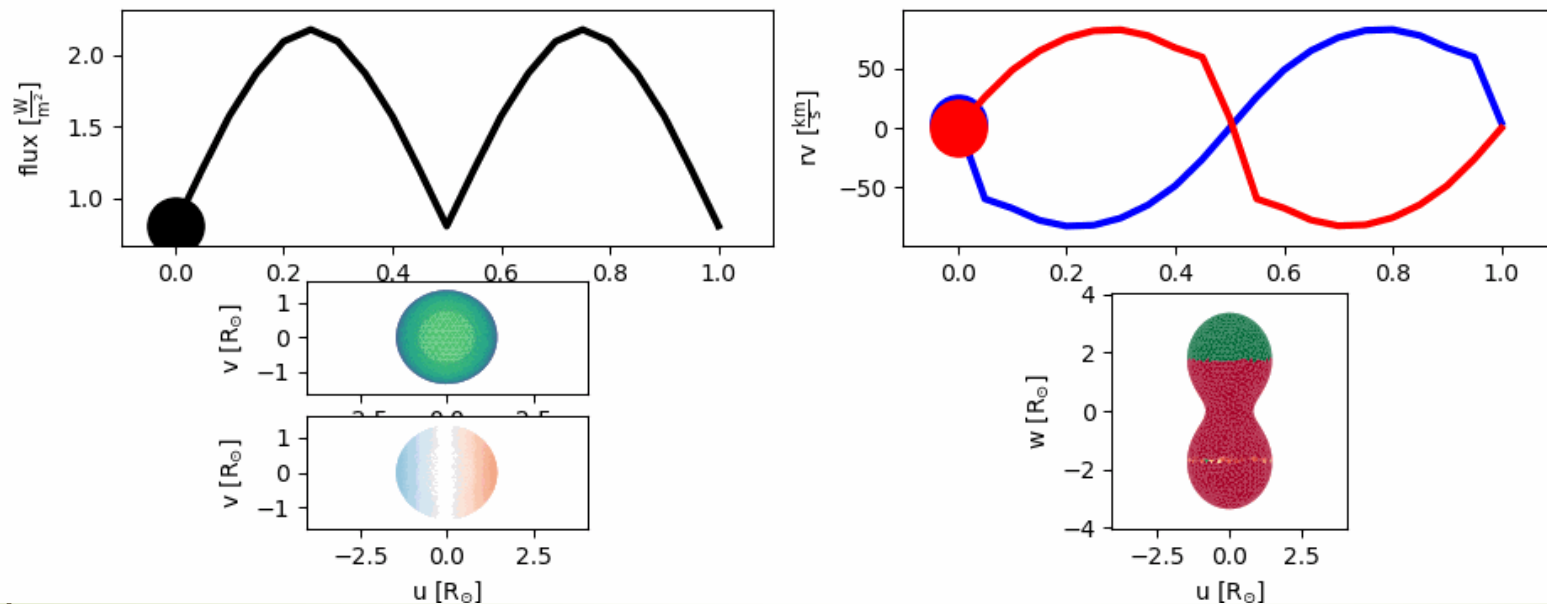


基于机器学习的相接双星快速解轨

丁旭 季凯帆



相接双星：



相接双星的两子星充满洛希瓣，拥有公共包层，并且具有强烈的物质交流。

其产生光变主要跟主次星温度，质量比，相接度，轨道倾角有关。

国际上TESS和ZTF的数据状况：



TESS 空间望远镜
对每个扇区观测的时间大约是**27 day**，光变曲线极限星等在**13等**以内，每个扇区**2-3万**条光变曲线（**50个扇区**），**百万**条光变曲线

Filter(s)	#lightcurves with $N_{obs} \geq 1$	#lightcurves with $N_{obs} \geq 2$	#lightcurves with $N_{obs} \geq 5$	#lightcurves with $N_{obs} \geq 10$	#lightcurves with $N_{obs} \geq 20$
<i>g</i>	1,356,061,500	1,117,111,394	933,630,593	816,818,038	694,110,875
<i>r</i>	2,158,697,597	1,848,325,736	1,572,495,172	1,405,725,599	1,234,469,607
<i>i</i>	559,365,948	452,347,284	367,360,293	323,757,711	280,740,497
<i>g+r+i</i>	4,074,125,045	3,417,784,414	2,873,486,058	2,546,301,348	2,209,320,979

Table 4: Number of lightcurves with number of DR10 observation epochs (N_{obs}) greater than some limit

ZTF 地面望远镜
Palomar **48 英寸**施密特望远镜，它拥有一个 **47 平方度**的视场，中值极限星等为 **20.8 等**（*g* 波段）和 **20.6 等**（*r* 波段），**12亿**条光变曲线

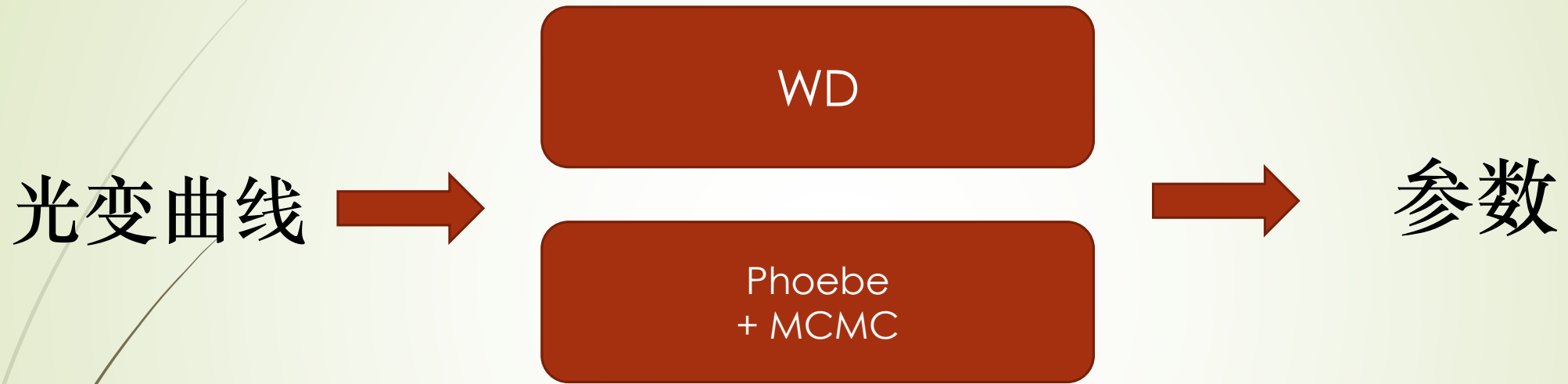
海量的数据？

Latković等（2021）通过文献搜集到700颗相接双星，
并对其中的参数进行研究

700颗目标离数万及数十万差别还是很大



目前获得解轨参数的方法：



对一条光变曲线的解轨时间长达数小时和数天

如何高效率**获得**相接双星**参数**?

海量数据



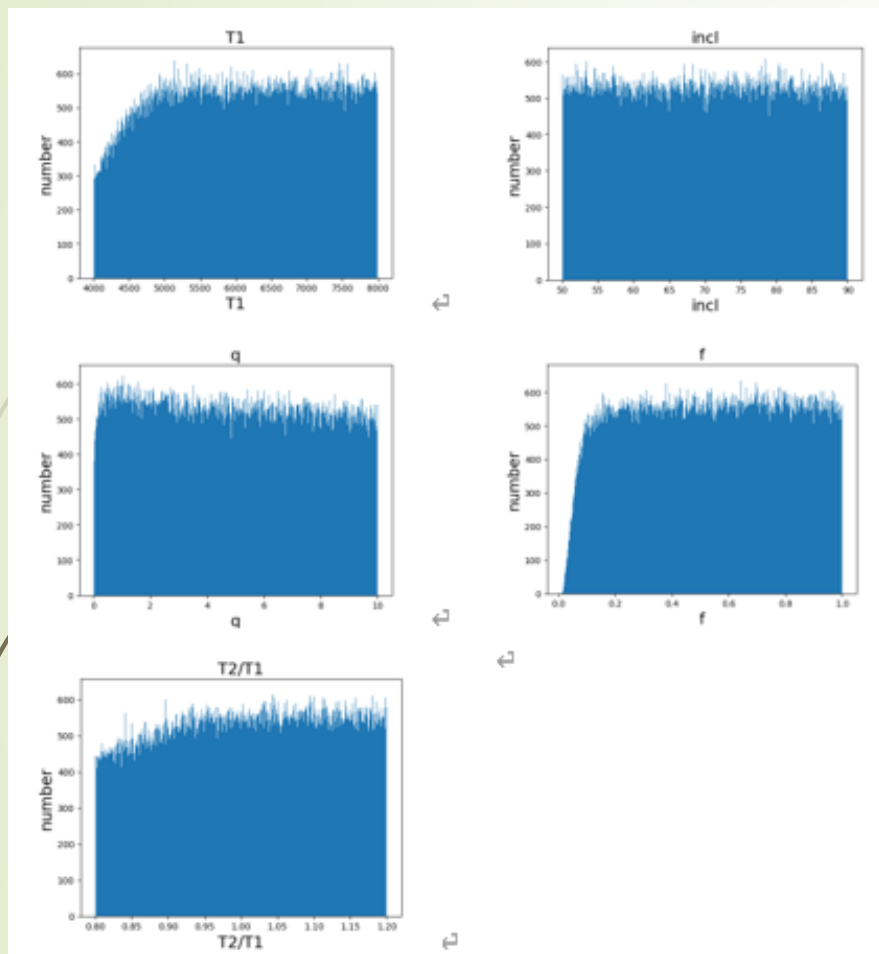
主星温度 T_1
轨道倾角 $incl$
质量比 q
相接度 f
温度比 T_2/T_1
第三光比例 13



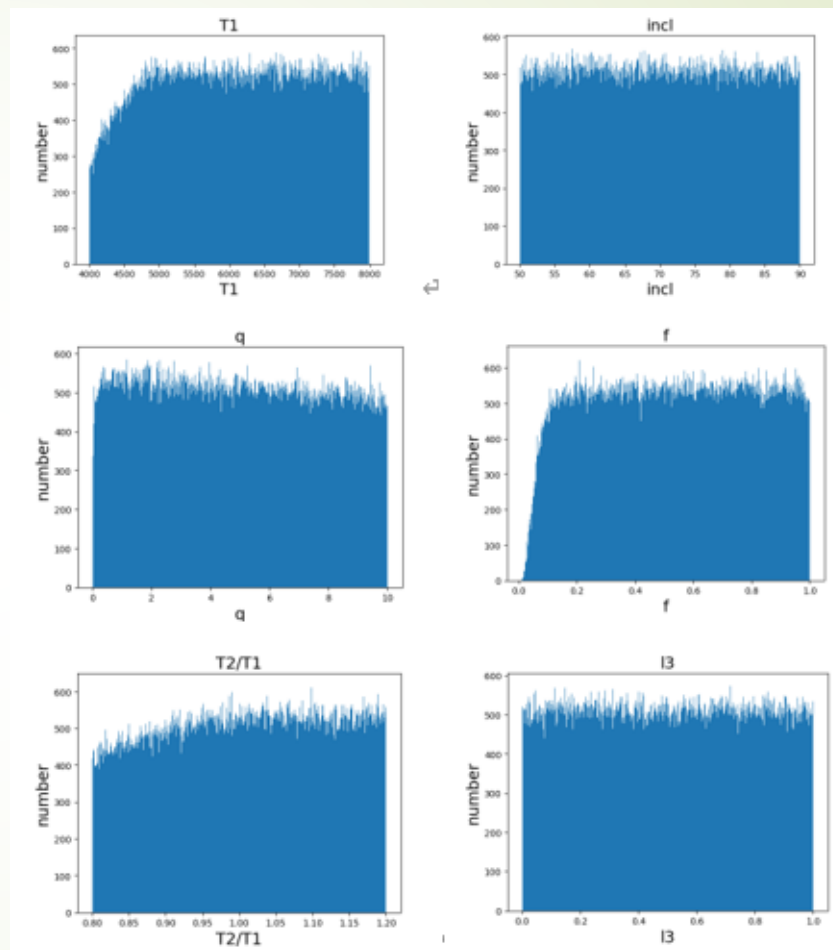
是否有可能用神经网络模型来替代Phoebe?

有监督机器学习中的**回归**问题!

建立几十万样本的训练集



无第三光影响的数据集



有第三光影响的数据集

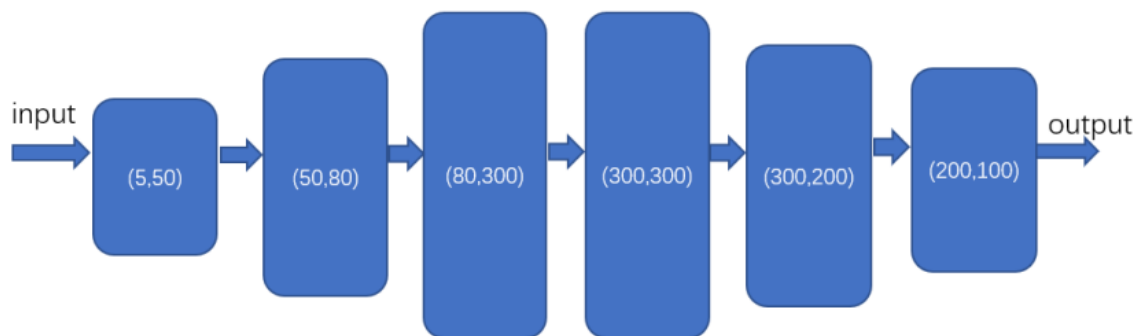


图 4.34 无第三光影响的网络结构

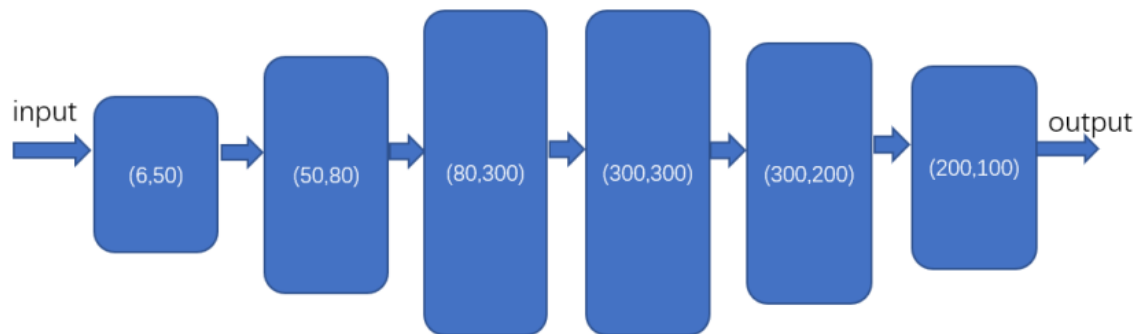
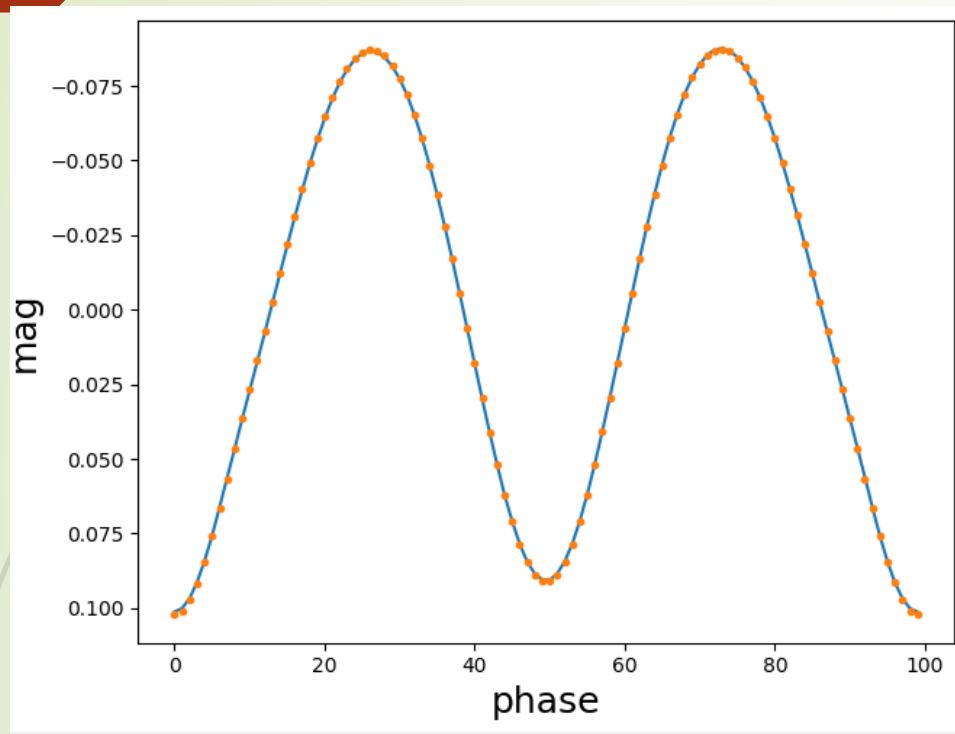


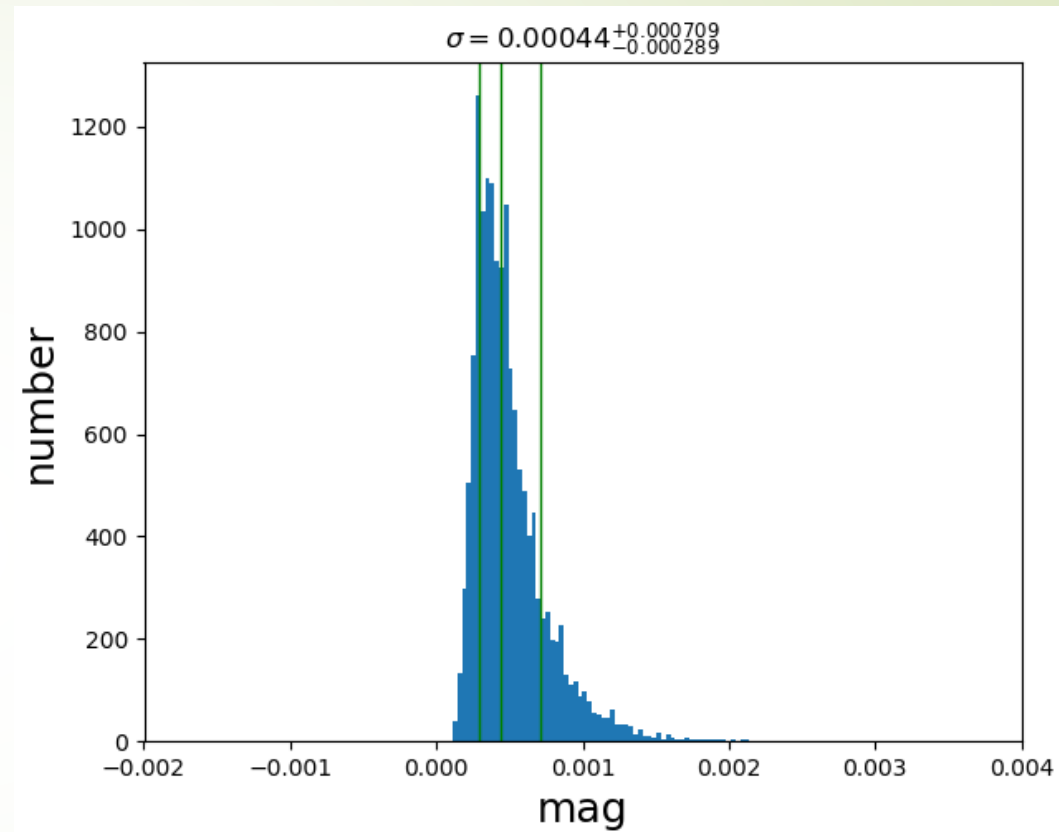
图 4.35 有第三光影响的网络结构

激活函数: **relu**
损失函数: **mse**
优化器: **Adam**

无第三光影响NN模型生成光变曲线精度：

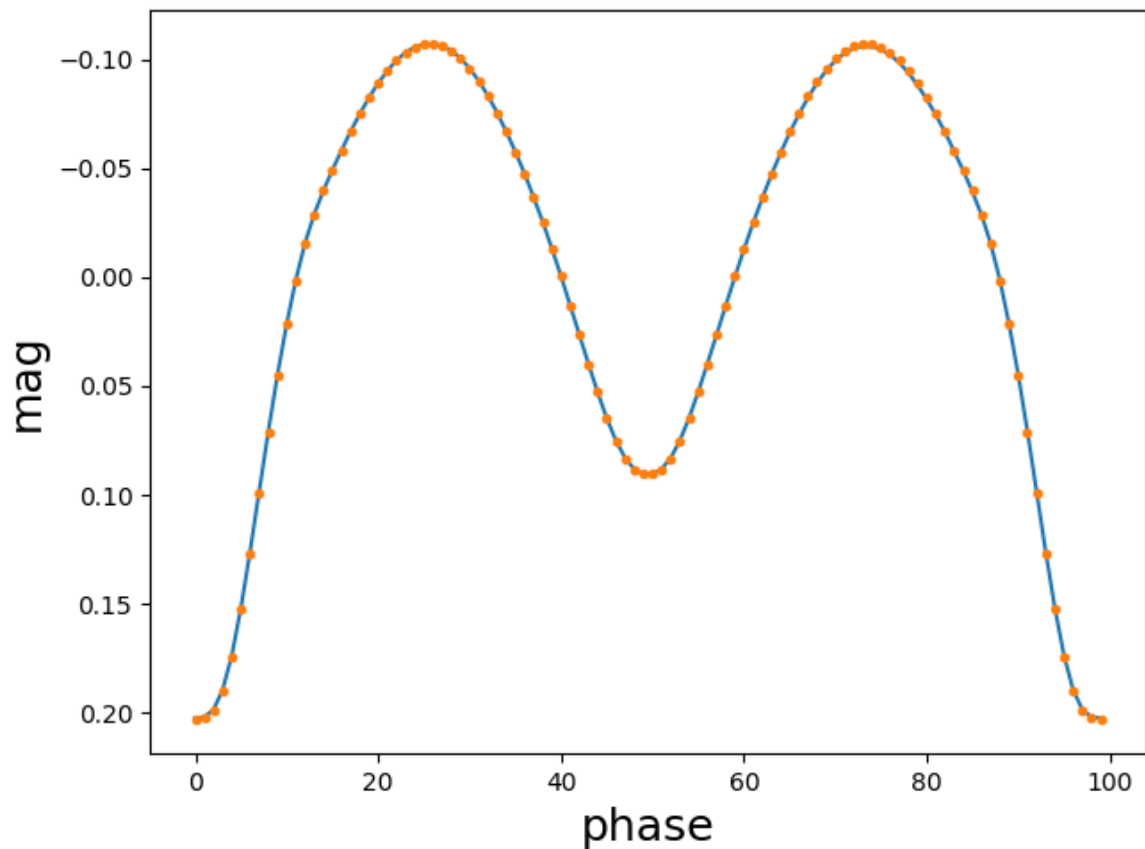


理论的光变曲线（蓝）和模型生成的光变曲线（黄）
残差标准差是**0.000363**

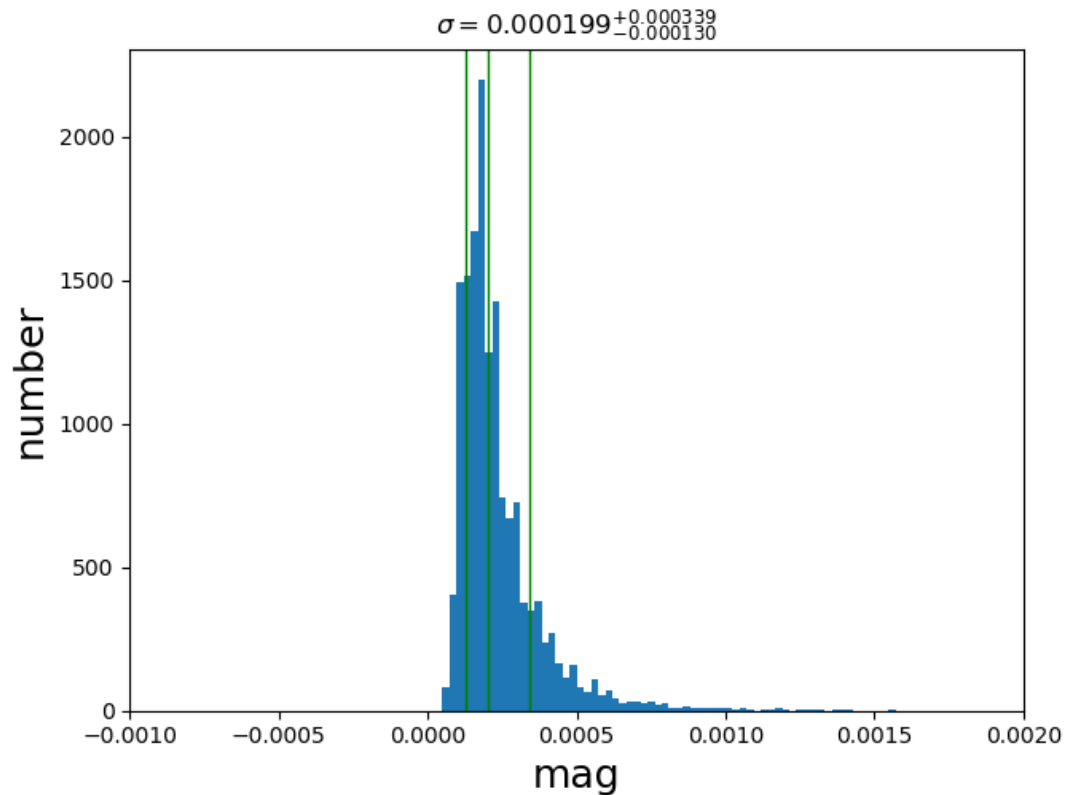


残差标准差分布（**1.5万**测试集）

有第三光影响NN模型生成光变曲线精度：



理论的光变曲线（蓝）和模型生成的光变曲线（黄）
残差标准差是0.0005286



残差标准差分布（1.5万测试集）

生成单条光变时间对比



生成光变曲线的精度好于千分之一星等

获取**参数**后验分布的**时间**对比

Phoebe+MCMC **5.3 days**

30 walkers

500 Iterations

1.5万条光变曲线时间

NN模型+MCMC **30 seconds**





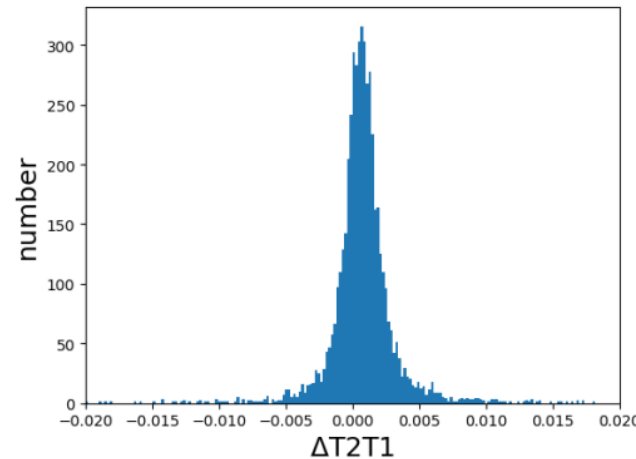
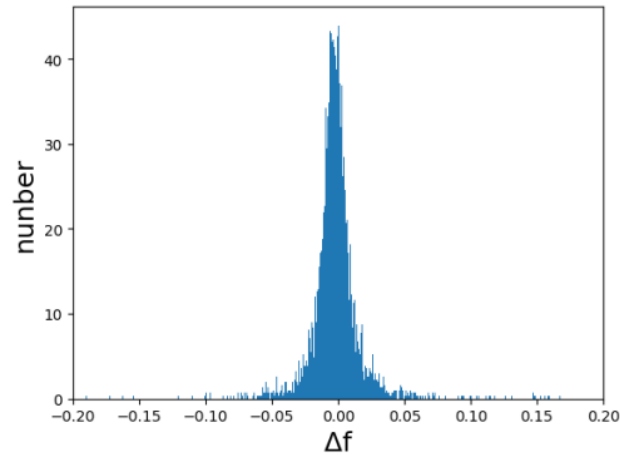
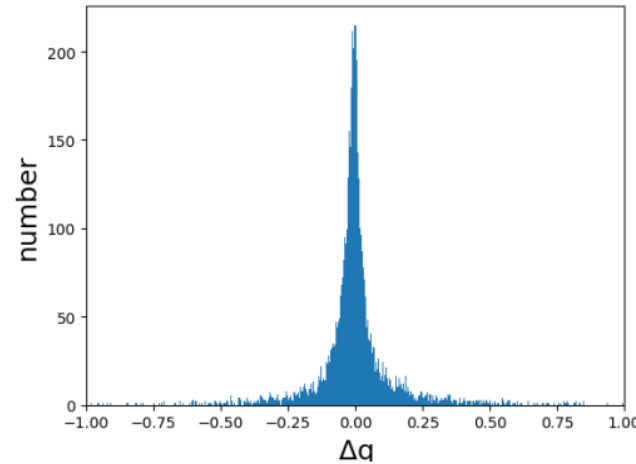
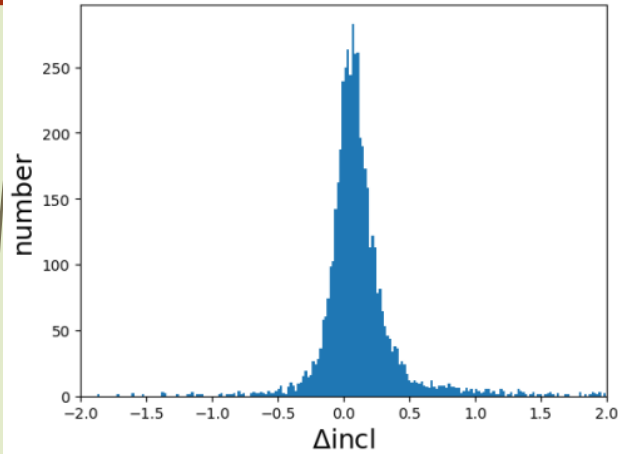
从**时间**上对比：时间提高4个数量级，
从数**天**降到数十**秒**。



从**精度**上对比：通过NN模型生成的光
变曲线误差 \ll **千分之一** 一个星等。

(Kepler和TESS的测光精度在0.001-0.003星等)

5000条理论光变曲线+0.001星等的误差 快速解轨误差测试（无第三光）



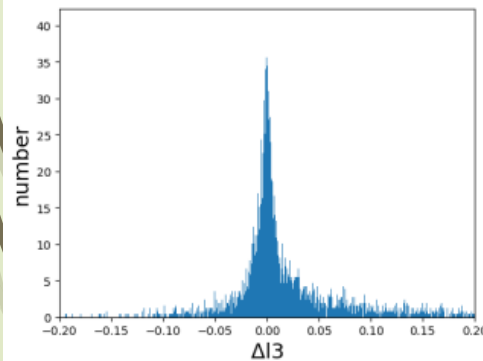
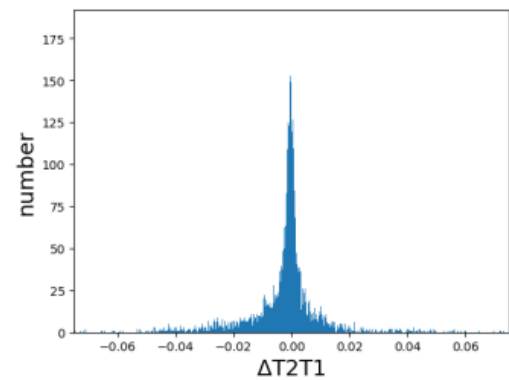
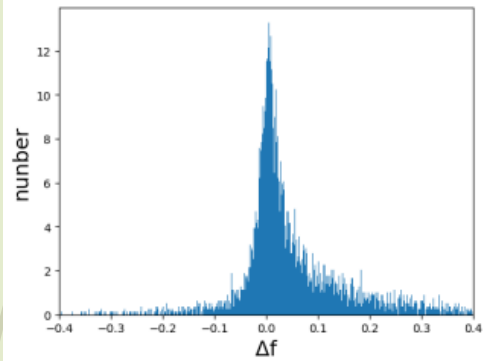
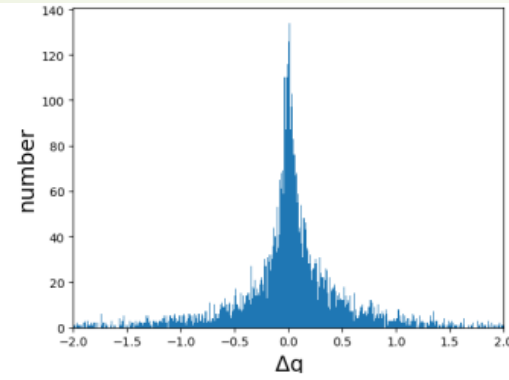
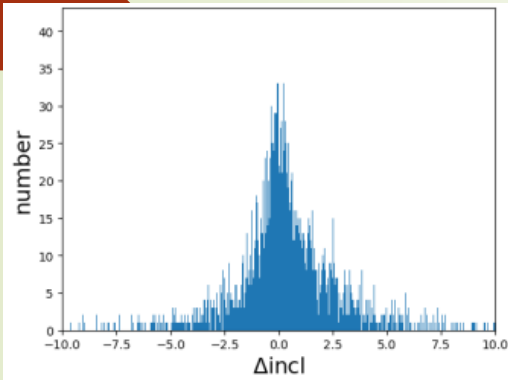
倾角 $\Delta incl = \pm 0.877$ 度

质量比 $\Delta q = \pm 0.011$

相接度 $\Delta f = \pm 0.0204$

温度比 $\Delta T_2/T_1 = \pm 0.004$

快速解轨误差测试（第三光）



倾角
质量比
相接度
温度比
第三光比例

$$\Delta incl = \pm 2.65 \text{度}$$

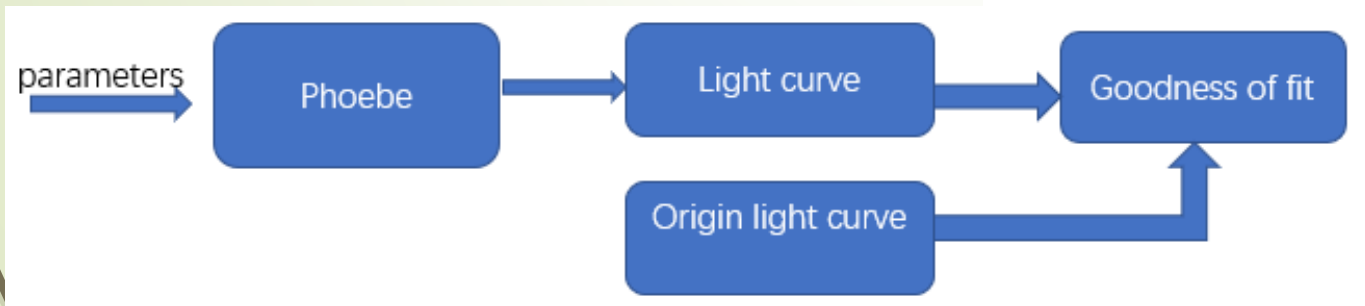
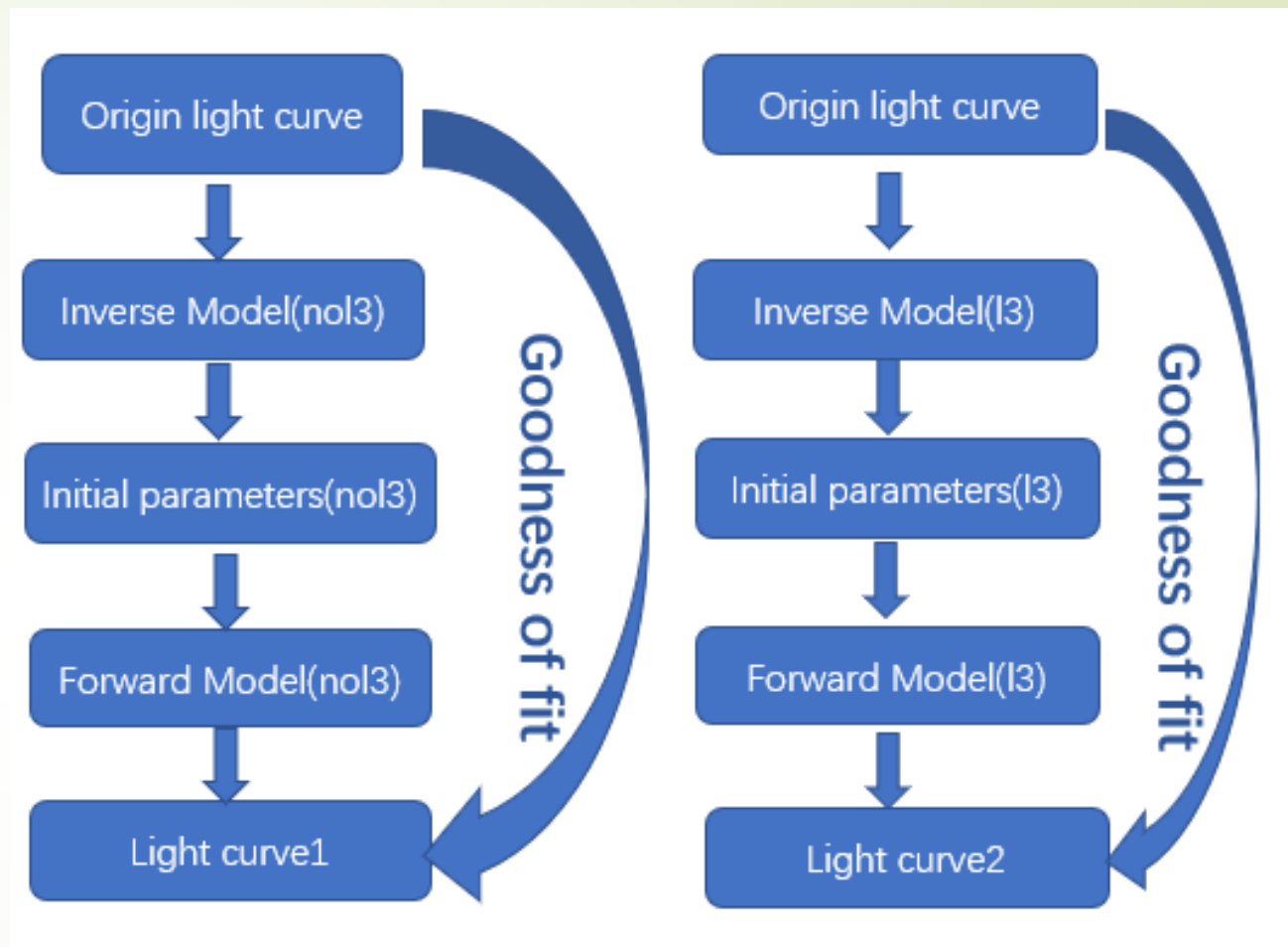
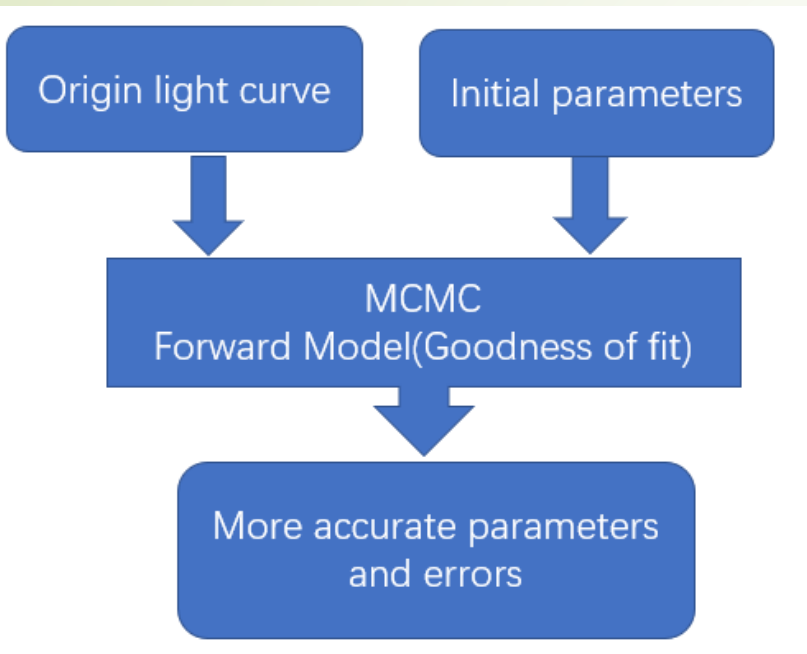
$$\Delta q = \pm 0.0212$$

$$\Delta f = \pm 0.129$$

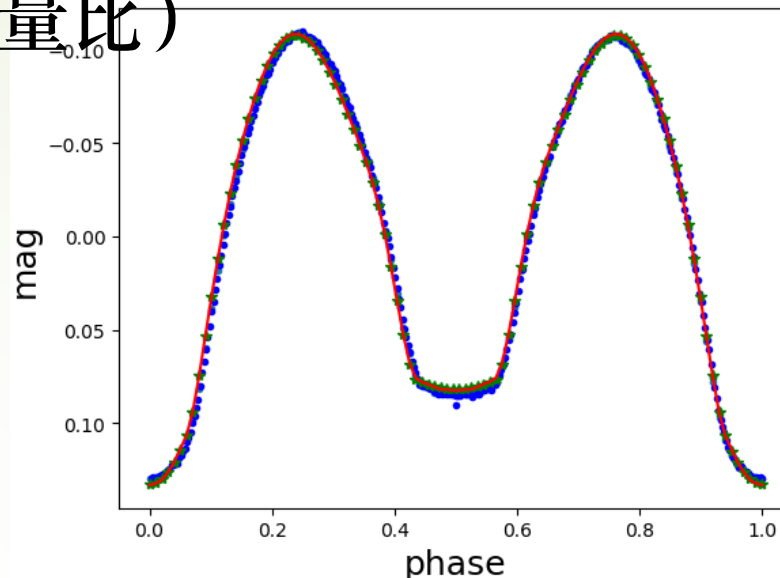
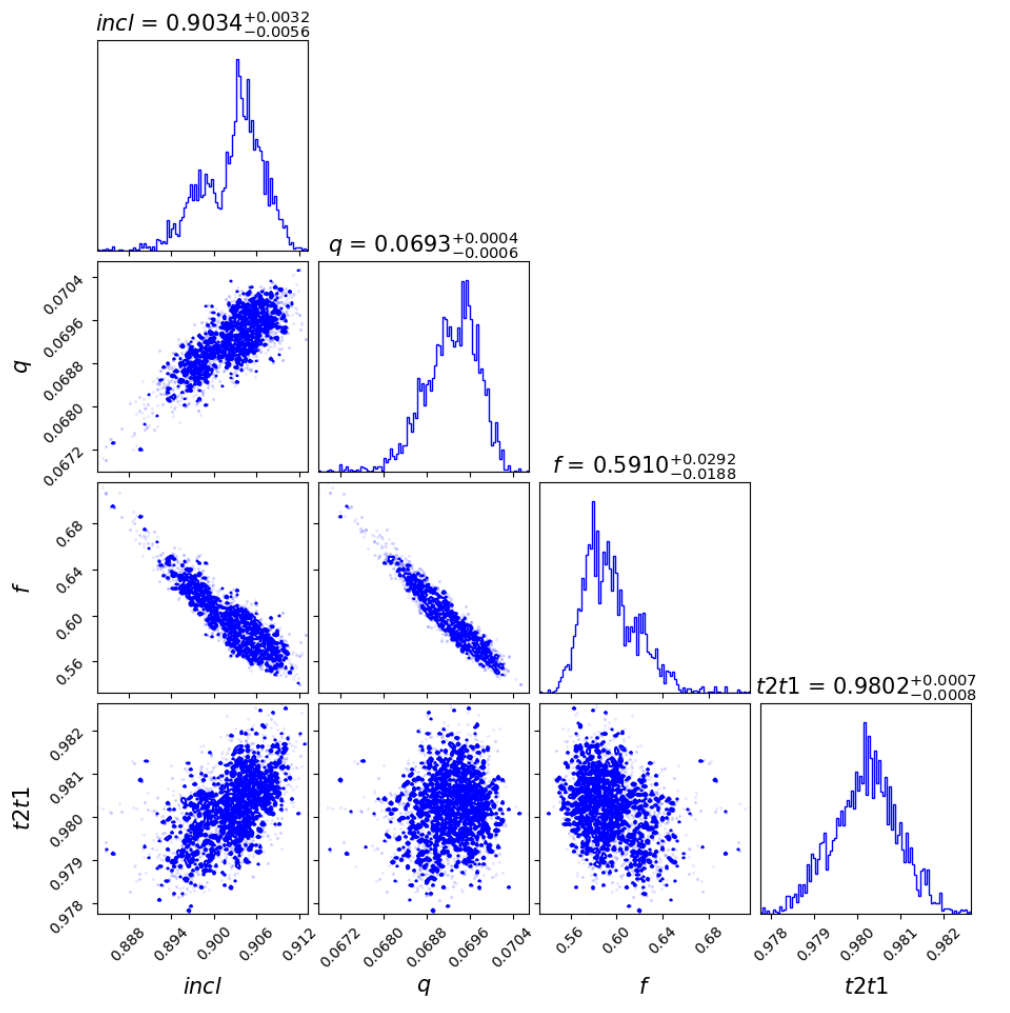
$$\Delta T_2/T_1 = \pm 0.016$$

$$\Delta l_3 = \pm 0.07$$

实际的光变曲线解轨:

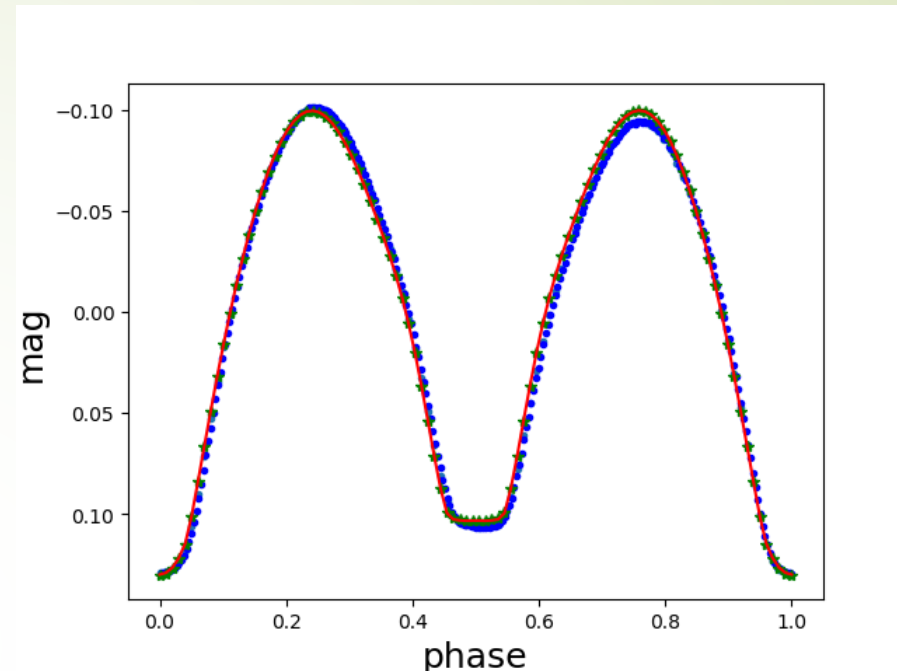
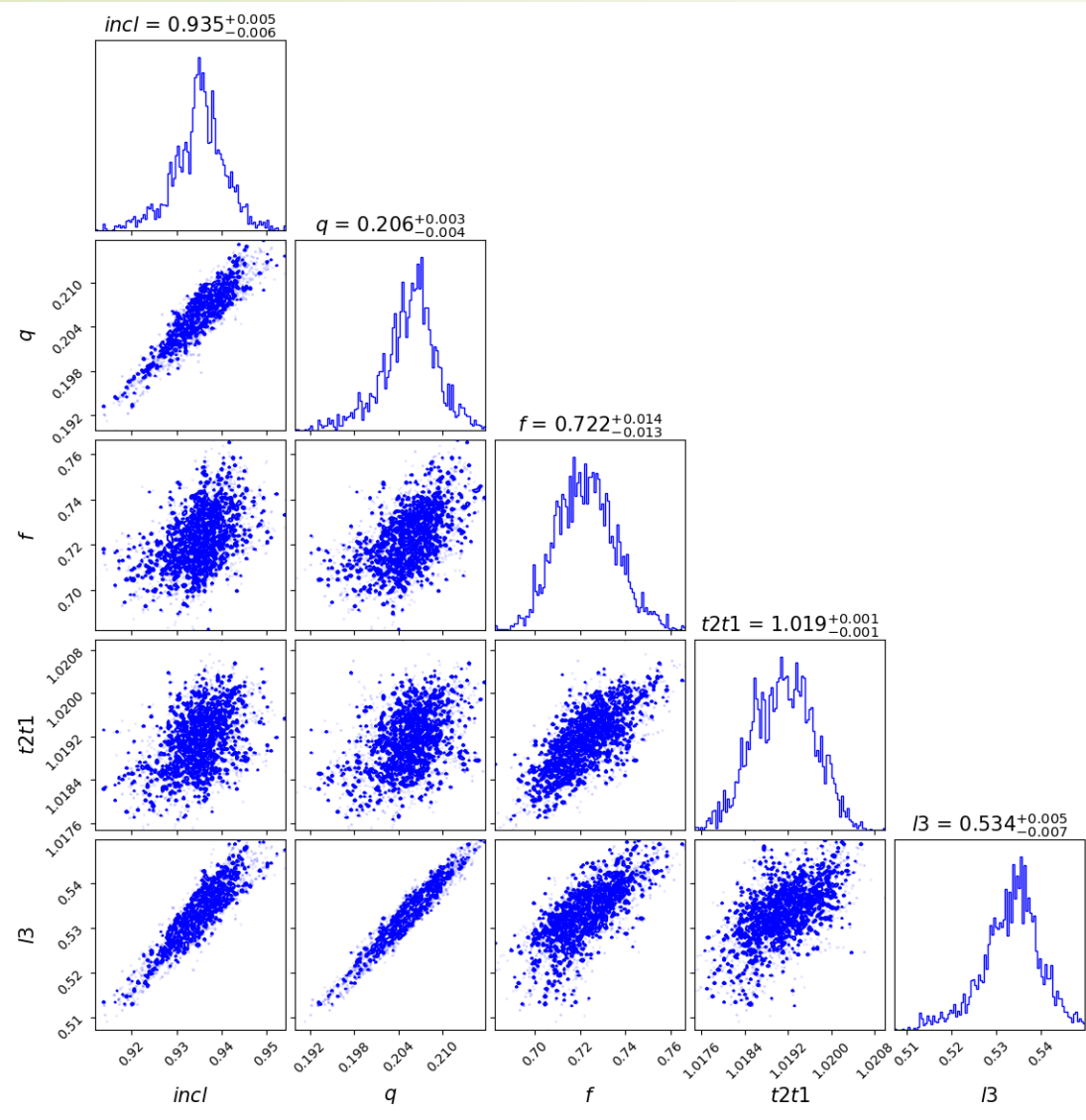


Kepler数据的解轨（高倾角、低质量比）



KIC 3127873 (no13) 快速解轨参数
后验分布拟合度 $R^2 = 0.998$

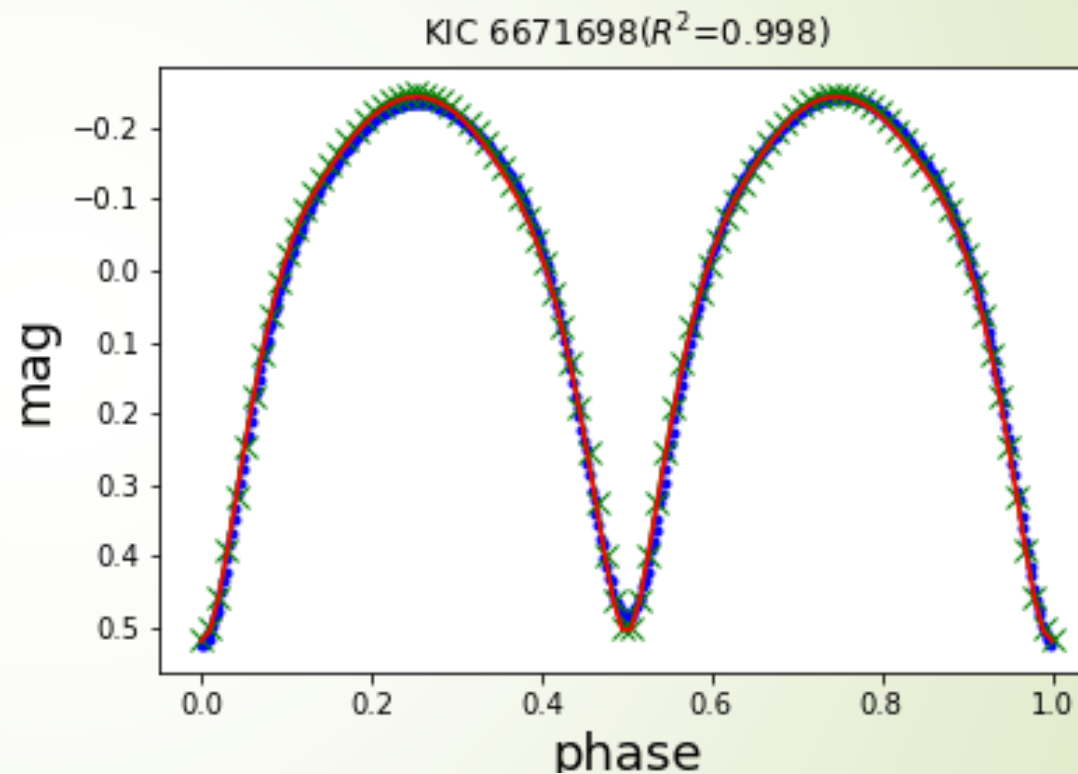
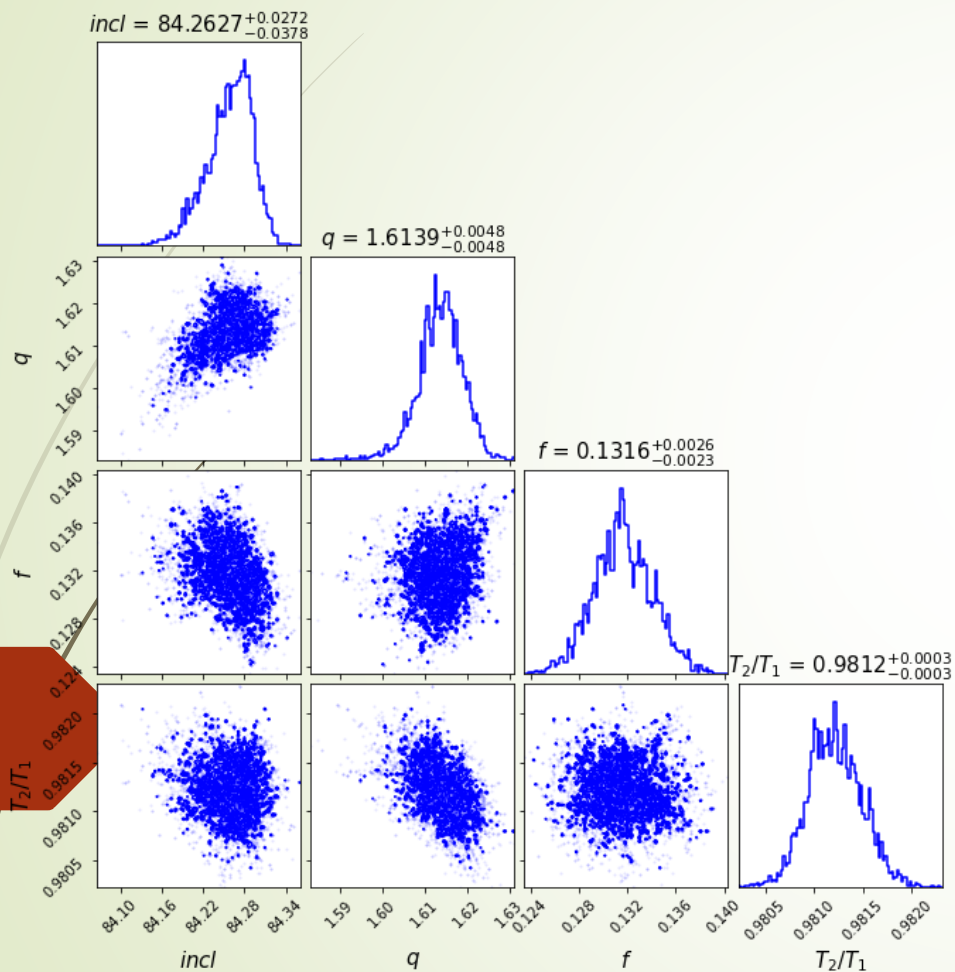
parameter	ours	Li et al. (2020)	Senavcı et al. (2016)
incl	81.31	81.9	80.5
q	0.063	0.071	0.073
f	0.59	0.65	0.65
T2/T1	0.980	0.953	0.954



parameters	ours	Li et al. (2020)
incl	84.15	86.04
q	0.21	0.22
f	0.72	0.84
T2/T1	1.02	1.04
l3	0.534	0.592

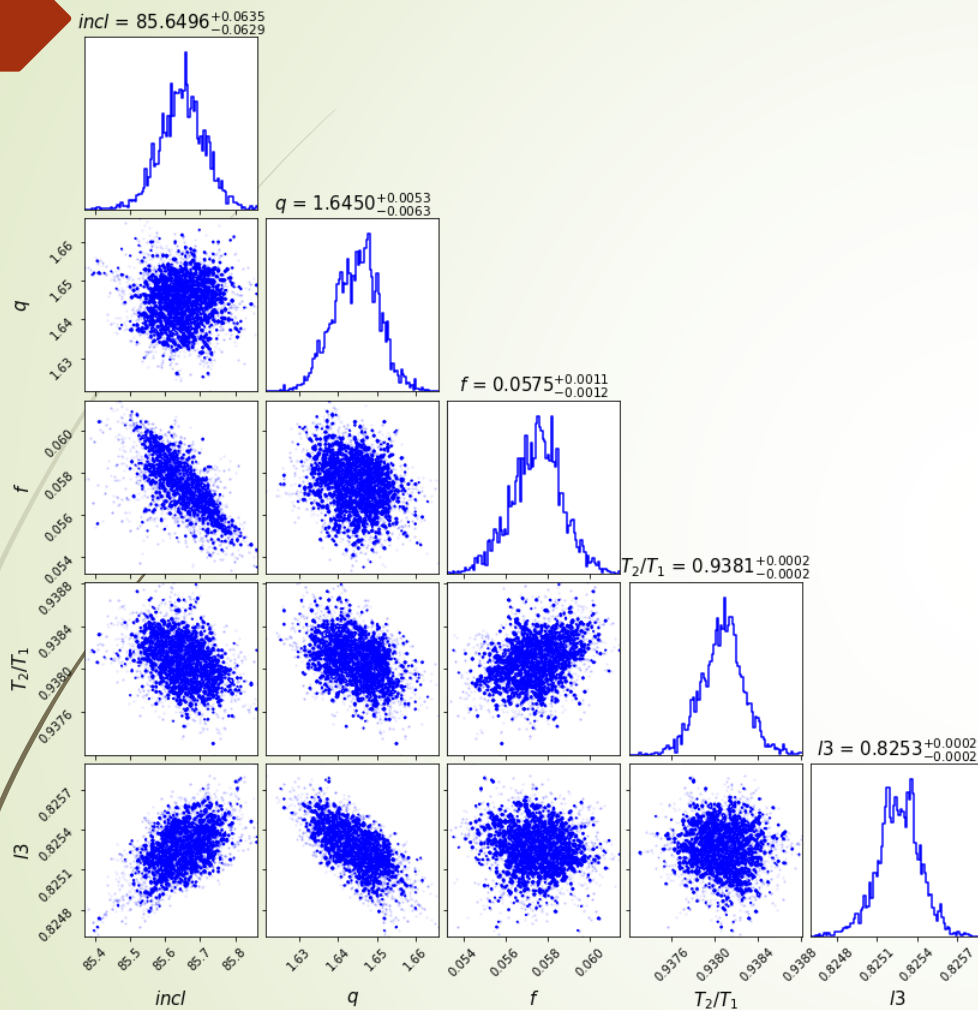
KIC 1161883(l3)快速解轨参数的后验分布
(倾角incl = 84.15°) 拟合度 $R^2 = 0.997$

高倾角、高质量比、no13

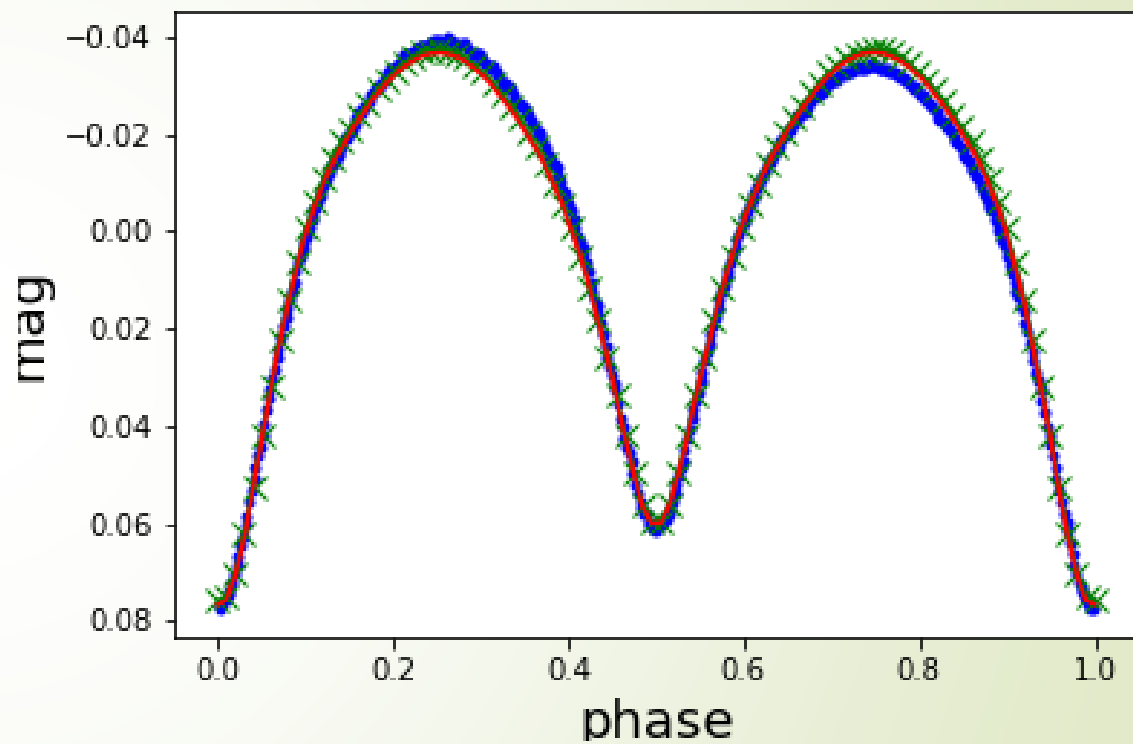


$T_1=5570$ $T_2=5658(06)$ $q = 1.60(0.02)$ $incl = 84.35(0.05)$ $f=0.1254$

高倾角、高质量比、13

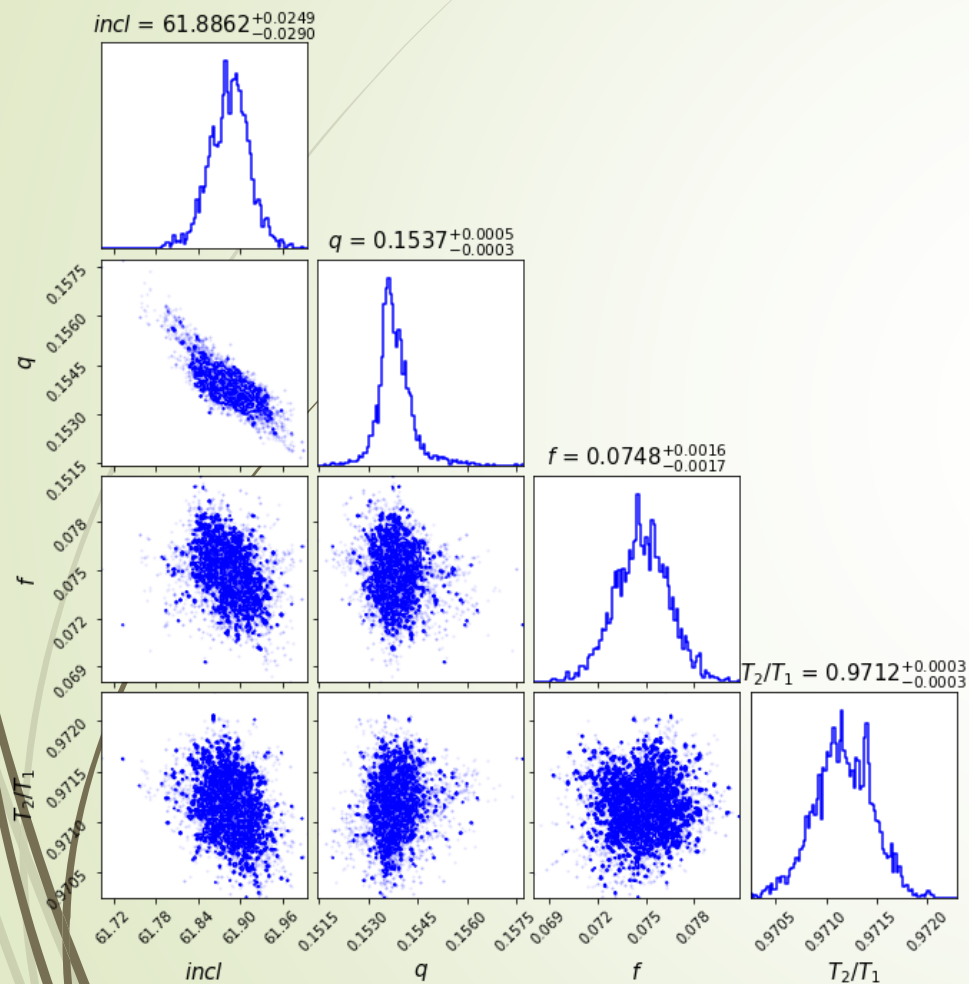


KIC 4909422 ($R^2=0.995$)

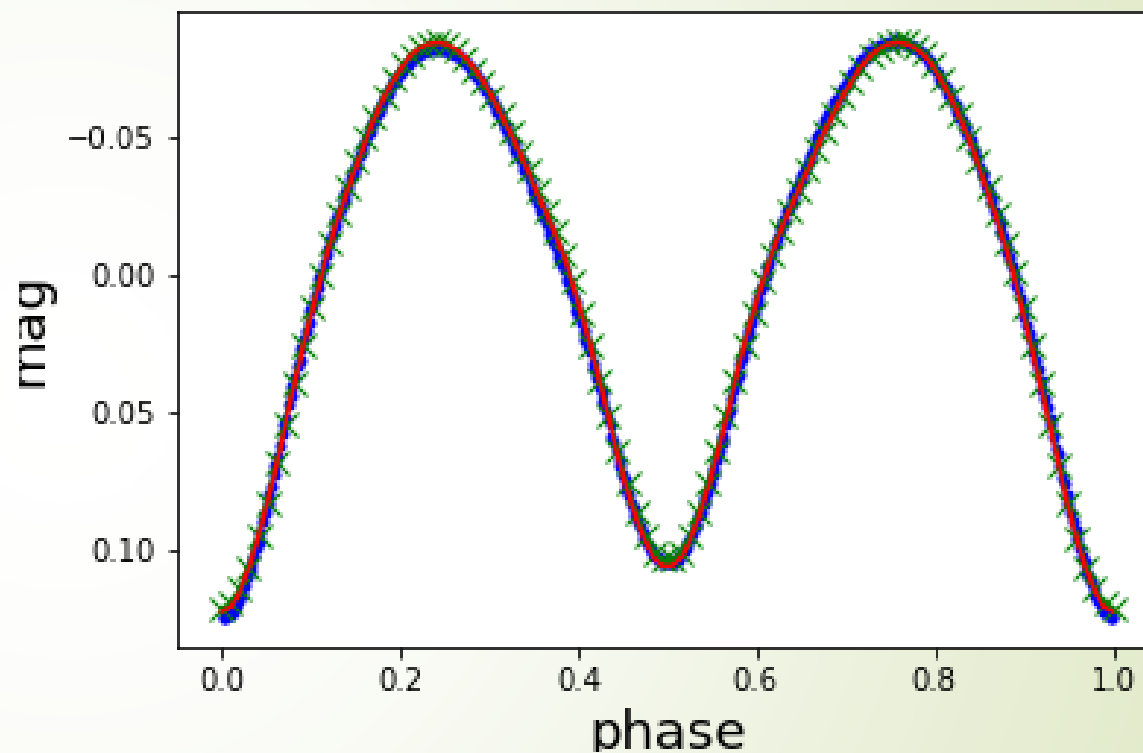


T1=5404 T2=5908(42) q=1.26(0.01) incl=82.49(0.11) l3= 0.8395 f=0.1545

低倾角、低质量比、no13

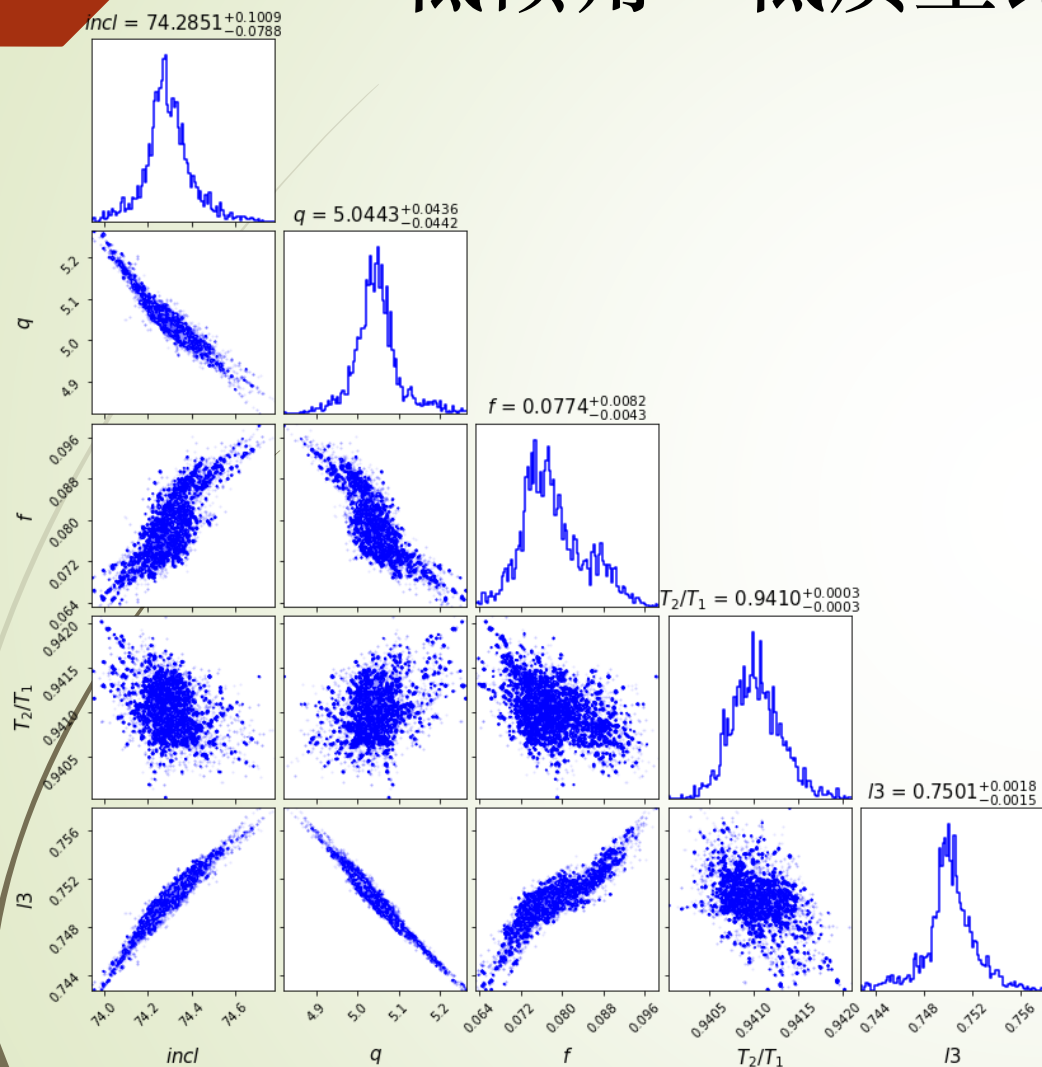


KIC 9392682 ($R^2=0.999$)

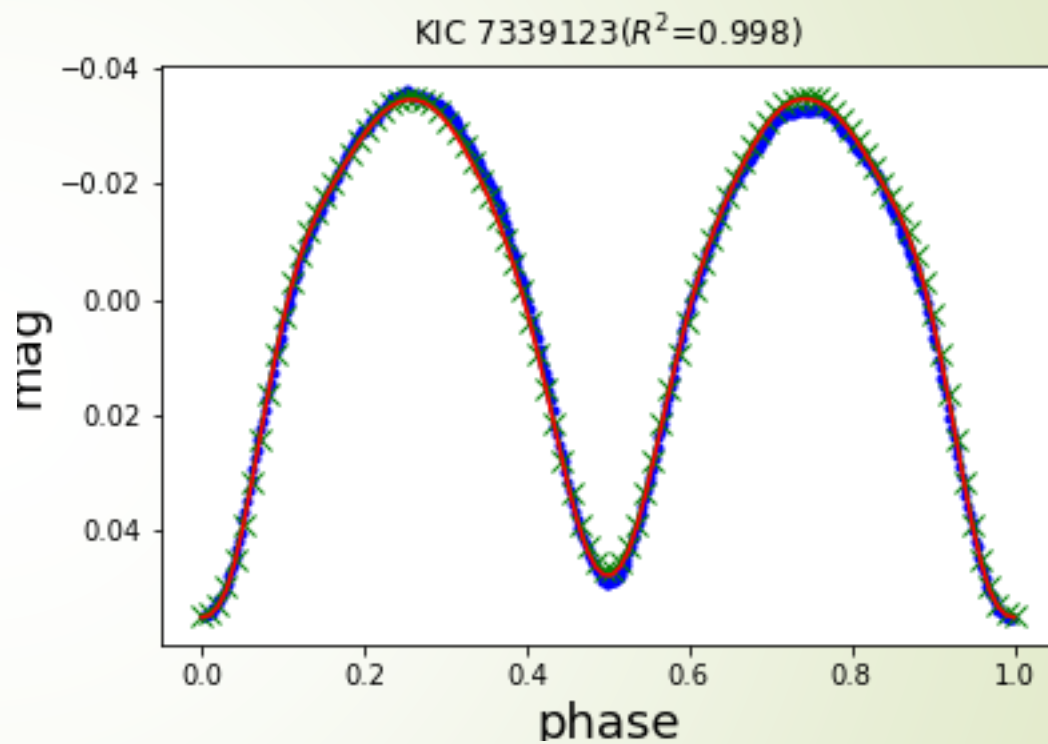


$T_1 = 7195$ $T_2 = 6756(09)$ $q = 0.14(0.02)$ $incl = 62.39(0.08)$
 $f = 0.1538$

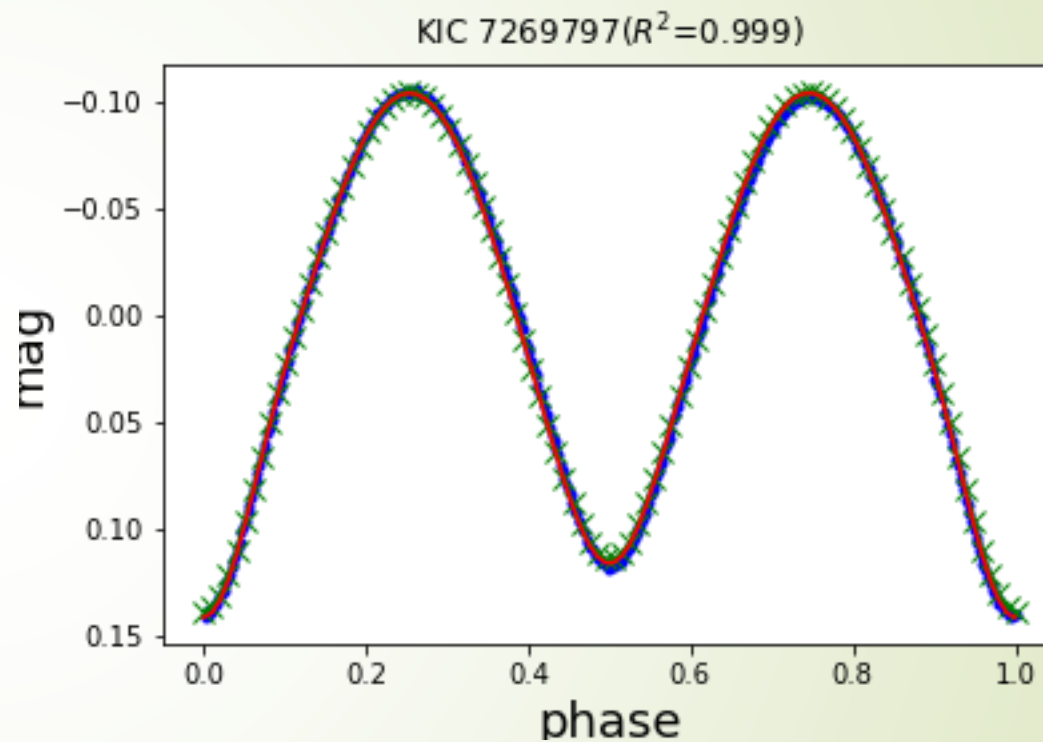
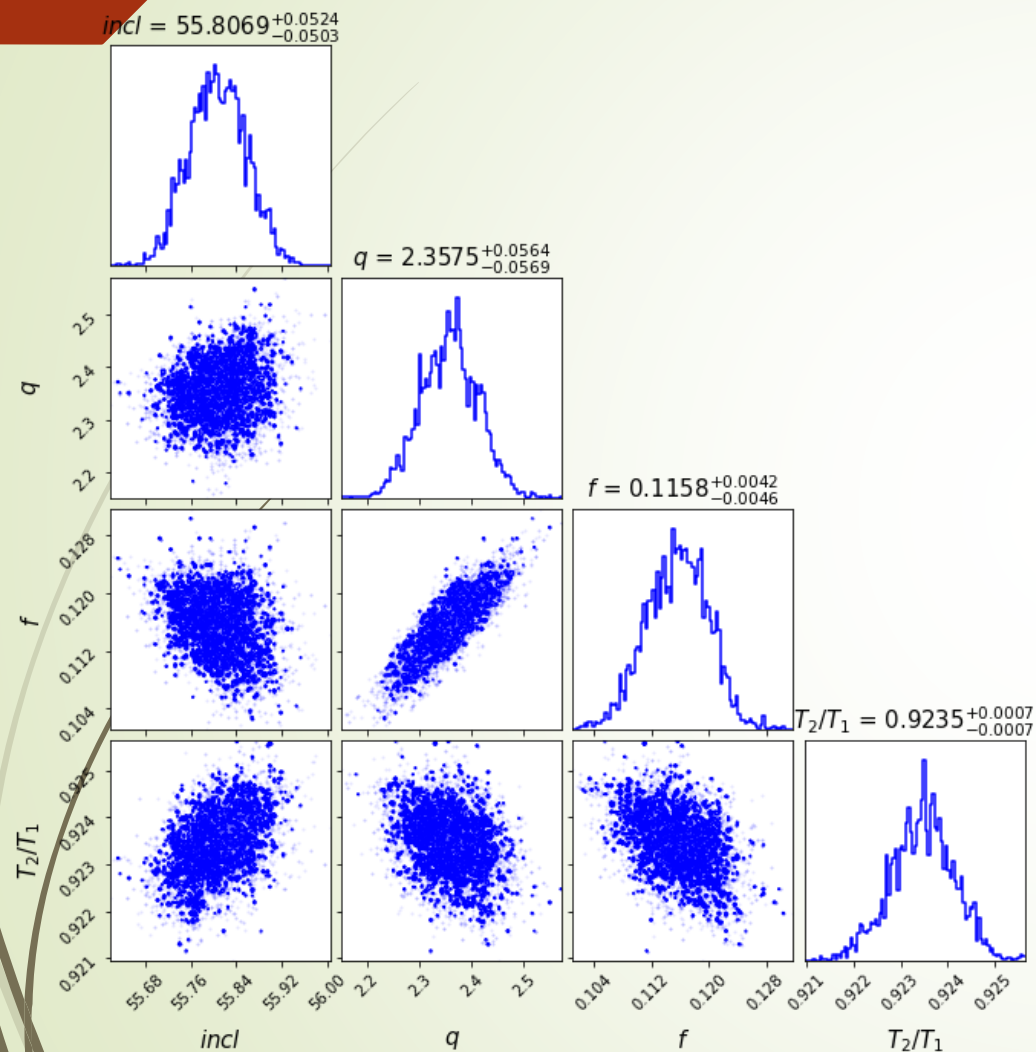
低倾角、低质量比、13



$T1=6138$ $T2=5700(18)$ $q = 5.12(0.02)$ $incl = 74.20(0.13)$ $l3=0.7494$
 $f=0.1126$

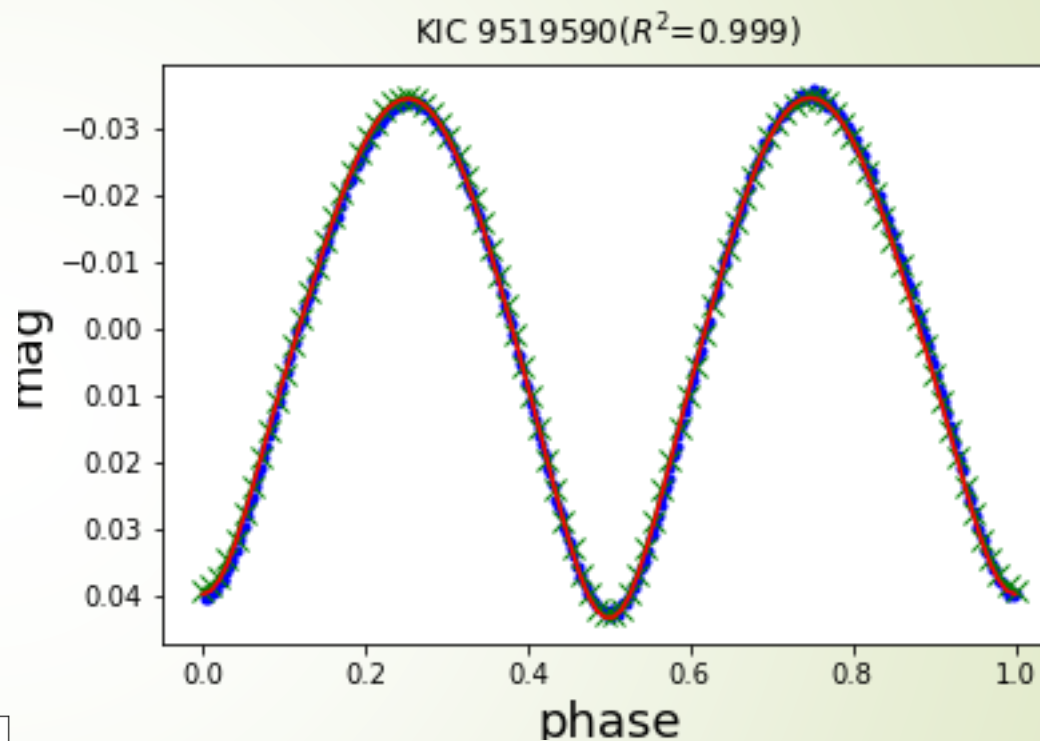
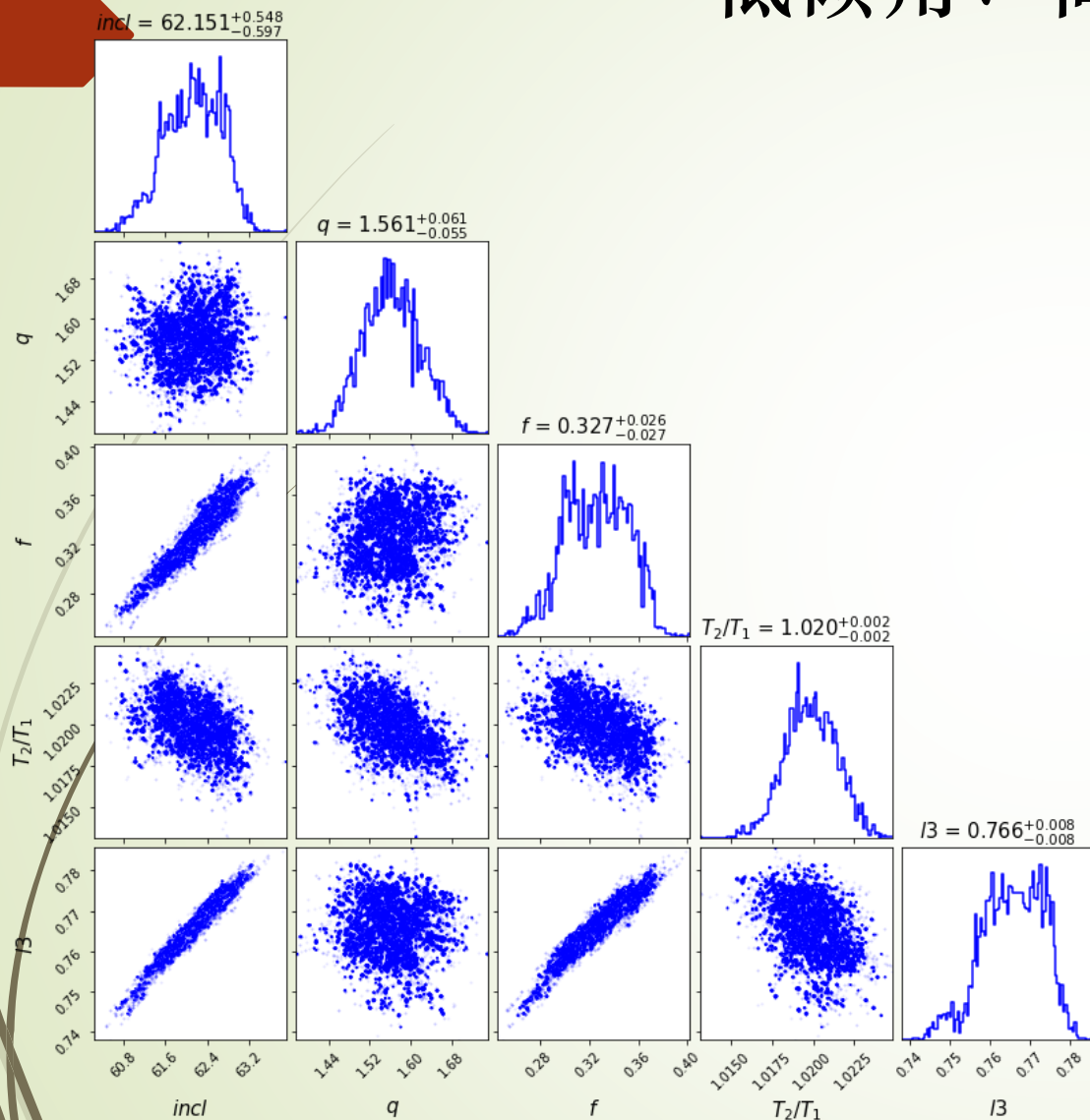


低倾角、高质量比, nol3



$T_1=5163$ $T_2=4873(05)$ $q=0.80$ $incl = 56.32(0.05)$ $f=0.0977$

低倾角、高质量比, 13



T1 = 5961 T2 = 6123(08) q=1.35(0.01) incl=58.25(0.29) f=0.6957

参数对比

Name(KIC)	q*	q(ours)	Incl[1]	Incl(ours)
7698650	0.096[1]	0.0852	78.83	75.3173
2159783	0.147[1]	0.1448	81.04	79.3548
3104113	0.159[1]	0.1505	78.36	76.3442
5439790	0.174[1]	0.1774	81.43	80.6291
8265951	0.134[1]	0.1397	76.58	78.8820
8539720	0.067[1]	0.0638	70.80	69.8795
9350889	0.102[1]	0.0803	78.67	75.1319
12352712	0.073[1]	0.0647	80.92	80.7745
9453192	0.099[1]	0.0888	77.56	76.6666
3127873	0.071[1]	0.0599	81.91	78.2264
10007533	0.080[1]	0.0702	82.36	81.6118
10229723	0.112[1]	0.1019	77.25	75.8227
5290305	0.17[2]	0.1509	76.65	75.4080
8554005	0.26[2]	0.2811	80.21	75.5003
7698650	0.096[2]	0.0845	78.83	76.9662
9356753	0.186[2]	0.183	80.45	79.9456
5358200	0.32[2]	0.404	77.42	74.7838
10586874	0.31[2]	0.303	80.77	78.9726
8257903	0.347[2]	0.3292	80.78	80.59
7601767	0.108[2]	0.1143	71.36	69.802
10618253	0.123[2]	0.1012	82.400	79.440
9995660	0.33[2]	0.3002	77.94	76.38

轨道倾角偏差的标准差是

1.4712°

质量比偏差的标准差是

0.022

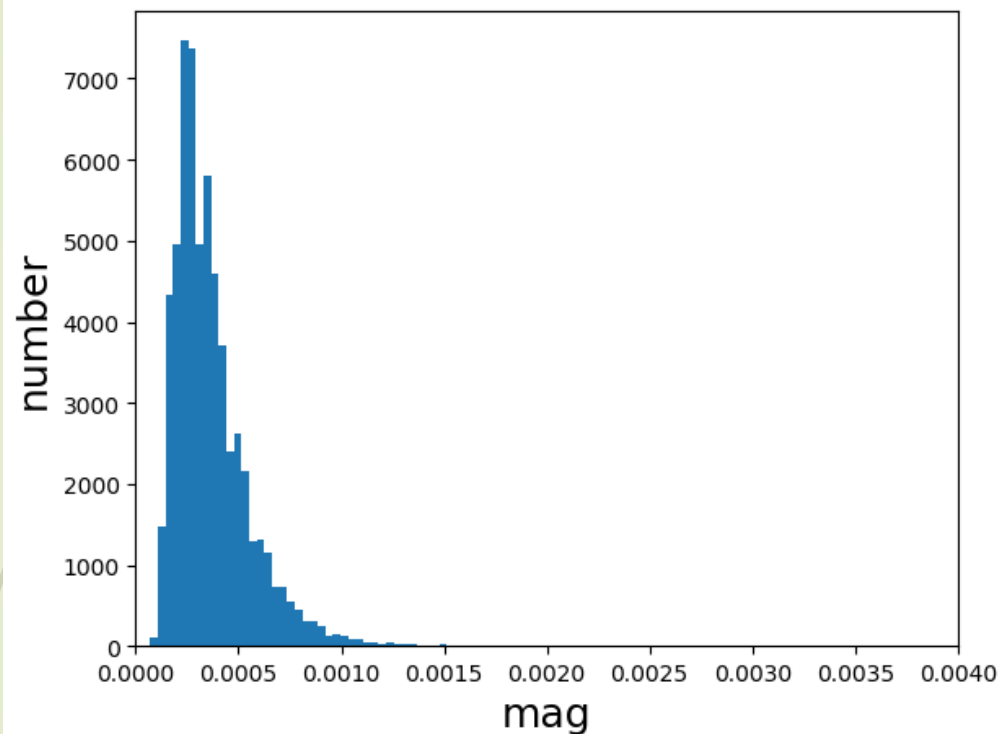
[1]来自 Li 等 (2020)

[2]来自 Şenavcı 等 (2016)

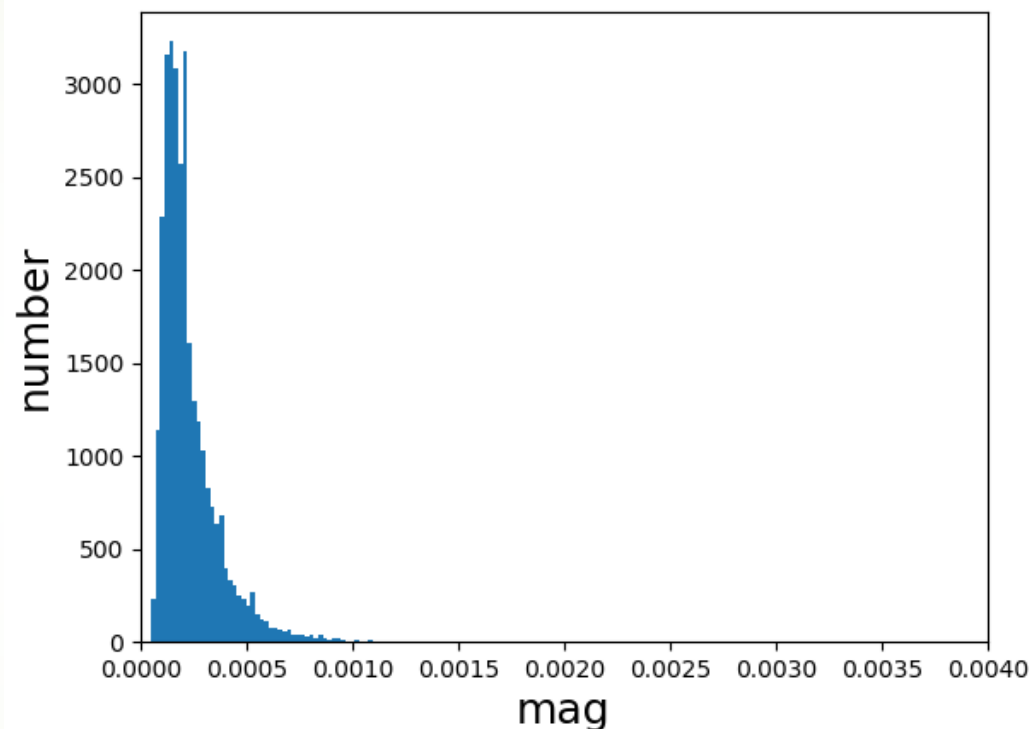
TESS相接双星的解轨

- 解轨的步骤和Kepler类似
- TESS采用的是**TESS:T**滤光片
- 做样本，然后训练
- 建立**TESS模型**

NN模型测试:

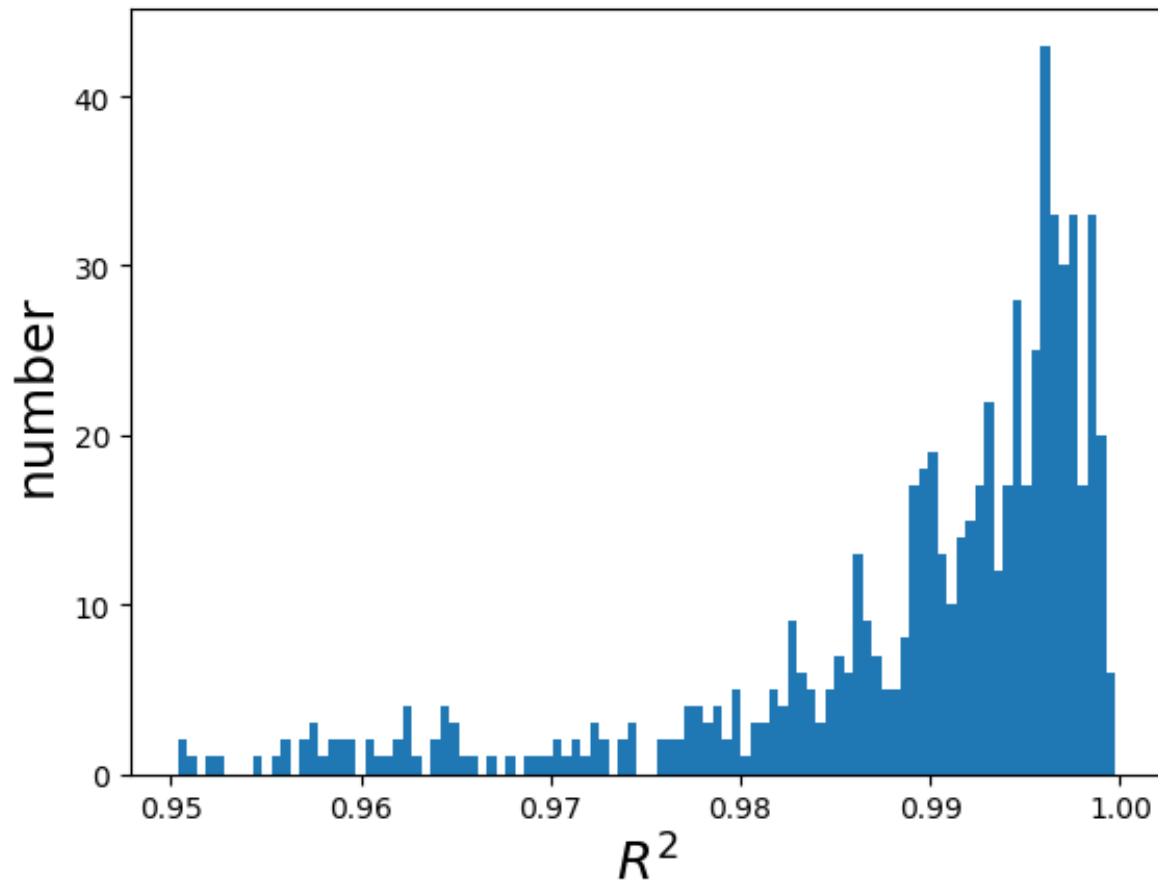


参数使用模型(无第三光影响)生成的光变曲线和标签的光变曲线的残差的标准差的分布主要集中在 $0.00032^{+0.0002}_{-0.0005}$



参数使用模型(有第三光影响)生成的光变曲线和标签的光变曲线的残差的标准差的分布主要集中在 $0.00019^{+0.00034}_{-0.00012}$

TESS批量解轨的结果



拟合度大于0.95的
699个目标

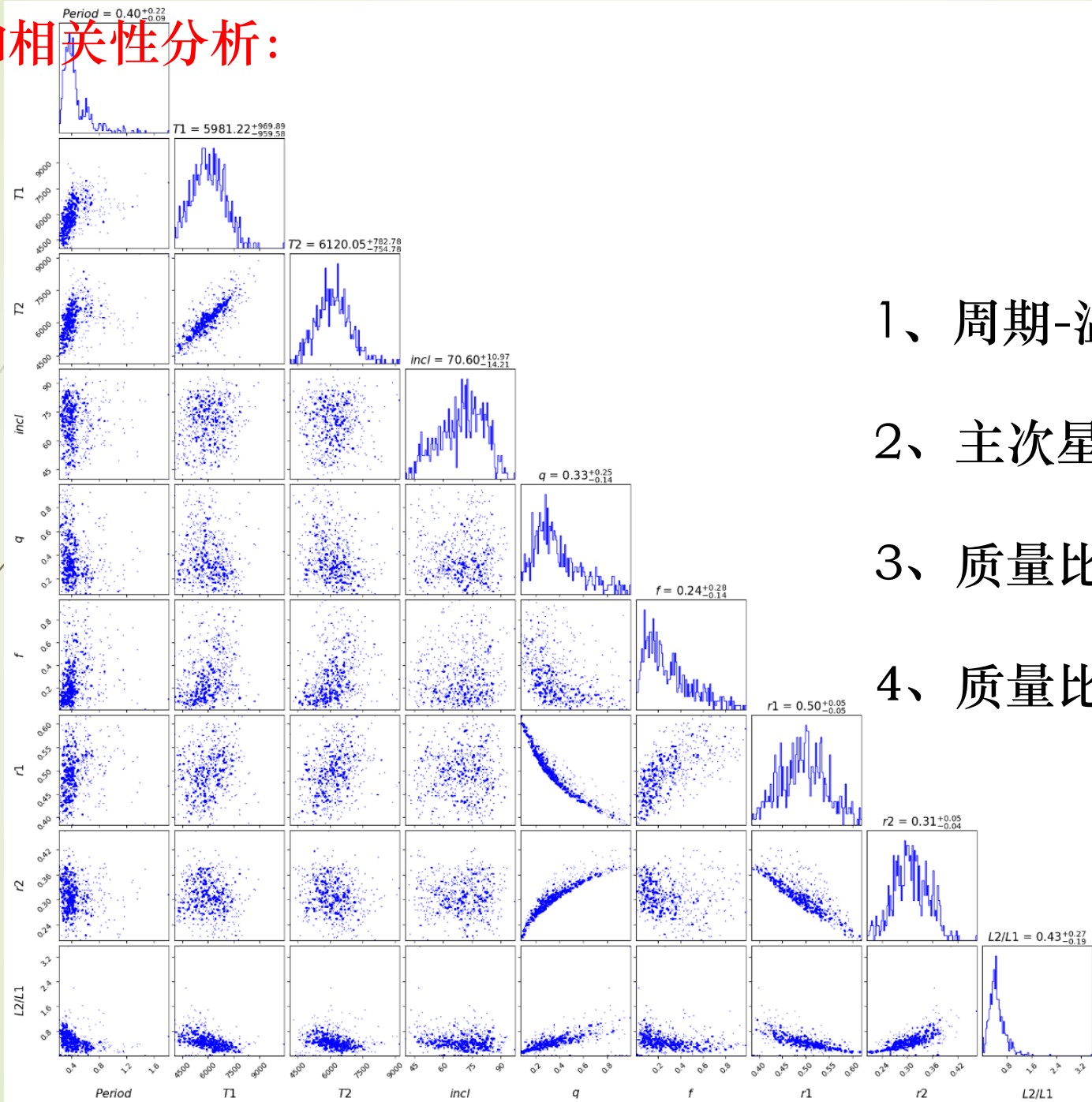
拟合度 R^2 的分布

TESS相接双星参数星表

Num	Column	Units	Explanations
1	name		TESS object name
2	RA	°	RA(J2000)
3	DEC	°	DEC(J2000)
4	Period	day	Orbital period
5	T1	K	Effective temperature of primary star
6	incl	°	Inclination angle
7	σ_{incl}	°	Uncertainty in incl
8	q		Mass ratio
9	σ_q		Uncertainty in q
10	T2/T1		Temperature ratio
11	σ_{t2t1}		Uncertainty in T2/T1
12	f		Fill-out factor
13	σ_f		Uncertainty in f
14	L3		Third light ratio
15	σ_{L3}		Uncertain in L3
16	r_1		Relative radius of primary star
17	r_2		Relative radius of secondary star
18	L2/L1		Light ratio
19	R^2		Goodness of Fit

1. 目标名
2. 赤经
3. 赤纬
4. 周期
5. 主星温度
6. 轨道倾角
7. 轨道倾角误差
8. 质量比
9. 质量比误差
10. 温度比
11. 温度比误差
12. 相接度
13. 相接度误差
14. 第三光比例
15. 第三光比例误差
16. 主相对半径
17. 次星相对半径
18. 光度比
19. 光变曲线拟合度 R^2

参数的分布和相关性分析:



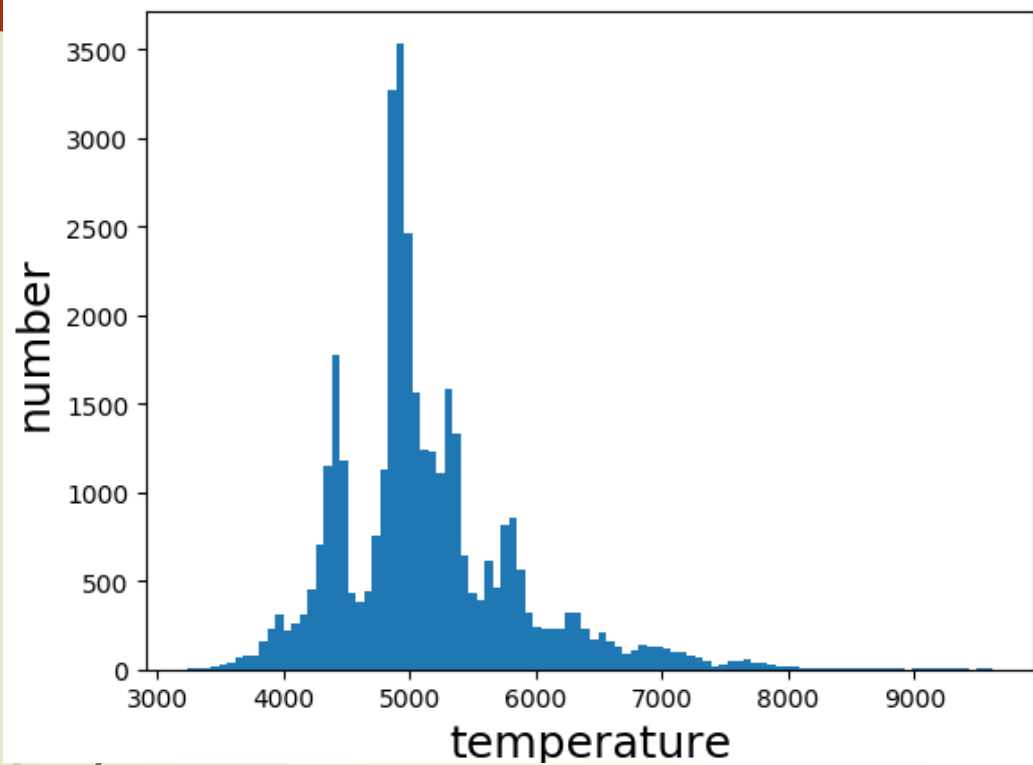
- 1、周期-温度关系
- 2、主次星温度的关系
- 3、质量比和光度比之间的关系
- 4、质量比和半径比之间的关系

ZTF相接双星的解轨

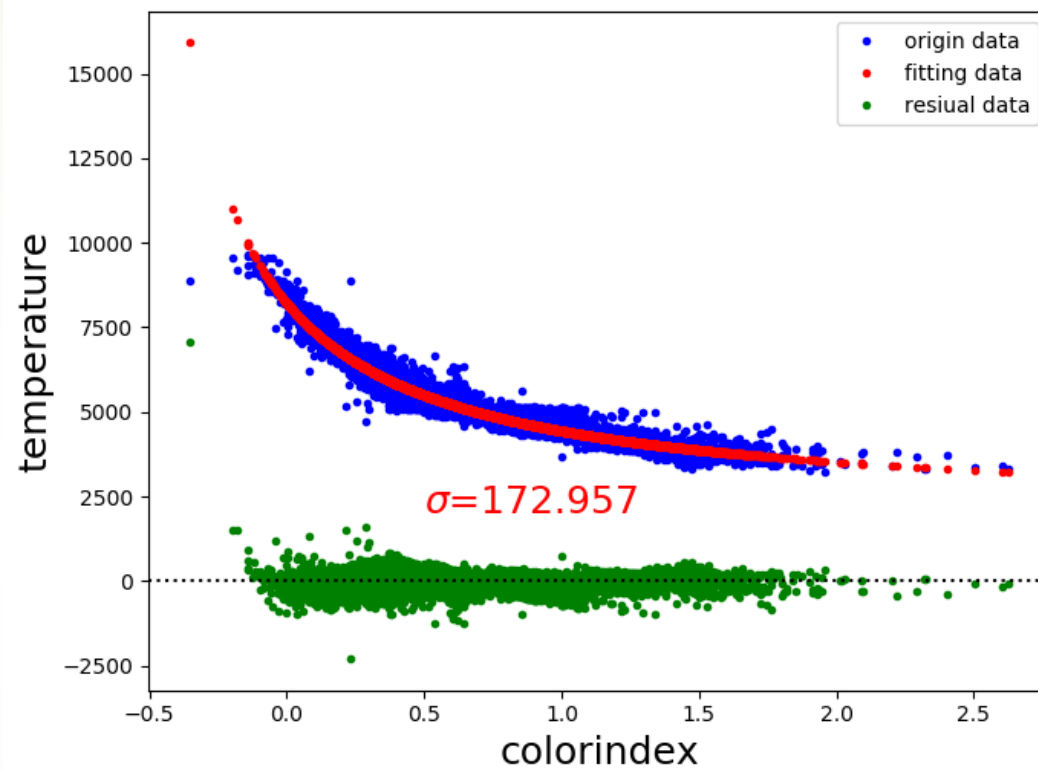
与TESS解轨不同的地方主要体现在以下三点：

- 一、**数据集的不同**，TESS所采用的滤光片为TESS:T波段，而ZTF需要将数据集对应的滤光片设置成**ZTF的r波段**；（训练方式与TESS类似）
- 二、ZTF的光变曲线数据的**噪声**相比TESS的数据大很多，需要做**一定的预处理**；
- 三、由于ZTF的目标相对**比较暗**，对于**大部分目标的主星温度采用色指数**的方法进行计算。

温度的预处理:

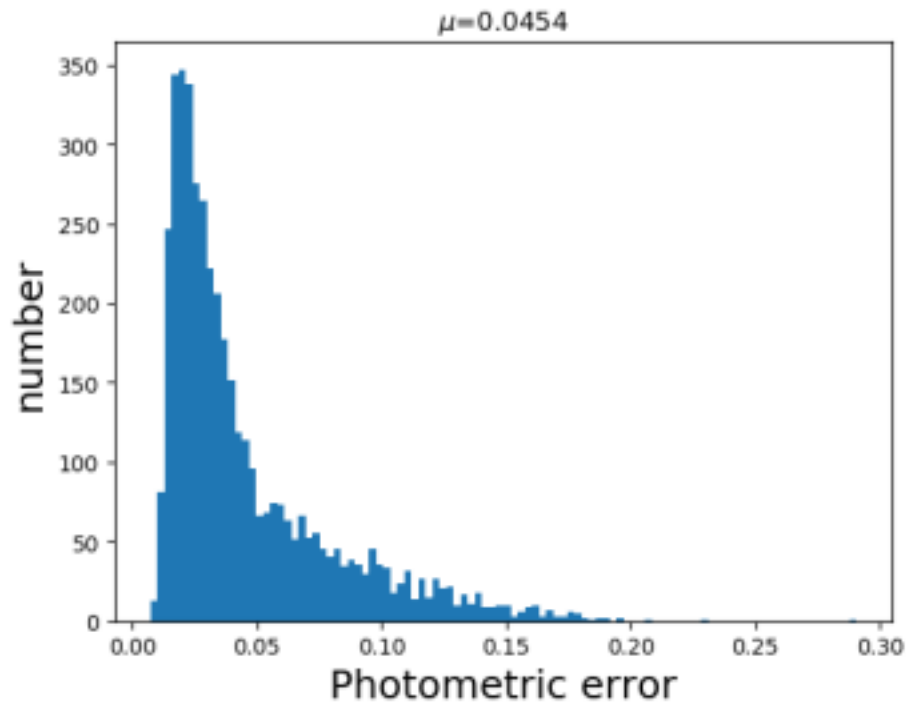


用10万个目标和Gaia匹配上**36483**个，
温度的平均值是**5138.49K**



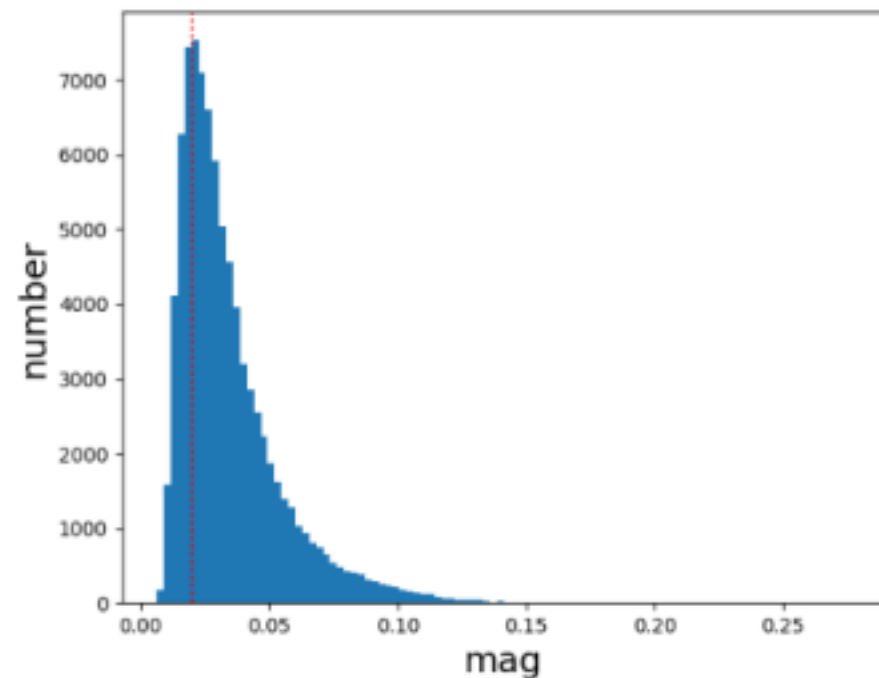
$$T = \frac{a}{colorindex + b} + c$$
$$a = 3950.7775$$
$$b = 0.6394$$
$$c = 2026.48318$$

测光误差分布：



(a)测光误差分布

测光误差的均值在
0.045mag

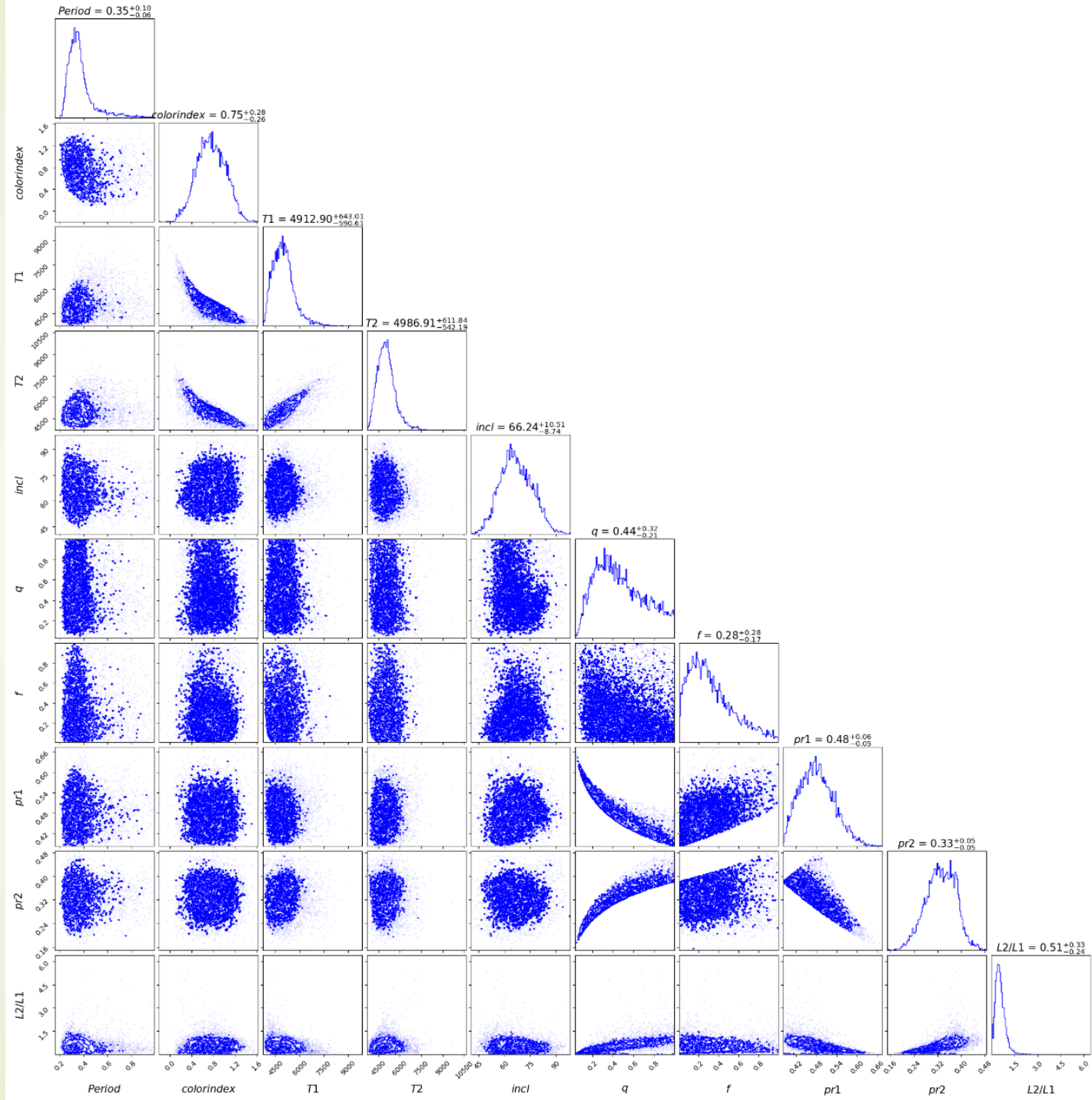


(b)光变曲线拟合残差的标准差分布

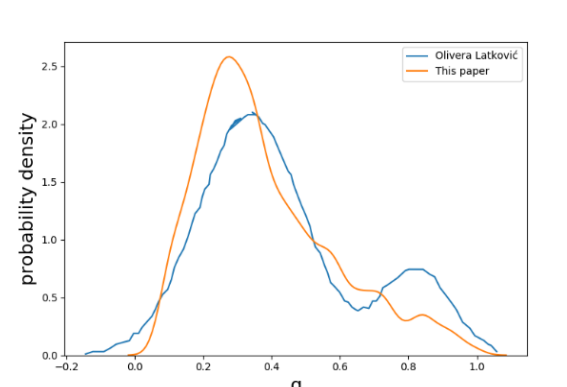
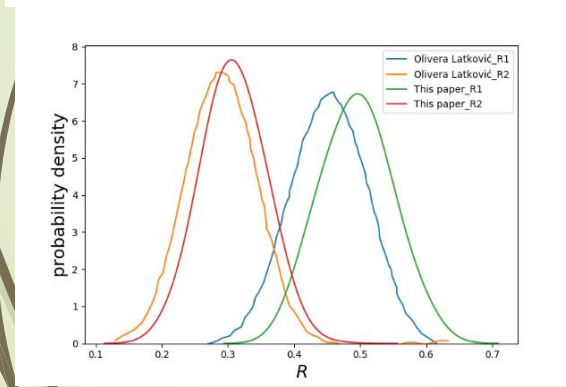
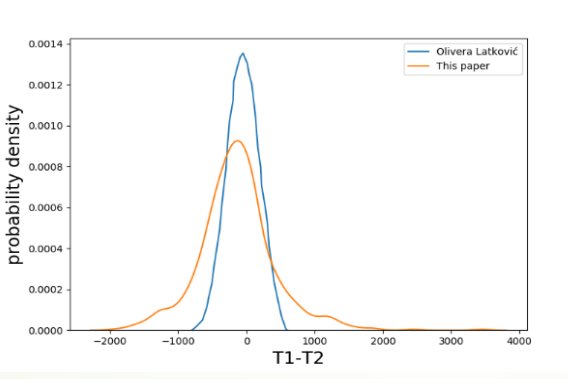
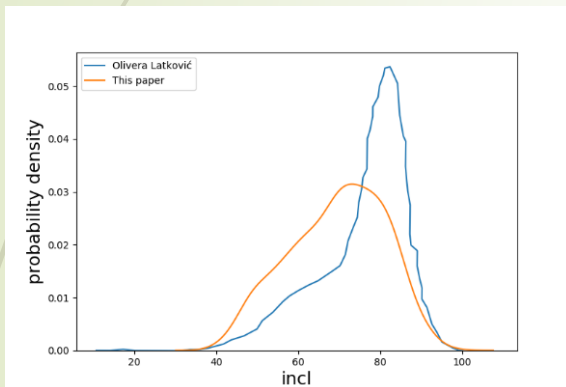
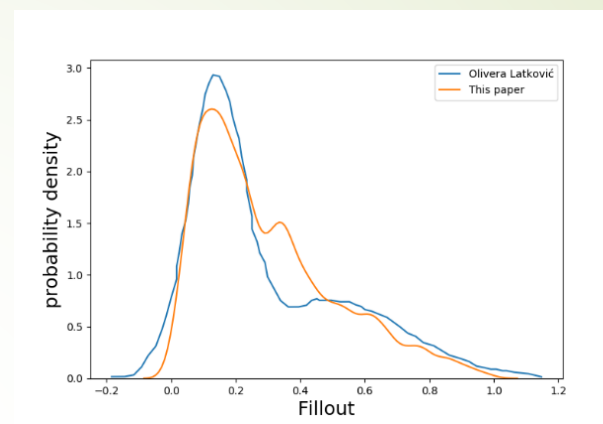
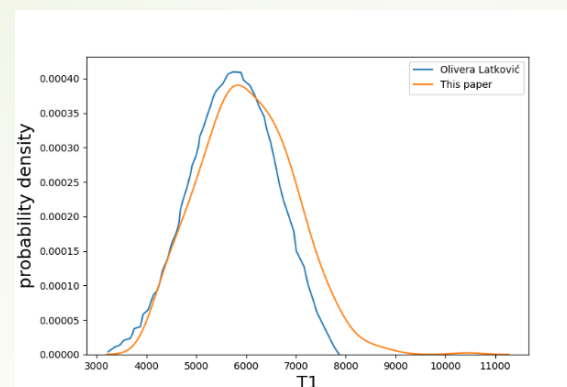
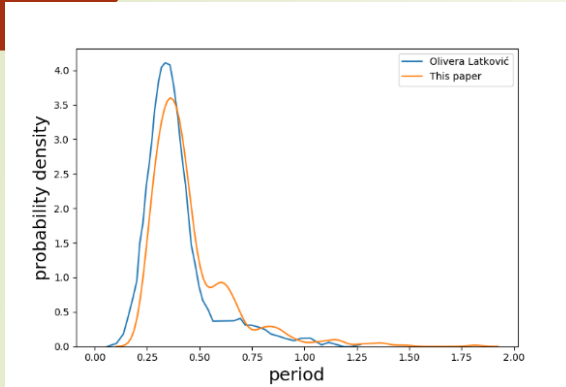
Phoebe根据86365颗目标的解轨参数
生成光变曲线，残差的标准差均值是
0.035mag

ZTF相接双星参数
星表
(86365颗目标)

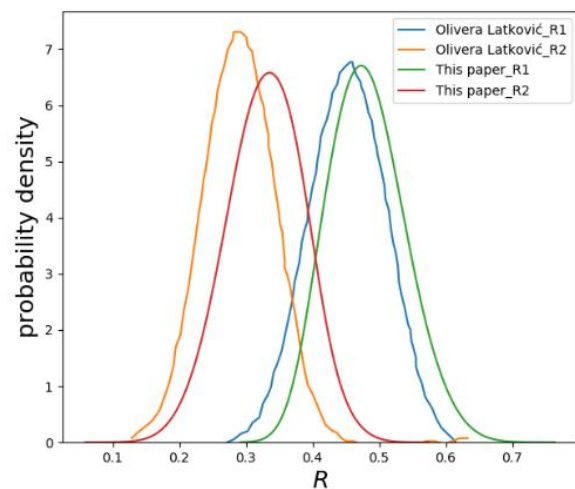
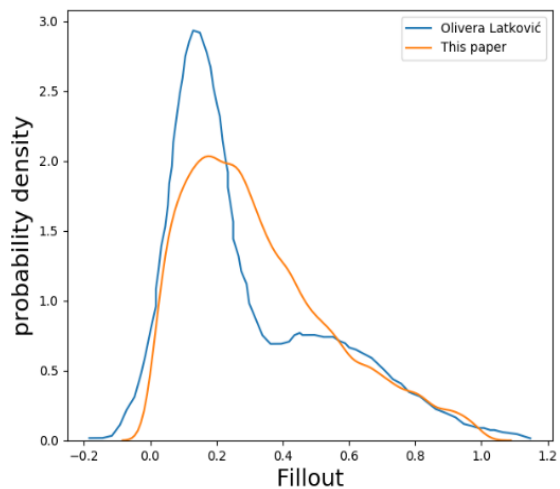
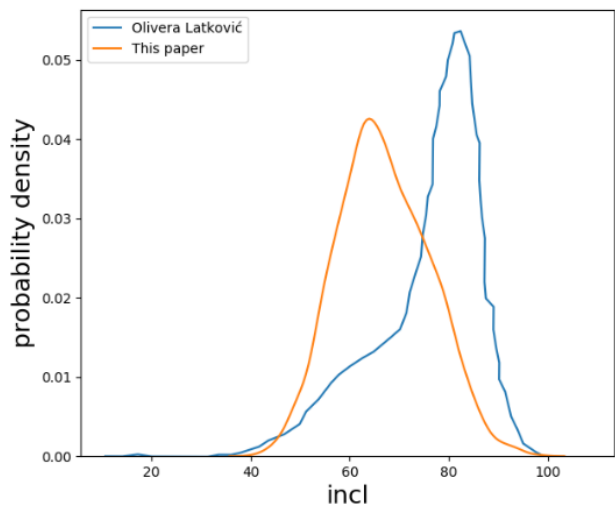
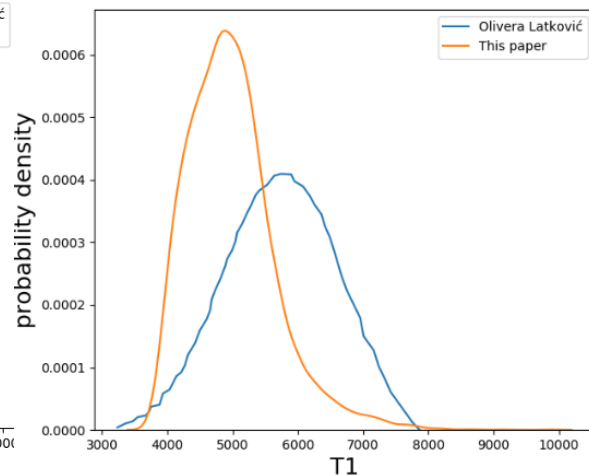
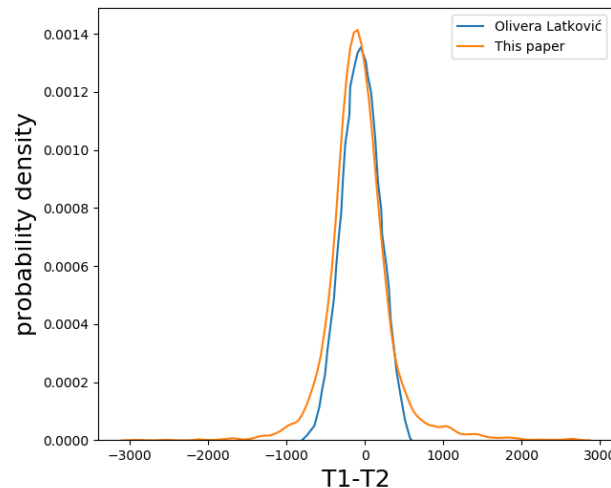
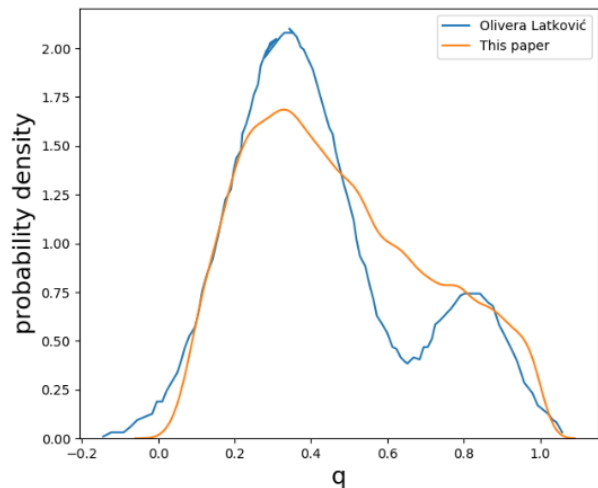
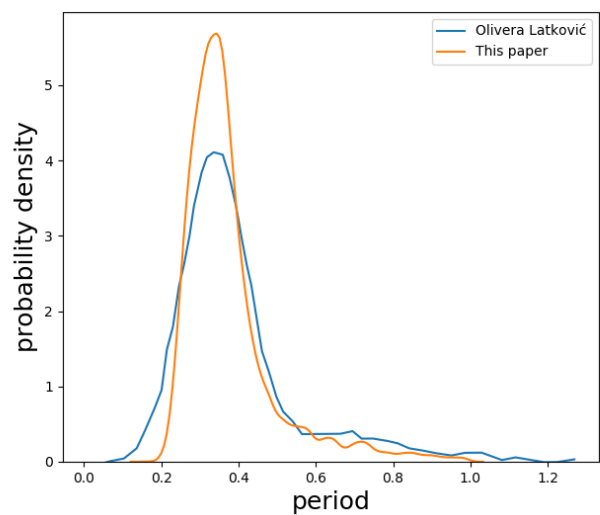
Num	Column	Units	Explanations
1	name		ZTF object name
2	RA	°	RA(J2000)
3	DEC	°	DEC(J2000)
4	Period	day	Orbital period
5	T1	K	Effective temperature of primary star
6	incl	°	Inclination angle
7	σ_{incl}	°	Uncertainty in incl
8	q		Mass ratio
9	σ_q		Uncertainty in q
10	T2/T1		Temperature ratio
11	σ_{t2t1}		Uncertainty in T2/T1
12	f		Fill-out factor
13	σ_f		Uncertainty in f
14	L3		Third light ratio
15	σ_{L3}		Uncertain in L3
16	r_1		Relative radius of primary star
17	r_2		Relative radius of secondary star
18	L2/L1		Light ratio
19	$\sigma_{residual}$		Std value of Residual



Latković等 (2021) 人通过搜集文献, 获得700颗相接双星的参数。



Latković O, Čeki A, Lazarević S. Statistics of 700 individually studied W UMa stars[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2021, 254(1): 10



Latković等（2021）通过搜集文献，总共获得700颗相接双星的参数，我们将我们的获得参数分布和其获得的参数分布进行对比

