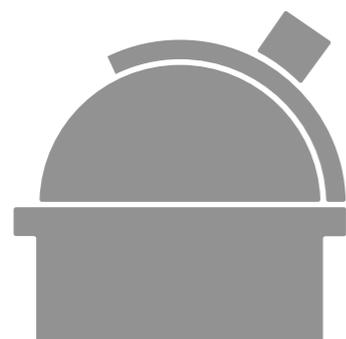


# TriCCS を用いた 系外惑星トランジットの多バンド高速撮像



東京大学 理学系研究科

**修士1年 直川史寛**

檜山和己、森万由子

松林和也、川端美穂、新納悠、土居守、酒向重行、有馬宣明、TriCCSチーム

※当日の発表内容から、一部変更しています

# 研究の目的

## ① TriCCSの試験

- ・ 高速撮像モードの利用
- ・ 測光精度の評価

## ② 系外惑星のトランジット観測への応用

- ・ 高速撮像の活用は可能か
- ・ 多バンドでの光度曲線の違いは検出できるか

# 観測対象

**TrES-1 (主星)** ( RA = 286.0408, DEC = 36.6323)

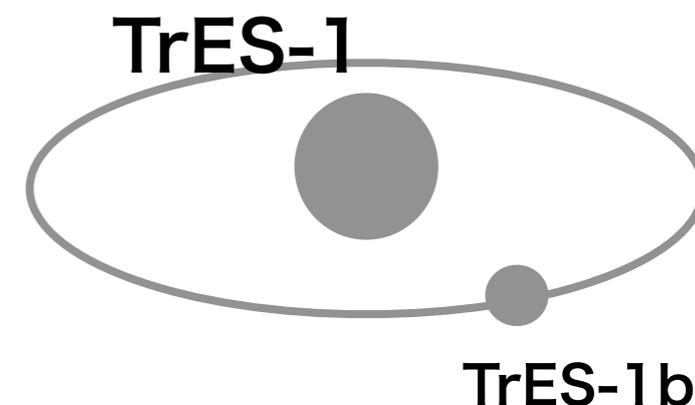
等級 : 11.55 mag(g), 10.96 mag(rp) (Gaia EDR3)

**TrES-1b (惑星)**

惑星半径 :  $R_p = 1.13 \pm 0.06 R_{\text{Jup}}$  (Stassun et al.2017)

主星との半径比 :  $R_p/R_s = 0.13781 \pm 0.00097$  (Baluev et al.2015)

減光度 :  $(R_p/R_s)^2 \sim 2\%$



2% 程度

# 観測対象

**TrES-1** ( RA = 286.0408, DEC = 36.6323)

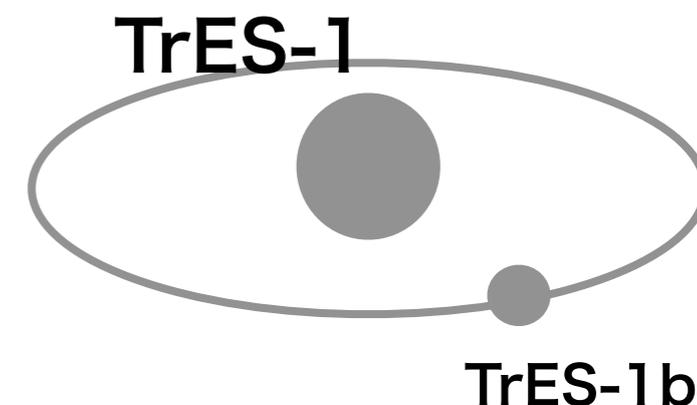
等級： 11.55 mag(g), 10.96 mag(rp) (Gaia EDR3)

## 観測プロフィール

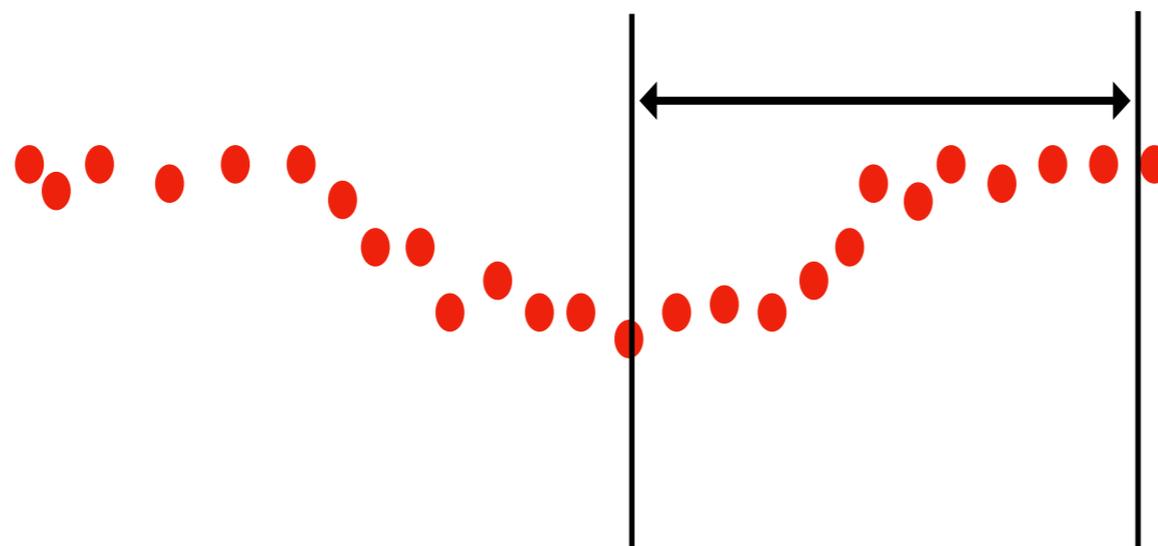
日時：2021年5月21日 約2時間

1フレームあたりの露光時間：約0.1秒 (約10 fps)

バンド：g, r, z

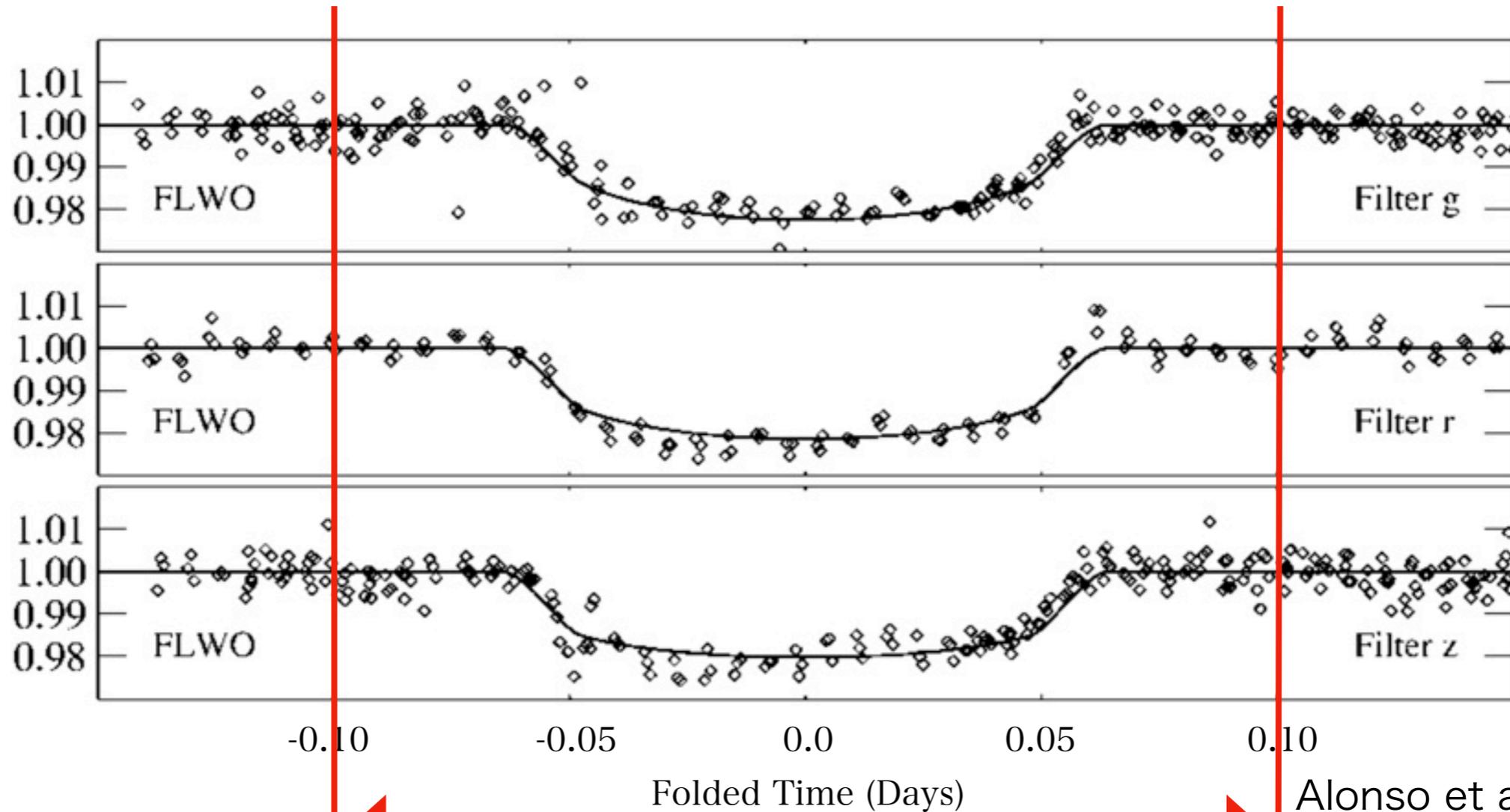


トランジットの後半部分のみを観測



# TriCCSでトランジット観測を行う利点

## 1. 高速撮像



TriCCS (10 fps)なら・・・

**この区間に約17万個の測定点**

# TriCCSでトランジット観測を行う利点

## 1. 高速撮像

多くの点が打てると・・・

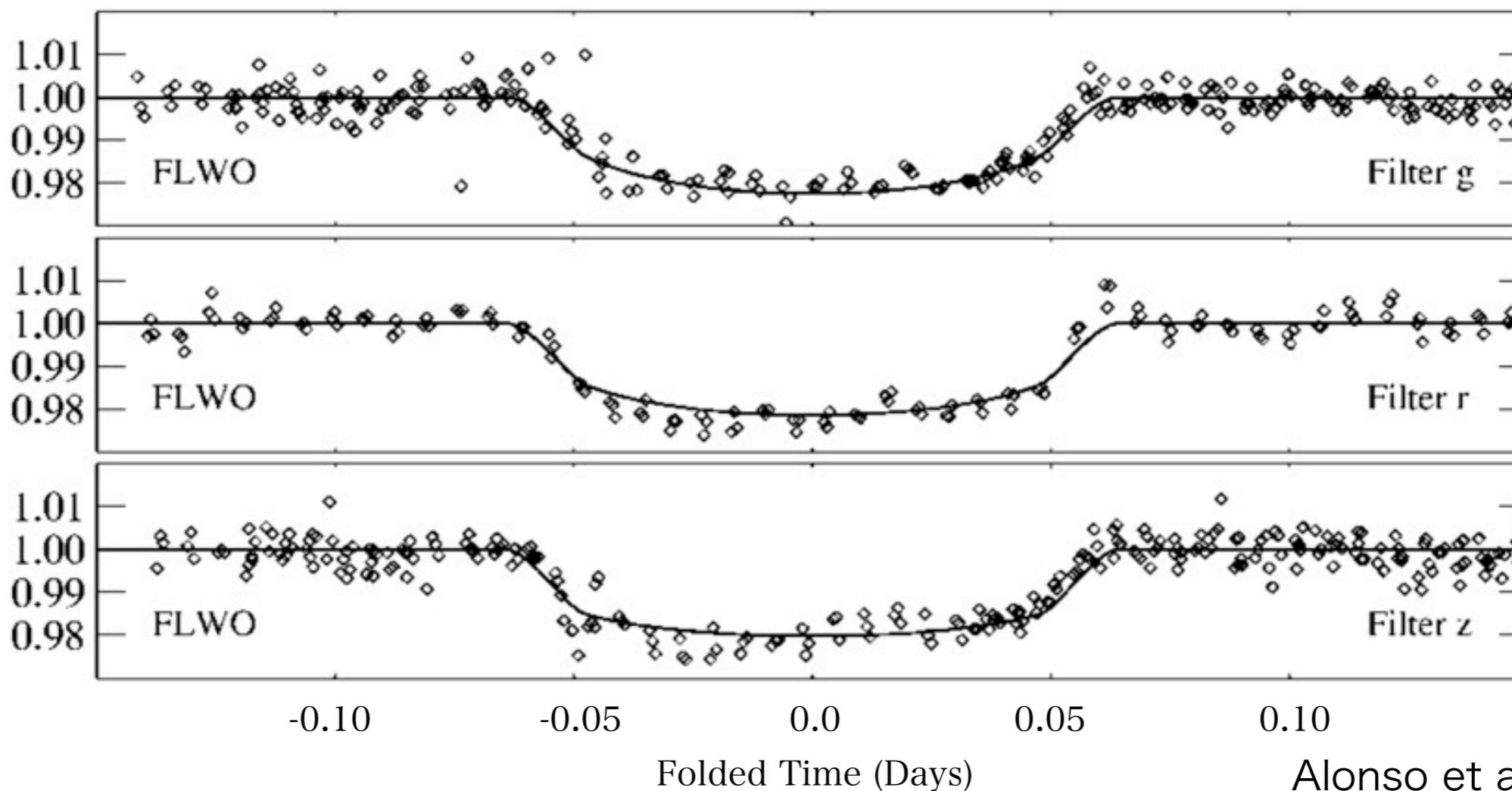
→トランジット光度曲線の精密な決定

→短い時間スケールで生じる光度曲線  
の変化を検出

ただし、これらはノイズとの兼ね合い  
今回、そこを評価

# TriCCSでトランジット観測を行う利点

## 2. 多バンド同時撮像



**光度曲線の形は波長依存性を持つ  
(主星の周辺減光によるもの)**

TriCCSでトランジット観測を行う利点

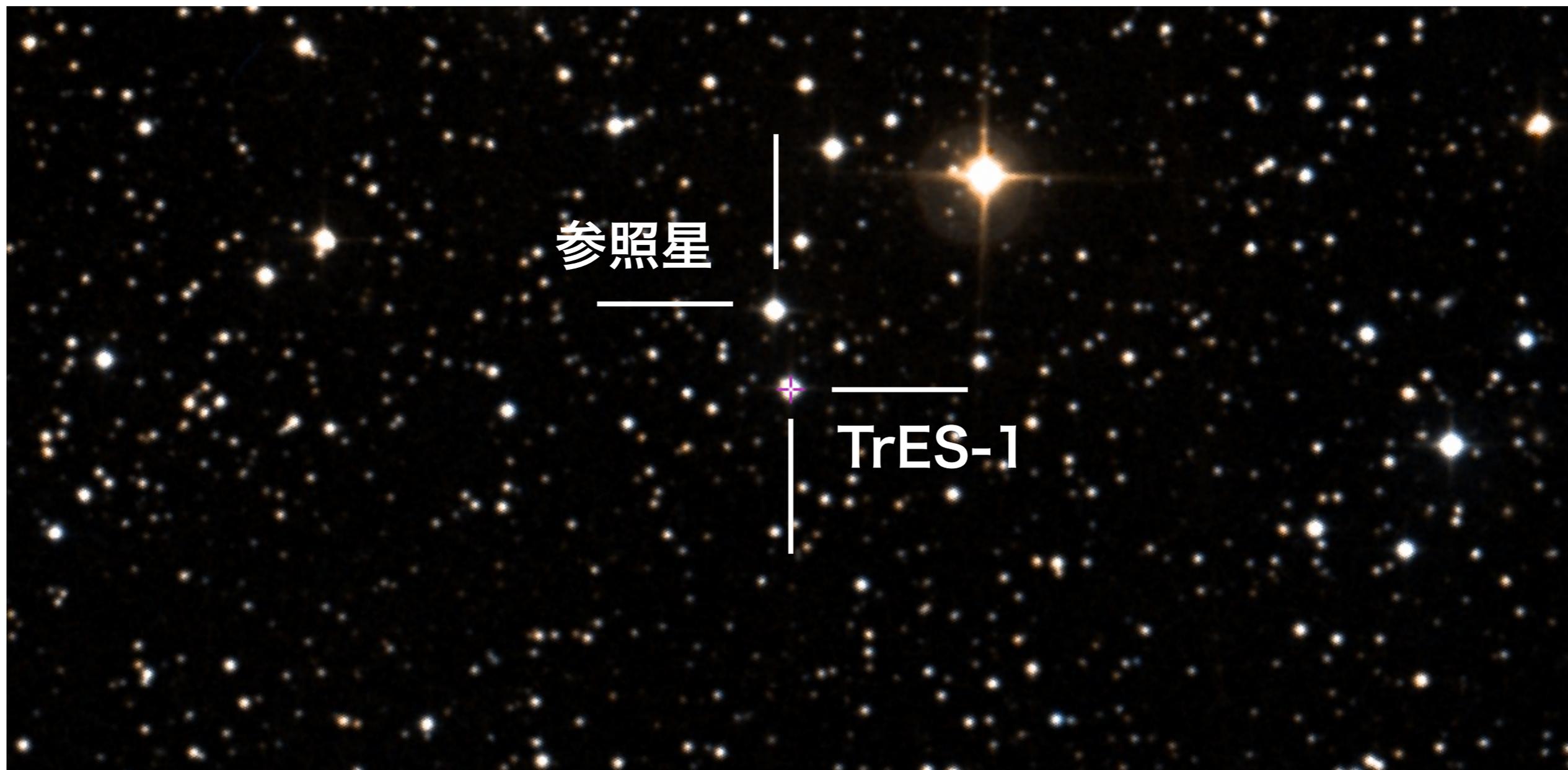
## 2. 多バンド同時撮像

多バンドで撮像ができると・・・

- **(高速撮像と合わせて) 波長ごとの光度曲線の形の違いを高精度で検出**
- **そこから、主星の大気的情報を引き出せる**

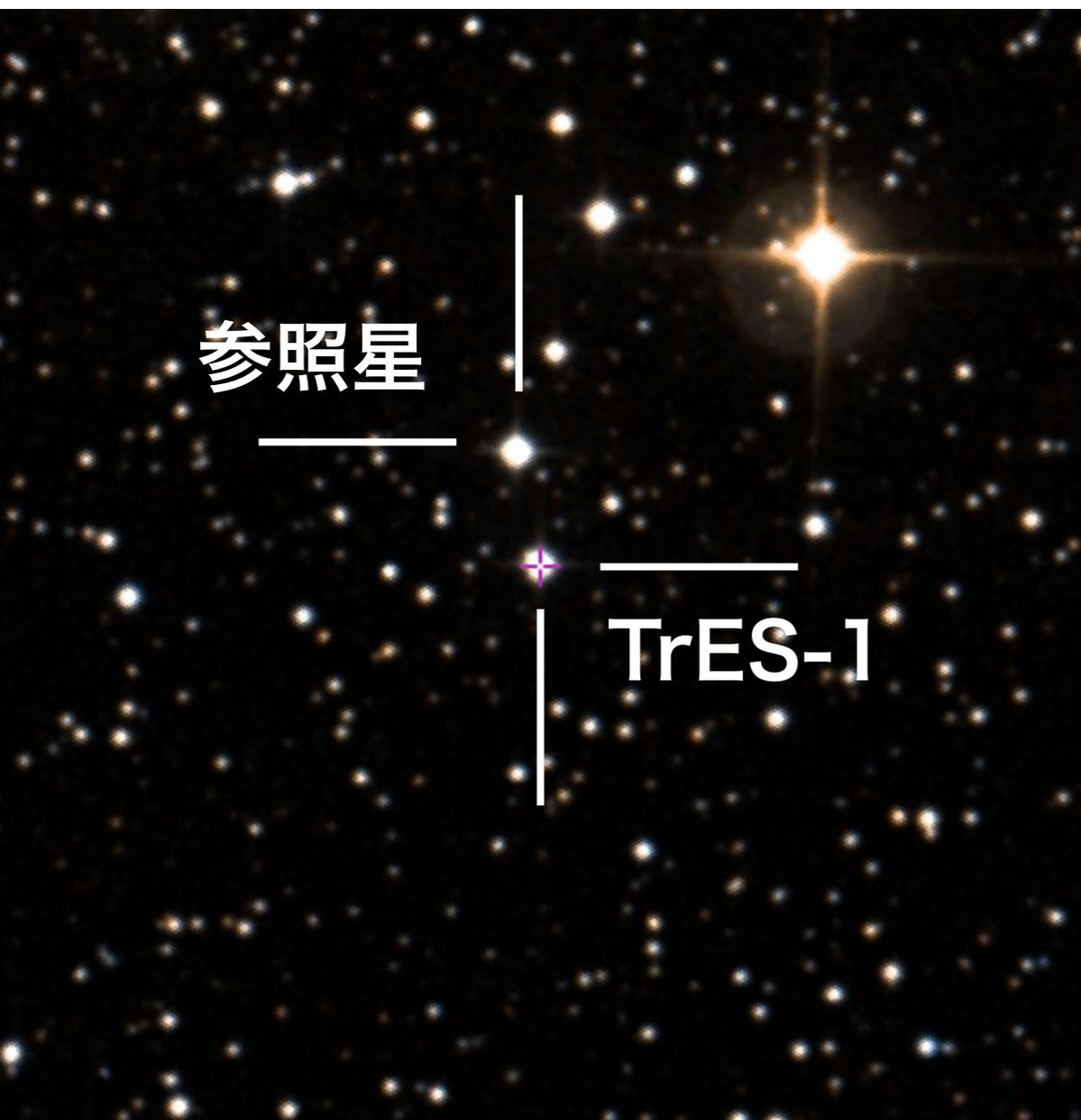
ただし、これらもノイズとの兼ね合い  
今回、そこを評価

# 測光方法



*This image has been created by using "Aladin sky atlas" developed at CDS, Strasbourg Observatory, France*

# 測光方法



- Source Extractor (Bertin & Arnouts 1996) のPython Library SEP (Barbary 2016) を使ったスクリプト (有馬氏作成) を用い、各フレームごとの重心に対して、半径 15 ピクセルでアパチャ測光



- スタック等



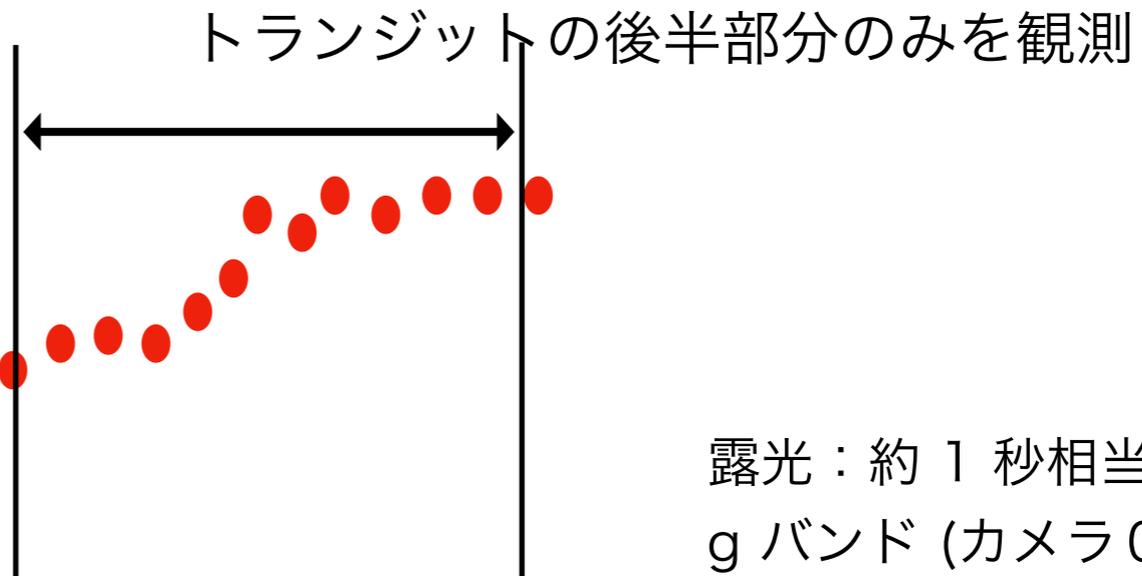
- 参照星との相対測光

# 結果



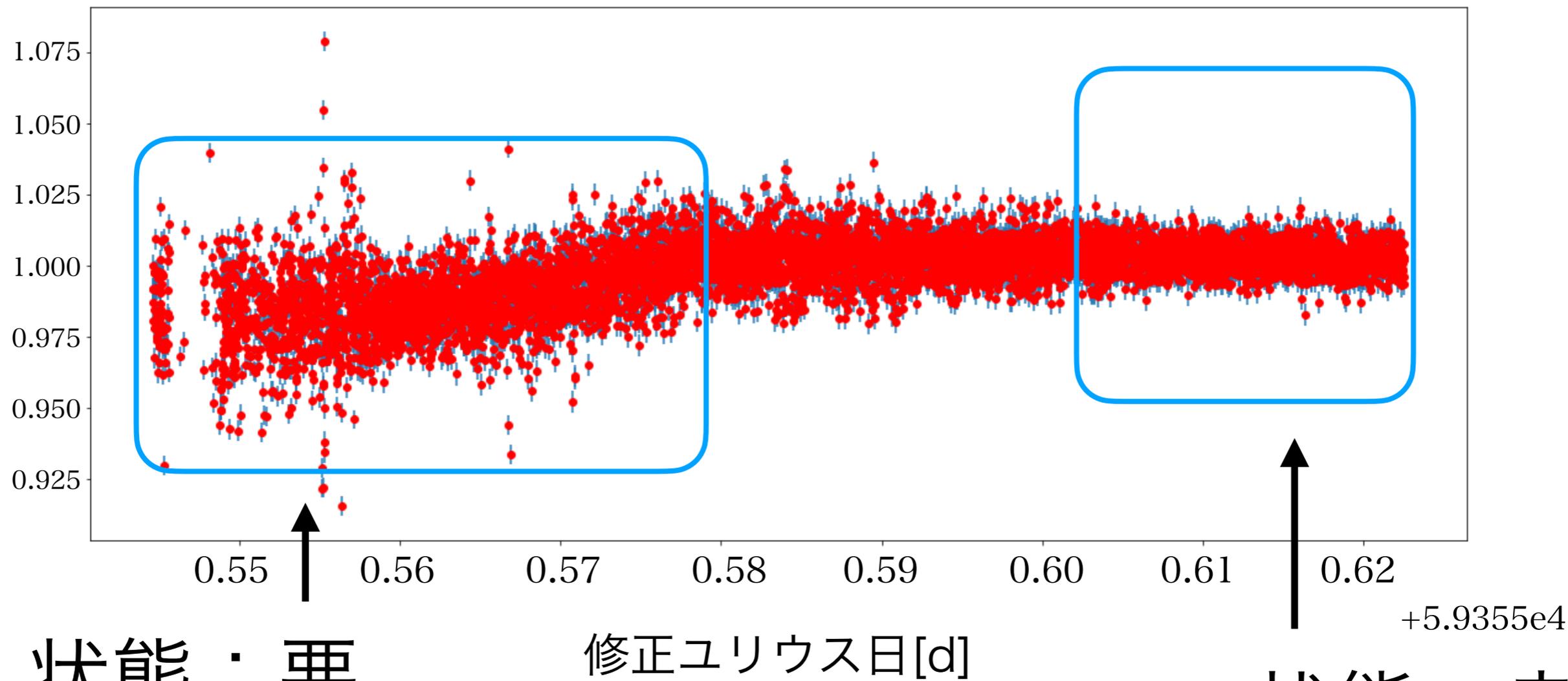
# 結果

## 1. 光度曲線



露光：約 1 秒相当  
g バンド (カメラ 0)

規格化されたフラックス



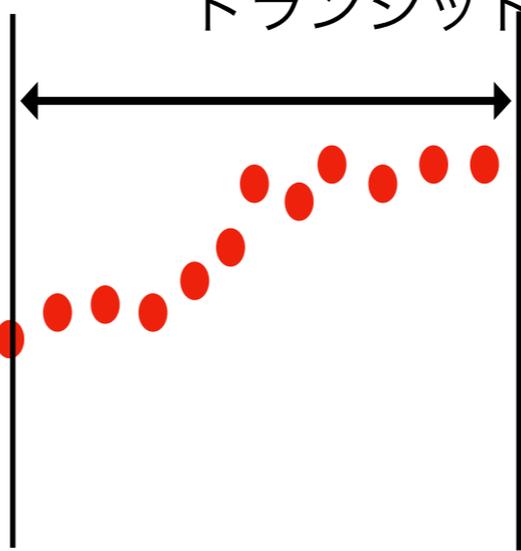
状態：悪

状態：良

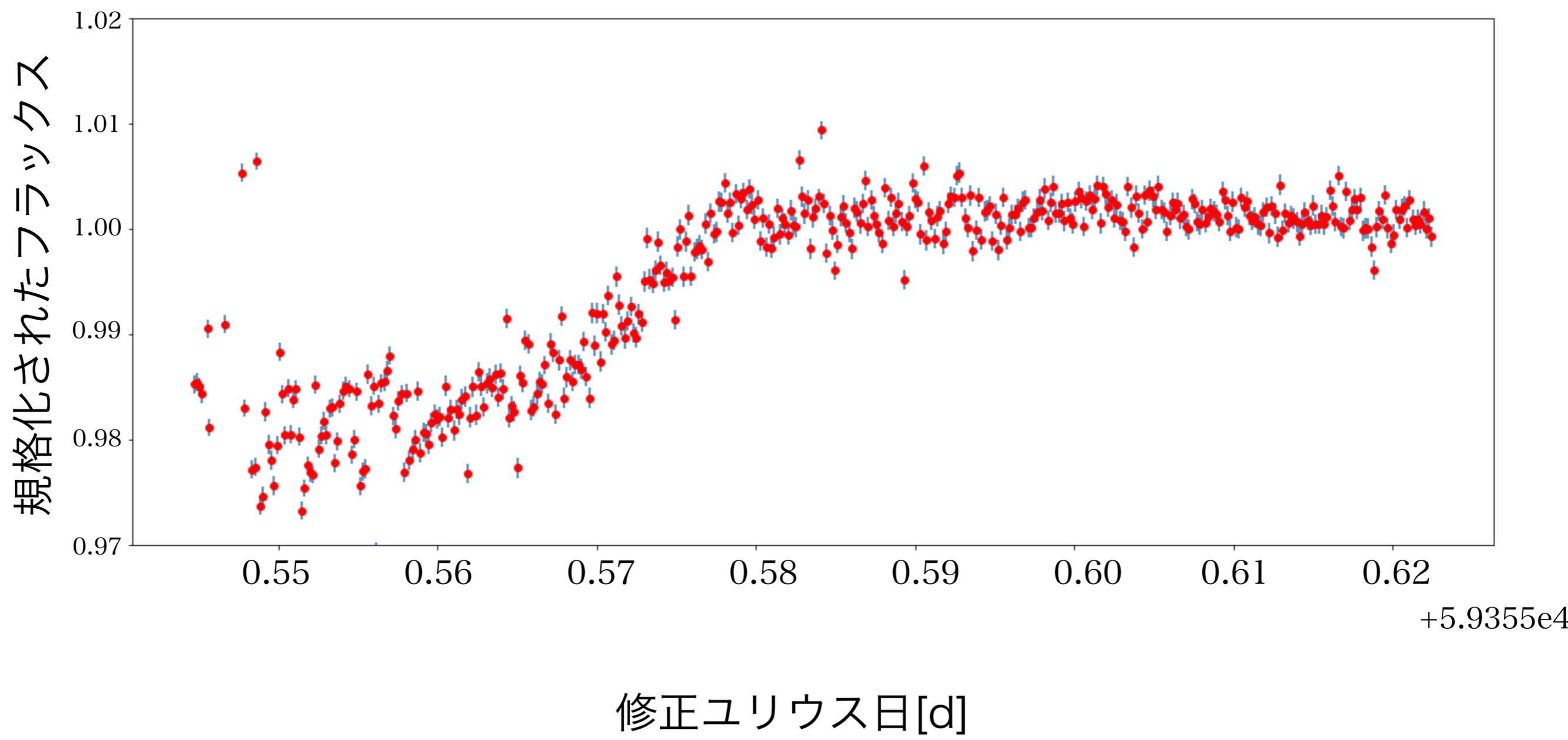
# 結果

## 1. 光度曲線

トランジットの後半部分のみを観測



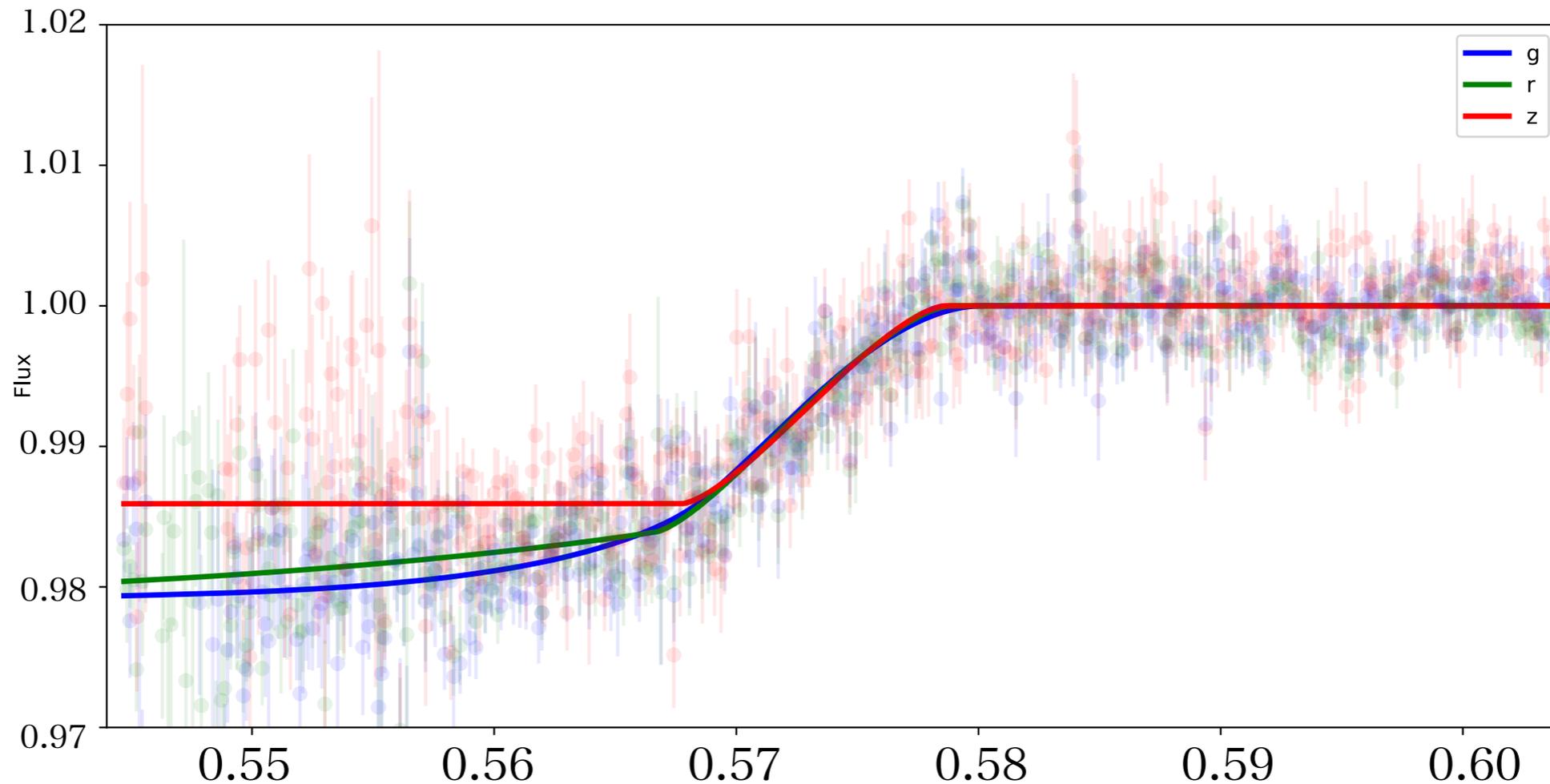
露光：15 秒相当  
g バンド (カメラ0)



## 1. 光度曲線

batman (Kreidberg L. 2015) を用いてフィット

規格化されたフラックス



一部のパラメータは文献値などを参考に固定  
軌道周期 (Baluev et al. 2015)  
軌道長半径 (Bonomo et al. 2017, Baluev  
et al. 2015より計算) など  
以下の (波長依存する) パラメータは探索  
惑星半径、周辺減光のパラメータなど

t - 59355

修正ユリウス日[d]

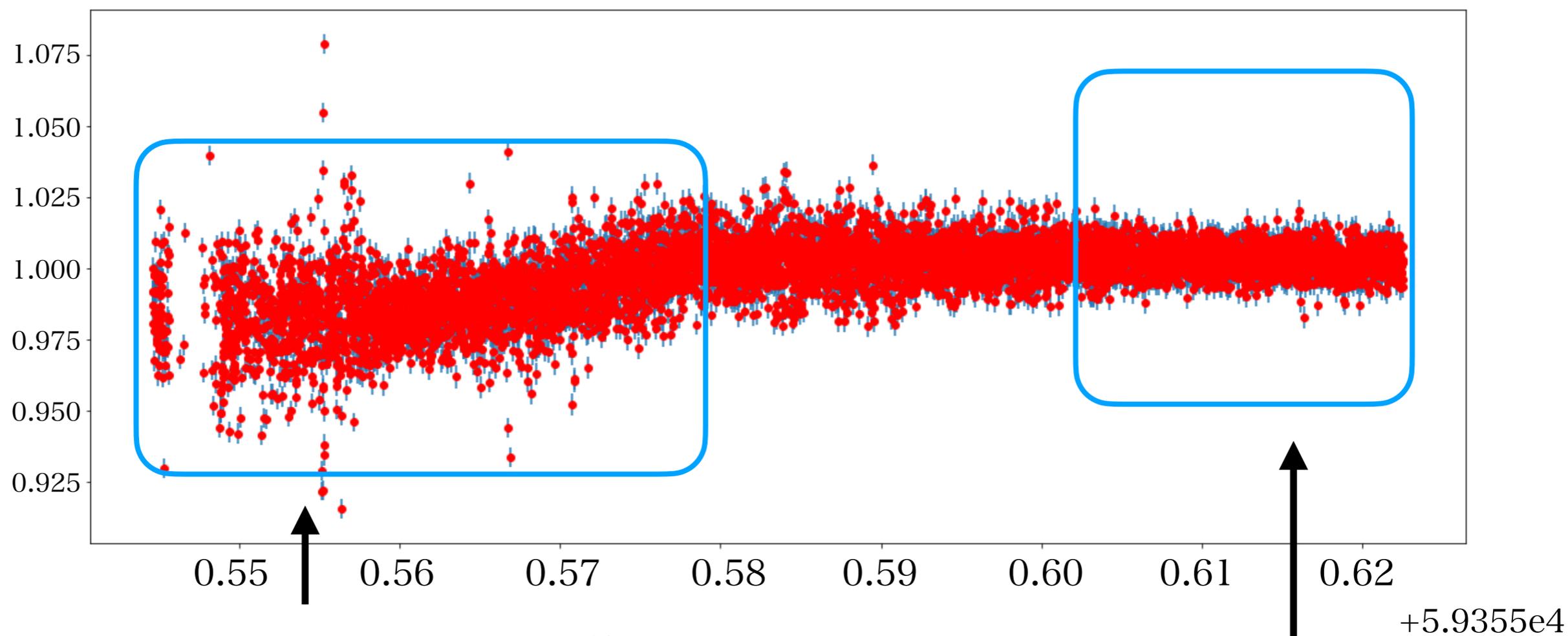
**バンドごとの光度曲線の  
明確な違いは見られなかった**

# 結果

## 2. 測光値のばらつきの評価

露光：約 1 秒相当  
g バンド (カメラ 0)

規格化されたフラックス



状態：悪

状態：良

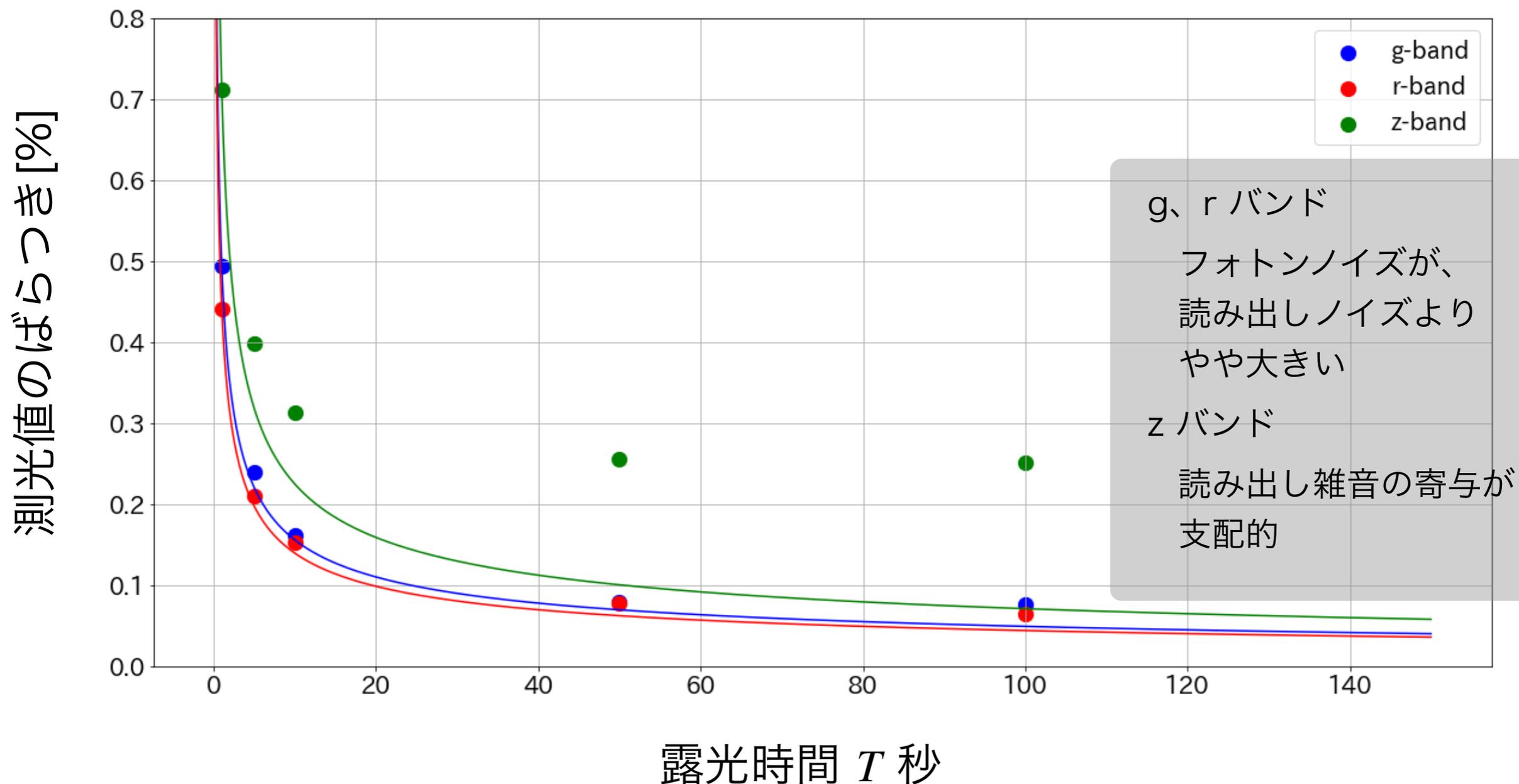
このあたりで評価

# 結果

注：こちらはデータに少し怪しい点があったので再解析しました。その結果は18,19枚目をご覧ください

## 2. 測光値のばらつき

実線は、一番左の点(1 s)を  
基準にした  $\frac{1}{\sqrt{T}}$  のライン

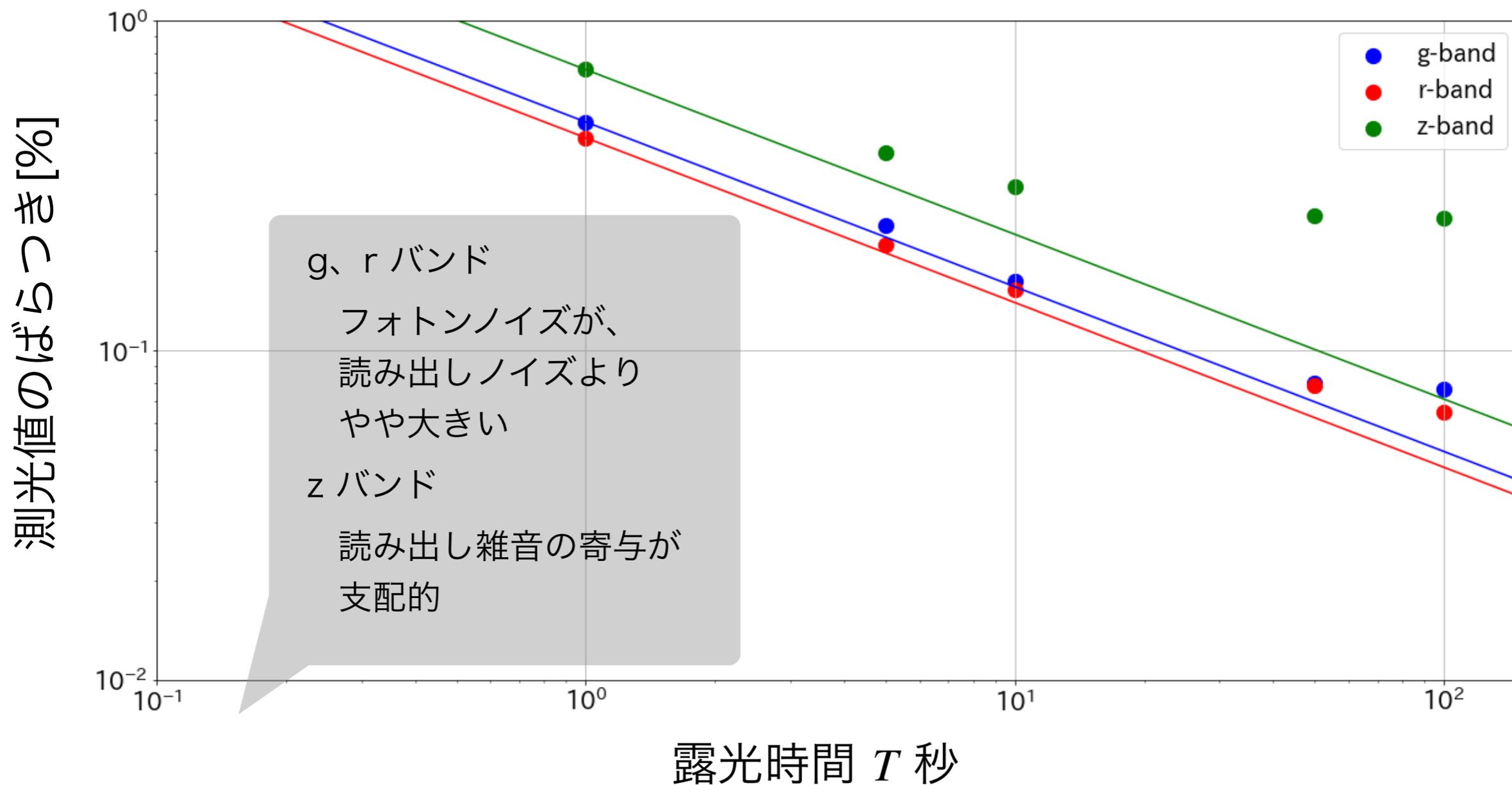


# 結果

注：こちらはデータに少し怪しい点があったので再解析しました。その結果は18,19枚目をご覧ください

## 2. 測光値のばらつき

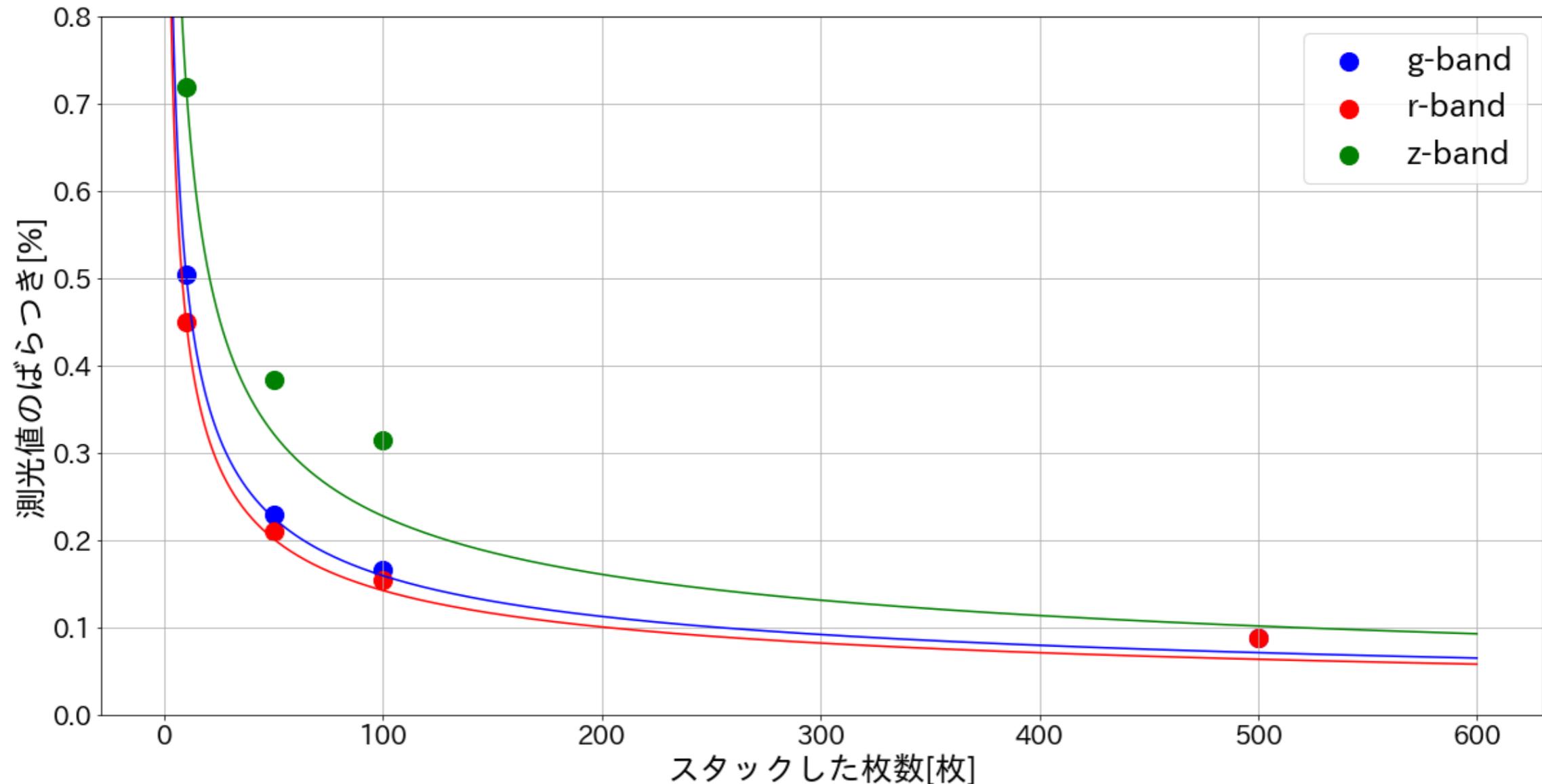
実線は、一番左の点(1 s)を  
基準にした  $\frac{1}{\sqrt{T}}$  のライン



# 結果

## 2. 測光値のばらつき

実線は、一番左の点(10枚スタック)を  
基準にした  $\frac{1}{\sqrt{T}}$  のライン

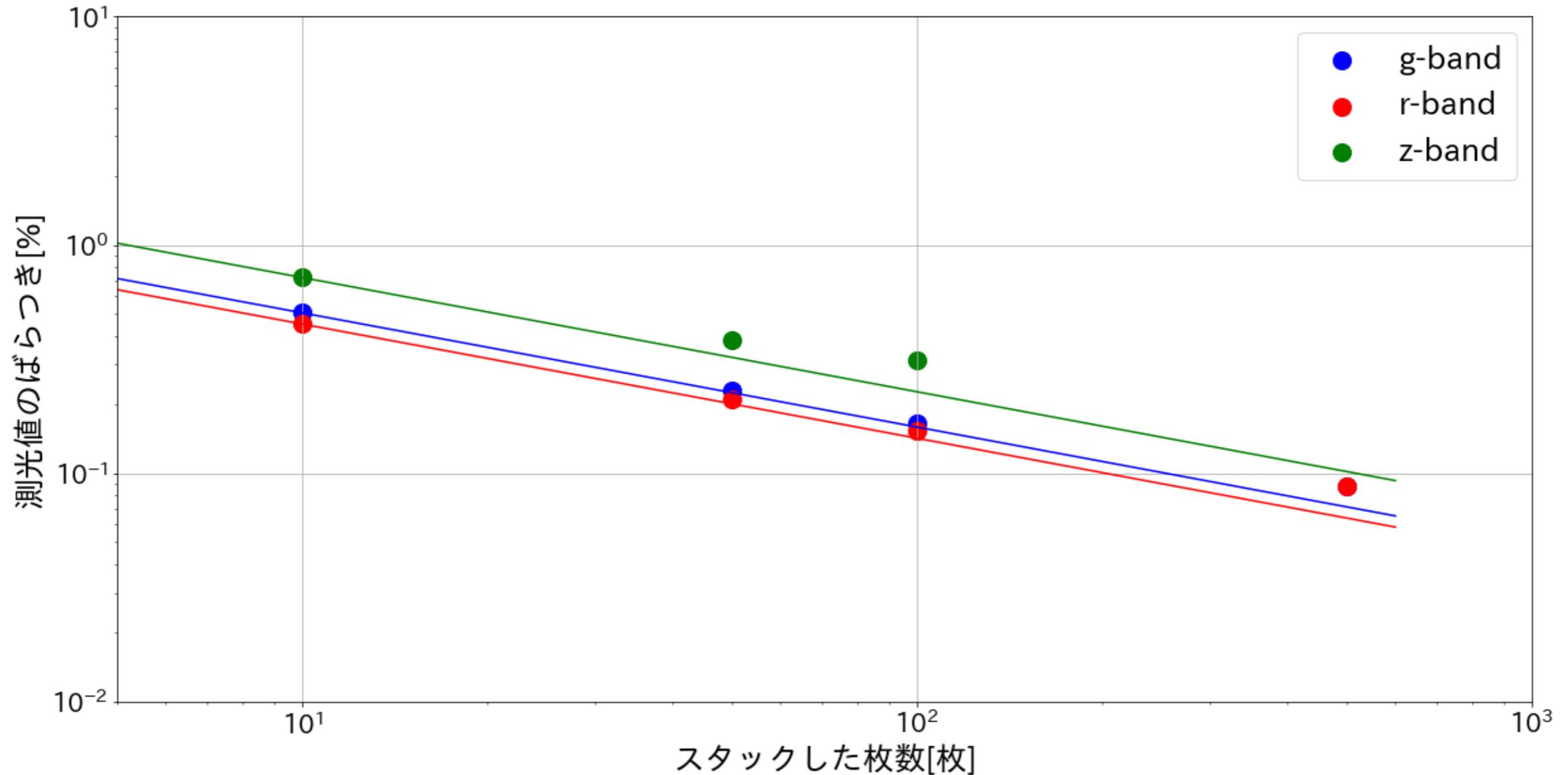


※16枚目のデータについて数値に少し怪しい点があったので、再解析したものがこのスライドです（あまり結果は変わりませんでした）。1フレームあたりの露光時間は約 0.09 秒で、例えばスタックした枚数が 10 枚だと、露光時間約 0.9 秒に相当します。16枚目のグラフとは、プロットした点の数が違うので注意してください。

# 結果

## 2. 測光値のばらつき

実線は、一番左の点(10枚スタック)を  
基準にした  $\frac{1}{\sqrt{T}}$  のライン



※17枚目のデータについて、数値に少し怪しい点があったので再解析したものがこのスライドです（あまり結果は変わりませんでした）。1フレームあたりの露光時間は約 0.09 秒で、例えばスタックした枚数が 10 枚だと、露光時間約0.9秒に相当します。17枚目のグラフとは、プロットした点の数が違うので注意してください。

# 結論

注：当日の発表から多少変更しています

## 系外惑星のトランジット観測 における高速撮像の応用可能性

→ **ノイズの低減＋面白いサイエンスが必要**

そもそもトランジット光度曲線に、短い時間スケールの変動の寄与は少ない？

とりあえずシンチレーションノイズの度合いが大きい

測光方法などに改善の余地があるかも

# 結論

## 系外惑星のトランジット観測 における高速撮像の応用可能性

→ただし、以下の点では意味がある

- 大量に測定点を打てるので、外れ値を削除しても、特に影響を受けない  
(観測装置への宇宙線などの影響を受けにくい)
- 観測対象の主星が明るい場合、サチらずに観測を行える

データ量が膨大（後述）になることとの  
トレードオフがある

# TriCCS を使ってみて

## データが重い！！



# TriCCS を使ってみて データが重い！！



3バンド × 約2時間分で 1 TB 超



一発撮るたびに大容量のストレージを用意しないと解析できない



ネットワーク経由での転送ができない



ある程度の計算機環境がないと、解析が大変

cf) Source Extractor を走らせると、10 時間程度かかった  
(環境：8コア メモリ 40 GB iMac)