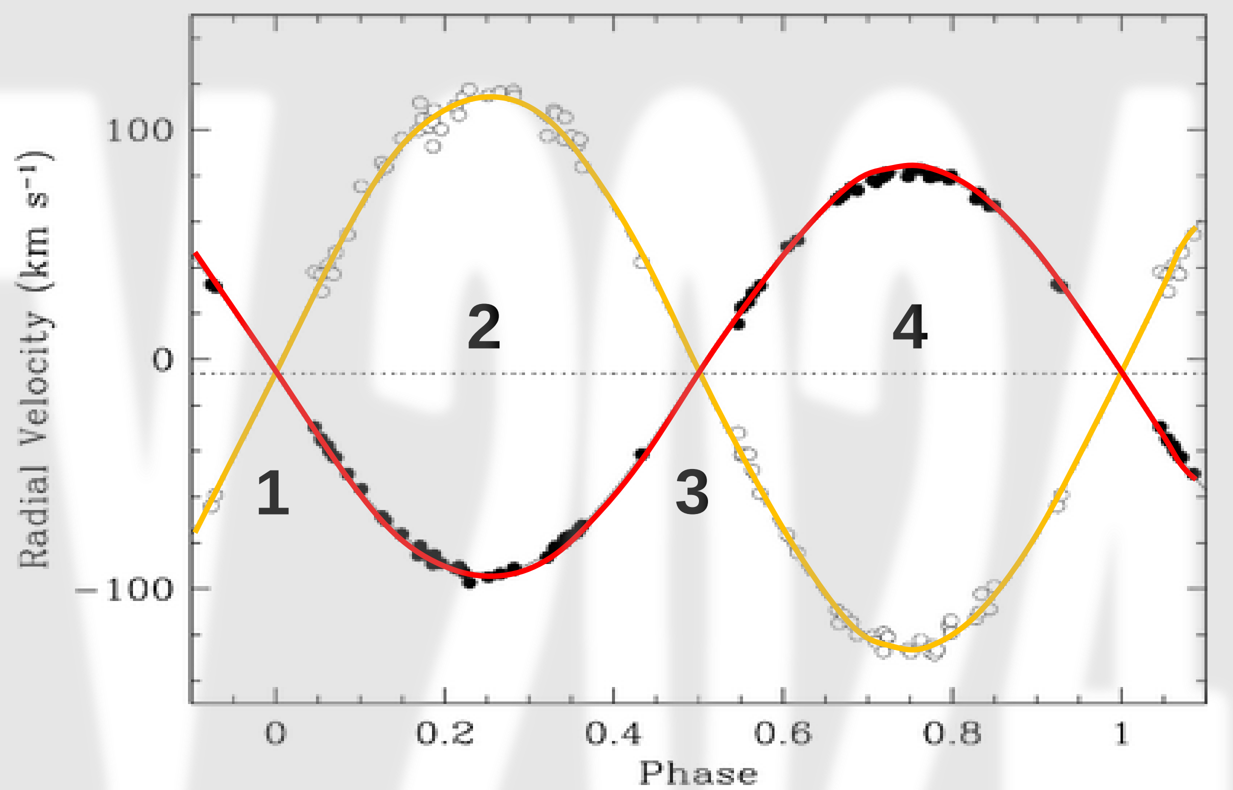
При $V_r \simeq 100$ км/с при наблюдении в линии водорода H_α, с длиной волны $\lambda_{H_\alpha} \simeq 650$ нм, смещение спектральной линии составляет всего

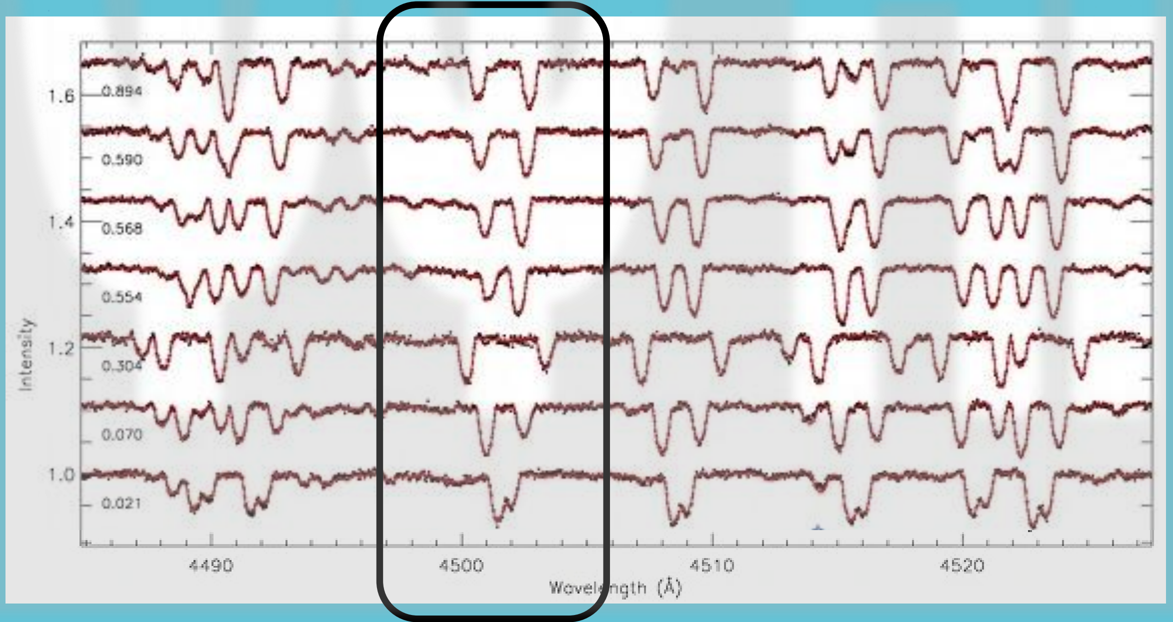
$$\Delta\lambda \simeq \frac{V_r}{c}\lambda \simeq \frac{100}{300000} 650 \simeq 0.22 \text{ нм}$$

Спектрально двойные



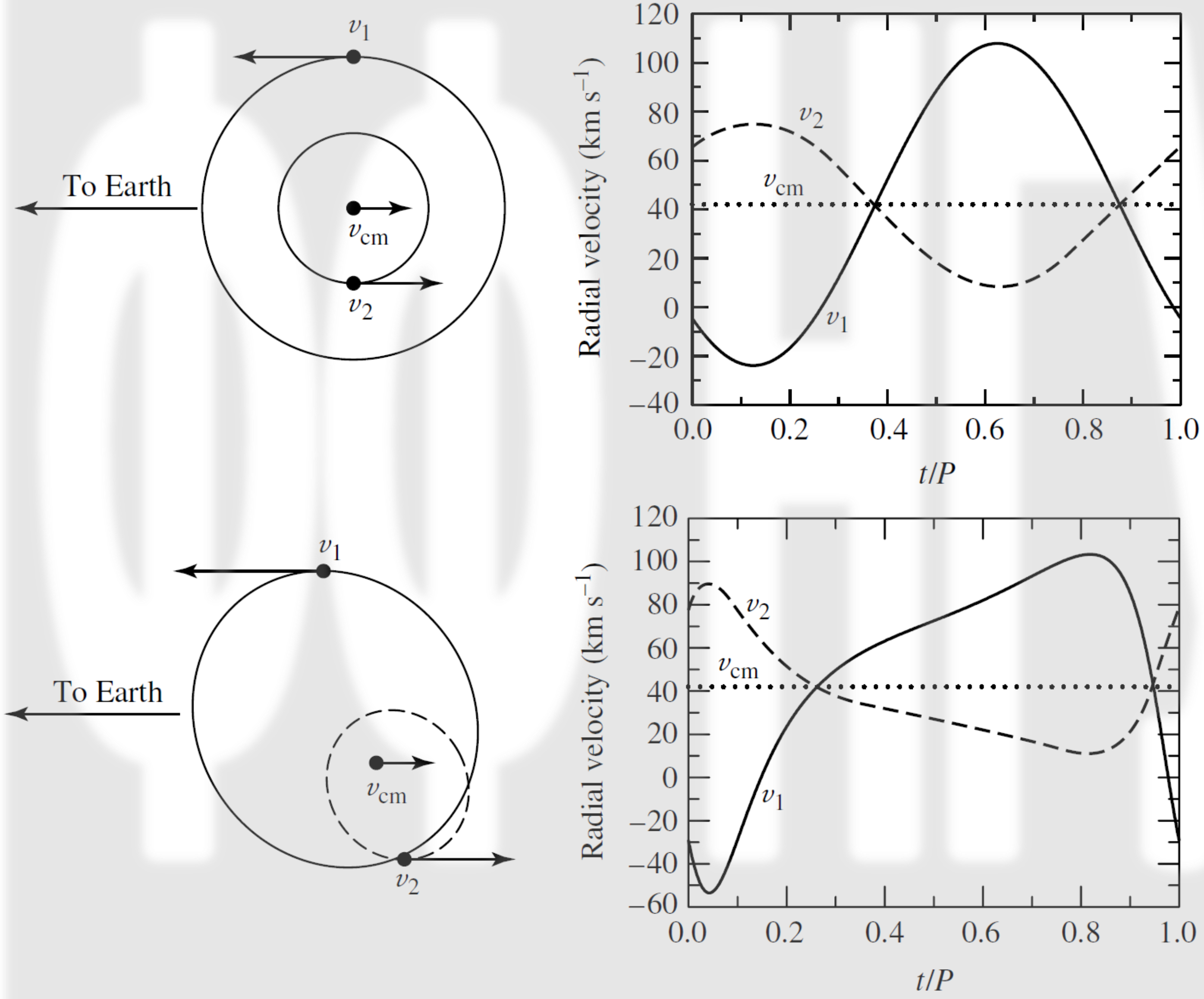






Если спектры обеих звезд видны (звезды не сильно различаются по яркости), то возможно одновременно измерить скорости обеих звезд системы.

Спектрально двойные



В случае круговых орбит зависимость радиальной скорости от времени меняется гармонически.

В случае эллиптических орбит, кривая скорости более сложная и зависит не только от степени вытянутости, но и от ориентации осей эллипса относительно наблюдателя.

Из спектральных наблюдений невозможно определить параметры i и Ω ориентации плоскости орбиты в пространстве!

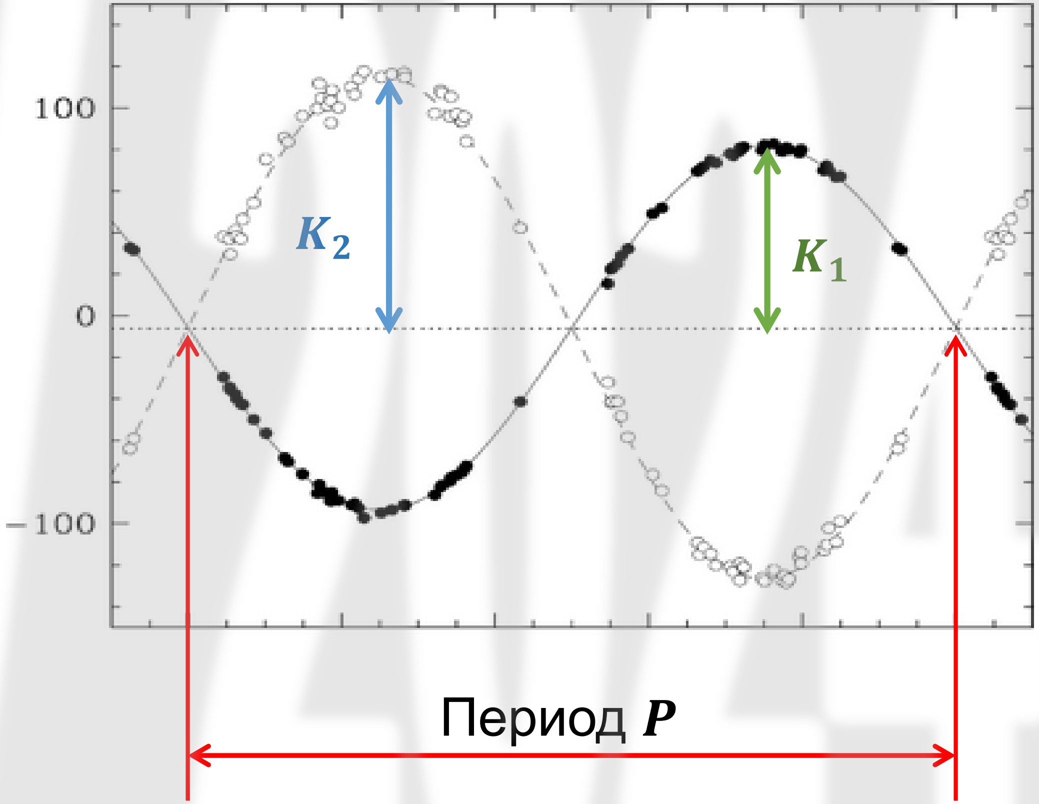
Массы звезд двойной системы

Если система не разрешается, но удается измерить радиальные скорости обеих звезд, то в предположении круговых орбит ($e = 0$), получаем:

$$(*') \qquad \frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2/\sin i}{v_1/\sin i} = \frac{K_2}{K_1}$$

$$a = \frac{P}{2\pi}(v_1 + v_2) = \frac{P}{2\pi}\frac{(K_1 + K_2)}{\sin i}$$

$$(**') \qquad m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{G}\frac{a^3}{P^2} = \frac{P}{2\pi G}\frac{(K_1 + K_2)^3}{\sin^3 i}$$



Основной проблемой при этом, как правило, является неизвестное наклонение орбиты (угол i).

Массы звезд двойной системы

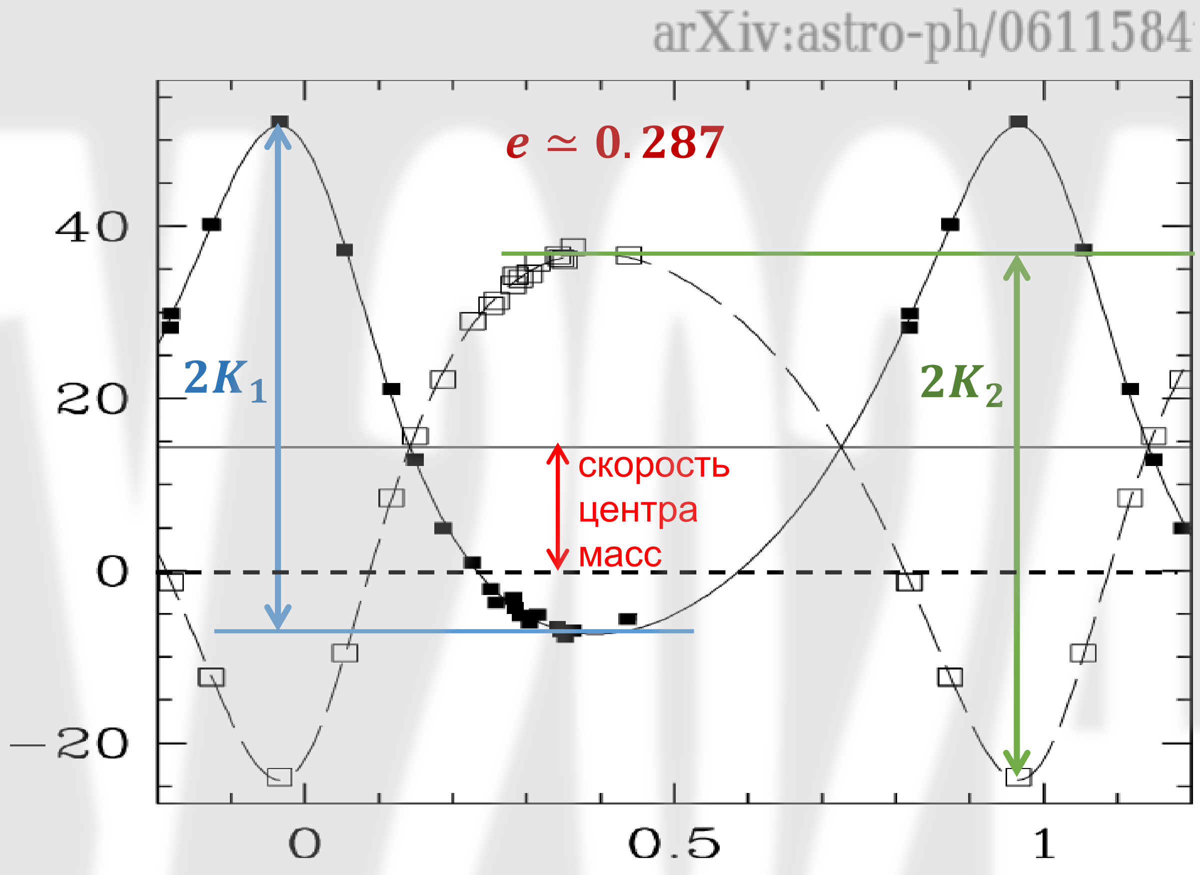
Вводя обозначение
$$q = \frac{m_2}{m_1} = \frac{K_1}{K_2},$$

преобразуем $(**')$ к виду

$$m_1 + m_2 = m_1(1+q) = \frac{PK_2^3}{2\pi G}\frac{(1+q)^3}{\sin^3 i}.$$

Тогда (в общем случае эллиптических орбит):

$$m_1 = \frac{PK_2^3\left(1-e^2\right)^{3/2}}{2\pi G}\frac{(1+q)^2}{\sin^3 i} \qquad m_2 = \frac{PK_1^3\left(1-e^2\right)^{3/2}}{2\pi G}\frac{(1+1/q)^2}{\sin^3 i}$$



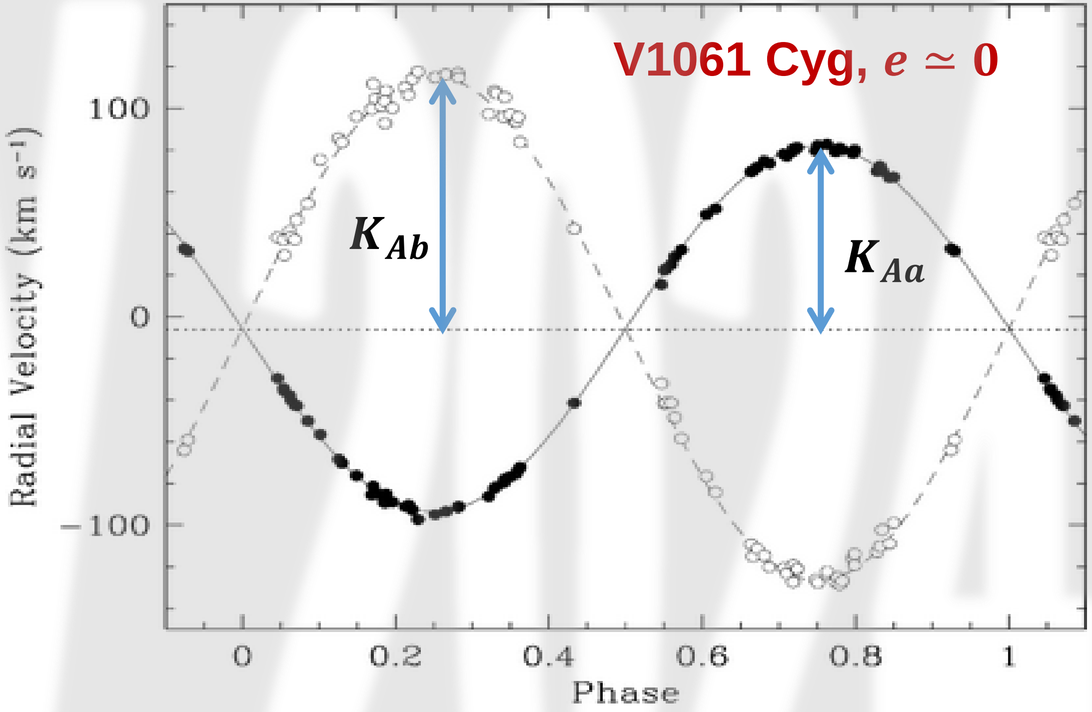
Если, кроме того, спектрально двойная система является еще и затменной, то $i \simeq 90°$ и $\sin i \simeq 1$.

Наблюдательный пример

Двойная система с круговыми орбитами.

arXiv:astro-ph/0512072

$P_{\rm A}$ (days)	2.3466487 ± 0.0000049
γ (km s^{-1})	-7.84 ± 0.25
$K_{\rm Aa}$ (km s^{-1})	87.96 ± 0.34
$K_{\rm Ab}$ (km s^{-1})	120.54 ± 0.73



$M_{\rm Aa}$ ($M_\odot$)	$(1.274 \pm 0.018)\boxed{/\sin^3 i_{\rm A}}$
$M_{\rm Ab}$ ($M_\odot$)	$(0.9297 \pm 0.0096)\boxed{/\sin^3 i_{\rm A}}$
$M_{\rm B}$ ($M_\odot$)	...
$q \equiv M_{\rm Ab}/M_{\rm Aa}$	0.7297 ± 0.0053

Вычислительный пример

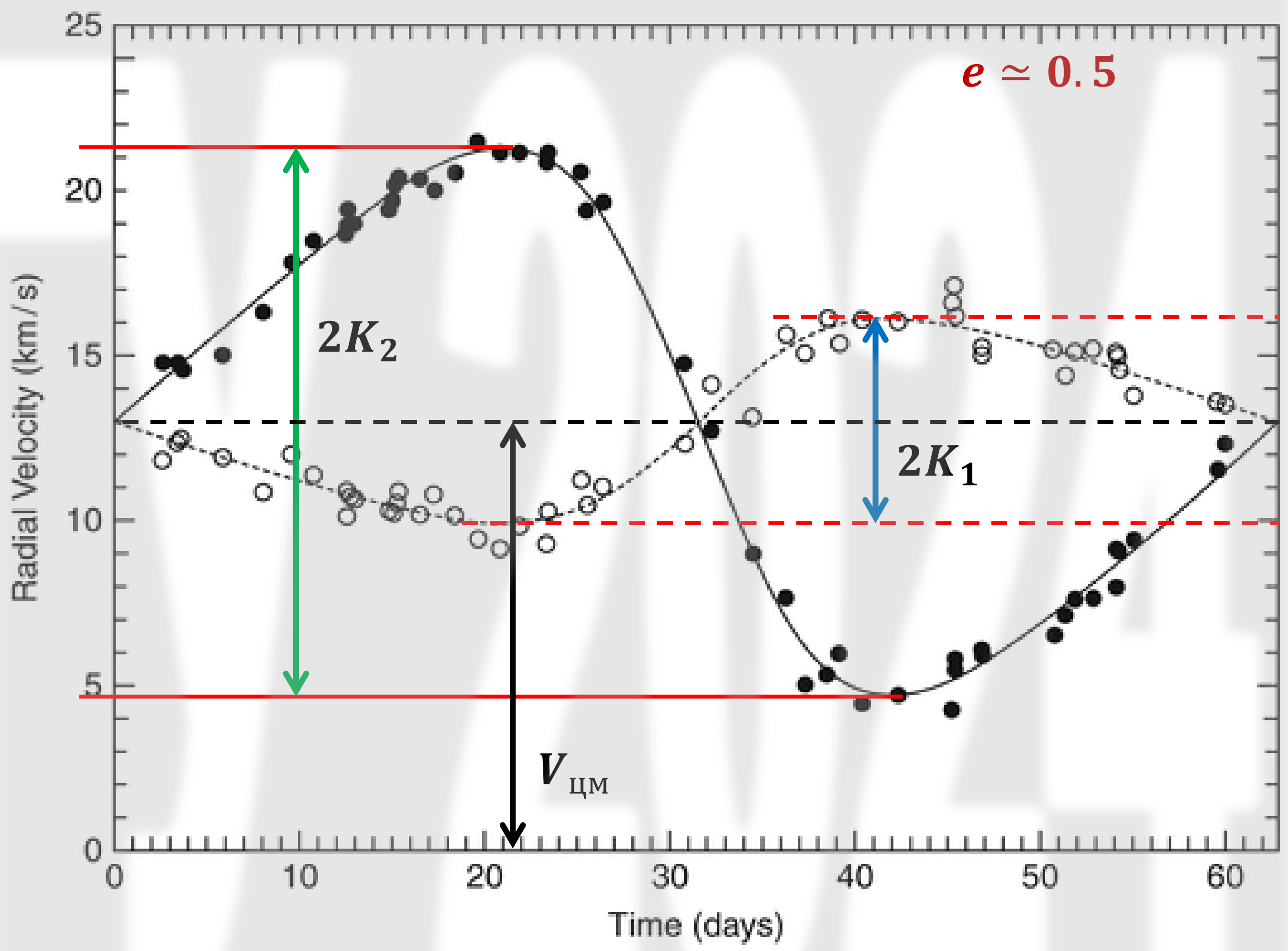
По приведенным результатам измерений радиальных скоростей двойной системы определить отношение масс и звезд и скорость центра масс системы относительно Солнца.

$$2K_1 \simeq 6.2 \text{ км/с}$$

$$2K_2 \simeq 16.6 \text{ км/с}$$

$$q = \frac{m_2}{m_1} = \frac{K_1}{K_2} \simeq \frac{6.2}{16.6} \simeq 0.37$$

$$V_{\text{цм}} \simeq 13 \text{ км/с}$$



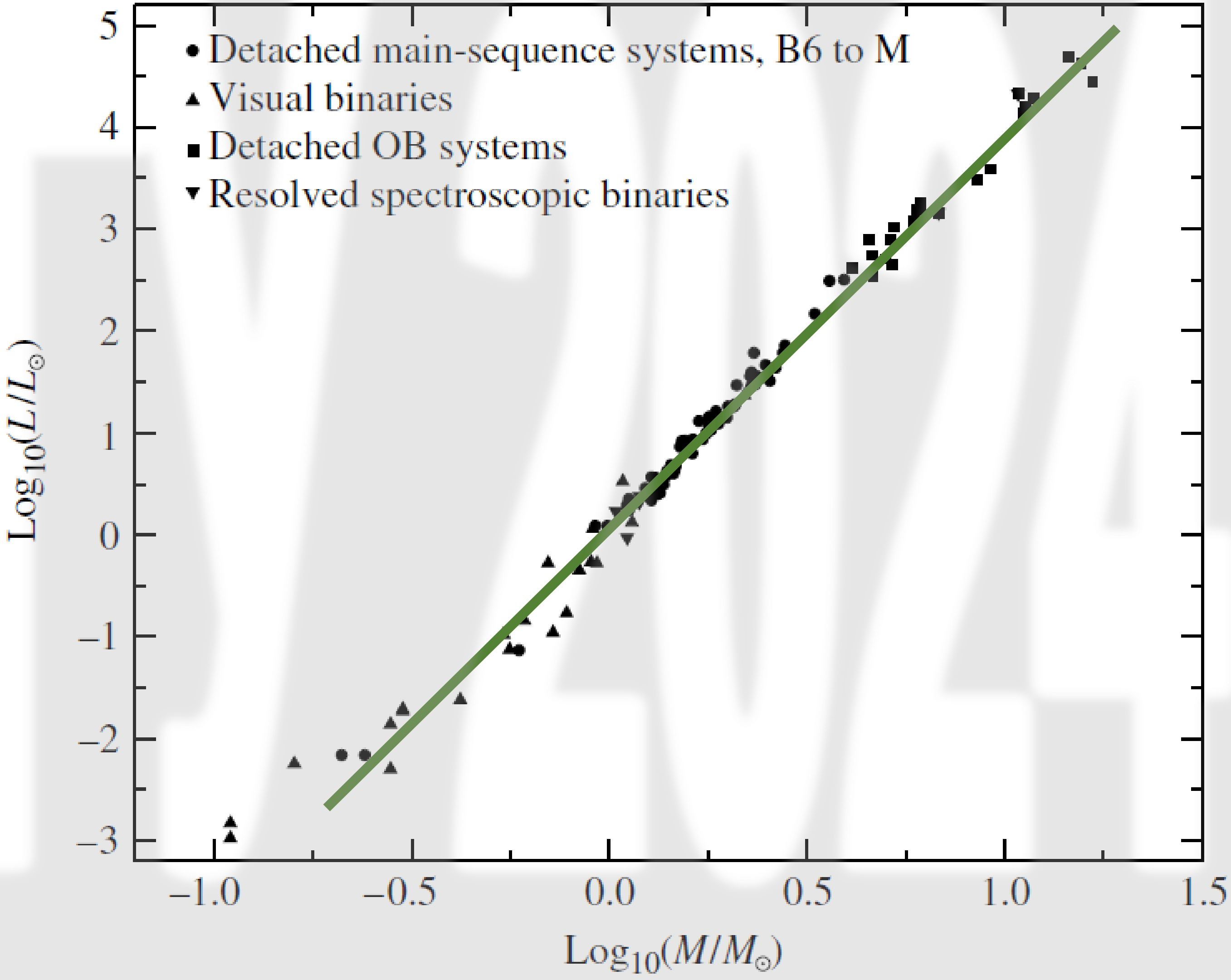
Функция масс

Из анализа двойных систем с известным расстоянием была построена первая зависимость светимости от массы для звезд главной последовательности.

$$L = L_{\odot}\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{\alpha}$$

Для приведенного на графике диапазона значений масс $\alpha \simeq 3.8$. Для более широкого диапазона, как мы видели, **<u>для оценок</u>** лучше подходит $\alpha \simeq 3.5$.

Popper, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 18, 115, 1980.



Функция масс

Однако далеко не всегда удается измерить скорости обеих звезд (например если их светимости сильно различаются). Тогда

$$\boldsymbol{m_2} = \frac{PK_1^3}{2\pi G}\frac{(1+1/q)^2}{\sin^3 i} = f(m)\frac{(1+1/q)^2}{\sin^3 i}$$

– величина больше 1

Но величина q теперь не известна.

$$\boxed{f(m) = \frac{PK_1^3}{2\pi G}\left(1-e^2\right)^{3/2}}$$

– функция масс, включает только измеренные параметры.

Так как $\frac{(1+q)^2}{\sin^3 i} > 1$, то отсюда получаем ограничение на массу m_2:

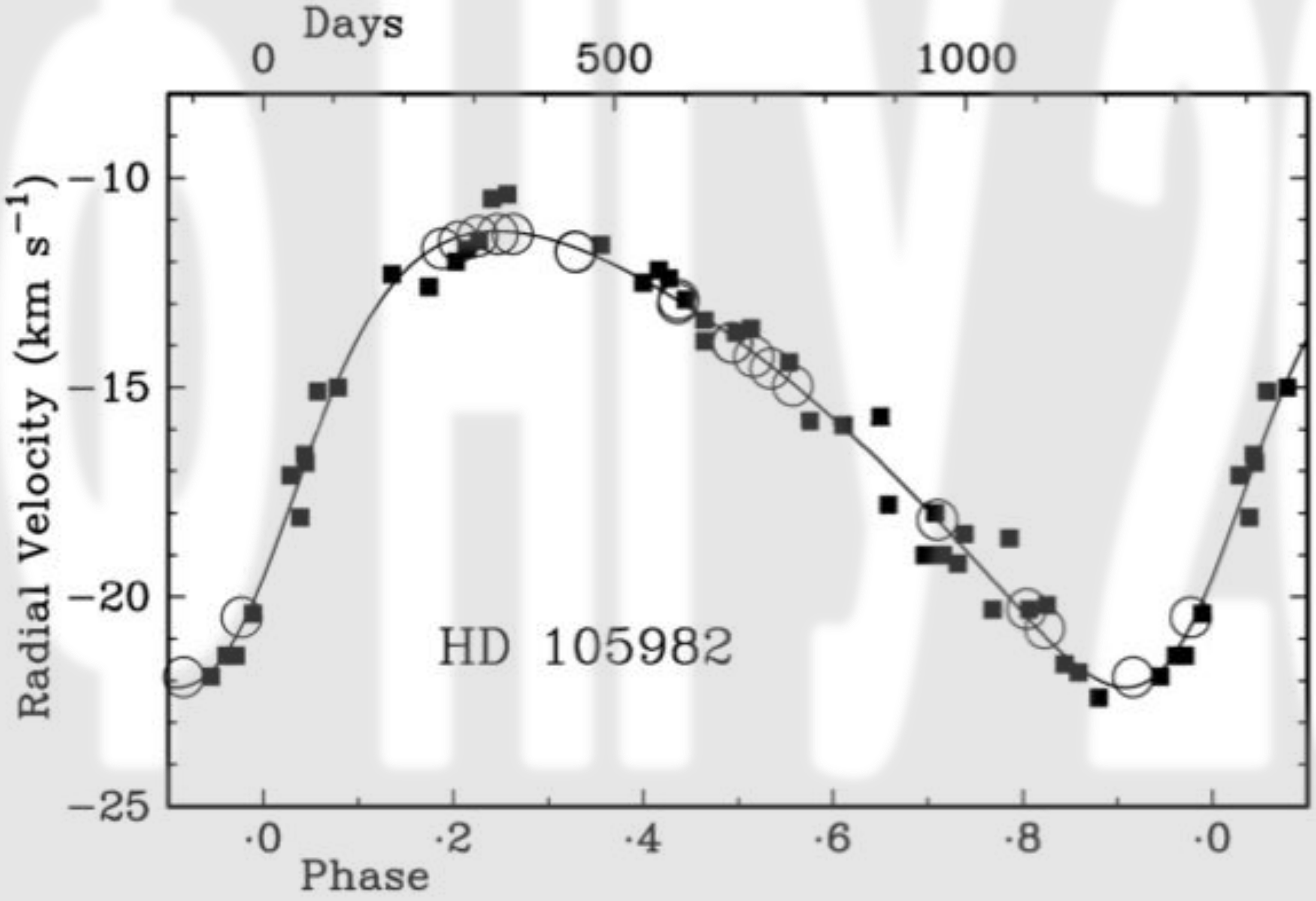
$$\boxed{m_2 > f(m)}$$

$$f(m) \simeq \left(\frac{P}{10}\right)\left(\frac{K_1}{100}\right)^3\left(1-e^2\right)^{3/2}$$

– P в сутках
– K в км/с
– $f(m)$ в массах Солнца

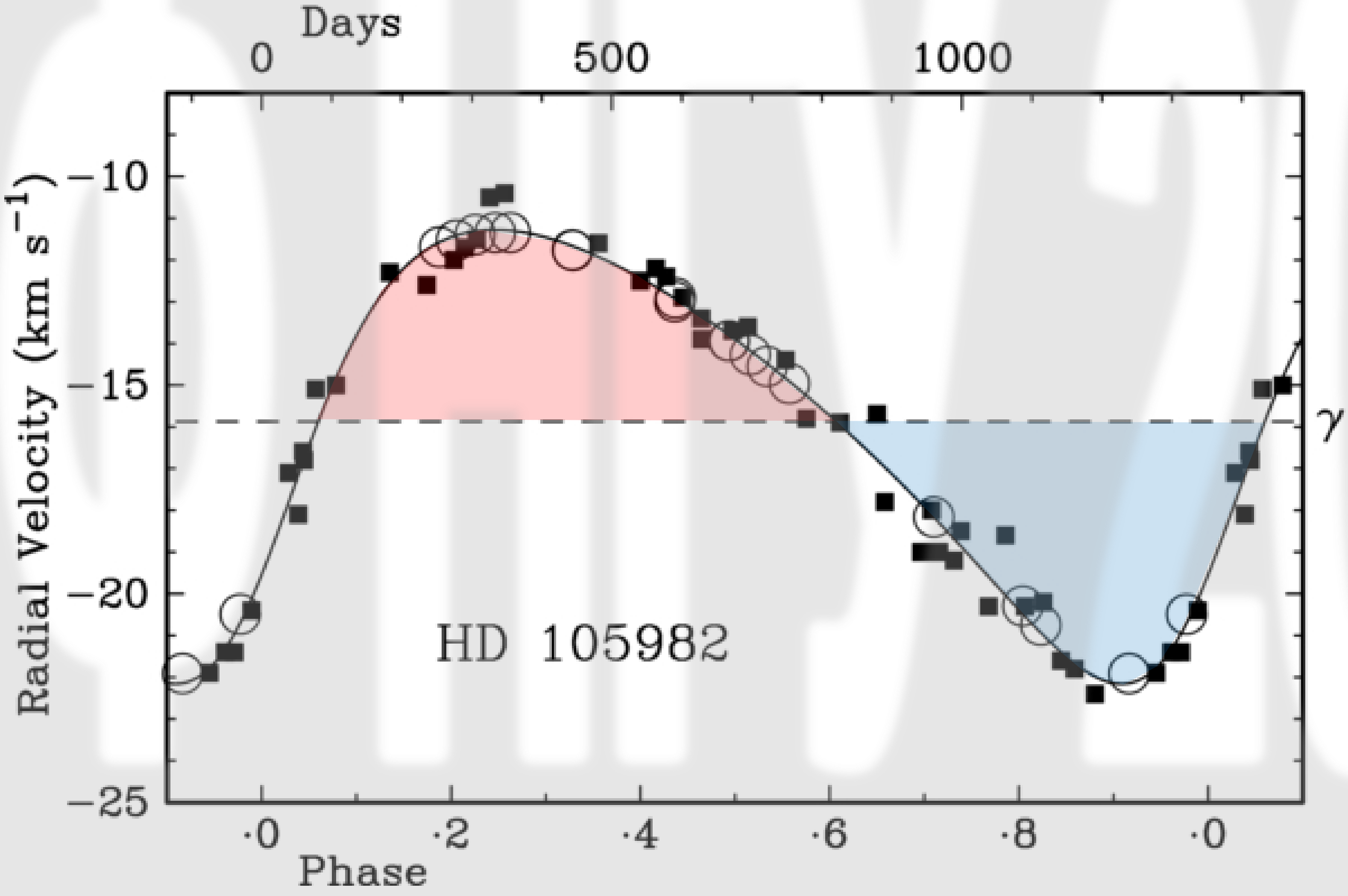
Вычислительный пример

В двойной системе наблюдается спектр только одной звезды. Определить скорость центра масс системы.



Вычислительный пример

В двойной системе наблюдается спектр только одной звезды. Определить скорость центра масс системы.



Вычислительный пример

В двойной системе наблюдается спектр только одной звезды спектрального класса A5, принадлежащей ГП. При этом измеренные значения параметров орбиты равны: $e \simeq 0$, $P = 12.0$ сут., $K_1 \simeq 140$ км/с. Что можно сказать о второй звезде системы?

По спектральному классу звезды определяем температуру: $\boldsymbol{T}_{\text{эфф}} \simeq \mathbf{8500}$ К.

Поскольку звезда принадлежит ГП, то по соотношению масса-температура можно оценить ее массу:

$$\boldsymbol{m}_1 \simeq \boldsymbol{M}_\odot \left(\frac{\boldsymbol{T}}{\boldsymbol{T}_\odot}\right)^{5/3} \simeq \mathbf{1.9}\ \mathrm{M}_\odot$$

Пользуясь функцией масс, найдем нижний предел на массу компаньона:

$$\boldsymbol{m}_2 > \boldsymbol{f}(\boldsymbol{m}) \simeq \left(\frac{\boldsymbol{P}}{\mathbf{10}}\right)\left(\frac{\boldsymbol{K}_1}{\mathbf{100}}\right)^3 \simeq \left(\frac{\mathbf{12}}{\mathbf{10}}\right)\left(\frac{\mathbf{140}}{\mathbf{100}}\right)^3 \simeq \mathbf{3.3}\ \mathrm{M}_\odot$$

Если $\boldsymbol{m}_1 \simeq 2\ \mathrm{M}_\odot$, а $\boldsymbol{m}_2 > 3.3\ \mathrm{M}_\odot$, то почему звезду 1 мы видим, а звезду 2 нет?