

ボケもゆらぎもキャンセル してしまる補償光学

二十一世紀はイメージング・
サイエンスの時代



いえ まさのり

国立天文台 研究連携主幹。

1972年東京大学理学部天文学科卒業、77年同大学理学系大学院博士課程修了。理学博士。

同年日本学術振興会奨励研究員、東京大学理学部天文学科助手、81年同大学東京天文台助手、86年同天文台助教授、88年国立天文台助教授、東京大学理学部助教授（併任）、92年総合研究大学院大学助教授（併任）、国立天文台教授、2002年総合研究大学院大学数物科学研究科長を経て、04年より現職。

専門は銀河物理学、すばる望遠鏡による観測天文学。現在は次世代超大型望遠鏡計画に取り組んでいる。

国立天文台光赤外研究部教授、同ELTプロジェクト室長、東京大学大学院理学系研究科教授、総合研究大学院大学物理科学研究科教授を併任。

- 1 木山国昭 「見えなかつたものを見つける」(2007年) 『科学』(2007年1月号)
- 2 木山国昭 「位相差電子顕微鏡の技術と応用」(2008年) 『科学』(2008年2月号)
- 3 Kunio Nagayama, "Time contrast microscopy and its applications for electron microscopy and tomography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, 1000-1006, 2005
- 4 Kunio Nagayama, Radostin Danev, "Phase contrast electron microscopy: development of thin-film phase plates and biological applications," *Phil. Trans. Roy. Soc. B*, 363 (1540), 2008 (London). DOI 10.1088/rsta.2008.0228

私は、これまでの先生方のお話を、多分、二回ほどきいています。二度きいてもおもしろく、素晴らしい話ばかりです。もつと感心するのは、今日の聴衆の熱心さです。東京大学でよく授業をしますが、二割ほどの学生は寝ています。見渡しても寝ている方がほとんどおられないのは素晴らしいことです。

立花先生から「ボケもゆらぎもなおす」という題をいただきました。認知症を治す話だつたら多分ノーベル賞をもらえると思いますが、残念ながらそうではありません。すばる望遠鏡のみえ方を十倍ほどよくするハイテク眼鏡の話です。その原理と、みえてきた実例を紹介した後、今後の広がりについてお話しさせていただきます。

その前に、すばる望遠鏡の十年間にわたる建設の記録を五十五分にまとめた『未知への航海』のラストシーンをご覧いただきます（図1）。このビデオを二〇〇二年の映画祭に出品したところ、五つの映画祭すべてで文部科学大臣賞などを受賞しました。そのラストシーンは、すばるのドームによくみると、縁がゆらゆらとゆれているのがわかります。これは、空気のゆらぎのせいです。

補償光学とは

もし、すばる望遠鏡が宇宙空間で真空状態のなかにあればどうなるでしょうか。すばる望遠鏡の鏡は、気合いをいれて磨きましたので、可視光では点光源が○・○三秒角という回折限界の大きさにみえるはずです（図2）。回折限界とは理論的な限界です。しかし、実際はゆらぐ空気越しにみているため、シーリングサイズと呼ばれる一秒角ほどに広がった像となり、ぼけてしまします。理想的な場合、図2左に示すような強度分布が実現するはずですが、普通は図2右のようにのつぱりと広がった絵になります。それでも、空気のゆらぎの少ないハワイ島に建設したことと、頑張って望遠鏡に仕上げたことにより、現在、世界で一番みえ味のよい望遠

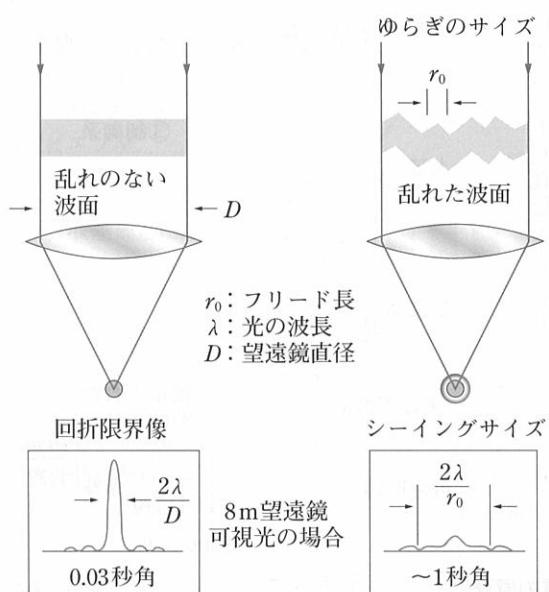


図2 真空中での星像（回折限界像）と乱れた大気越しの星像（シーリングサイズ）

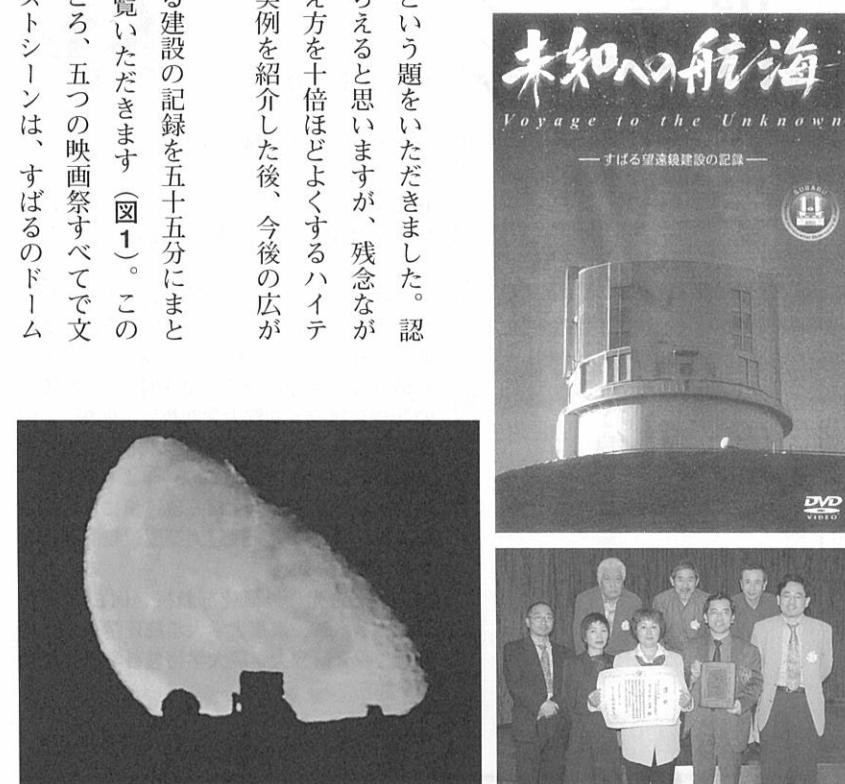


図1 すばる建設記録映画『未知への航海』
2002年度、5つの映画賞・ビデオ賞を受賞

鏡だと定評です。しかし、それでも理想とはギャップがありますので、ハイテクで何とか理想に近づけようというのが補償光学です。

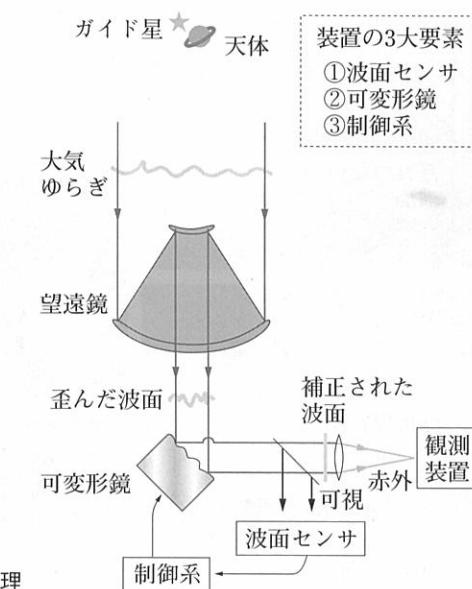
この補償光学装置の原理は次のようになっています（図3）。星からやってくる光は球面波で広がりますが、無限に遠い地球へ到達するときには平面波になっています。それが、大気を通過する際、温度ムラのため屈折率がわずかにゆらいで凸凹してしまいます。これを波面ゆらぎといいます。このゆらいでいる波面をセンサで測定して、ゆらぎを打ち消すように鏡の表面を凹凸に変形させて直してしまうという技術を補償光学といいます。空気のゆらぎは一秒間に一千回ほどの速さで変化しているため、一秒間に二千回測定して、鏡の形状を一秒間に一千回直します。とんでもないウルトラDをやるわけです。それをやると、波面がまっすぐになるため、理論的な回折限界の像ができます。でも、いうは易し、行うは難しです。

可変形鏡の原理

このようなことができるかもしれないという論文を、一九五三年に米国の天文学者ハロルド・

バブコックが発表しました。しかし、技術がなかなか成熟せず、可能になったのは一九九〇年代

図3 補償光学装置の原理



になつてからです。私も学生と一九九〇年ごろからこの研究を始めました。波面を測るため、八メートルの鏡の各部分からの光をマイクロレンズアレイでそれぞれ独立に集め、それを光子計数型のフォトダイオードアレイで測定します。鏡を変形させる方式もいろいろ考えられますが、私どもが採用したのはバイモルフピエゾ型です（図4）。一枚の圧電素子のシートのあいだに多数の電極を挟んで、電極の電圧をかえると、その分極のためにピエゾ素子がバイメタルのように曲がります。その電圧を調節することで、一秒間に一千回ほど鏡の形状を精緻に変化させることができます。

図5は、二〇〇一年に私どもが最初に開発した補償光学系をすばる望遠鏡に装着して得た実測値です。すばる望遠鏡でも、補償光学を使えない場合には、像がもやつとします。それを補償光学で直すと、図5右のようになります。周りに回折リングがみえていることから、理論的な回折限界に達していることがわかります。

図5は二重星です。二つの星がきつちり分解でき、その距離が〇・三秒角であることがわかります。非常によく分解できているだけでも、広がっていた光を一か所に集められるので、光の強度が増しています。このことが重要です。周りの空の明るさに比べてコントラスト

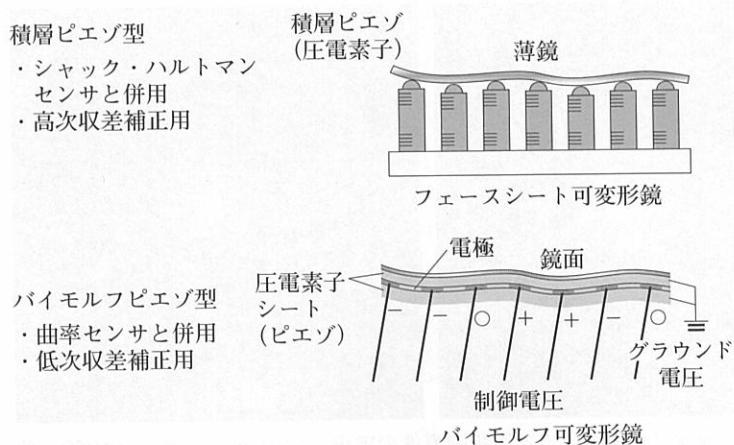


図4 可変形状鏡の原理 積層ピエゾ型（上）とバイモルフピエゾ型（下）

が上がるるので、これまでみえたよくなかったような暗い星も浮き上がってくるからです。

補償光学でみえてきた宇宙

図6は、球状星団M13の中心部を従来の赤外線カメラでとった画像と、補償光学系でその中心の一部を拡大してとった画像です。従来のカメラでみえていた明るい星のあいだに無数の暗い星が写っていることがわかります。

次にみていただくのは、米国の小さな会社がつくった動画です。これは口径三十センチメートルほどの小型望遠鏡の後ろに簡単な補償光学系をつけて、地上から撮影した木星の画像をつないで動画にしました。私どもの補償光学系には三十六個のアクチュエータがありますが、これには二個しかありません。最近市販されているデジタルカメラについている手ぶれ防止機能ほどのレベルですが、それだけでも地上から木星の衛星の動きなどがみえるようになります。ときどき大気の状態が悪くなるとぼけて、よくなるとくっきりします。わざわざ木星の近くまでいかなくても、地上からこのような画像がとれる時代になりました。ただし、これをやるには、まだ望遠鏡より補償光学系になりました。ただし、これをやるには、まだ望遠鏡より補償光学系になりました。

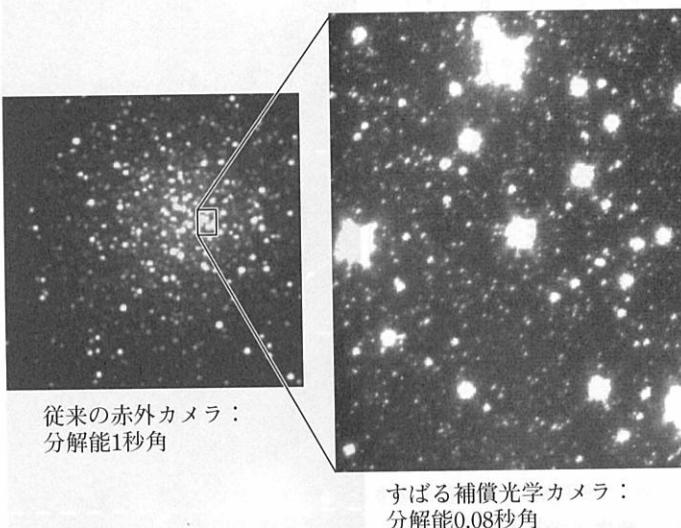


図6 第1期補償光学系（36素子）による球状星団M13の画像

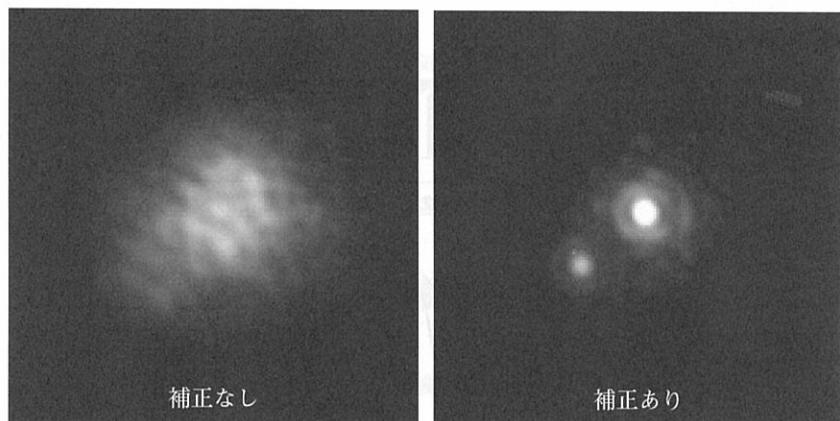


図5 第1期補償光学装置による回折限界像の実現（2001年） 連星計1852（角距離0.31秒角）を解像。波長2.2 μm

の値段のほうが高くなります。

二〇〇六年になつて、補償光学で初めて太陽系以外の惑星が撮影されました。それは、木星質量の五倍ほどの惑星です。地球型の惑星を写真撮影するためには、当面難しいと私たちちは思っています。それを撮影するためには、次世代の宇宙望遠鏡か、後で紹介する三十メートル望遠鏡が必要になります。しかしながら、太陽系外の惑星の存在が星の動きから確認されたというだけでなく、実際に写真がとられたという意味で画期的な成果です。

次のビデオには驚きがあります（図7）。土星の衛星タイタンを補償光学系をつけてみたものです。望遠鏡をタイタンにロックして、補償光学をオンにして撮影したものです。背景にある二つの星がタイタンの後ろに隠れるとき、光がするつと上を通ります。今度は下をするつと通ります。幾何学的には、背後に星が隠れるため光はこないはずです。しかし、タイタンは厚い大気をもつており、その大気を通して光が回り込んでくる現象を初めて確認した画像です。発見されるとそのような説明ができますが、こんな現象がみえるとは誰も予測していませんでした。

銀河中心のブラックホールの存在を証明

もつとすごいのは、銀河系中にブラックホールが存在することを、補償光学を使って、誰も疑う余地がない事実として証明できることです。銀河系中心に「いて座A*」という強い電波源があることが昔から知られていますが、その写真をとってもどこが中心なのかよくわかりませんでした。ただし、非常に正確に電波源の位置だけは決まっています。

その付近の星を補償光学で十年近く精密に撮影し続

けたところ、S2という星の位置が一九九二年ごろから十年間のあいだに、楕円軌道を描いて銀河中心と思われるところを公転していることが証明されました（図8）。太陽系の周りを地球が一年かけて秒速三十キロメートルで公転していることから、ケプラーの運動法則を使うと、太陽の質量が計算できます。これと同じように、銀河系中心の周りのS2星が回っているスピードを測定した結果、この星を振り回している銀河系中心の質量は、太陽の百万倍ほどあることがわきました。しかも、非常に狭いところになければならないということから、それはブラックホールでしかあり得ないことが、これで確実に示されたのです。

さらに、このブラックホールの領域を補償光学で観測していたら、周辺のガスが落ち込む寸前に（なかに落ち込んでしまうと光もでてこられないのですが）、高温になつて光る現象が、實際

にとらえられました。このような新しい発見が天文学で起こっています。

次世代の補償光学

国立天文台では、特別推進研究をいただいて（その四年目が終わろうとしている）、現在の五倍ほどの機能をもつ新しい補償光学系をつくることと、レーザーガイド星システムの開発を進めています。観測したい天体のそばに明るい星があれば波面を測定できるため現在の補償光学系が使えますが、そのような幸運なケースは全体の一〇一二%ほどです。そこで、新しい補償光学をより有効に使うために、自然の明るい星ではなく、レーザーで人工的に明るい星をつくつてしまおうといふとんでもない話です。

これも一九九〇年ごろに米国の天文学者が提案した考え方です。地球の大気中の高度九十キロメートルほどのところにナトリウムの原子密度が高い層があります。このようなナトリウム層は、水星や月にも存在することが知られています。ナトリウムは高速道路などでオレンジ色のランプに使われる

補償光学装置による撮影
(2002年5月)

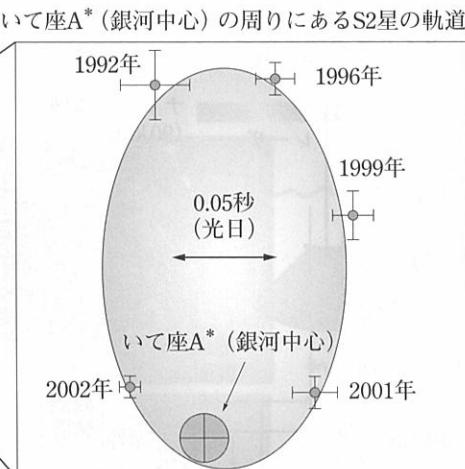
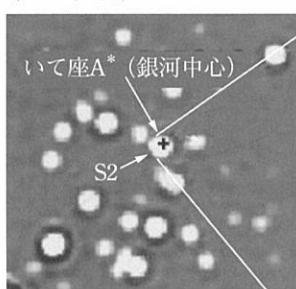
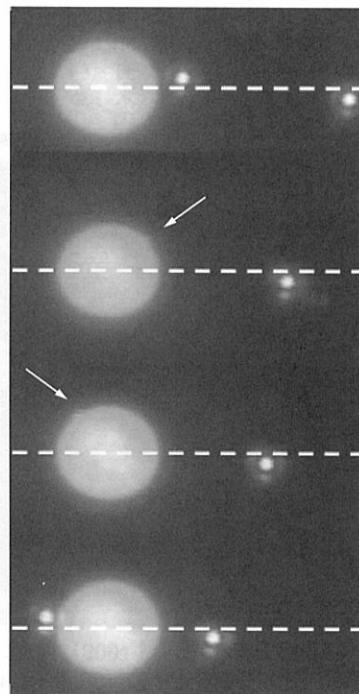


図8 銀河系中心のブラックホールを巡る恒星の軌道運動 銀河系中心の星の運動から太陽の100万倍の質量のブラックホールがあることが証明された
(European Southern Observatory, Press Release 17/02, 16 Oct. 2002 より改変)

図7 補償光学系をつけてみた
土星の衛星タイタン



原子なので、オレンジ色で光るレーザーを擊つとナトリウム層のなかのナトリウム原子が励起されて光ります。任意の方向にレーザーを擊つと、十分明るい星がつくれるという理屈です(図9)。

現在、五倍機能が高い百八十八素子の補償光学系とレーザー、そのレーザーを伝送する光ファイバ、すばる望遠鏡の先端からレーザーを擊つ小型の送信望遠鏡がすべて開発され(図10)、この春(二〇〇六年)、ハワイに輸送して、この夏に組み上げ試験を始めたと思つていいところです。

レーザーをやる人は、みんな気合いをいれてやらなければいけないみたいですが、ナトリウム層に撃ち込むレーザーを理化学研究所とわれわれが共同で開発しています。よく知られているネオジウムYAGレーザーには、一千六十四ナノメートルと一千三百十九ナノメートルという二種類の波長があります。なぜか天の恵みで、この二つの光を混ぜ合わせると、波長が五百八十九ナノメートルと、ナトリウム原子にほぼぴったりになります(図11)。これに気づいた人はすごいと思います。この原理を使ってレーザーを開発しました。

二〇〇五年の七月七日、七夕の日に、和光市の理化学研究所で一般公開して、デモとして図12のようにレーザービームを発振しました。図12で左がベガ、右がアルタイルです。一億円のレーザーポインターです。パワーがあるので直接夜空の星を指せるのです。

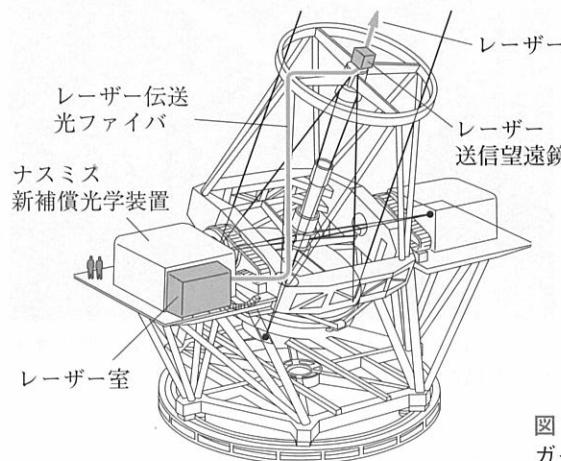


図10 すばる望遠鏡レーザーガイド補償光学系

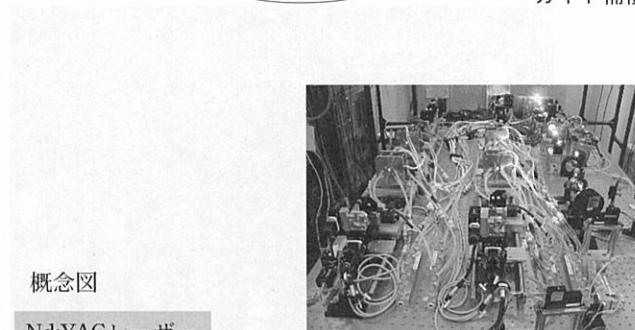


図11 和周波ナトリウムレーザー

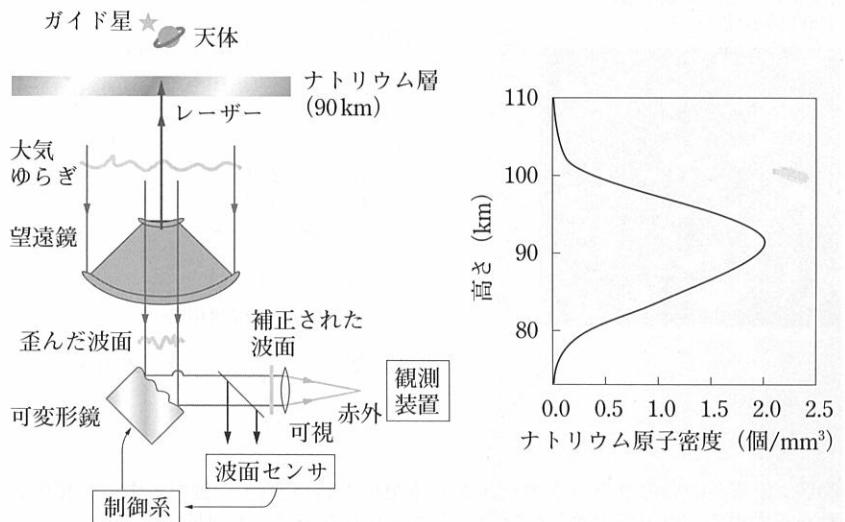


図9 レーザーガイド補償光学系の原理

す。図13は、九十キロメートルの高さに星をついたという証拠になつています。

現在すばる望遠鏡で補償光学を使わないと解像力は〇・六秒角ですが、百八十八素子の新しい補償光学系を使うと〇・〇六秒角となります。

ハッブル宇宙望遠鏡はテレビでよくきれいな絵をだすのに使われますが、それは真空中にあるからです。ハッブル宇宙望遠鏡だと、普段のすばる望遠鏡より少し解像力が勝ります。しかし、ハッブル宇宙望遠鏡は直径一・四メートル、すばるは八・二メートルですから、すばるの補償光学機能が完璧に發揮できれば、ハッブルを三倍上回ります。今開発している補償光学系があと一年後に稼働すると、素晴らしい画質の観測ができるようになると思っています。

私自身は遠い宇宙の銀河を観測しています。図14は、私たちが見つけた百二十八億光年のところにある人類が知っている一番遠い銀河です。私たちはこの銀河を発見しましたが、その構造をみたりすることは補償光学が使えないためまだできていません。一年後に補償光学系を使って、百二十八億年前の銀河の姿を実際にみてみたいと思っています。

表1は、二〇〇六年の遠方銀河ランキング・ベストテンですが、遠い銀河探しにおいてトップテンのうち九つまでを、すばる望遠鏡が独占しています。

補償光学技術の産業へのインパクト

補償光学は、天文学のニーズがあつてでてきたものですが、その技術はいろいろな面で応用できます。もちろん、レーザーを細くシャープにできるため、各種の材料を微細加工したり、パワー・レーザーで鉄材を切断するときの効率が上がります。医学応用も広がっています。レーザー手術や、究極の眼鏡では、補償光学を使って人間の視力を五・〇や一〇・〇にする研究が進んでいます。米国のロチエスター大学では補償光学眼鏡を開発しています。ただし、眼鏡といつても、今のところ光学ベンチほどもあるため

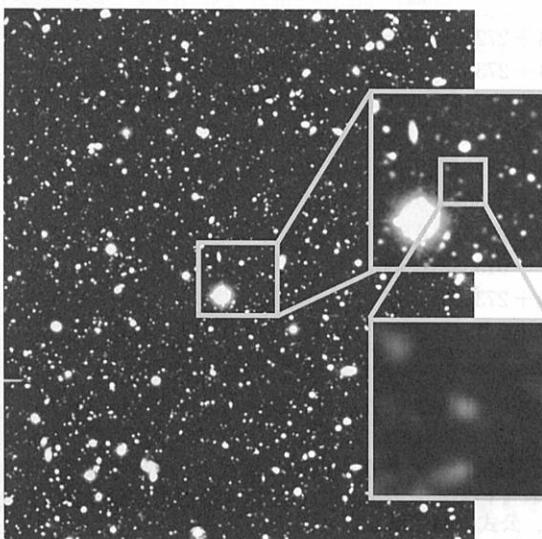


図14 128億光年の最遠銀河 IOK-1 の発見（改訂版）

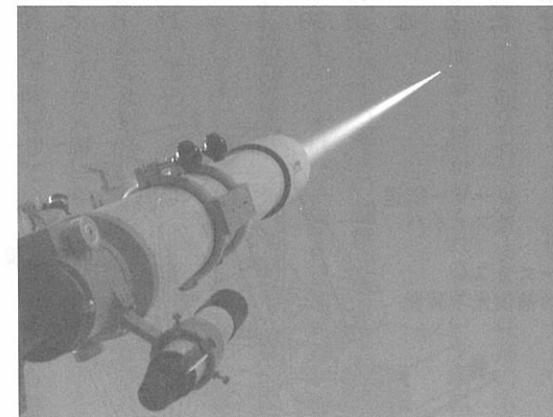


図12 レーザーガイド星生成実験 牽牛（アルタイル）と織女（ベガ）を示すレーザーポインター

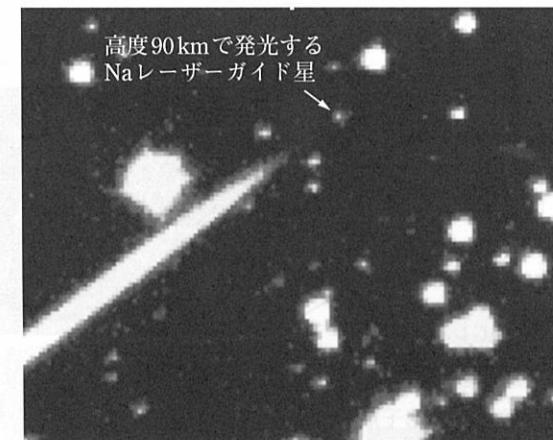


図13 高度90kmで発光するナトリウムレーザーガイド星 Na D₂線の波長に1,000万分の1の精度であわせる、あわせないをやってみる（口絵カラー参照）

実用化レベルではありません。しかし、それを使ってみた人の感想をきいてなるほどと思つたことがあります。

その話をする前に、眼の話をしましよう。図15は、サルの網膜の視神経を補償光学を使って撮影したもので、眼球のなかの水様体というゼラチンのようなものが波面をゆるがすため、解像力が落ちます。皆さん的眼のなかの水様体のゆらぎを測つてそれを直すと、光学系の全体の解像力が上がつて視神経細胞一個一個がみえるようになります。図15では、赤感度のある細胞と青感度のある細胞、色感度が違うものが区別できます。補償光学を使わない場合、いろいろな細胞で色をみると色が安定します。しかし、補償光学を使って点光源をみると、スポットの大きさが小さくなります。人間はじっとしているつもりでも動いていますので、像があちこち動き回ります。そのため、補償光学眼鏡装置を使って点光源をみた人の感想は、装置がオンになると点光源の色が赤になつたり青になつたり、色がちらちらしたというのです。それは、像がいろいろな視神経細胞の上を動き回ったか

表1 遠方銀河ベストテン（改訂版）

順位	天文名	座標	赤方偏移	距離 [#]	論文	公表日
1 [*]	IOK-1	J132359.8 + 272456	6.964	128.826	家ほか	2006年9月14日
2	SDF ID1004	J132522.3 + 273520	6.597	128.250	谷口ほか	2005年2月25日
3	SDF ID1018	J132520.4 + 273459	6.596	128.248	柏川ほか	2006年4月5日
4	SDF ID1030	J132357.1 + 272448	6.589	128.238	柏川ほか	2006年4月5日
5	SDF ID1007	J132432.5 + 271647	6.580	128.222	谷口ほか	2005年2月25日
6	SDF ID1008	J132518.8 + 273043	6.578	128.219	谷口ほか	2005年2月25日
6	SDF ID1001	J132418.3 + 271455	6.578	128.219	小平ほか	2003年4月25日
8 [*]	HCM-6A	J023954.7 - 013332	6.560	128.189	Huほか	2002年4月1日
9	SDF ID1059	J132432.9 + 273124	6.557	128.184	柏川ほか	2006年4月5日
10	SDF ID1003	J132408.3 + 271543	6.554	128.178	谷口ほか	2005年2月25日

距離は宇宙年齢を136.6億歳とするモデルによる値。単位は億光年

* この銀河のみケック望遠鏡で発見されたが、ほかはすべてすばる望遠鏡による発見

& 重力レンズ効果で増光した銀河で、その色から赤方偏移が7前後と推測されている銀河が数例報告されている。ただし、どれも分光観測での赤方偏移の確認はできていないため、公式記録ではない

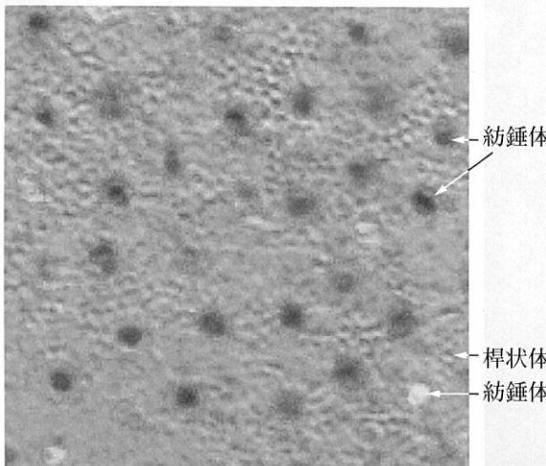


図15 補償光学によるサルの視神経細胞の高解像診断 (<http://www.cvs.rochester.edu/williamslab/>より許可を得て転載)

らだと思います。あんまりみえすぎると、みてはいけないものがみえたり、疲れると思います。しかし、そのような応用の研究すら始まっているのです。また、糖尿病の方が眼底出血をする前に事前診断してレーザーで患部の血管を焼くと、失明される方が少なくなります。

そのほか、電波望遠鏡、電波天文学でも似たような技術があります。また、大阪大学が研究されているレーザー核融合にもこの技術を導入して、たくさんのレーザービームを一か所に集め、核融合するときの効率を上げるような研究がなされています。

天文学は役に立たないといつてしまふ同業者がいますが、そんなことはありません。いろいろな応用につながります。望遠鏡の性能を考えると、光を集めの力は鏡が大きいほど大きく、集光面積は直径の二乗に比例します。集めた光が点光源の場合、どれぐらい小さくできるかという回折限界は波長で決まっており、直径の逆数に比例して小さくなります。大きな望遠鏡で補償光学が実現すると、像をより小さいところに押し込めることができます。したがって、中心の強度は小さいところにたくさん集まるので、補償光学が完全に動く大きな望遠鏡をつくると、直径の四乗でピークが上がりります。一方、背景光は直径に依存せず、コントラストは直径の二乗に比例します。したがって、大きいものをつくつて補償光学を動かせば、これまでの望遠鏡

より質的に違うものがみえるようになります。望遠鏡の値段は、直径の約一・五乗に比例します。その意味で、大きいものをつくったほうがお得ですが、それだけではなかなか納得していただけません。

私たちは今、日米欧で建設を進めている電波望遠鏡 A L M A に統いて、国際協力で三十メートルクラスの望遠鏡の建設を構想して相談を始めています。私自身も大学院で先生方に習い始めてからまだ三十年足らずですが、そのあいだの天文学の進歩は驚くべきものです。今後十年、このような望遠鏡ができると、宇宙観はますます驚くような進歩があると確信しております。是非、ご期待いただければと思います。

(あとがき)

このシンポジウムの半年後の二〇〇六年九月には、私たちの発見した最遠銀河の論文が『ネイチャ』誌に掲載されました。本稿では図14と表1は、この発展を反映して差し替えました。また、その翌月の十月には、新しい補償光学系の試験観測(図16)と、レーザーガイド星生成システムの試験(図17)が成功しましたので、それらの画像を補遺として追加させていただきました。

●参考文献

- 1 家正則、岩室史英、舞原俊憲、水本好彦、吉田道利編・『シリーズ現代の天文学 宇宙の観測I—光・赤外天文学』
(日本評論社、二〇〇七年)
- 2 家正則・『すばる望遠鏡』(岩波書店、二〇〇三年)
- 3 すばる室企画・『未知への航海(D V D)』(国立天文台/U N、二〇〇一年)
- 4 家正則監修・『二十一世紀の宇宙観測』(誠文堂新光社、二〇〇一年)
- 5 家正則ほか・『地球と宇宙の小事典』(岩波書店、二〇〇〇年)

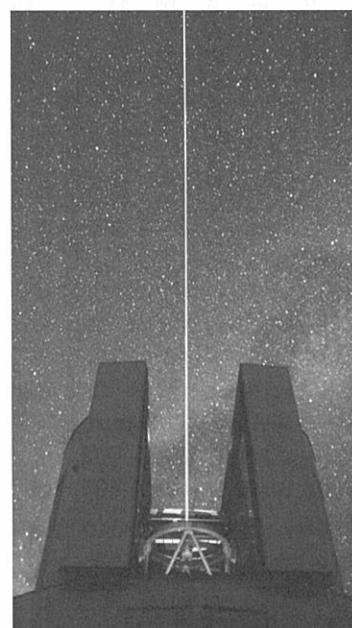


図17 すばる望遠鏡から発射されたレーザービーム

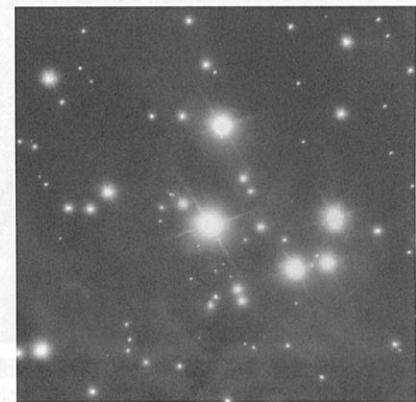
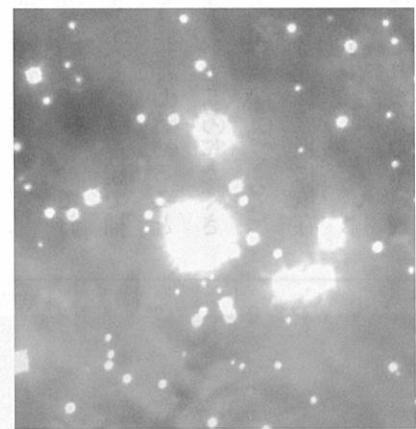


図16 188素子補償光学系の初画像