

補償光学(AO)と惑星撮影

2016年 8月 28日

塩田 和生

内 容

1. 補償光学(AO)とは
2. すばる望遠鏡のAO装置と成果
3. 海外のAO装置と成果
4. 日本国内におけるAO技術の研究動向
惑星用AO装置やAO小型化の研究

補償光学(AO)とは

国立天文台 高見英樹先生の資料によると、

波面補償光学装置(AO, Adaptive Optics)は、
天体観測の大きな妨げになる大気ゆらぎをリアルタイムで
補正して、回折限界分解能を得る装置である。

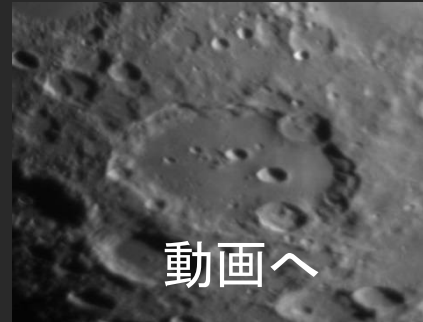
補償光学装置は、1970 年代後半に米軍によって人工衛星を
監視するために開発されたのが実用化の始まりであった。

その後1980 年代後半からは天体観測のための開発が始まり、
米国やヨーロッパなどで、口径3-4 m 級の望遠鏡で試験的に
使われるようになった。

更に1990 年代の終わりには8-10 m 級の望遠鏡には必須の
装置として本格的に取りつけられるようになってきた。

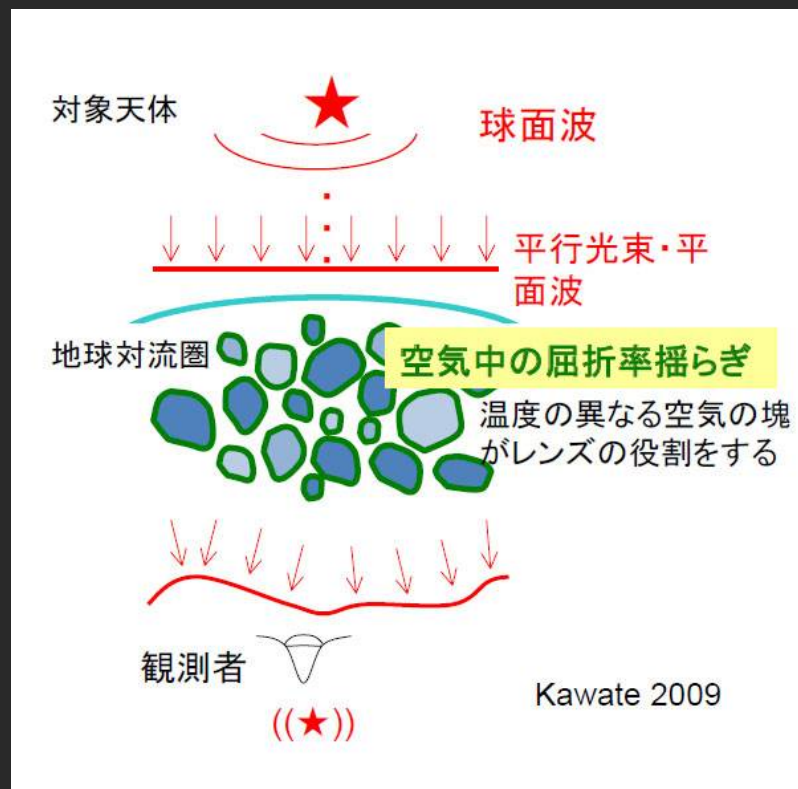
大気ゆらぎの性質

強拡大で揺れて見える月



動画へ

シーイングの原因



空気塊の大きさや変化の速度

空気塊サイズ(フリードの r_0)

日本では、数cm程度

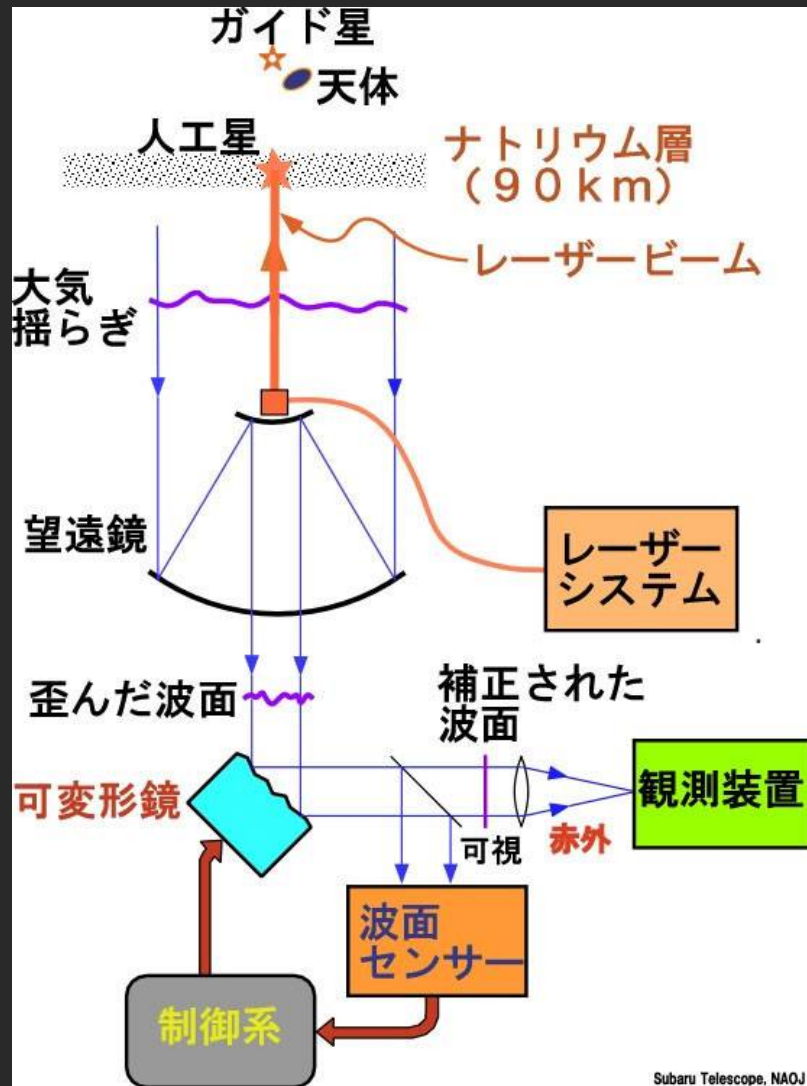
ハワイ・マウナケアでは、数十cm程度

時間変化

空気塊サイズと上層大気の風速にもよるが、オーダーは数百Hzぐらい

すばる望遠鏡のAO装置

すばる望遠鏡HPに載っている原理図



http://subarutelescope.org/Gallery/j_index.html

波面センサー

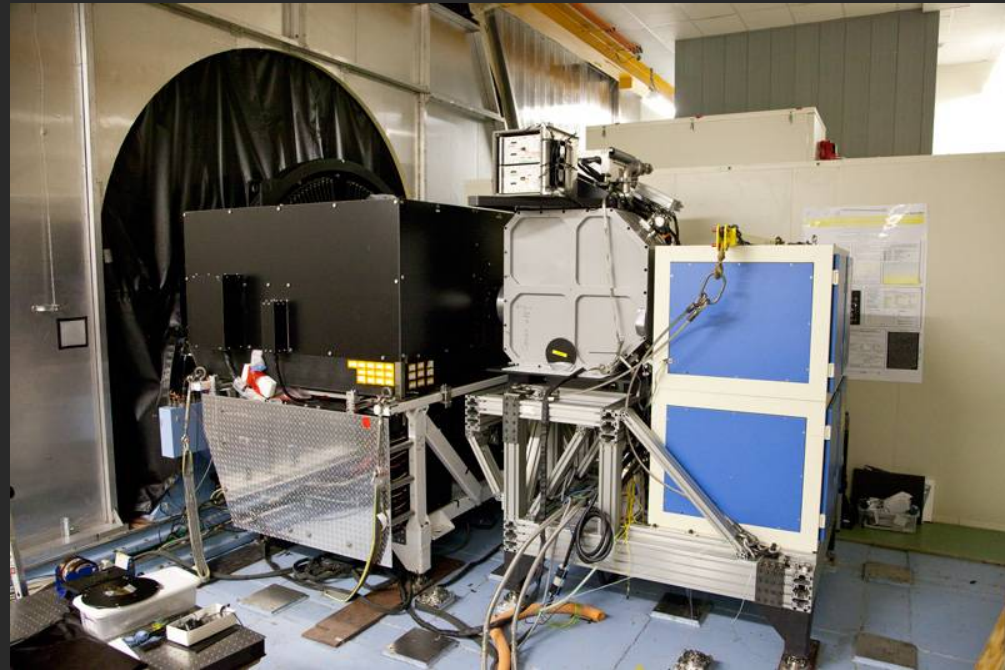
入射光束を細かく分割して、
波面の傾きや曲率を測定

可変形鏡

圧電素子を使い、入射光束を
数十～数百分割し、KHzで制御

すばる望遠鏡のAO装置

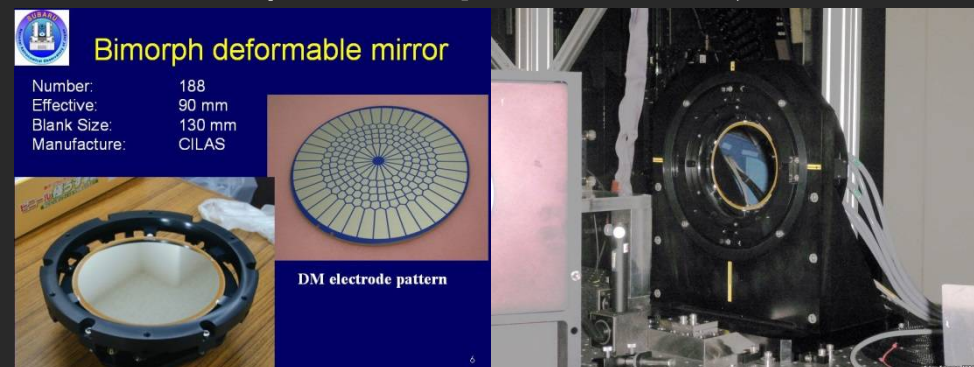
すばる望遠鏡ナスミス焦点に
置かれたAO装置の外観



188素子波面センサー

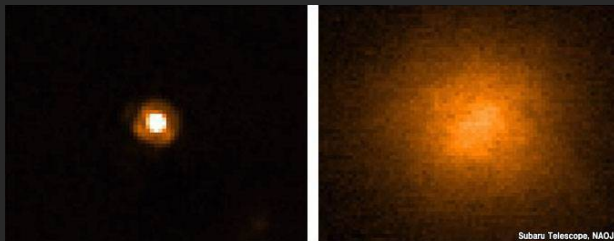


188素子デフォーマブルミラー

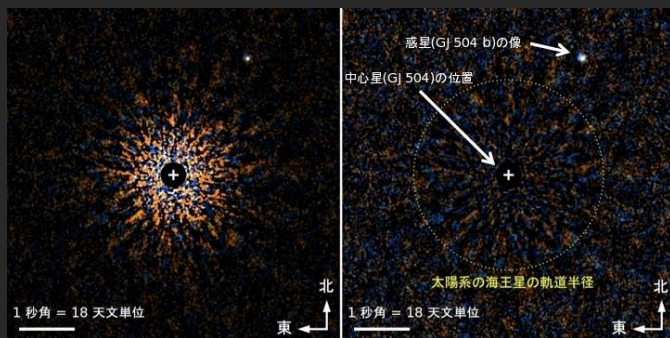


すばる望遠鏡 AO装置の成果

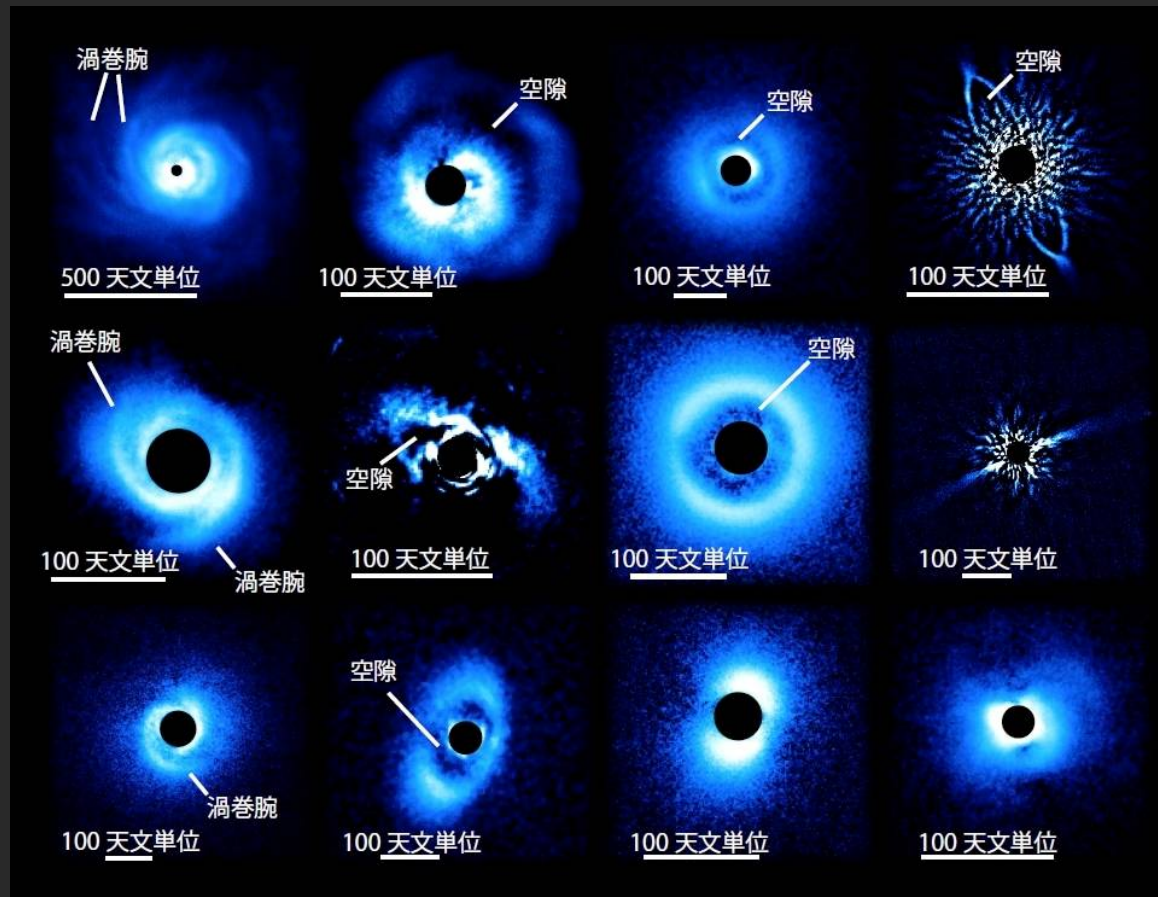
星像の変化
(左:AOあり、右:AOなし)



「第二の木星」の直接撮影



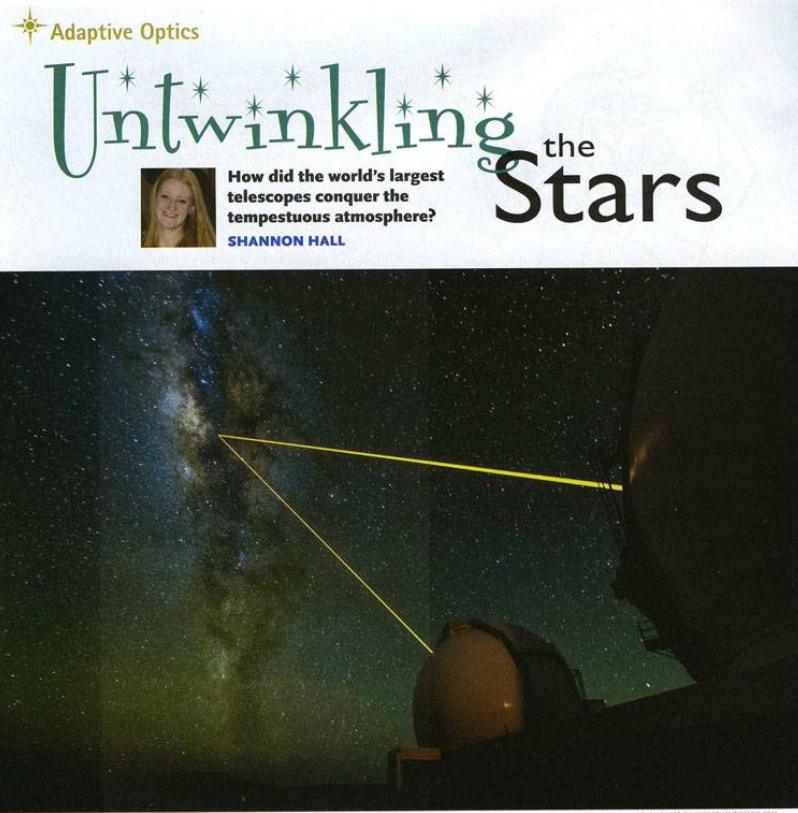
すばる望遠鏡 SEEDS プロジェクトで撮影された、若い恒星のまわりの星周円盤の画像ギャラリー



http://www.naoj.org/Pressrelease/2013/08/04/j_index.html

海外におけるAOの状況

Sky & Telescope 2016.5 AO解説記事



Adaptive Optics

Untwinkling the Stars

How did the world's largest telescopes conquer the tempestuous atmosphere?
SHANNON HALL

On the fourth night, after the team of engineers responsible for the test had left, Macintosh went out on his own. "That was the night when we said, 'Wow, we just got it. It's a done deal and it's a done deal,'" he says. "The way about the telescope was that it was a done deal. The way about the telescope was that it was a done deal. The way about the telescope was that it was a done deal."

But on one such evening in November 2013, high in the remote Chilean Andes, Bruce Macintosh was bored. Macintosh (Stanford University) led the team that built the Gemini Planet Imager (GPI), the first in its class of next-generation adaptive optics instruments.

The team had mounted GPI on the immense 8.1-meter mirror of the Gemini South telescope, and the instrument would finally begin its planet search during this observing run. But it still had to go through an extended testing sequence, and Macintosh was finding the work tedious—he was anxious to "get on sky."

ARTIFICIAL STARS Twin laser beams from the Keck telescopes atop Mauna Kea, Hawaii, create artificial guide stars to aid adaptive optics observations of our galaxy's center.

The first few days of an observing run can be enchanting: the night sky so dark that familiar constellations are hard to find, the landscape typically barren and far from city lights, and the array of mirrors and instruments finally catching beams of light from the distant universe. But on one such evening in November 2013, high in the remote Chilean Andes, Bruce Macintosh was bored. Macintosh (Stanford University) led the team that built the Gemini Planet Imager (GPI), the first in its class of next-generation adaptive optics instruments.

The team had mounted GPI on the immense 8.1-meter mirror of the Gemini South telescope, and the instrument would finally begin its planet search during this observing run. But it still had to go through an extended testing sequence, and Macintosh was finding the work tedious—he was anxious to "get on sky."

ARTIFICIAL STARS Twin laser beams from the Keck telescopes atop Mauna Kea, Hawaii, create artificial guide stars to aid adaptive optics observations of our galaxy's center.

Deep (and Classified) Roots

Macintosh's interest in the field of adaptive optics was not a new one. "I've been working on something like this since I was a kid," he says. "I've been working on something like this since I was a kid."

But on one such evening in November 2013, high in the remote Chilean Andes, Bruce Macintosh was bored. Macintosh (Stanford University) led the team that built the Gemini Planet Imager (GPI), the first in its class of next-generation adaptive optics instruments.

The team had mounted GPI on the immense 8.1-meter mirror of the Gemini South telescope, and the instrument would finally begin its planet search during this observing run. But it still had to go through an extended testing sequence, and Macintosh was finding the work tedious—he was anxious to "get on sky."

ARTIFICIAL STARS Twin laser beams from the Keck telescopes atop Mauna Kea, Hawaii, create artificial guide stars to aid adaptive optics observations of our galaxy's center.

Adaptive Optics

Macintosh's interest in the field of adaptive optics was not a new one. "I've been working on something like this since I was a kid," he says. "I've been working on something like this since I was a kid."

But on one such evening in November 2013, high in the remote Chilean Andes, Bruce Macintosh was bored. Macintosh (Stanford University) led the team that built the Gemini Planet Imager (GPI), the first in its class of next-generation adaptive optics instruments.

The team had mounted GPI on the immense 8.1-meter mirror of the Gemini South telescope, and the instrument would finally begin its planet search during this observing run. But it still had to go through an extended testing sequence, and Macintosh was finding the work tedious—he was anxious to "get on sky."

ARTIFICIAL STARS Twin laser beams from the Keck telescopes atop Mauna Kea, Hawaii, create artificial guide stars to aid adaptive optics observations of our galaxy's center.

UNDER AN OCEAN OF AIR Adaptive optics is a technology that allows astronomers to see the universe as it is, not as it is seen through the atmosphere. It's a technology that allows astronomers to see the universe as it is, not as it is seen through the atmosphere.

Macintosh's interest in the field of adaptive optics was not a new one. "I've been working on something like this since I was a kid," he says. "I've been working on something like this since I was a kid."

But on one such evening in November 2013, high in the remote Chilean Andes, Bruce Macintosh was bored. Macintosh (Stanford University) led the team that built the Gemini Planet Imager (GPI), the first in its class of next-generation adaptive optics instruments.

The team had mounted GPI on the immense 8.1-meter mirror of the Gemini South telescope, and the instrument would finally begin its planet search during this observing run. But it still had to go through an extended testing sequence, and Macintosh was finding the work tedious—he was anxious to "get on sky."

ARTIFICIAL STARS Twin laser beams from the Keck telescopes atop Mauna Kea, Hawaii, create artificial guide stars to aid adaptive optics observations of our galaxy's center.

Adaptive Optics

Macintosh's interest in the field of adaptive optics was not a new one. "I've been working on something like this since I was a kid," he says. "I've been working on something like this since I was a kid."

But on one such evening in November 2013, high in the remote Chilean Andes, Bruce Macintosh was bored. Macintosh (Stanford University) led the team that built the Gemini Planet Imager (GPI), the first in its class of next-generation adaptive optics instruments.

The team had mounted GPI on the immense 8.1-meter mirror of the Gemini South telescope, and the instrument would finally begin its planet search during this observing run. But it still had to go through an extended testing sequence, and Macintosh was finding the work tedious—he was anxious to "get on sky."

ARTIFICIAL STARS Twin laser beams from the Keck telescopes atop Mauna Kea, Hawaii, create artificial guide stars to aid adaptive optics observations of our galaxy's center.

Adaptive Optics

Macintosh's interest in the field of adaptive optics was not a new one. "I've been working on something like this since I was a kid," he says. "I've been working on something like this since I was a kid."

But on one such evening in November 2013, high in the remote Chilean Andes, Bruce Macintosh was bored. Macintosh (Stanford University) led the team that built the Gemini Planet Imager (GPI), the first in its class of next-generation adaptive optics instruments.

The team had mounted GPI on the immense 8.1-meter mirror of the Gemini South telescope, and the instrument would finally begin its planet search during this observing run. But it still had to go through an extended testing sequence, and Macintosh was finding the work tedious—he was anxious to "get on sky."

ARTIFICIAL STARS Twin laser beams from the Keck telescopes atop Mauna Kea, Hawaii, create artificial guide stars to aid adaptive optics observations of our galaxy's center.

Adaptive Optics

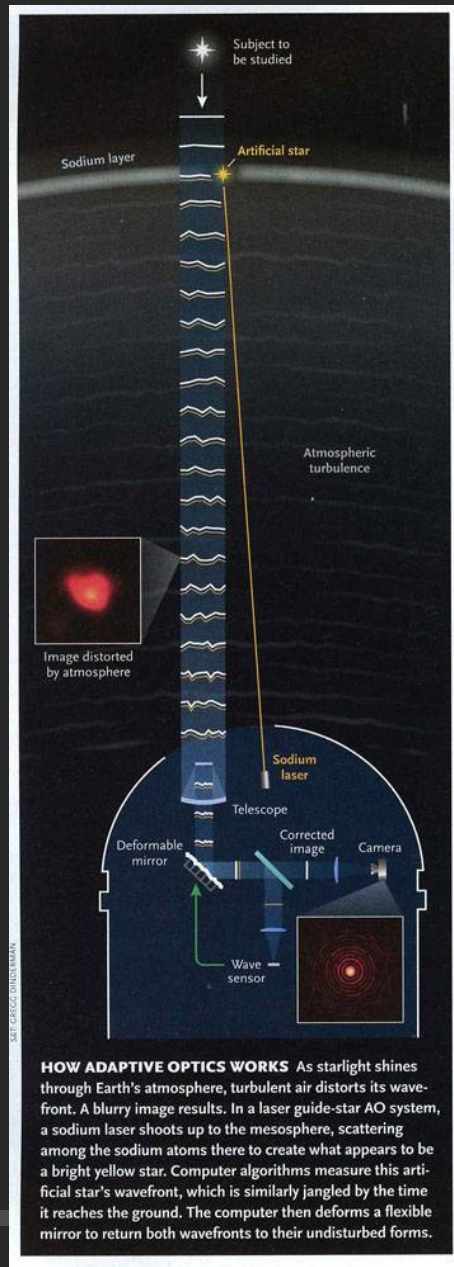
Macintosh's interest in the field of adaptive optics was not a new one. "I've been working on something like this since I was a kid," he says. "I've been working on something like this since I was a kid."

But on one such evening in November 2013, high in the remote Chilean Andes, Bruce Macintosh was bored. Macintosh (Stanford University) led the team that built the Gemini Planet Imager (GPI), the first in its class of next-generation adaptive optics instruments.

The team had mounted GPI on the immense 8.1-meter mirror of the Gemini South telescope, and the instrument would finally begin its planet search during this observing run. But it still had to go through an extended testing sequence, and Macintosh was finding the work tedious—he was anxious to "get on sky."

ARTIFICIAL STARS Twin laser beams from the Keck telescopes atop Mauna Kea, Hawaii, create artificial guide stars to aid adaptive optics observations of our galaxy's center.

AOの原理と効果の解説図

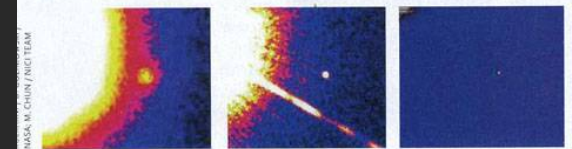
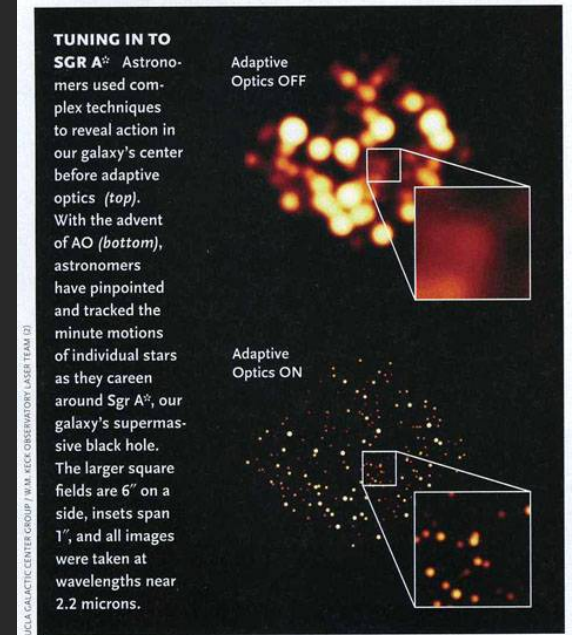
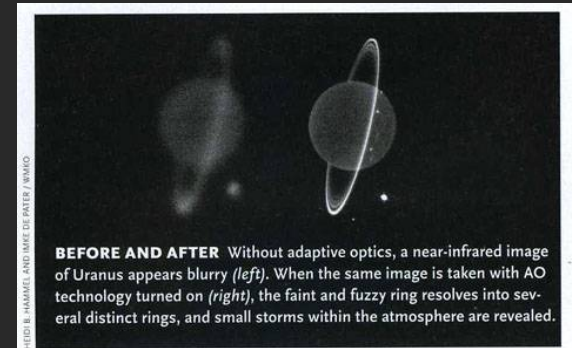


大気層を通過中に
乱れた波面を補正する

- Artificial Star
- Deformable Mirror
- Wave Sensor

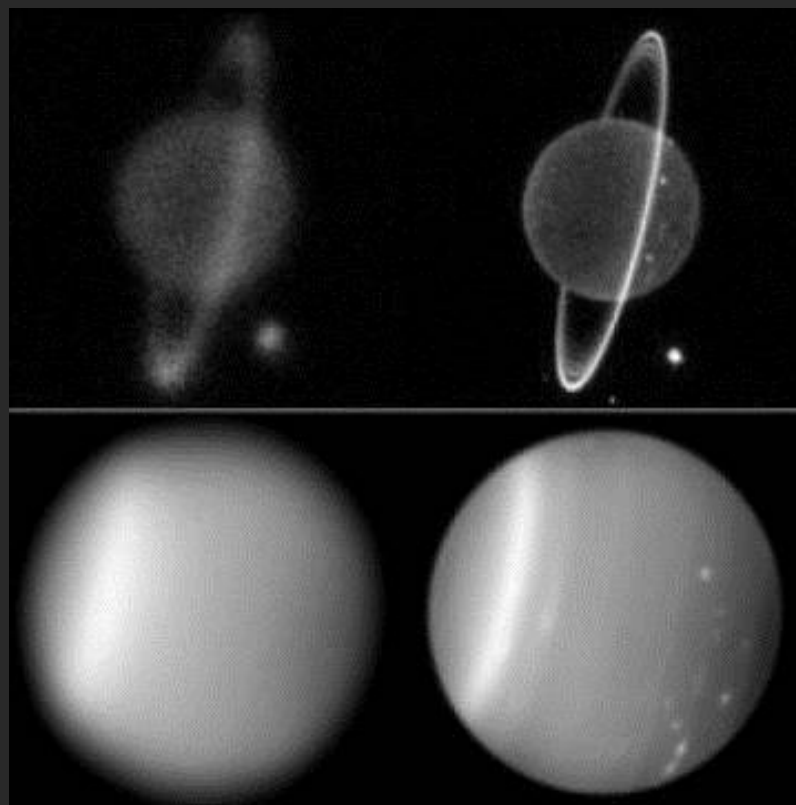
の組み合わせで実現。

視角の小さな対象に
有効

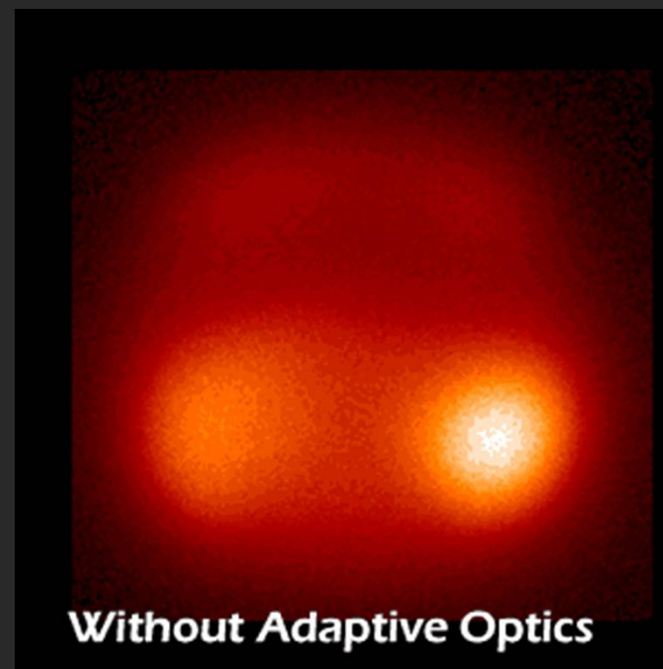


Sky & TelescopeのWebサイトには

2004年にKeck II 望遠鏡で
撮影された天王星



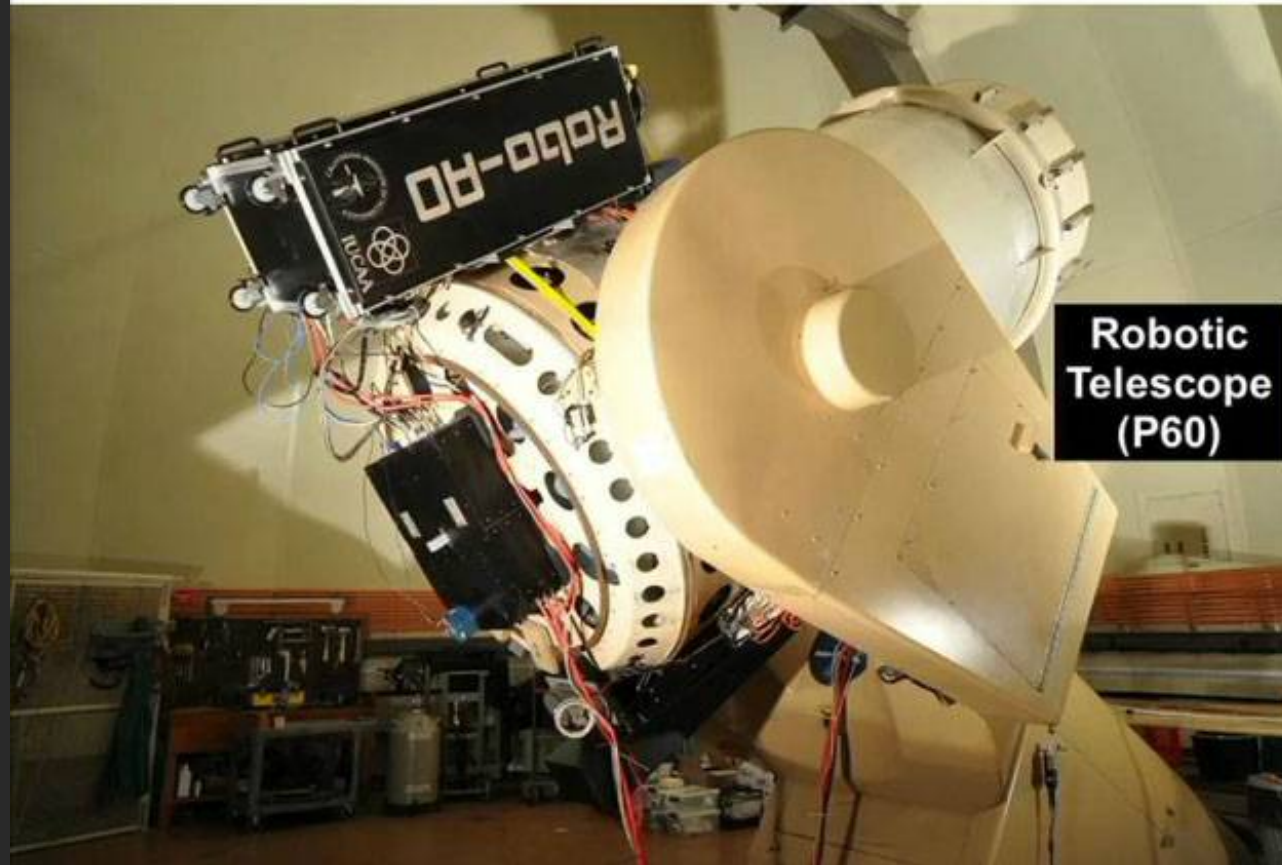
こちらは海王星



<http://www.skyandtelescope.com/sky-and-telescope-magazine/beyond-the-printed-page/adaptive-optics-before-and-after/>

カセグレン焦点に取り付けられたAO装置

Robo-AO on the Palomar 60" telescope



土星の動画
へのリンク

<http://www.ifa.hawaii.edu/Robo-AO/#>

<http://www.astr.tohoku.ac.jp/~nakasho/zasshikai/materials/materials2012/1031masuda.pdf>

AO技術の課題と対策

AO技術は素晴らしい技術だが、課題も多い

1) 視野が狭い（数秒～数10秒角）

2) 高価で大きな装置になる

そのため、視野の拡大、装置の小型化
などを目指した研究が続いている

更に、アマチュアが惑星観測で使えるようになるには、

3) レーザー無しで使えること

4) 小型・安価になること

日本国内での研究動向

日本天文学会の年会では、AO関連の研究発表は毎回数件ある。最近のトピックスは、

すばる望遠鏡やTMT用の、高性能大型装置

- Multi-conjugate波面補正、マルチレーザー星

1～3mクラスの望遠鏡用の簡易型装置

- 最新のMEMS技術による安価な可変形鏡の採用
- 可視波長での観測→安価なサイエンスカメラ
- 光学系をシンプルかつ小型に

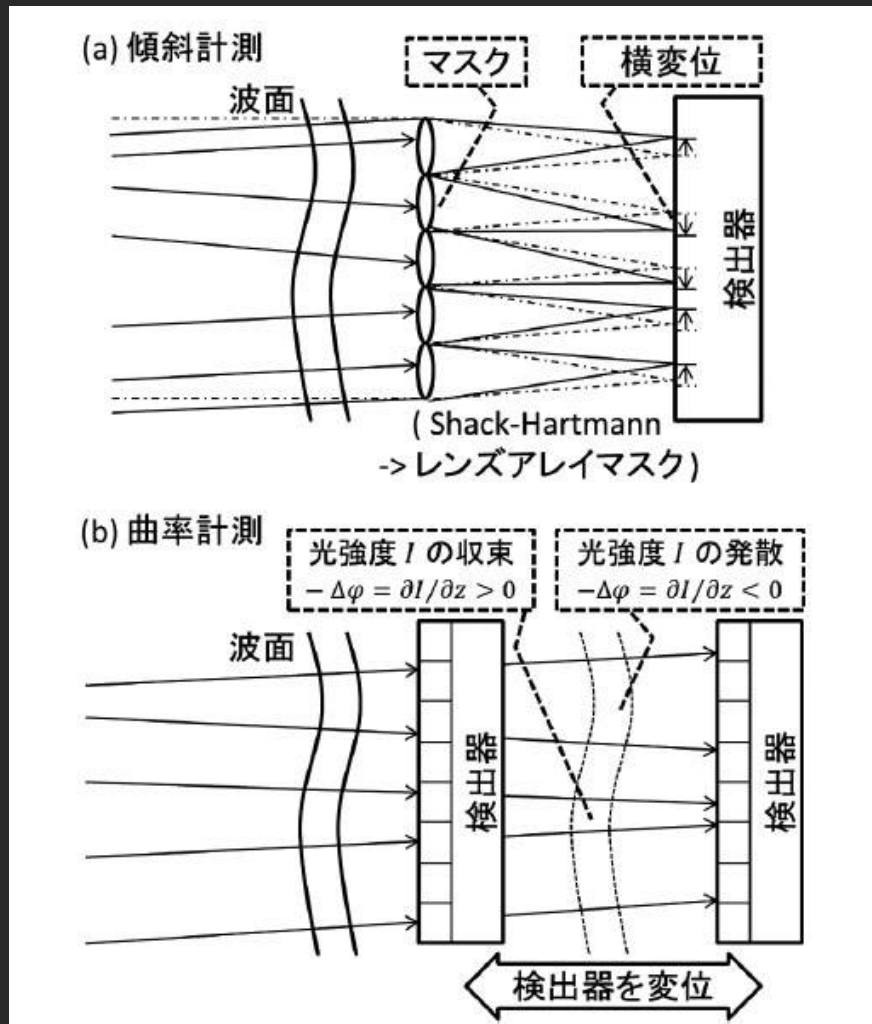
「補償光学研究開発のための情報交換会」

年2回程度開催のプロの研究者の連絡会、アマチュアでも参加可能
発表された内容は下記サイトにアップされている。

<https://sites.google.com/site/jpnaobase/meeting/mitaka160318>

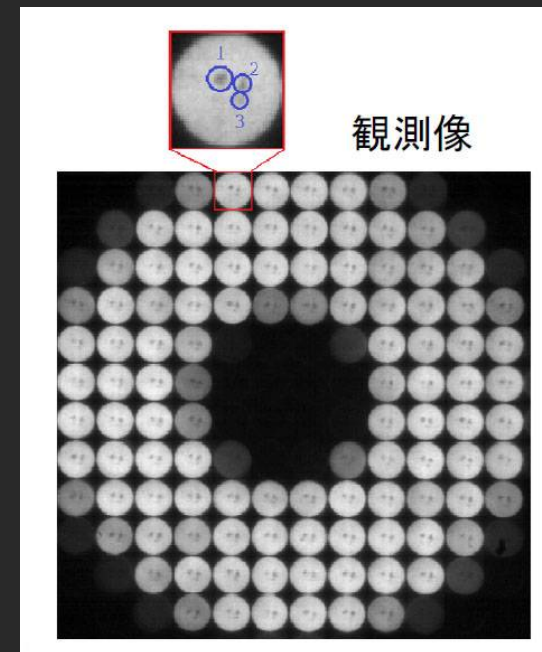
レーザー人工星は必須か？

波面センサーの原理



シャックハルトマンセンサーは
点光源でなくても動作可能

太陽用のAO装置では既に実用化

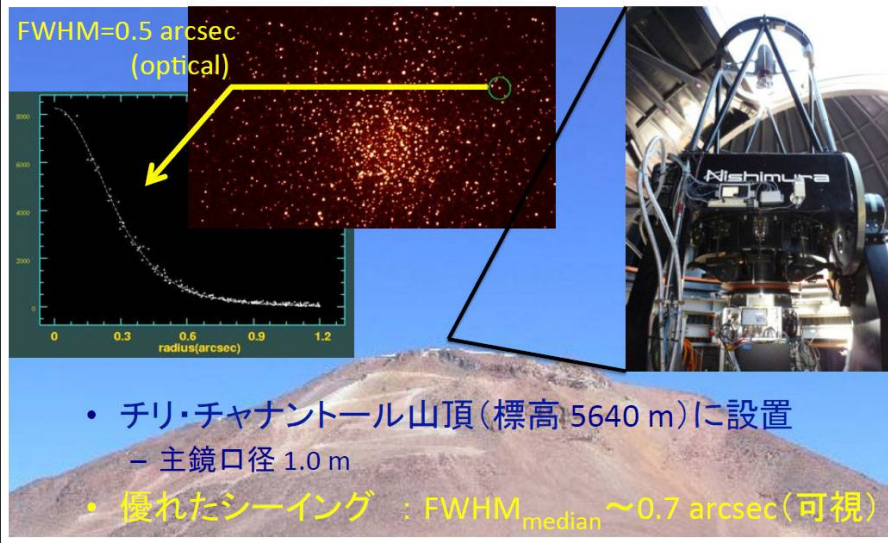


飛騨天文台AO装置のSH像(三浦)

<https://drive.google.com/file/d/0B7UrUVi26zHwd1AyNjlra1NGSWc/view>

小型化研究(1) miniTAO望遠鏡用AO装置

東京大学 miniTAO 望遠鏡



小口径望遠鏡用可視 AO 装置

特徴

	大望遠鏡用赤外線AO	小望遠鏡用可視AO
望遠鏡口径	6-10m	1-2m
観測波長	近赤外線 (1-4 μm)	可視 (0.4-0.8 μm)
角度分解能	$\sim 0.1 \text{ arcsec}$	$\sim 0.1 \text{ arcsec}$
観測可能夜数	数晩	豊富
費用	高価	安価
観測目的	遠方天体、詳細観測	モニター、突発現象

サイエンスターゲット

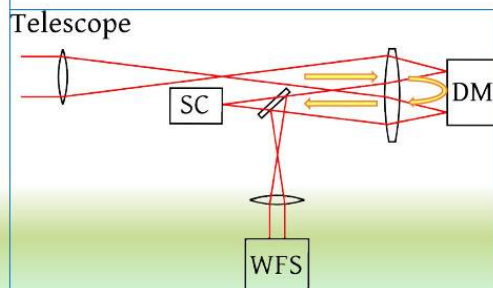
- 活動銀河核、重力レンズクエーサーなど

<https://drive.google.com/file/d/0B7UrUVi26zHwVU1DVVFuVnN5eUE/view>

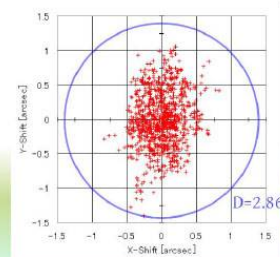
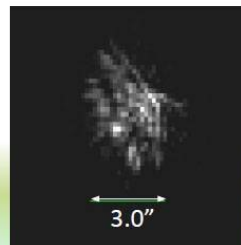
小型化研究(2) 京都産業大学のCRAO装置

CRAOのアイデア

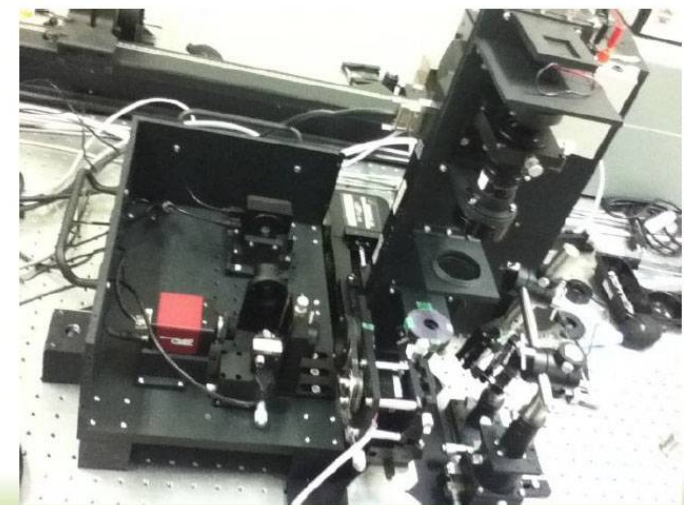
- ・ダブルパスレンズ系による小型AOの実現性と有用性の確認(テストベッド)
- ・神山天文台(KAO)1.3m荒木望遠鏡において安価な可視AOの実現を目指す。



※KAOサイトSeeing: 2"~3"



筐体組み込み後の試験



※外装を外したCRAO1.5号機。

<https://drive.google.com/file/d/0B7UrUVi26zHwMkJ6M0hXeTY5QzA/view>

惑星撮影用のAO装置開発

北大&国立天文台チーム・・・北大ピリカ望遠鏡用に開発中

目標＝木星視直径程度の視野(50 秒角)に渡し、0.4 秒角の分解能

惑星用大気揺らぎ補償光学系の開発

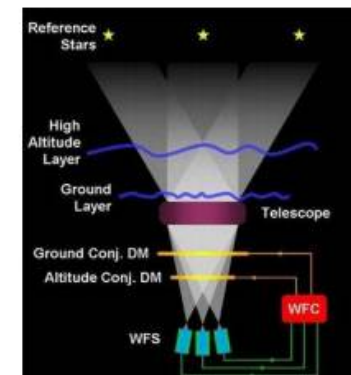
波面測定

- ・惑星面上で常に波面測定を可能にするために、**惑星自身を波面参照源**とする。
- ・木星や土星などの場合は、惑星模様を使った**Correlation Tracking**法を検討
- ・金星などコントラストの低い対象は、曲率方式を使った低次ゆらぎの検討



波面補正

- ・**複数の波面センサ**を惑星面上の任意の点に並べ、共役高度の異なる**複数の可変形鏡**を用意し、補正視野を広げる。(MCAO)



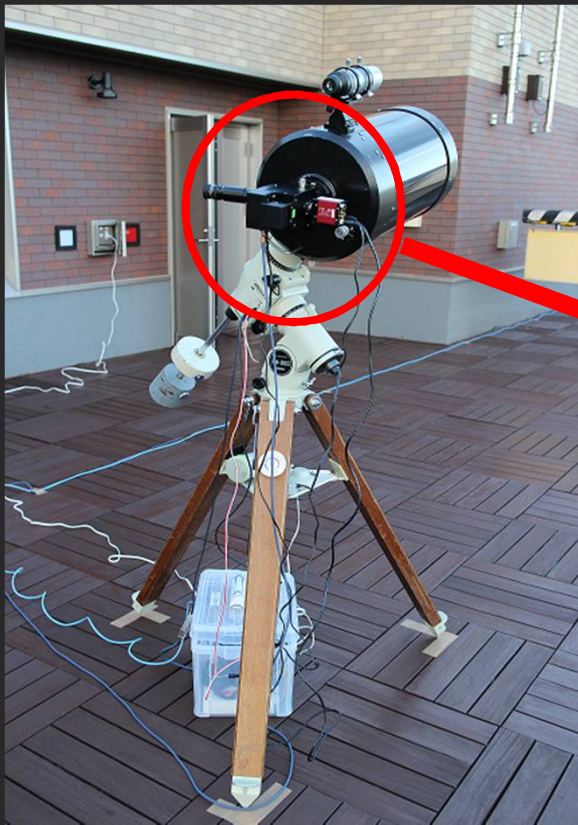
[Richard and Markus, 2007]

2017.8から試験観測の予定

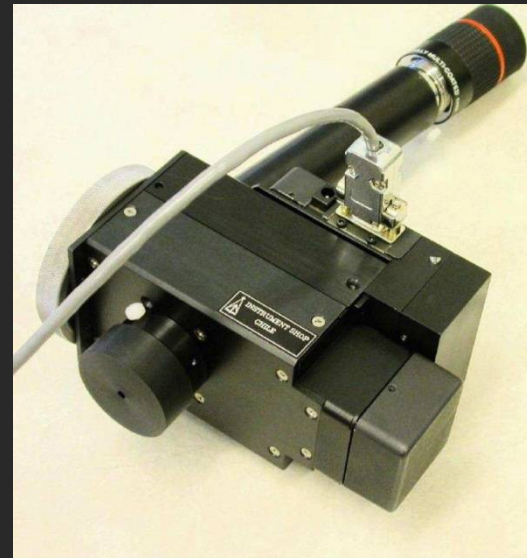
<https://drive.google.com/file/d/0B7UrUVi26zHwcm5SOU9aYXNVajA/view>

大気ゆらぎの定量的な測定

惑星撮影用AO開発のステップとして、MASS-DIMMを使って
名寄サイトの大気揺らぎの高度プロファイルを1年間に渡って測定



MASS-DIMM装置

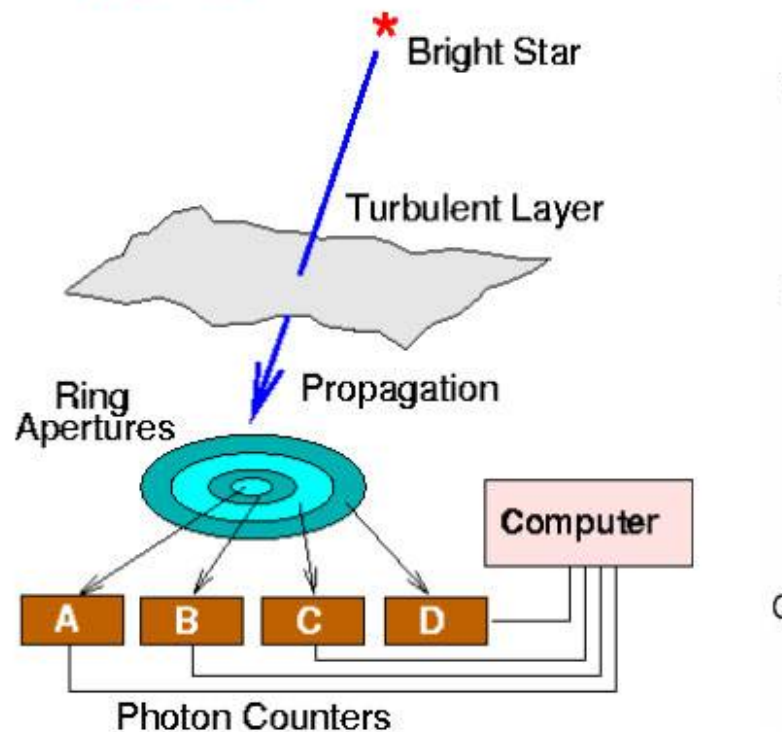


<https://drive.google.com/file/d/0B7UrUVi26zHwcXIEenM0S3ZXeVE/view>

シーイング測定装置(MASS-DIMM)の原理

MASS

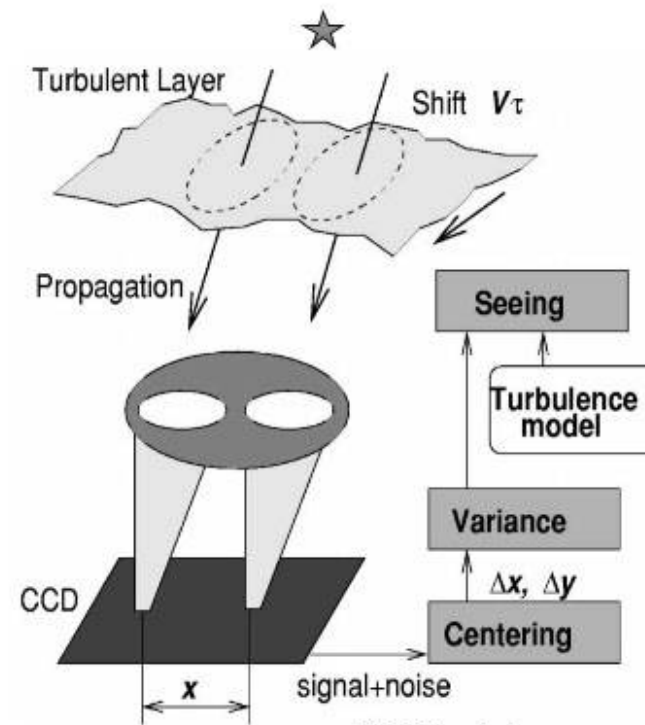
天体のシンチレーションから
6つの高度の C_n^2 を測定
(0.5, 1, 2, 4, 8, 16km)



<http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/profiler/index.html>

DIMM

離れた開口を通った星像の
相対的な重心揺らぎからシーイングを測定

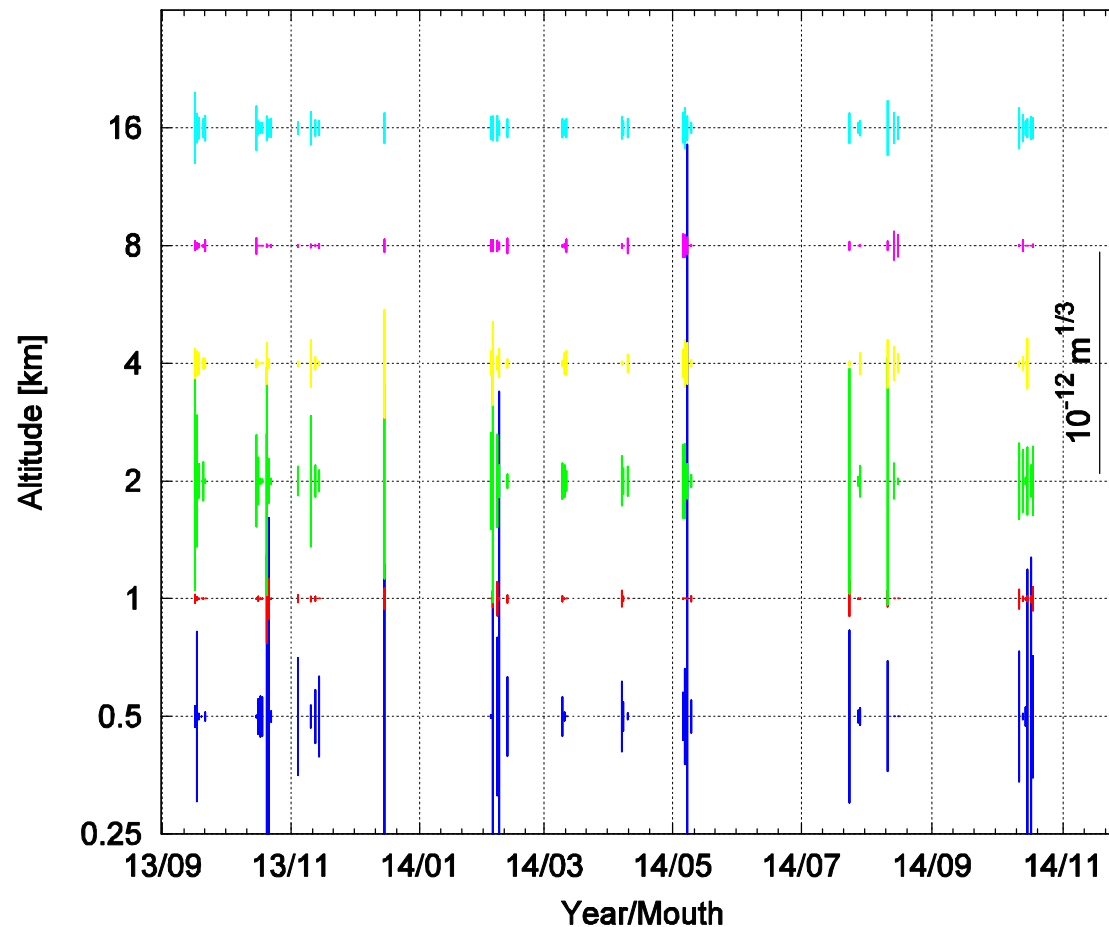


[A. Tokovinin,
2002]

<http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/profiler/index.html>

1年間の測定結果(2013.9-2014.10)

MASSで得られた大気揺らぎの高度プロファイル
(1日ごとに中央値をとる)



高度	割合
16km	8.4%
8km	1.6%
4km	5.3%
2km	14.9%
1km	2.5%
0.5km	16.8%
GL	50.6%

補償光学研究開発のための情報交換会

第8回の日程とプログラム

日時: 2016/9/17 (土) 10:00 - 15:00

場所: 岡山理科大学A1号館A0125号室

セッション1: 中小望遠鏡における補償光学開発

10:00-10:25「中小望遠鏡用AOについて(仮)」(高見英樹・国立天文台)

10:30-10:55「imaka88について(仮)」(早野裕・国立天文台)

11:00-11:25「惑星観測用補償光学系の開発状況」(渡邊誠・岡山理科大学)

11:30-11:55「可変形鏡BMC Multi-3.5の性能評価」(森貞翔太・岡山理科大学)

(12:00-13:00 昼休み)

セッション2: 大型望遠鏡と補償光学開発

13:00-13:25「TMTの主鏡(仮)」(大屋真・国立天文台)

13:30-13:55「TMT PlanBのサイトにおける観測性能の評価」(松尾太郎・大阪大学)

14:00-14:25「多天体補償光学に向けた Open-Loop 補償光学系での波面補償の試験」
(鈴木元気・東北大学)

14:30-15:00 全体の議論とまとめ

日本の開発レベルは？

1. 人もお金も不足しているらしい

<https://drive.google.com/file/d/0B7UrUVi26zHwVkdUVndQN01pYW8/view>

2. シーイングが良くない日本では、技術的な難易度が高くなり、いい画像が得にくいようだ

遠くない将来、アマチュア用AO装置も実現可能かも？

⇒ まずは、惑星撮影用がターゲットだろう

アマチュアの惑星観測者も、開発に協力できる余地があるかも知れない。

終わり

もっと小型・安価な装置にできないか

宇宙天文Expoで見かけたAO実験キット(2013年)

Thorlabs Solutions

補償光学(AO)キット

波面測定および波面制御を手軽に実施いただけるキットです。

特長

- アルミまたは金コーティング、140個または32個アクチュエータのMEMS可変形状ミラー
- CCD または CMOS 式シャックハルトマン波面センサ
- 必要な全ての光学素子、メカニクス(一部組立・アライメント済み)が含まれています。
- 閉ループ動作デモンストレーションソフトウェアとソフトウェア開発キットが含まれます。

組み立ては簡単

デモンストレーション用アプリケーションソフトウェア

AOKI-UM01
ブレッドボードは別売り

MEMS 静電可変形状ミラー

特長

- 140個または32個アクチュエータ
- アクチュエータの最大移動量: 3.5 μm
- アクチュエータ間隔: 400 μm
- 動作波長: 400~1100 nm (アルミコーティング) または 600~1100 nm (金コーティング)
- 駆動用ソフトウェアとソフトウェア開発キットが含まれます。
- ペンチトップまたは OEM 製品に適した高電圧電源内蔵の小型駆動回路

DM140-35-UM01

ミラーの変形により生じた高次ゼルニックモードパターン

MEMS 静電可変形状ミラーの構造

シャックハルトマン波面センサ

特長

- 波面、強度分布実時間測定
- 予め校正されたマイクロレンズアレイ間の容易な切り替え
- フレームレート: 最大 15 Hz (CCD) / 450 Hz (CMOS)
- 小型・軽量、USB 2.0 インターフェイス
- 測定用ソフトウェアとソフトウェア開発キットが含まれます。
- 3種類のマイクロレンズアレイ(センサとセット)
 - ・クロムマスク、300~1100 nm、ピッチ 150 μm
 - ・ARコーティング、400~900 nm、ピッチ 150 μm
 - ・ARコーティング、400~900 nm、ピッチ 300 μm

波面センサ用アプリケーションソフトウェア

交換可能な2種類のマイクロレンズアレイが付属する波面センサキット WFS-Kシリーズも提供可能

<http://www.thorlabs.co.jp> E-mail: sales@thorlabs.jp

THORLABS ソーラボジャパン株式会社

〒170-0013 東京都豊島区東池袋2-23-2 TEL: 03-5979-8889 FAX: 03-5979-7285

201304

デフォーマブルミラーや
波面センサーが、
パーツとして売られていた。

更に、
AO実験キットも売られていた。
(説明員に聞いたら200万円)