

けた)は、理論モデルを制約する上で実際に優れた指標となることが示された。細かい計算は専門的になるのでいっさい省略し、結果だけを述べよう^{5),7)}。

われわれの銀河系のまわり 40Mpc 以内に分布する橢円銀河およそ 400 個の速度のデータより $v = 450 \pm 90 \text{ km/s}$, $\sigma = 375 \pm 30 \text{ km/s}$, したがって $v/\sigma = 1.3 \pm 0.4$ が観測値である。 v/σ が 1 に比べて大きいことは、速度場のうちでコヒーレントな成分がランダムな成分に優っていることを意味し、40Mpc 以上のスケールでの重力場のゆらぎが大きいことを定量的に示している。これに対して理論モデルの予言値はどうであろうか? 初めに述べた冷たいダークマターの場合、現在標準的とされるインフレーション理論に基づくモデルでは $v/\sigma = 0.3 \sim 0.7$ となり観測値とは大きく矛盾する。これは、冷たいダークマターモデルでは大スケールの構造(銀河団・超銀河団)の成長が遅いため、先にできた銀河のもつランダムな速度(σ に対応)が、その後に誘起されるコヒーレントな速度成分(v に対応)に比べてずっと大きくなるためである。インフレーション理論では宇宙初期のゆらぎのスペクトルの形がかなり一般的に定められるため、この理論に基づく限り上の困難は実はダークマターの種類にはほとんどよらない。つまり事態はかなり深刻である。

結論としては残念ながら、この小文のタイトルに対する答えはまだわかっていない。ここで述べた宇宙論テストの示したように、“銀河が先で大構造が後”という単純な描像は否定される。かといって、その逆が真であるわけでもない。さまざまな観測を統一的に説明できる宇宙論モデルは存在していない

いのである。この謎を解き明かすためにまず必要なものは精度の高い大量の観測データである。ハッブル望遠鏡は残念ながら予定された動作は期待できそうにないが、日本も含めて世界中で現在建設予定中である大地上望遠鏡や、第 2, 第 3 の宇宙望遠鏡が、“銀河が先か? 超銀河団が先か?”という素朴な疑問に対する答えを近い将来教えてくれることであろう。

参考文献

- 1) 小玉英雄: 数理科学 308(1989) ~連載中。
- 2) M. J. Geller, J. P. Huchra: in Proceedings of Large-Scale Motions in the Universe: A Vatican Study Week, Edited by V. C. Rubin and G.V. Coyne (Princeton University Press, Princeton, 1988) p.1.
- 3) M. J. Geller: in Proceedings of the Third Nishinomiya-Yukawa Memorial Symposium, Edited by H. Sato and H. Kodama (Springer-Verlag, Berlin, 1990) p.1.
- 4) レビューとしてたとえば、S. M. Faber, D. Burstein: in Proceedings of Large-Scale Motions in the Universe: A Vatican Study Week, Edited by V. C. Rubin and G.V. Coyne (Princeton University Press, Princeton, 1988) p.116.
- 5) J. P. Ostriker, Y. Suto: Astrophys. J. 348, 378(1990).
- 6) J. M. Bardeen et al.: Astrophys. J. 304, 15(1986).
- 7) Y. Suto: in Proceedings of the Third Nishinomiya-Yukawa Memorial Symposium, Edited by H. Sato and H. Kodama (Springer-Verlag, Berlin, 1990) p.1.

補償光学: ESO が実証観測に成功

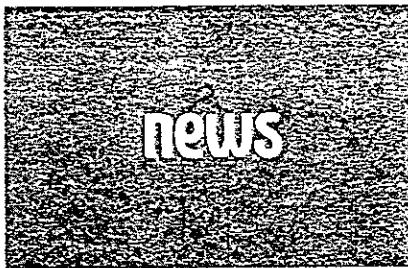
家 正則

欧洲 8 か国の国際共同天文台である ESO(European Southern Observatory, 欧州南天天文台, 本部ミュンヘン市)のマークル博士(F. Merkle)のグループは、天体観測への補償光学の実用化にとり組んできたが、このほどついにその実証観測に成功した。(図 1) は、ESO が南米のアンデス高原に保有している口径 3.6 メートルの望遠鏡に補償光学装置をとり付けて観測することにより、解像力が劇的に改善されたことを示している¹⁾。この天体は、銀河系内の散開星団メシエ 7(NGC6475) にある 5.5 等星 HR6658 である。赤外線の L バンド(波長 3.5 マイクロメートル)で、補償光学試作機を作動させて観測した場合と、作動させずに観測した場合を対比している。補償なしの像

の直径は約 0.8 秒角であり、シーリングの大きさに相当している。補償を行うと、像の鋭さは約 3.5 倍になり、像直径は 0.22 秒角となった。これはこの波長での回折限界に相当し、回折リングが良く見える。解像力が高まったおかげで、この星が二重星であることがわかった。2 つの星の間隔は 0.38 秒角である。

この実証観測に使われた補償光学試作機は、

- (1) 5 行 5 列のマイクロレンズアレーと 100×100 画素の 2 次元レチコン型検出器を備え、100 ヘルツで 9 等星まで波面測定を行えるシャック-ハルトマン型波面測定装置、
- (2) 19 個のピエゾアクチュエーターにより鏡面を ±7.5 マイクロメートル



まで変形できる直径 70 ミリメートルの補償鏡、
(3) 最低次の波面傾斜のみを独立に補償するピエゾ駆動の像追尾鏡、
(4) 波面誤差から各アクチュエーターの駆動量を計算する専用プロセッサー
(5) 32×32 画素のインジウム・アンチモン素子赤外カメラ、
からなる²⁾。システムとしては 100 ヘルツで測定される波面誤差情報から、補償鏡の固定振動モードでの展開を通じて、10 ヘルツでの補償を達成している。口径 3.6 メートルの望遠鏡に用いた場合、可視光では部分補償となるが、3.5 マイクロメートルの赤外線では全補償が可能な設計である。

■ 補償光学とは

望遠鏡の解像力の理論的な限界は、観測波長 λ と望遠鏡の直径 D の比で決まる。これは“回折限界”とよばれ、およそ λ/D ラジアンである。人間の瞳は直径約 5 ミリメートル程度だから、目のいい人なら 500 ナノメートルの可視光では 10^{-4} ラジアンの識別力がある。200 メートル先に 2 つ並べた 10 円玉を 2 個と認められる程度の視力に相当する。直径 1 メートルの望遠鏡では回折限界は 5×10^{-7} ラジアン、つまり約 0.1 秒角になる。ところが、実際に 1 メートル級の望遠鏡で得られる星像の大きさは 1 秒角以下にはなかなかならない。これは、われわれが地球大気の層を通して天体を見ているからである。大気中の温度のゆらぎは屈折率をわずかに変化させ、かけらうのように星の像を乱してしまう。夏の道路で見られる逃げ水現象や炎越しの像がふわふわと揺れ動くのと同じことである。このようなかけらうの強さのこと

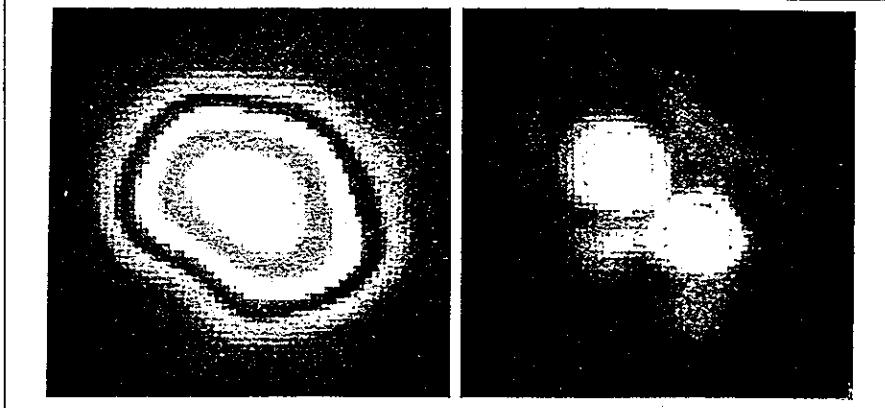


図 1) 欧州南天天文台(ESO)3.6 メートル望遠鏡での、初めての本格的な補償光学による実証観測¹⁾

19 個のアクチュエーターを有する補償光学装置を用いて、0.38 秒角しか離れていない 2 重星を赤外線で分解することに成功した。[写真は F. Merkle らによる (The Messenger, ESO 60, 1990)]

を、天文学では“シーケンス(見え方)”とよんでいる。

解像力を高めるには、まず望遠鏡をシーケンスの良いところに置かねばならない。せっかく雲ひとつなく晴っていてもシーケンスが悪くては良い観測データは得られない。国立天文台が計画している直径 8 メートル級の望遠鏡 (JNLT) は、このためシーケンスの良いハワイ島のマウナケア山頂(海拔 4200 メートル)に建設する予定である。JNLT は“能動光学”方式を採用することにより、鏡面の重力変形や熱変形を常時修正して、今までの望遠鏡を凌ぐ結像性能を達成するはずである³⁾。しかしながら、世界一のシーケンスを誇るマウナケアに設置し、さらに能動光学機能を備える JNLT といえども、そのままでは回折限界の解像力を発揮できない。能動光学では補正しきれない大気のゆらぎを実時間で測って補正し、回折限界の解像力を達成しようというのが“補償光学”である。補償光学システムの原理を〈図 2〉に示

す。補償光学は技術的には能動光学を高速化したものと考えて良い。

■ シーケンス

かけらうを完全になくすには、宇宙空間か大気のない月面に行く必要があると考えられてきた。「大気のゆらぎを測って直せば、地上からでも大望遠鏡の回折限界の分解能が得られる」という補償光学の概念は、1953 年にバブコック (H.W.Babcock) が提案した⁴⁾。10 センチメートル程度の小口径望遠鏡で星を観察すると、大気の乱れの影響で星があちらへこちらへとふらふら踊るのがわかる。口径 1 メートル以上の大望遠鏡では、星の位置の踊りかたは小口径の望遠鏡の場合に比べて目立たないが、星が全体にふやけて見える。これは、小望遠鏡で見えるランダムな星の動きが大望遠鏡では多数重ね合わさるためである。

波面の位相がその範囲では一定であると考えて良い長さを、便宜的にフリード長 η_0 と書く。 η_0 はシーケンスの目

かめられている。時間スペクトルも広帯域にわたっていて、マウナケアでの最近の測定では20センチメートルの領域にわたる自己相関が50%になるタイムスケールはわずか2ミリ秒とされている⁶⁾。したがって完全な補償を行うには、1キロヘルツぐらいまでの補機能力が要求されることになる。

■ 波面測定装置

天体からの波面がどうゆらいでいるかを測ることが、補償光学の第1歩である。波面ゆらぎの測定法としては、現在シャック-ハルトマン法が良く用いられている(図3)⁶⁾。これは、望遠鏡に入ってくる光波面が、どの部分でどれくらいずれているかを測ることができる装置である。この装置で星を観測すると、トンボの複眼のようなマイクロレンズアレーにより、多数の星像が焦点面上に結ばれる。光波面のゆがみに応じて焦点面上の対応する星像の位置が移動する。星像の配置ずれから、各点での波面の傾きの誤差が得られる。これを積分してやると波面の変形状態がわかるという寸法である。前述したように補償光学を実現するには、波面検出については1ミリ秒程度の時間分解能が要求される。かすかな星を光源としてこのような高速で測定することは容易ではないが、半導体技術の急速な進歩により、高速読み出し専用の2次元固体素子カメラを用いて波面を測定することが可能になりつつある。

最近、シャック-ハルトマン法と原理的に異なる新しい方法として、ロディエ法が提案されている⁷⁾。シャック-ハルトマン法では波面の1次微分である勾配の分布を測るのにに対し、ロディエ法では波面の2次微分である曲率の分

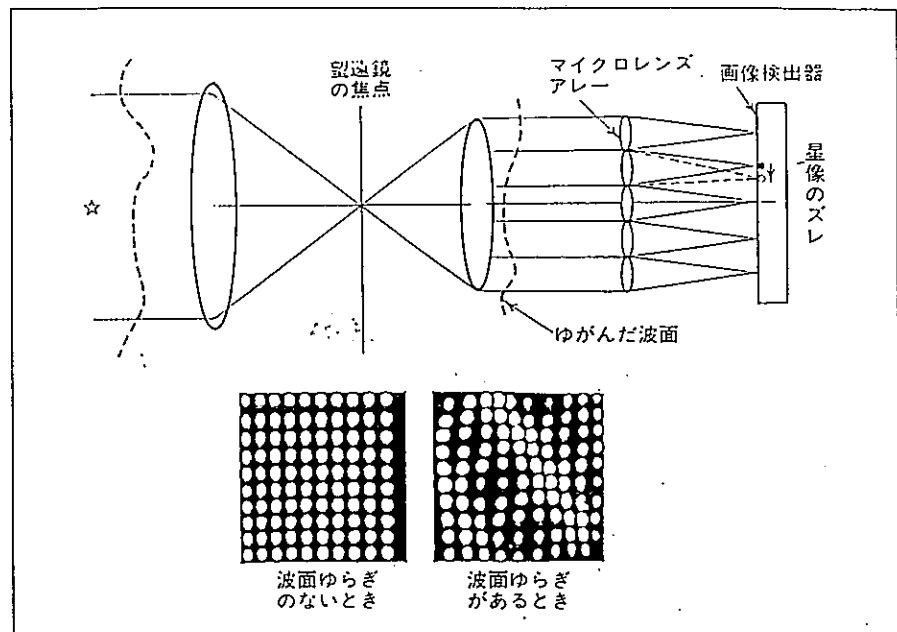


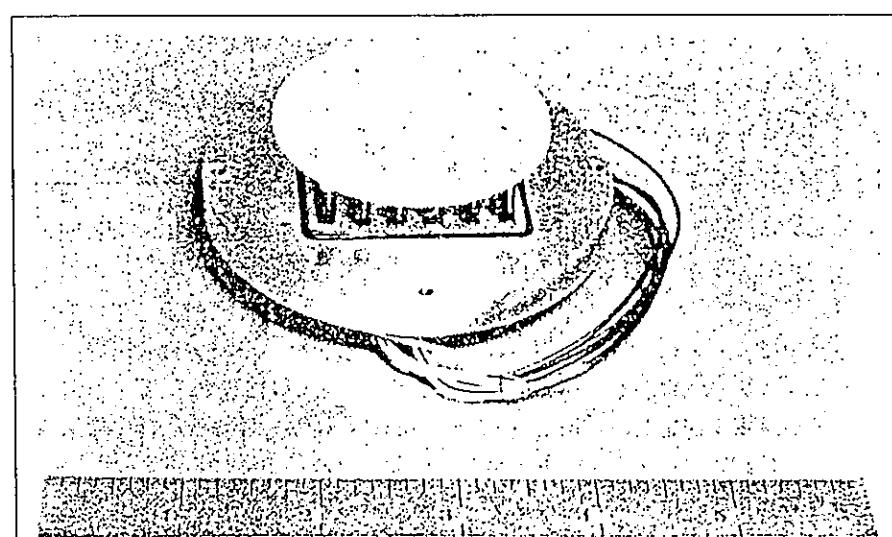
図3 シャック-ハルトマン型波面測定装置の原理

布と周辺での勾配の分布を測る。基本的には、周辺での勾配を境界条件として、内部での曲率測定値を2回積分して波面を再現する。この方式の利点は、測定した曲率の誤差信号を対応するアクチュエーターへの入力信号として、直接アナログ入力できる可能性があることである。直接フィードバックをしない場合には、基本的には2回積分を要する方式なので誤差が積み重なりやすい。

■ 補償鏡

補償鏡を用いた補償光学の試みは1970年代から始められたが、レーザー光の絞り込みをねらった開発を中心で

図4 36個のニオブ酸マグネシウム鉛(PMN)型ピエゾアクチュエーターを有するモノリシック補償鏡⁸⁾



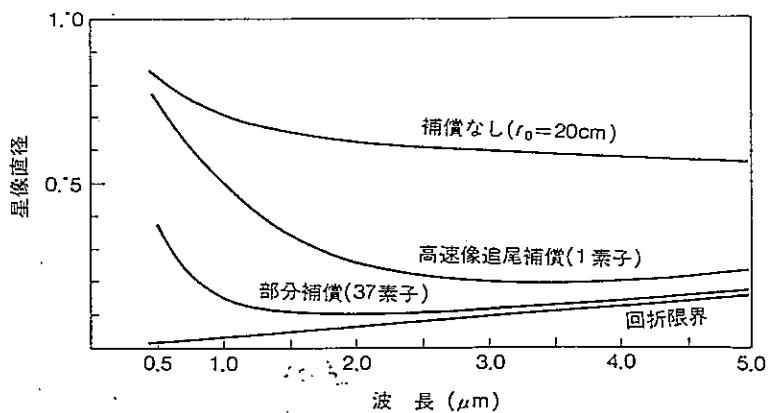


図 6 補償光学の効率

可視光(0.5 マイクロメートル)で 0.8 秒角程度のシーリングの場合に、口径 8 メートルの望遠鏡に像追尾装置のみを用いたとき、および 37 素子の補償光学システムを駆動したときに期待される星像の大きさを観測波長に対して図示したもの。

れている。傾き補償は $D/r_0 = 4$ のときに最も有効である。波面ゆらぎ補償がおおまかでよい赤外線の場合、傾きの補償を行うだけでもかなりの像改善になる。8 メートル級の望遠鏡の場合、可視光で全補償を達成するには約 1000 項の補償を要するが、シミュレーションによると数 10 項程度の補償でも像をかなり改善することができる(図 6)。

■ 補償光学のメリット

補償光学のメリットは、望遠鏡の理論的な回折限界に相当する空間解像力が得られることである。理論的な限界(λ/D)は波長に比例している。一方、大気のゆらぎのスケールを表すフリード長 r_0 は波長の $6/5$ 乗に比例しているから、補償光学を用いないときの解像力(λ/r_0)は波長にあまりよらない。つまり、短波長の可視光ほどシーリングによる像の劣化が著しい。可視光のほうが、補償光学が実現したときのメリットは大きいが、それだけに技術的にはより難しい。赤外線を測定する 2 次元検出器が近年急速に発達したことによって、補償光学はまず赤外線での天体観測で成果を上げ始めた。

補償した場合の像の中心強度は補償なしの場合よりもはるかに高い。光をより集中することができるため、望遠鏡の効率も向上する。したがって、以前より暗い天体が観測できるようになります。撮影だけでなく、天体の光をスペクトル分解して分析する分光においてもメリットは大きい。像がシャープになるため、分光器の入り口のスリットを狭めることができる。このため、分光器そのものをコンパクトで安定か

つ安価なものにすることができる。

天体観測の効率は 1980 年代に半導体検出器が実用化され、写真の場合に比べて信号雑音比が約 7 倍になった。1990 年代には、8 メートル級望遠鏡の登場でさらに約 2 倍に、そして能動光学や補償光学の実用化で約 30 倍になるとされている。次世代の観測天文学で補償光学の果す役割は大きい。

参考文献

- 1) F. Merkle *et al.*: The Messenger, ESO 60, 9 (1990).
- 2) G. Rousset *et al.*: Astron. Astrophys. 230, L29 (1990).
- 3) 家 正則: バリティ 5, No. 9, 52 (1990).
- 4) H.W. Babcock: Publ. Astron. Soc. Pac., 65, 229 (1953).
- 5) F. Roddier, M. Northcott, and B. Graves: preprint to appear in Publ. Astron. Soc. Pacific (1990).
- 6) T. Noguchi *et al.*: Publ. National. Astron. Obs., 1, 1 (1989).
- 7) N. Roddier and F. Roddier: Proc. SPIE 1114, 92 (1989).
- 8) J.W. Hardy: in High Angular Resolution at Infrared and Optical Wavelength, ESO Conference, Garching (1981) p. 25.
- 9) M.A. Ealey, C.E. Wheeler: Proc. SPIE 1114, 134 (1989).
- 10) N.A. Massie: Proc. SPIE 332, 377 (1982).
- 11) L.A. Tompson, C.S. Gardner: Nature 328, 229 (1987).
- 12) C.S. Gardner, B.M. Welsh, L.A. Thompson: Proc. SPIE 1114, 191 (1989).

オゾンの減る場所

岩坂泰信, 近藤幸治

成層圏のオゾンが減っているのは人間が大気中に放出しているフロン(クロロフロロカーボンをここではこのようにいう)のせいではないかと、心配されている。とくに、南極のオゾンホールが発見されてからは、どの研究者もデータを見るとときにオゾン減少の傾向を見つかるのではないかと、目を皿のようにして見るようになった。世の中も変わったといえば変わったものであ

る。というのは、オゾンホール発見の前後までは、観測からオゾン減少が見つかるとは思われていなかった。そのような風潮のなかでは、世界各地で観測された、あるいは人工衛星で観測されたオゾン濃度の結果は、もっぱら大気の運動を知るためのトレーサーとして使用されるだけで、オゾンが地球上から消滅しているのかどうかと疑って観測値を調べる人はいなかった(ある