

半分離型食連星IU Perの 物理量の導出

津山高専，高知大理工^A，船穂天文台^B
佐々井祐二，坪井元春^A，赤澤秀彦^B

目的

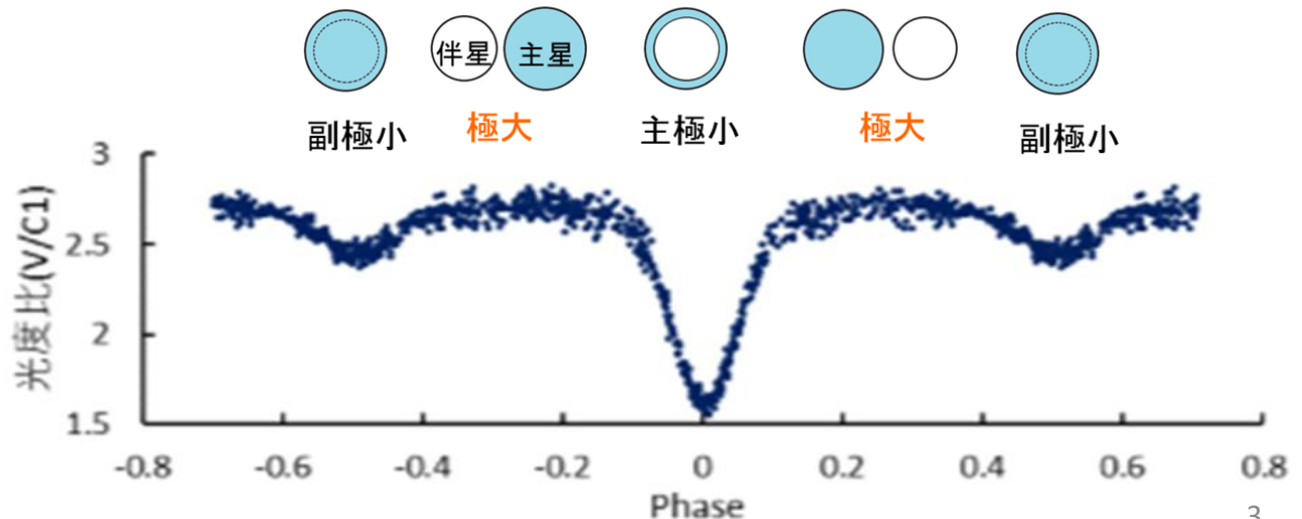
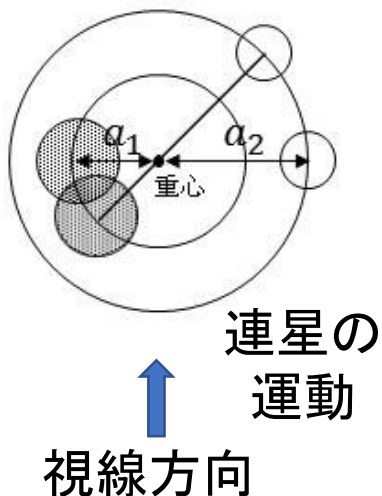
食連星の測光データ(小口径望遠鏡+冷却CCDカメラ)で物理量の比が得られる。絶対値を得るためには、視線速度を生成する分光データ(分光器)が必要であるが、口径1m程度の望遠鏡でも取得が困難である。そこで、教育現場でも取得可能な測光データに情報を追加しスケールを組み込み解析を行いたい。測光データの有効活用を図りたい。

いきさつ

- 6月21日に、津山高専(岡山県北)総合理工学科先進科学系2年生の校外見学(担任, 副担任+おまけの発表者)で、西はりま天文台を訪問させて頂き、講義やなゆた望遠鏡見学でお世話になりました。ありがとうございました。
- その関係で、今回、活動発表の機会を頂戴しました。
- 本発表は、赤澤氏の測光観測データを、2020年度に発表者と当時の学生で解析した少々前の内容です。
- 発表者は元々、素粒子論の量子色力学で大規模数値計算などをやっていました。天文アマチュアです。
- プロの天文研究者の方々にご教示頂けますと幸いです。

食連星

- 主星と伴星があり、これらの成分星が万有引力により影響し合うことにより、重心の周りで軌道運動をしている。
- 地球から見たときに、成分星が互いを隠しあうことで変光する。
- 天体の1/3が連星であり、天文学における重要な情報源
- 測光データは教育機関やアマチュアの小口径望遠鏡+冷却CCDカメラでも取得できる。 → 半径比のような比が分かる。
- 絶対値を導出するには、視線速度を生成する分光データが必要だが、口径1mクラスの望遠鏡でも難しい。



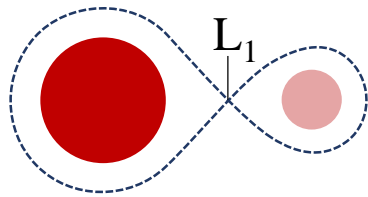
食連星の分類法

コパールの分類

ロッシュローブ：内部ラグランジュ点 L_1 を通る等ポテンシャル面

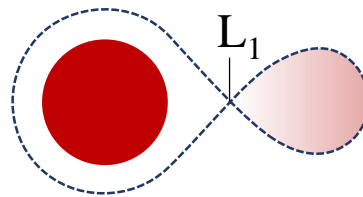
分離型

(D: Detached)



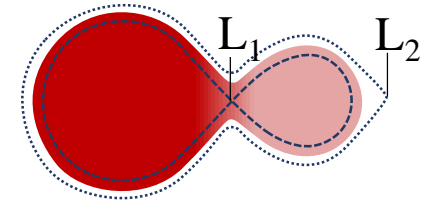
半分離型

(SD: Semidetached)



接触型

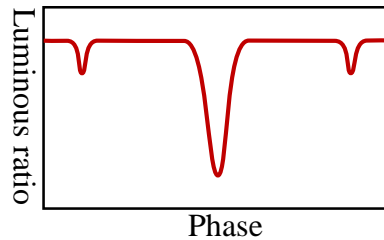
(K: [英]Contact, [独]Kontakt)



光度曲線による分類

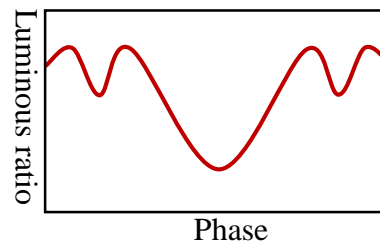
アルゴル型

(EA: Algol-Type)



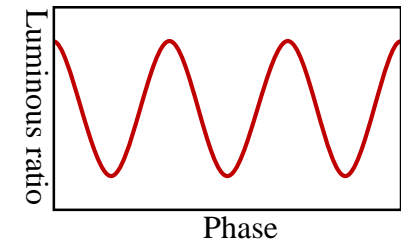
こと座β型

(EB: Beta Lyrae-Type)



おおぐま座W型

(EW: W Ursae Majoris-Type)



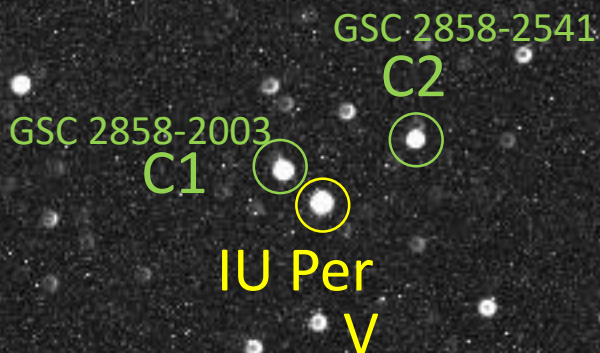
主星と伴星が十分に離れている

両星がかなり接近している

両星が接触し共通大気となっている

ペルセウス座IU星 (IU Per) の測光観測

赤澤は2018年12月13日から31日に掛けて、倉敷市の船穂天文台にて口径20cm望遠鏡を用いた測光観測を行い、Johnson ICフィルタの測光観測データを得た。ライト画像総数は2178枚である。



GSC 2858-2541
C2
GSC 2858-2003
C1
IU Per
V

変光星 V: IU Per

比較星 C1: GSC 2858-2003

C2: GSC 2858-2541

について、アパチャ測光し
その結果を

元期 (EPOC) 2458465.96629HJD

周期 $P=0.8570251\text{day} \doteq 20\text{時間}34\text{分}$

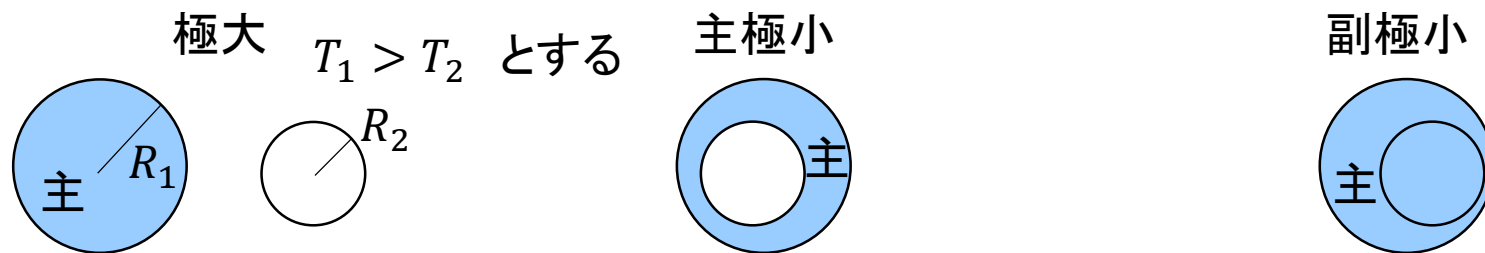
光度比 V/C1一位相 の光度曲線を作り、解析する。

スペクトル型: A4V

測光のためピントを甘くしている

測光観測で分かる物理量の例 (半径比と温度比)

周辺減光を無視し, 地球方向に均一な放射があるという簡単化のための仮定を置き, シュテファン・ボルツマンの法則 $E = \sigma T^4$ [J/(m²·s)] を用いると

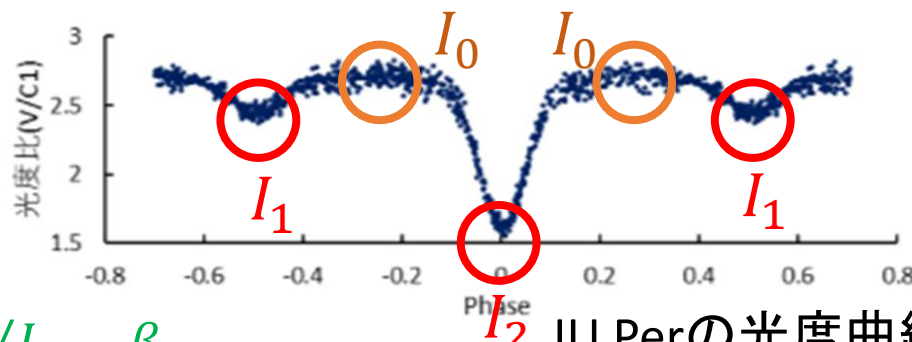


最大光度 (極大) $I_2 = \sigma\{\pi(R_1^2 - R_2^2)T_1^4 + \pi R_2^2 T_2^4\} = 1.60$ $I_1 = \sigma\pi R_1^2 T_1^4 = 2.41$
 $I_0 = \sigma(\pi R_1^2 T_1^4 + \pi R_2^2 T_2^4) = 2.68$

副極小に対する光度比

$$\frac{I_0}{I_1} = 1 + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = \frac{1}{I_1/I_0} = \frac{1}{\alpha}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = \frac{I_2/I_0}{I_1/I_0} = \frac{\beta}{\alpha}$$

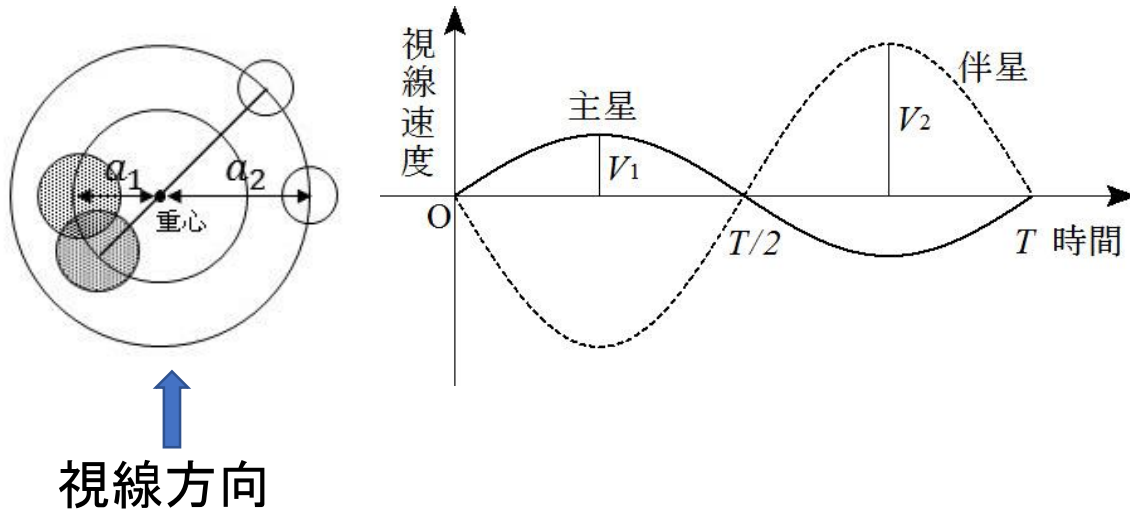


I_2 IU Perの光度曲線

半径比 $\frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} = 1.49$ 温度比 $\frac{T_1}{T_2} = \sqrt[4]{\frac{1 - \beta}{1 - \alpha}} = 1.32$

高校物理, 地学で理解できる。第38回国際物理オリンピックイラン大会のPink問題

分光観測による視線速度取得



光のドップラー効果により、視線速度の大きさ

$$V_1 = \frac{2\pi a_1}{T} \quad V_2 = \frac{2\pi a_2}{T}$$

が分かると、連星間距離

$$a = a_1 + a_2$$

これでスケールが入る。

- 絶対値を導出するには、視線速度を生成する分光データが必要だが、口径1mクラスの望遠鏡でも難しい。
 - 測光データだけだと、物理量の比しか分からない
- 教育機関やハイアマチュアの小口径望遠鏡で取得される測光データの有効活用を図るには？

アイデア

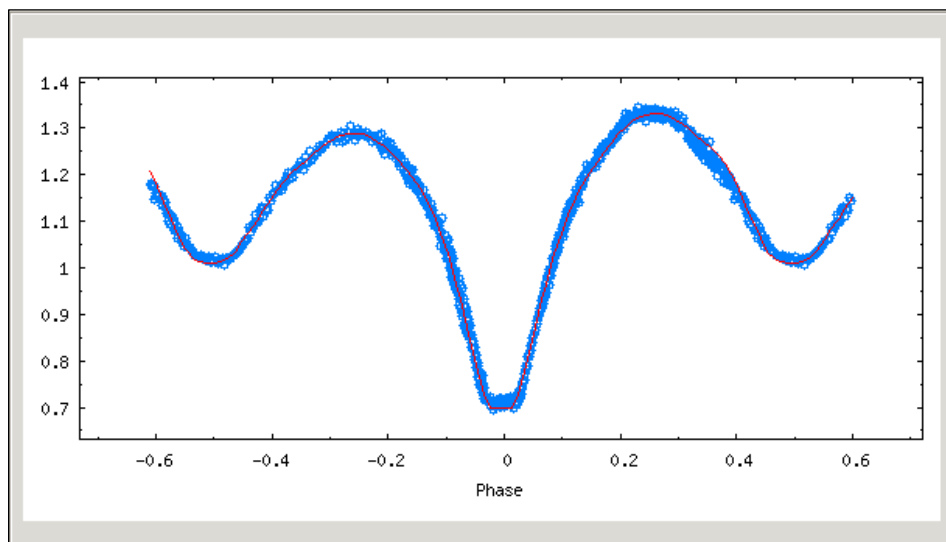
- i. 詳細なスペクトル型を把握し、同型スペクトル星の研究データから主星温度と質量を推定する。
- ii. 天文学の理科年表であるCox他 (2000) の質量光度関係のデータから主星温度と質量を推定する。(方法が分かったので、次の食連星からは実施している)

Cox A. N., ed. "Allen's Astrophysical Quantities (4th ed.)", (2000) 338.

- iii. 成分星の質量比 q について、これは先行研究の数値を使う。
- iv. q を変化させ光度曲線とフィッティング曲線との誤差の最小値を調べる q -探索から q を決定する。(最終的にはこれを目指す)
- v. 主星質量と質量比が分かれば、一般化されたケプラーの第3法則より、成分星間距離が分かり、スケールが入る。
- vi. もちろん、先行論文は参考にする。

PHOEBE(PHysics Of Eclipsing BinariEs)による解析

- 米国ピラノバ大学のAndrej Prsaらが開発しているフリーソフト
- 光度曲線合成法に基づいたWilson-Devinneyコードを実装
- Windows8.1上でないと動作しないが, Python上で動作するPHOEBE2が登場してる。



光度比一位相グラフ
別の食連星BL Andの観測光度曲線とフィッティング曲線(赤線)

- 観測光度曲線とフィッティング曲線(赤線)を一致させるようにパラメータを調整
- チューニングしたパラメータ → 物理量

いくつかのパラメータを仮定する必要がある

スケール導入のための考察

A4V型

同型の恒星に関する研究から (HR2285とHR4632)

質量光度関係利
用が良い

M.A.Malkan, et al. : Micron Spectral Atlas of Stars, Astrophys. J. Suppl. 142(2002) 79-94.

Saul J. Adelman : The physical properties of normal A stars, IAU Symposium, No. 224 (2004) 1-11.

主星の表面温度 $T_1 = 8375 \text{ K}$

質量 $M_1 = 1.92 M_\odot$ (M_\odot : 太陽質量)

IU Perに関する先行研究 (Zhang他 (2009)) から

今後 q -探査をやりたい

Xiao-Bin Zhang, Rong-Xian Zhang and Qi-Sheng Li : The semi-detached binary system IU Per and its intrinsic oscillation, Research in Astronomy and Astrophysics, Vol. 9 No. 4 (2009) 422-430.

質量比 $q = \frac{M_2}{M_1} = 0.2738$ $\therefore M_2 = 0.526 M_\odot$

成分星間距離 a について

一般化されたケプラーの第3法則

太陽と地球の場合 ($q \doteq 0$)

$$\begin{aligned} M_1 + M_2 &= \\ M_1(1 + q) &= \frac{a^3}{G} \left(\frac{2\pi}{P} \right)^2 \end{aligned}$$

$$M_\odot = \frac{(2.15 \times 10^2 R_\odot)^3}{G} \left(\frac{2\pi}{365.3} \right)^2$$

従って

$$a^3 = \frac{M_1(1 + q)}{M_\odot} (2.15 \times 10^2 R_\odot)^3 \left(\frac{P}{365.3} \right)^2 \therefore a = 5.12 R_\odot$$

PHOEBEによるIU Perの解析

仮定パラメータ	PHOEBE記号	値
エポックタイム	HJD0	2458465.96629
変光周期 P [day]	PERIOD	0.8570257
主星表面温度 T_1 [K]	TAVH	8375
質量比 q	RM	0.2738
半長径 a	SMA	$5.116 R_{\odot}$ (スケールが入った)

The screenshot shows the PHOEBE software interface for IU Per. The window title is "PHOEBE - IU_Per". The menu bar includes File, Settings, and Help. The toolbar contains icons for Open, Save, LC Plot, RV Plot, Fitting, Settings, and Quit. The main panel has tabs for Data, Parameters, Fitting, and Plotting. Under the Parameters tab, there are sub-tabs for Ephemeris, System, Orbit, Component, Surface, Luminosities, Limb Darkening, and Spots. The System sub-tab is active, showing parameters for SMA, RM, VGA, and INCL. Each parameter has a text input field, a checkbox, and a range control (Step, Min, Max). The Results summary panel on the right lists various parameters and their values.

Parameter	Value
$\Omega(L_1)$	2.407591
$\Omega(L_2)$	2.235852
Mass 1	1.926620
Mass 2	0.527509
Radius 1	1.730736
Radius 2	1.398780
$M_{bol} 2$	1.983277
$M_{bol} 1$	4.649505
$\log(g) 1$	4.246183

パラメータフィッティング

File Settings Help



Data Parameters Fitting Plotting

Ephemeris System Orbit Component Surface Luminosities Limb Darkening Spots

TAVH - Primary star effective temperature in K

 8375 Step: 10 Min: Max:

TAVC - Secondary star effective temperature

 5042 Step: 10

PHSV - Primary star surface potential

 3.28000 Calculate 0.01000

PCSV - Secondary star surface potential

 2.40900 Calculate 0.01000

MET1 - Primary star metallicity

 0.000 Step: 0.010

MET2 - Secondary star metallicity

 0.000 Step: 0.010

Results summary

Parameter	Value
$\Omega(L_1)$	2.407591
$\Omega(L_2)$	2.235852
Mass 1	1.926620
Mass 2	0.527509
Radius 1	1.730736
Radius 2	1.398780
$M_{bol} 2$	1.983277
$M_{bol} 1$	4.649505
$\log(g) 1$	4.246183

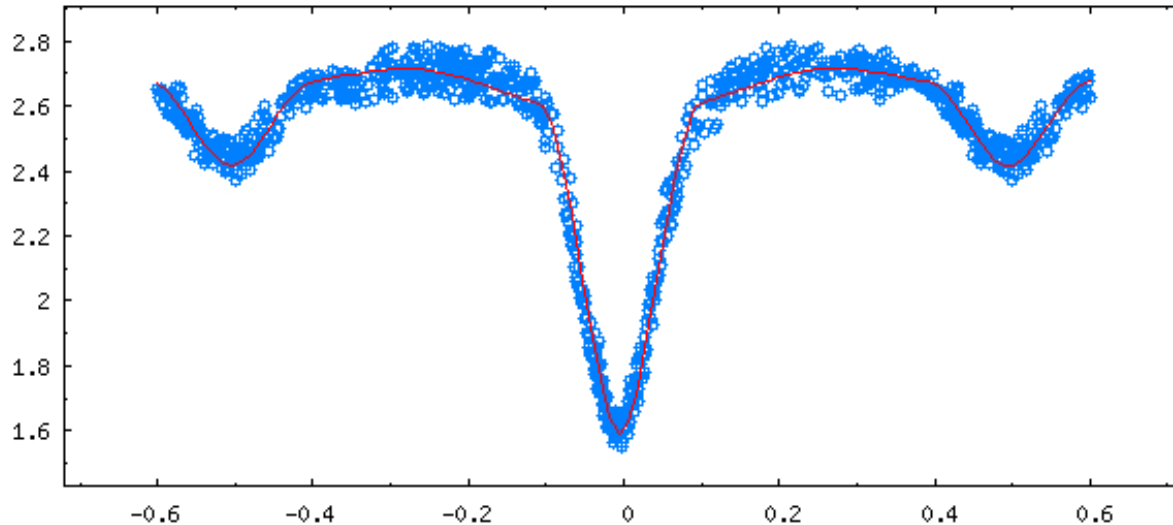
Fitting summary

Parameter	Value
phoebe_pot1	3.280000

- 仮定パラメータ
→ 固定
- 主星表面ポテンシャル $\Omega_1 = 3.280$
→ 少しずつ手動で変えていく
- フィッティングさせるパラメータに 入れる
- 差分補正・最適化問題アルゴリズム **ネルダー-ミード法** でフィッティング
- 伴星表面温度 $T_2 = 5042\text{K}$
- 伴星表面ポテンシャル $\Omega_2 = 2.409$
- 軌道傾斜角 $i = 77.76367^\circ$ で収束した

誤差関数の極小点は多数あるので

フィッティングおよび模式図

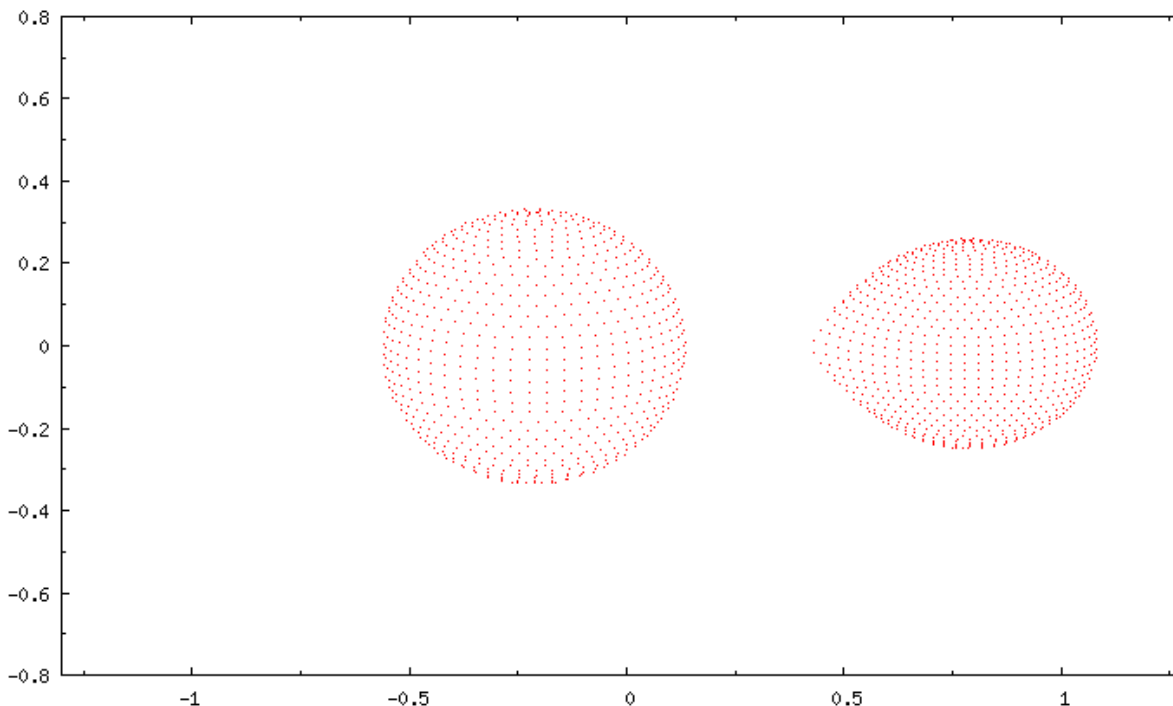


観測光度曲線とフィッティング曲線(赤線)を一致させる

横軸は位相

縦軸は比較星に対するIU Perの光度比

光度曲線の分類でアルゴル型(EA型)



位相=0.25

横から見たIU Per

共通重心が原点

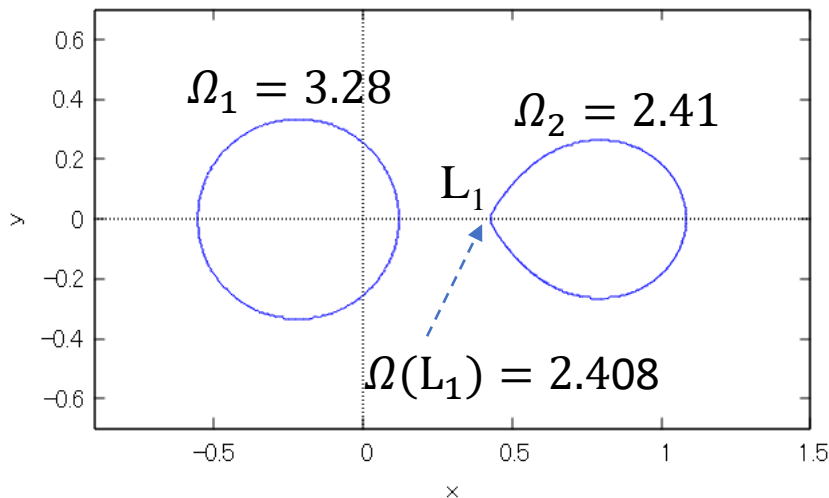
左は主星

右はガスがロッシュローブを満たす伴星

ロッシュモデルの分類で半分離型(SD: Semidetached)

IU Perの解析結果

	パラメータ	PHOEBE記号	本報告	Zhang et al. (2009)
仮定	主星表面温度 T_1 [K]	TAVH	8375	6450
	伴星表面温度 T_2 [K]	TAVC	5042	4790
仮定	主星-伴星質量比 q	RM	右を仮定	0.2738
仮定	連星間距離 a	SMA	$5.12 R_\odot$	—
	軌道傾斜角 i [°]	INCL	77.8	77.8
	主星表面ポテンシャル Ω_1	THSV	3.28	2.9845
	伴星表面ポテンシャル Ω_2	TCHV	2.41	2.4076
	主星半径 R_1	Radius 1	$1.74 R_\odot$	—
	伴星半径 R_2	Radius 2	$1.36 R_\odot$	—
仮定	主星質量 M_1	Mass 1	$1.92 M_\odot$	—
仮定	伴星質量 M_2	Mass 2	$0.526 M_\odot$	—
	Lagrange点 L_1 ポテンシャル	$\Omega(L_1)$	2.408	—



主星, 伴星のロッシュ等ポテンシャル面

$$\Omega = \xi(x, y, z = 0) = \left(\frac{1}{r'} + \frac{r'^2}{2} - \frac{z^2}{2} \right) + q \left(\frac{1}{r''} + \frac{r''^2}{2} - \frac{z^2}{2} \right) - \frac{q}{2}$$

主星はロッシュローブよりも小さいサイズでラグランジュ点 L_1 には届かない. Ω_2 の値は $\Omega(L_1)$ とほぼ同じ値である. 伴星大気はロッシュローブを満たしており, 内部ラグランジュ点 L_1 を通過して, 主星に流入し質量移動が推定される.

まとめ

- 先行研究論文Zhang他 (2009) では、主星の温度が6450 Kとされていた。これはスペクトル型がA型ではなくF型となるほど低い温度である。
- IU PerはA4型であり、他の同型の恒星は8375Kであるため、8375 Kを主星温度と仮定し解析した。
- 絶対値を導出するには、視線速度を生成する分光観測データが必要だが、口径1mクラスの望遠鏡でも難しい。
- そこで、教育機関やハイアマチュアの小口径望遠鏡でも取得できる測光観測データに類似恒星の情報からスケールを入れ、各種物理量の導出を行った。

ご静聴ありがとうございました

津山高専天体観測室状況
は付録

謝辞: 2017~2022年度 科学研究費 基盤研究(C)「未来のガリレオ育成のための天文教育—食連星の観測と光度曲線解析—(17K01002) 終了

応用物理研究室天体観測室



スターロックシステム

財源: 科研費 + 校費

東天体観測室 (2015年12月)

口径35cm望遠鏡 (赤道儀)

Meade LX850-35cm



西天体観測室 (2012年4月)

口径35cm望遠鏡 (赤道儀)

Losmandy社TITAN赤道儀

+ Meade LX200 35cm鏡筒

観望会では口径20cm, 15cm

望遠鏡なども使用