

発表論文

“Ellipsoidal variability and the difference between
sequence D and E red giants”

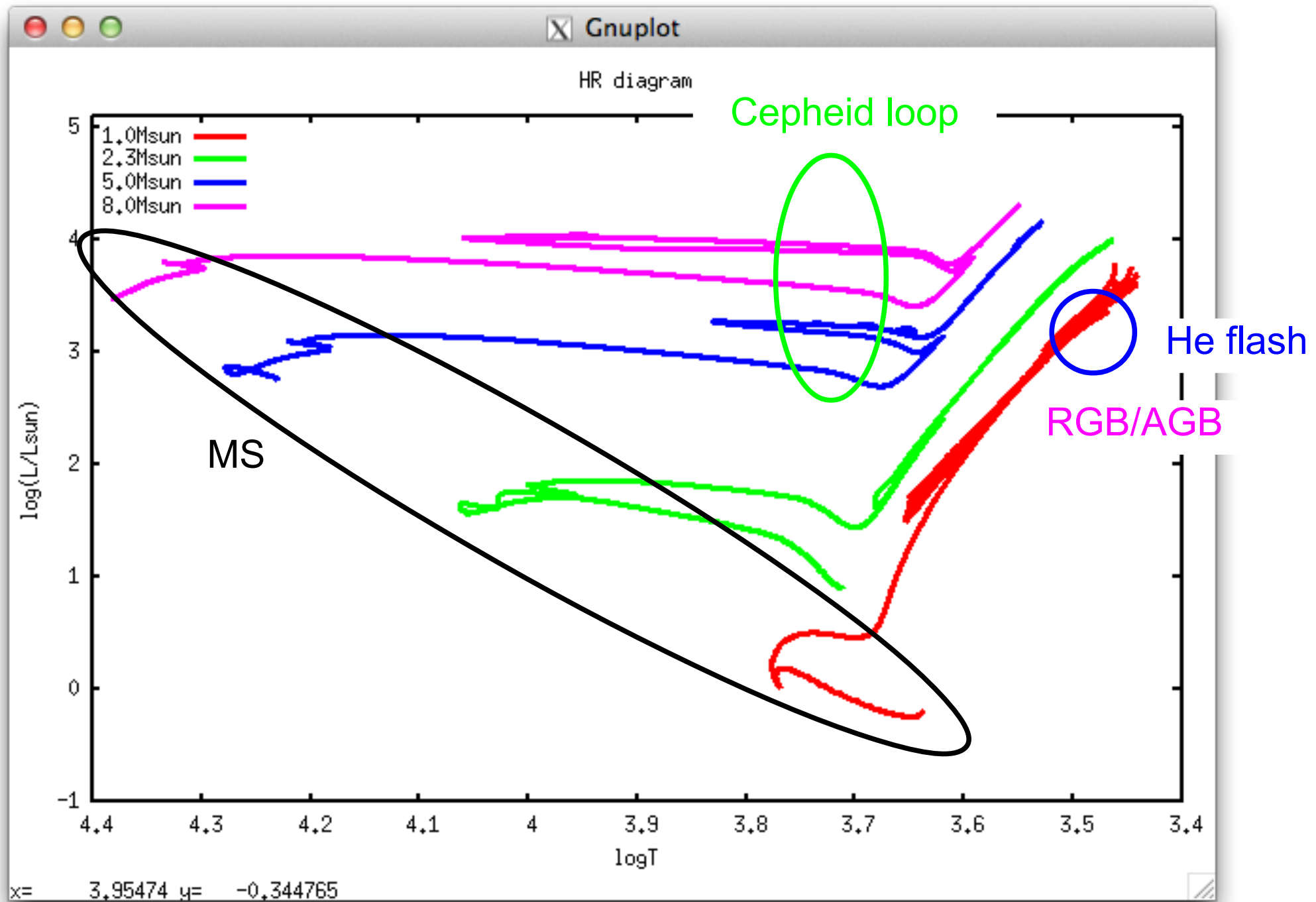
C. P. Nicholls, P.R. Wood and M.-R. L. Cioni
MNRAS.405.1770N(2010)

李研究室 D1
高山 正輝

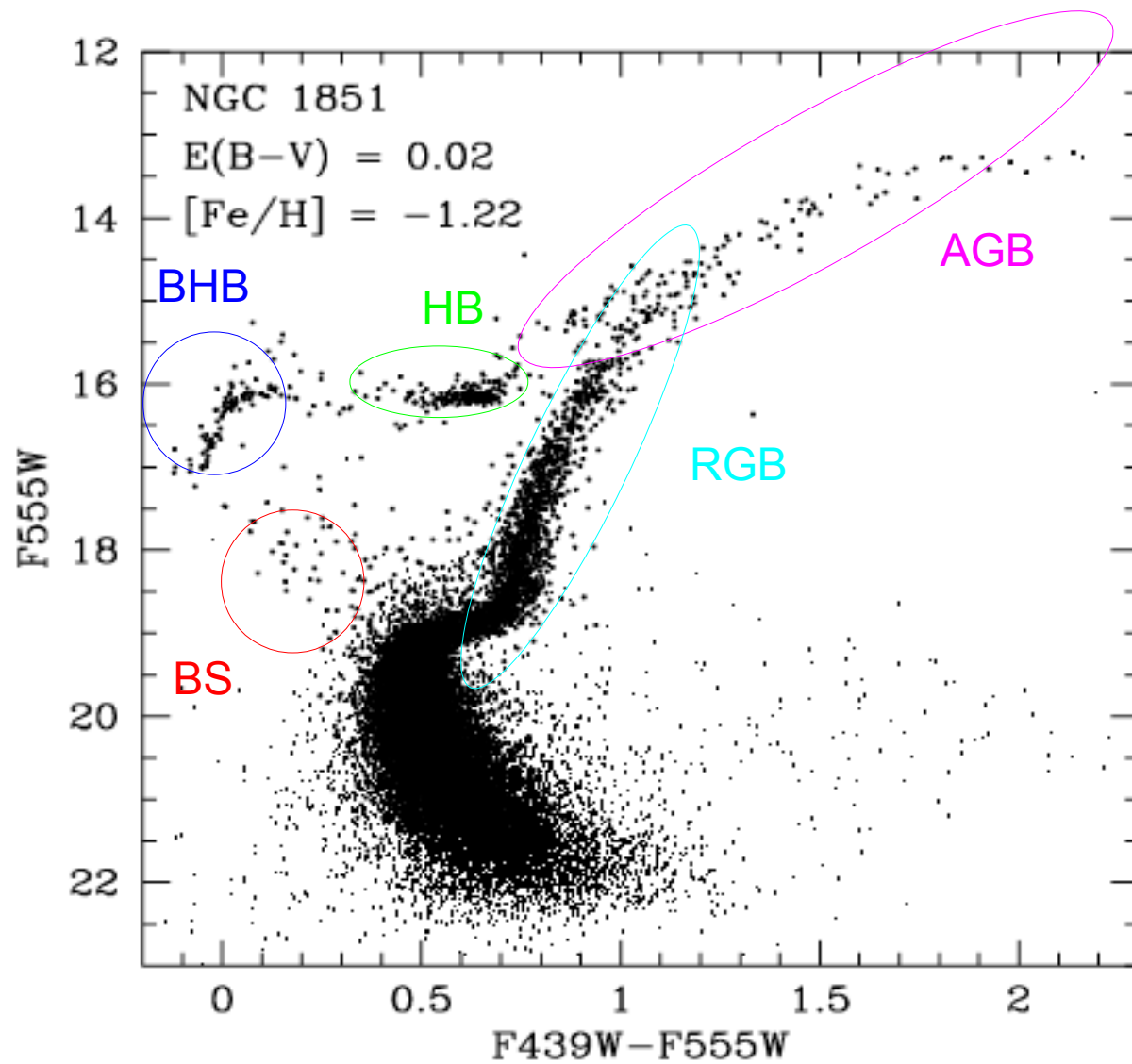
本日のお話

- (1) Red giantsのいろいろな種類の変光星の紹介
- (2) binary variation mechanisms
- (3) Almost Sequence E stars are ellipsoidal binaries
- (4) There is no evidence as sequence D is ellipsoidal binary

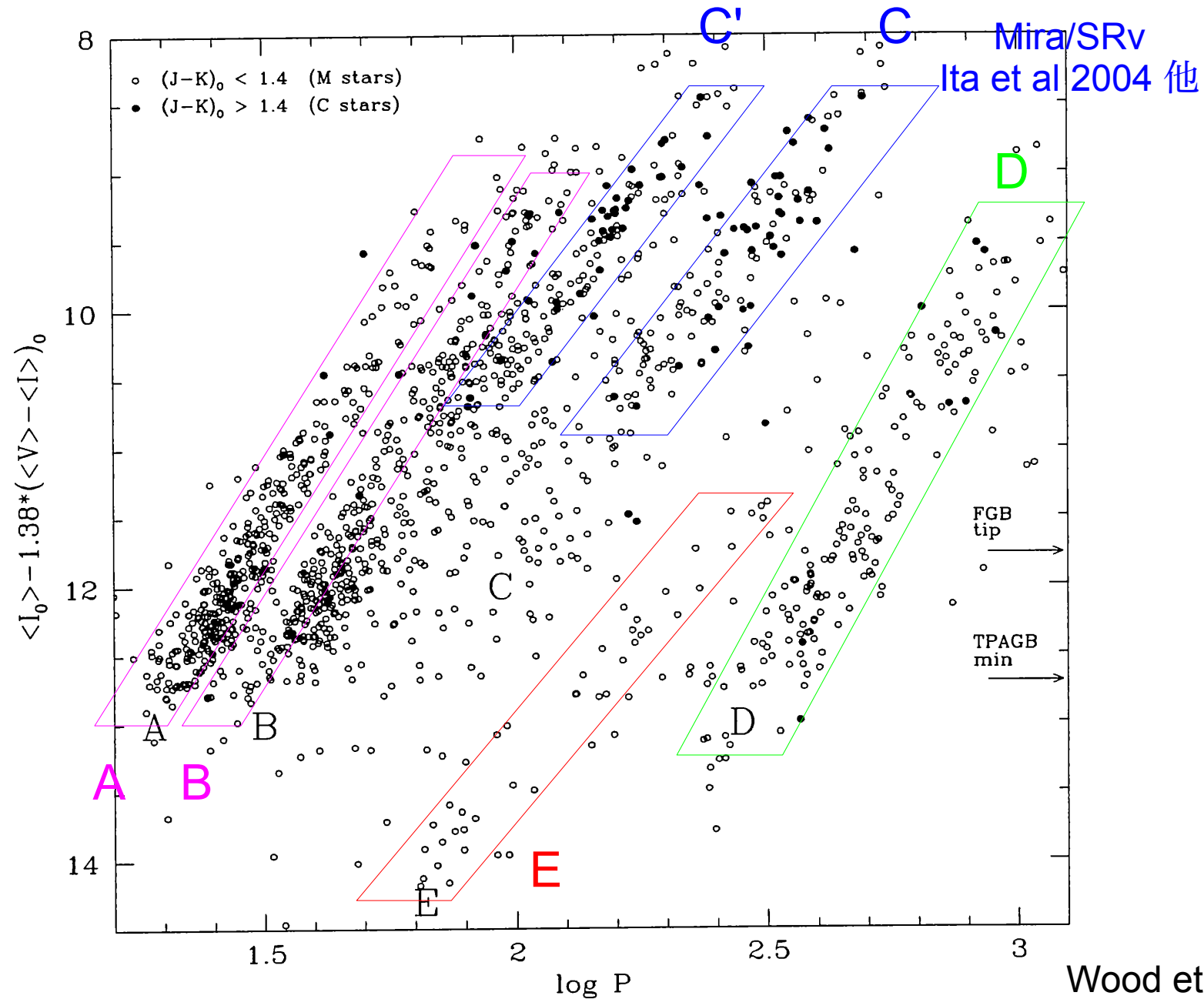
星の進化あれこれ



観測的には、



Various valuable variables of luminous RGB/AGB stars



One of the most mysterious phenomenon in the universe =>the origin of sequence D

変光現象なので脈動変光星では？

>>同じ進化段階のMira型変光星の周期(基本振動)よりさらに数倍長周期。星の構造からしてこのような長周期な脈動は励起されないはず(Wood et al 1999)

連星による変光か？

>>MIR excessが観測されない→Roche lobe overflowによる星周ダストが存在しない？(Olivier et al 2003)

のちにMIR excessは観測された(Wood & Nicholls 2009)

>>radial velocity amplitude ~ 数km/sが観測された。Binaryだと思ってbest fit modelを探したところ、sampleのほとんどで1Msun(AGB星)+0.1Msun(MS or WD)、近日点の位置が240度~320度の狭い範囲に固まる、おかしいmodelがfitしてしまった(Hinkle et al 2002)

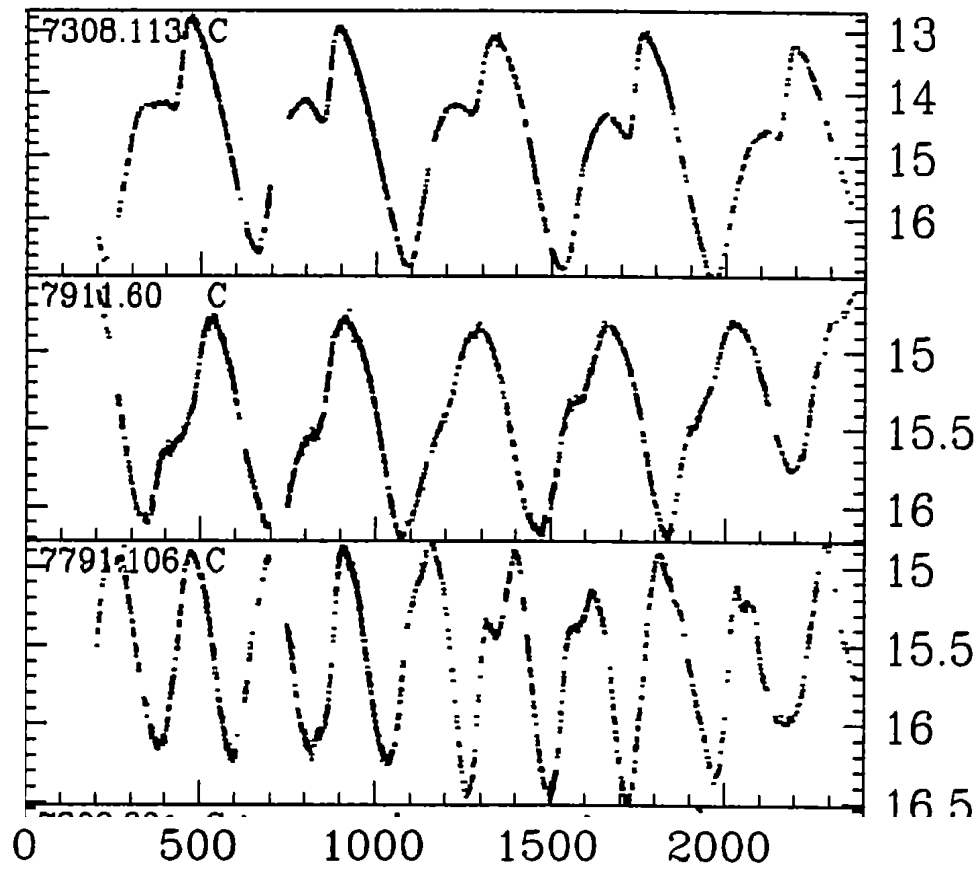
>>1Msun(AGB星)+0.1Msun(MS) modelの場合、2つの星は短時間に合体してしまう。理論的な観測確率は0.07%。実際観測されている割合は25~30%(Olivier et al 2004)

高速自転星の黒点？

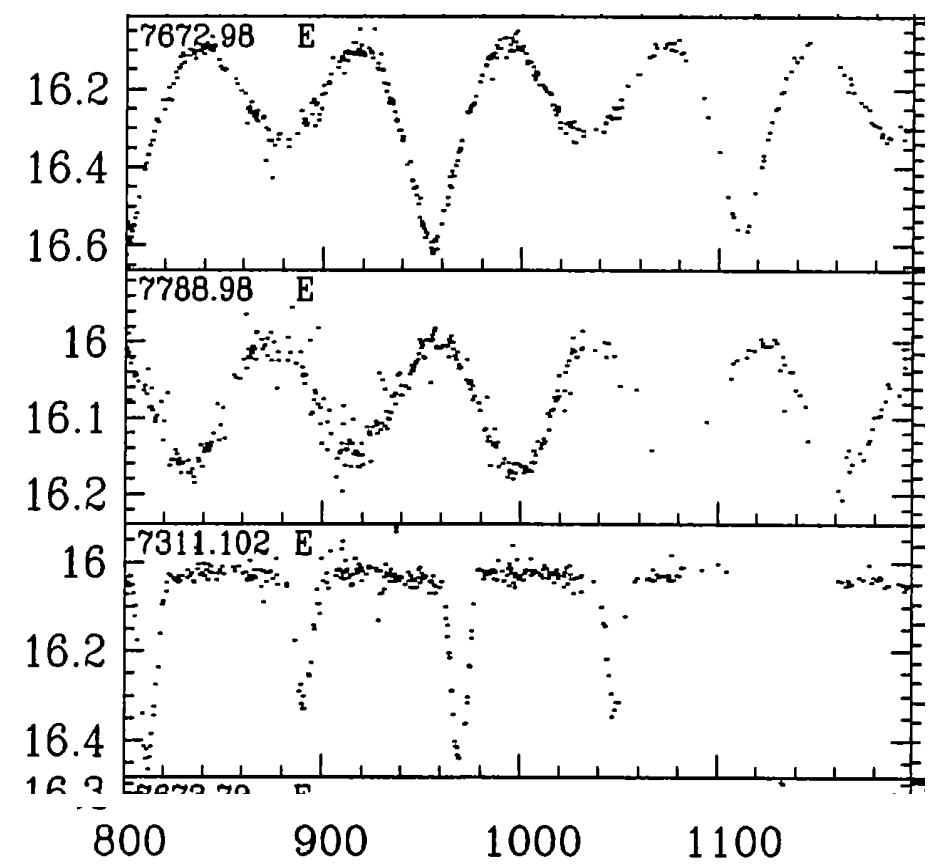
>>自転速度(赤道) > 3km/s→速すぎ。普通はせいぜい~1km/s(Olivier et al 2003)

Is sequence E made by binary stars ?

典型的なMira型変光星のlight curve
周期80~400日

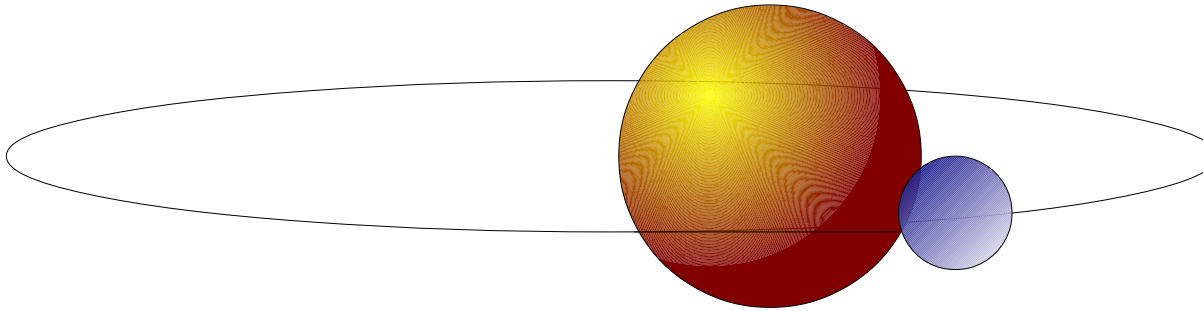


典型的なsequence E starのlight curve
周期~数100日

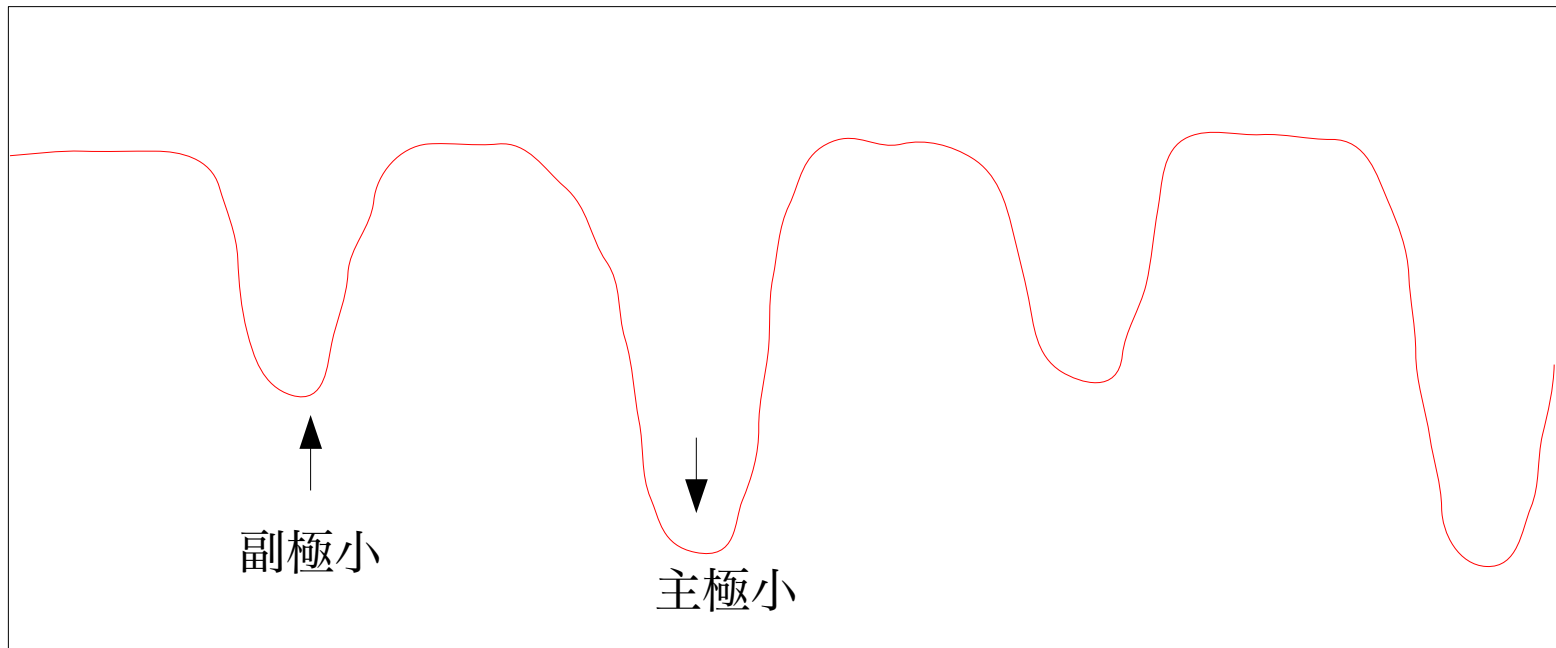


Variable mechanisms by binary ①

Eclipsing binary



光度曲線

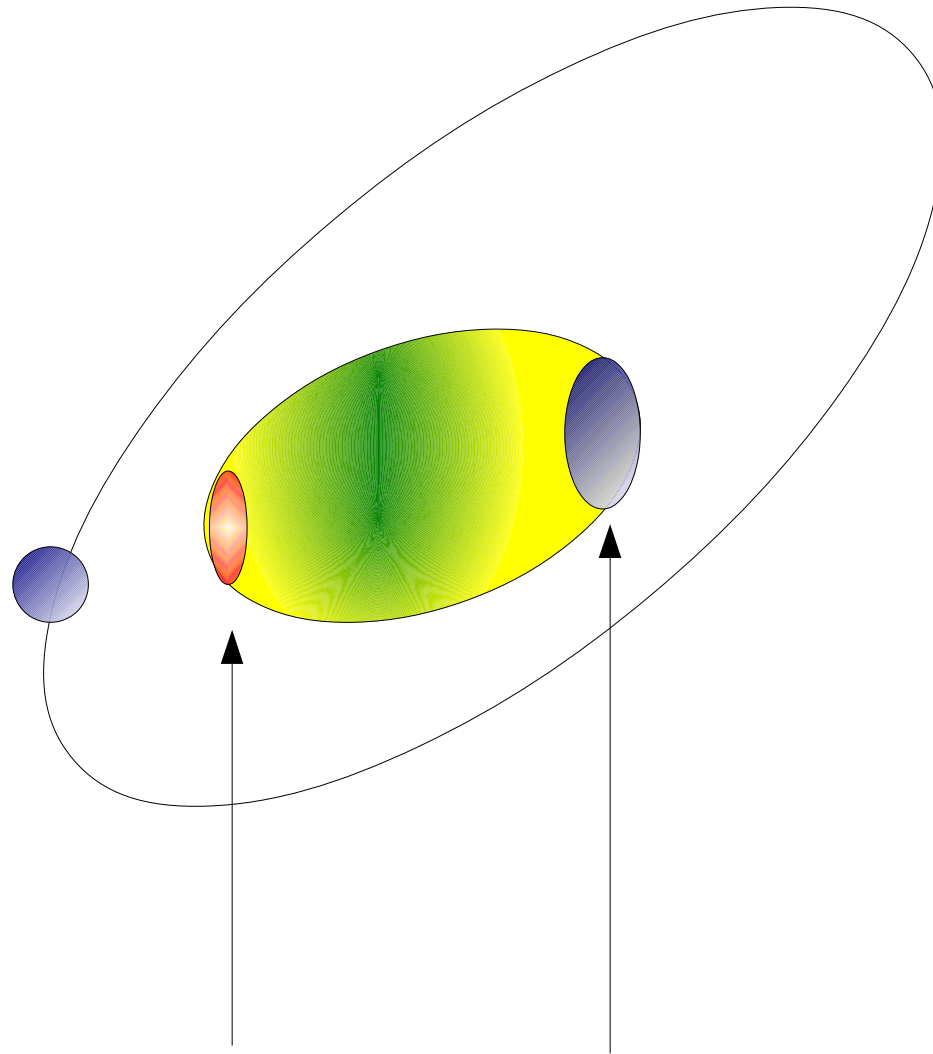


時刻

Variable mechanisms by binary ②

Ellipsoidal binary

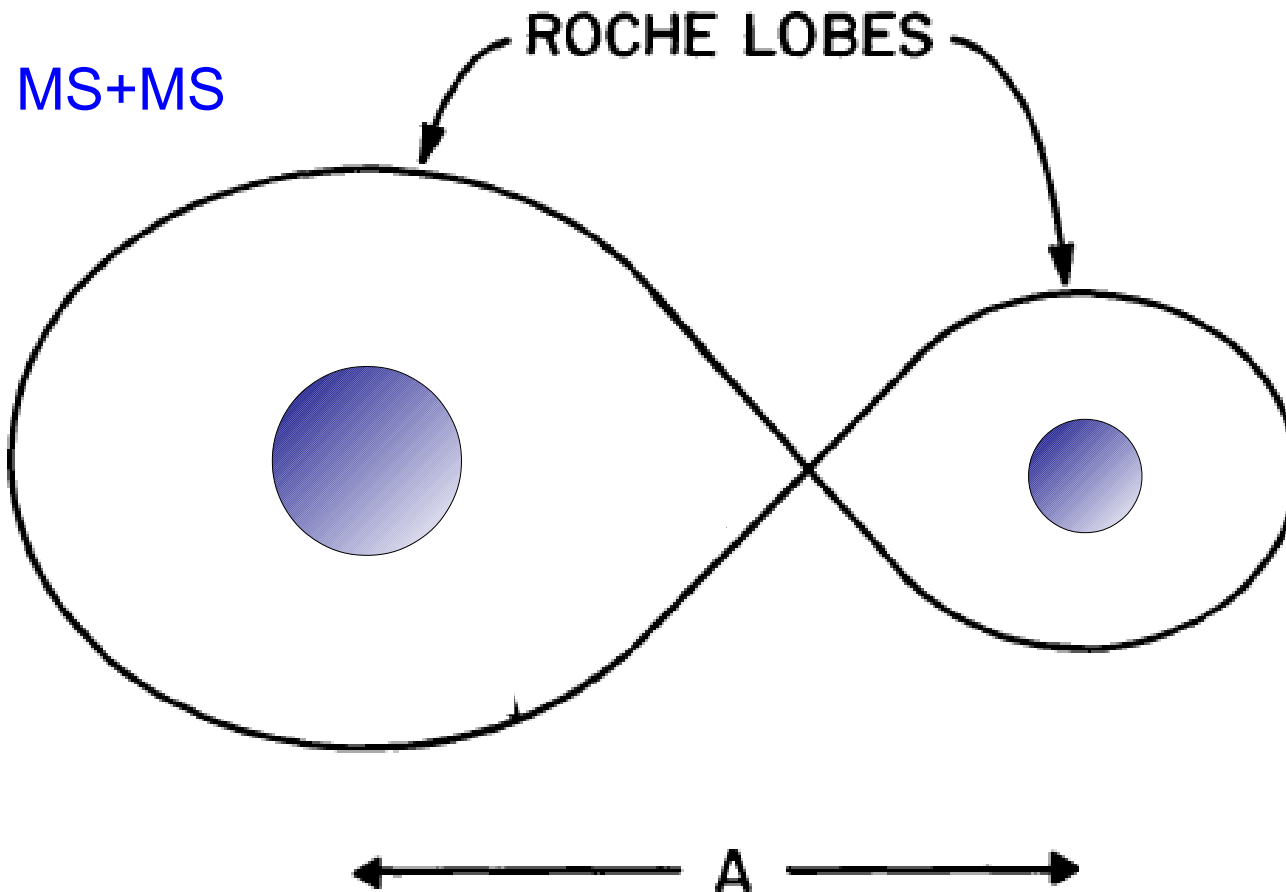
Light curveとvelocity curveの
周期の比は1:2



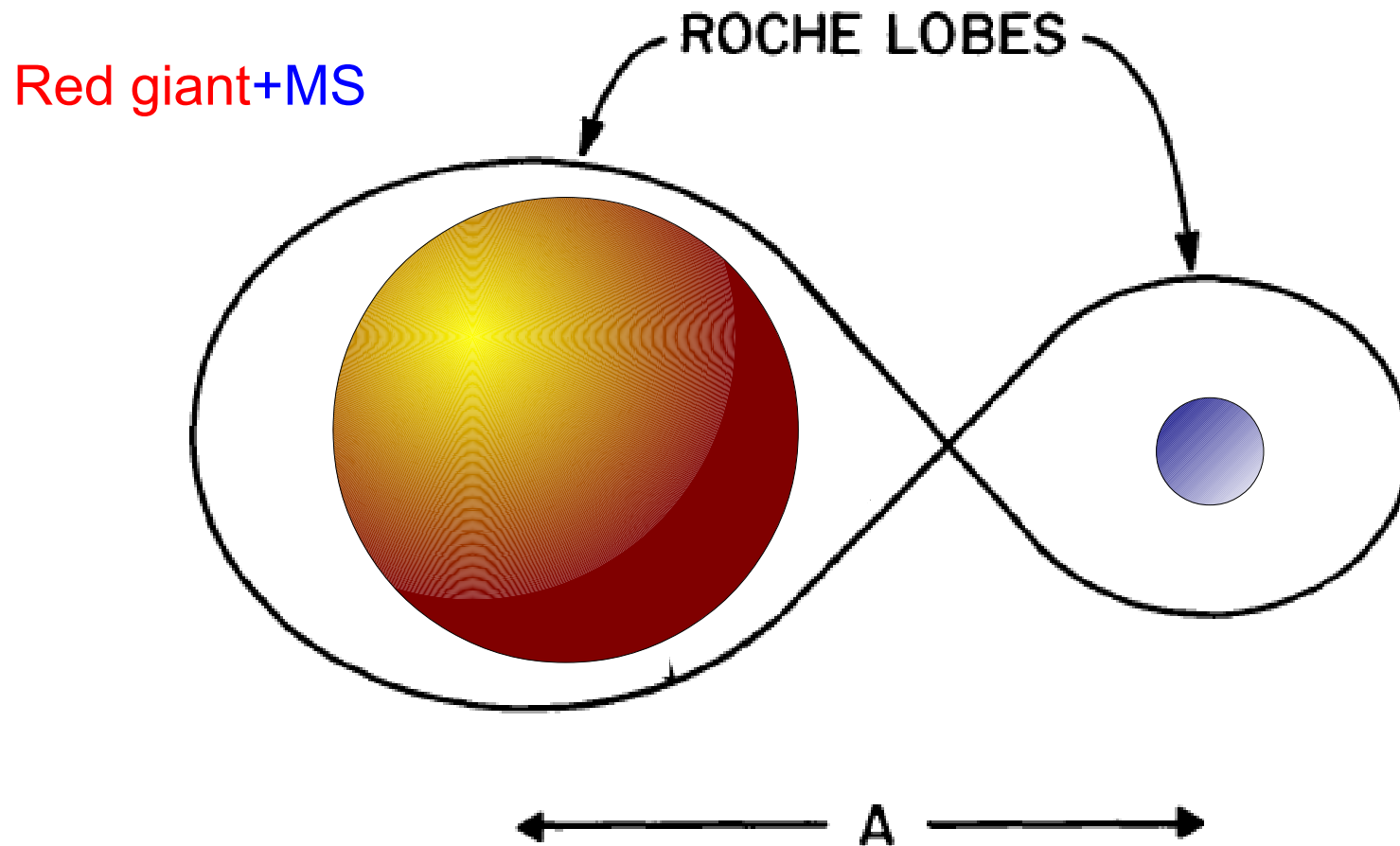
伴星の重力による潮汐力で楕円体に変形

主星表面は重力の小さい側(伴星側)で温度が低く、
反対側は(伴星側に比べ)温度が高い
→gravity darkening

なぜ楕円体に変形する？
~binary中の星と軌道要素の進化~

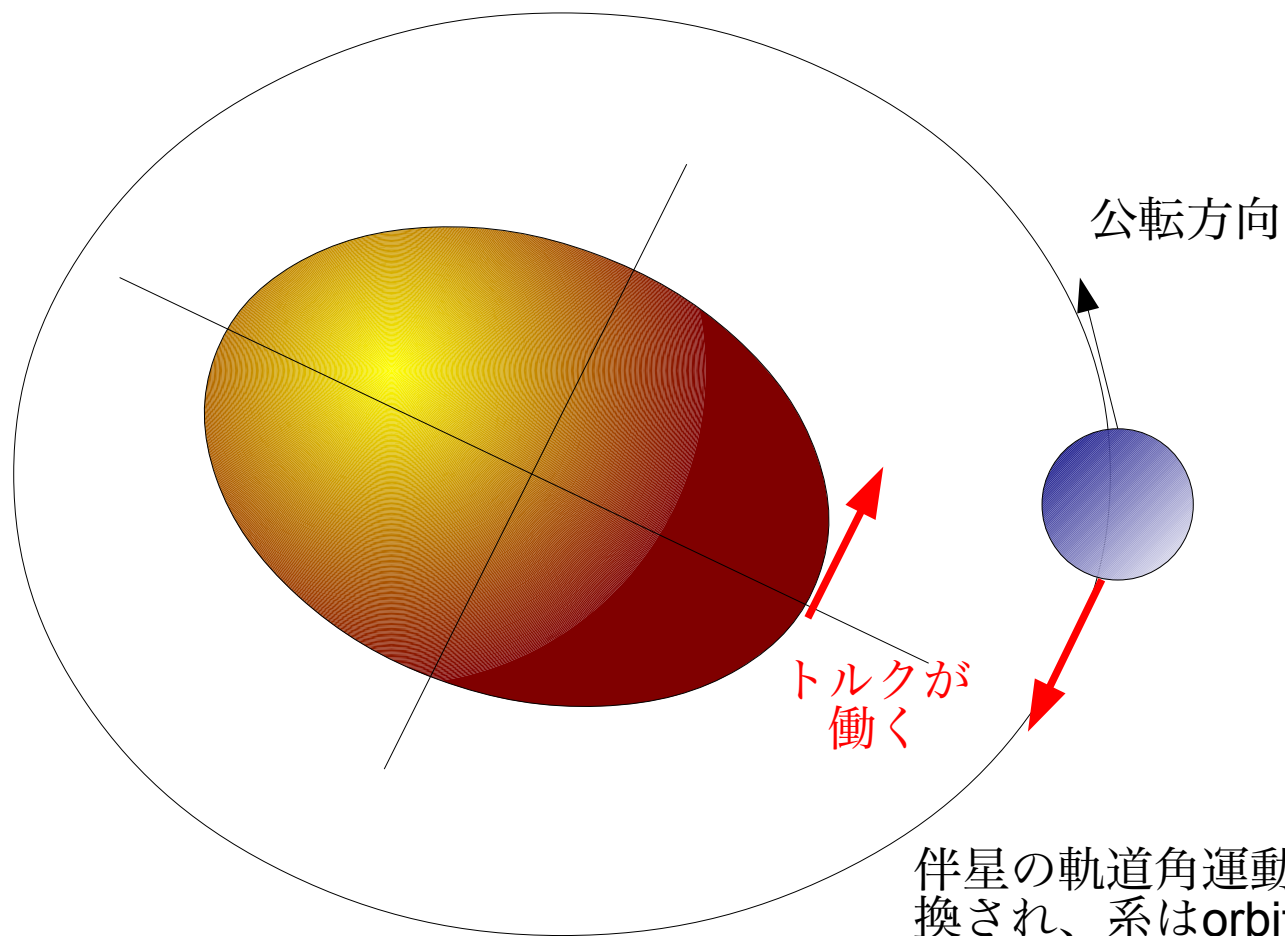


なぜ楕円体に変形する？
~binary中の星と軌道要素の進化~



なぜ楕円体に変形する？ ~binary中の星と軌道要素の進化~

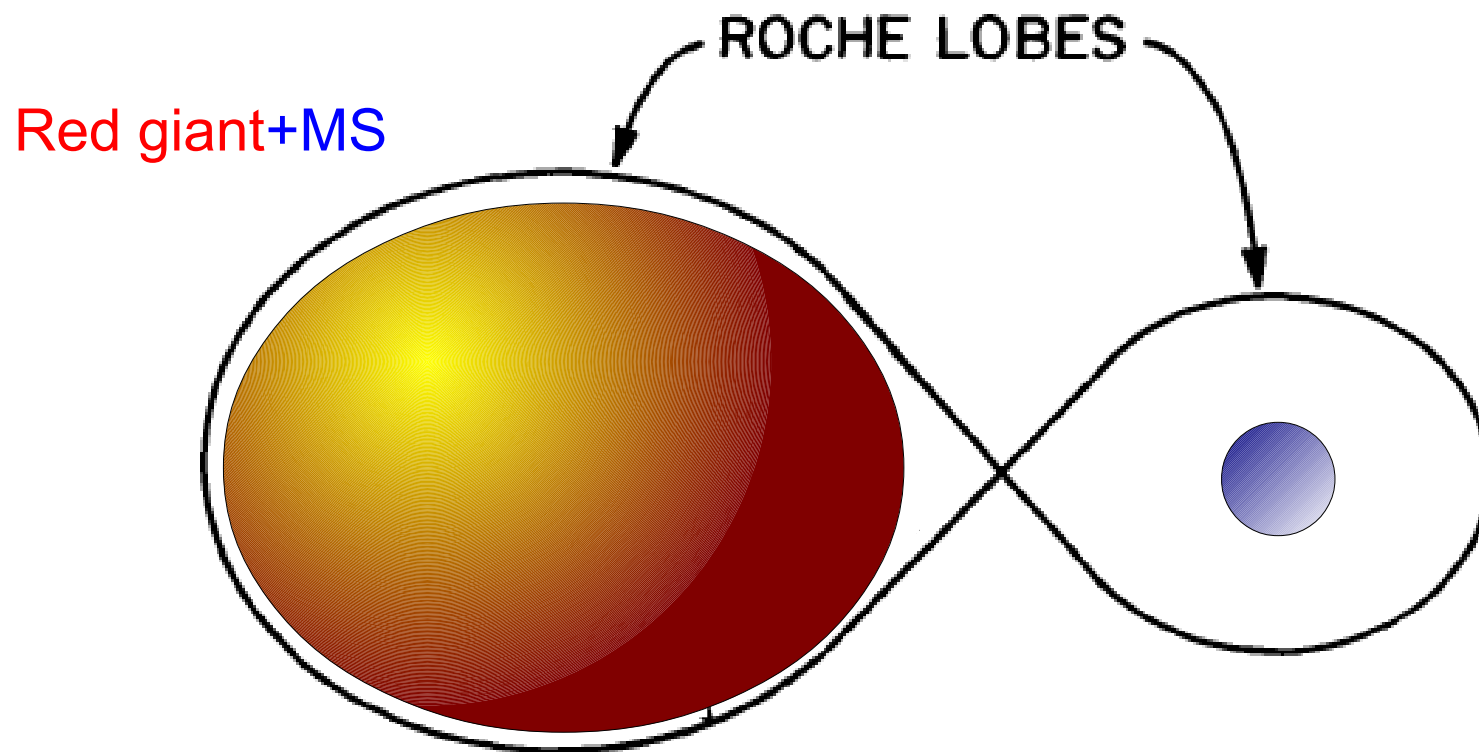
Tidal lockとeccentricityの減少



伴星の軌道角運動量が主星の自転角運動量に変換され、系はorbital energyを失っていく

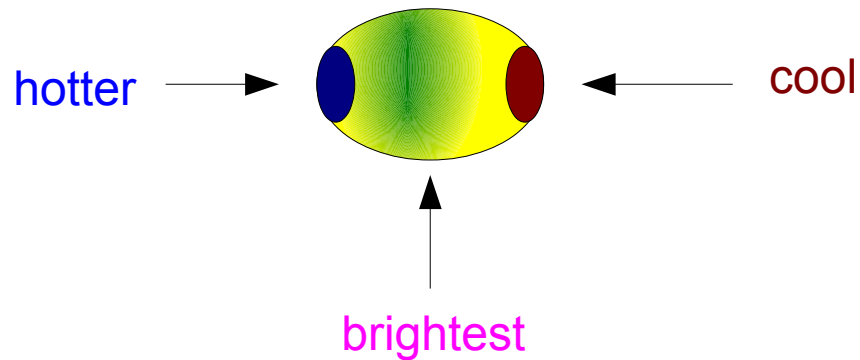
→楕円軌道が円軌道($e=0$)に近づいていく
(~3500yr-->赤色巨星の進化に比べ十分短期間)
→主星の自転角速度と公転角速度が同じになる

なぜ楕円体に変形する？
~binary中の星と軌道要素の進化~



RGは伴星の重力による
潮汐力によって引き延ば
され、Roche lobeに沿う
ようにして膨らむ
-->Roche lobe overflow

Light variationとradial velocity variationの周期比



Ellipsoidal variablesの光度は見かけの表面積で決まる！

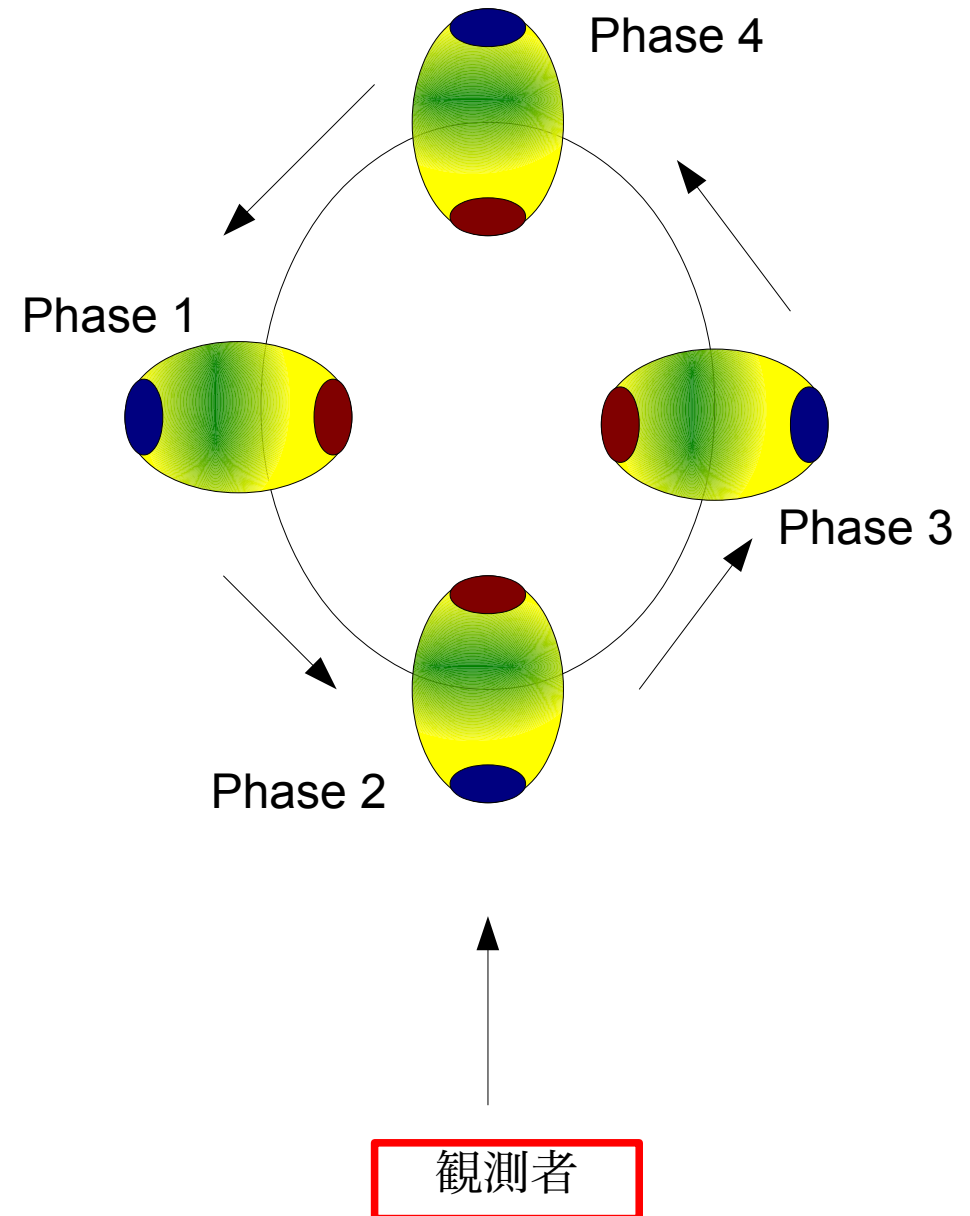
Phase 1：見かけの光度極大、視線速度最小

Phase 2：見かけの光度極小、ただし温度が高
いのでPhase 4より明るい。視線速度0*
*重心の視線速度を0として

Phase 3：見かけの光度極大、視線速度最大

Phase 4：見かけの光度極小(最小)、視線速度0

→視線速度の変化1周期に対し、
光度変化は2周期分含まれている



Light variation and velocity variation

Observations

- radial velocity observations
VLO(ESO)

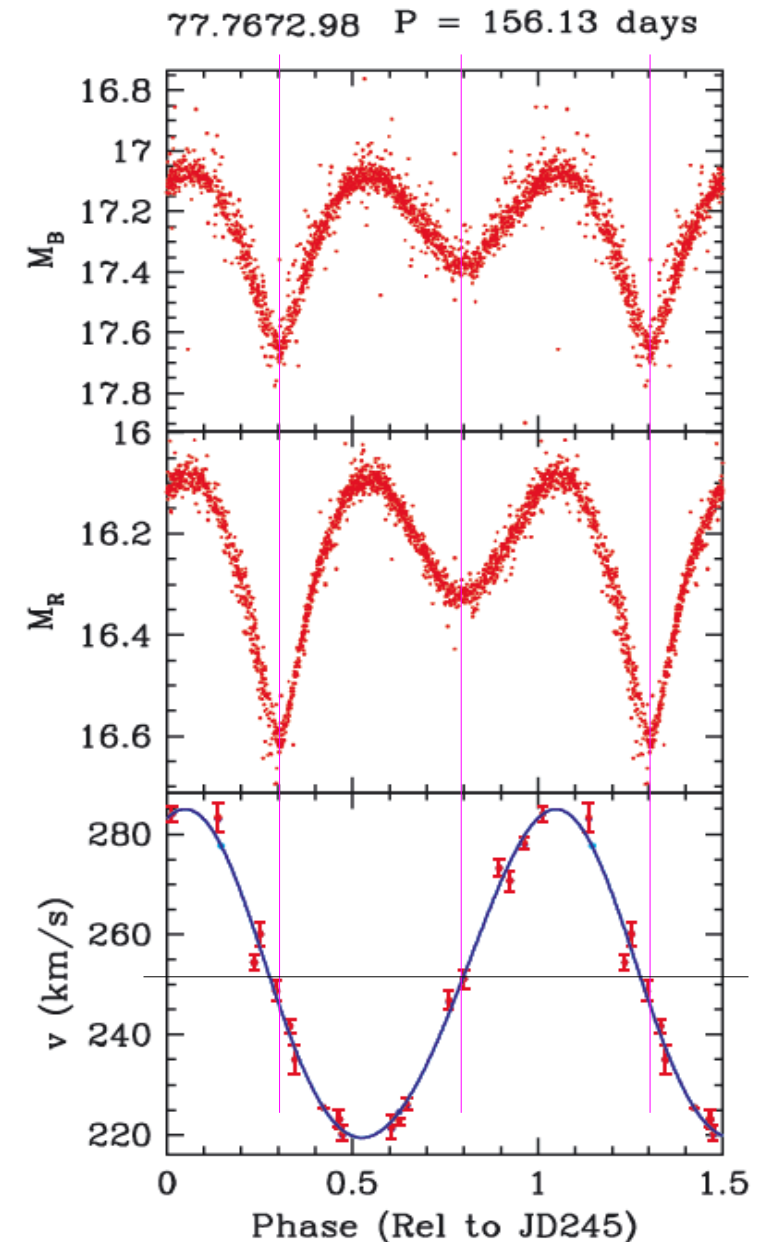
- photometric intensity observations
MACHO project

>>(例)右図

Light variation period : velocity variation period
=1:2 が見て取れる

$V_{\text{orbit}} \sim 0$ && $dV_{\text{orbit}}/dt < 0$ のとき(最も遠ざかったときに相当)light curveの主極小
→gravity darkeningを確認

以上より **sequence E**はellipsoidal binary !



Properties of sequence E system

力の釣り合い

$$m_1 r_g \omega^2 = \frac{G m_2 m_1}{a^2}$$

重心－主星間距離

$$r_g = \frac{m_2}{m_1 + m_2} a$$

軌道角速度

$$\omega = \frac{2\pi}{P} = \frac{2\pi}{2\pi r_g / \frac{K}{\sin i}}$$

Mass function

$$f(m_2) \equiv \frac{K^3 P}{2\pi G} = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2}$$

m1 : 主星mass、m2 : 伴星mass、a : 2星間距離、P : 軌道周期
K : velocity amplitude、i : inclination

Properties of sequence E system

Total system mass = $m_1 + m_2 = 2M_{\text{sun}}$

Mass ratio $q = m_2/m_1$

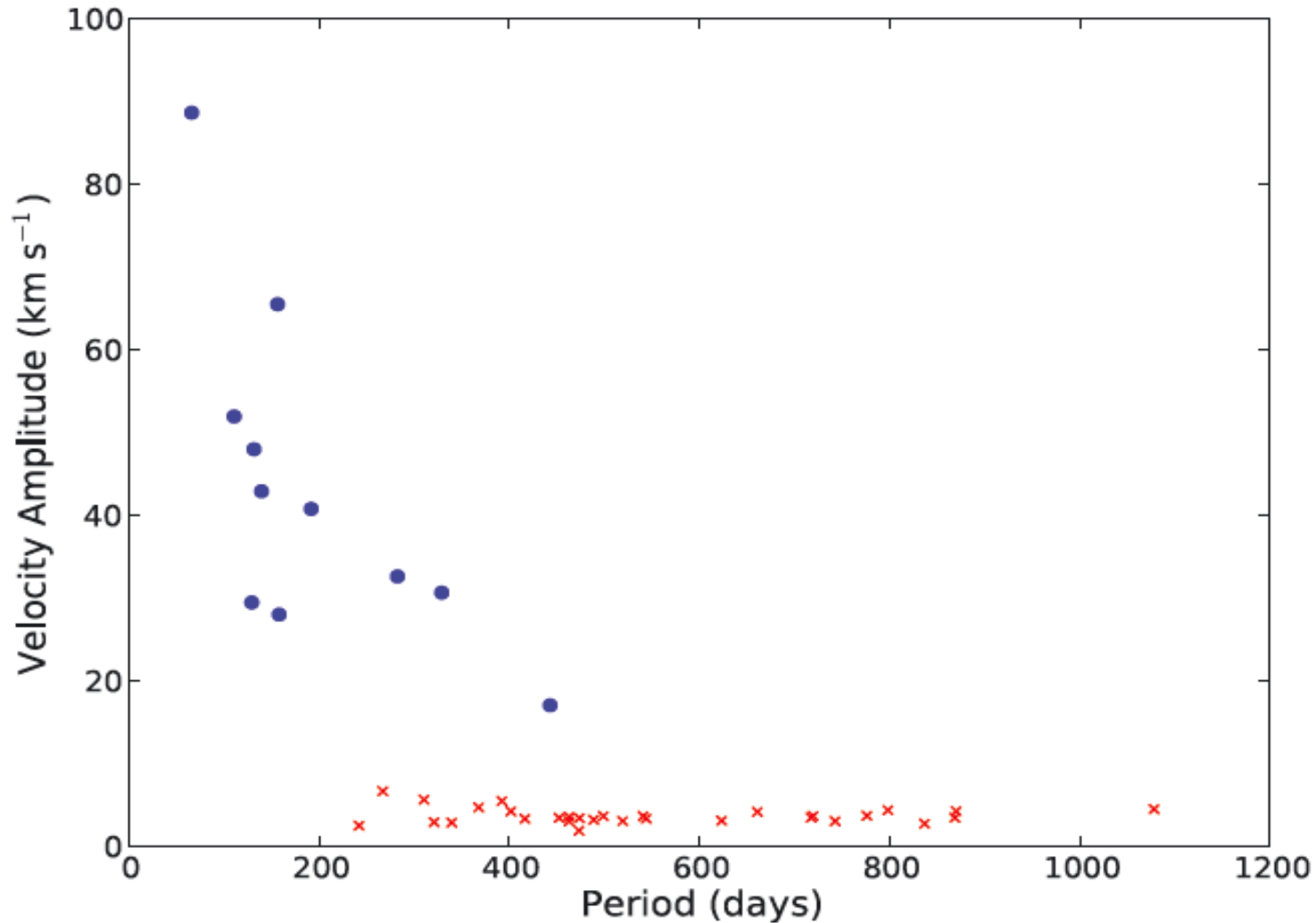
,,,とすれば,,,

$$f(m_2) \equiv \frac{K^3 P}{2\pi G} = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2}$$

与えられた周期の中でvelocity amplitudeが最大となるシステムは、 $q=1$ すなわち $m_1=m_2$

逆に周期が長くなるほどvelocity amplitudeの上限は小さくなる

Properties of sequence E system



青丸：sequence E star-->periodが大きいかほど観測される最大の velocity amplitudeは小さくなる傾向が見える

赤丸：sequence D star-->periodに関わりなく velocity amplitude はほぼ同じ

Properties of sequence E system

Ellipsoidal binary

-->主星はRoche lobeを満たすくらい膨らんでいる

-->このとき主星は大きく膨らんでいる程明るい

&

Orbital periodが大きい

-->2星間が離れている

-->Roche lobe radiusが大きい

$$\frac{R_L}{a} = \frac{0.49q^{-\frac{2}{3}}}{0.6q^{-\frac{2}{3}} + \ln(1 + q^{-\frac{1}{3}})}$$

Eggleton (1983)

*RL=Roche lobe radius



Orbital periodが大きいほど主星は明るい

☆前スライドでorbital periodが大きいほどvelocity amplitudeの最大値が小さくなることを示した

-->明るい星ほどvelocity amplitudeの最大値は小さくなる！？

Properties of sequence E system

total massを与えた場合、velocity amplitudeが最大となるのは $q=1$ のとき

$$a = \frac{R_*}{\frac{0.49q^{-\frac{2}{3}}}{0.6q^{-\frac{2}{3}} + \ln(1+q^{-\frac{1}{3}})}} = \frac{R_*}{0.37}$$

R^* =stellar radius
 $R^*=R^*(m1, L)$

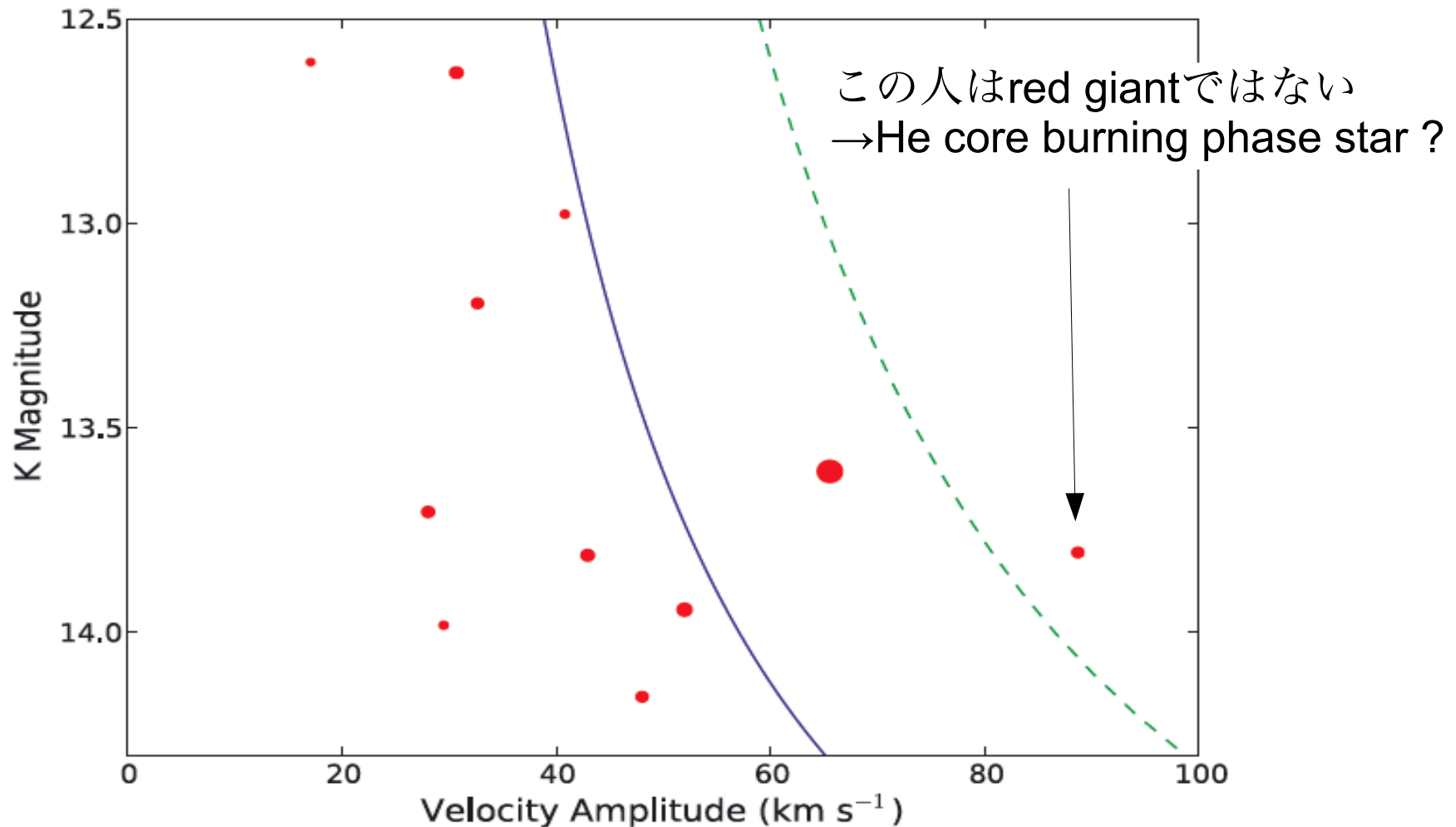
$$P = \frac{2\pi r_g}{\frac{K}{\sin i}} = \frac{2\pi a \sin i}{(1+q)K}$$

$$K_{max} = \sqrt{\frac{0.37m_2G \sin^2 i}{(1+q)R_*}}$$

$\sin i = 1, q=1$
 $m1=m2=1\text{Msun}$
 $R^*=R^*(1\text{Msun}, L)$

※星の進化計算から、明るくなる($L \rightarrow$ 大)ほど R^* は大きくなる

Properties of sequence E system



赤丸：観測されたsequence E star

青線： $m_1 = m_2 = 1 \text{ Msun}$ の曲線、 緑線： $m_1 = m_2 = 2.3 \text{ Msun}$

観測されたvelocity amplitudeの最大値は星の光度が明るくなるほど小さくなる

Calculation results

e~0

バラエティが豊富

Star	γ (km s ⁻¹)	K (km s ⁻¹)	e	ω (deg)	T (HJD)	P (d)	$a \sin i$ (R _☉)	$f(m)$ (M _☉)	M^a (M _☉)	m (M _☉)
77.7429.189	281.40 ± 0.57	25.99 ± 0.80	0.05 ± 0.03	275.38 ± 28.52	3332.5 ± 8.8	110.34	56.58 ± 1.75	0.2003 ± 0.0186	1.07	0.93
77.7548.68	247.20 ± 0.19	8.54 ± 0.24	0.07 ± 0.03	170.67 ± 25.63	3502.6 ± 32.9	442.83	74.55 ± 2.22	0.0285 ± 0.0024	1.52	0.48
77.7672.98	250.71 ± 0.75	32.77 ± 1.10	0.06 ± 0.03	38.99 ± 29.11	2989.4 ± 12.3	156.13	100.92 ± 3.42	0.5679 ± 0.0575	2.27	2.27
77.7673.79	252.37 ± 0.41	24.01 ± 0.59	0.02 ± 0.02	236.49 ± 61.77	3064.4 ± 22.6	131.35	62.30 ± 1.55	0.1887 ± 0.0140	1.09	0.91
77.7789.152	255.04 ± 0.74	14.03 ± 0.97	0.05 ± 0.08	198.55 ± 90.81	3024.2 ± 40.5	157.73	43.67 ± 3.05	0.0451 ± 0.0094	1.44	0.56
77.7790.72	275.00 ± 0.83	15.35 ± 0.92	0.19 ± 0.06	262.20 ± 13.11	3326.7 ± 10.2	328.79	97.85 ± 6.02	0.1167 ± 0.0214	1.22	0.78
77.7791.115	350.88 ± 0.30	21.47 ± 0.35	0.03 ± 0.02	275.04 ± 40.51	3032.0 ± 16.3	139.18	59.02 ± 0.97	0.1429 ± 0.0070	1.17	0.83
77.7910.41	238.06 ± 0.55	20.41 ± 0.66	0.08 ± 0.04	10.03 ± 21.82	3075.8 ± 11.8	191.46	76.94 ± 2.53	0.1673 ± 0.0163	1.13	0.87
77.7910.77	255.34 ± 1.67	44.35 ± 2.83	0.08 ± 0.04	279.65 ± 38.55	2987.6 ± 7.1	65.72	57.38 ± 3.67	0.5890 ± 0.1131	2.36	2.36
77.7912.111	231.16 ± 0.45	14.76 ± 0.62	0.06 ± 0.04	223.73 ± 41.73	3075.1 ± 14.7	128.89	37.50 ± 1.57	0.0428 ± 0.0054	1.44	0.56
77.7914.74	305.31 ± 0.11	16.33 ± 0.14	0.02 ± 0.01	272.80 ± 24.26	3271.8 ± 18.9	282.24	91.04 ± 0.79	0.1276 ± 0.0033	1.20	0.80

^aHere we assume $\sin i = 1$.

結論

Sequence Eはellipsoidal binaryであることをlight & velocity variationから示した。

Sequence D starはsequence Eに見られるvelocity amplitudeとperiodの関係を示さなかった。またamplitudeのrange自体も両者で異なる

Sequence Eのmass ratioにはそれなりのばらつきがある点がsequence Dとは異なる。

Sequence Dは(少なくとも)ellipsoidal binary systemでは説明できない現象である。