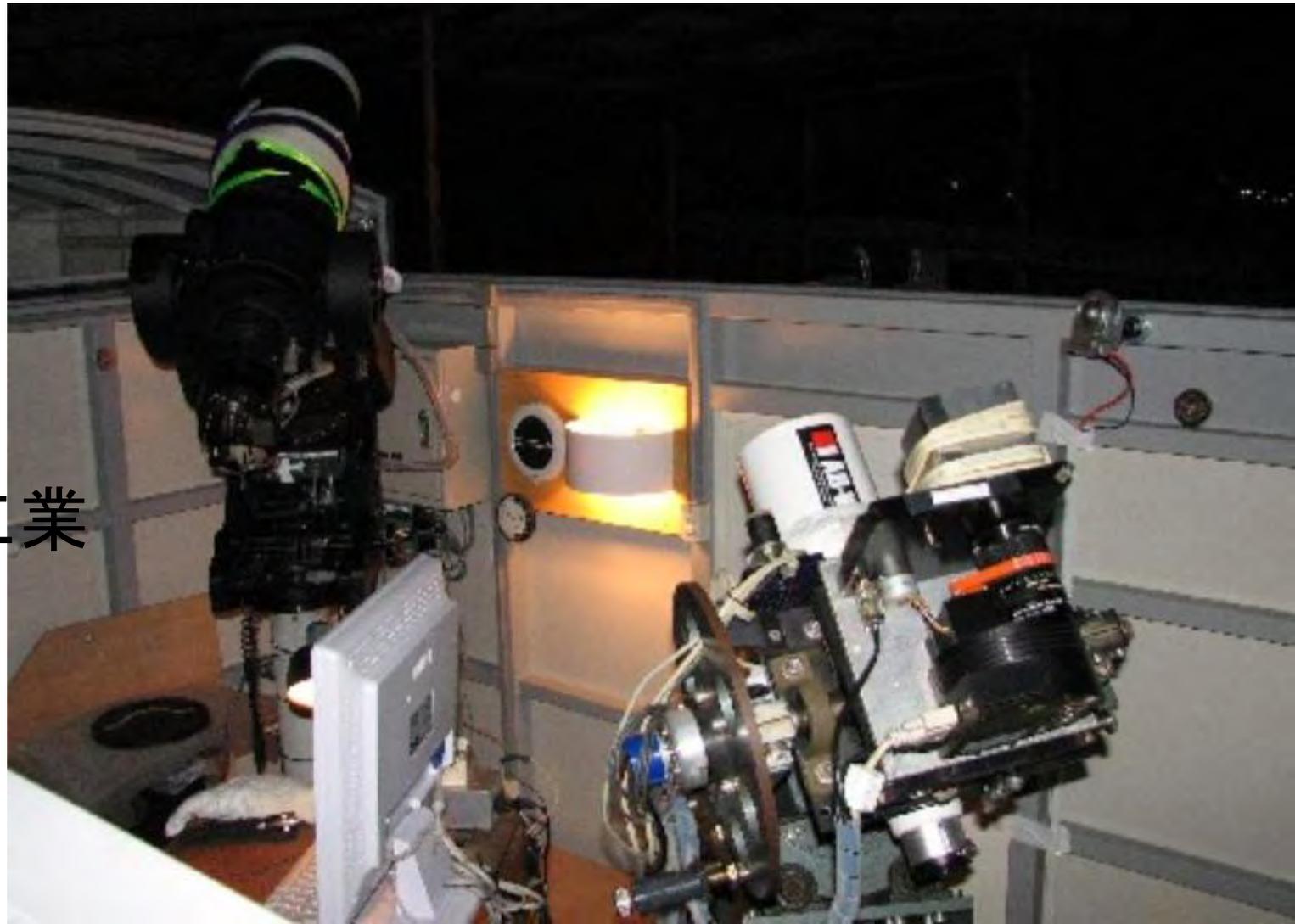


星の明るさの変化で 系外惑星を調べる

大島 修
岡山県立水島工業
高等学校



お話の概要

- 自己紹介
- 私の観測所—どのような望遠鏡と装置を使っているか
- 星の明るさで惑星を検出する方法
- どこが難しいのか 地上観測と衛星
- どんな大きさの惑星まで測れるのか
- 日本での観測
- 私の観測
- 今後の測光観測への期待

なぜ高校教員が この豪華講師陣の中に？

- ニッチ(すきまに棲み分ける)

特に新規開拓された科学分野では、アイデア・工夫しだいでニッチを生かすことができる

- アマチュア
 - 小口径
- 自分の望遠鏡を自由に使える

系外惑星の研究という最先端に貢献できる

自己紹介

- 倉敷市玉島に生まれ育ち、(高松→神戸→堺→尼崎→蒜山)、現在玉島に住んでいます
- 西に岡山天体物理観測所、東に本田実さんに挟まれて育ち、中2で天文少年に
- 香川大学で天文学を学び、兵庫県の高校(9年)
その後、蒜山高校(2年)→水島工業高校(6年)
→美星天文台(4年)→鴨方高校(10年)
→水工(3年め)

岡山天体物理観測所の影響

祝開所50周年(来年)

- 幼稚園のころ、自宅のすぐ前の港に188cm主鏡が陸揚げされて、ゆっくり運ぶトラックの後を、野次馬としてぞろぞろ付いて歩いた記憶あり(後に思い出す)
- 小さい頃から、「東大の東洋一の望遠鏡」、「岡山は国内で一番天体観測に適している」
と聞かされて育った
- 後に、大学生時に利用
- さらに美星天文台建設時には、元副所長の清水実さんと一緒に計画策定委員・職員を

本田実さんの影響

- 中学2年、天文に目覚める
- そのころ次々と新彗星新星を発見しておられた
- 玉島図書館の講演会の手書きの張り紙を見て参加。普通の人にはない個性と人柄に触れる。
- 「雨の夜でも夜中に3回は起きて晴れていないかを見る」(関勉さんの著書より)
- 死ぬ3日前まで賀陽町まで観測に出かけておられた

私も生涯現役の観測家でありたい

測光一筋でやってきました

- 3年星からフレア一星の光電測光観測 OAOで2年間観測
- 卒業後、教職の傍ら光電測光装置を自作を試みる
 - 27歳で半田ごてを初めて購入し、エレクトロニクスを独習する
 - 個人でパソコンが入手できる→データの自動収集、装置の制御
 - 光電測光システムの開発と製品化
 - 新星や食変光星の測光観測に使用

後に、美星天文台の企画・立案・設計・製作に役立つ

自作の光電子増倍管を使った フォトンカウンティング測光装置



製品化された光電測光装置



株式会社エイ・イー・エス
Advanced Engineering Services Co., Ltd.



天文・光分野
Astronomy

HOME > 製品・サービス > 天文・光分野 > 光電測光装置 PCPA

天文・光分野TOP

低軌道衛星光学観測装置

静止衛星光学観測装置

移動用天体観測車

光電測光装置

研究支援

光電測光装置 (PCPA)

光電測光装置：星の輝きを捉える

PCPAは、天体観測のノウハウを結集し、最新のハイテク技術技術を駆使して完成した、フォトンカウンタ（光電子計数）方式の光電測光システムです。

- F10の望遠鏡に対応しており、セレストロン標準品の取付金具が含まれます。
- 受光器部は、サイドオンタイプ受光器（低感度型）と、ヘッドオンタイプ受光器（高感度型）があります。
- 制御ソフトウェアは、コンピュータによるU,B,Vジョンソン3色測光に対応しています。



納入先

でも、高すぎて自分では購入 できませんでした

<PCPA-2>

岡山理科大学教養部殿、兵庫県立西はりま天文台公園殿、
陸別町銀河の森天文台殿

<PCPA-1 for Windows>

島根県立三瓶自然館サヒメル殿

<PCPA-1R >

鳥取県アストロパーク佐治天文台

○ 特注型測光器

<大型測光器>

岡山県美星天文台殿

<特殊受光部>

海上保安庁（本庁、白浜水路観測所、美星水路観測所）殿

自宅の観測小屋 OTO(大島玉島観測所)



系外惑星の観測に到るまで

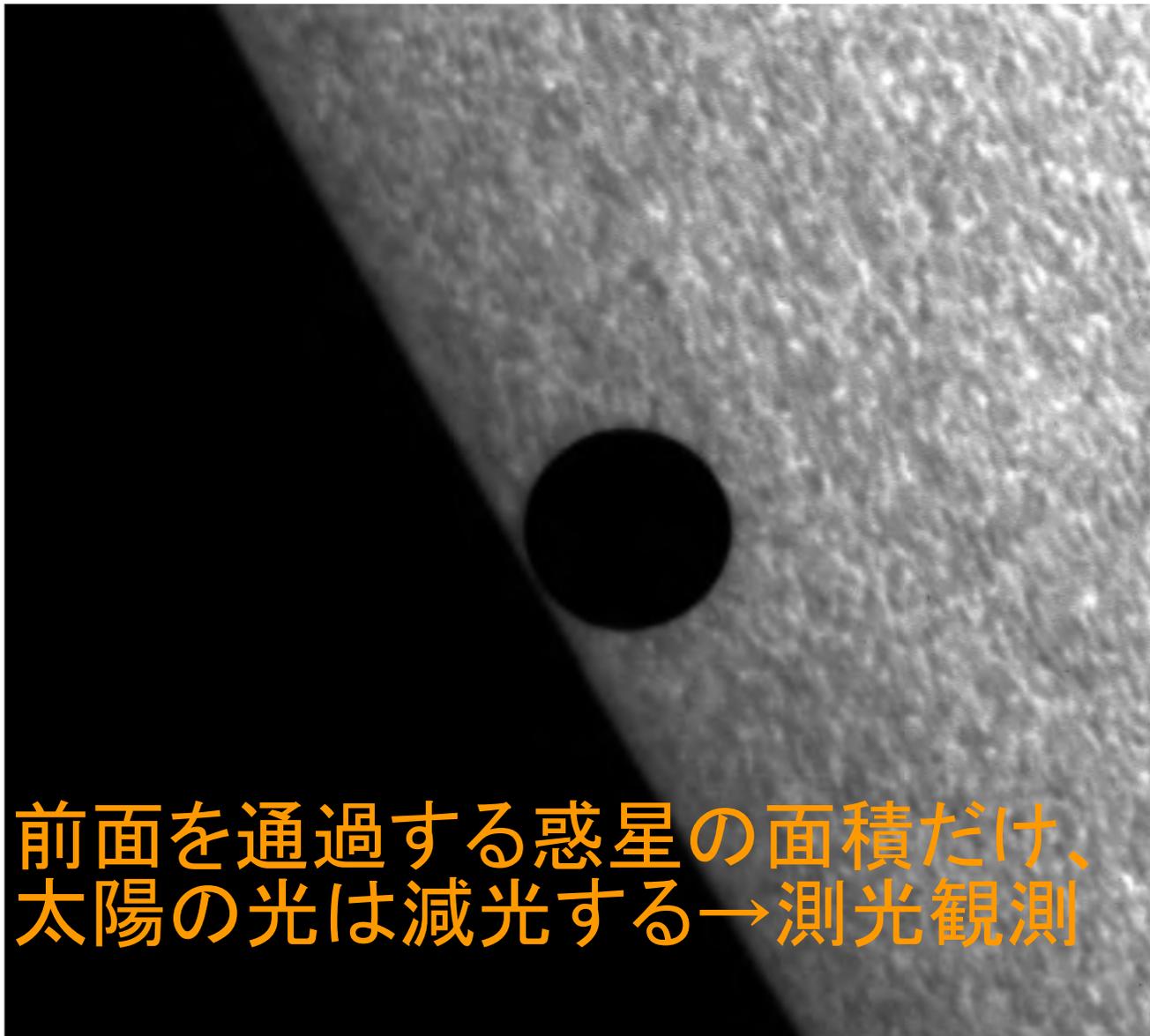
- 美星天文台勤務時代には、天文台の立ち上げで手一杯
- 鴨方高校へ教員復帰(10年間)
 - 前半 カシオペア座RZ星の研究(この論文がきっかけで、世界的に連星系における非動径振動という分野が一気に花開く)

0.02等級の振動現象を検出するために、高精度な測光観測が必要。観測理論に基づき観測者協力者に助言

- 後半 時代はCCD。自分の観測プロジェクトを始めたところへ、井田茂先生が出現

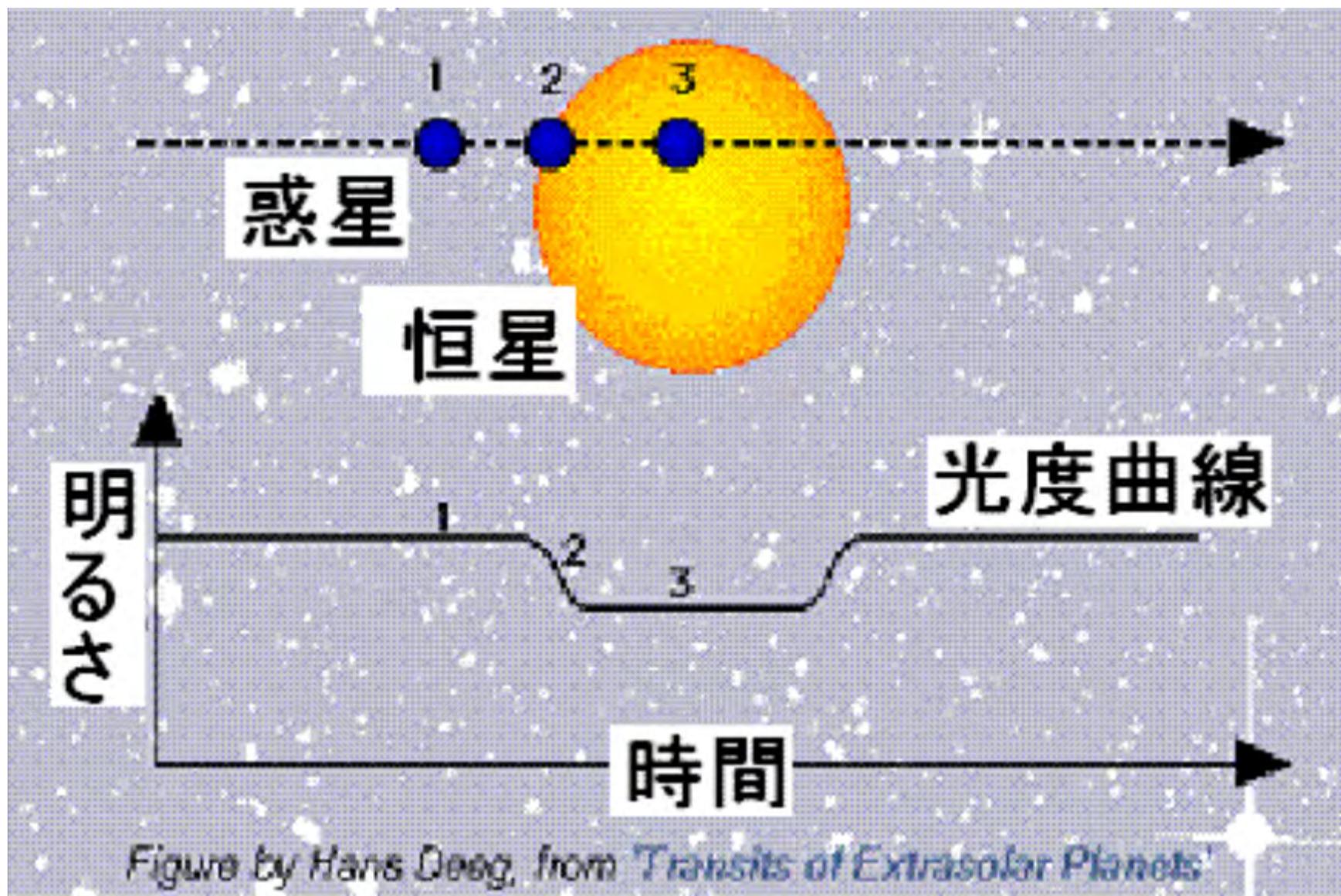
系外惑星の観測に巻き込まれる

地球から見た水星の太陽面通過



日本の太陽観測衛星「ひので」の観測2006年11月9日

トランジット(前面通過による食) と明るさの変化



測光は小口径望遠鏡に向いている

- 測光観測は、光をまとめて測る
- 分光観測は、光を分けて測る
- 小口径の望遠鏡でも、大型望遠鏡のと同じ対象を観測できる

分光観測と測光観測の 両方のデータを組み合わせると

- 片方だけではわからなかった情報を得る
- 質量の確定 (測光からは、軌道の傾きがわかる)
- 大きさの測定 (減光時間から通過距離がわかる)

質量と体積から、天体の平均密度を知ることができる

→ 内部の構造を推定できる

冷却CCDカメラによる測光

- CCDチップ自体は、デジカメにも使われている
- 長時間露出すると、熱的に電子が発生しノイズになる。
- 冷却するとこの熱ノイズが減少する。

測光—明るさを正確に測るには

- 系外惑星のトランジットの測光観測には、
精度が肝心
 - いかに正確に明るさを測るか
 - どんな工夫をしているか

光量が少ないと精度が悪くなる

- できるだけ多くの光を集める
- 大雑把には、精度が光子の数の平方根に比例して向上する



光子数が多いほど測定精度が上がる



光子数が少ないとザラザラな画像(左)

光子数の多い画像は滑らか(右)

浜松ホトニクス PIASカタログ(1984年)から引用

光量が多いほどよいなら測光には 望遠鏡は大口径ほどよいか？

- そうはいかない
- 天文学者の「天敵」：地球の大気が悪さをする
 - 透明度が変化する(チリやうす雲が通過すると星の明るさは変化して見える)
 - シーイング (“See” + “ing”)
空気の乱れ(屈折率の異なる空気の塊が入り混じる)が、見え方を悪くする。かげろう現象そのもの

ここだけの内緒話：天文学者は地球に空気がなければ良いのにと、とんでもないことを考えている。

(観測時だけでも、望遠鏡の筒先から宇宙空間までだけでも)

比較して測ると良い精度になる

- 近くにある星(比較星)と明るさを比べると
 - 近くにある星どうしは、地球大気で乱される(曇る、揺れ動かされる)条件がほとんど同じ
 - 比較すれば(分数の分子と分母に置く)、同じ乱れはキャンセルできる
- 1つの星を単独で測るよりも10倍から100倍以上に精度が上がる

さらに測光精度を上げるには

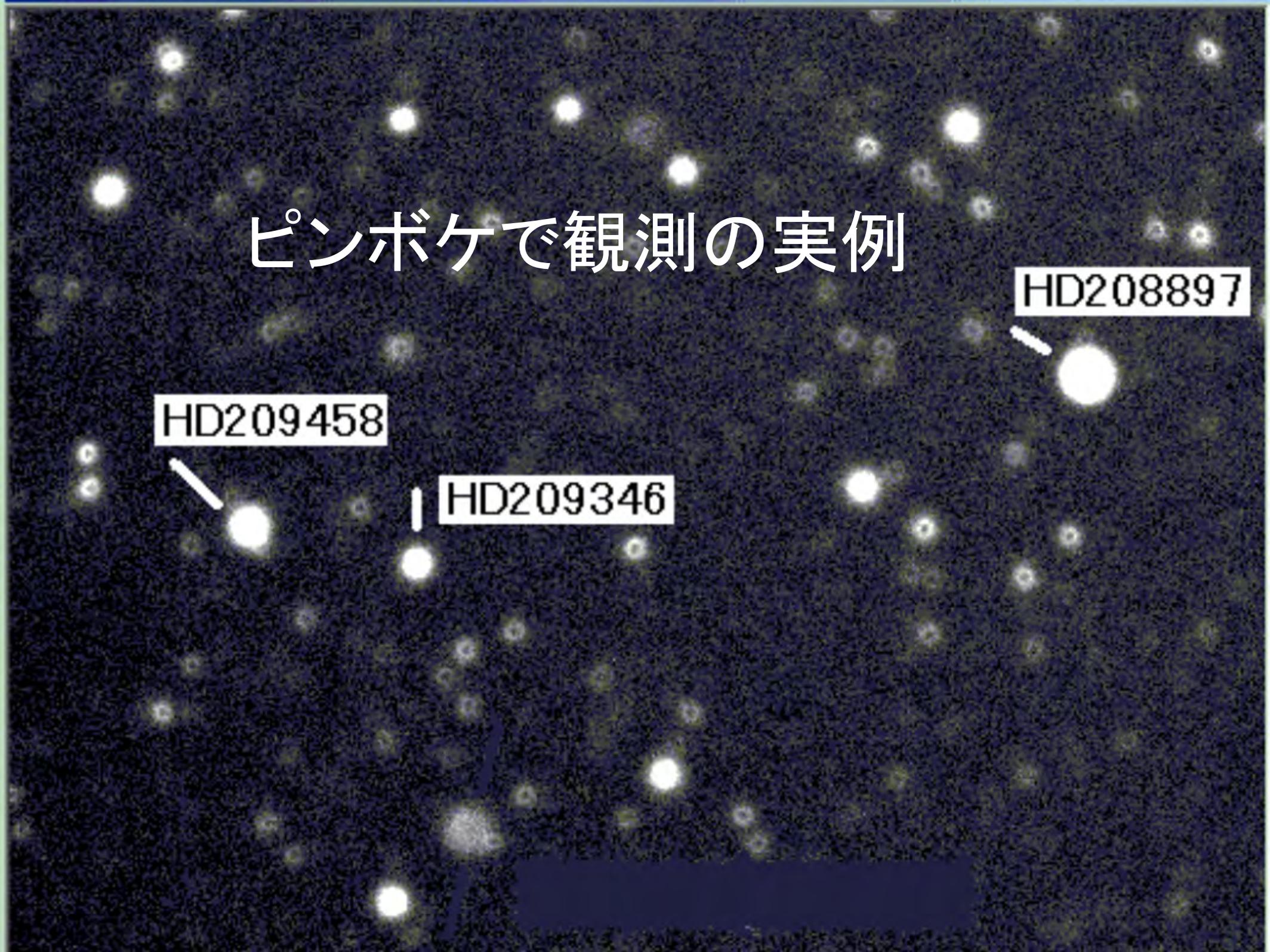
- ピンボケにする
 - 出来るだけたくさんの光を集める
 - 1画素に溜められる光の量は限られているので、多数の画素で受けるため
 - 精度は光子の数の平方根に比例する
 - CCDの感度ムラを避ける
- 露出時間は30秒から2分程度
 - 大気のゆらぎを平均化する、光をたくさん集める
- 同じ視野内に、同じような明るさの比較星をとる
 - 比較星が暗いと精度が悪化する

ピンボケで観測の実例

HD208897

HD209458

HD209346

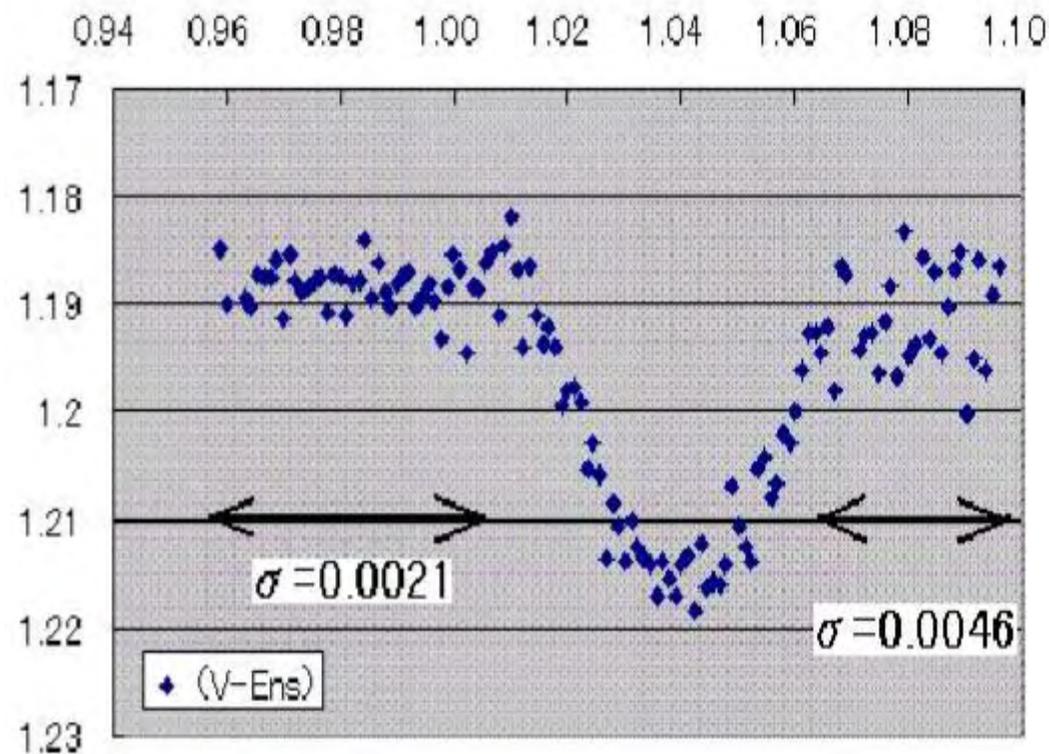
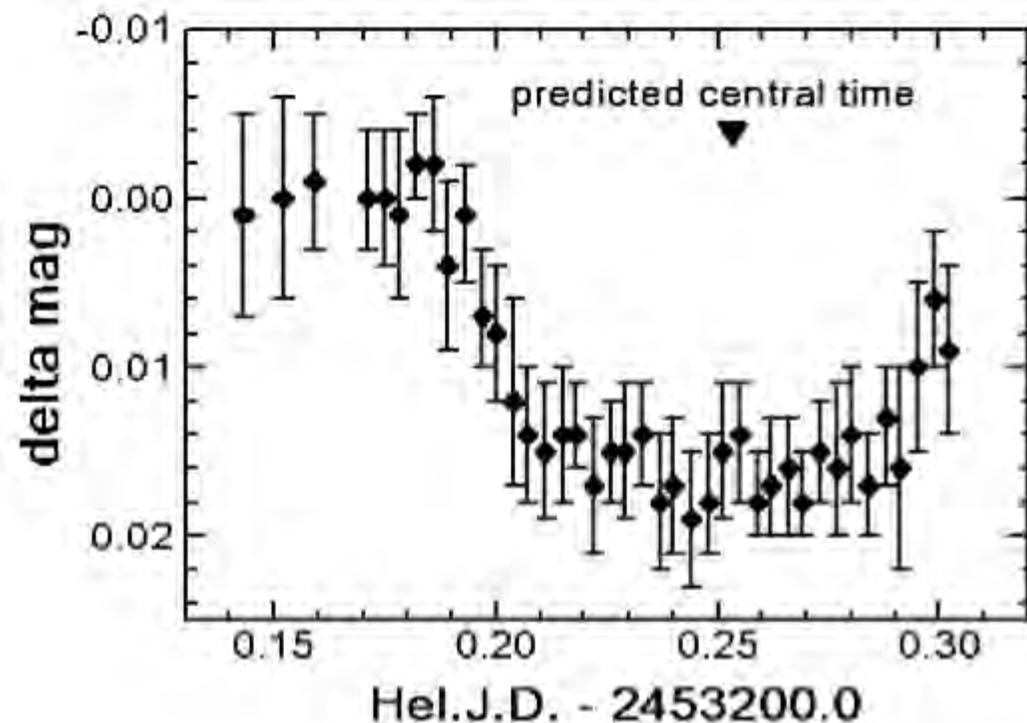


地上からのトランジット測光観測

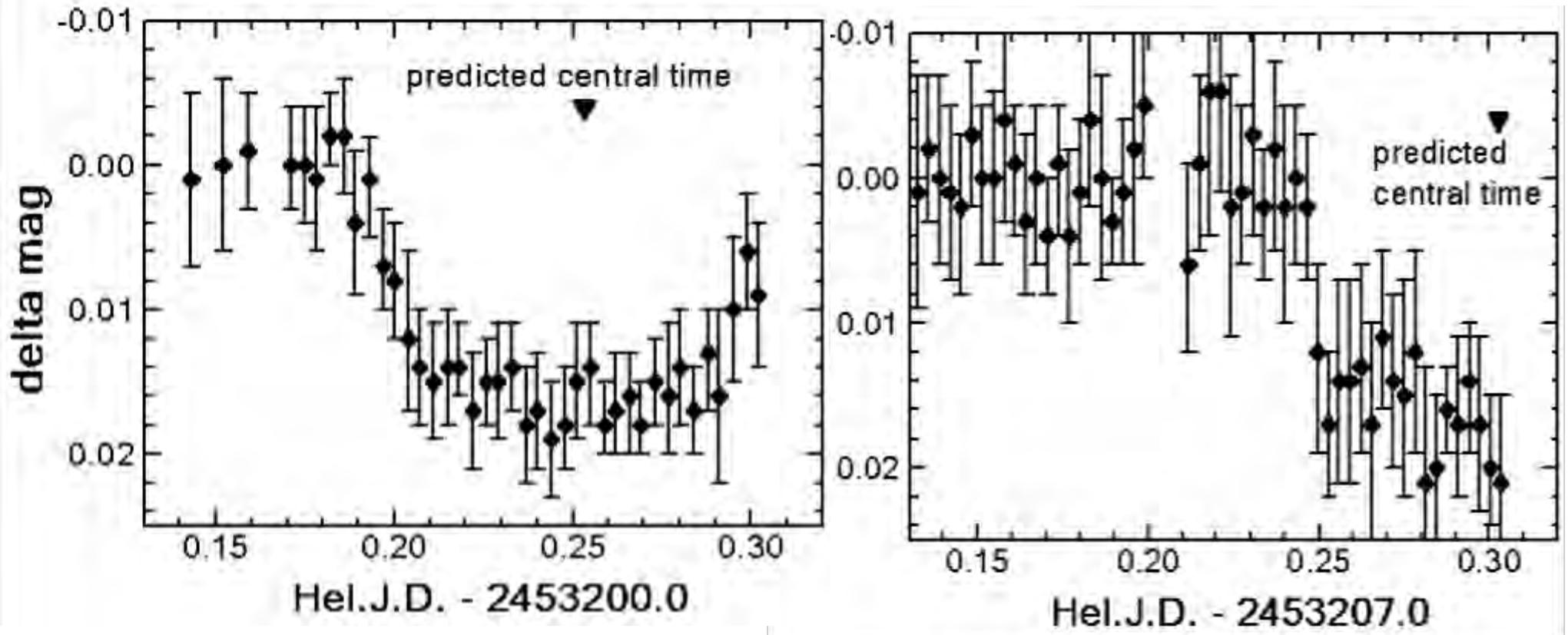
HD209458b(2004年)
OTO 10cm望遠鏡

TrES-3(2008年)
BAO 101cm望遠鏡

国内で初めての良好な観測



大気条件と観測精度



左図は数ヶ月に1度の好条件(梅雨明け当日)

右図は1ヶ月に数回の好条件(その1週間後)

その他の観測条件は同一

トランジットの測光観測の主な目的

- サーベイ観測

特定の領域をシラミつぶしに明るさを監視し、新規にトランジット惑星を発見する

- 分光観測(視線速度観測)で見つけた候補星を確認する(N2Kプロジェクト)

→惑星の物理量の確定

- トランジットを起こす時刻の変化を測定する

- TTV(Transit Timing Variation)

→さらに第2、第3の惑星が存在することがわかる

測光観測で発見された惑星の例

- <HD209458b 75cmAPT フォトマル測光器>
- TrES 10cm f/2.9シュミット光学系
 - **TrES-1b**, TrES-2b等 初めてのtransitによる惑星検出
- HATnet 200mm f/1.8写真レンズ(口径11cm)
 - HAT-P-1b等
- XO 200mm f/1.8写真レンズ(口径11cm)
 - XO-1b等
- SWASP 200mm f/1.8写真レンズ(口径11cm)
 - SWAP-1b、SWASP-2b等

N2Kコンソーシアムとは

<http://tauceti.sfsu.edu/n2k/>

Debra Fischer¹ & Greg Laughlin² Principal Investigators

G. Henry⁸, G. Marcy³, P. Butler⁴, S. Vogt², C. McCarthy¹, J. Valenti⁹ Co-Investigators (USA)

T. Johnson, R. Sareen, K.L. Tah, D. Abouav Students (SFSU)

M. Ammons, S. Robinson, J. Strader, A. Wolf Students (UCSC)

J. Johnson, J. Wright Students (UCB)

Bun'ei Sato⁵, Shigeru Ida⁶ Co-Investigators (Japan)

Dante Minniti⁷ Co-Investigator (Chile)

- ケック、マゼラン、すばる望遠鏡により新しく2000個の候補星 (Next2000)からホットジュピターを見つけて、
- 日米のアマチュアを含めた測光観測からトランジット惑星を発見、研究する
- なぜホットジュピターか→トランジットの検出が容易
→未解決なホットジュピターの起源を探る

N2Kプロジェクト 日本トランジット観測チーム

井田茂先生・渡部潤一先生提唱

すばる・ケック・マゼラン望遠鏡で視線速度で候補星を
探す→小望遠鏡の測光観測でトランジットを検出する

2004年に日本のアマチュアのを結集
2008年まで継続

いくつか候補をキャンペーン観測を実施した
地理的経度の関係で日本で何度かチャンスはあった
天候不順で観測できず

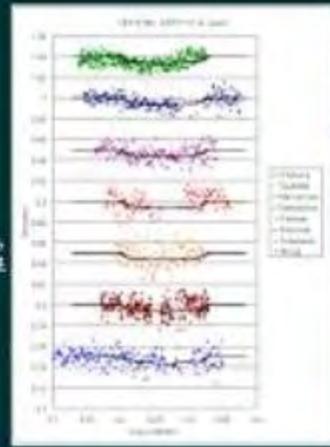
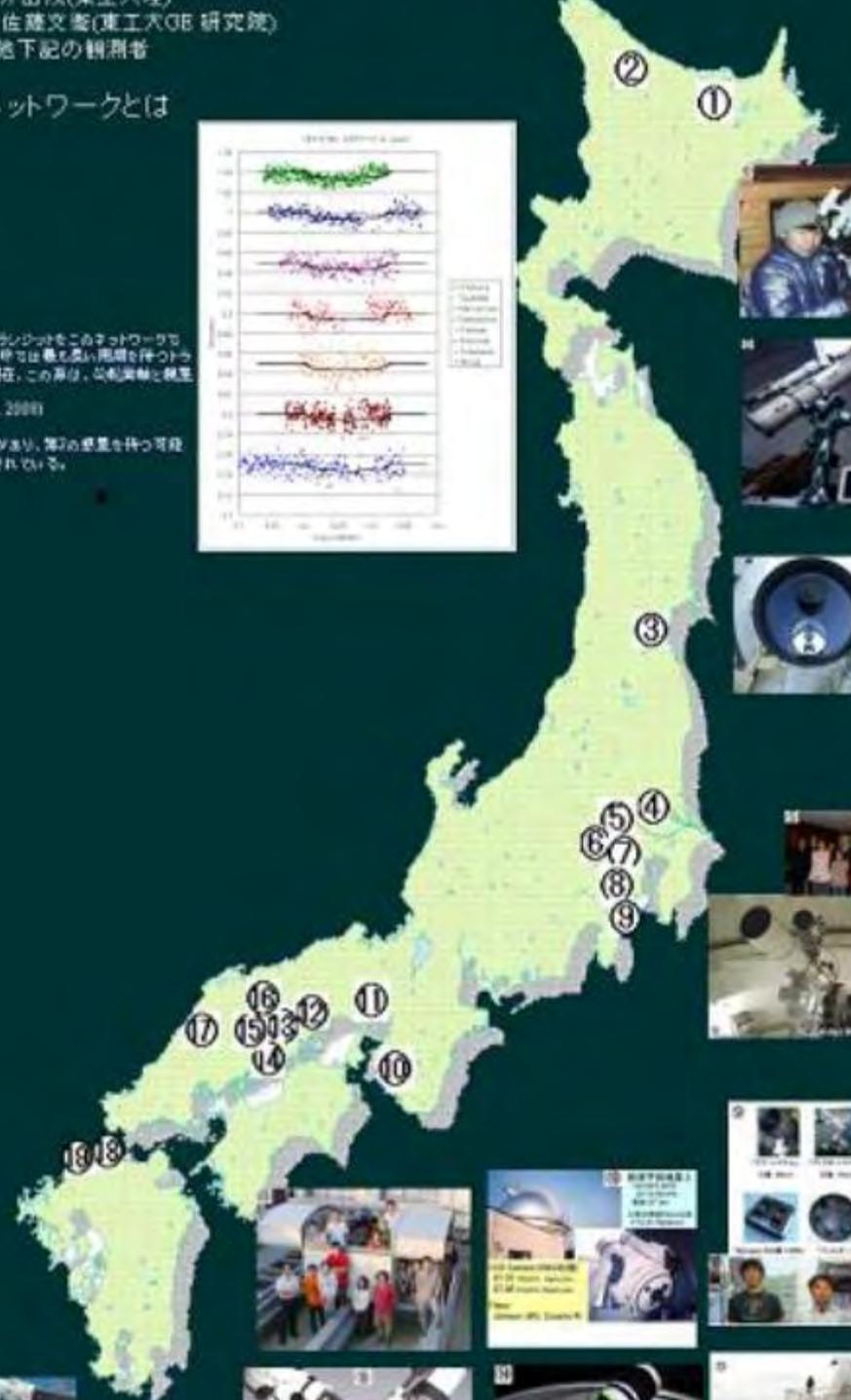
現在は、TTV観測へ移行

観測者の分布

- 北海道から九州まで19の観測所
- 口径10cmから1mまで
- 高校生から退職者まで

大島 修(岡山県立高)、井田 茂(東工大理)
津部 浩一(国立天文台)、佐藤 文彦(東工大CE 研究所)
成田 憲保(国立天文台)、他下記の観測者

日本トランジット観測ネットワークとは



ある程度は、海外観測4017155のトランジットをこのネットワークで
観測した観測記録、21日という短時間での観測は最も長い期間を持つト
ランジット観測で、観測率60.67と高い。現在、この率は、英航路と航路
の自動化とが主な原因で減少している。
また、この率はTTVを定している可能性があり、第2の観測を持つ可能
性が指摘されており、TTVの観測が奨励されている。



観測データを提供した観測者

- 赤澤秀彦(倉敷市川辺小学校) 倉敷市、35cmSC、28cmSC、12cm屈折 ST-7、ST-9、ST-6
- 石隈慎一郎・木村 真二 (神戸大理)、神戸市 30cmSC、20cmSC、STL-1001E、ST-9
- 伊藤芳春(仙台一高) 仙台市、35cmSC ST-9XEi
- 井上哲秀(小倉高校) 小倉市20cm反射
- 円舘金(北海道津別町) 25cmイプシロン光学系 ST-8
- 佐野 康男(名寄市)・大石 尊久(北大) 25cm反射、10cm屈折、ST-9E
- 大川拓也(所属なし)、川崎市13cm反射(イプシロン光学系)、PENTAX K10D (デジタル1眼レフカメラ)
- 大島修(水島工高) 倉敷市、20cmSC、10cm屈折 ST-9XE
- 清田誠一郎(VSOLJ) つくば市25cmSC Apogee7
- 高橋佑介(元東海大理) 平塚市10cm屈折Apogee Alta U260
- 富田晃彦 (和歌山大) 和歌山市65cm反射、ST-7
- 大倉信雄・中島洋一郎(岡山市・瀬戸内市) 25cmライトシュミットカメラST-1001E
- 松本直記(慶応) 横浜市、15cm屈折 ST-7
- 副島 照史 (福岡市) 20cmSC、ST-9XE
- 塚田 健(星の子館) 三鷹市 50cm STL-1001E
- 宮下敦(成蹊高) 12.5cmST-7
- 矢田猛士 (三瓶自然館) 60cm反射ST-10XME
- 藤井貢(藤井美星観測所) 7.5cm屈折、ST-7

N2Kプロジェクトとの連携

まず分光観測で候補星を見つける

すばる望遠鏡(口径8.2m)

ケック望遠鏡(口径10m)

次にトランジットを起こしているかどうかを小望遠鏡で確認する

ここでアメリカ、日本、ヨーロッパのアマチュアが活躍する余地がある。

典型的なトランジットを起こしている時間は数時間

地理的に120度(時間で8時間)ずつ離れた場所から観測すれば、もれのない観測が期待できる。

日本トランジット観測ネットワークの

HD17156b

岡山188cm望遠鏡で分光観測
ロシターマクローリン効果の検出

大発見か！？

恒星の自転軸と惑星の公転面のずれが76度もある

惑星系を生んだ円盤(=恒星の赤道面)から、大きくはずれた軌道を描いていることを意味する。

とすると、主流となっている惑星移動原因に

私の観測が役に立った例

PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan **60**, L1–L5, 2008 April 25

© 2008. Astronomical Society of Japan.

A Possible Spin-Orbit Misalignment in the Transiting Eccentric Planet HD 17156b*

Norio NARITA[†]

Department of Physics, School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033
narita@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp

Bun'ei SATO

Global Edge Institute, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

Osamu OHSHIMA

Mizushima Technical High School, 1230 Nishiachi-cho, Kurashiki, Okayama 710-0807

and

Joshua N. WINN

*Department of Physics, and Kavli Institute for Astrophysics and Space Research,
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA*

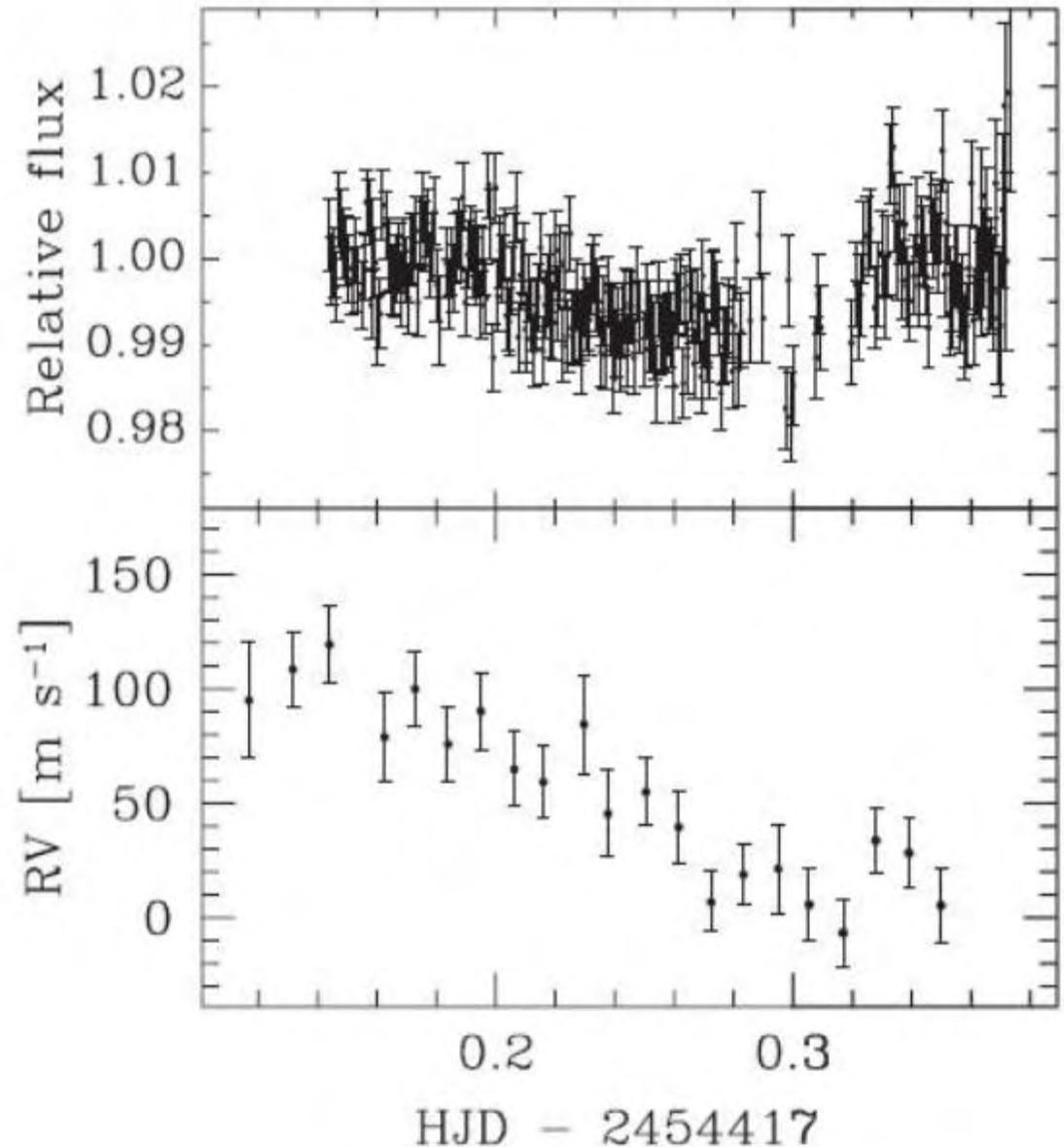
(Received 2007 December 16; accepted 2008 January 30)

Abstract

We present simultaneous photometric and spectroscopic observations of HD 17156b spanning a transit on 2007 November 12 (UT). This system is of special interest because of its 21 d period (unusually long for a transiting planet) and its high orbital eccentricity of 0.67. By modeling the Rossiter–McLaughlin effect, we find the angle

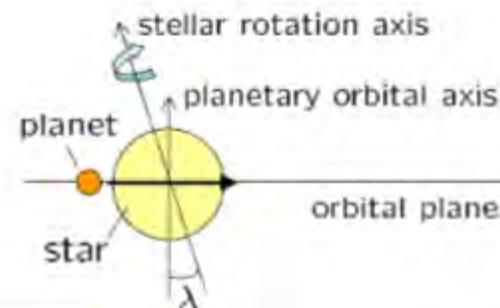
20cm望遠鏡によるデータでも

- HD17156b (N2Kプロジェクトが発見)
- OAO188cm望遠鏡の分光観測に合わせてOTO20cm望遠鏡で測光観測
- トランジットの中央時刻を決定するために使われた



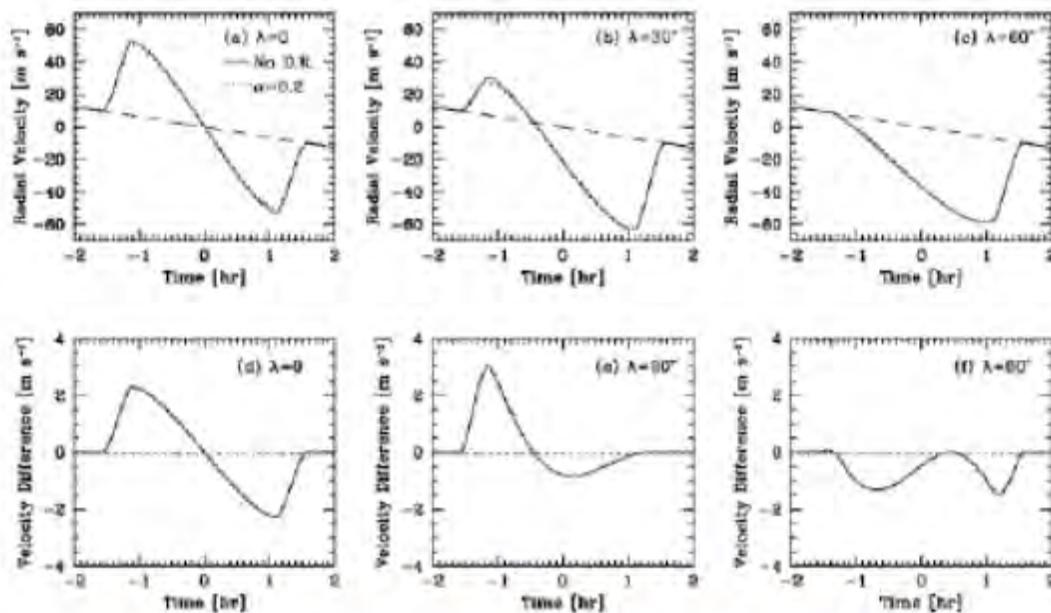
ロシター効果から 軌道傾斜角を得る

背景: λ の定義



転軸と惑星の公転軸のなす角

背景: Rossiter効果と λ の関係



トランジット中の視線速度の振る舞いから
 λ を求めることができる

成田憲保 (2006)

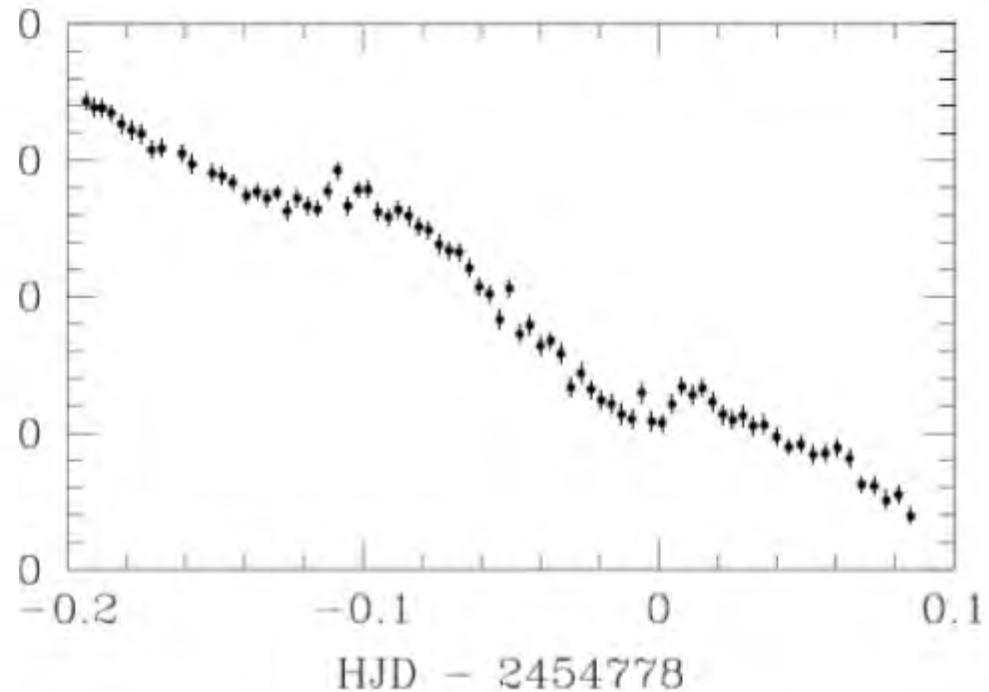
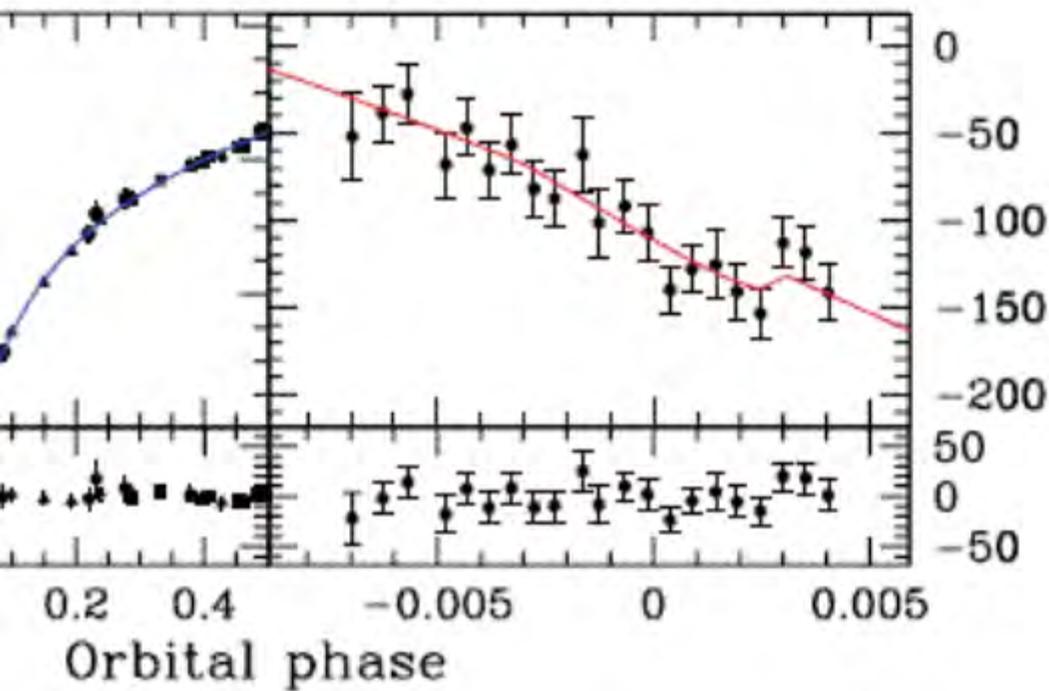
ホットジュピターの起源(1)

- 巨大惑星が $\sim 0.05\text{AU}$ 付近にある
 - ✓ Core accretion modelではここで形成されたとは考えにくい
 - ✓ もっと遠くで形成し、この場所まで移動してきたはず
 - ✓ 惑星のmigration → これまでの主流の理論
- ある程度離れたところには離心率の大きな惑星が多い
 - ✓ 離心率を大きくするメカニズムがあるはず
 - ✓ $\sim 0.05\text{AU}$ 付近より近いところでは離心率は0に近づいている
- これらの特徴を説明できる理論はどんなものだろうか？

ホットジュピターの起源(2)

1. diskの中で遠くでできた巨大惑星がmigrationしてきた
 - disk-planet interaction (Type I & II migration)
 - 大きな離心率や大きな軌道傾斜角のずれは生まない
2. 惑星同士の重力散乱で内側に放り込まれた
 - planet-planet interaction, Jumping Jupiter model
 - 大きな離心率や大きな軌道傾斜角を持つ可能性がある
 - 主星近傍ではtidal circularizationで離心率はほぼ0に落ちる
3. (連星系の場合) 伴星からの摂動を受ける
 - 古在 migration (Wu & Murray 2003)
 - 大きな離心率と軌道傾斜角を持つ → HD 80606を説明

HD17156の軌道は傾いていなかった



velocities taken with the Subaru HDS. The values and errors are presented in tab

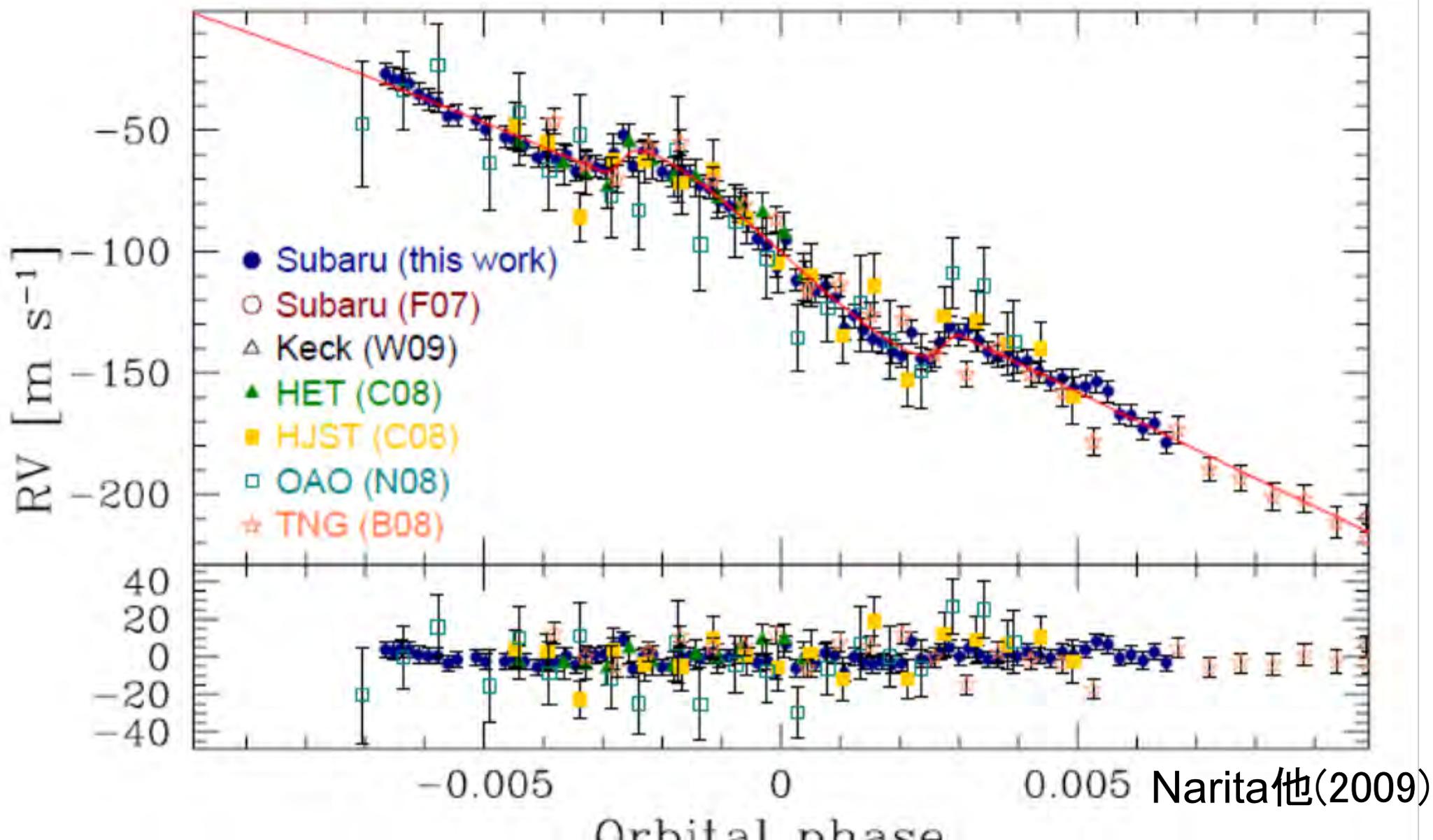
s of HD 17156 as a function of orbital phase

l with the (岡山口径1.8mとすばる8.2mでは光量が20倍も違う

ferent data sets (circle, OAO; triangle, Subaru;

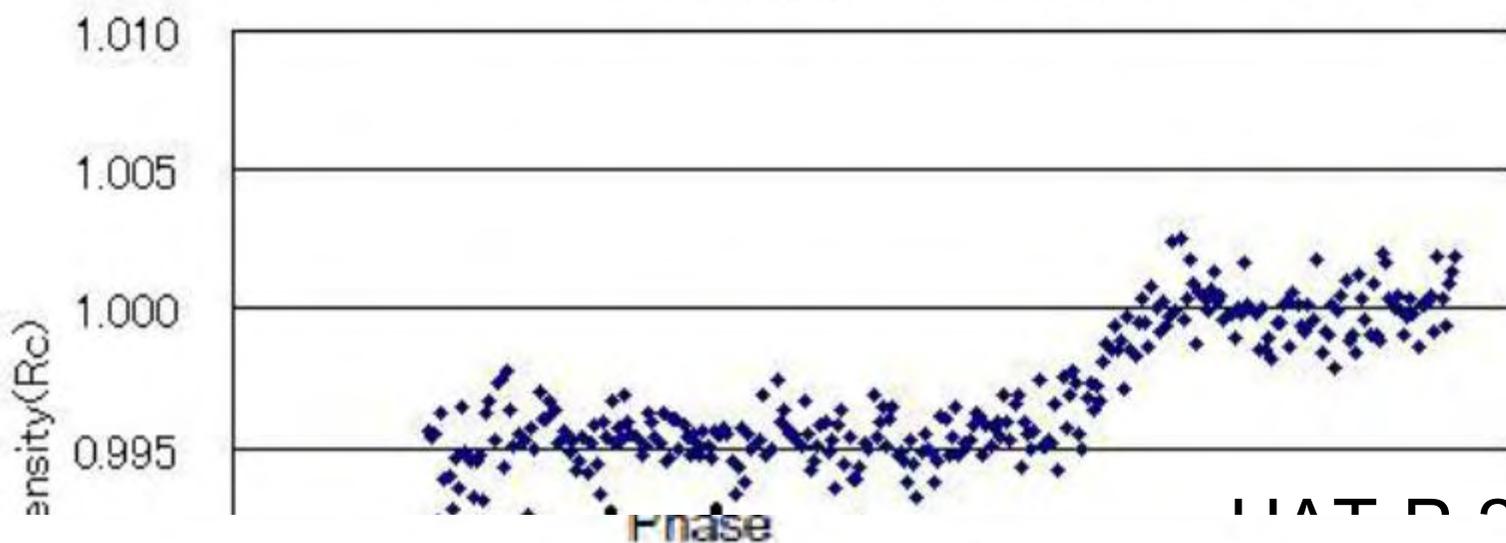
el: The entire orbit. Right panel: A zoom of

大望遠鏡のデータを総合すると

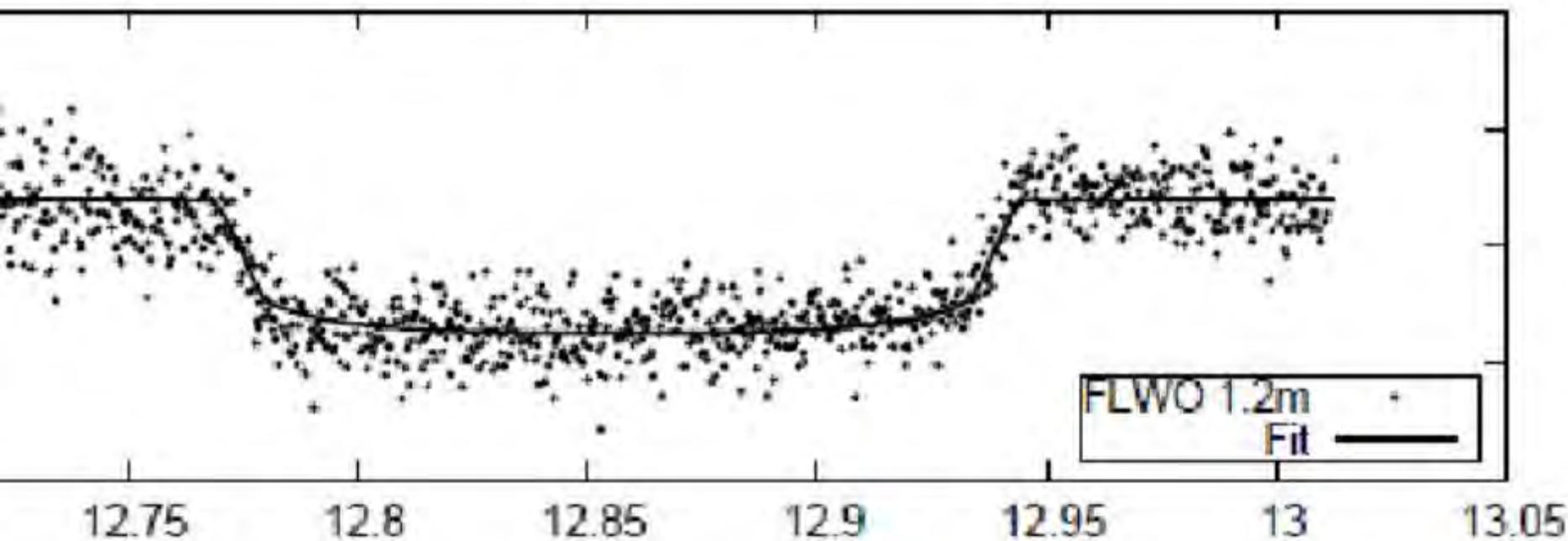


最近の観測では さらに高精度を達成

HAT-P-2@BAO101cm20090510_airmass_corrected



HAT-P-2 (2009年5月)



遠鏡
58m)
惑星

今後の測光による系外惑星の観測

N2Kプロジェクトは終了へ(井田先生ご苦労様でした)

- 高精度な測光観測からTTV観測(第2、第3の惑星検出)
- 赤外観測
- ケプラー衛星が見ているのは、空の中のごく一部
- M型星の周りのスーパーアースの検出

新天地(新しい環境、新しい分野)は、ニッチのかたまり

科学が精密化するとアマチュアの出番が少なくなるのは歴史の必然

しかし、「ニッチ」は必ず残っている(これも生命進化の必然)

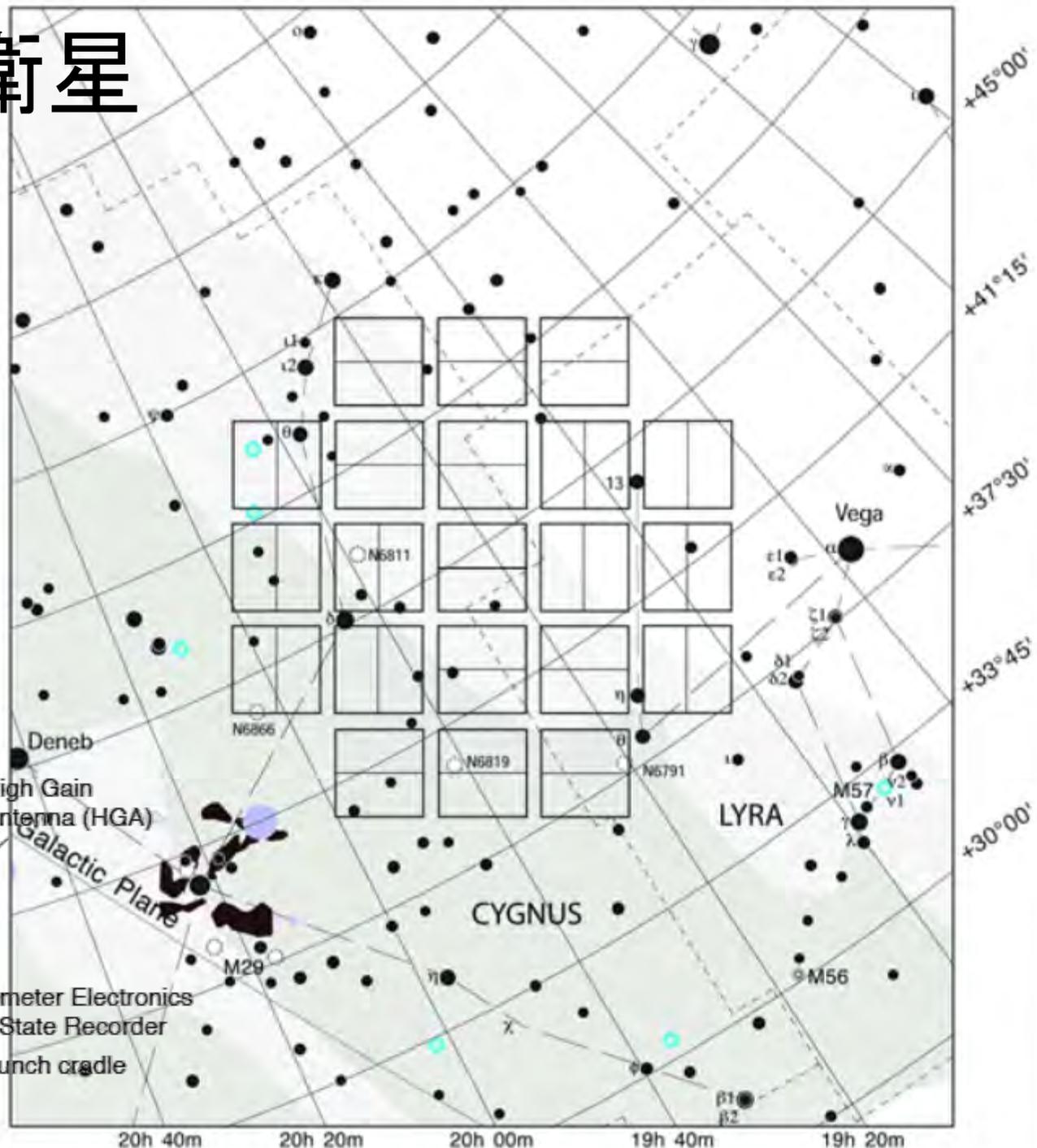
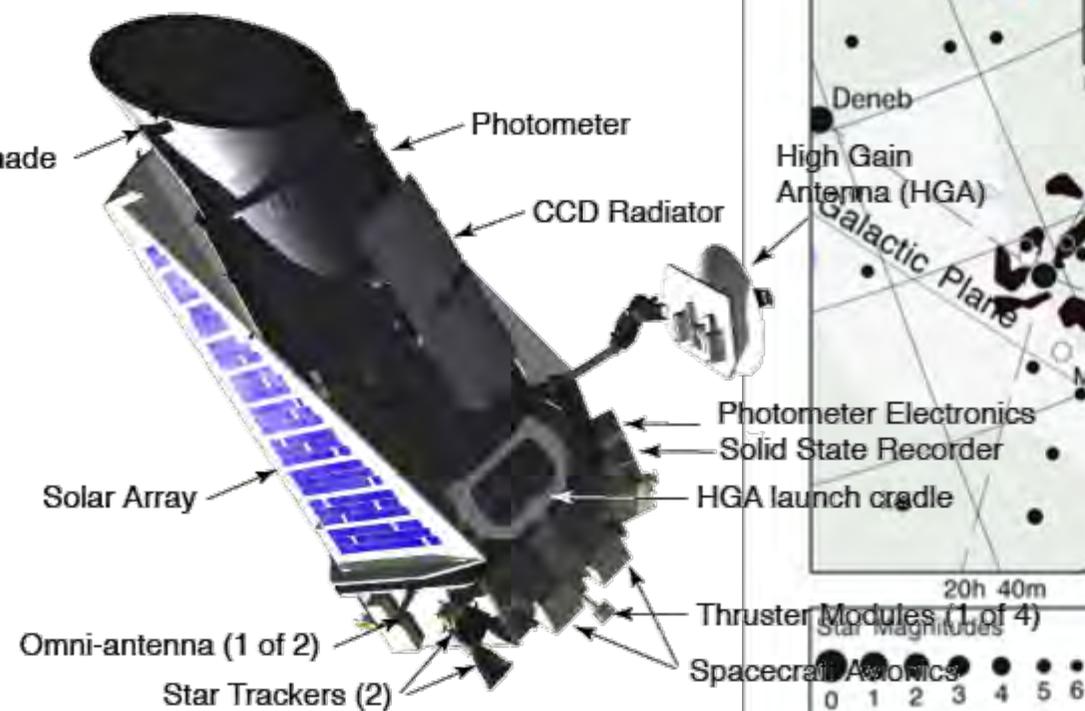
ケプラー衛星

米国のプロジェクト

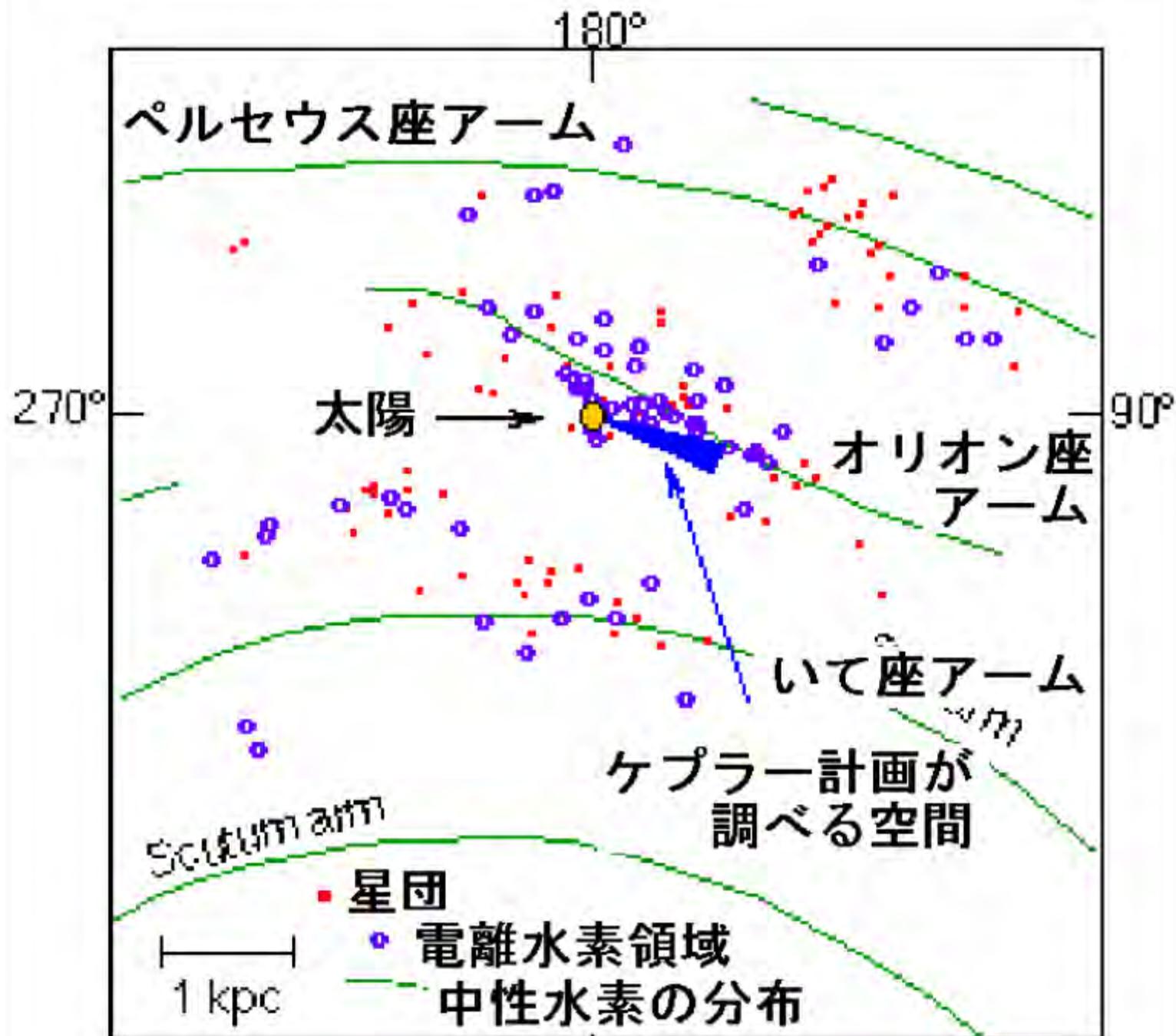
同じ視野を監視し続ける

広い視野

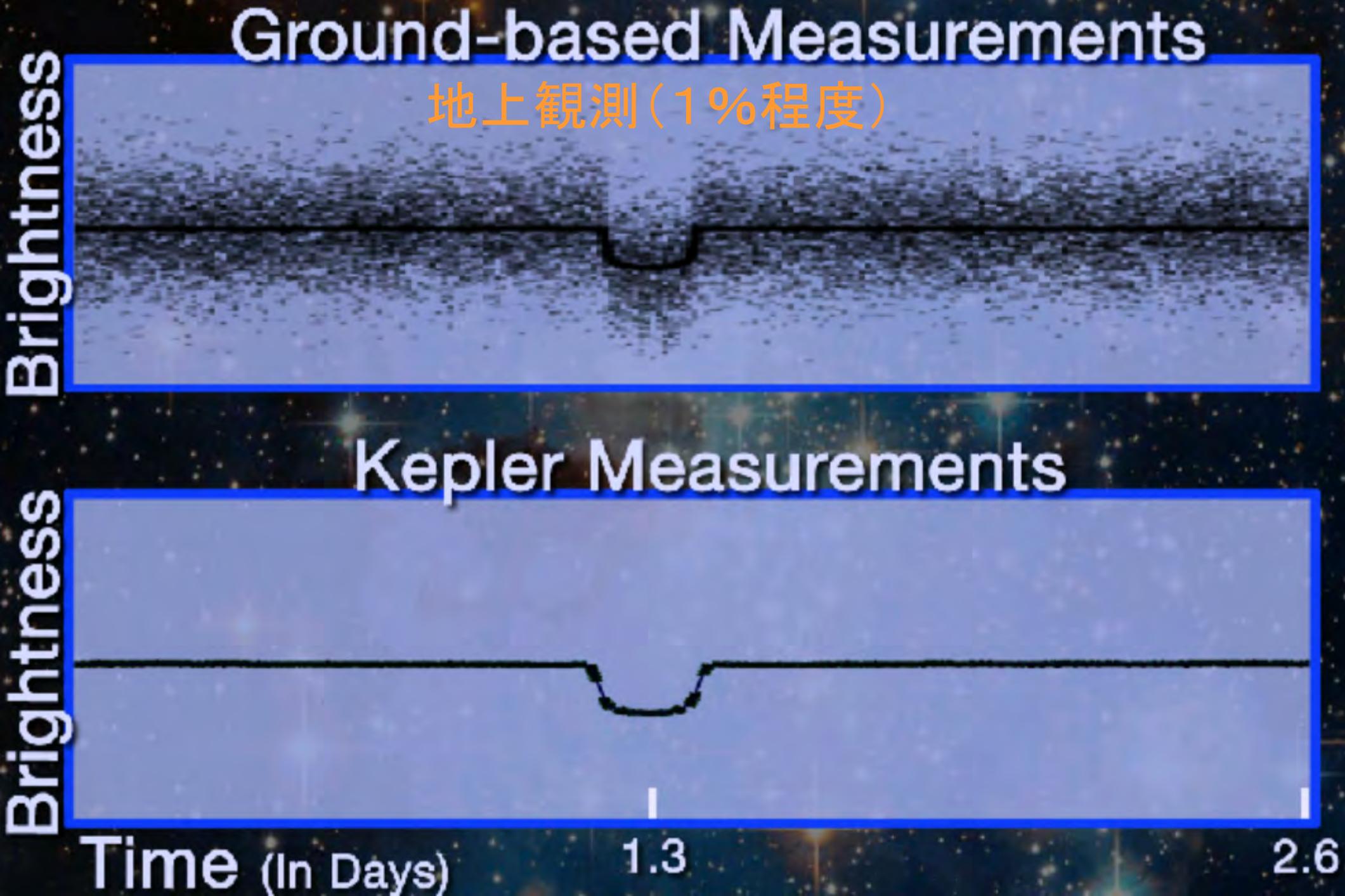
口径65cmのシュミットカメラ光学系



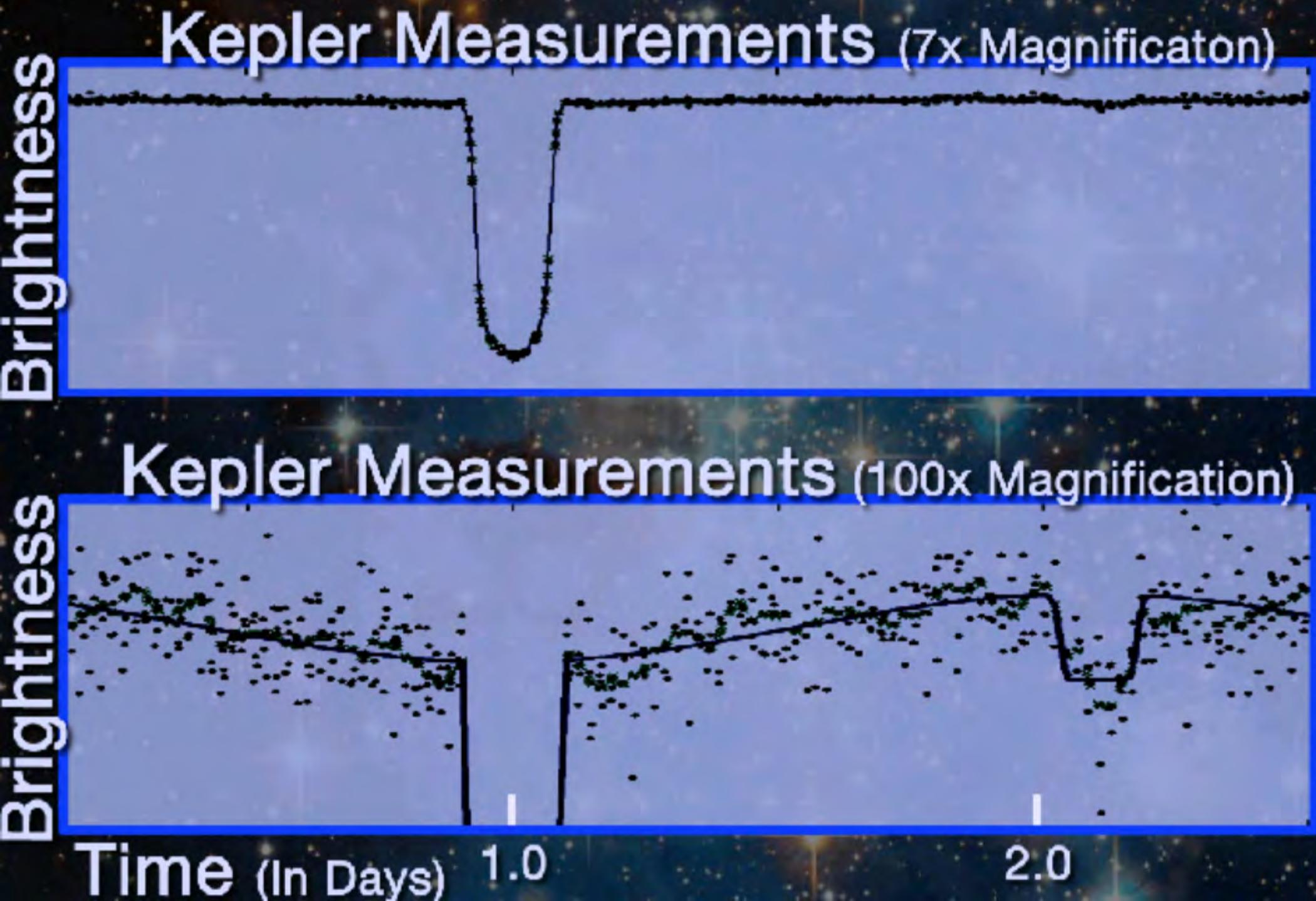
ケプラー衛星が調べる領域



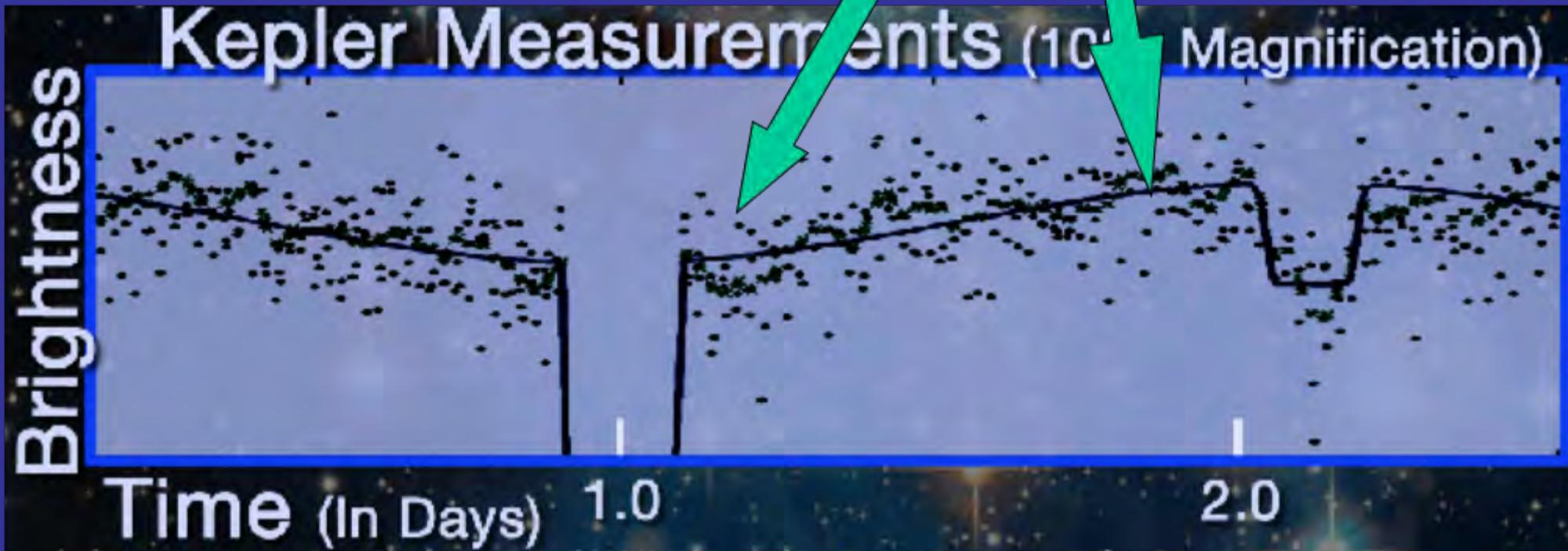
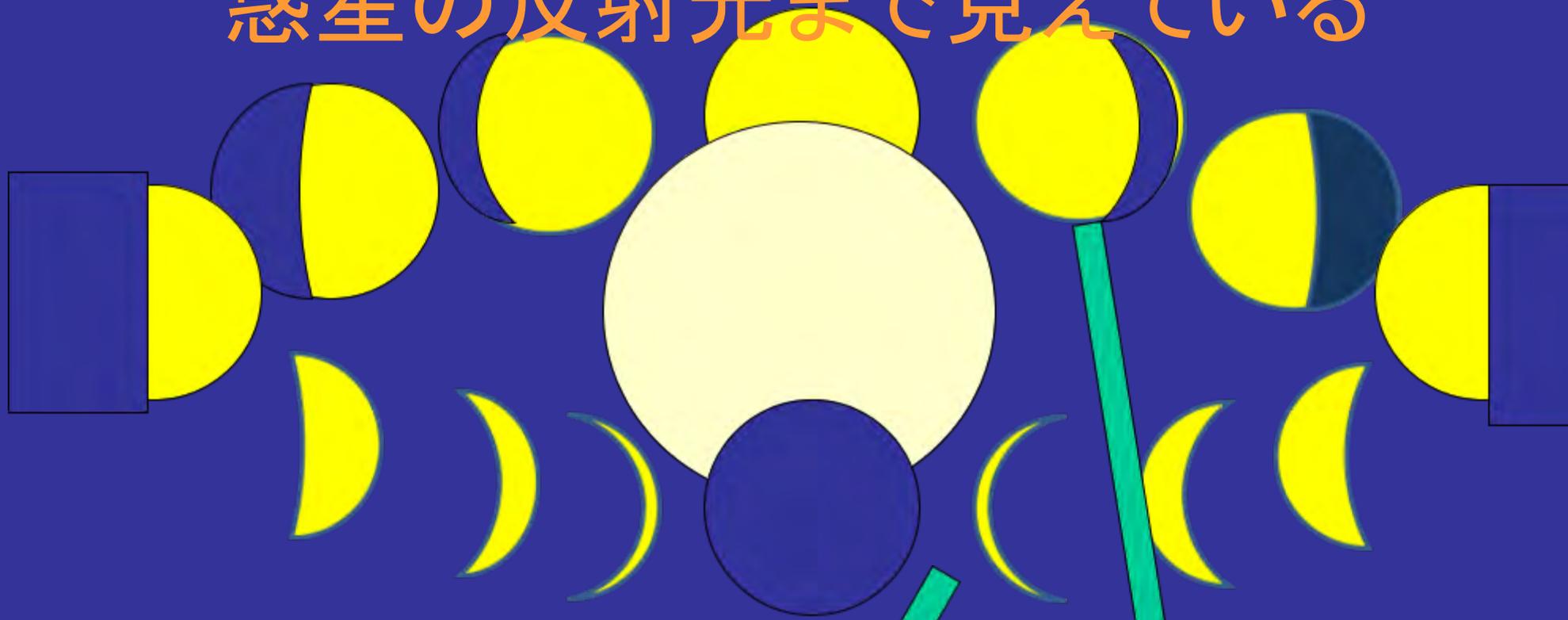
測光精度ではケプラー衛星には敵わない



HAT-P-7の光度曲線(ケプラー衛星)



惑星の反射光まで見えている



地球型惑星の発見

- すでにごく少数ではあるが地球型惑星候補は見つかっている
- しかし、生命の誕生が期待できる条件を持った地球型惑星を見つけるには、もっとたくさんの地球型惑星を見つけないといけない
- ケプラー衛星の成果に期待