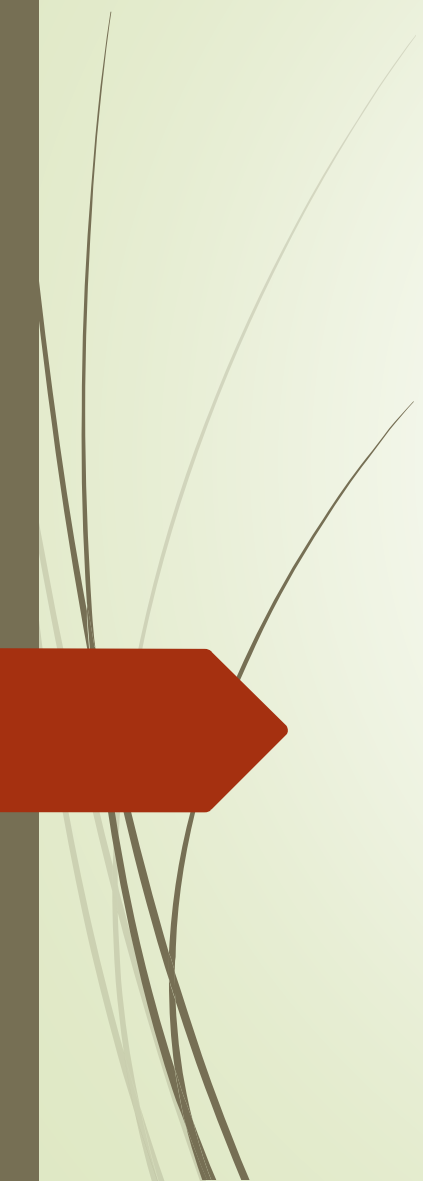




時間領域天文学と 時刻補正

東京工業大学

伊藤亮介

2018-12-25

大学間連携WS @ 埼玉大学

Summary

GPSを用いた可視光観測用CCD 用の
安価な時刻校正システムを構築した

GPS+LED発光で(安価に) $\pm 45\text{ms}$ の絶
対時刻校正が可能に

2013年1月に太陽系外縁天体
Varunaによる恒星食の観測に成功

目次

- 天文学と絶対時刻
- 時刻校正手段
- かなた望遠鏡/高速カメラでの実装例
- 掩蔽観測例

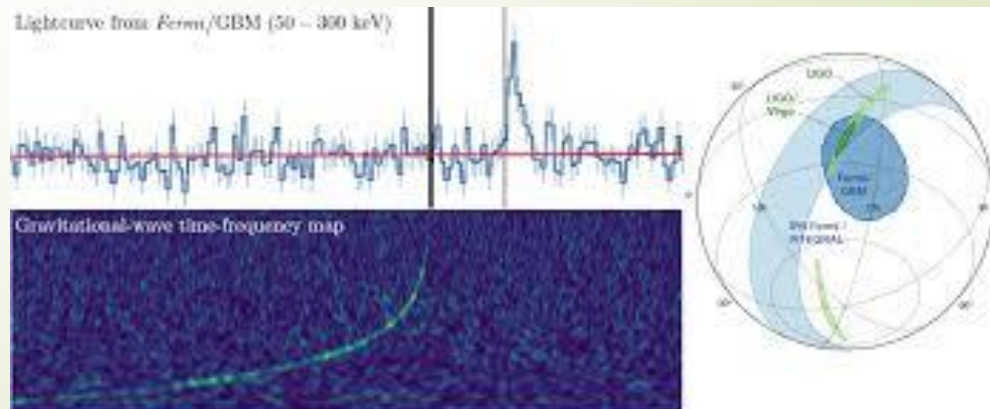
時刻と天文学

“時刻（じこく）とは、時間の流れにおけるある一点、連続する時間の中のある瞬間[1]、または時間の区分のこと。ある時点や時間の区分や現在を、他の時点や時間の区分と区別する表現である。”

Wikipediaより



<http://www.geocities.co.jp/SilkRoad-Forest/4638/toruko.html>

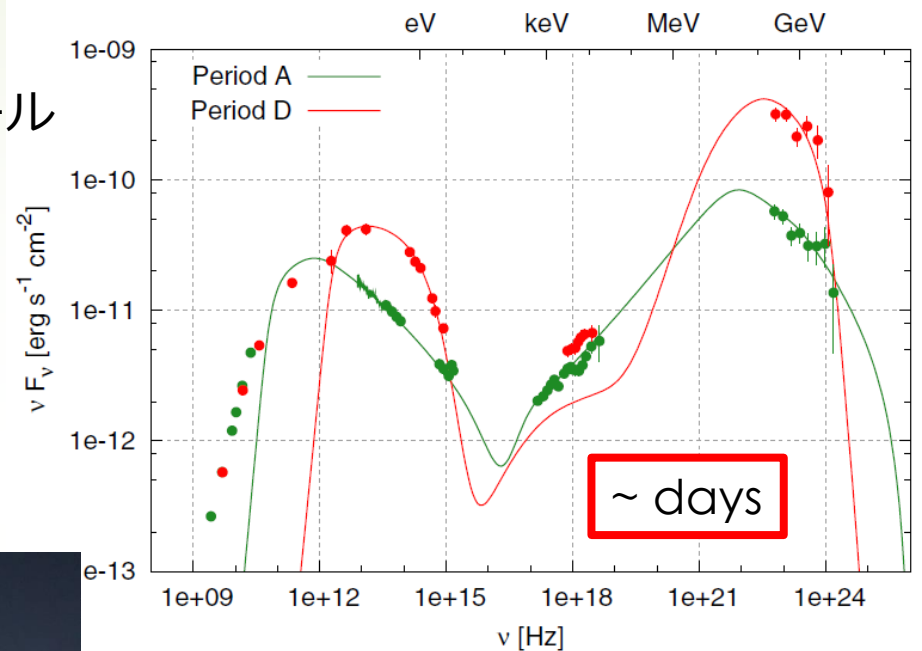


“同時”観測

- 天体の変動タイムスケール
- 観測装置の感度
- ...



Blazar, MW-SED (hayashida+12)



- Pulsar
- 光の振動数
- 光子の到達時間

時計の歴史

時代	手法	原理	時間精度
古代	日時計	太陽位置	1 時間
B.C. 300	水・砂時計	重力	1 時間
A.C. 1000	ギア式	バネ・重力	数分
A.C. 1600	振り子	重力	1-10秒
A.C. 1900	クォーツ	圧電効果	10 μ sec
A.C. 1950	原子時計	共鳴	1 femto sec

“時刻”の基準

協定世界時(UTC)

世界中の研究機関にある200台以上の
原子時計の重み付き平均

地球の自転に基づくUT1 との差は閏秒の
挿入によって調整される

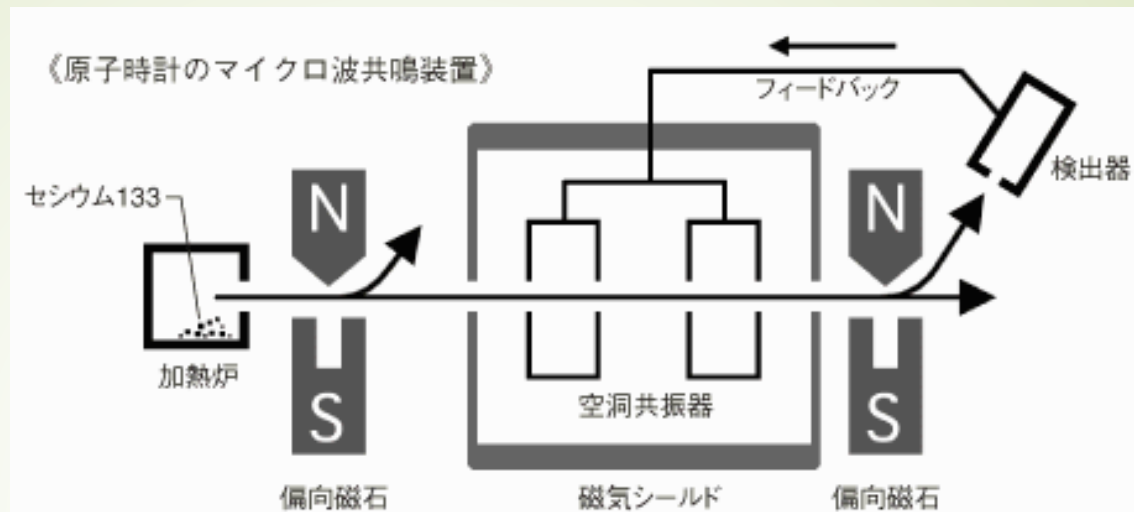
利用可能な時刻補正システム

	時刻精度	安定性	コスト	備考
原子時計	$10^{-13}\sim 10^{-18}s$	○	×	コスト大
水メーザー	$10^{-15}s$	○	×	
長波JJY	< 10 ms	△	○	伝送誤差大
NTT時報	30 ms	×	○	連続10分のみ
電波時計	100 ms	×	○	受信機難あり
NTP server	< 1ms	○	○	信号取り出しが困難
GPS 時計	500 ns	○	○	

目的に応じた時計選択が重要

現在の可視CCD, CMOSの読み出し速度(~100 Hz)
では、原子時計は高コスト

原子時計



<https://www.tdk.co.jp/techmag/ninja/daa01133.htm>

UTCとの校正や長期安定運用のためには
GPSと併せて使用するのが良し



Microsemi社 5071A (Cs 133)
参考価格: 700~900 万円
周波数確度 10^{-12}



Microsemi社 SA.45s
参考価格: 70 万円
周波数確度 10^{-11}

長波 JJY

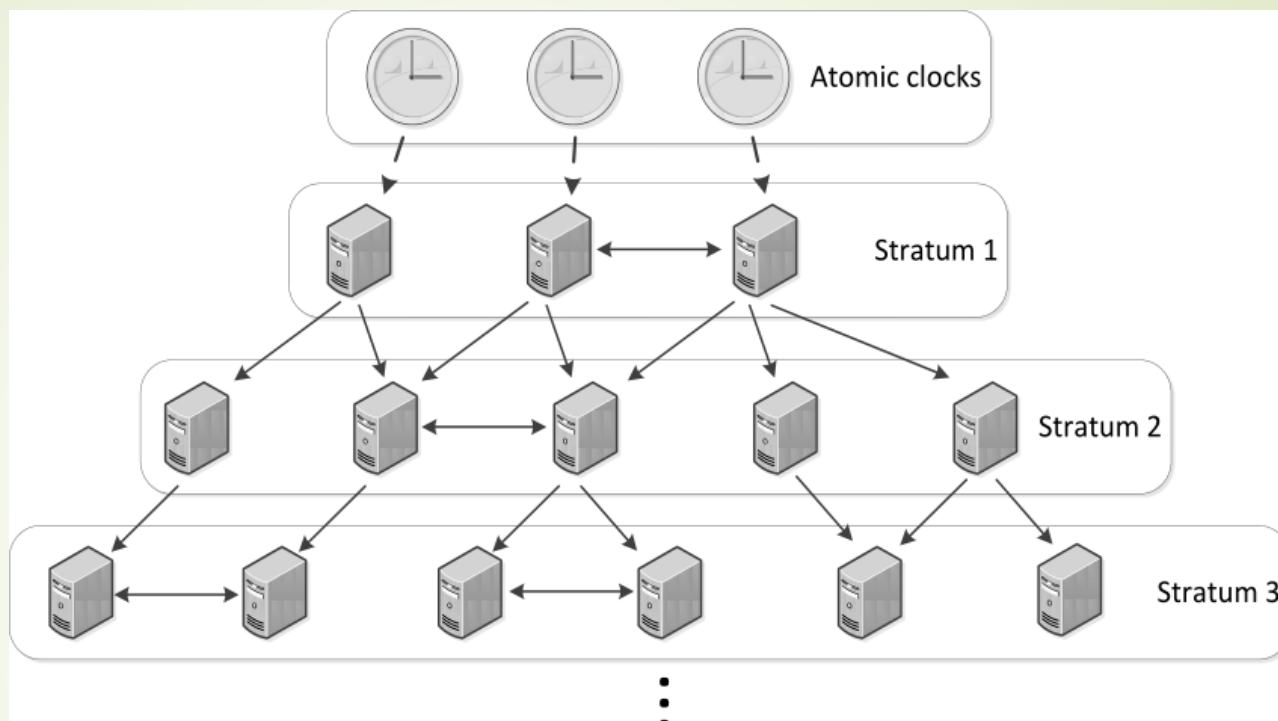


NICT

伝送遅延あり(300kmで1ms)
電離層の影響を受ける
時刻マーカのパルス幅: 0.2s +/- **5 ms**

正確な秒信号を取るには、専用受信機を設計する必要あり

NTP (Network time protocol)



[Synchronization of current and voltage measurements in a modular motor diagnostic system](#)

< 1 msの精度で時刻校正可能(UNIX系)

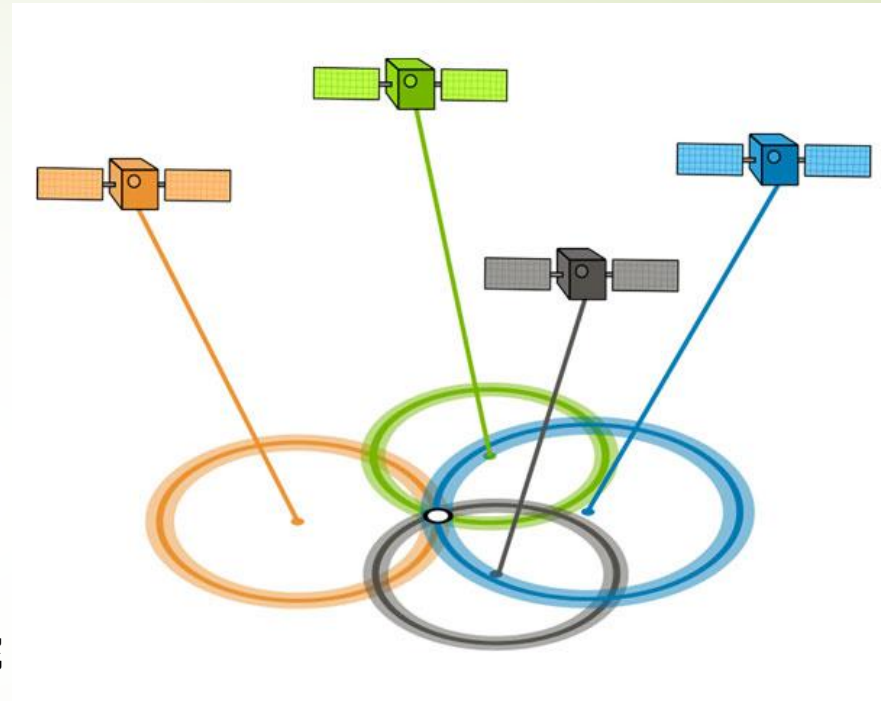
OSや制御PCの時刻同期には簡便だが、
装置自身(CCD, シャッターetc..)と同期
させるのは大変

GPS

衛星の原子時計情報を用いた測位システム

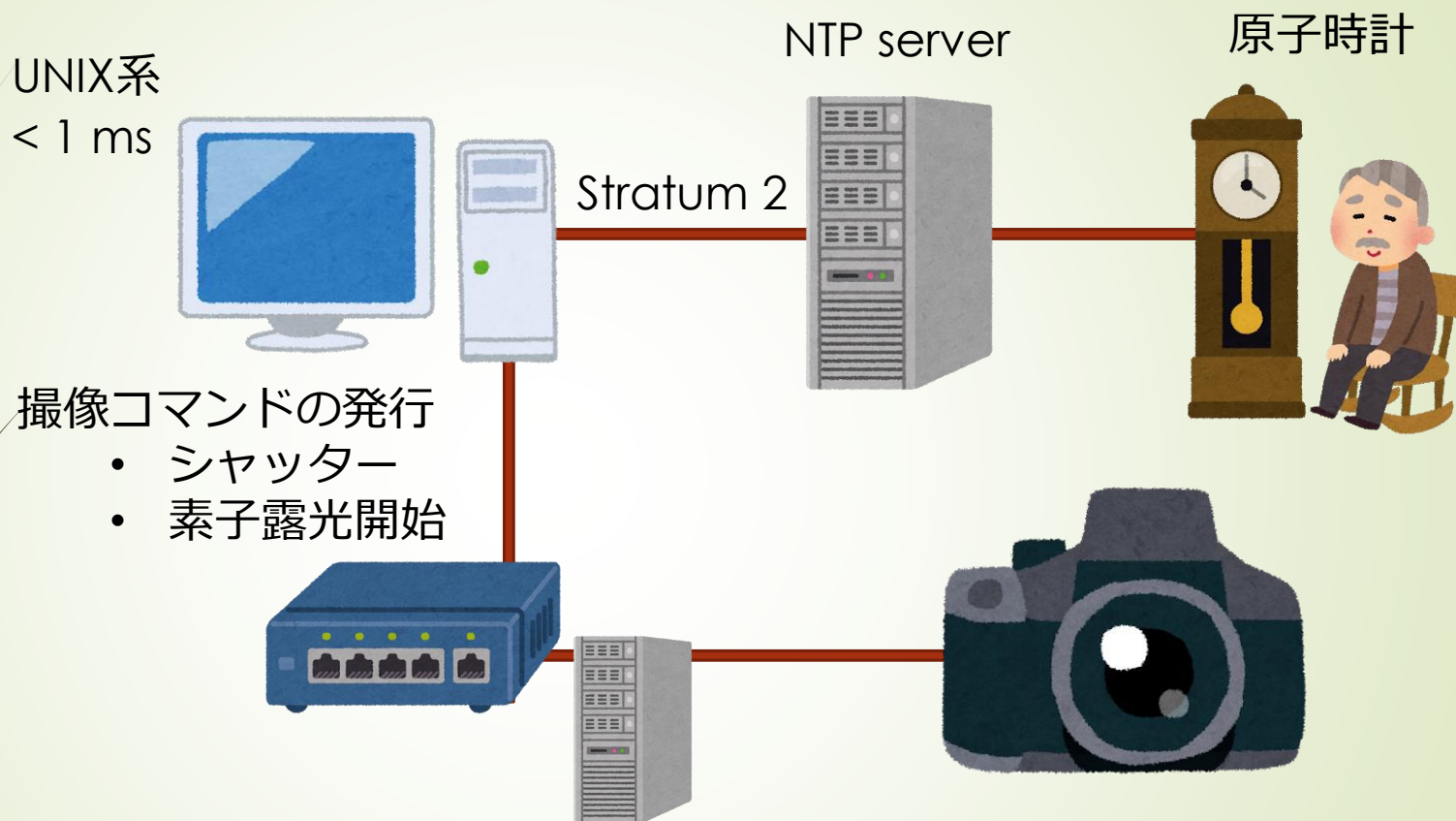
4機の衛星の信号から、
三次元位置+時刻を
取得可能

GPS受信機の普及もあり、
非常に安価で手軽に利用可能



<http://sciencewithkids.com/science/resources/gps-facts/>

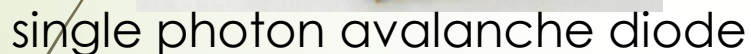
ミリ秒の精度を達成するには



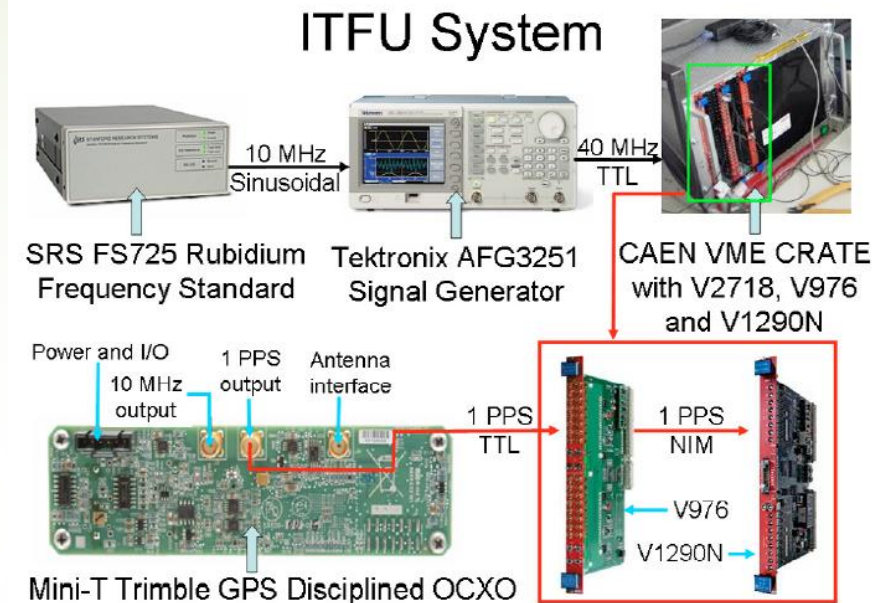
コマンド発行後から実際の
シャッター制御、露光開始までの遅延は？
FITSへ記録される時刻はどのタイミング？

露光しているタイミングを何らかの方法で
感知する必要あり

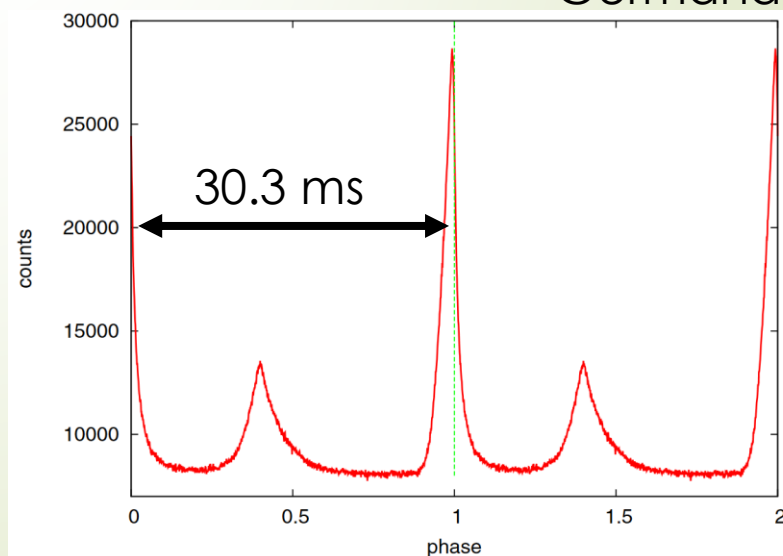
<http://www.everyphotoncounts.com/spad.php>



UTC: +/- 500 pico sec



Germana+12



かなた望遠鏡/高速カメラ



京都大学/浜松ホトニクスとの共同開発

裏面照射型 E2V CCD

35.8 frame/secでの読み出しが可能(27.1ms)

BVR撮像 or R=20,150 分光

問題点

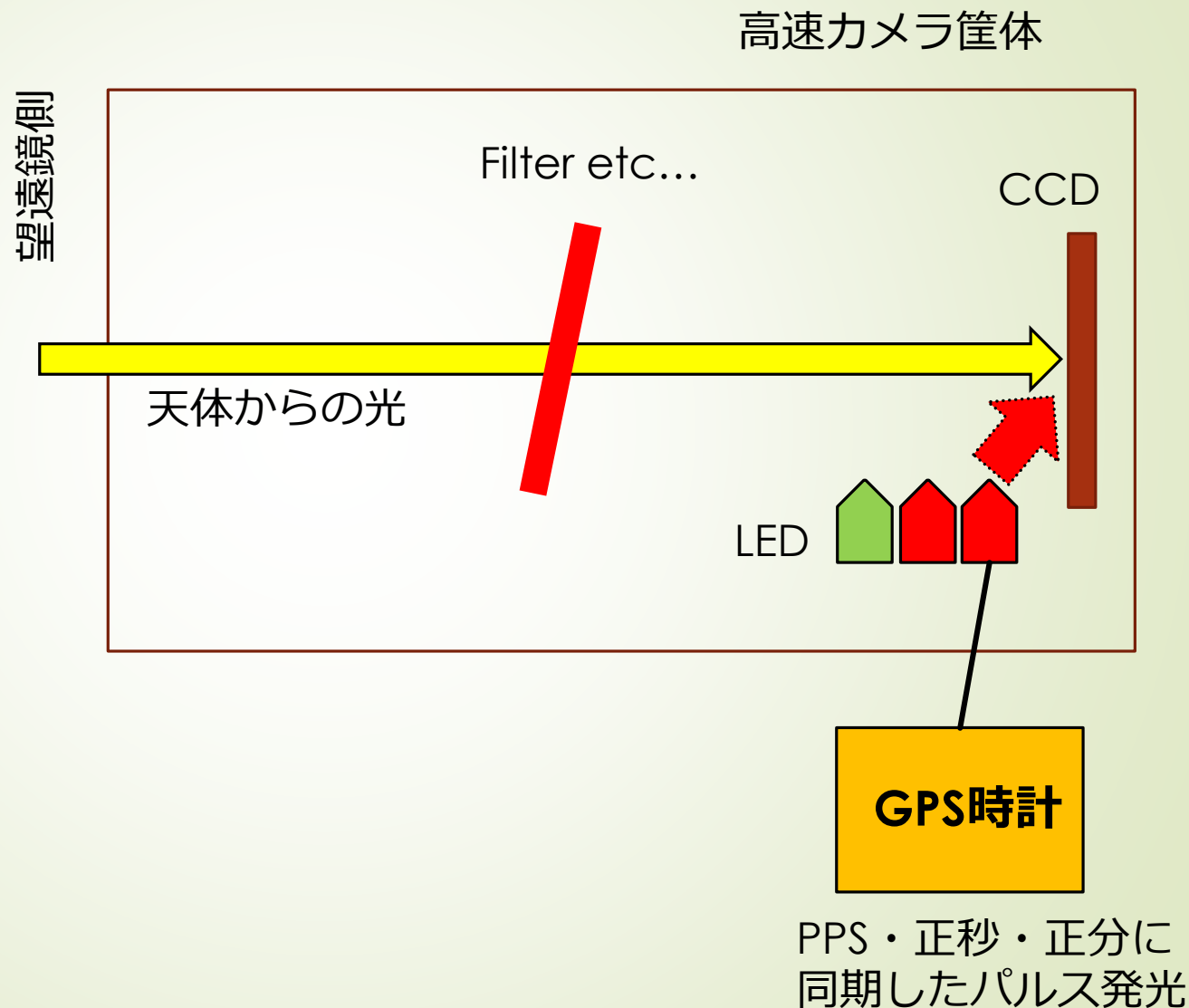
- “市販”CCD の場合、読み出し基盤等を改造して露光時間を検知するのは困難
- 読み出しまでのラグを測定するのも難しい
- NTP/GPS同期するCCDがあれば理想的だが...



例：浜ホト、EM-CCDの場合
(かなた望遠鏡 高速カメラCCD)

ファイルに記録される時刻：
「start」ボタンクリック時刻
実際に撮像が開始されるタイミング：
「start」ボタンクリック 1-2秒後

望遠鏡への実装



GPS時計キット

GPS受信モジュール
2,000 円

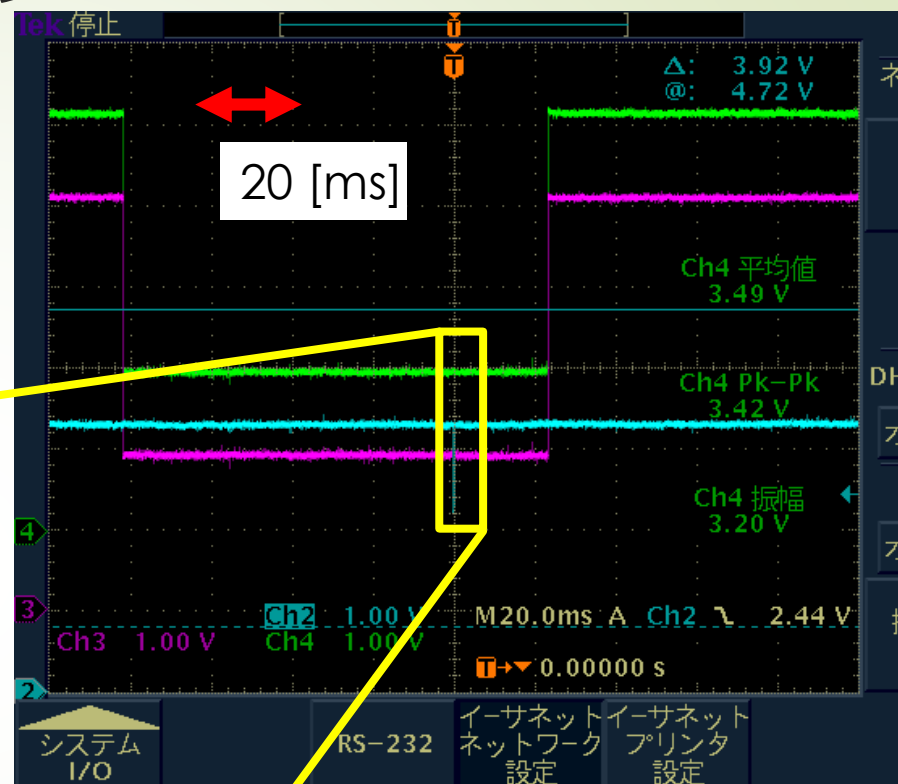
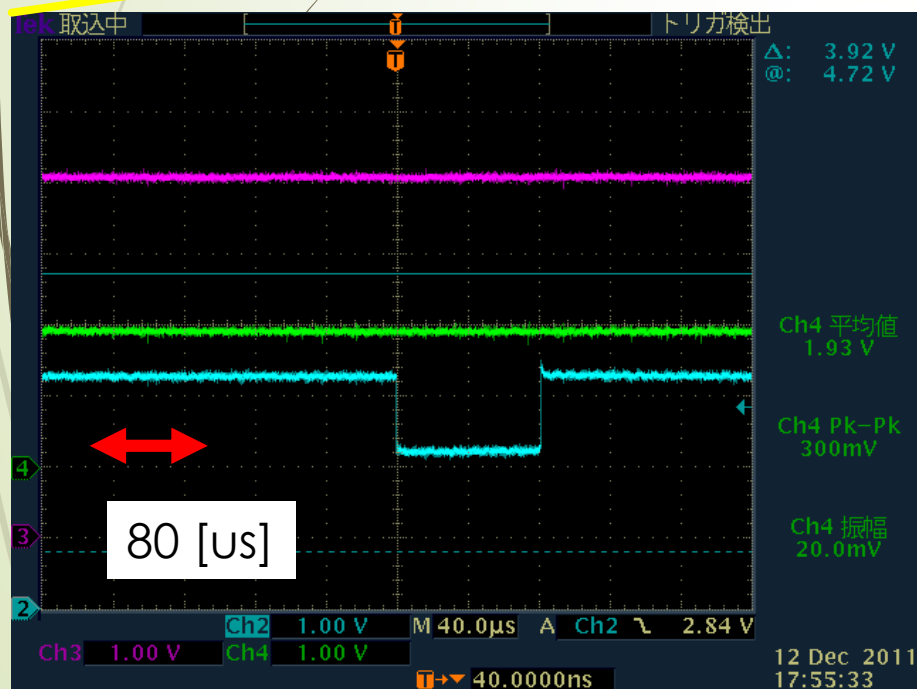


いずれもPPS信号を出力
最大遅延 **8 μ sec** (仕様書)

秋月電子通商
「GPS世界時計キット」
13,500円、
組み立て所要時間:2-3時間



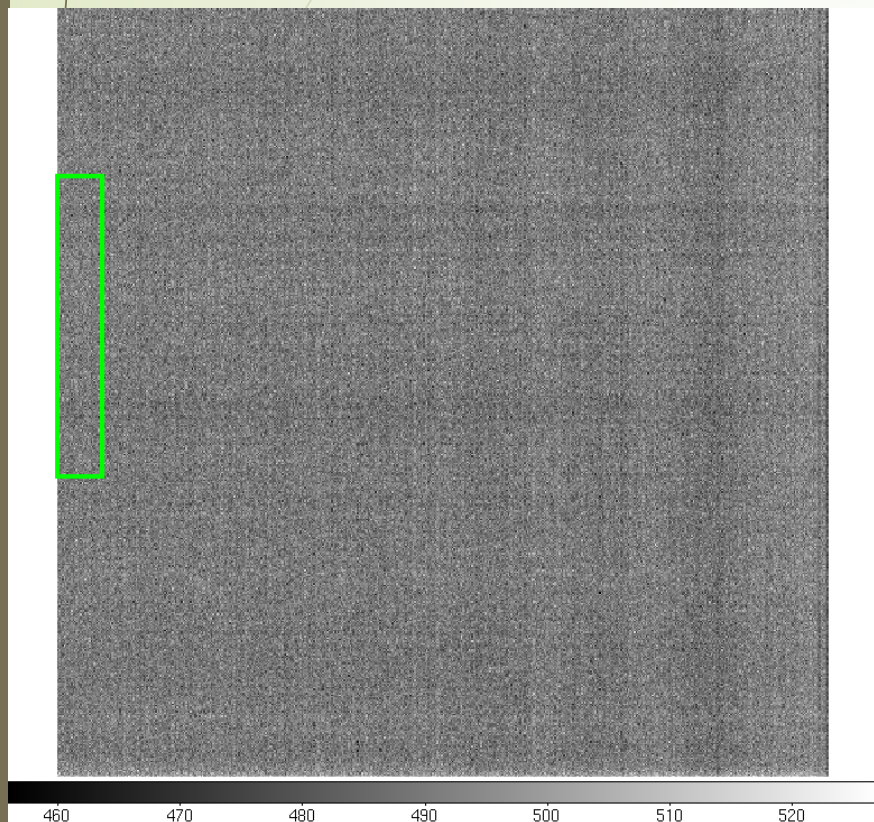
発光タイミング



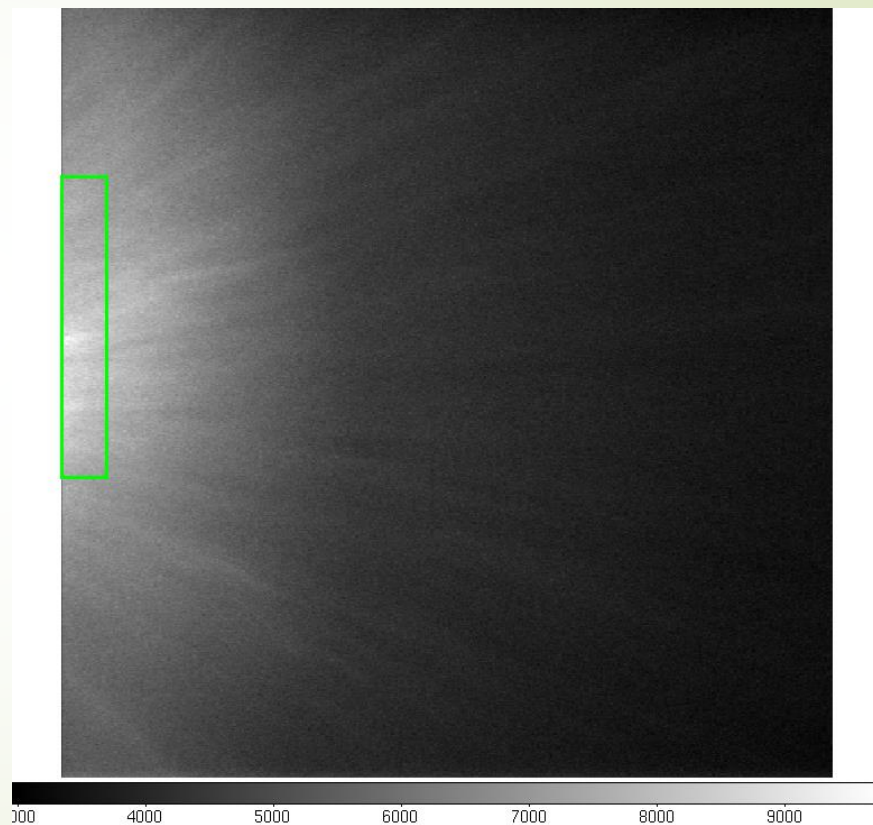
LED の反応速度
~ 100 ns

読み出し画像

LED OFF

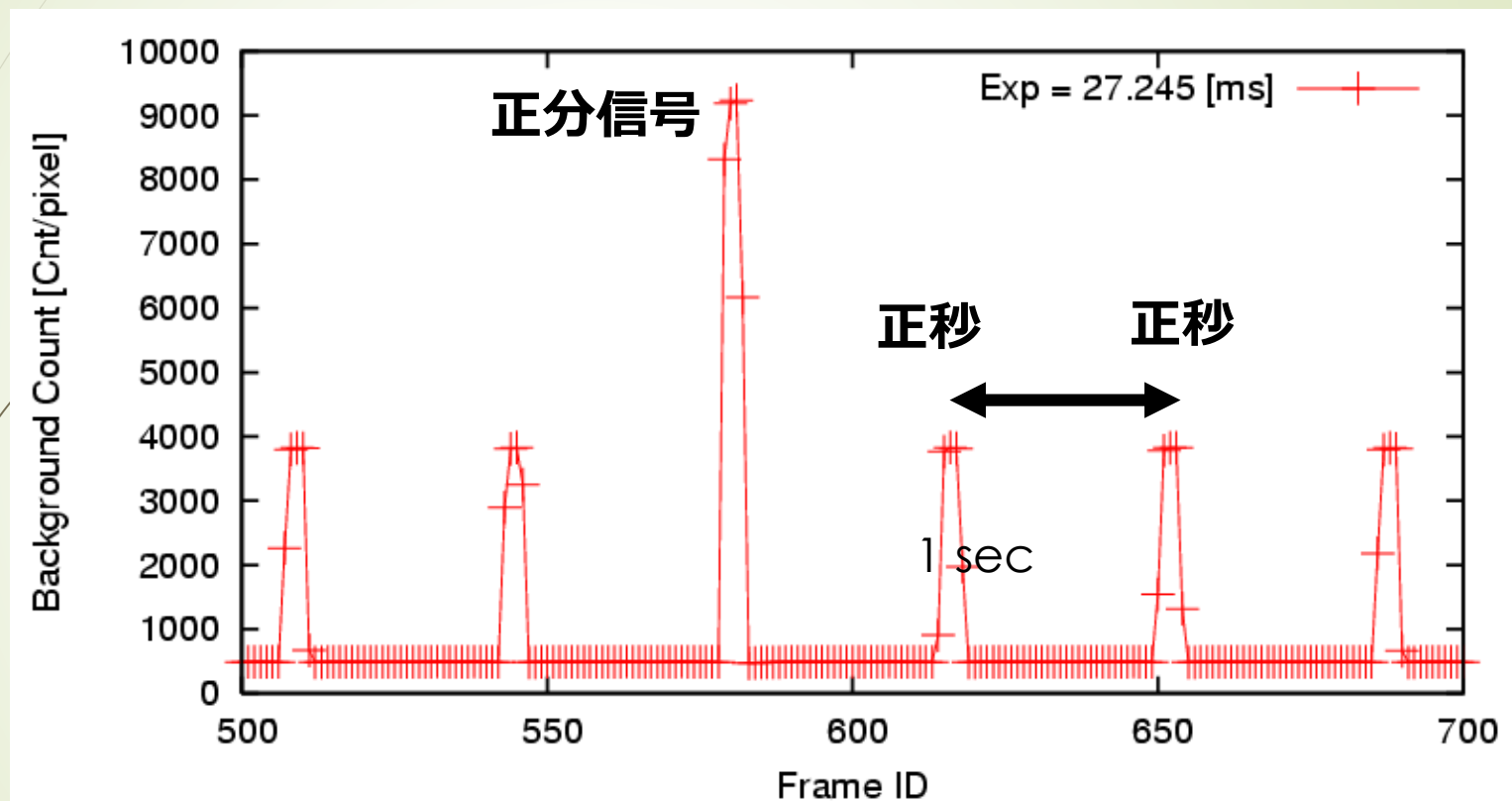


LED ON



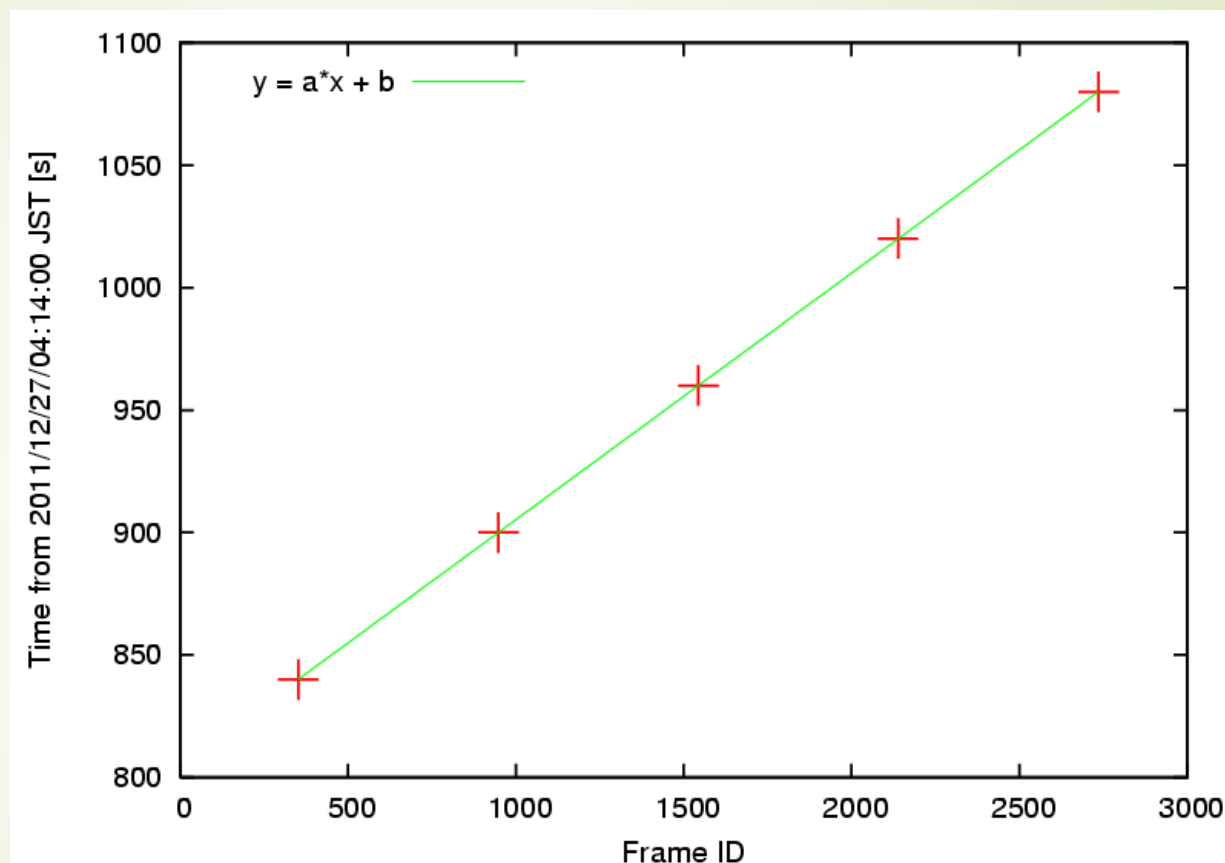
緑BOX部の平均カウント値から、LED点灯時間の測定

テスト読み出し



パルス発光 : 3-4 Frame

時刻校正

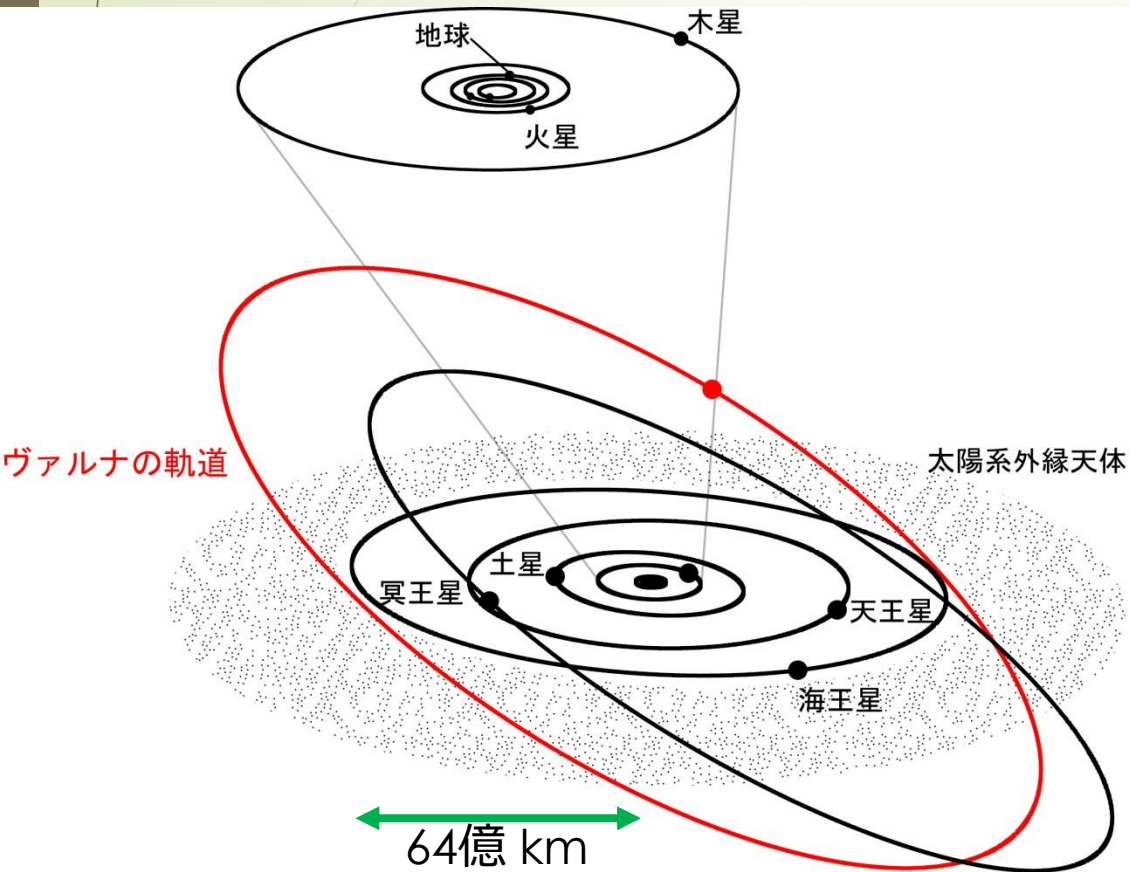


$$\begin{aligned} a &= 0.100688 & +/- 2.581e-05 \\ b &= 804.558 & +/- 0.0454 \end{aligned}$$

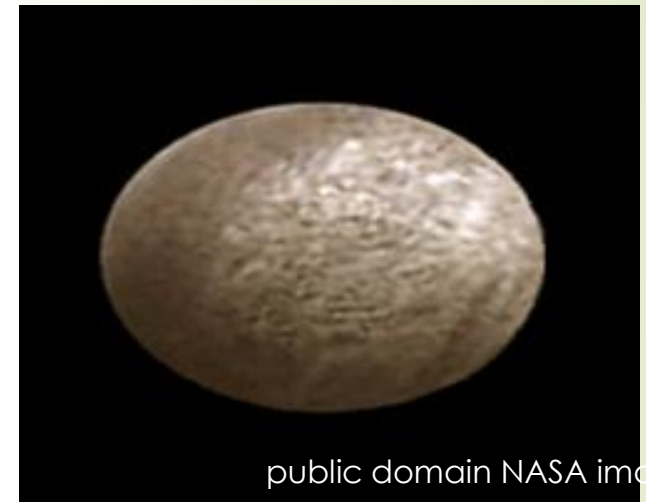
時刻精度は45 ms 程度(<100ms)

太陽系天体 掩蔽観測

Varuna (ヴァルナ)

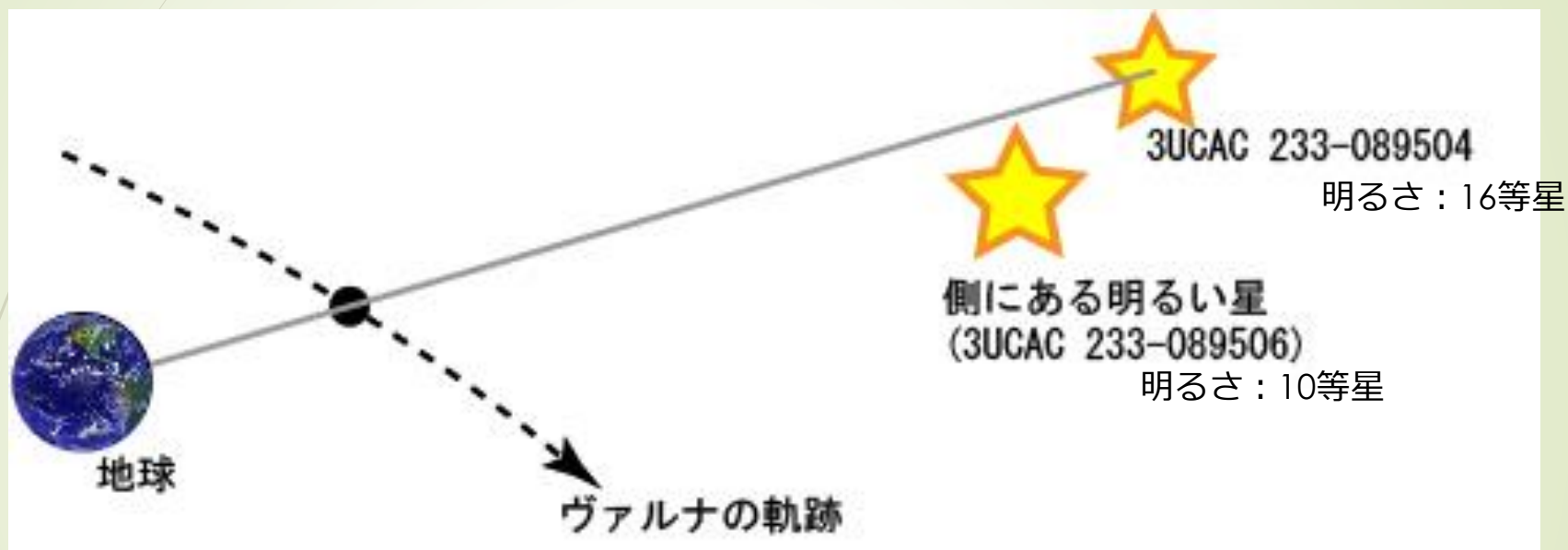


ヴァルナ想像図



太陽系外縁天体
楕円形に潰れた形?
推定直径 1,000 km

恒星食



- ヴァルナは非常に遠くに位置するため軌道予想が難しい
食位置には数千km程度の誤差がある
- 明るい恒星と食を起こすのは世界的にみて年に1回程度

観測は極めて難しい

掩蔽観測

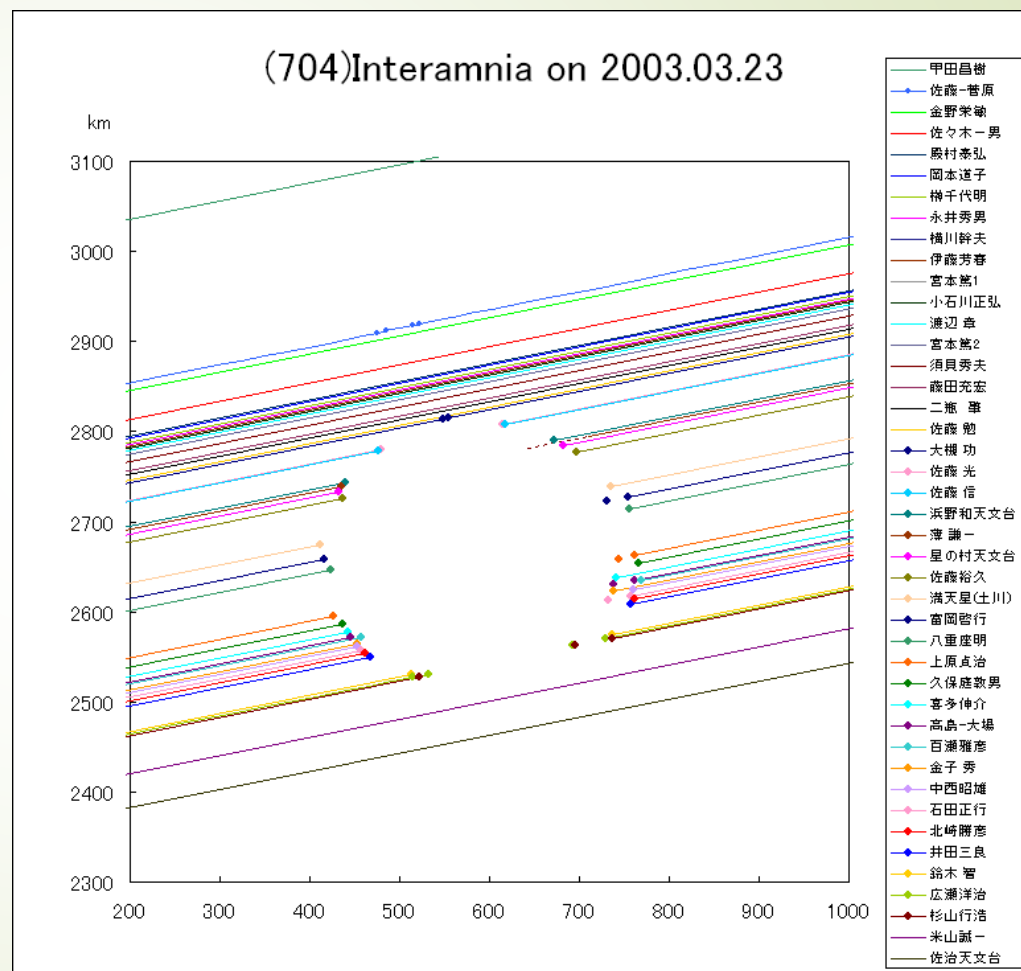
小惑星掩蔽観測：

多数の観測場所で同時に
掩蔽・出現時刻を記録

小惑星などの形を精度よく決定

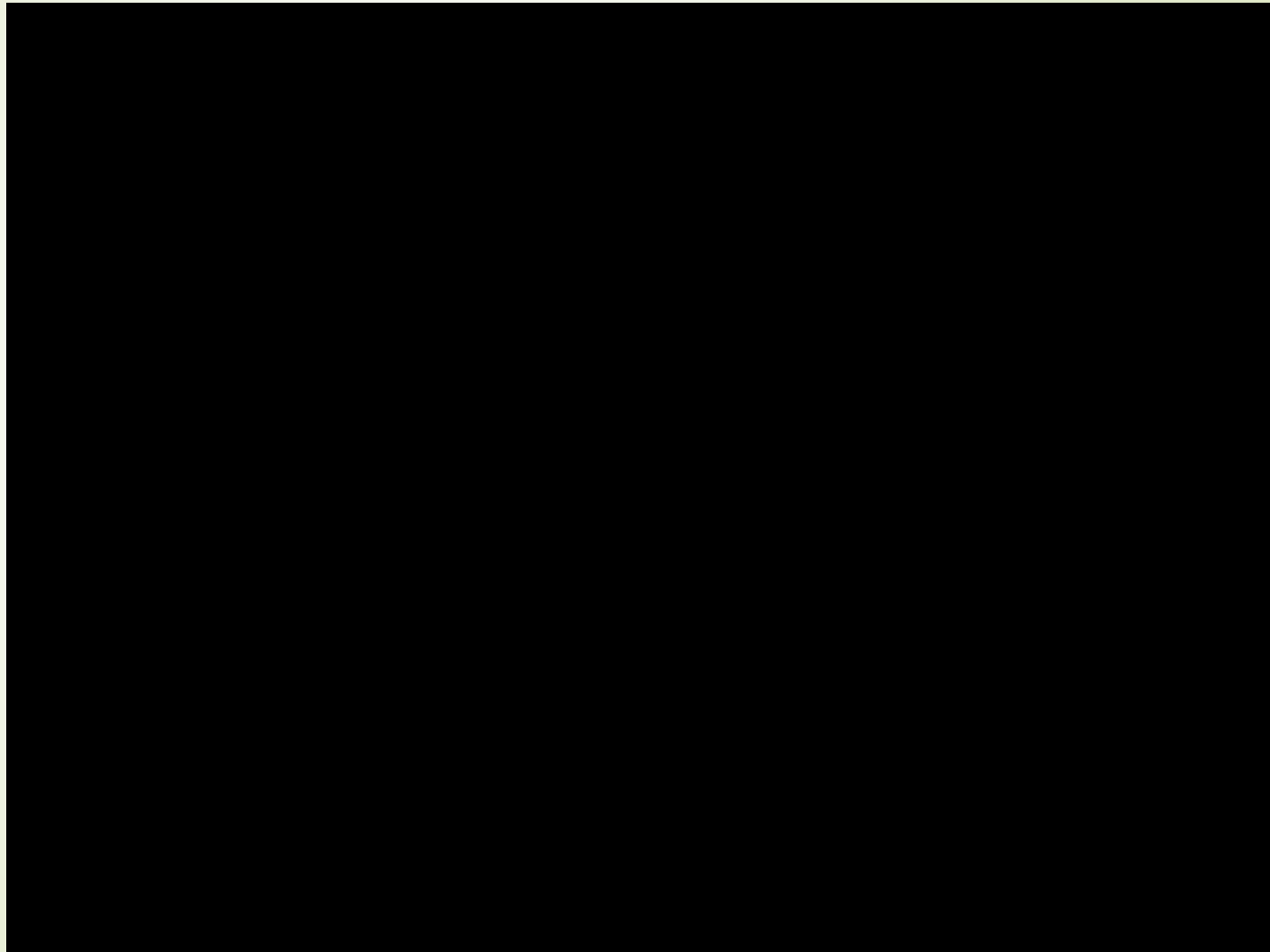
時間決定精度がそのまま
形状の位置精度となる

観測地点ごとの絶対時間
較正が必要不可欠



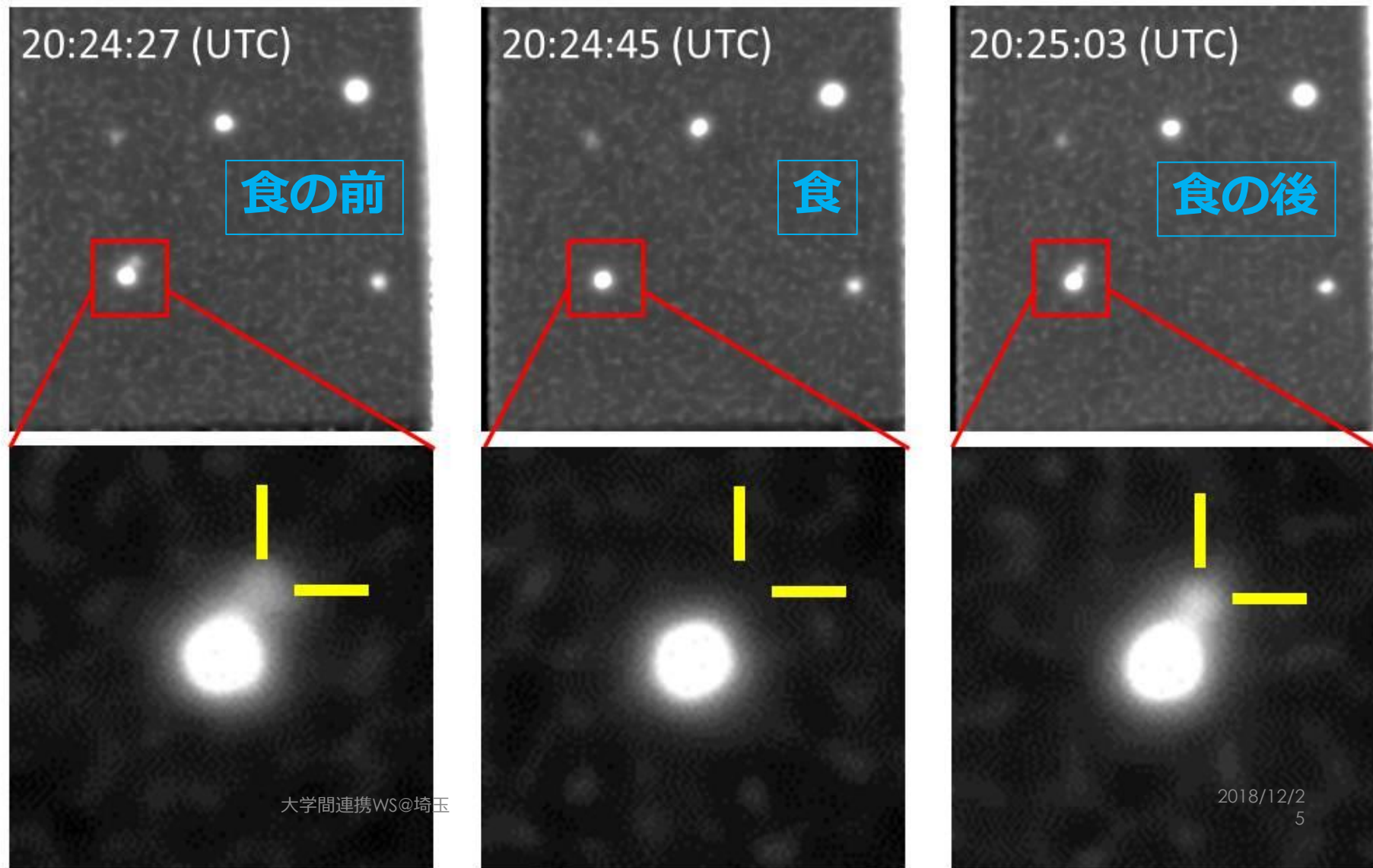
小惑星インテラムニアによる掩蔽
せんだい宇宙館作成

かなた望遠鏡での観測

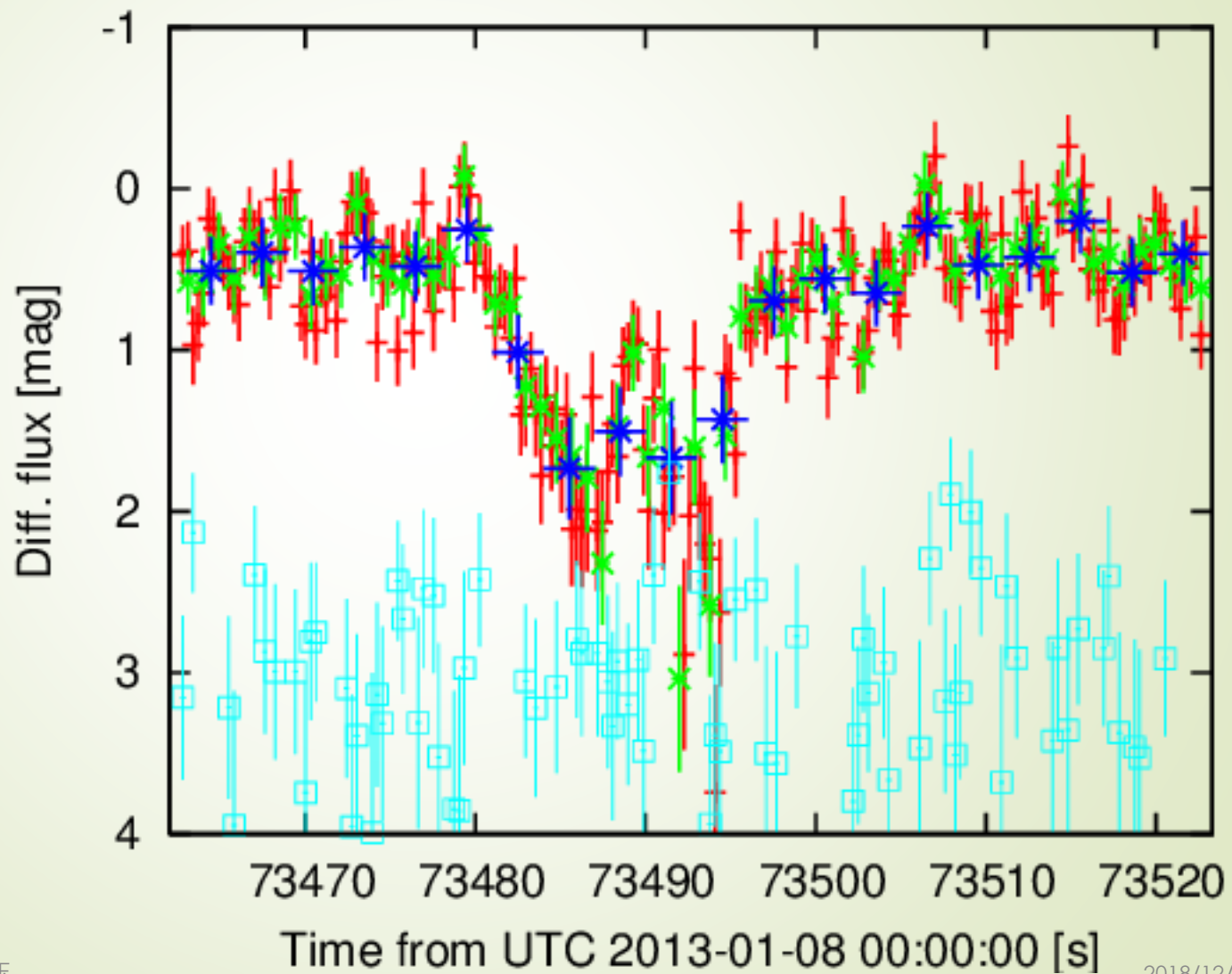


太陽系外縁天体(TNO) Varunaによる恒星食

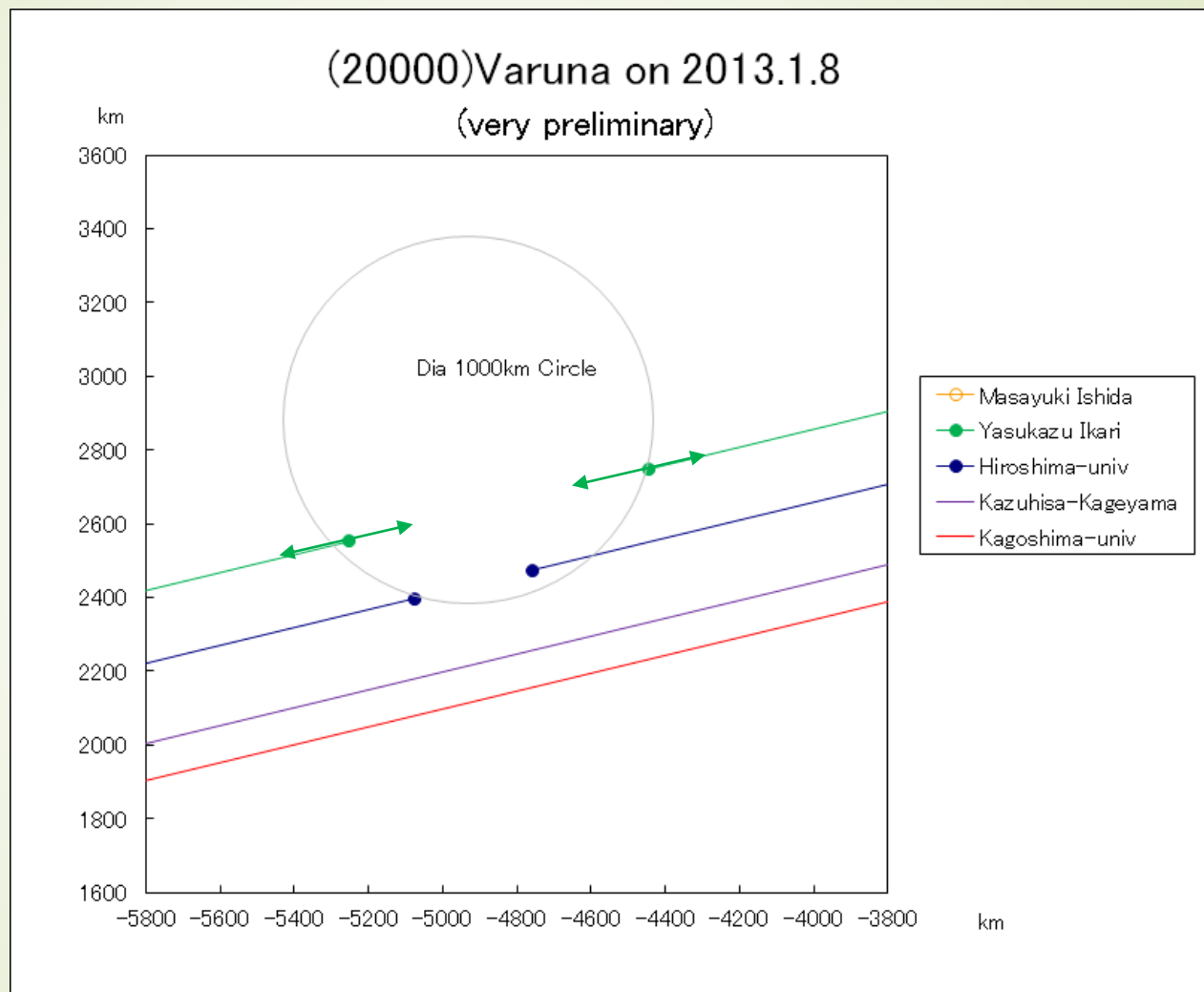
2013-01-08 東広島天文台・かなた望遠鏡



Light curve



多地点観測結果



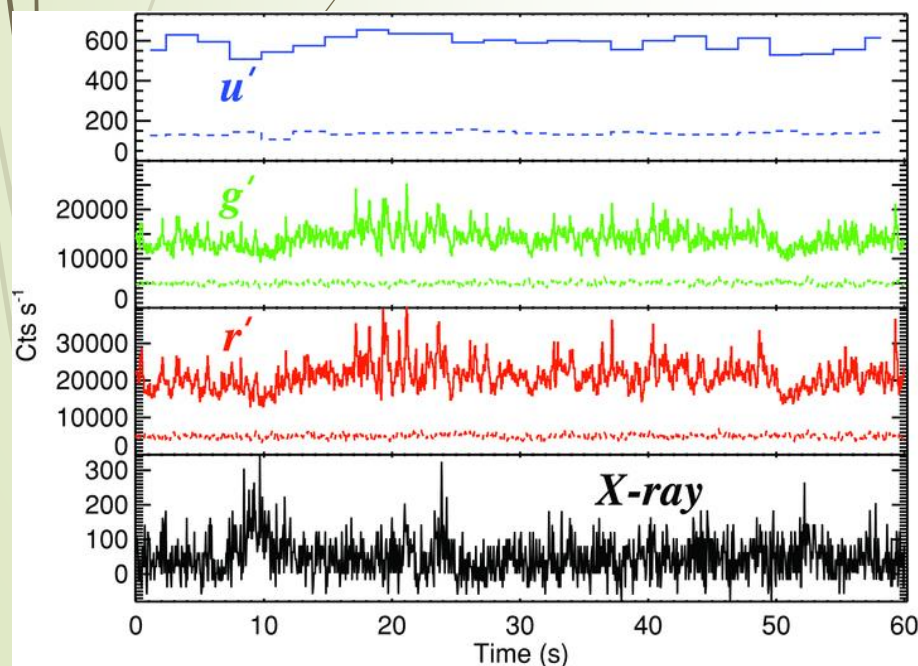
$D = 750 \pm 300 \text{ km @ Shiga}$

$D = 327 \pm 10 \text{ km @ Hiroshima}$

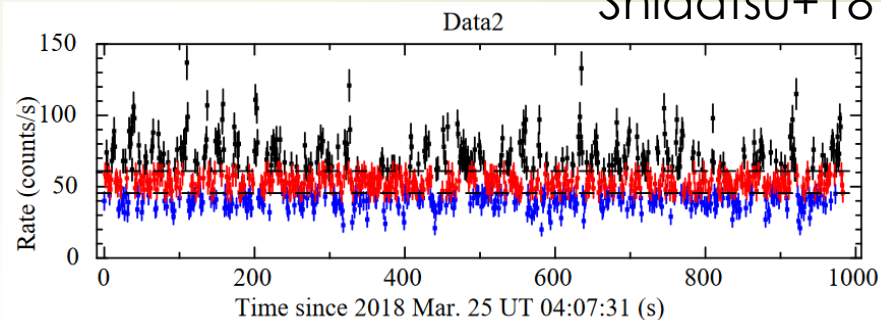
多波長ミリ秒同時観測への期待

MAXI 1820+070
Black hole binary

GX339-4, Gandhi+10

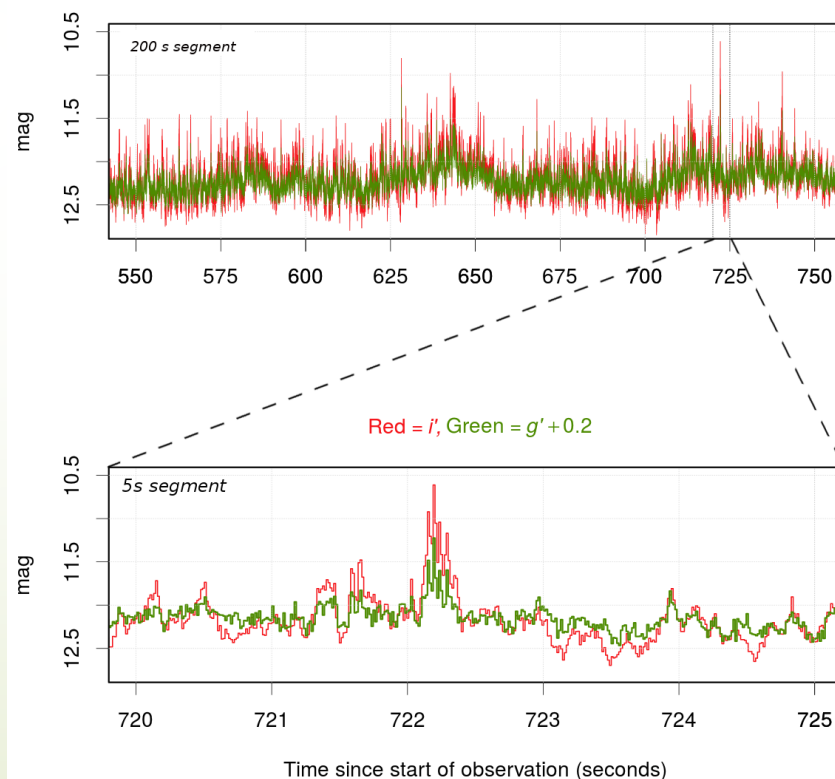


Shidatsu+18



Gandhi, Atel #11437

MAXI J1820+070 - 2018 March 16 - Ultracam



Summary

GPSを用いた可視光観測用CCD 用の
安価な時刻校正システムを構築した

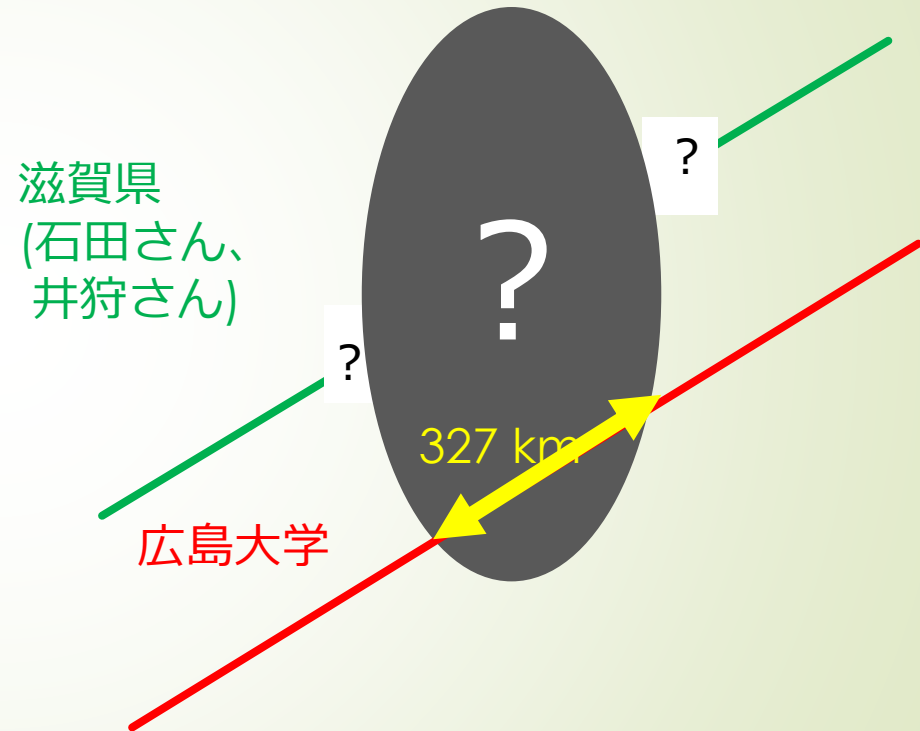
GPS+LED発光で $\pm$ 数十msの絶対時刻
校正が可能に

かなた望遠鏡/高速カメラで 太陽系
外縁天体 Varunaの掩蔽観測に成功

観測の結果

食の継続時間 約13秒
およそ 327 kmに相当

同時刻に滋賀県の
アマチュア観測家も
観測に成功！



ヴァルナの南限付近が観測された