

キラキラ星を防ぐ

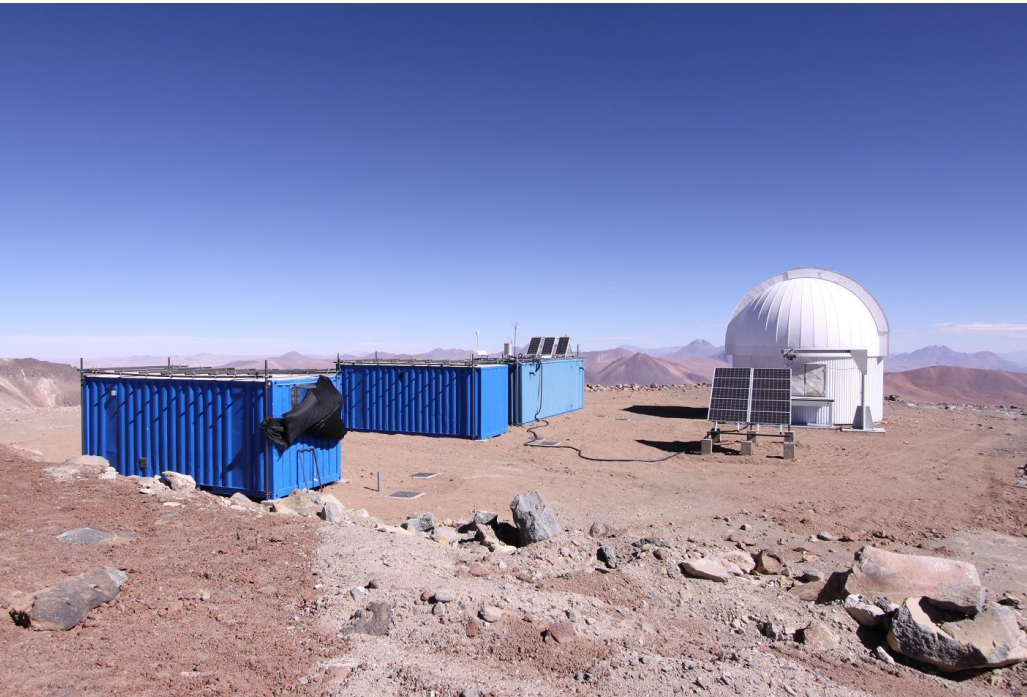
本原 顕太郎

理学系研究科・天文学教育研究センター

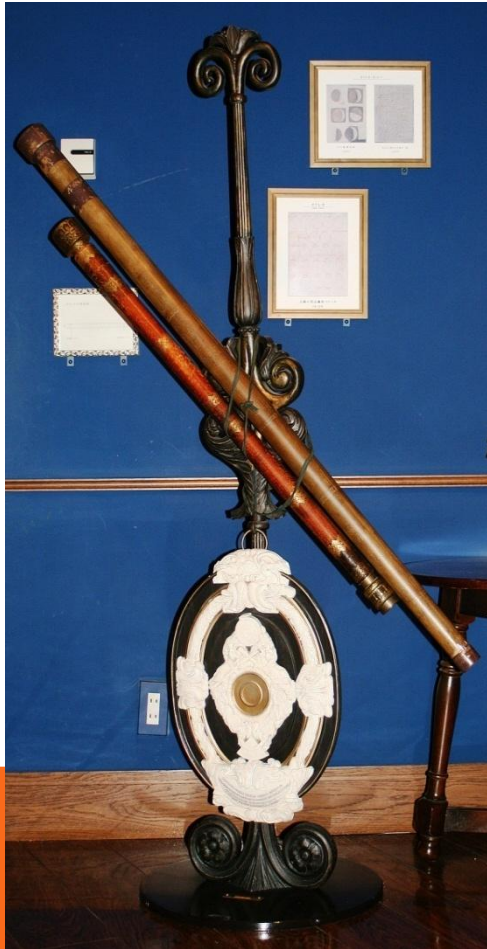
※：このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。

自己紹介

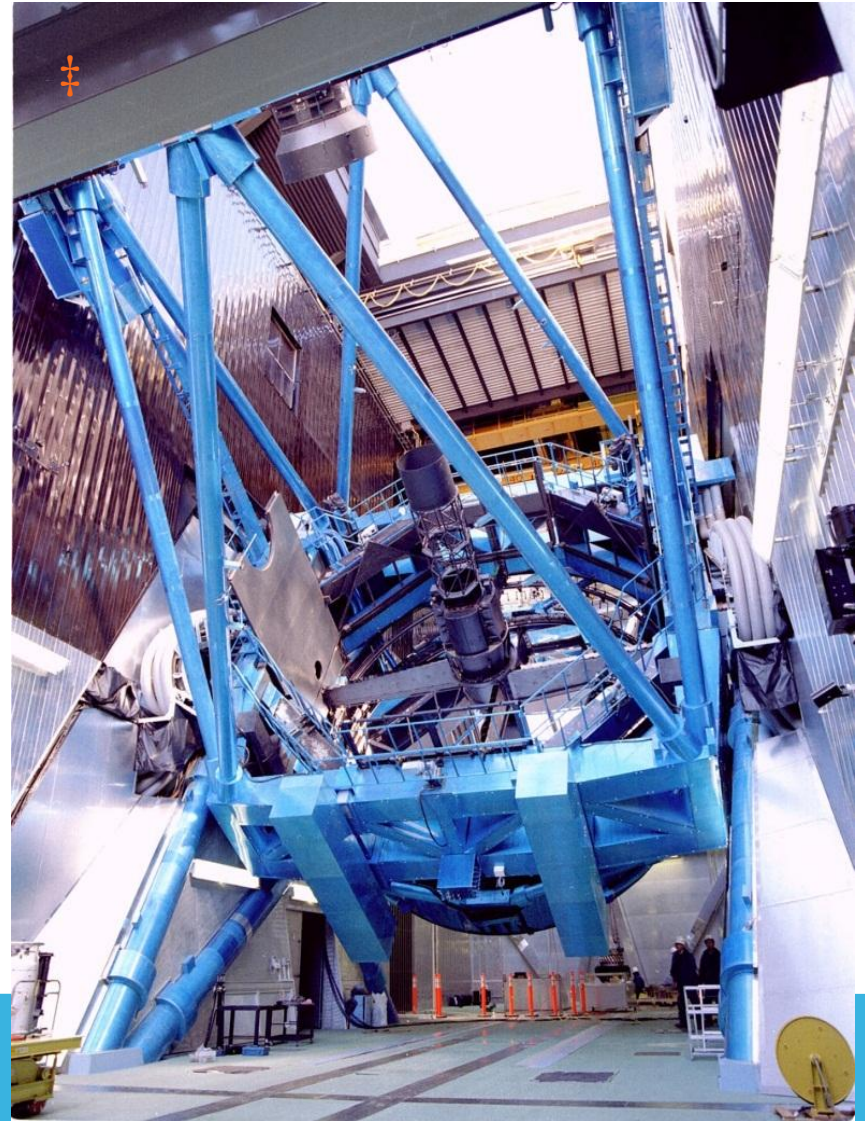
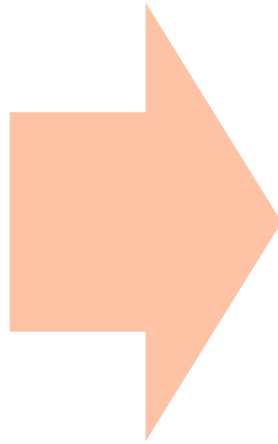
- 大学院時代は京都大学ですばる望遠鏡の赤外線カメラ開発をしていました
- 専門は赤外線観測装置開発と銀河の形成進化の研究
- 現在は…
 - 東京大学アタカマ天文台計画
: 南米チリの標高5600mの山の上に
6.5m(!)の望遠鏡を建設するプロジェクト
 - 1m望遠鏡ができて観測が始まったところ
 - 酸素吸いながら仕事してます。



巨大望遠鏡の時代



400年で...
口径で100倍以上！
集光力で1万倍以上！



✦ハワイのすばる望遠鏡

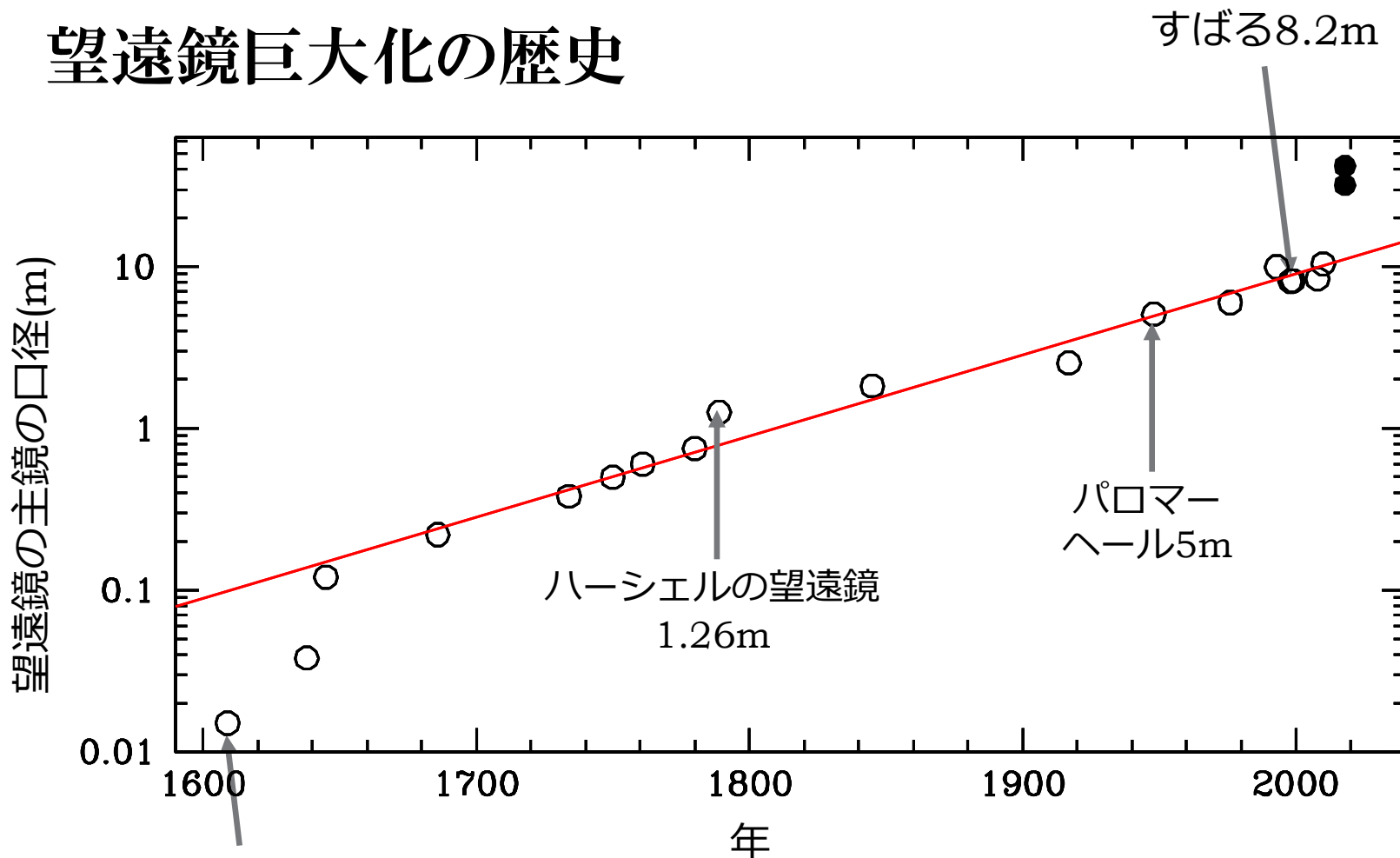
http://www.naoj.org/photo/telescope5_300.jpg

“Copyright (c) Subaru Telescope, NAOJ. All rights reserved.”

400年前のガリレオの望遠鏡

http://www.astronomy2009.jp/ja/products/telescope/galileo_telescope.html

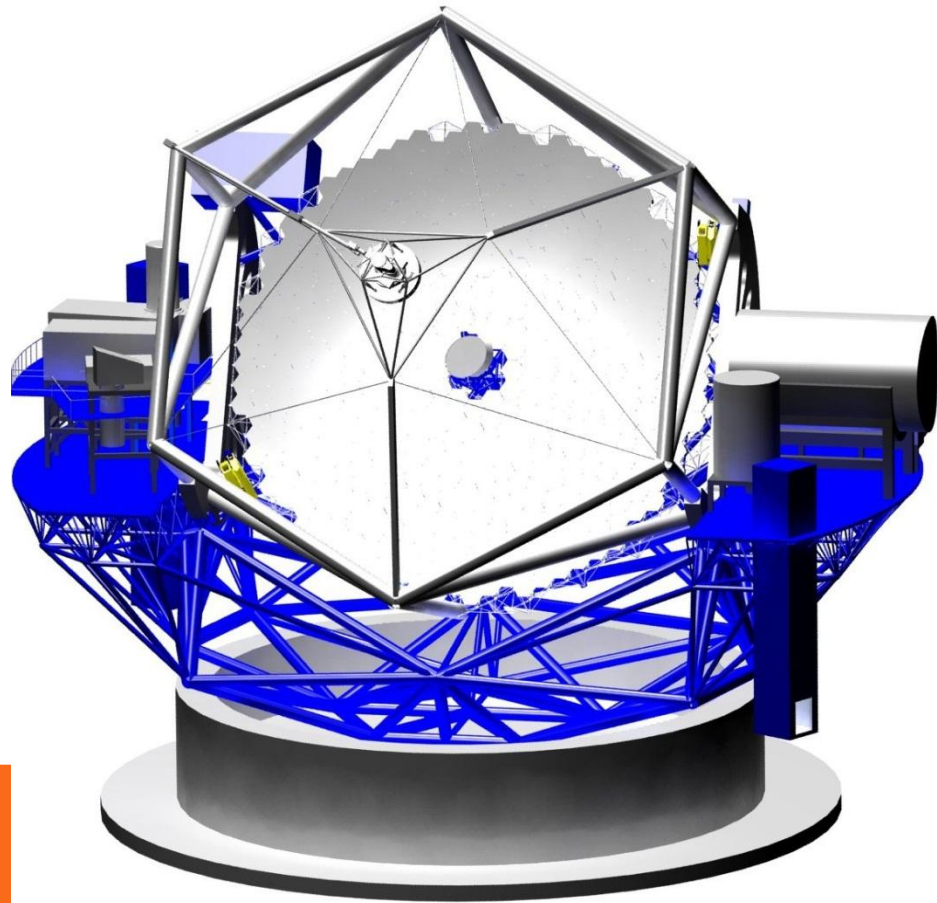
望遠鏡巨大化の歴史



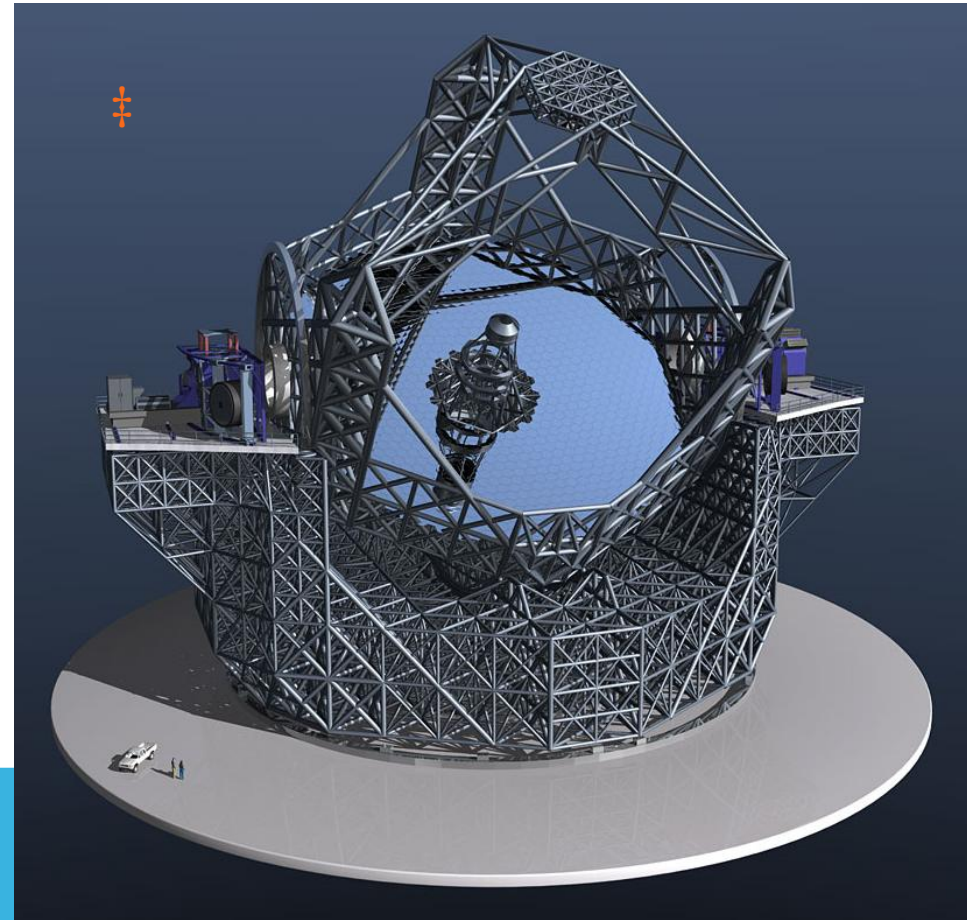
ガリレオの望遠鏡
1.5cm

望遠鏡の口径は150年で10倍に。

次世代の超巨大望遠鏡



30m望遠鏡 (TMT)
30m主鏡
<http://www.tmt.org/>



ヨーロッパ超大型望遠鏡(E-ELT)
42m主鏡
<http://www.eso.org/sci/facilities/eelt/>

VLT : 8M望遠鏡4台 = 16M相当の集光力



http://www.eso.org/public/images/paranal_11-nov1999/

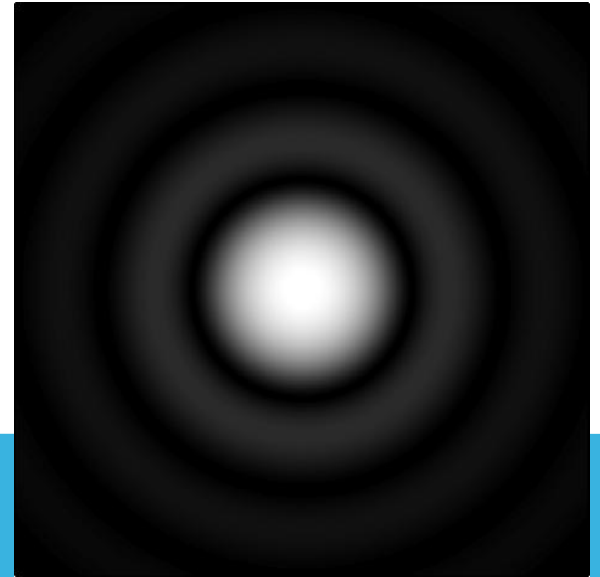
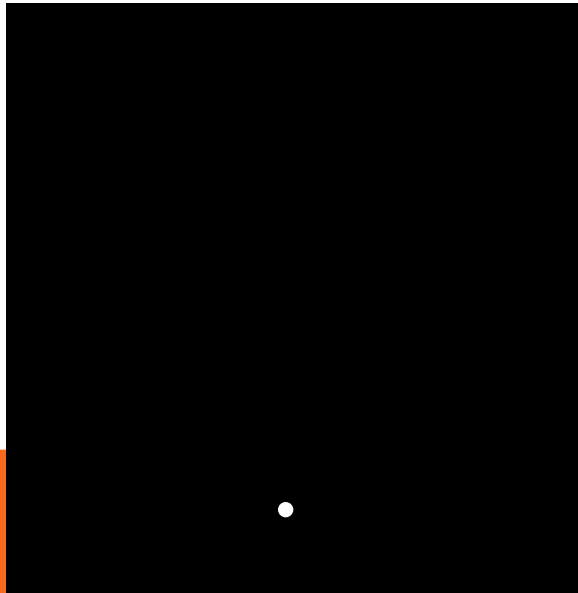
大きな望遠鏡

暗い天体を見ることができる

望遠鏡の口径の自乗（面積）に比例して暗いものが見ることができる

細かい構造を見ることができる：光の回折

望遠鏡の口径に反比例して像の“ボケ”が小さくなる。
光の波長に比例して像の“ボケ”が大きくなる。



著作権情報：Wikipedia

at(http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Diffraction_disc_calculated.png)

すばる望遠鏡 vs ハッブル宇宙望遠鏡(HST)



すばる：口径8.5m

分解能0.015秒角 (可視光で)

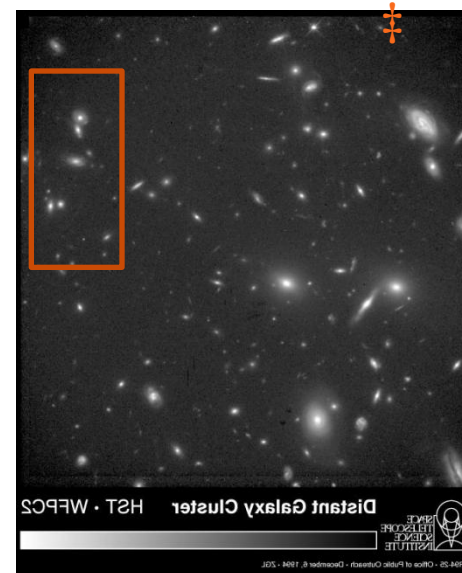
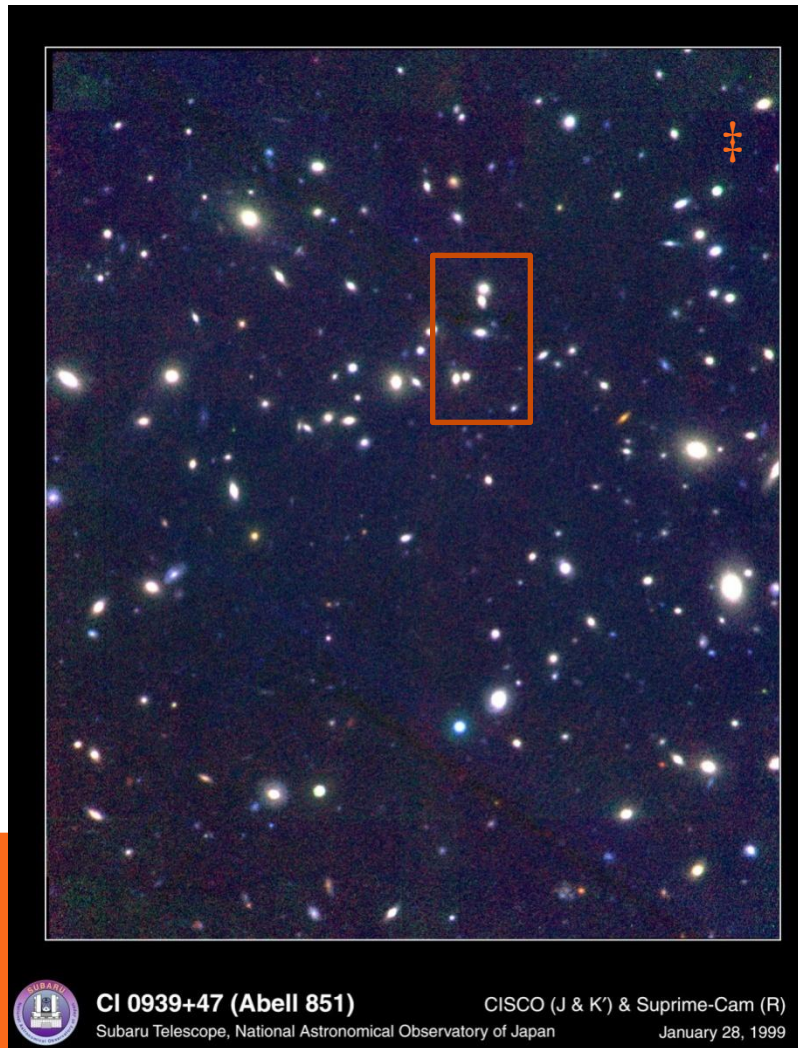
HST：口径1.5m

分解能0.083秒角

Copyright(c) STScI

Copyright (c) Subaru Telescope, NAOJ. All rights reserved.

それでは、比較してみましょう。



<http://hubblesite.org/gallery/album/entire/pr1994052d/>
Copyright(c) STScI

すばる、完敗！



すばる：口径8.5m
分解能0.4秒角



HST：口径1.5m
分解能0.1秒角
Copyright :STScI

地球の大気が邪魔をする。



ISS002E9767 2001/08/08 21:59:15

大気の陽炎

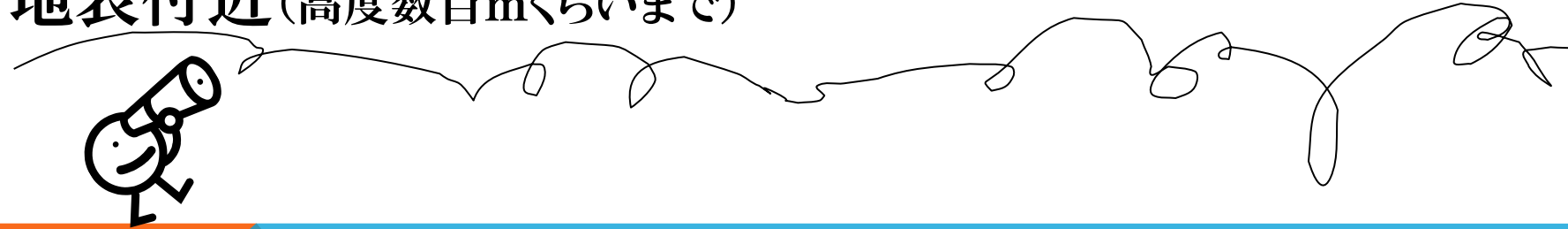


大気乱流の塊(密度が違う)が望遠鏡の鏡の上を通過する

成層圏付近(高度10kmくらい)



地表付近(高度数百mくらいまで)



キラキラ星の正体：陽炎



著作権情報：

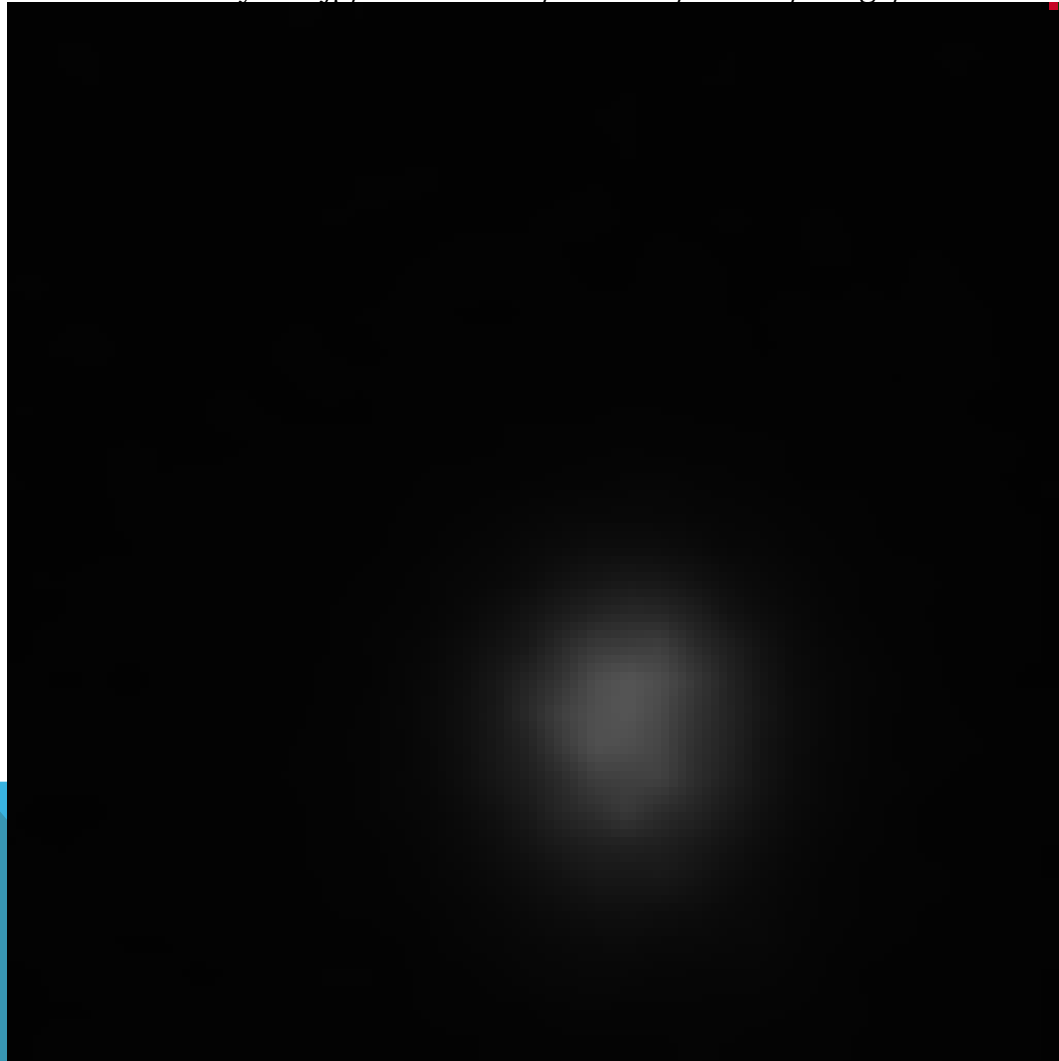
Wikipedia

at (http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Usairways_a330-300_n278ay_lands_arp.jpg)

“シーイング”の実際

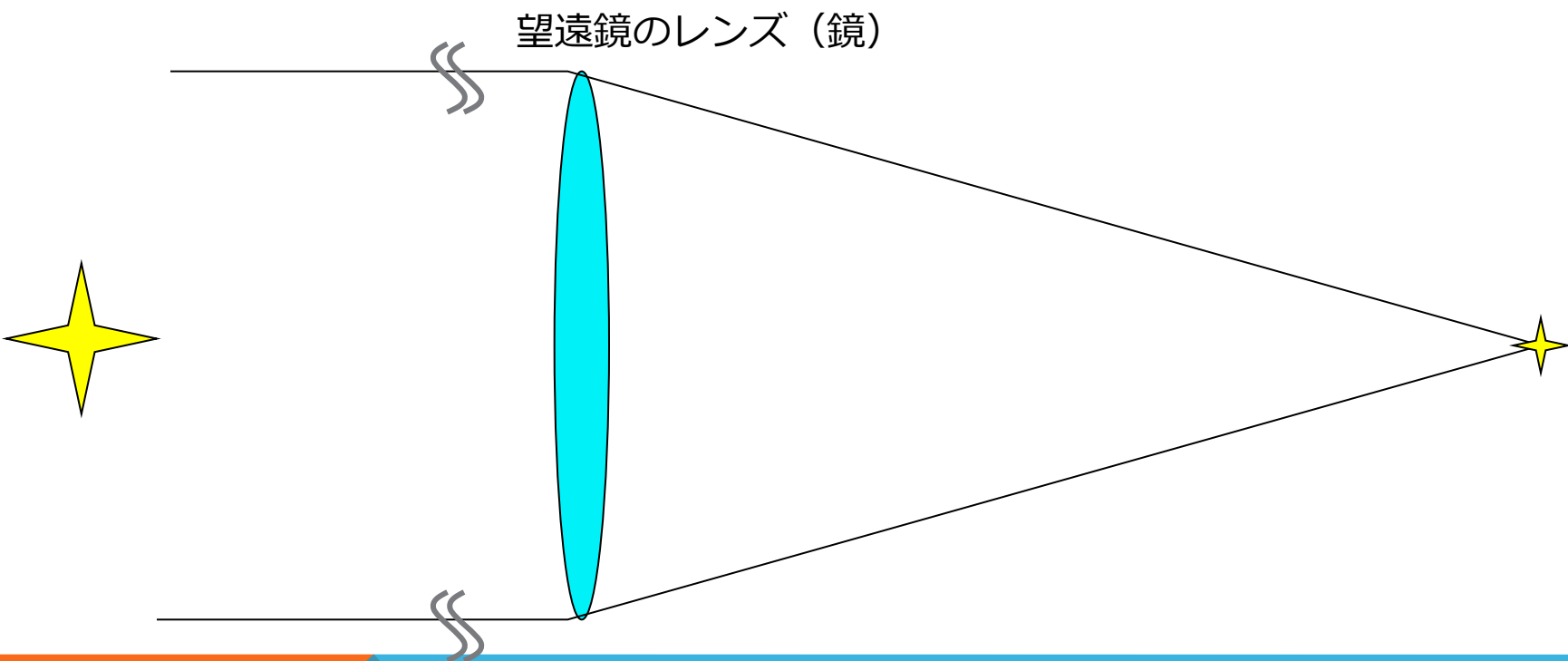
国立天文台三鷹で2 μ mの赤外線で見た星

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/old2005/CISCO/image/blockscan.html>



長時間露出すると、ぼやけて見える。

大気の乱流



大型望遠鏡の構造



副鏡を取りつける位置
Position of Secondary Mirror

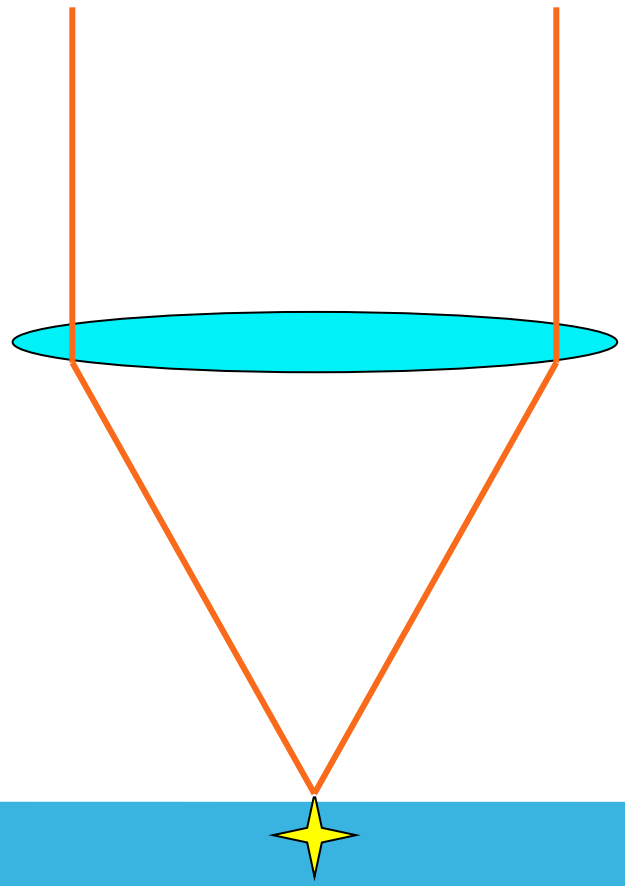
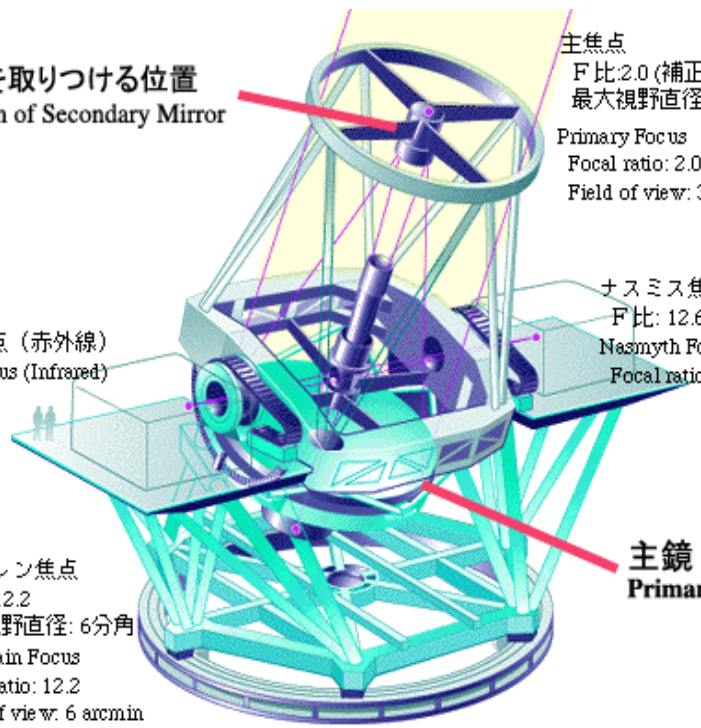
主焦点
F比: 2.0 (補正レンズ込み)
最大視野直径: 30分角
Primary Focus
Focal ratio: 2.0 (with corrector)
Field of view: 30 arcmin

ナスミス焦点 (可視光)
F比: 12.6
Nasmyth Focus (Optical)
Focal ratio: 12.6

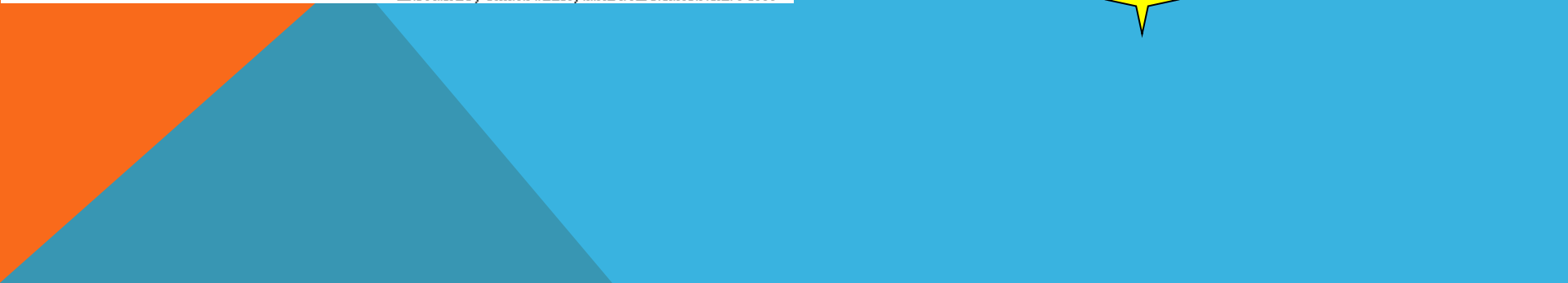
ナスミス焦点 (赤外線)
Nasmyth Focus (Infrared)

カセグレン焦点
F比: 12.2
最大視野直径: 6分角
Cassegrain Focus
Focal ratio: 12.2
Field of view: 6 arcmin

主鏡
Primary Mirror

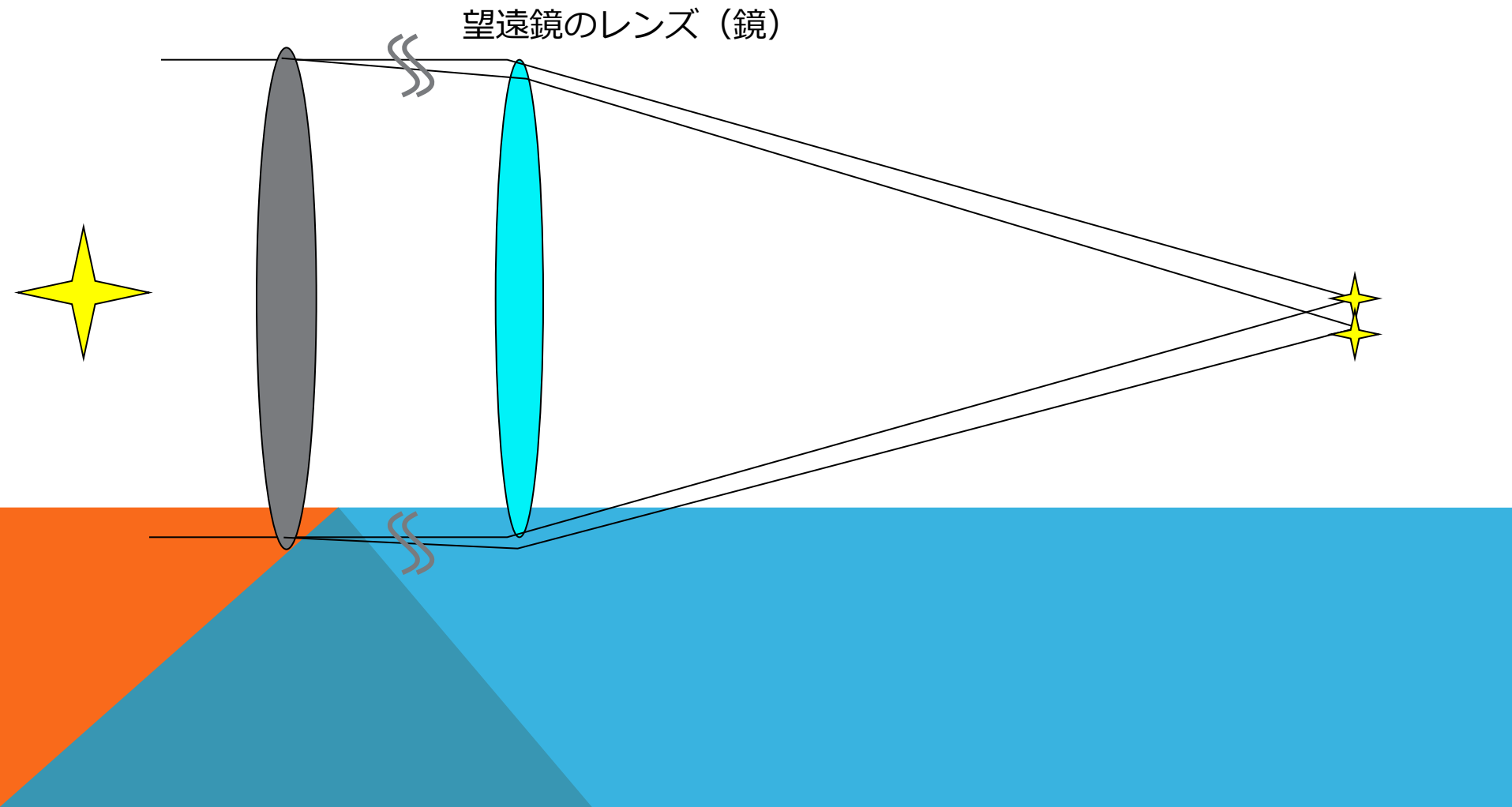


遠藤孝悦・画 日経サイエンス1996年2月号より
Illustration by Takaetsu Endo, taken from Nikkei Science 1996



大気の乱流1：像の揺れ

密度の違う大気の塊が望遠鏡の鏡の上を通過すると、その塊で屈折が起きて光の方向が曲げられる。



Tip-tilt : 手ぶれ防止機構



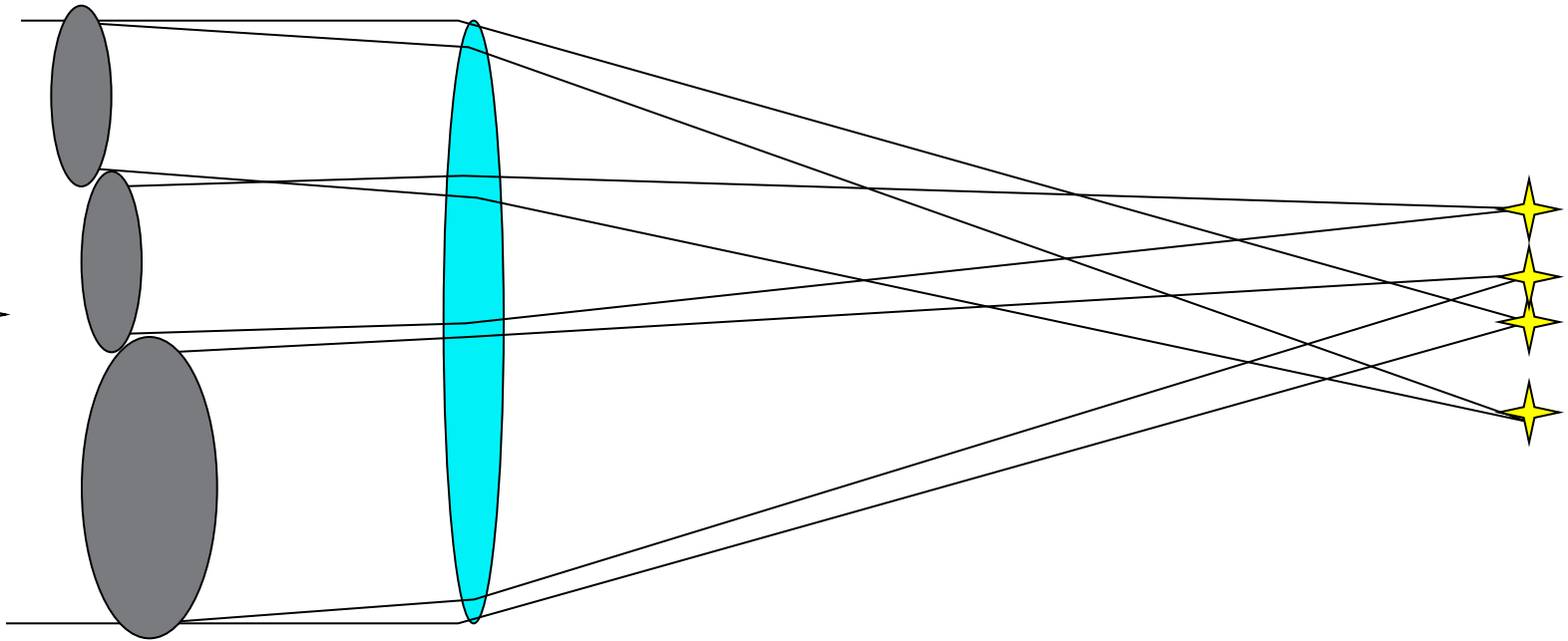
英国赤外線4m望遠鏡(UKIRT)の
30cmティップティルト副鏡

<http://www.mpia-hd.mpg.de/UKIRT/>

※：画像使用許諾の問合せを行ったが、プロジェクトの閉鎖に伴い連絡をとることができなかった。

大気の乱流2：像の分裂

- 乱流の塊のサイズはハワイ・マウナケアで20センチくらい（可視光）
- 大気乱流の**フリード長(Fried length)**と呼ぶ。
- 波長にほぼ比例する：赤外線 $2\mu\text{m}$ だと1m位になる。



それぞれの塊で曲がった光(乱された波面)を元に戻せば良い！

補償光学(Adaptive Optics)

歴史

1953年 バブコック (米) により考案される

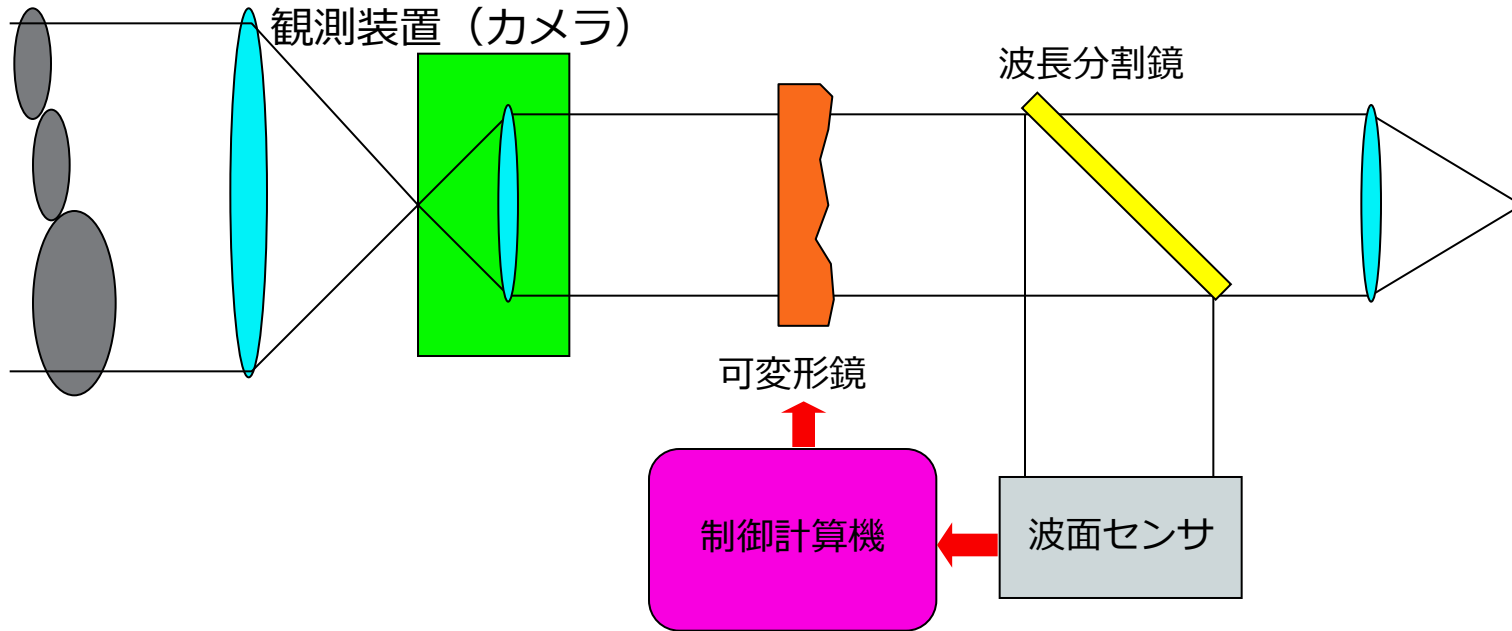
1970年代 軍事衛星監視用に実用化された(らしい)

1980年代 天文学用途で実用化

1990年代 欧米の4mクラスの望遠鏡で科学的観測が始まった

補償光学の原理

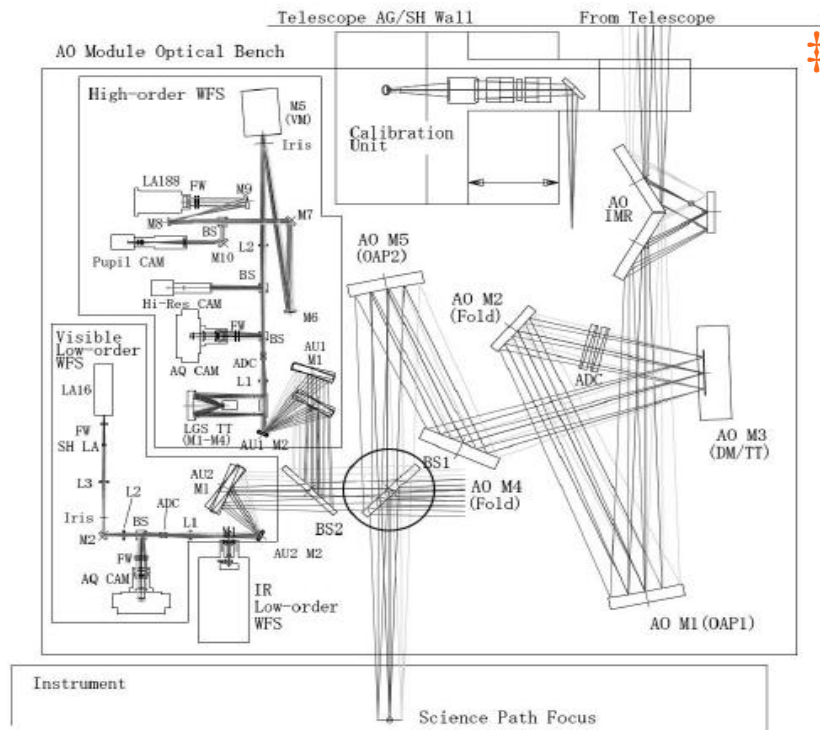
乱れた波面を元に戻す。



すばる望遠鏡の新補償光学システム

2006年より観測開始

188素子 ⇒ 60cmくらいのサイズの乱流まで補正できる



著作権情報：

右：Minowa et al., Proceedings of SPIE, Vol. 7015, 701561 (2008)

左：<http://www.naoj.org/Pressrelease/2006/11/20/fig4.jpg>

“Copyright (c) Subaru Telescope, NAOJ. All rights reserved.”

補償光学の技術

可変形鏡

圧電素子（ピエゾ）を使った物が主流



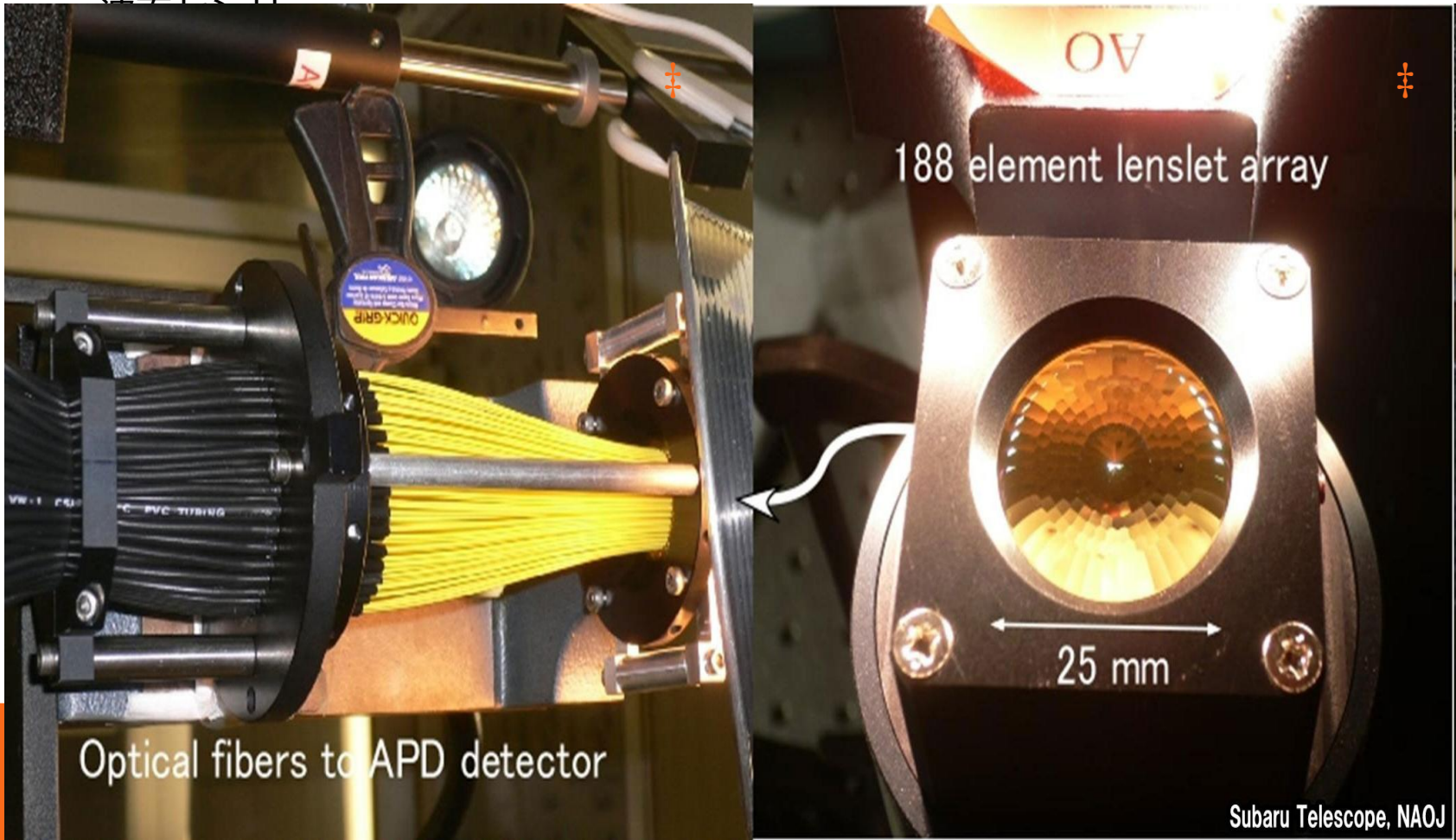
Bimorph deformable mirror

Number:	188
Effective:	90 mm
Blank Size:	130 mm
Manufacture:	CILAS



DM electrode pattern

補償光学の技術

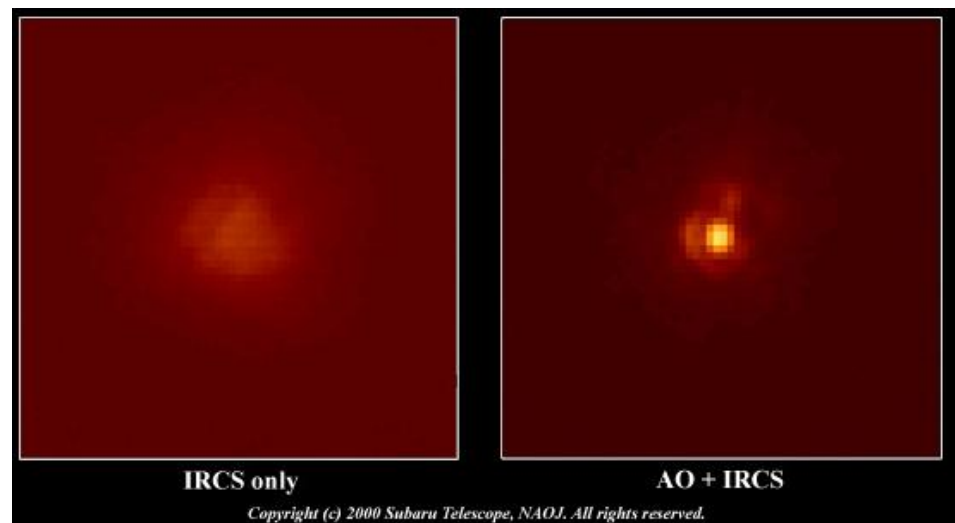


“Copyright (c) Subaru Telescope, NAOJ. All rights reserved. “
http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/11/20/j_index.html

補償光学の威力

細かい構造をみることができる

暗い天体まで見ることができる

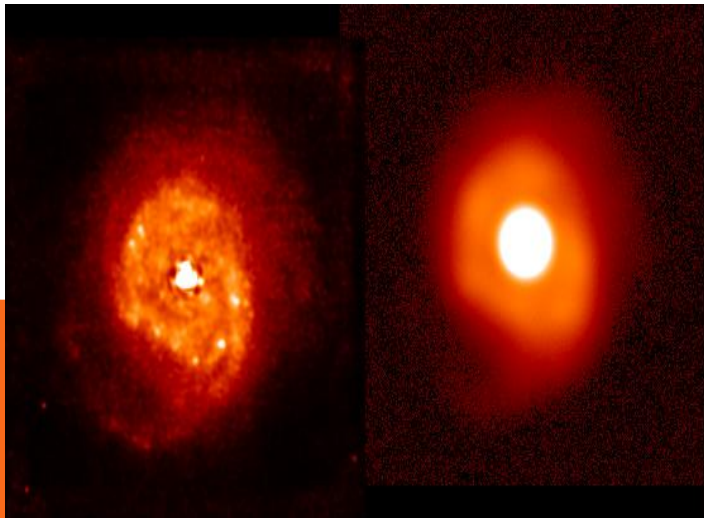


出典情報： “Copyright (c) Subaru Telescope, NAOJ. Allrights reserved.

”

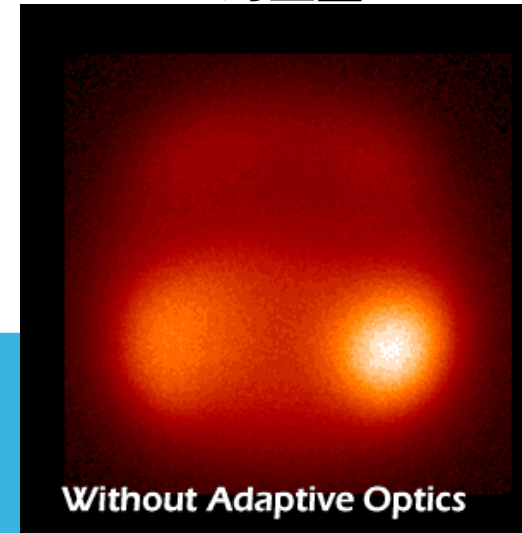
(<http://www.naoj.org/Pressrelease/2000/12/02/AO.jpg>)

スターバースト銀河
NGC7469



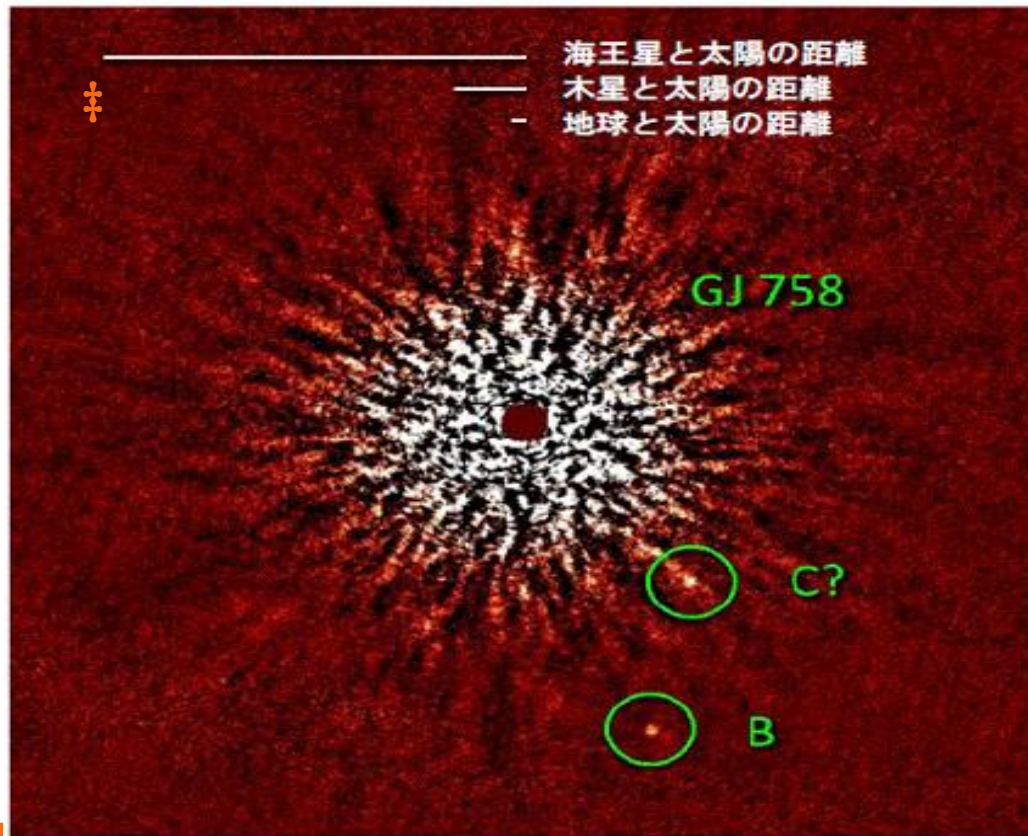
出典情報： University of California Observatories
(<http://www.ucolick.org/~max/289C/neptune.gif>)

海王星



出典情報： The CFHT Adaptive Optics Bonnette
(http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Imaging/AOB/best_pictures.html)

太陽系以外の惑星



すばる望遠鏡の新観測装置 HiCIAOで発見された惑星

“Copyright (c) Subaru Telescope, NAOJ. All rights reserved.”
(http://www.naoj.org/Pressrelease/2009/12/03/j_index.html)

天の川銀河の中心には 本当にブラックホールがあるの？

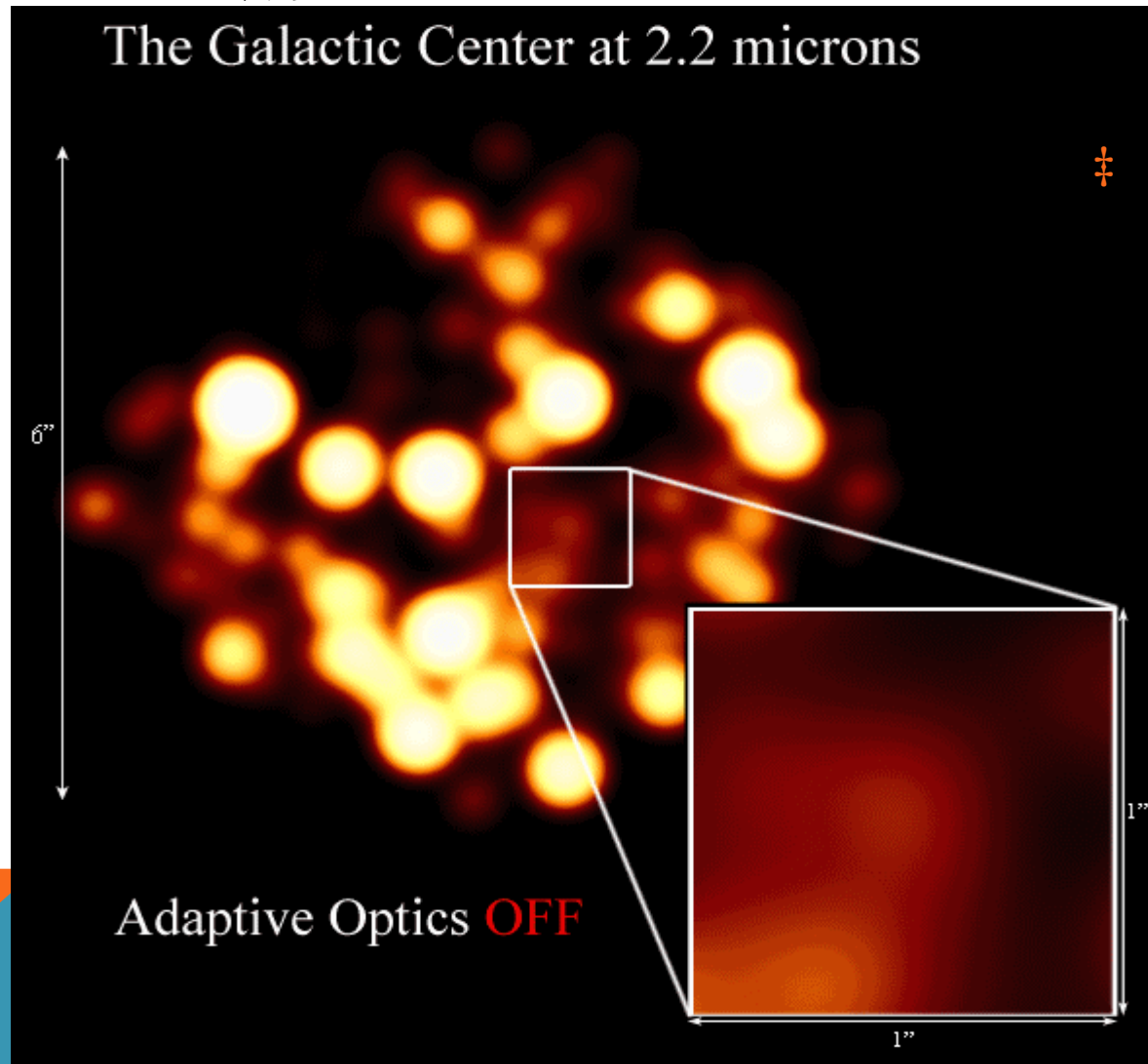


著作権情報

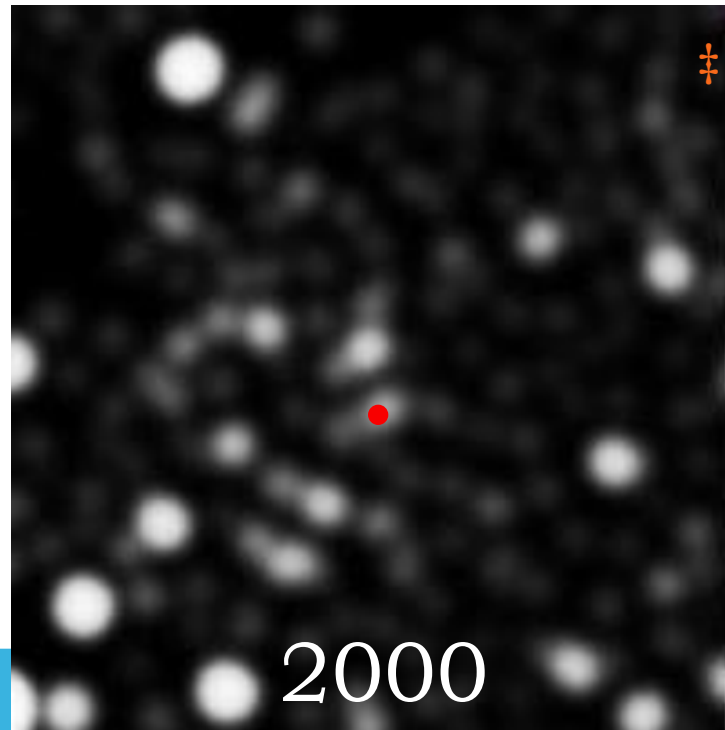
上：東京大学TAOプロジェクト

下：名大国立天文台

補償光学で分解してみた



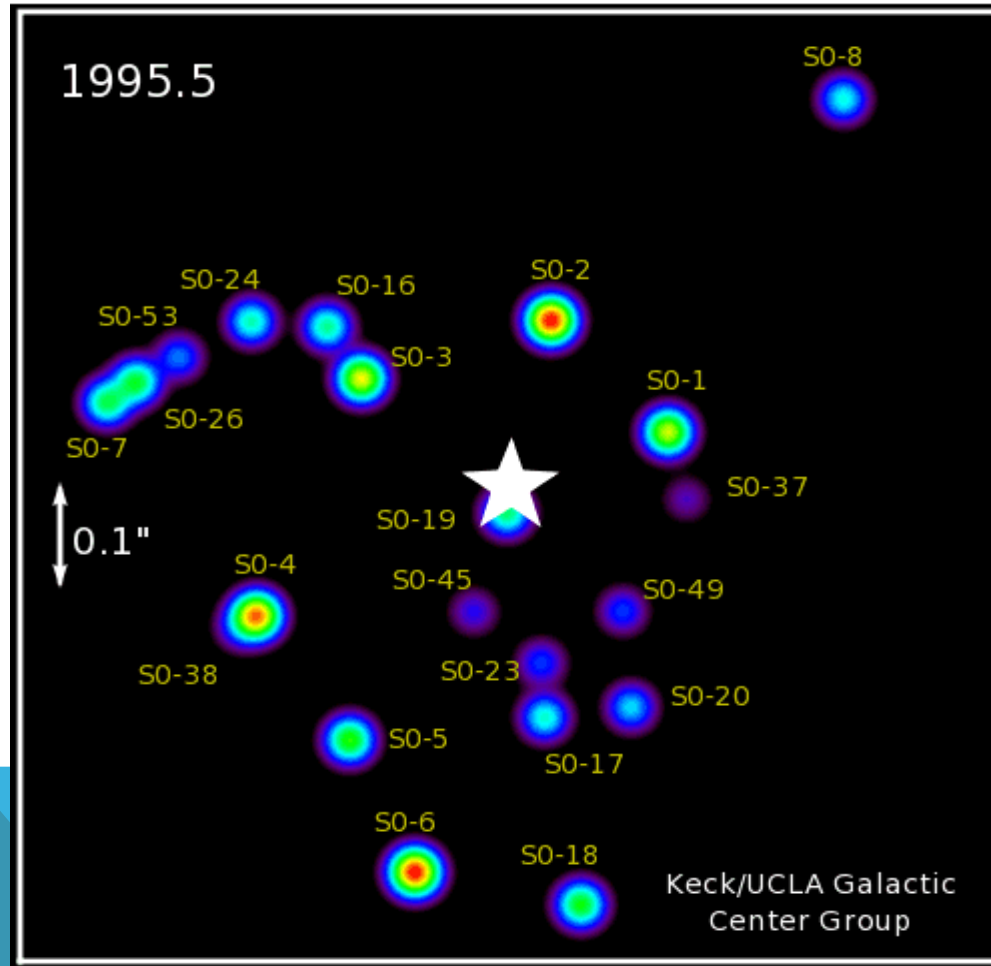
星が動いている！



"Image courtesy
Max-Planck-Institute for extraterrestrial Physics, Garching,
Germany"
At (http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/res_mass.php?lang=en)

太陽の400万倍の質量ブラックホールがある！

星の軌道から中心にある（見えない）物体の質量がわかる。



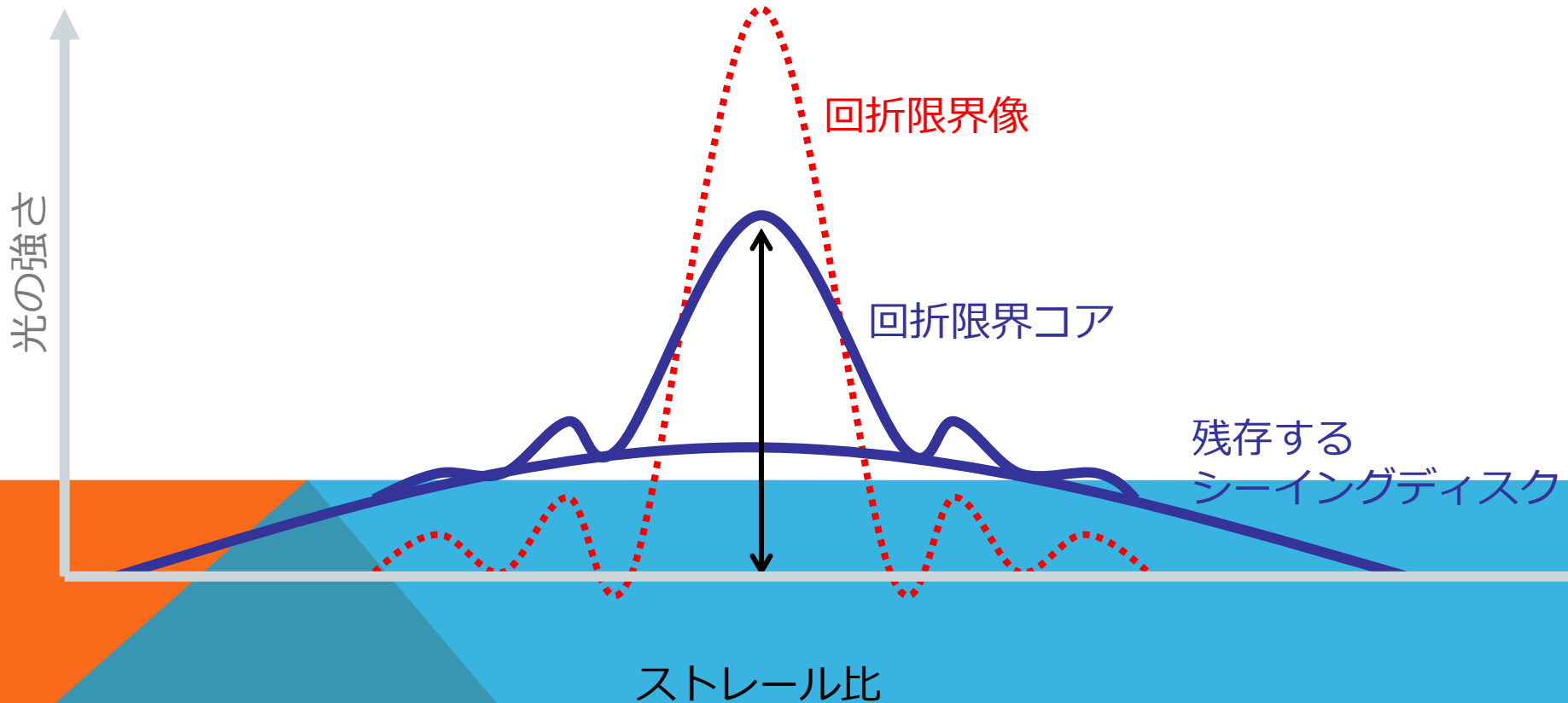
<http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/pictures/aoMovie.shtml>

補償光学の性能

どの程度補正出来ているか：ストレーン比(Strehl Ratio)

ストレーン比 1：完全な回折限界の像

すばる望遠鏡の補償光学でストレーン比0.6位（ $2\mu\text{m}$ 帯で）
いろんなサイズの乱流があるので、完全には補正できない。

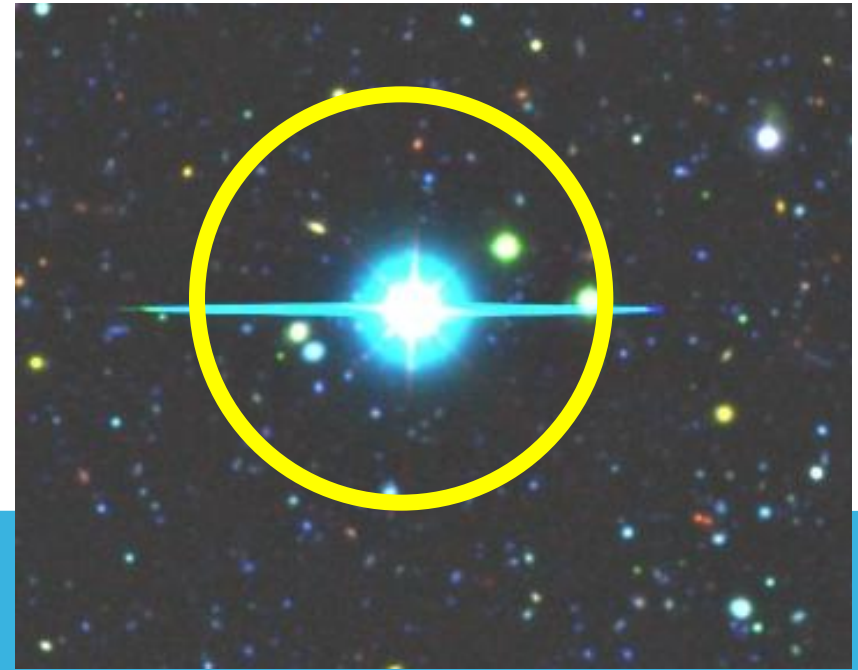
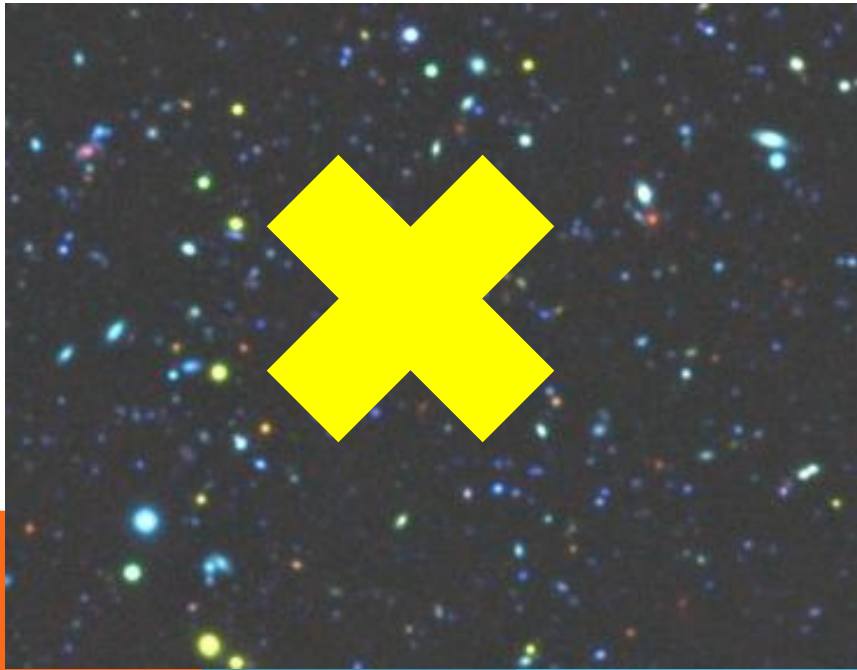


補償光学の限界 (1)

明るい星がないと動かない！

一声、15等以上の星がないといけない

観測できるのは全天の1%以下の領域だけ。(しかも星が多いところ)



著作権情報：発表者自信による撮影。

星を作ろう！

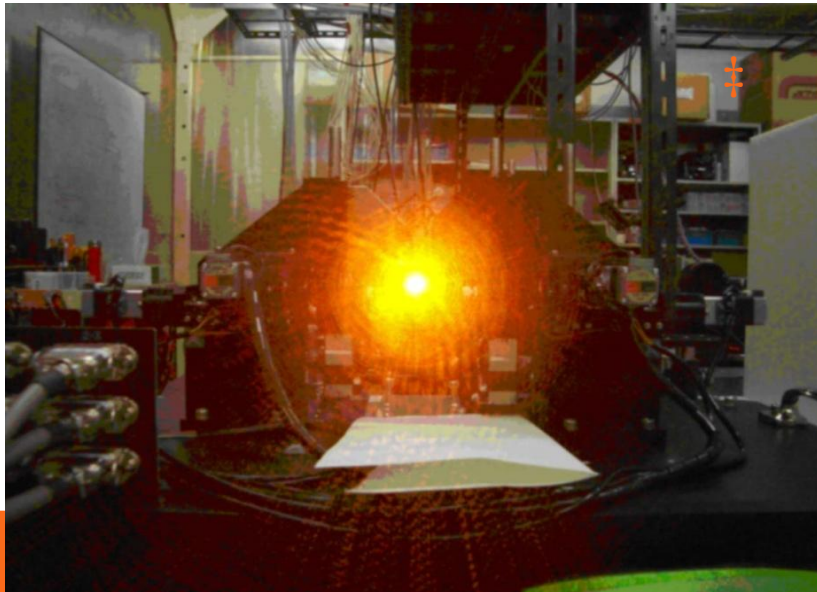


“Copyright (c) Subaru Telescope, NAOJ. All rights reserved.
<http://subarutelescope.org/Topics/2009/06/26/figure2.jpg>”

大気上層部のナトリウムを励起する

波長 $0.589\mu\text{m}$ のレーザーを照射

高度 $90 - 100\text{ km}$ 位のところにあるナトリウム層を励起する



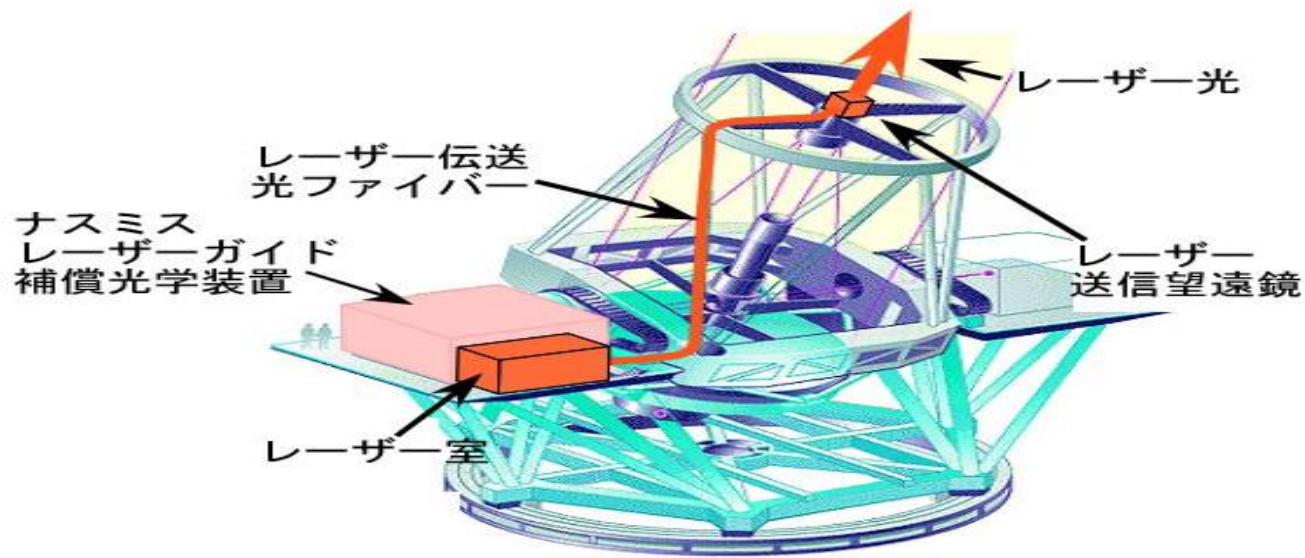
ナトリウム層

成層圏付近($\sim 10\text{ km}$)

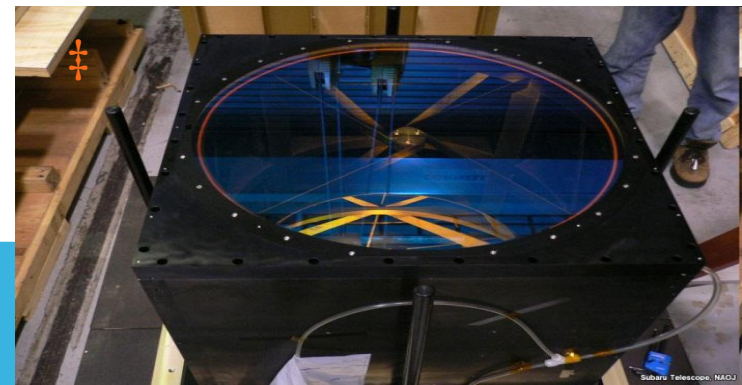
地表付近($\sim 100\text{ m}$)



レーザーガイド星



(c) 遠藤孝悦



著作権情報:

上: 日経サイエンス、1996年2月号、「遠藤孝悦・画」

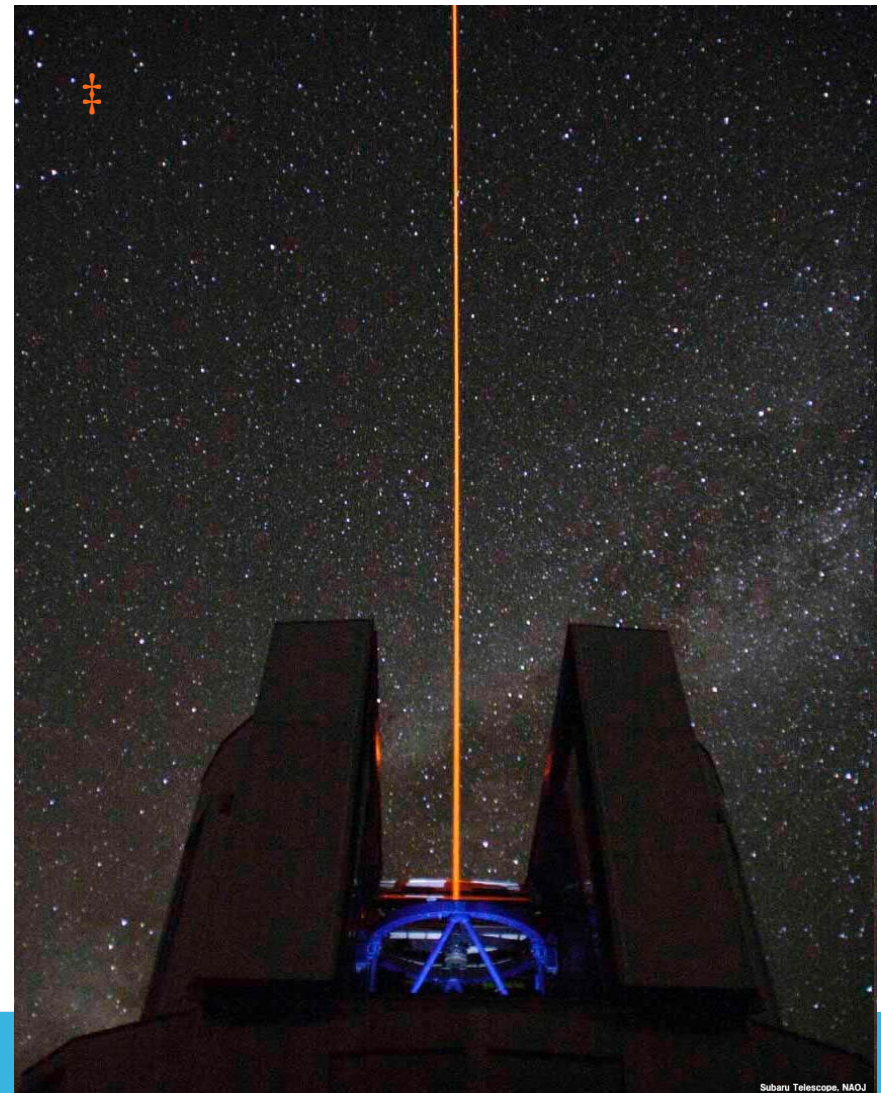
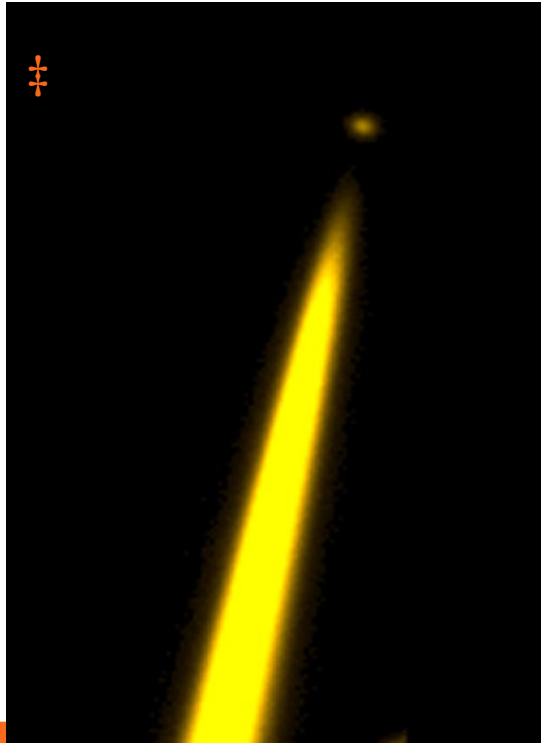
左下: “Copyright (c) Subaru Telescope, NAOJ. All rights reserved.”

右下: “Copyright (c) Subaru Telescope, NAOJ. All rights reserved.”

at (http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/11/20/j_index.html)

レーザーガイド星

4 Wのレーザーで12等級くらいの星
ができる



すばる望遠鏡でのレーザーガイド星試験

“Copyright (c) Subaru Telescope, NAOJ. All rights reserved.”

<http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/11/20/>

ウィリアム・ハーシェル3 m望遠鏡で撃ったレーザーガイド星
<http://www.ing.iac.es/PR/AR1999/chap299.html>

補償光学の限界 (2)

赤外線でしか効果がない！

現在の8-10m望遠鏡の補償光学は赤外線 1-2 μm 帯での観測が主
可視光 0.5 μm では効果が非常に小さい

可視ではフリード長が小さい (~20cm) \Leftrightarrow 赤外線 2 μm 帯だと1mくらい

\Rightarrow 波面を補正するサイズが細かい

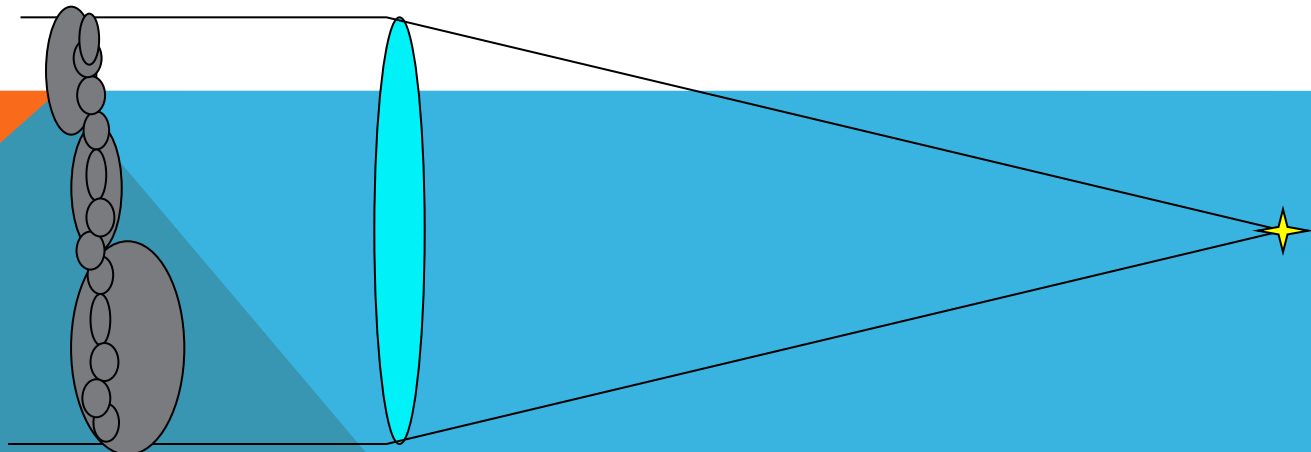
波面測定点、可変形鏡の素子数が20倍以上

60点 \Rightarrow 1200点

\Rightarrow フリード長が小さい分変化する時間も1/5以下に短くなる

数msec \Rightarrow 1msec以下

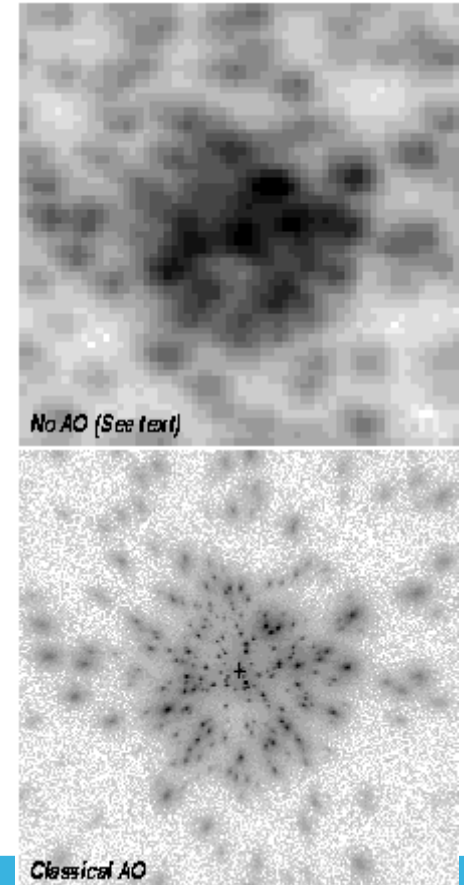
\Rightarrow 制御のための計算量は2桁以上増える



補償光学の限界 (3)

補償される視野が狭い

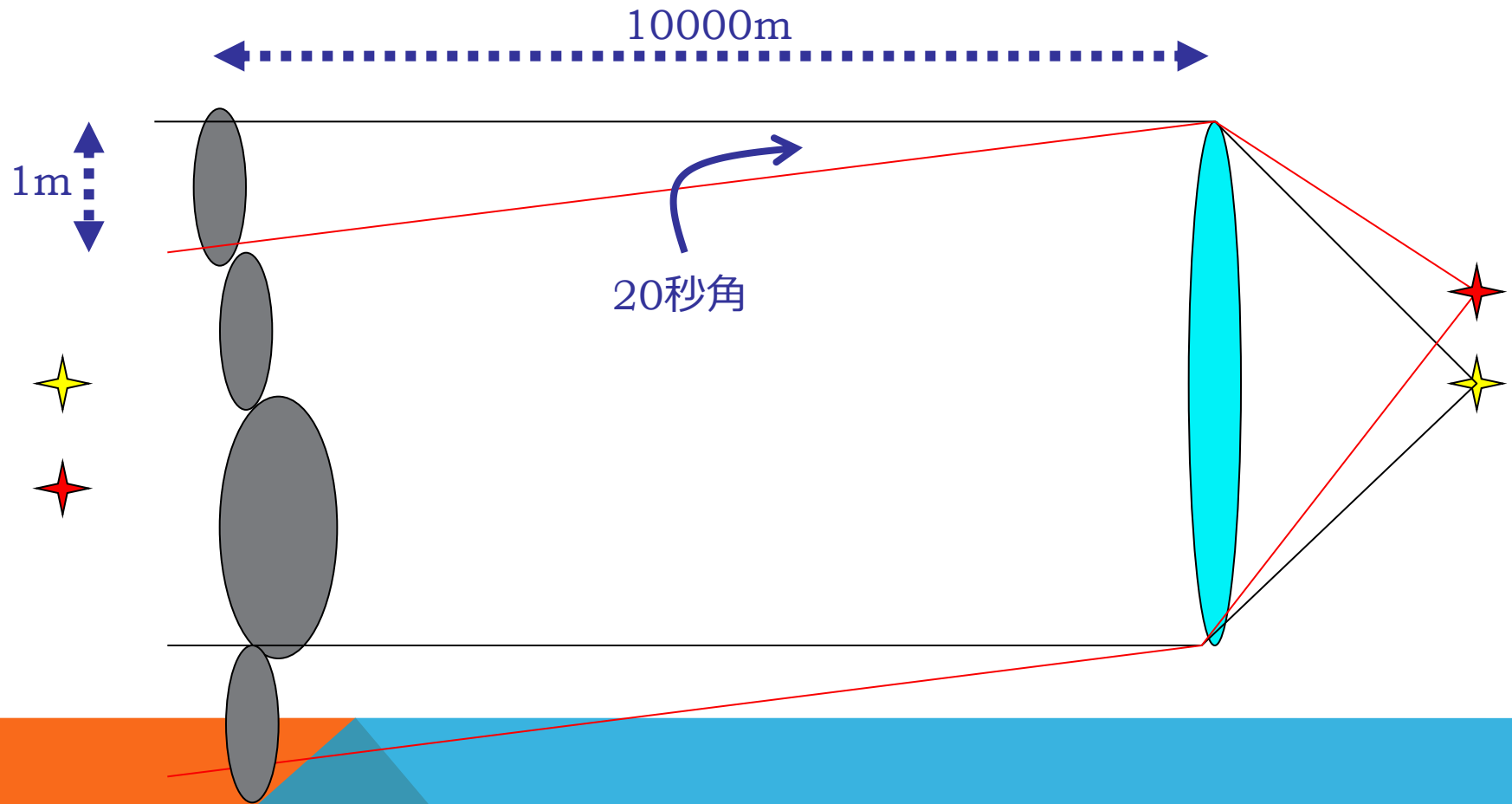
ガイド星からせいぜい10秒角程度(2 μ m帯で)
可視光になるとフリード長に比例して小さくなる(1/5以下)



ジェミニ望遠鏡グループによるシミュレーション

http://www.gemini.edu/sciops/instruments/adaptiveOptics/AOprogram_top.html

補償光学の限界 (3) 補償される視野が狭い

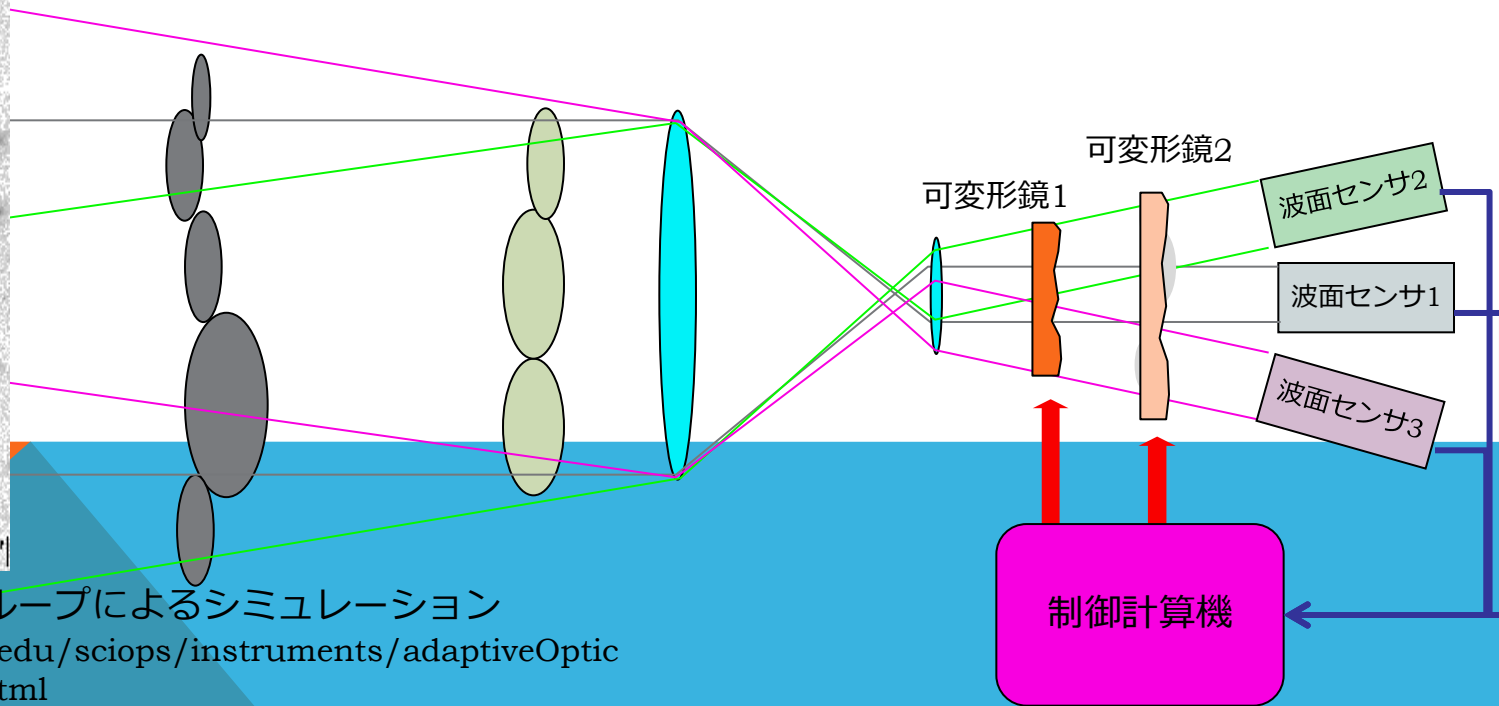
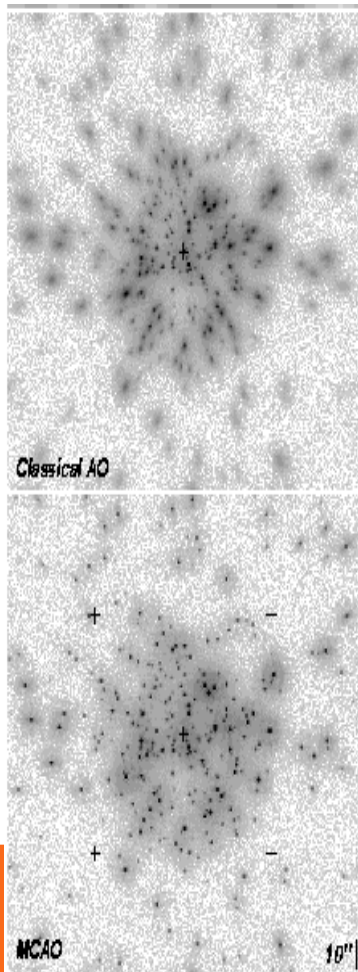


ガイド星からせいぜい10秒角程度($2\mu\text{m}$ 帯で)

可視光になるとフリード長に比例して小さくなる(1/5以下)

マルチコンジュゲート補償光学

複数の星を使う（レーザー星を複数撃つ）：5個ほど
大きく効く乱流2層（地表と10 km）の像面に可変形鏡
それぞれの星に対応する波面センサを準備
⇒数分角で補正がかかる
⇒複数の層の補正も可能となる



ジェミニ望遠鏡グループによるシミュレーション
http://www.gemini.edu/sciops/instruments/adaptiveOptics/AOprogram_top.html

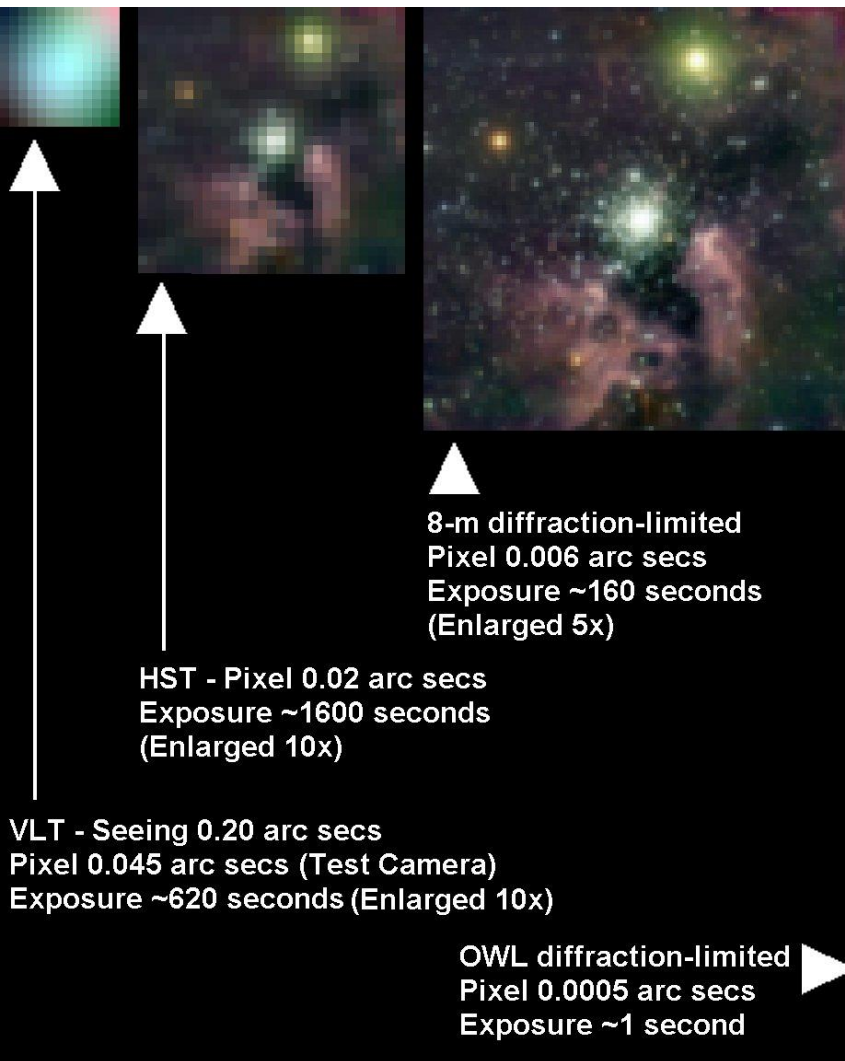


Very Large Telescope/MAD <http://www.eso.org/public/news/eso0833>
ESO/F. Marchis, M. Wong, E. Marchetti, P. Amico, S. Tordo

超巨大望遠鏡の時代に向けて

現在計画されている30m望遠鏡 (TMT: Thirty Meter Telescope) では補償光学は必須の技術





ヨーロッパ100m望遠鏡計画によるシミュレーション
http://www.eso.org/sci/facilities/eelt/owl/index_3.html

まとめ

補償光学はまだまだ制限は多いし、万能ではない

様々な観測モードに合わせて最適なものを使う必要がある

とはいえ、まちがいなく次世代の天文観測で必須の技術

お手軽補償光学

補償光学が売ってる！



補償光学系採用 **アダプティブ・オプティクス装置 AO-7**
世界中で唯一の市販されているアダプティブ・オプティクス
機能的で、**最大にシャープなCCD天体画像**をご提供します！



皆様よりの多数のお買い上げを下さりまして、誠に有り難うございました。
「AO-7-アダプティブオプティクス装置」は完売致しました！
この度の完売により、新製品と致しまして「**AO-8(ST-XE用)**」をご用意致しております！

モデルAO-7 アダプティブ・オプティクス装置

モデルAO-7は、ST7/8/9/10/2000カメラのユーザーの皆様が、その望遠鏡を使用して観測現場で最高の画像解像度が得られるように設計されています。SBIGは、これらのイメージングカメラで星の画像を安定化し解像度を高めるために22箇のガイディングCCD素子を活用しています。AO-7システムには、大気修正用の高速ティップティルトミラー、およびLucy-Richardsonアルゴリズムを実装する新しい画像強化ソフトウェアの2つのコンポーネントからなります。



アダプティブ・オプティクス装置「AO-7」本体は、大型2インチ天頂ミラーのような形状を用いております。シユスカセ専用取り付けリングは標準装備で、このリングを取り外せば、42mmTネジ(AD7側がメス)となり、一般市販品のカメラアダプター等への接続も容易に行えるようになります。AO-7の制御及び電源等のすべては、接続ケーブルをカメラ下にあるジャックと繋ぐだけで行えます。CFW-8Aやリレー接続も同時に行えるように、接続ケーブルにもう1つの分岐ジャックが標準付属となっております。

× 検索 次を検索(N) 前を検索(P) すべて強調表示(A) 大文字/小文字を区別(C)

完了

最新鋭！「AO-8」アダプティブオプティクス装置 - Mozilla Firefox

http://www.sbig-japan.com/AO8.html

すばる望遠鏡も「真っ青！？」同機に採用されている補正光学系システムに相当の「市販製品」がこのAO-8です！

最新鋭！「AO-8」アダプティブオプティクス装置



画像をクリックで詳細ページへ

対応機種・機器：(最適:◎/適:○/対応可:△/非対応:×)

(◎): ST-7XME・8XME・9XE・10XME・2000XM・2000XM・4000XM・4000XM
 (○): STL-4020CM・4020M・6303E
 (△):
 (×): ST-1/402/ST-L(一部)/ST-X/ST-8300の各シリーズ SG-4 他

製品名称:	SBIG AO-8アダプティブオプティクス装置
品番:	「ao8-xe」
サイズ・寸法等:	本体寸法 :約122 × 114.3 × 48.6mm 重さ :約540g 日本語ソフト対応:「Ver5.47J」以降
付属品:	AO-8本体・TネジADプレート・取付ネジ一式(各取付用)・ヘクスレンチ・CCDOPSソフトウェア(英語版)・英文取説・日本語取扱説明書

バックフォーカス量:約51.3mm(AO-8本体・TネジADプレート込み)
 (小数点第2位 :約70.2mm(CCD + AO-8&Tネジ)
 四捨五入合計):約112.6mm(CCD + CFW-8A + AO-8&Tネジ)
 :約95.7mm(CCD + CFW-9 + AO-8&Tネジ)
 :約85.0mm(CCD + CFW-10 + AO-8&Tネジ)

※上記は、各種フィルター等のピント移動値は含まれませんが、AO8補正ガラスプレートによるピント補正值(-2mm)は含まれます。

単品販売価格: **¥148,000-**

「最適:◎」→お勧め 「適:○」→使用可、一部性能発揮出来ない場合あり 「対応可:△」→別パーツ併用で取付け可(適) 「非対応:×」→取付け不可もしくは使用不適

チェック! → 各機器との接続図(イラスト) ←
 チェック! → 専用リーフレット(簡易カタログ) ←
 チェック! AO-8の日本国内ファーストライブ後の解説ページはこちらです!

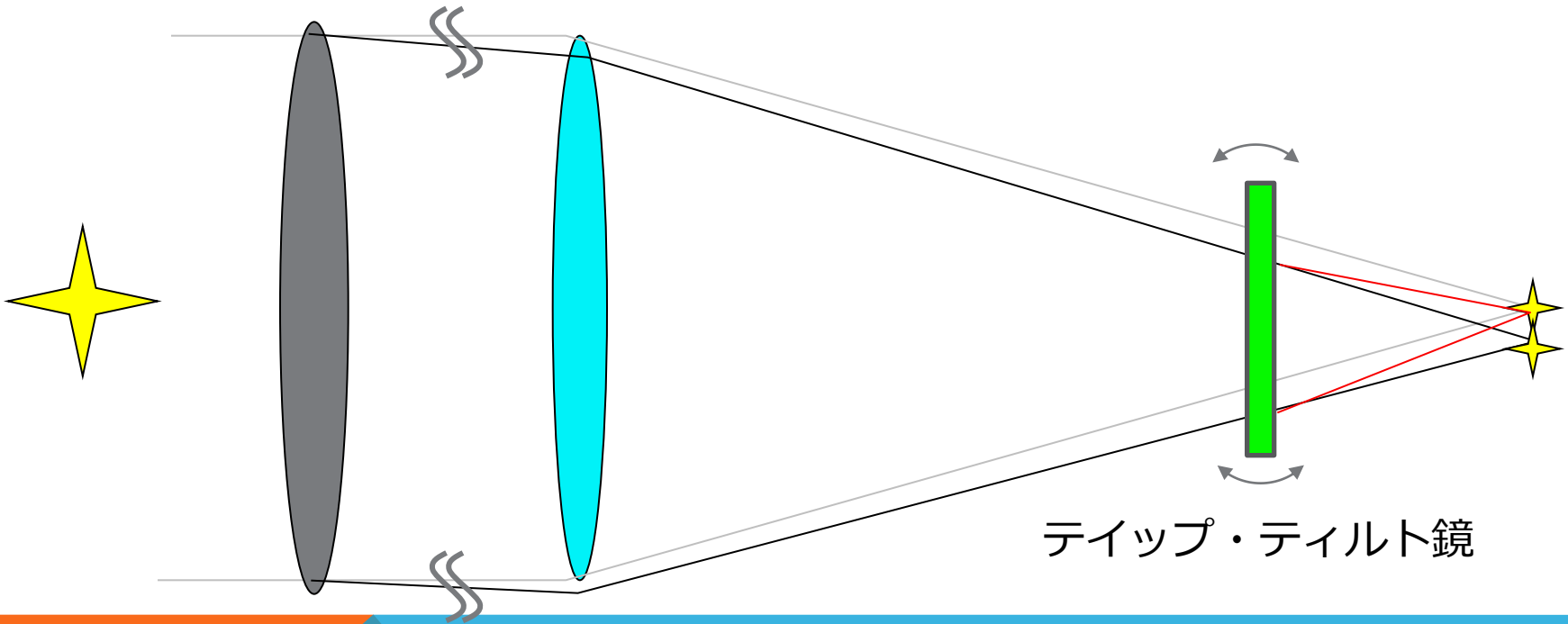
SBIG社製品TOPへ お問い合わせ(メール) ご注文(html)

検索: 次を検索(N) 前を検索(P) すべて強調表示(A) 大文字/小文字を区別(C)

完了

http://www.sbig-japan.com/AO8.html

ティップ・テイルト(TIP-TILT)補正



ティップテイルト副鏡



英国赤外線4m望遠鏡(UKIRT)の
30cmティップテイルト副鏡

<http://www.mpia-hd.mpg.de/UKIRT/>

‡: 画像使用許諾の問合せを行ったが、プロジェクトの閉鎖に伴い連絡をとることができなかった。

すばる望遠鏡の1.3m赤外線副鏡を
組み立てているところ

http://subarutelescope.org/Topics/2003/05/16/j_index.html

望遠鏡の振動も除去してくれる。



英国赤外線4m望遠鏡(UKIRT)の
30cmティップテイルト副鏡

<http://www.mpia-hd.mpg.de/UKIRT/>

‡：画像使用許諾の問合せを行ったが、プロジェクトの閉鎖に伴い連絡をとることができなかった。