

いといても過言ではありません。

400年前、ガリレオは望遠鏡で月を眺め、そのスケッチを残しています。しかし、彼は単に画像を書き残しただけではなく、そこから月にある山の高さを推定し、地元の山よりもずっと高いという結果を出してから、「月は完全なる球体なのではない」と記しています。

## 用語解説

### ニュートンの力学の法則

物体に加わる力とその運動についての法則で、物体に力が加わると力と同じ向きに加速度が生じ、その大きさは力の強さに比例し、物体の質量に反比例するというもの。式で表わすと  $f=ma$  となる。発表当時は、3つの法則を組にして発表することが流行っていたこともあり、これに慣性の法則（「 $f=0$ なら  $a=0$  となる」に相当）、作用反作用の法則を加えてセットで語られることが多い。

### 加速度

速度の変化率のこと。直線運動の場合は、速度が速くなったり遅くなったりするペースとなるが、進む向きが変わった場合には速さが変わらなくても向きが変わった分だけ速度が変化したと考え、これも加速度とよぶ。物理学や天文学では1秒間の秒速の変化である  $m\ s^{-2}$  を単位としてよく用いる。

### 落体の法則

重力のみの影響で物体が運動する場合、その加速度は物体の質量によらず常に一定であるという法則。ガリレオが発見した、ピサの斜塔で大小2つの鉄球を落下させて示したという伝説があるが、実際には、2つの落下する鉄球を鎖で繋いだらどうなるのかなどの思考実験によって導いたといわれている。

### 等価原理

ニュートンの力学の法則で登場する質量と、重力の法則で登場する質量とが同一の物体に対しては常に完全に等しいということ。その理由は長い間わからなかったが、アインシュタインは逆に、これが重力の決定的な特徴だと考えることで、新しい重力の理論である一般相対性理論を構築することに成功した。

### 動力学的質量

ニュートンの力学の法則と重力の法則を組み合わせて、周囲をめぐる物体の運動から得た質量のこと。

写っている天体の正体を知ることは容易いことはあります。わかったときの喜びは苦労に増してすばらしいものです。この連載でもその解明のおもしろさの一端でも伝えることができればと思っています。

reference: Strigari L.E., et al. (2008) Nat 454, 1096-1097

あらゆる天域でハッブル宇宙望遠鏡を超える分解能を実現する

すばる望遠鏡

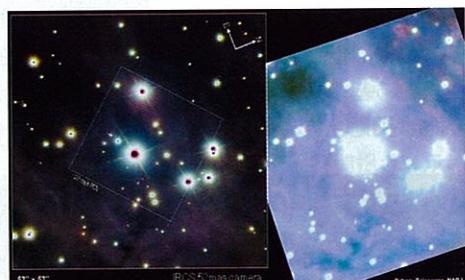
## レーザーガイド星補償光学系の実用化が見えてきた！



天頂付近に  
向けてレーザー光  
を打つすばる望遠鏡。光  
線の太さが太く見えるのは、試験観  
測でレーザーの位置を微妙に動かしているためだ。天の川が真正  
を横切るタイミングで撮影。まるで銀河の中を観測しているかのようだ。(キヤノンEOS 5D SIGMA 8mm F4 露出240秒 モ  
バイル赤道儀TOAST-Proにて自動追尾撮影)

2009年6月、  
ハワイ島マウナケア山頂のすばる望遠鏡から、  
オレンジ色のかすかな光線が  
満天の星空へと続いていた。  
これは、すばる望遠鏡が  
得ようとしている新たな“視力”。  
8年間の歳月と約7億円の予算を  
費やしたレーザーガイド  
星補償光学系(LGSAO=Laser  
Guide Star Adaptive  
Optics)によく  
実用化のめどがつき始めた。

取材／写真：竹本宗一郎(ZERO)

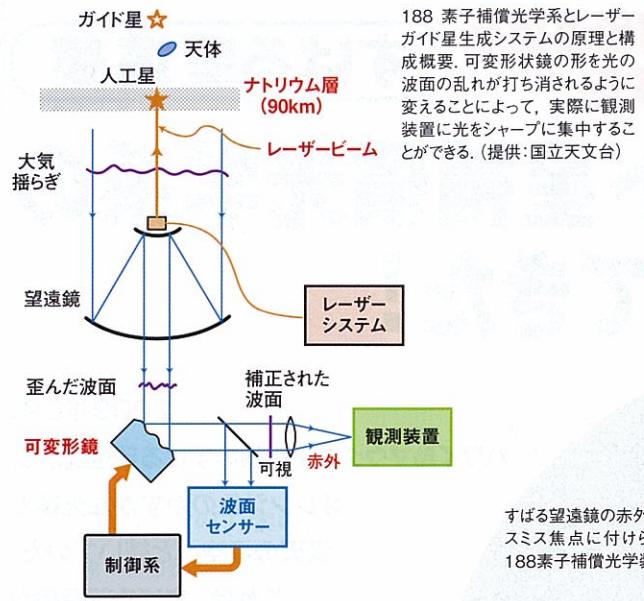


左が第2世代の188 素子補償光学系でとらえたトラベジウム(解像度 0''.06)。近赤外カメラ CISCO による右の画像(解像度 0''.6)とくらべると、その絶大な効果は一目瞭然。(提供: 国立天文台)

### ハッブルを超える 分解能を実現する補償光学系

高度約610kmの地球周回軌道を回るハッブル宇宙望遠鏡。その最大のメリットは、いうまでもなく地球の大気層を通すことなく宇宙を見わたせることだ。口径わずか2.4mの宇宙望遠鏡が今なお世界トップクラスの観測を続けられる理由は、まさに这一点にある。逆にいえば、地上にどんなに口径の大きな望遠鏡を建設したとしても、地球の大気を通過した星の光しかとらえることができないということだ。それはまさに水中から水面上を見上げているようなもの。たとえば口径8.2mのすばる望遠鏡が持つ理論的な回折限界は波

長2.2ミクロンの近赤外線では0''.06。しかし実際に観測して得られる分解能は0''.6に過ぎないという。大気の揺らぎの影響によって望遠鏡が本来持っている分解性能を限界まで使用できないというジレンマを抱えた天文学者たちがたどり着いた一つの答えが、補償光学という技術だ。波面補償光学装置(Adaptive

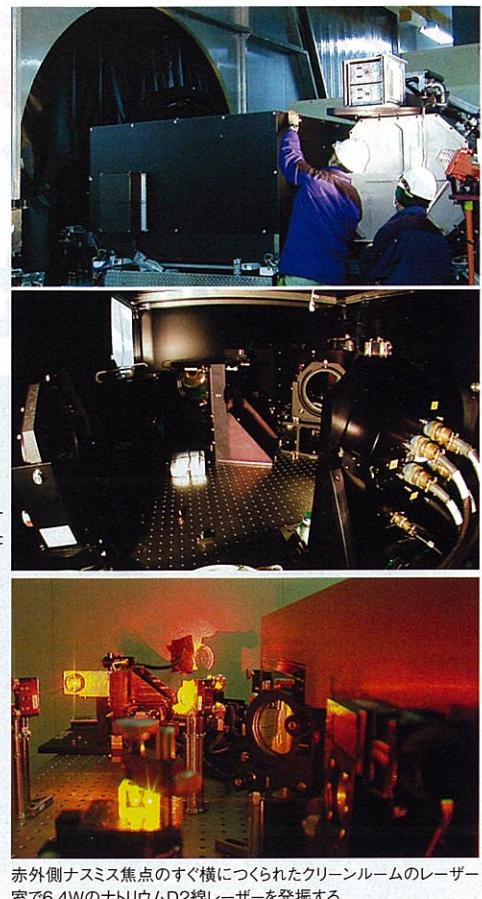


Optics) は、星からの光波面の大気揺らぎによる乱れを高速の波面センサーで測定し、大気の揺らぎが変化しない間に光路中に置いた可変形鏡を変形させて揺らぎを打ち消し、波面の乱れを補正するというものだ。この装置は夜空に輝く明るい星をガイド星として用いて大気の揺らぎをリアルタイムで補正し、望遠鏡が持つ理論的な回折限界にまで分解能を向上させることができる。

すでに世界各国の大型望遠鏡では標準システムとして導入されている補償光学系。国立天文台のすばる望遠鏡では現在、小型の薄膜鏡の形状を、188個のアクチュエーターで秒間2000回のリアルタイム制御を行なえる第2世代の188素子補償光学系が運用を開始している。これにより近赤外観測での空間解像力は、ハッブル宇宙望遠鏡の約3.4倍を実現したといわれている。しかし従来の補償光学系では、上空の大気の揺らぎを測る基準光源として明るい星を利用するため、根本的な問題を抱えていた。「条件を満たすガイド星が



6月の試験観測では、天体観測用超高感度カラーレビューカメラ (NC-R550a) を使い、高度90kmに生成されたレーザーガイド星をカラー動画で撮影することにも成功した。散乱光が途切れただその先に11等星の明るさで輝くレーザーガイド星の様子がはっきりわかる貴重な映像だ。



すばるの観測室の様子。6月1日から4日間にわたりLGSAOチームによる試験観測が行なわれた。全日とも良好なシーケンスで好天候のもと、計画していたほぼすべての試験観測をクリアできた。

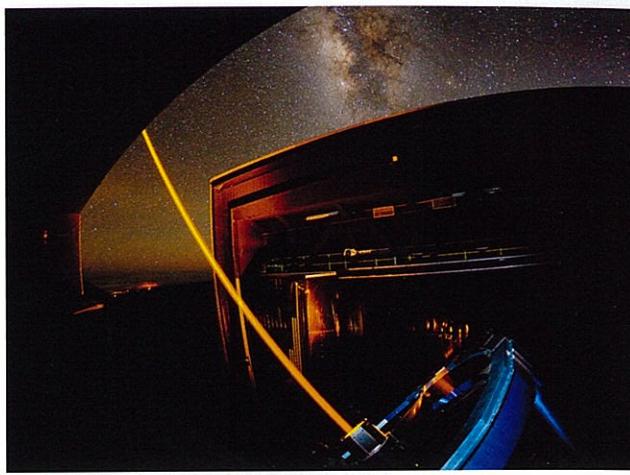
レーザー光を照射し、大気中に人工星をつくり出そうというものの、簡単な原理はこうだ。上空90kmの高さにナトリウム原子の分布密度が高いナトリウム層が存在している。このナトリウム層に向けて、望遠鏡からナトリウムD2線(波長 589nm)のレーザー光を照射。するとナトリウム原子が励起状態になり、高エネルギーの励起状態から基底状態にもどる際に、吸収した光と同じ589nmの発光現象が起こる。その光をガイド星として利用することにより、天域にかかわらず補償光学系を使った赤外線観測ができるようになるというものだ。

### レーザーガイド星補償光学系

すばる望遠鏡の補償光学系は、大きくはレーザー発振装置と送信望遠鏡、そして188 素子波面補償光学装置からなる。クリーンルームに設置されたレーザーの出力は現在6.4W。これをフォトニック結晶光ファイバーという最先端の光ファイバーによる高出力レーザー伝送系で、すばる望遠鏡のカセグレン副鏡の裏側に設置した口径50cmの送信望遠鏡に伝送し、効率およそ70%、約4.5Wでレーザー光を夜空に打っている。レーザー光を天頂付近に照射したときの人工星は10等星から11等星の明るさとなり、サイズは大気の条件等によって1''.2から1''.5程度だ。188素子波面補償光学系本体は、望遠鏡の赤外側のナスマス焦点に装着され、ここで星の光を受けた後、ダイクロイック鏡で可視光と近赤外光を分け、大気の揺らぎを測定する波面センサーに可視光を送り、近赤外光は観測装置に入れるというのが基本的な補償光学系の構成だ。

### プロジェクトチームによる開発がスタート

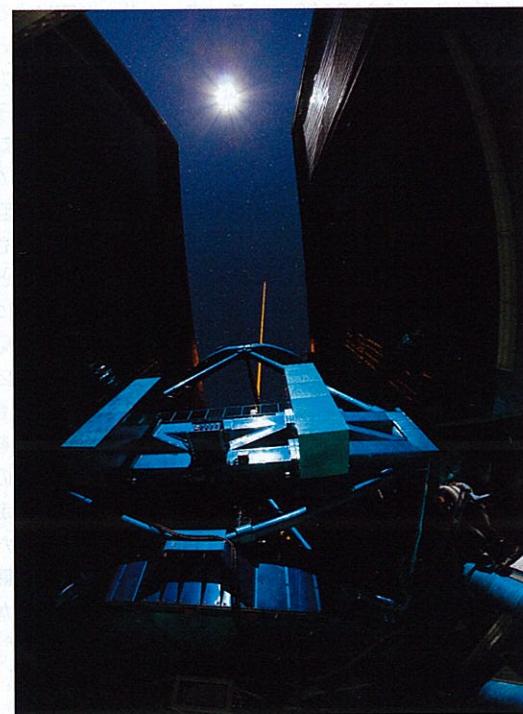
すばる望遠鏡の補償光学系にレーザーガイド星を導入しようという構想は、1996年ごろから静かに動き始めていた。その後簡単な試験や調査を経て、2002年には国立天文台の家正則教授を中心としたプロジェクトチームが結成される。ガイド星生成用のナトリウム光レーザー装置の開発は、理研中央研



すばる望遠鏡のカセグレン副鏡の裏に取り付けられた口径50cmの送信望遠鏡から高出力のナトリウムD2線レーザー光が打ち上げられる。これを拡散させることなく可能な限り並行光に保つことで、高度90kmに約11等級のレーザーガイド星が現われる。レーザー光は真下から見ると散乱光がもっとも明るく見え、ドームからは離れるほど暗くなっていく。

究所の固体デバイス研究ユニットの協力を得て実現した。波長 1319nm と波長 1064nm の赤外線で発振する2つのレーザー光を特殊な光学結晶に同時に入射すると和周波混合が生じ、ナトリウムD2線の波長589nm にほぼぴったりと合ったレーザー光を発生することができるという現象を利用した装置だ。そして2006年10月、初めてすばる望遠鏡から589nmのレーザー光が夜空に打ち上げられた。

### LGSAOの実用性が見えてきた



2009年2月には、もっと条件のよい天頂付近での観測で初めてレーザーガイド星を補償光学系の視野捕捉カメラでとらえることに成功した。しかし課題もあった。それはレーザーガイド星を視野捕捉カメラの視野にどんびしゃりと導くことだ。最初は視野から外れたレーザーガイド星を探し出すのに数時間要した。さらに問題なのは、天頂付近でレーザーガイド星を視野にとらえても、すばる望遠鏡の傾きや方向が変わると自重による複合的な

すばる望遠鏡のドーム内から撮影したLGSAO試験観測の様子。上空には上弦を過ぎた月が輝いている。

たわみが発生し、レーザーガイド星が視野捕捉カメラから簡単に外れてしまうのだ。当然、望遠鏡は観測する天体によってあらゆる方向に向けられる。そのため常にカメラの視野にレーザーガイド星がとらえられるようレーザーの方向を制御する必要がある。2月のフェーズでは、望遠鏡をさまざまな角度に傾け方位を変えながら、この制御のための多くのデータを取得した。

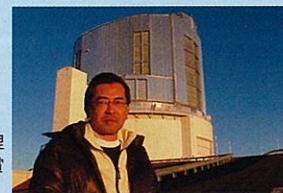
また、補償光学系で高い精度を得るには高度90kmでもっとも小さなレーザースポットをつくることが重要となってくる。そのためにレーザービームのフォーカスを正確に合わせる、つまり平行光になるようレーザービームの拡がりを調節するのだ。高度90kmの大気の中にあるナトリウム層も絶え間なく変動し、さ

らに望遠鏡を傾ければ望遠鏡とナトリウム層の距離はどんどん遠くなる。この距離変動も考慮し常に補償光学のカメラで最小像となるようにするための情報も必要だった。

4ヶ月後の6月には、前回得られたデータからフィードバックをかけた補正テーブルをつくり、ソフトウェア等による制御方法を確立。実際にレーザーガイド星のサイズを目標に近い大きさにすることができた。2月の段階では最小でも2角が精一杯だったが、6月の試験観測では、レーザーガイド星の大きさが1.5角を切るまで小さくできたことが簡単な解析から明らかになった。これによりレーザーガイド星補償光学系の実用化へのシナリオが一気に見えてきた。

## 「レーザーガイド星補償光学系(LGSAO188)で見る宇宙」

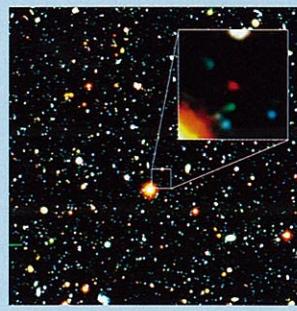
家 正則 1972年東京大学理学部天文学科卒。1977年同大学院理学研究科博士課程・天文学専攻修了。2008年仁科記念賞受賞。現在、国立天文台・光赤外線研究部教授、理学博士。



LGSAO188では、これまでの補償光学系と違って、観測したい任意の天体のすぐそばにレーザービームで「人工星」をつくり、その光の揺らぎを高速測定して大気揺らぎの効果を打ち消し、観測したい天体を約10倍の解像度でくっきりと写し出すことができる。これまでの補償光学系は、明るいガイド星の近くにたまたまある天体しか観測できなかった。つまり遠い銀河の観測などには使えなかっただけに、LGSAO188への期待は大きい。試験観測開始に向けて、LGSAOと近赤外分光撮像装置IRCSの特徴を活かすさまざまな観測テーマについて関係者は考えをめぐらせている。

我われが2006年に発見した129億光年の最遠銀河IOK-1は、まだ補償光学系で見ていない。世界でも最高の切れ味を誇るすばる望遠鏡といえども、裸眼ではIOK-1は赤い寝ぼけたシミにしか見えない。LGSAO188のハイテク眼鏡を利かせると10倍の解像

度でその構造が見えるのである。この時代の原始銀河はまだ小さく、形も整っていないものが多くたと考えられている。その中でも格段に明るいIOK-1は複数の原始銀河が衝突合体して成長段階にあるものなのではないだろうか。100



2006年に発見した129億光年の最遠銀河IOK-1 (拡大図中心の赤い点)。(提供: 国立天文台)

億光年かなたの多数の銀河の構造を調べると、原始銀河から銀河が成長してきた様子を調べることができるだろう。

銀河団や銀河の重力レンズ効果で多重像が見えるケーサーや銀河もLGSAO188でぜひ見てみたい。多重像の位置や明るさをLGSAOで精度よく測ると、レンズ銀河や銀河団の重力場構造を決めることができる。ケーサーが変光すると、複数の像の変光に時間差が生じる。これを測るとハッブル定数を決めることができる。いろいろな赤方偏移での重力レンズ効果の測定からは宇宙膨張の様子を調べることができ、ダークエネルギーの正体に迫ることができるかもしれない。

110億光年ぐらいまでの明るい銀河ではIRCSの分光機能を利用して、銀河回転や速度分散分布などの内部運動も調べができるだろう。輝線の分布から星生成率分布も調べることができる。

銀河系内では球状星団のLGSAO観測ではその中の星の位置をきわめて精度よく測定することができる。すばる望遠鏡のAO36で2001年に撮影したデータやハッブル宇宙望遠鏡で撮影された画像と比較すると、個々の星ぼしの位置変化を検出することができるだろう。また、球状星団の中の星ぼしの固有運動の測定から、球状星団の質量を測定し、ダークマターの分布と量を決めることができるだろう。

今年後半から技術試験観測を始めるLGSAO188で、どんなテスト観測をするか、現在関係者で毎週ゼミを開き、いろいろとアイデアを練っているところである。8年間の皆の苦労が花開くときが近付いている。

## LGSAO 運営上の問題

基本的には外に光を出さないよう配慮されてきた天体観測のスタイルが大きく変わろうとしている。現在マウナケアでは、すばる望遠鏡のほかにケック望遠鏡とジェミニ望遠鏡でもレーザーガイド星補償光学系が運用されている。そのためマウナケア山頂では、ときに3本のレーザー光線が夜空に向かって伸びている光景を目にすることがある。

レーザーガイド星は望遠鏡から夜空へレーザーを打ち上げることで成立する技術だ。それゆえ各天文台共通の問題点も抱えている。高出力のレーザービームを並行光に近い形で上空90kmのナトリウム層に当てるため、航空機や人工衛星に対する非常にきびしい基準を守らなくてはならない。レーザーを打つ日に関する情報を常にFAA(アメリカ連邦航空局)に提供し、航空機の事故がないように努めるのはもちろん、ドームの東西にスポットterとよばれる2名のスタッフを配置し、航空機の監視を常に行なうことが課せられている。スポットterは長時間にわたって常に肉眼で天域を監視し続け、観測エリアに航空機が接近するたびに無線で観測室に知らせ、レーザービームのシャッターを閉じることになる。現在は30分から1時間交代でスタッフがスポットter業務を行なっているが、これは大きな負担だ。

さらに人工衛星の存在も大きな負担になっている。レーザーによる人工衛星への被害を回避するため、関連機関へ自分たちがレーザーを向ける方向を4日前までに通知し、それに対して担当部署からレーザーを打ってよい時間帯を回答してくれるという。その回答に従ってレーザーを打つわけだが、試験も人工衛星への照射を避けるために、たびたびレーザービームのシャッターを閉じなくてはならなかった。また4日前までに観測する天域を報告しなければならないため、それ以降の天域変更ができないという不便さも抱えている。

## すばる望遠鏡への新たな期待

この夏からは、1ヶ月から2ヶ月ごとに定期的に試験観測を繰り返し、レーザーガイド星の明るさ、サイズの統計的取得や操作性の向上を目指しながら効率のよさを追及していくことになる。さらに年内には必要

目に見える部分は空気中の微粒子による散乱光に過ぎない。高度30kmを超えると散乱体が少なくなリーザー光が途切れたようになくなる。そして高度90kmのナトリウム層に到達すると共鳴散乱によって発光現象が起こる。それがレーザーガイド星だ。(キヤノンEOS 5D EF15mm F2.8 露出60秒 モバイル赤道儀TOAST-Proにて星景モードで自動追尾撮影)



取材日には、ジェミニ望遠鏡からもレーザーが打たれていた。このほかケック望遠鏡もLGSAOを運用しているため、マウナケア山頂に同時に複数のレーザー光が夜空へ伸びる光景に出くわすことも。

なすべてのハードウェアコンポーネントが揃うため、すべての機能を動かし実際の観測に使える形での技術試験をスタートさせる予定だという。

これまで、ガイド星のない領域ではまったく補償光学系を使うことができなかったすばる望遠鏡。しかし、ガイド星のない領域というのは、まさにすばる望遠鏡がもっとも得意とする深宇宙、遠方銀河の観測エリアだ。レーザーガイド星補償光学系が実用化されることによって、これまで以上の高分解能で高精度の観測が次々に行なわれるだろう。遠方銀河のチャンピオンキャラクタログの更新や、さらに新しい発見につながることに期待はふくらむ。

協力：家正則教授、高見英樹教授、早野裕氏、国立天文台

