

見えないことを使って 太陽系を観測する

はしもとじょーじ (神戸大学 惑星学科)

掩蔽(えんぺい)

▶ 世界最高性能の望遠鏡でも見えないものが見える
小惑星の大きさや形を決定する

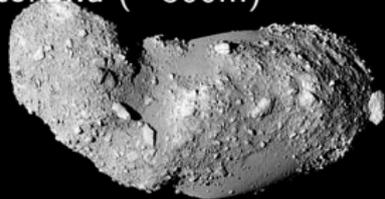
▶ (3200) Phaethon と (98943) 2001 CC21

太陽系外縁天体の大気を測る

▶ 冥王星とクワオアア

探査機が撮影した小天体

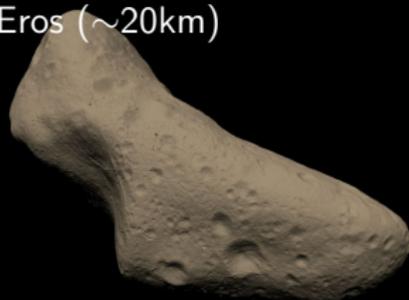
Itokawa (~300m)



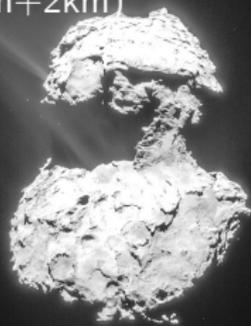
Ida (~30km) and Dactyl



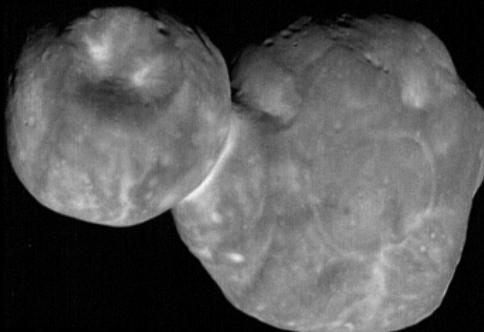
Eros (~20km)



Churyumov-Gerasimenko
(~3km+2km)



Arrokoth (~20km+15km)



画像：

<https://apod.nasa.gov/apod/ap140209>

<https://apod.nasa.gov/apod/ap040619>

<https://apod.nasa.gov/apod/ap010605>

<https://apod.nasa.gov/apod/ap200127>

<https://apod.nasa.gov/apod/ap190228>

物質強度 > 重力

探査機でその場に行かないとどんな形かわからない

世界最高性能の望遠鏡でも見えない

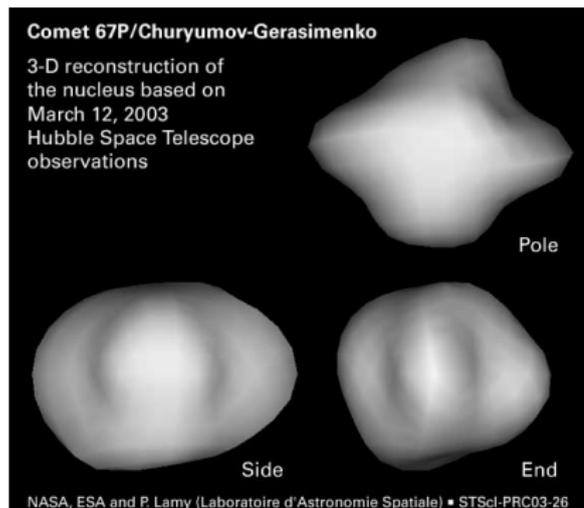
角分解能 (識別できる最小の角度)

- ▶ 大気ゆらぎ ~ 0.6 秒角@マウナケア
- ▶ 光の回折による像の広がり (回折限界) $1.22\lambda/D$
- ▶ 光学系の精度
- ▶ 検出器の画素サイズ

ハッブル宇宙望遠鏡

- ▶ 口径 $D = 2.4\text{m}$
- ▶ 回折限界 0.07 秒角@ 675nm
⇒ ~80km @ 1.52au

cf. 視力 1.0 = 60 秒角



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:67PNucleus.jpg>

掩蔽 (えんぺい)



何かがあるを隠すこと

- ▶ 日食は、月が太陽を隠す掩蔽

太陽系内天体による恒星の掩蔽

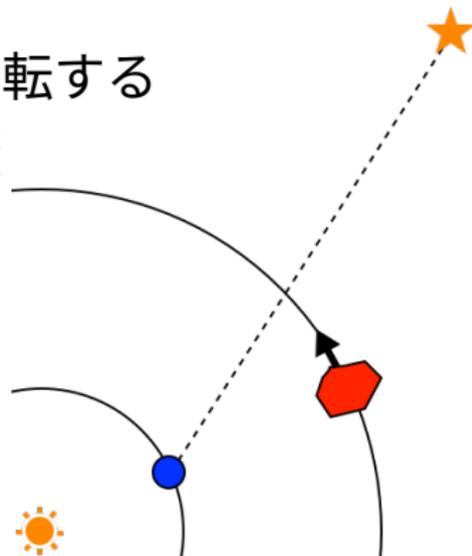
- ▶ 太陽系内天体は太陽の周りを公転する
- ▶ 天体が恒星の前を横切れば掩蔽

$$L = v\tau$$

天体 (赤) の大きさ L

天体 (赤) 移動速度 v

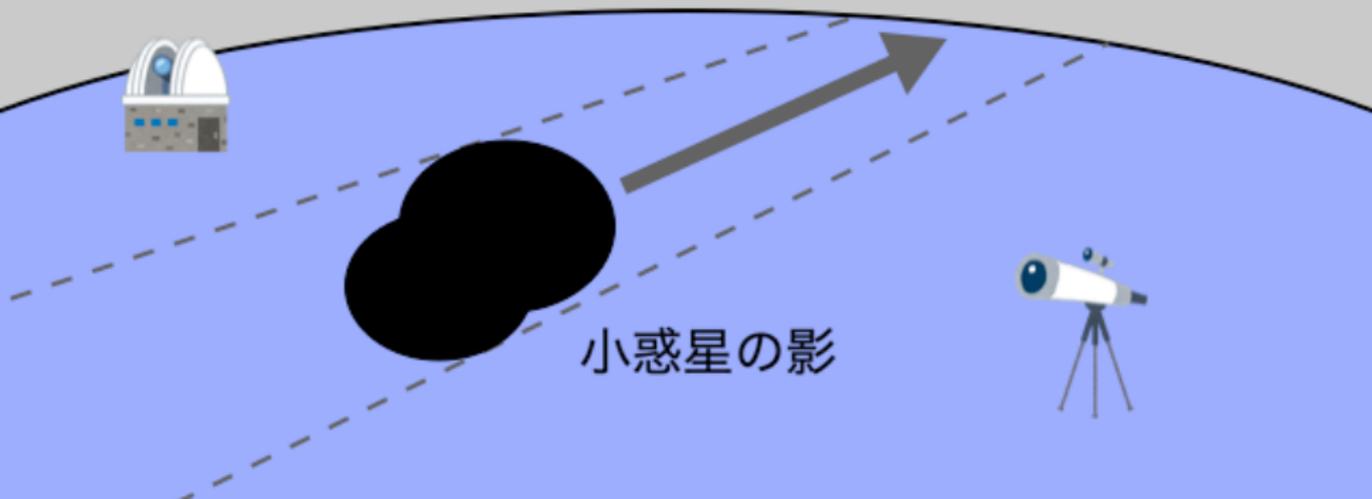
掩蔽継続時間 τ



★ 恒星



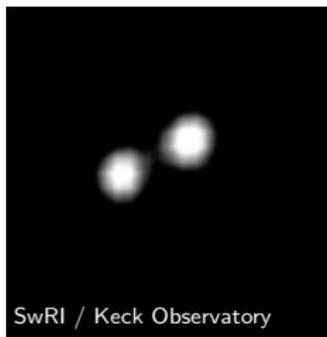
- ▶ 小惑星の移動に合わせて小惑星の影が移動
- ▶ 観測点が影の中に入ると恒星は見えなくなる



(90) Antiope

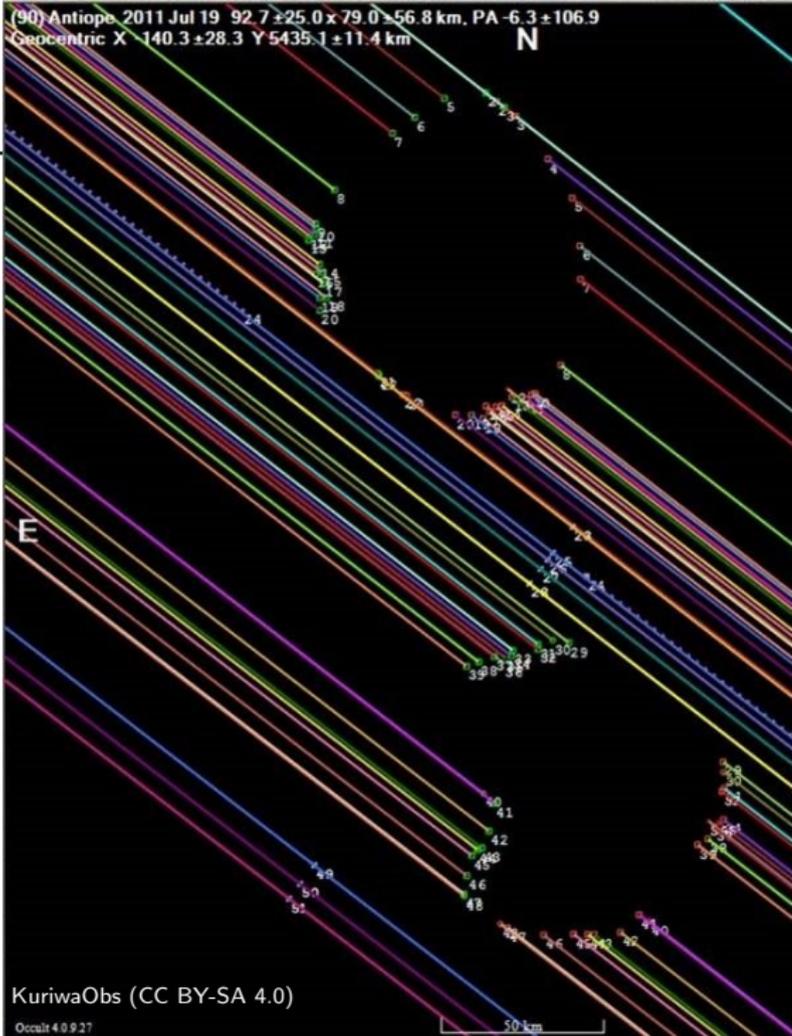
連小惑星 (88km, 84km)

▶ 中心間距離 171km



掩蔽観測 (2011.07.19)

- ▶ 57 観測地点を緯度・経度で並べ換え
- ▶ 掩蔽なしを表示
⇒ 小惑星の影絵

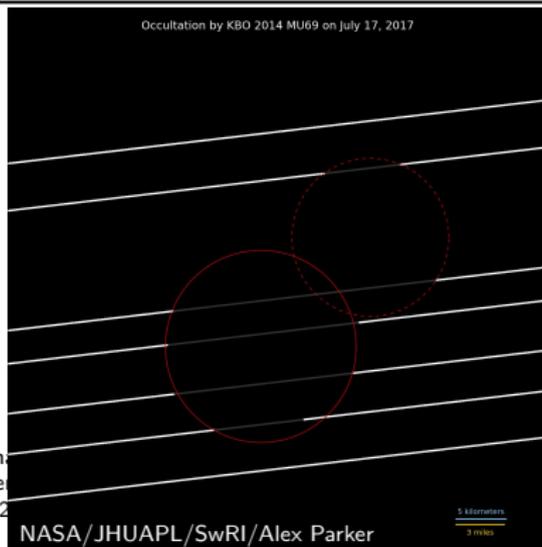


KuriwaObs (CC BY-SA 4.0)

Occult 4.0.9.27

50 km

(486958) Arrokoth



画像：

<https://www.planetary.org/space-images>
<http://pluto.jhuapl.edu/News-Center>
<https://apod.nasa.gov/apod/ap190201>

左 ハッブル宇宙望遠鏡 (2014)

中 掩蔽観測 (2017)

右 New Horizons (2019)

⇒ 掩蔽観測の正確さが証明される

掩蔽の観測

大口径望遠鏡では観測できない

- ▶ 小天体の掩蔽帯は狭い \Rightarrow 移動観測は必須

精度は観測点の数と時間分解能で決まる

- ▶ 小口径の望遠鏡で多点観測
- ▶ 高時間分解能観測
 - GPS を使った時刻決定 \Rightarrow 精度 \sim ミリ秒
 - 高感度 CMOS カメラ \Rightarrow 高速度撮像

天体移動速度 $v \sim 10 \text{ km/s}$ (典型的な小惑星)

時間精度 $t \sim 10 \text{ ms}$

\Rightarrow 大きさ決定精度 $\Delta \sim vt \sim 100 \text{ m}$

深宇宙探査技術実証機 DESTINY+



直径 5~6km

小惑星 (3200)Phaethon のフライバイ探査

- ▶ ふたご座流星群母天体
- ▶ 近地球小惑星 公転周期 1.43 年
- ▶ 活動的小惑星 近日点付近で少量の物質放出
- ▶ 彗星？ 小惑星？

3200 Phaethon 掩蔽 2021.10.03

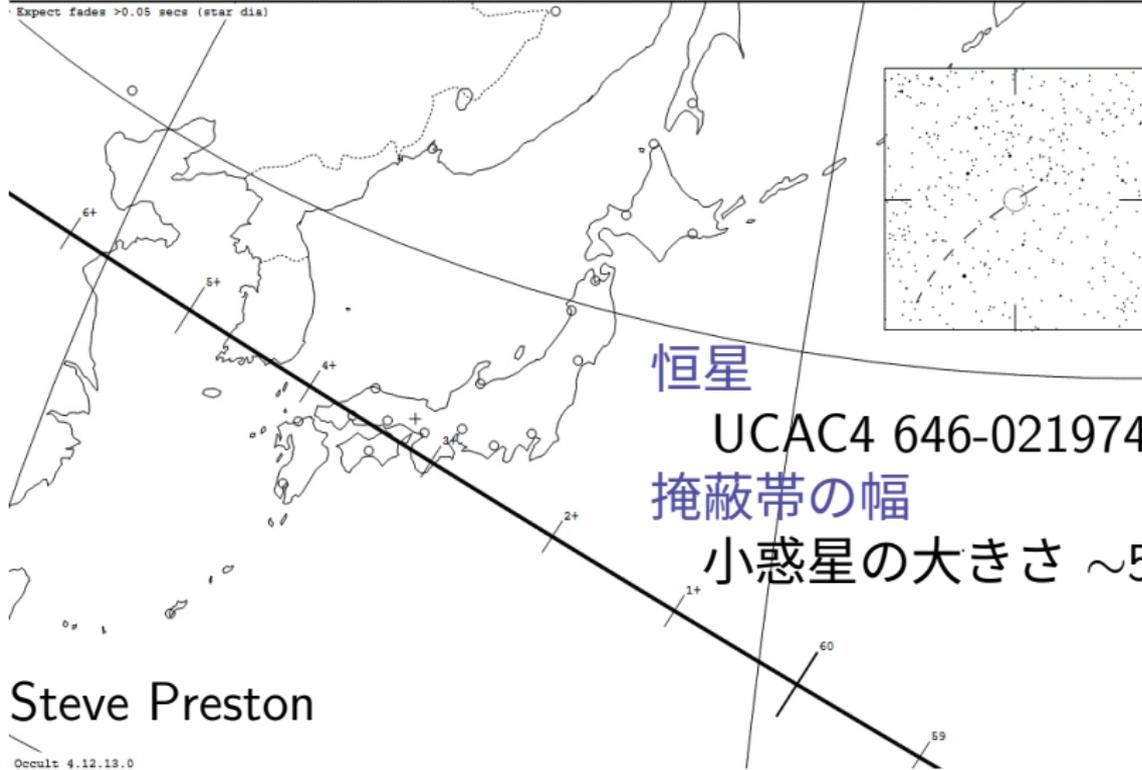
3200 Phaethon occults UCAC4 646-021974 on 2021 Oct 3 from 16h 46m to 17h 12m UT

Star: (Dia = 0.3 mas)
Mv 12.0; Mb 13.9; Mr 11.0
RA = 4 50 35.2051 (astrometric)
Dec = 39 5 11.250
[of Date: 4 52 4, 39 7 10]
Prediction of 2021 Sep 30.0
Reliable not available

Max Duration = 0.68 secs
Mag Drop = 6.5 (7.1r)
Sun : Dist = 114°
Moon: Dist = 77°
: illum = 10 %
Error 1.1x0.8 mas in PA 136°

Asteroid: (in DAMIT, ISAM)
Mag = 18.5
Dia = 5.0 ±0.4km, 4 mas
Parallax = 4.313"
Hourly dRA = -1.593s
dDec = 11.87"
JPL#7652021Sep30, Known errors

Expect fades >0.05 secs (star dia)



Steve Preston

3200 Phaethon 掩蔽 2021.10.03

百島



徳島



韓国

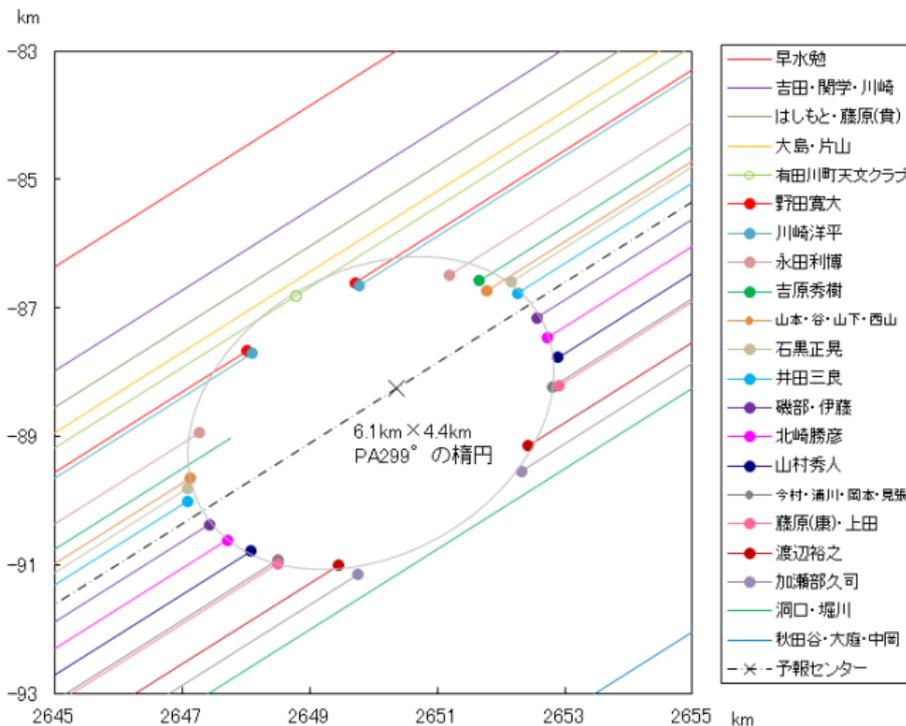


Phaethon 観測チーム 2021

- ▶ 観測点 35
- ▶ 掩蔽あり 17
- ▶ 掩蔽なし 7
- ▶ 不成立 11

3200 Phaethon 掩蔽 2021.10.03

(3200)Phaethon on 2021.10.3 UT



形状

6.1km × 4.4km
(等価直径 5.2km)

ちょっと横長
だいたい楕円

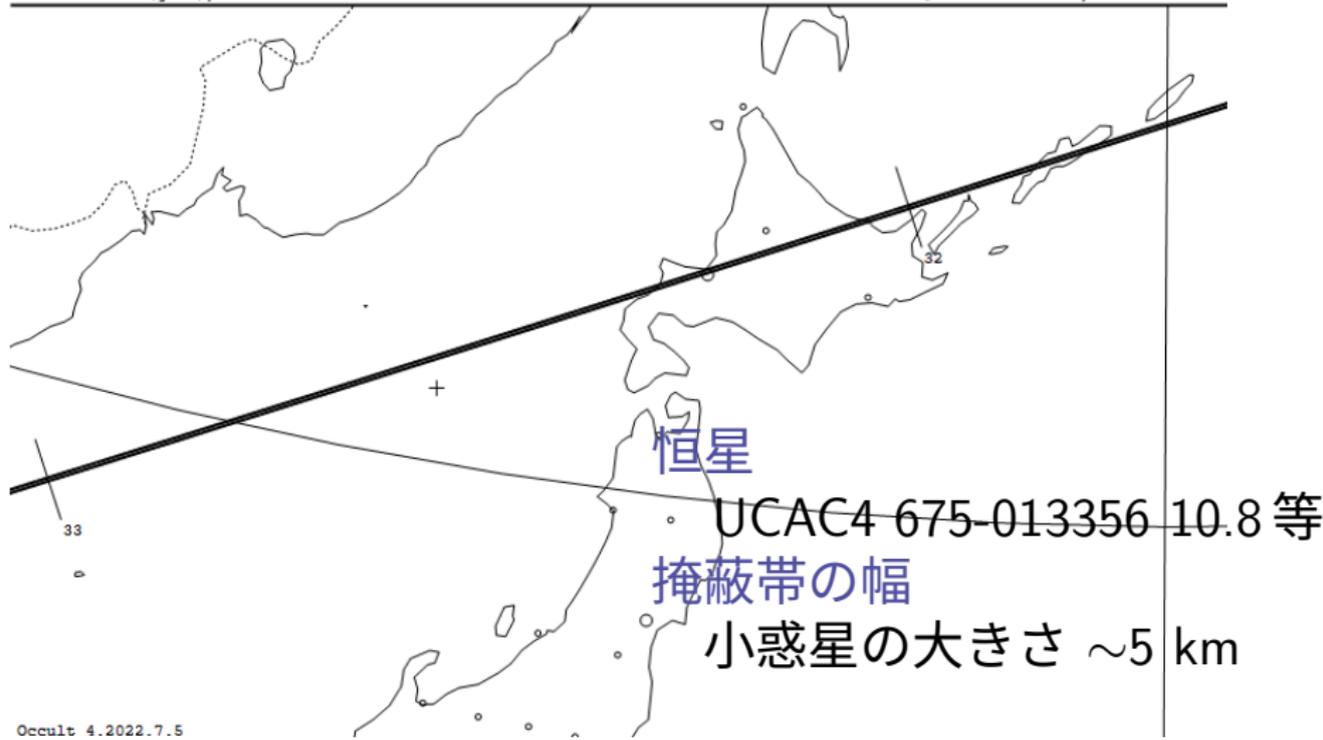
3200 Phaethon 掩蔽 2022.10.21

3200 Phaethon occults UCAC4 675-013356 on 2022 Oct 21 from 14h 27m to 14h 36m UT

Star: (Dia < 0.1 mas)
Mv 10.8; Mb 11.3; Mr 10.1
RA = 2 32 8.7863 (astrometric)
Dec = 44 56 40.065
[of Date: 2 33 38, 45 2.43]
Prediction of 2022 Aug 4.4
Reliable 0.9 (good),

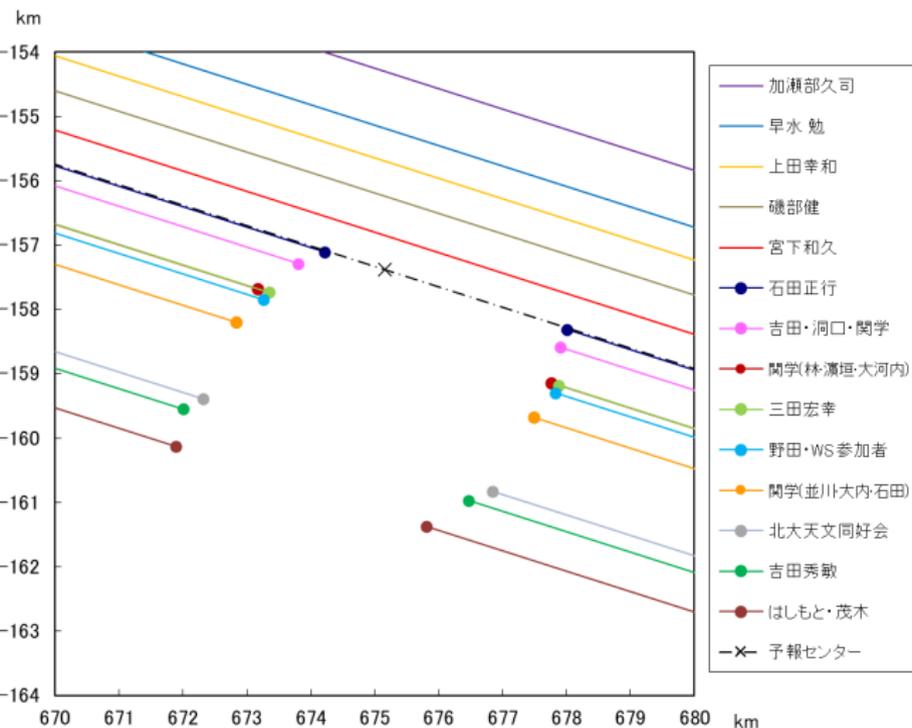
Durations: Max = 0.22 secs
1km = 0.044 secs, 1mas = 0.041 secs
Mag Drop: 6.7 [100%]v, 6.9 [100%]r
Sun : Dist = 144°
Moon: Dist = 106°, illum = 16%
Error 0.9 x 0.6 mas in PA 100°

Asteroid: (in DAMIT, ISAM)
Mag = 17.4
Dia = 5.0 ± 0.4 km, 5 mas
Parallax = 6.935"
Hourly dRA = -7.978"
dDec = -27.43"
JPL#778:2022-Jul-12, Known errors



3200 Phaethon 掩蔽 2022.10.21

(3200)Phaethon on 2022.10.21 UT



Phaethon 観測チーム 2022, 整約は早水氏による。

update2022.10.28

小惑星は予報より
南側を通過

- 大きさの上限が決まらない
- 単純な楕円ではなさそう

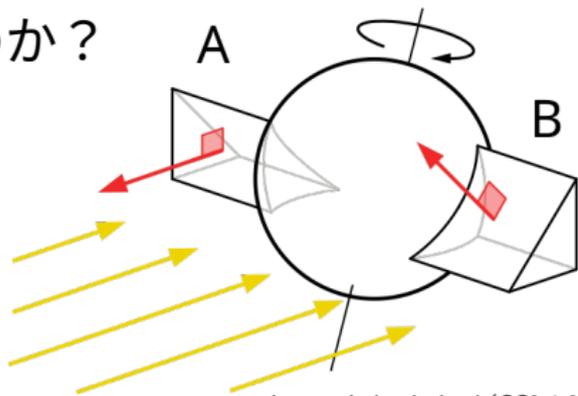
前回と異なる断面
自転周期 3.6 時間

Kim et al. (2018)

わからないことが増えた？

単純な形ではないらしい

- ▶ どういう形状をしているのか？
- ▶ 自転周期？
- ▶ YORP 効果？



軌道が変化した理由？

- ▶ 近日点付近でのダスト放出の影響？

活動的小惑星とは？

- ▶ 起源，進化，etc

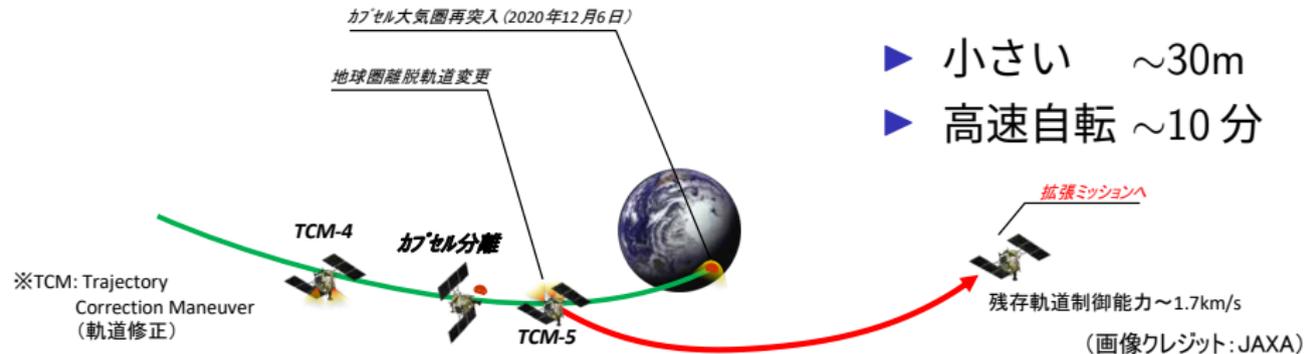
はやぶさ2 拡張ミッション

はやぶさ2

- ▶ 小惑星リュウグウの探査およびサンプルリターン
 - ▶ 2014年12月3日 打ち上げ
 - ▶ 2018年6月27日～2019年11月13日 リュウグウ探査
 - ▶ 2020年12月6日 地球帰還, カプセル分離

はやぶさ2 拡張ミッション

- ▶ 次の目標天体：1998 KY26, 2001 CC21



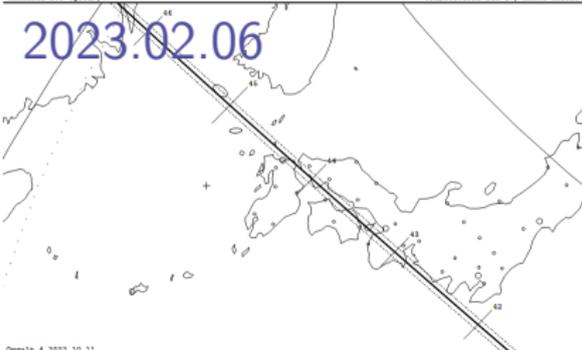
- ▶ 小さい ~30m
- ▶ 高速自転 ~10分

98943 2001 CC21 CC21 掩蔽

98943 2001 CC21 occults HIP 41805 on 2023 Feb 6 from 10h 17m to 10h 51m UT

Star: (Mag = 2.1 mag)	Durations: Max = 0.11 secs	Azimuth:
Mr 7.7; Mr 8.2; Mr 7.0	lrm = 0.19 secs; lmas = 0.024 secs	Mag = 14.3
SA = 4 31 24.049 (astrometric)	Mag Disp: 0.1 [100%]; 0.8 [100%]	RA = 0 60 40.00hm, 6.3 mas
Dec = 63 5 15.391	Star Dist = 141"	Parallax = 60.249"
Inf Date: 6 20 26 63 2 403	Mean Dist = 31; lllum = 39%	Hourly OSB = -14.03%
Prediction of 2023 Oct 19.2	EWOC = 123.70"	EWOC = 123.70"
Reliable 1.0 (good)	JPL41805-2023-Feb-07	Shown errors

2023.02.06

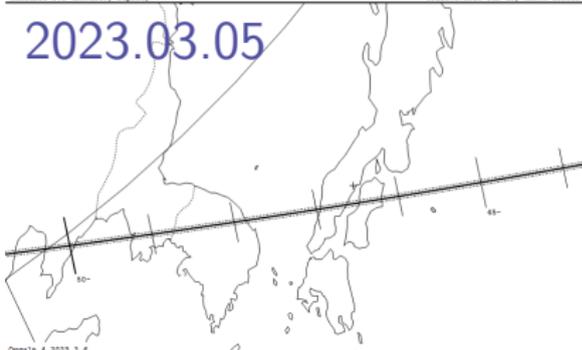


Occult 4.2022.10.11

98943 2001 CC21 occults TYC 4082-00763-1 on 2023 Mar 5 from 12h 38m to 13h 29m UT

Star: (Mag = 2.1 mag)	Durations: Max = 0.18 secs	Azimuth:
Mr 10.1; Mr 10.7; Mr 9.3	lrm = 0.28 secs; lmas = 0.024 secs	Mag = 17.3
SA = 4 40 46.6481 (astrometric)	Mag Disp: 7.1 [100%]; 7.4 [100%]	RA = 0 40 40.10hm, 6.2 mas
Dec = 62 15 39.610	Star Dist = 203"	Parallax = 60.502"
Inf Date: 4 42 47 62 18 267	Mean Dist = 67; lllum = 90%	Hourly OSB = -11.23%
Prediction of 2023 Feb 15.3	EWOC = 123.70"	EWOC = 123.70"
Reliable 3.1 (uncertain, dupSec)	JPL4082-2023-Feb-17	Shown errors

2023.03.05

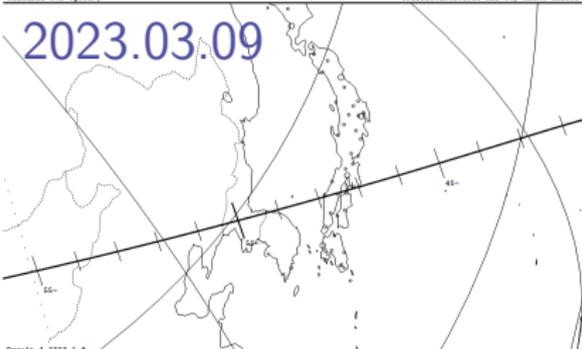


Occult 4.2023.2.6

98943 2001 CC21 occults UCAC4 756-031031 on 2023 Mar 9 from 12h 41m to 13h 33m UT

Star: (Mag = 2.1 mag)	Durations: Max = 0.16 secs	Azimuth:
Mr 11.4; Mr 11.7; Mr 10.6	lrm = 0.21 secs; lmas = 0.024 secs	Mag = 17.4
SA = 4 7 37.938 (astrometric)	Mag Disp: 0.1 [100%]; 0.3 [100%]	RA = 0 60 40.00hm, 6.3 mas
Dec = 61 5 31.981	Star Dist = 141"	Parallax = 60.203"
Inf Date: 4 2 52 61 19 327	Mean Dist = 115; lllum = 9%	Hourly OSB = -14.16%
Prediction of 2023 Mar 7.8	EWOC = 69.81"	EWOC = 69.81"
Reliable 0.5 (good)	JPL4210-1973-2023-Mar-04	Shown errors

2023.03.09

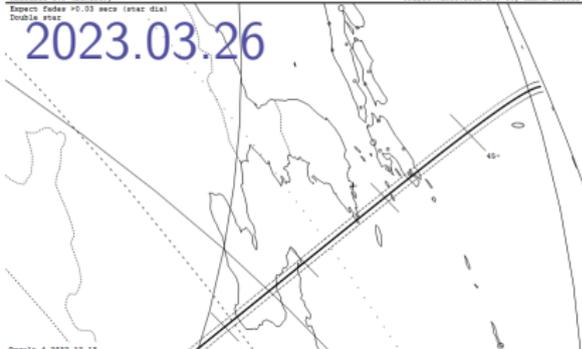


Occult 4.2023.1.9

98943 2001 CC21 occults HIP 10366 on 2023 Mar 26 from 11h 44m to 12h 26m UT

Star: (Mag = 2.4 mag)	Durations: Max = 0.18 secs	Azimuth:
Mr 5.1; Mr 5.7; Mr 5.0	lrm = 0.28 secs; lmas = 0.024 secs	Mag = 19.0
SA = 2 10 39.1339 (astrometric)	Mag Disp: 3.7 [100%]; 14.2 [100%]	RA = 0 60 40.00hm, 6.3 mas
Dec = 61 3 53.056	Star Dist = 64; lllum = 29%	Parallax = 61.668"
Inf Date: 2 10 39 61 19 247	Mean Dist = 24; lllum = 29%	Hourly OSB = -14.51%
Prediction of 2022 Dec 18.7	EWOC = 69.81"	EWOC = 69.81"
Reliable 3.7 (uncertain)	JPL4167-1973-2022-Nov-05	Shown errors

2023.03.26



Occult 4.2022.12.13

98943 2001 CC21 掩蔽 2023.03.05

恒星

UCAC4 756-031031 11.4 等

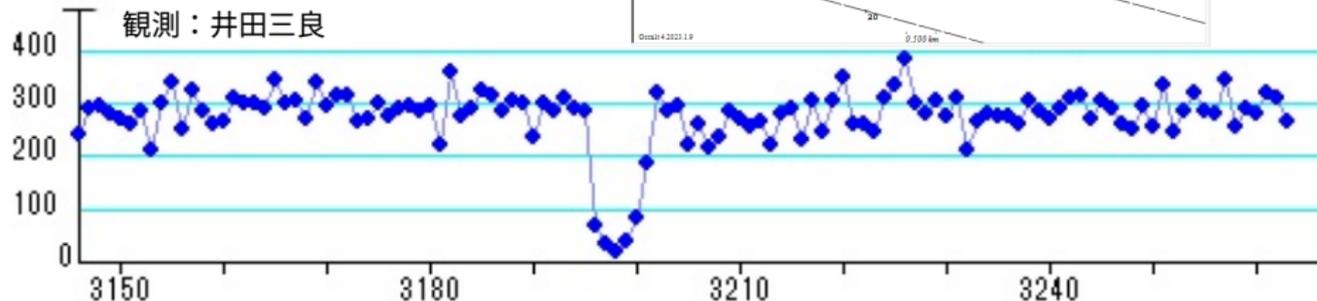
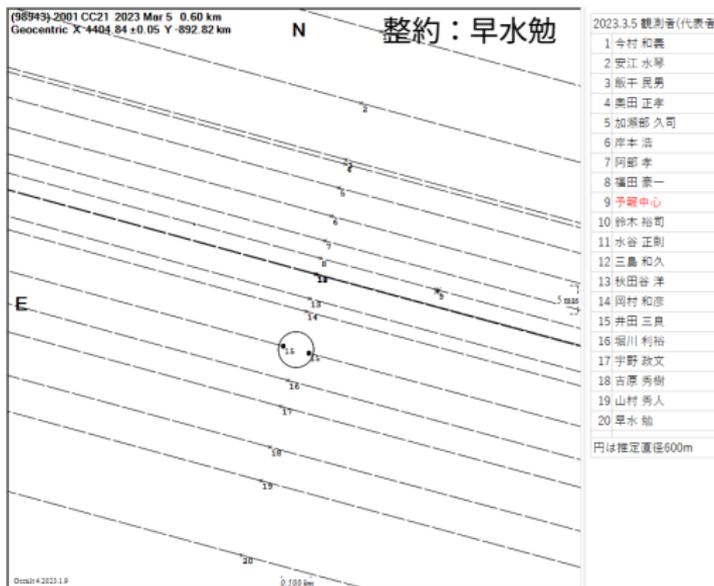
観測点

19(20) #四国地方・中国地方

1 地点で減光を観測

減光時間 ~ 0.105 秒

\Rightarrow 大きさ ~ 500 m



98943 2001 CC21 掩蔽 2023.03.26

恒星

HIP 10366 5.1 等

観測点

13(18) # 鹿児島



小惑星の形状決定を目指すも減光は観測されず

- ▶ 200m くらいの間隔で約 2.4km の幅に配置された観測点をすり抜ける... ⇒ どこへ行った？

太陽系外縁天体（海王星以遠天体）

太陽系の天体で海王星よりも外側にある天体

- ▶ エッジワース-カイパーベルト天体
- ▶ オールトの雲 ⇒ まだ観測されていない

Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)



冥王星型天体

太陽系外縁天体
かつ準惑星

- ▶ 冥王星 1930年
- ▶ エリス 2005年
- ▶ ハウメア 2004年
- ▶ マケマケ 2005年
- ▶ クワオアー 2002年

冥王星



NASA/JHU/APL/SwRI

NASA/JHU/APL/SwRI/Alex Parker

発見

1930年 C. Tombaugh

軌道半径 43.4 au

公転周期 247.7 年

軌道離心率 0.25

軌道傾斜角 17.1 度

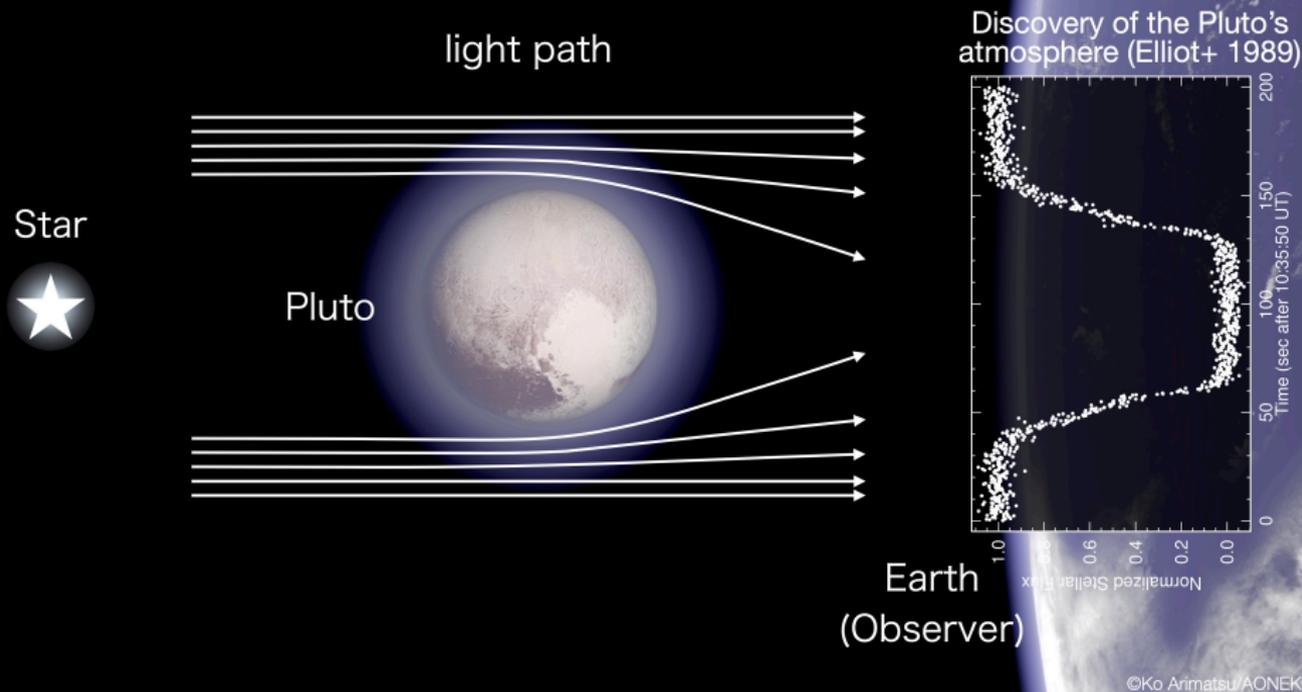
質量 1.3×10^{22} kg

半径 1185 km

表面の氷

N₂, CO, CH₄, C₂H₆

冥王星大気の発見 1985年



冥王星による恒星の掩蔽を観測

- ▶ 大気によって屈折した光が観測される

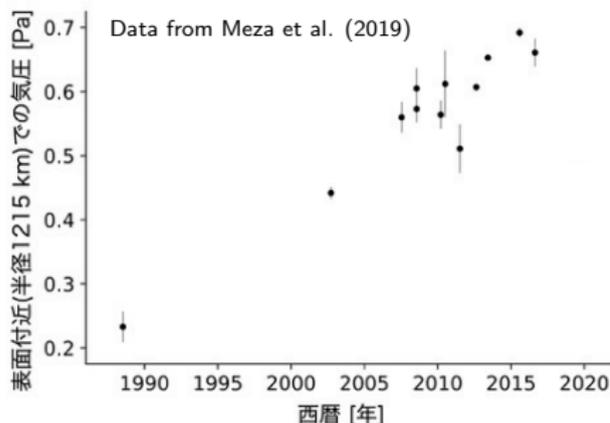
冥王星大気量の時間変化

恒星掩蔽を用いた観測

- ▶ 30年間で約3倍に増加
(Meza et al. 2019)

冥王星大気の起源

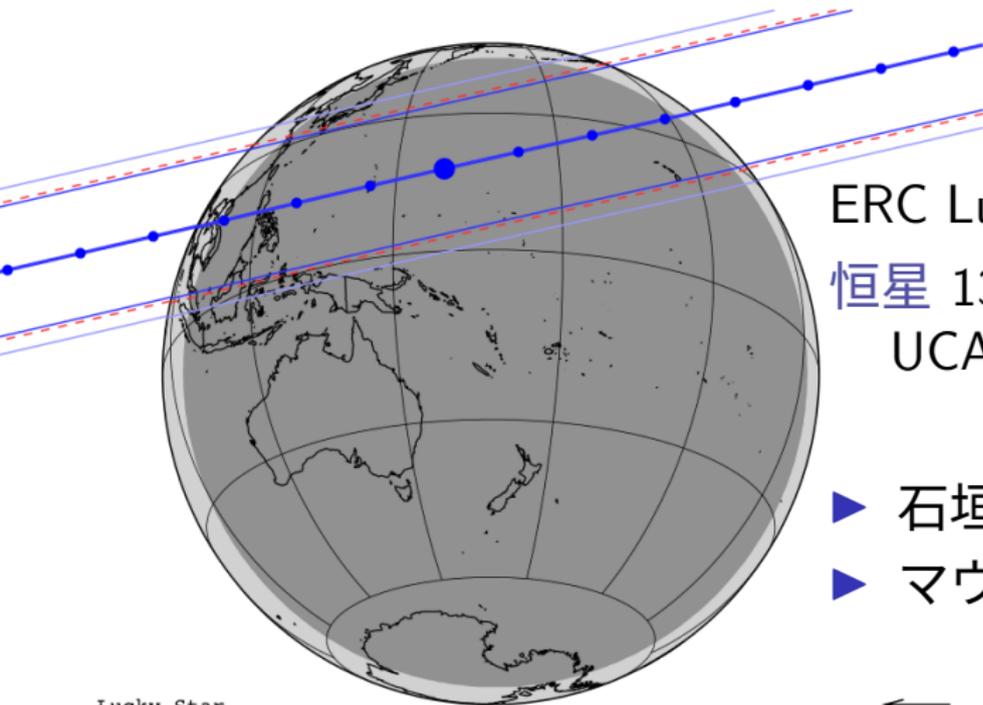
- ▶ 地表にある N_2 氷の昇華
大気圧 \sim 飽和蒸気圧
- ▶ 離心率の大きい公転軌道
太陽に近づく \Rightarrow 温度上昇 \Rightarrow 大気圧増加
太陽から遠のく \Rightarrow 温度低下 \Rightarrow 大気圧減少
- ▶ 前回近日点通過 1984年12月
太陽から遠ざかっているのに大気圧は増加？



冥王星 掩蔽 2019.07.17

Pluto, GAIADR2+pmGAIADR2, NIMAv8PLU055

Offset: 0.0mas 0.0mas



ERC Lucky Star project

恒星 13.0 等

UCAC5 340-173206

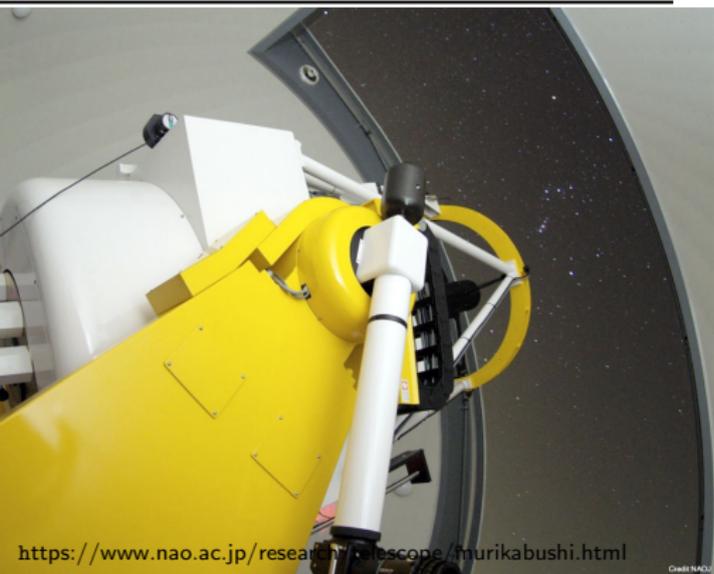
- ▶ 石垣島
- ▶ マウイ島

Lucky Star



yyyy mm dd hh:mm:ss.s	RA_star_J2000	DE_star_J2000	C/A	P/A	vel	Delta	G*	RP*	H*
2019-07-17 12:45:03.5	19 33 26.0127	-22 07 58.419	0.170	347.10	-24.18	32.8254	13.2	12.5	11.0

石垣島+マウイ島



むりかぶし望遠鏡

▶ $D=105\text{cm}$, $f=12600\text{mm}$

CMOS カメラ

▶ ZWO ASI1600MM



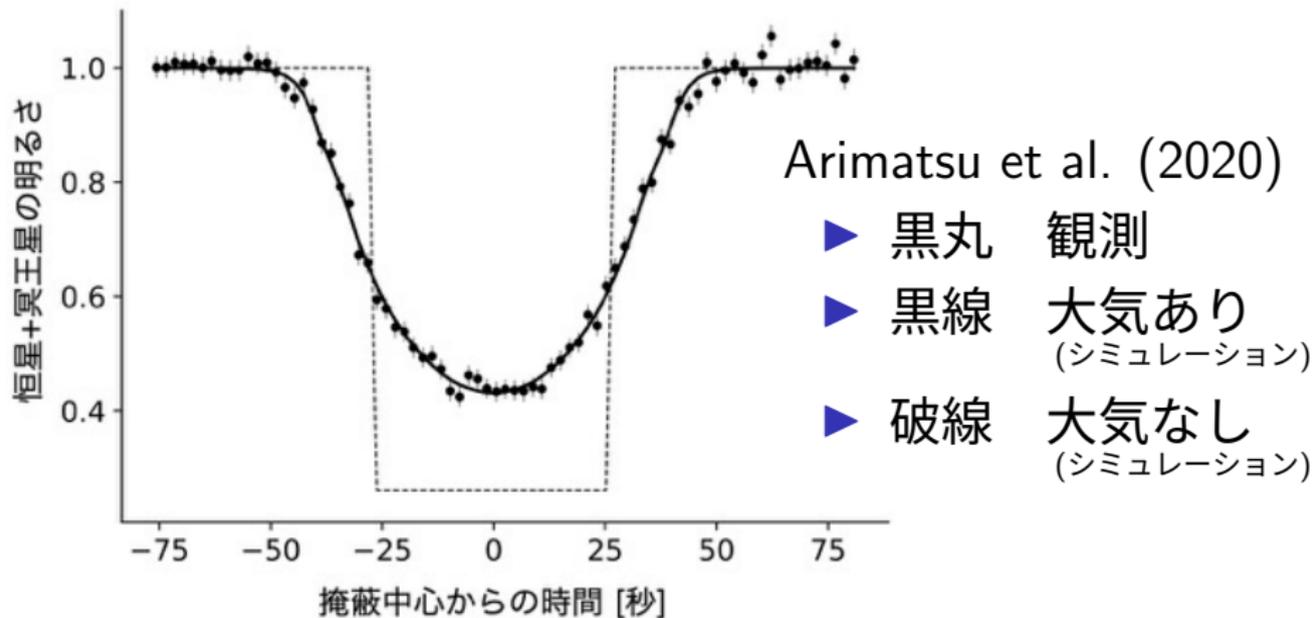
東北大学ハレアカラ T60

▶ $D=60\text{cm}$, $f=14400\text{mm}$

CMOS カメラ

▶ ZWO ASI178MM

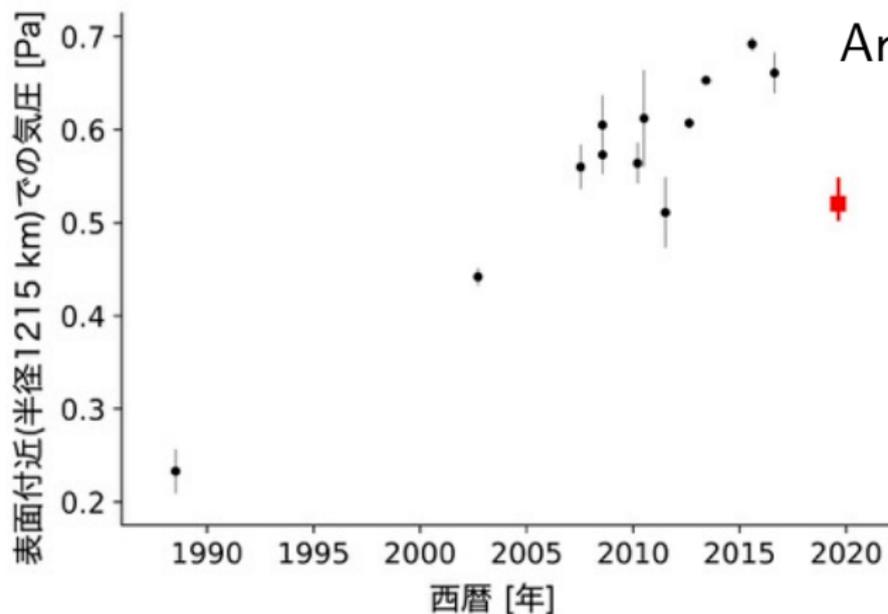
ハレアカラで観測された明るさ変化



大気モデルを用いて明るさ変化を再現する大気圧を探す

⇒ 冥王星の大気圧 $5.2^{+0.28}_{-0.19} \mu\text{bar}$

冥王星大気量の時間変化



- ▶ 1985-2016 の約 30 年間はほぼ単調な増加だったが、
- ▶ 冥王星の大気は増加から減少に転じた？

急激な減少

- ▶ 前回 (2016.07) の観測から約 20% 減少
- ▶ 1 年につき約 7% 減
⇒ 約 10 年後に消失？

なぜ減り始めたのか？

- ▶ 前回近日点通過
1984 年 12 月
- ▶ 表面の模様と関係？
Bertrand and Forge (2016)

RESEARCH HIGHLIGHT | 03 July 2020

Goodbye, Pluto's atmosphere

The gases that envelop the distant dwarf planet might finally be freezing out and falling to the surface.



Pluto's thin atmosphere (blue) has experienced an unexpected drop in pressure since it was measured previously, a few years ago. Credit: NASA/JHUAPL/SwRI

冥王星表面の様子が重要？

画像：有松亘



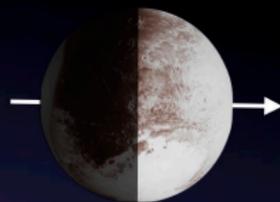
1994, $L_s = 15^\circ$



2002, $L_s = 34^\circ$



2015, $L_s = 63^\circ$



2030, $L_s = 91^\circ$

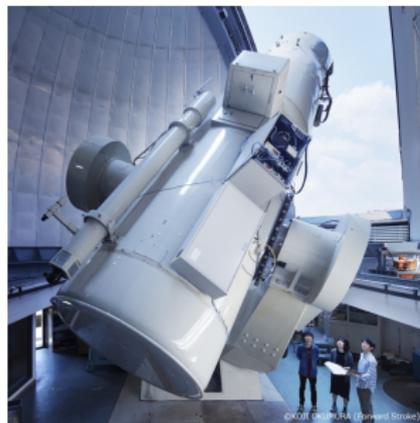
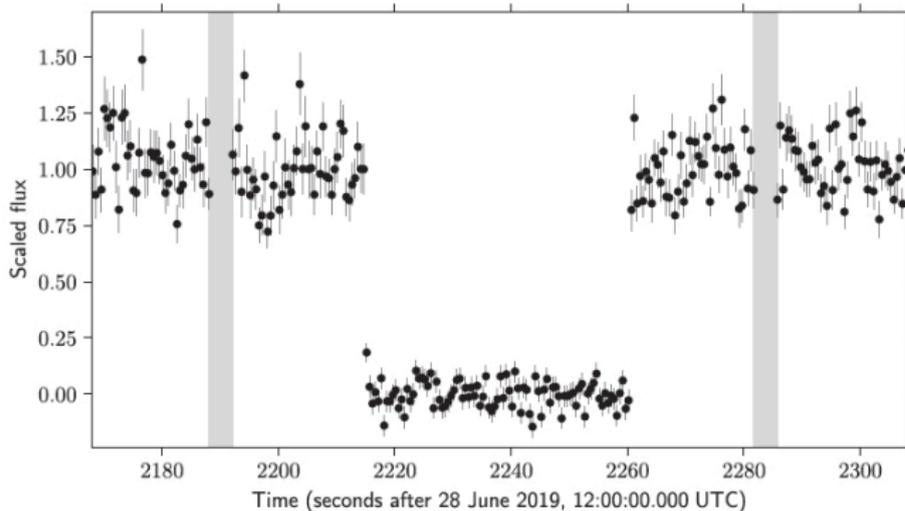
自转轴傾斜角 $120^\circ \Rightarrow$ 横倒しに近い

- ▶ 季節によって太陽光が入射する緯度帯が大きく変化

表面の様相

- ▶ 地域によって表面にある氷の組成が異なる
- ▶ トンボー地域：明るい(反射率大)ハート型の領域
 - 西側：スプートニク平原, N_2 氷で覆われた平原

クワオアー 掩蔽 2019.06.28



東京大学木曾観測所

- シュミット望遠鏡
- トモエゴゼン

準惑星 (冥王星型天体) の候補

- ▶ 軌道半径 43.7 au
- ▶ 質量 1.6×10^{21} kg
- ▶ 半径 555 km

冥王星は大気を持つが、クワオアーや他の冥王星型天体は**大気を持たない**

まとめ

掩蔽（えんぺい）

- ▶ 何かが何かを隠すこと
- ▶ 小口径の望遠鏡で深宇宙の観測ができる

小惑星の形と大きさを決める

- ▶ 小口径望遠鏡の機動力と物量で超高精度の観測
- ▶ 探査機到着後に答え合わせ♡

太陽系外縁天体の大気

- ▶ 大気の起源の謎
- ▶ 大気を持つ天体と持たない天体の違いは？