

補償光学系：大気揺らぎを克服する

高見 英 樹

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: takami@optik.mtk.nao.ac.jp

補償光学系 (AO) は大気揺らぎをリアルタイムで補正して回折限界に近い星像を得る技術である。これを使うと、これまでは大気揺らぎによって条件の良いサイトでも 0.5 秒角の星像しか得られなかったところが、その何倍もの高い分解能で観測することができるようになり、すばる望遠鏡でも 1999 年の完成を目指して開発をしている。ここでは、その補償光学系の概要とその特徴をユーザーの立場から解説したいと思う。

1. 補償光学系 (AO) とは

・・・大気の揺らぎの影響のないところで観測するのは天文学者の夢であった。今それが実現しつつある。・・・

今の 8 m クラスの大望遠鏡は、望遠鏡の研磨、鏡の支持機構の技術の発展によって、それ自身では可視光でもほぼ回折限界の像を得ることができるようになっており、その空間分解能は 0.015 秒角にもなる。それに対して、大気揺らぎでできまるシーイングの日本国内の平均的な値は約 3 秒角であり、世界で最も良いサイトの一つであるハワイ・マウナケア山頂でも平均約 0.5 秒角である。この違いはどのようなものと考えられてきたのであるが、実は古く 1953 年に Babcock¹⁾ が、これを解決する方法、即ち補償光学系 (Adaptive optics, 以下 AO) を提案していた (図 1)。これは大気揺らぎによる光の波面のずれを測定し、瞬時に途中の光学系の形状を、波面ずれがキャンセルするように変形させてやることによって、波面揺らぎを補正してほぼ回折限界の像を得るシステムである。実際には望遠鏡の光束を複数の小開口に分割して、その開口ごとの分解

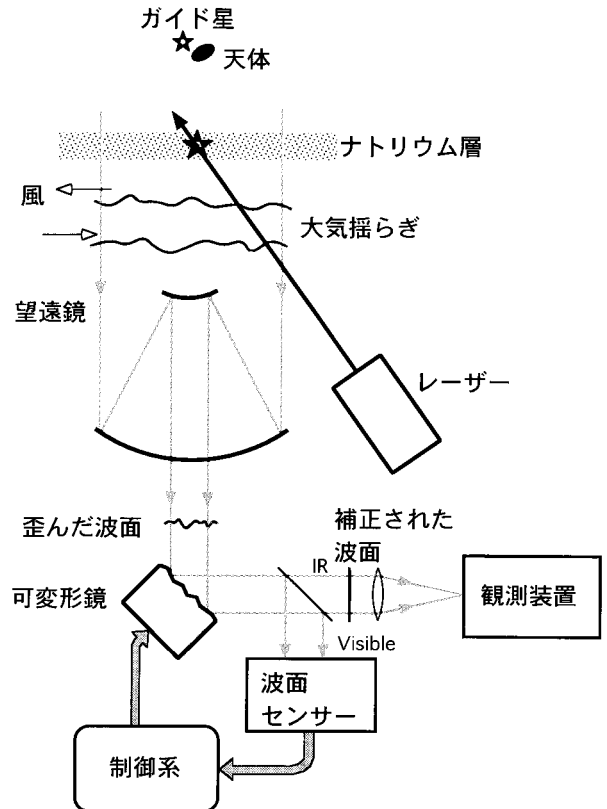


図 1. 補償光学系 (AO) の概念図。望遠鏡の光路中に波面を補正するための可変形鏡を置き、そこを通った光の波面の一部を波面センサーで測定する。その信号を計算機で処理し可変形鏡を波面誤差をキャンセルするように制御する。



表 1. シーイング 0.45 秒角の場合の各波長ごとのフリード長

波長 (μm)	r_0 (m)
0.5	0.23
1.2	0.65
1.65	0.95
2.2	1.34
3.4	2.26
10	8.2

能で波面を測定し、それに対応した素子数をもつ可変形鏡で波面を補正するのである。しかし、当時はそれを実現する技術がなく、初めての実用化は 1970 年代後半、米空軍によってなされ、目的は人工衛星の監視のためであった。天文用の実用的な AO はまず ESO (ヨーロッパ南天文台) によって 1980 年代終わりに作られた。名称は COME-ON, その改良版 COME-ON+ であり、この装置の制御素子数は 52 素子である。これは現在 ADONIS という名前で ESO 3.6 m 望遠鏡に取り付けられて現役で活躍しており、VLT 用の AO の事実上のプロトタイプとなっている²⁾。その後これまでに、望遠鏡に取り付けて星からの光の波面補償に成功した AO の数は約 15 になっている。これらの内、現在最も活躍しているものは CFHT (マウナケアにある 3.6 m 望遠鏡) の観測所装置となっている PUEO (19 素子)³⁾、ハワイ大学の Roddier のグループによる Hokupa'a (36 素子)⁴⁾、と先に述べた ADONIS である。特に、PUEO と Hokupa'a からは補正素子数が少ないにもかかわらず分解能約 0.1 ~ 0.2 秒角の素晴らしい星像が得られ、PUEO には CFHT の約 1/3 の望遠鏡時間が割り当てられるまでになっている。現状では、AO が働いている波長域は主に近赤外域であるが、シーイングが非常に良い場合には可視域でも回折限界コアの像が見えるところまでいっている。AO の効用は空間分解能

を上げるだけではない。拡散していた光を狭いところに集めることによって、より暗い天体を観測できるようになる。現在の AO では、余分に 6 枚程度の鏡を通すことになるので、赤外域では熱雑音が増加するが、それを考慮しても、点光源については 1 ~ 1.5 等級、限界等級が向上する。

2. AO のキーワード： フリード長・・・

AO には沢山の技術用語があって、それらの多くが、一般の天文学者にはなじみが薄い乱流理論、波動光学から出てくるものなので理解しにくいのであるが、そのなかで 3 つだけ、フリード長 (r_0)、ストレル比、アイソプラナティック角の意味がわかれば、AO について重要な概念をほぼ正しく捉えることができるようになる^{5), 6)}。

1) フリード長

仮に、揺らぎがある大気層を通ってきた光を、無限に大きい理想的な望遠鏡で結像したとする。その場合、星像は揺らぎによって広がってしまっており、その拡がり角をシーイングという。シーイングは、大気揺らぎの大きさによって決まる。それは、揺らぎが大きいと波面の位相がそろっている空気のスケーリングが小さくなり、そのスケーリングの口径を持



つ望遠鏡の分解能に相当する星像の大きさに
なってしまうからである。この揺らぎのスケ
ールをフリード長という。この正確な定義は、
シーイング分解能に等しい分解能を与える望
遠鏡の口径 r_0 のことである。この r_0 は、波長
が長くなると大きくなり、

$$r_0 \propto \lambda^{1.2}$$

の関係がある。参考のために可視 ($0.5 \mu\text{m}$)
でシーイング 0.45 秒角の場合の各波長ごとの
フリード長を表 1 に示す。

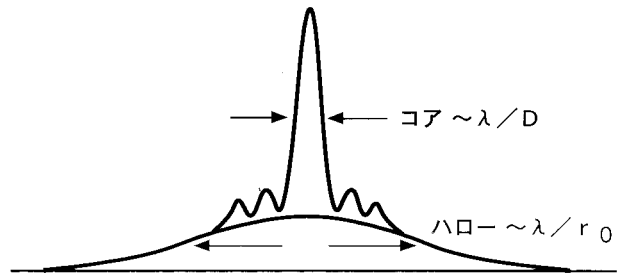


図 2. AO による星像の概念図。星像はほぼ回折限界の幅を持つ
コアと、補正しきれなかった高次波面誤差によるシーイン
グディスク幅より少し狭いハローからなる。この図では、
ハロー成分の高さを強調してある。

2) ストレール比と補正素子数：

AO 性能を表す指標

普通は望遠鏡の空間分解能を表すのに半値幅を
使うことが多い、しかし AO の性能を表す場合は、
これはあまり正確な表し方ではない。その理由は、
AO によって補正された星像の形にある。AO では
波面を補正するために有限な素子数を持つ可変形
鏡と波面センサーを使うので、その分割の分解能
より細かい高次の波面誤差は補正されずに残って
しまい、そのために星像における光の分布は、ほぼ
回折限界分解能を持つコアのまわりに、高次の波
面誤差による、シーイングサイズより少し小さいハ
ロー成分を持つようなものになる (図 2)。このコ
アの幅は補正の程度に少ししか依存しないので、
半値幅では正しく性能を表せないのである。

そこで、半値幅のかわりにストレール比という値
を使う。ストレール比というのは星像の中心強度
を、回折限界の時の強度の最高値で規格化したも
ので、波面補正の程度が良くなると高くなって 1
に近づく。このストレール比は、また波面誤差の根
自乗平均残差 σ (ラジアン) と

$$\text{ストレール比} = \exp(-\sigma^2) \quad @ \quad \sigma^2 \ll 1$$

という関係がある。これから、AO が十分に効い
ている、即ちストレール比を 1 に近づけるため
には、この σ^2 を 1 より充分小さくすることが必要
であることがわかる。分割のサンプリングによる波面

誤差がこの条件を満たすようにするためには、その
分割の大きさを r_0 以下にする必要があることか
ら、AO に必要な補正素子数は、望遠鏡の口径を
D とすると

$$\text{補正素子数} \geq (D/r_0)^2$$

のように概算することができるのである。

3) アイソプラナティック角

AO では波面が補正できる視野の大きさは限られ
ている。その理由は、波面を測定するガイド星の方
向が波面補正をしたい目的の天体の方向と離れて
くると、光が通ってくる空気層の位置がずれてく
るために、そのずれに応じて波面の測定誤差が生
じてくるからである。この誤差が許容できる角度範
囲をアイソプラナティック角 (θ) という。揺らぎ
のある層の地表からの距離 (高さ) を H とすると、

$$\theta \sim 0.314 r_0 / H$$

であらわされる。例えば、揺らぎの典型的な高さを
地表から約 5 km とすると、波長 $2.2 \mu\text{m}$ でのアイ
ソプラナティック角を計算すると半径で約 17 秒角
となり、AO が働く視野が意外に狭いことがわか
る。ガイド星が見つかる確率、すなわち AO が実用
的に使える確率は、この角度に大きく依存する。

3. AO を構成する主要なコンポーネント： 波面センサーと可変形鏡

1) 波面センサー：どれだけ暗いガイド星で波面が測れるか

天文用 AO の波面センサーにとっては、どれだけ暗い星で、少ない光子数で、波面が測れるかが最も重要である。そのため、実験室内では一般的な、光の干渉を使った測定は用いられずに、波面に垂直な光の進行方向を幾何光学的に測定する方式のセンサーが使われる。AO の場合は、(1) Shack-Hartmann センサーと (2) 曲率センサーという 2 種類の方式のセンサーが主に使われているが、どちらも望遠鏡の開口を分割して、それぞれの領域ごとの、Shack-Hartmann センサーの場合は波面の傾き、曲率センサーの場合は波面の曲率を測定するものである (図 3)。現在のところ最も感度の高いセンサーは光子計数ダイオードを用いた曲率センサーで、各分割領域に数 10 個の光子が入れば波面測定ができる。

我々のシミュレーションによる性能評価の結果では、このセンサーを使うと 8 m 望遠鏡では 17 等という暗い星でも AO が働く。両方式のセンサーの性能の優劣については、原理的には (1) が分割数の大きい高次 AO では有利で、(2) は低次 AO で有利であるということになっているが、まだ決着がついていない。

2) 可変形鏡

波面を補正する、つまり位相を場所ごとに制御する素子を可変形鏡という。ぐにゃぐにゃ曲がるので、別名ラバーミラー (ゴムの鏡) とも呼ばれている。これを実現する方法は色々あるが、天文用には電圧によって長さが変わるセラミックス：圧電素子を使った鏡が使われる (図 4)。

その 1 つが一体型フェースシート鏡である。こ

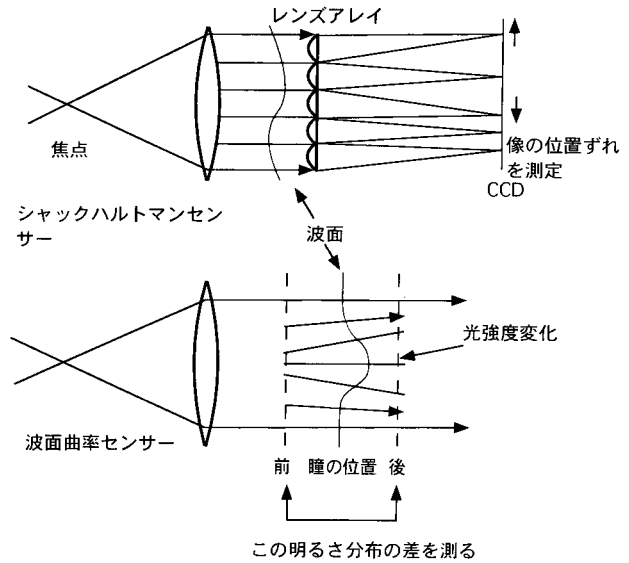
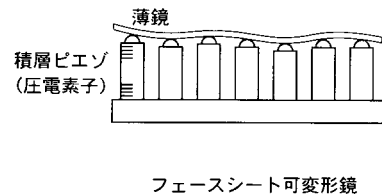
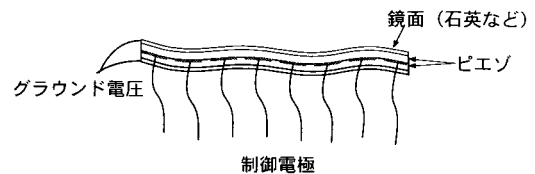


図 3. AO に使われる波面センサー上) Shack-Hartmann センサー、各焦点位置のずれが、波面の傾き (一次微分) に対応する。下) 波面曲率センサー、明るさの分布が波面の曲率 (二次微分) に対応する。



フェースシート可変形鏡



バイモルフ鏡

図 4. 可変形鏡の種類。
上) 一体型フェースシート鏡 下) バイモルフ鏡



れは積層圧電素子をならべて、その上に薄いガラス等の鏡面を貼り付けたものである。このような構造にしておくと、とびとびに駆動素子を動かしても、鏡面は、滑らかに変形する。口径は数～数10 cm、アクチュエーター数は数10～数100素子のものまで作られており、可変形鏡としては最も一般的なものである。これは Shack-Hartmann センサーと組み合わせられて高次まで補正する AO に良く用いられており、Gemini, VLT の AO もこれを採用している。

もう一つの方式がバイモルフ鏡で、2枚の薄い圧電素子の板を貼り付けて互いの伸び縮みが逆になる方向に電圧をかけると、面を曲げる、つまり波面の曲率が制御できることを利用したものである。この素子は、曲率を制御するので、先に述べた曲率センサーとの相性が良い。PUEO, Hokupa'a, そしてすばる AO もこれを採用している。これまでは低次の AO 用と考えられてきたが、PUEO, Hokupa'a システムの成功を承けて、曲率センサーと組み合わせたより高次の 85 素子バイモルフ鏡を使った AO システム計画が始まっている。

4. スカイカバレッジ：

どれだけ AO は使えるか

・・・いくら星像が小さくなくても観測したい天体が観測できなければ意味がない。・・・

天文用の AO で最も重要な要素の1つがスカイカバレッジである。スカイカバレッジというのは、天球の中で AO を使って観測ができる領域の割合である。AO はガイド星を使って目的天体の星像を改善するので、ガイド星があることが必須である。スカイカバレッジは、観測をしたい天体の近く、概ねアイソプラナティック角の中に、ガイド星となりうる明るい星がどれくらいあるかによって決まる。この点がどんな方向の天体でも観測ができる、普通の観測装置と大きく異なるところである。すばる

用 AO について見積もったところ、シーイング 0.45 秒角のときに波長 $2.2 \mu\text{m}$ でのスカイカバレッジは銀河面で 30%，銀極方向で 10% というものであった。つまり、任意の方向にガイド星が見つかるというわけではないのである。そこで、各天文台で AO ができる前に、観測したい天体について適当なガイド星があるかどうかを約 5 億個の星のデータベースがある USNO - A1 カタログ⁷⁾ を使って調べるといようなことが、すでに始まっている。

5. どんな望遠鏡に AO は向いているか：“Why the rich gets richer？”

“Why the rich gets richer？”これは 1998 年 3 月にハワイ島コナであった AO の国際会議で S. Ridgway が AO に関して言ったことばであるが、シーイングの良いサイトの大望遠鏡こそ AO が役にたつということである。大気揺らぎを補正するシステムなのになぜか、とも思われるが、それは次のようなわけである。シーイングが悪いところでは、

1) コストが見合わない

AO を使ったときの性能（ストレーラ比）は先に述べたように D/r_0 と補正素子数でほぼきまるので、シーイングが悪いところでの小望遠鏡用の AO とシーイングが良いところでの大望遠鏡用 AO を比べると、両者は同じレベルの性能をもつシステムを作らなければならない。シーイングの悪いところの小望遠鏡では、AO の値段は望遠鏡と同程度の莫大なものになってしまう。

2) スカイカバレッジが小さい

シーイングの悪いところでは r_0 が小さいので、開口を小さく分割して波面を測らなければならなくなり、明るいガイド星しか使えない。かつ、アイソプラナティック角もそれに比例して小さくなってしまふ。それ故、AO を使って観測できる天体はごく限られたものになってしまう。

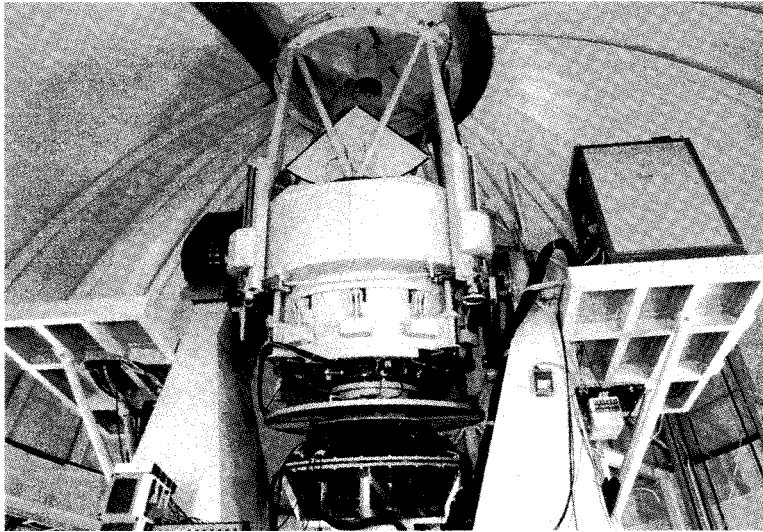


図5. 1.6 m赤外シミュレーター望遠鏡に取り付けたプロトタイプAO

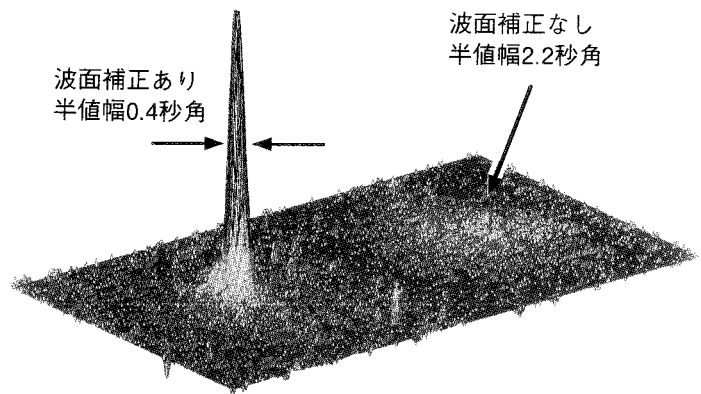


図6. 1.6 m赤外シミュレーター望遠鏡に取り付けたプロトタイプAOによる試験観測結果. 左) 波面補正あり, 半値幅0.4秒角, 右) 波面補正なし, 半値幅2.2秒角. 観測波長 $2.2 \mu\text{m}$, 天体: ベテルギウス.

これらと逆の意味で、シーイングの良いサイトでの大望遠鏡、すなわちマウナケアにあるすばる望遠鏡はAOには最適な望遠鏡なのである。もちろん、マウナケアの小望遠鏡だともっと簡単なAOでも良いのだが、望遠鏡自身の分解能の限界のため魅力は小さくなる。

6. すばるAO

我々は、すばる望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けるAOを製作中である。これは、波面センサーとしては曲率センサー方式(36素子)をとり、可変形鏡として36素子のバイモルフ鏡を使ったもの

である⁹⁾。1~5 μm の近赤外域で平均的なシーイング0.45秒角のときに回折限界に近い星像を得ることを狙っている。例えば、波長 $2.2 \mu\text{m}$ では星像の半値幅が0.07秒角、ストレール比 > 0.6 を目標としている。1999年にはすばる望遠鏡にとりつける予定で本番機を製作中である。すばるのライバルである望遠鏡用のAOはGemini(120素子)、VLT(144素子)、Keck(349素子可変形鏡)と、すばるより高次のシステムを作っているが、ガイド星の限界等級を考えると、その優劣は一概には言えない。

すばるAOを使うことを前提として製作されつつある観測装置として、CIAO(赤外コロナグラフ・



カメラ), IRCS (赤外分光カメラ)がある。AOを使う装置は、検出器のピクセルスケールを回折限界の分解能に合わせるために、AOを使わない観測装置とは異なる光学設計になっている。我々はこれまでに本番機とほぼ同じ可変形鏡、光学系、制御計算機を用いたプロトタイプ機を開発し、試験観測を行ってきた。1996年の8~9月、及び1997年の2~3月に国立天文台三鷹にある1.6 m望遠鏡(赤外線シミュレーター)に取り付けて明るい星を観測し、波長 $2.2 \mu\text{m}$ でほぼ回折限界分解能を持つ星像(空間分解能0.4秒角)を得ることに成功した(図5, 図6)。

7. レーザーガイド星

すばるAOのように最も良いサイトであっても、天空にばらまかれた星だけをつかっては任意の天体の観測が可能なわけではない。ガイド星の数が十分ではないのである。これを解決する方法として、高度90 kmにあるナトリウム原子層に波長589 nmのレーザーをあてて、人工的にガイド星を作るレーザーガイド星という技術が開発されつつある。例えば、4 Wの連続波レーザーを天頂めがけて出すと約9等星の人工星を作ることができる。しかしこれにも問題がある。レーザーガイド星では、上空にできたレーザースポットの位置が望遠鏡の振動・大気揺らぎ等で星に対して動いてしまう。AOではその動きを追尾するように補正が働くので、像のボケは補正できても、天体の像は逆に動いてしまうのである。そこで、星像の動きを補正するための波面傾き補正用の自然のガイド星がやはり必要になる。それでは、レーザーガイド星は意味がないかというところではなくて、この傾きを測定するためのガイド星は高次の波面補正用よりは暗い星でも良いため、スカイカバレッジはずっと広がるのである。例えば、すばるAOなど近赤外用の低次のAOでは、これでほぼ全天を観測することができるようになる。マウナケア山頂の天文台ではケック望遠鏡が出力20 Wのレーザーガイド星装置をもつAOを

1998年観測開始を目標に製作を進めている。すばるでも現在製作中のシステムのアップグレードとして、レーザーの試験を始めている。

また、観測できる星の数が可視域よりも約2倍多い近赤外域での波面センシングも、高速読み出し・低雑音の赤外線検出器ができたために可能になってきた。これを、単体の波面センサーとして用いることはもちろん、レーザーガイド星の波面傾き補正用の自然ガイド星検出にも使える。

8. AOによって生み出されるサイエンス

これまで、AOによって生み出されてきた科学論文は年間数編程度であったが、ようやく1997年には28編が出版されるようになり、本格的なAOの時代に入ってきたと良い。当初は、それ自身が明るいガイド星となる、YSO(若い生まれたての星)の観測が多かったが、最近ではシステムの安定性の向上と高感度波面センサーをもつAOの登場などによって、明るいガイド星が見つかりにくい系外銀河も観測の対象になってきている。これまでのAOによる主なサイエンスの成果としては、

- 1) YSOまわりの原始惑星円盤⁹⁾
- 2) 銀河中心核¹⁰⁾
- 3) QSOの母銀河の観測¹¹⁾
- 4) 重力レンズ銀河¹²⁾

などがある。1)については幾つかの成果がでてきているが、2)~4)については、まだ始まったばかりである。これからは、観測天体の数が増え、系統的な仕事が進むであろう。

すばるAOのサイエンスのテーマは上に挙げたものの他にも数多くあるが、そのなかで系外惑星検出(主にCIAOによる)は、現在幾つかの惑星の発見が報告されているが、すばるAOによつての直接検出が大いに期待できる。他に、銀河形成についても、可視域でのハッブル望遠鏡に匹敵する分解能と感度での観測が近赤外域でできる。これによ



って銀河形成の新しい描像が見えてくるかもしれない。

9. まとめ

AOはこれまでの開発の時代から、実用の時代になりつつある。ハッブル望遠鏡が可視域で0.1秒角を切る分解能と高い感度で新しい天文学を切り開いてきたように、すばるを初めとする8~10mクラスの望遠鏡に取り付けられたAOは近赤外域においてハッブルをはるかに上回る0.05秒角という分解能と高い検出感度で新しい天文学を切り開いて行くに違いない。

参考文献

- 1) Babcock, H. W. 1953, PASP 65, 229
- 2) Beuzit, J.-L., Hubin, N., Gendron, E., Demailly, L., Gigan, P., Lacombe, F., Chazallet, F., Rabaud, D., and Rousset, G. 1994, Proceedings of SPIE 2201, 955
- 3) Rigaut, F., Salmon, D., Arsennault, T., Thomas, J., Lai, O., Rouan, D., Veran, J. P., Gigan, P., Crampton, D., Fletcher, J. M., Stilburn, J., Boyer, C., Jagourel, P. 1998, PASP 110, 152
- 4) Graves, J.E., Northcott, M. J., Roddier, F., Roddier, C., and Close, L. 1998, Proceedings of SPIE 3353, in press

- 5) Roddier, F. 1981, Progress in Optics 19, 281
- 6) Beckers, J. M. 1993, ARA&A 31, 13
- 7) see <http://psyche.usno.navy.mil/pmm/>
- 8) Takami, H., Takato, N., Otsubo, M., Kanzawa, T., Kamata, Y., Nakashima, K., and Iye, M. 1998, Proceedings of SPIE 3353, in press
- 9) Close, L.M., Roddier, F., Northcott, M.J., Roddier, C., and Graves, J.E. 1997, ApJ 478, 766
- 10) Rigaut, F., Doyon, R., Davidge, T., Crampton, D., Rouan, D., and Nadeau, D. 1997, AJ, submitted
- 11) Aretxaga, I., Mignant, D. Le., Melnick, J., Terlevich, R. J., Boyle, B. J. 1998, MNRAS, in press
- 12) Crampton, D., Schechter, P., and Beuzit, J. 1998, AJ 115, 1383

Adaptive Optics: Overcome Atmospheric Turbulence

Hideki TAKAMI

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1
Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588.

Abstract: The adaptive optics (AO) system is a technique to get nearly diffraction limit image by compensating atmospheric turbulence in real time. It enables us to make observations with 10 times higher spatial resolution than the 0.5 arcsec resolution which is attainable at the best site. We are constructing the system for the Subaru telescope, which will be available from 1999. I would like to review the concept and the essence which is unfamiliar but important for common users of the AO system.