

すばる望遠鏡で見る遠宇宙

国立天文台 教授 家 正 則

国立天文台の家と申します。きょうは1時間ちょっとお時間をいただきましたので、最初に私が企画して国立天文台でつくりましたビデオを見ていただきたいと思います。ガリレオ・ガリレイが初めて小さな天体望遠鏡を夜空に向けてから僅か400年の間に、人類の宇宙観はどのように変わってきたかということを軸にしたビデオです。

このビデオの後、すばる望遠鏡計画の目的と、そこに織り込んだ技術についてお話しします。天文学で要求する技術は、一般の生活への応用には必要ないレベルのとんでもない要求をすることが多いんですね。でも、そういうチャレンジングな目標に向けて開発された技術が新たな応用を生み出することができます。天文学は役に立たないというのを自慢しているようなところがありますが、最後に、決してそんなことはないという話をします。我田引水になりますが、すばる望遠鏡で開発した能動光学や補償光学という技術を例にとって、それらがどういう産業界の分野とつながるかというお話をさせていただければと思います。

では、まずビデオをお楽しみください。

(ビデオ上映: 25分間)

「宇宙の果てに挑む」 国立天文台ビデオシリーズ 3
定価2950円

販売元: 天文学振興財団 三鷹市大沢 2-21-1
TEL 03-3422-34-8801

いかがでしたでしょうか? 登場人物は外国人も含めすべて天文台の職員です。このビデオ作品は最近、科学技術庁の推薦作品に選んでいただきました。私もうれしく思っています。

天体観測の発展史 ————— *

天文学ではほかの自然科学と違って、研究する対象に働きかけてその反応を見ることができませ

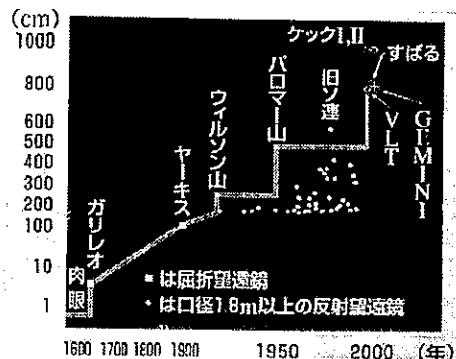


図1 望遠鏡口径増大の歴史

ん。ですから、われわれ天文学者は、ひたすら天体からやってくる電磁波など、いろんな信号を測定するしかないわけです。天体からの信号は非常に微弱で、しかもいろんな雑音の中に埋もれています。ですから天体観測では、高感度で低雑音な計測が命となります。画像を細かく見る空間解像力、スペクトルを詳しく分析するエネルギー解像力も大切で、天文学者はとんでもない要求を出します。

図1は、望遠鏡が大きくなってきた歴史を示しています。横軸が西暦年、縦軸が望遠鏡の大きさです。ガリレオ・ガリレイ(先ほどのビデオにも出てきたおじさん)が、望遠鏡を天体に向けたのは400年前のことです。そのときは直径が僅か3~4センチの手づくりの望遠鏡でしかなかったのですが、それでも直径5ミリから7ミリの肉眼に比べると、光を集めることの力は数十倍ぐらいになるわけです。ガリレオは、こうして初めて、木星には衛星があること、それから天の川は無数の星々の集まりであることを発見したのです。

その後、望遠鏡はどんどん大きくなり、20世紀の初めには直径1メートルのレンズを持ったヤキス天文台の望遠鏡というものが出来ました。

しかし、20世紀に入ってからの大きな望遠鏡はすべてレンズではなくて、鏡で反射する反射型望

遠鏡になりました。大レンズ用の均質なガラスをつくるのが難しいのと、光がレンズの中を通るときに波長によって屈折率が違うため、像が色づいてしまうという問題があったためです。

1947年、第2次世界大戦の真っただ中でしたが、アメリカのパロマー山に口径5メートルの望遠鏡が完成しました。その後、先進各国は1970年代～80年代に3メートルから4メートルの望遠鏡をたくさんつくったんですね。それは、むやみに大きくしてもいいものは出来ないことがわかつたからです。

望遠鏡はパロマー以降、約半世紀にわたり大きくならなかったのですが、この間に天文学は大いに進歩しました。それは、集めた光を記録する検出器が大幅に進歩したためなのです。私も、大学院に入ると、暗室で写真の現像法を学びました。しかしほんの数年で、そういう時代は終わってしまいました。1986年に私が日本で初めて本格的なCCDカメラを岡山天体物理観測所の188センチ望遠鏡につけて天体観測を行いました。ホームビデオの撮影にもよく使われているCCDカメラとほぼ同じなのですが、検出器部分を液体窒素で冷却して、雑音をゼロにするという特別な工夫をしたカメラです。

図2は、その感度の違いを表わした絵です。上は一番感度のいいフィルムで撮った写真です。微

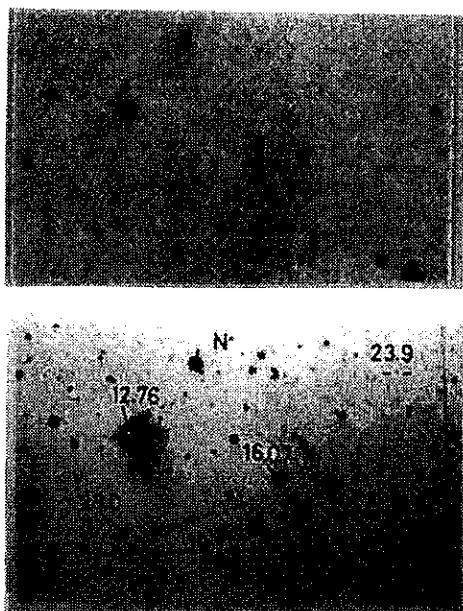


図2 写真乾板(上)とCCD(下)の感度比較



(国立天文台 磯部琢磨氏)

図3 衛星から撮影した夜の日本近海

かに写っているのが21等星ぐらいです。下の写真がCCDカメラで撮影した同じ領域の写真です。この写真には25等星まで写っていることが確認できました。検出器の感度が上がったために天文学は大いに進歩しました。写真乾板は集めた光の1%を有効利用します。CCDでは、最大で90%の光を有効利用できます。だから、集めた光をとらえる技術はもう完成に近づいてしまったんですね。そこで、さらに望遠鏡を大きくして光をもっと集め、解像力を高める必要が生じてきたのです。1980年代の中ごろから世界中の先端的天文台は21世紀に向けて、8メートル～10メートルクラスの望遠鏡の検討を始めたわけです。

図3は、人工衛星から夜の地球をとらえた写真です。どこを撮っているかは一目瞭然ですね。日本列島は、どこもかしこも街明かりでこうこうとしているのがわかります。北海道でも街明かりで、北海道の全体の形がよく見えますが、カムチャッカ半島だとか北朝鮮のあたりはやっぱりまだまだ暗いですね。この写真からもわかりますように、日本国内にはもう街明かりから逃れる場所はないんです。実は東京大学天文学科も昔は都心の麻布にありました。あまり夜空が明るくて観測できないというんで三鷹村へ移転したんですね。しかし三鷹も明るくなってしまって、1960年には岡山に天文台をつくりました。その岡山も明るくなって、われわれは今、ハワイに行っているんです。あと

20年もするとハワイもダメになって、どこへ行けばいいのかなと(笑)心配になりますが、その次は多分スペースに行くと思います。

現在、世界の最先端の天文台は、北半球ではハワイ島（海拔4200m）とスペインのカナリー諸島のラ・パルマ島（海拔2400m）という島の山頂にあります。北半球の天文台からは北の宇宙しか見えません。アメリカは伝統的に財閥の寄付で望遠鏡を天気の良いカリフォルニアにつくってきました。それで、ちょっと遅れて天文学にお金を使えるようになったヨーロッパは、南の宇宙の観測を分担する一大決心をして、8か国が国際共同で南米のチリのアンデス高原に天文台をつくりました。ヨーロッパから見ると地球の裏側にあたる場所にわざわざ天文台をつくったんですね。

8mすばる望遠鏡計画 ————— *

1984年に2年間の英独での研究期間を終えて帰国すると、すぐに私たちは技術検討会というのを組織して、今で言うすばる望遠鏡の建設の可能性について検討を始めました。約7年間いろいろな検討と予算要求を重ねて計画を認めていただき、1991年度から9年計画で、総予算約400億円で建設を始めました。図4には、すばる望遠鏡計画の概要を表にしてあります。

一番の目的は、できるだけ遠い宇宙を詳しく見ることです。遠くの天体からやってくる光はそれだけ時間がかかるってやってくるわけですから、現在見ている遠くの天体はそれだけ昔の姿を見ているわけです。ですから天文学者は、より遠くを見ることで宇宙の考古学を研究しているのです。もう一つの目的は、地球のような生命を宿せる環境にある天体がどれぐらいあるのかを調べ、できれば第2の地球を見つけることです。

建設した場所はハワイ島マウナケア山頂で、4200メートルあります。4200メートルだと0.6気圧しかありません。私も毎月ハワイに行って山に上がりますが、やっぱり体調が悪いときに無理すると、軽い高山病になって頭痛がしたりします。観測するうえでは条件がいいんですが、観測する人にとってはなかなか辛いところです。

すばる望遠鏡の直径8.2メートルの鏡は世界最

すばる望遠鏡

- ◆ 主目的：観測的宇宙論、星惑星系形成の研究
- ◆ 設置場所：ハワイ島マウナケア山頂(4200m)
- ◆ 望遠鏡：口径8.2m光学赤外線望遠鏡
- ◆ 特色：コンピュータ制御能動光学方式
- ◆ 0.32-20μm用の7つの観測装置
- ◆ 國立天文台ハワイ観測所：初の外国設置
- ◆ 9年計画、400億円、国際協力、運用法
- ◆ 予定：99年1月FL、2000年共同利用開始

科学技術省施設、文部省、独立行政法人

図4 すばる望遠鏡計画の概要

大で、しかも一番つるつるに磨かれた鏡です。コンピューター制御で鏡の形を調節するというアイデア、これがこの望遠鏡計画の一番の要でした。鏡を制御して光をコントロールしてしまう。20世紀は電子をコントロールする電子立国時代だったんですが、電子の次は光をコントロールする時代になるのではないか。そういう応用は結構あるのではないか?

波長域としては0.3ミクロンの紫外線から20ミクロンの赤外線までを観測します。このために七つの観測装置をつくっています。國立天文台ハワイ観測所は日本の國立研究施設として初めて外国の地に設置された研究所となりました。もちろん民間の企業の皆さんとっくに海外に支店とか工場を開いて社員を派遣しておられるわけですが、国の機関では外務省以外ではそういう前例がありませんでした。前例のないことだらけで随分苦労しましたが、いろいろな方の協力を得て、なんとか実現したわけです。

1999年の1月に天体からの光を初めて受け、新聞等でもすばるの写真が時どき報道されるので、すばる望遠鏡の名前をご存じの方も多いのではないかと思います。もう1年近くたっているのに、何をやっているんだとよく言われるんですが、七つの観測装置を順番に望遠鏡につけてテストし、望遠鏡の調整を慎重に進めてきました。ことしの12月から、いよいよ内外の天文学者に使ってもらうことになります。

世界最大・最高精度の8.2m主鏡 ————— *

望遠鏡の建設は9年計画でしたが、主鏡用のガ

ラスづくりに3年、磨くのに3年、そしてそれを設置し調整するのに2年ということで、8メートルの鏡をつくることが全体の工程を決めています。

観測時はドームを開けて空気を入れますので気温が変化します。光を集める光学系ですから、8メートルの鏡は、温度が変化しても光の波長の20分の1以上の変形が起きないようにしなければなりません。ですから、ガラスの膨張率が1度あたり100万分の1では不満で、1億分の1以下のゼロ膨張ガラスが必要となります。

世界中でこういうガラスをつくれる会社はドイツとアメリカの2社しかありませんでした。私たちはアメリカの会社を選びましたが、材料を吟味し特殊な方法でゼロ膨張のガラス材をつくります。一度に8メートルの大きさのガラスはつくれないので、1.5メートルぐらいのガラスブロックを55個つくって、亀の子のように並べ、大きな専用の炉に入れて火にかけ、隙間をちょっと溶かし合わせて1枚にしました。こうして直径8.3メートルの世界最大のガラス材がニューヨーク州のコーニングで1994年に出来上がりました。今度は、これを磨く番になります。大きなガラスの輸送も大作業でした（図5）。

研磨を請け負った会社はピッツバーグにあります。8.3メートルのガラス材を入れる輸送コンテナを載せたトラックで3車線の高速道路を借り切って、輸送することになりました。

8.3メートルのガラスの表面を光の波長の20分の1以下の凸凹にするといつても実感が湧かない

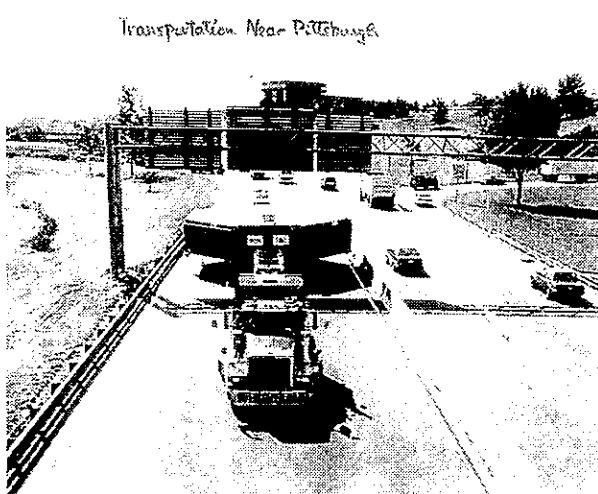


図5 主鏡材をピッツバーグの工場に輸送する風景

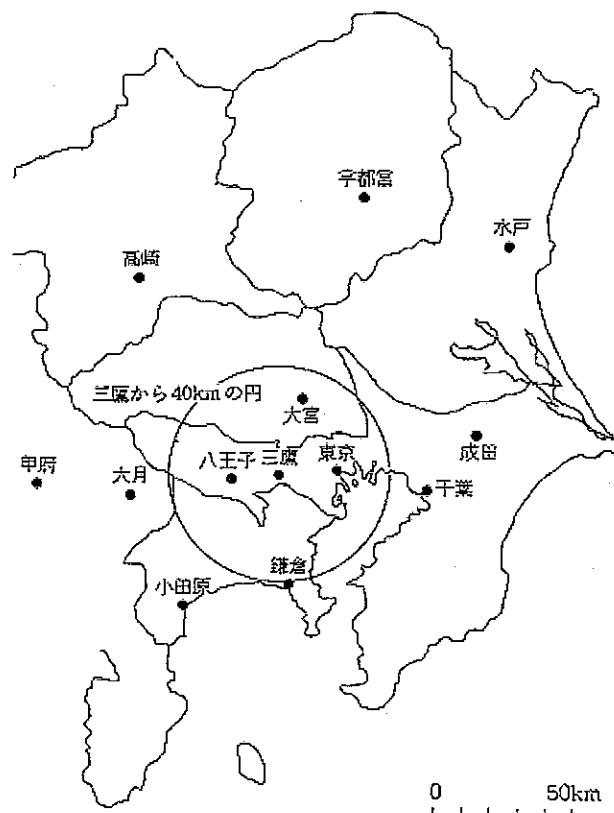
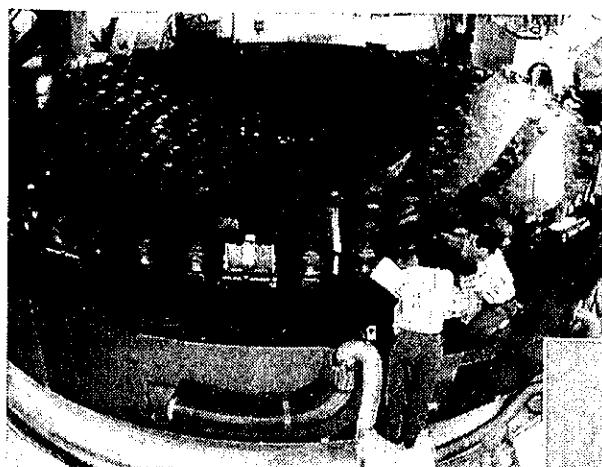


図6 鏡面精度は東京都を紙1枚の凸凹に均す程度

ので、これを1万倍に拡大してお話ししましょう（図6）。すると、直径83キロの土地を、光の波長の20分の1の1万倍、つまり0.3ミリの凸凹以下に地ならしすることになります。すばる望遠鏡では結局、最後は0.1ミリ以下の凸凹しか残さないまでに磨き上げたのです。0.1ミリというと紙1枚の凸凹しかない、そんな感じです。とんでもないことのようですが、現在の技術で慎重に行えば不可能ではないのです。

鏡の面は大体、曲率半径が30メートルの球面に近くなりますので、30メートルの距離から光を出すとほぼ戻ってきます。実際の研磨は、地下に高さ約30メートルの立坑をつくって行いました。正確には、主鏡はちょっと球面からずれた回転双曲面なので光の戻り方を見て、鏡のどこがどう凸凹しているかを測りながら磨くわけです。ガラスの研磨はとても根気のいる仕事です。どこか1か所擦り過ぎるとアウトなんですね。穴をつくってしまうと、その穴を消すには、もう一度、全部磨き直さないといけない。ですから毎日毎日測って山を見つけ、山を叩いていく。モグラ叩きのような



(1998年8月：右は筆者)

図7 研磨完了試験

仕事が続きます。

磨き上がった鏡（図7）は、直径が8.3メートルに対し、厚さが20センチしかありません。今までの望遠鏡の鏡は大体、直径の6分の1ぐらいの厚さを確保して、観測時に傾けても変形しないようにつくられてきました。ところが、すばる望遠鏡の鏡を、そういうやり方でつくると、特殊で大量にはつくれない高価なガラスを100トンもつくりなければいけない。工期も時間も現実的ではありません。ガラスが重くなると、ガラスを支える器だとか、望遠鏡の構造も重くなってしまって、全体の予算がそれに比例してふえてしまいます。天文学者って、大きな数字を平気で言いますし「何億円ください」なんて平気で言うんですが、その天文学者でも、さすがにこれは言っても貰えないだろうな（笑）と思うような金額になってしまふんですね。

そこで結局、20センチの薄さにすることを決意したんですが、これだけ薄いと望遠鏡を傾けると、光の波長の何分の1というレベルでは鏡がべこべこになります。鏡を見ていてもわかりませんが、天体撮影をするとその違いが出ててしまうのです。

さて、困ったと思ったわけですが、考えてみれば、どう変形しているかをきちんと測る術と、それをコンピューター制御で直す手立てを組み込んで制御してやればいいのではないか。その場合はむしろ薄い鏡のほうが直しやすいのではないか、と発想を転換してみたわけです。図8が、能動光学機構と名づけた、すばる望遠鏡の主鏡の形状を力制御する支持機構の概念図です。

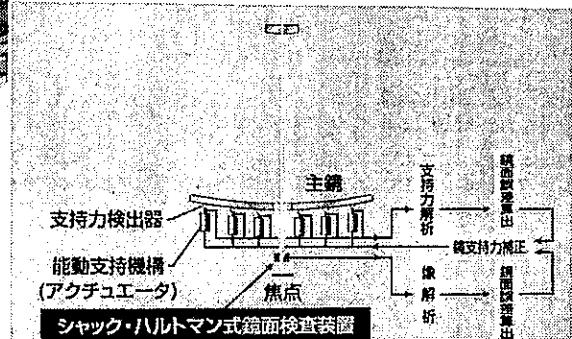
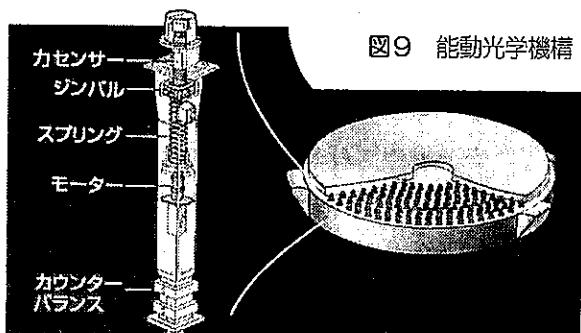
図8
能動光学の
基本原理

図9 能動光学機構

持っていくと普通は20度ぐらい温度が下がります。これまでの望遠鏡の鏡は実はこのため歪むのですが、形を制御できるようにすれば、こういう歪みもいつでもチューニングできるわけです。そういう新しい方法に賭けてみようと、すばる望遠鏡の基本設計を始めたわけです。

すばる望遠鏡のプロトタイプとして、厚さ2センチ、60センチの小型の模型をつくりまして、先ほどの方式で12点のアクチュエーターで形を制御する実験をやりました。図10は、1989年10月14日、日本天文学会の発表の二日前の晩にやっと取れたデータで、今でもよく覚えています。実際にガラスの形を二つ折りに曲げるという実験をしたんですが、見事に曲がりました、この考え方で望遠鏡が出来るなという確信を得たわけです。

ハワイでの建設と立上げ ——*

ハワイ島の山の上というのは火山灰の頂上です

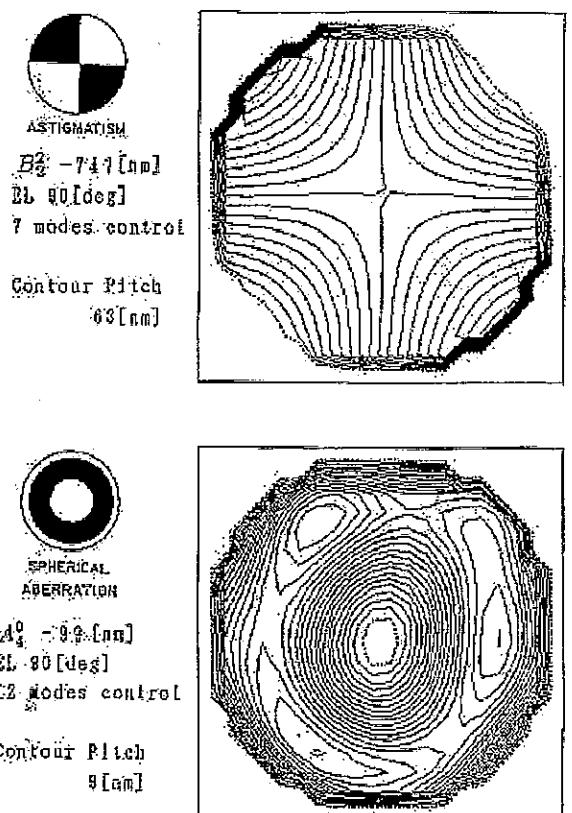
ので岩盤がありません。したがって重いドームを置くと不等沈下する心配があり、掘り返してセメントをまいて、地盤改良する工事を最初に行いました。ドームの形は他の天文台と違って円筒型になっています。これは水流実験などで、地上近くの乱れた風を望遠鏡の前に巻き上げないようにする工夫として採用したものです。ドームには大きな窓が幾つもつけてあり、観測中は適度に風を通して、ドームの内外の温度差を無くして、陽炎が立たないように工夫しました。シャープな画像が撮れることが実証され、このドームの設計方針は正解だったと思っています。

国立天文台ハワイ観測所（図11）は、ハワイ島の人口5万人ぐらいの町ヒロに建設されました。この町はずれにあるハワイ大学ヒロ分校のキャンパスの一角をハワイ大学と土地の貸借協定を結んでお借りしています。山頂もハワイ大学が管理していますので、山頂と麓の2か所を借りています。借料は毎年きちんと払っています。年間、両方合わせて2ドルです（笑）が。それだけ安く借りている代りにというわけではありませんが、出来上がった望遠鏡はハワイ大学の研究者にも優先して使っていただることにしています。

すばる望遠鏡で観測したデータは貴重ですので、全部、光ファイバーケーブルで山頂から麓の観測所内のデジタル電子図書館に転送し保存します。ここには数百テラバイトのデータが蓄えられるデータライブラリーがあります。観測して1年半たら観測者の優先権はなくなり、世界中の天文



図11 国立天文台ハワイ観測所

(1989年10月)
図10 能動光学デモ実験

学者に公開します。

時差が5時間ありますので、日本の午後1時はハワイの夕方6時になります。将来的には観測者はわざわざハワイに行かなくても日本から観測ができるようになりますとも考えています。実際、今でも毎日ハワイとTV会議で結んで、現地の職員と連絡調整をしています。

（ここからは、パソコン映像に切り換える）

2週間ほど前に新聞等で、すばる望遠鏡に不具合があったという報道があつて、ご心配いただきましたが、現在、望遠鏡は復旧して動いています。すばる望遠鏡は、400億円のプロジェクトで、多分2000人・年ぐらいの人が投入されていると思います。コンピューターのソフトウェアだけでも何十万行ものプログラムになります。そういう巨大システムにバグがないはずはありません。望遠鏡、観測装置をいろいろと試験調整して、不具合を直し、システムの性能を上げる地道な努力を続けています。

能動光学システムは基本的には線型代数なんですね。フックの法則で力を加えると鏡は曲がると

いうことと、あとは任意の変形は固有関数で一意的に展開できるということ。この二つの原理しか使ってないんですね。ですから難しいことは何にもやっていないので、この方式で基本的に成功するはずということは初めから確信を持っていたわけなんです。でも、そうはいっても、実際に星の光を受けるといろいろなトラブルがあって、なかなかすぐには、いい写真は撮れないだろうと思っておりました。

しかしながら、ファーストライトを迎えてから1週間で非常にきれいな写真が撮れました。私も現場で、アンドロメダ大星雲の観測に立ち会ったのですが、今までに見たことがないようなきれいな写真が撮れました。実際に写っている星のシャープさを測ってみると、いきなり0.4秒角、0.5秒角という数字が出たのです。これには私自身も驚き、感激しました。この望遠鏡をつくれば、ハワイは気象条件もいいし、空気の揺らぎを押さえるドーム設計をすることで、星の像が0.3秒角にまで縮まりますということを、私たちはずっと主張してきたわけです。日本で星が一番すっきりと見える岡山天文台でも星の像が1秒角より縮むことはなかなかないんです。だから、0.3秒と概算要求書や提案書に書いたときは、実は本当に実現するかどうかちょっと不安に思いながら、背伸びして書いていたのです。実際に、最高記録は次に述べるように0.2秒角にまでなりました。そういう意味では、やはり日本の技術力、システムエンジニアリングのレベルが高かったということを、すばる望遠鏡は実証したんじゃないかなと思います。

最初のビデオで、ガリレオやハッブルにより人類の宇宙観が膨らみ、そして、すばる望遠鏡の新しい発見に期待がつながる、という話をいたしました。そして今、すばる望遠鏡は世界一の鏡を完成し、すばる望遠鏡について観測するための合計7台の観測装置を、それぞれハワイで試験調整中です。

図12は、すばる望遠鏡で星がどれくらいシャープに写ったかという最初の6か月ぐらいの統計を取りたるもので、岡山の望遠鏡で星を見ると普通2秒角ぐらいに広がってしまいますが、それがもういきなり平均で0.6秒角とか0.7秒角というシャー

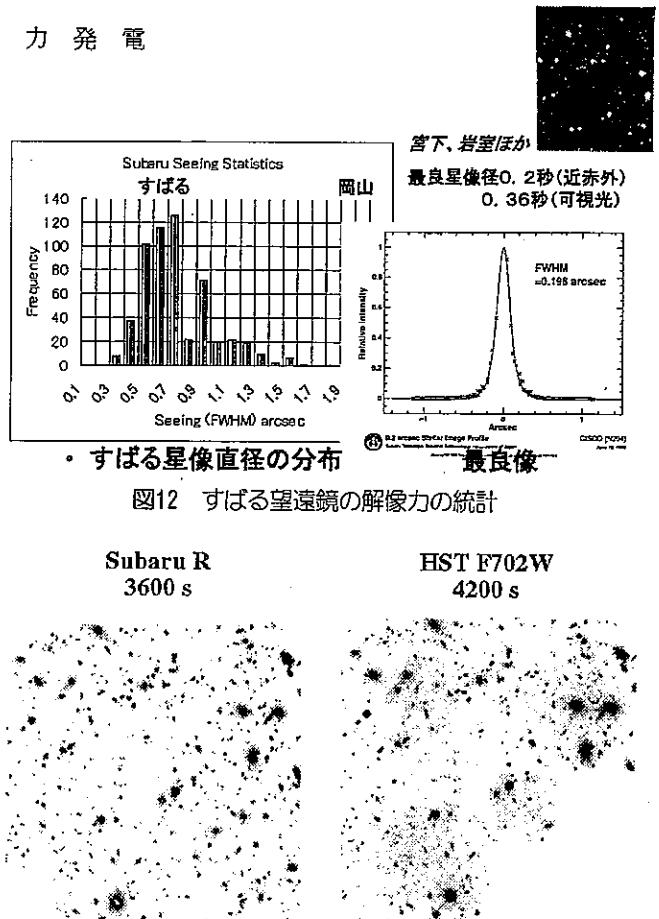


図12 すばる望遠鏡の解像力の統計

図13 銀河団エーベル851のすばる画像(左)とハッブル宇宙望遠鏡画像(右)

プな像になっているんですね。最高記録は0.2秒角です。0.2秒角になるということは、星の大きさが10分の1になりますから、光がそこへ全部集中するわけです。しかも岡山の望遠鏡に比べて、すばる望遠鏡は鏡の面積が15倍ぐらいあります。15倍の光を面積で100分の1のところに押し込められるですから、非常にシャープな強い光になるわけです。このため今まで見えなかつたような微かな天体も見えるわけです。

図13は、新聞などでよく報道されますハッブル宇宙望遠鏡で観測した銀河団を、すばる望遠鏡で観測して比べてみたものです。露出時間は両方とも1時間。すばるのほうが本当はむしろ10分間短いんですが、見えるぎりぎりの天体を数えてみると、全く同じぐらいの撮像性能を持っていることが証明できました。

地上の望遠鏡は揺らぐ空気の中で観測していますので、解像力では2倍負けていますが、鏡の面積はハッブル宇宙望遠鏡より13倍大きく、光をたくさん集められますので、見え方という意味では

負けていないんですね。詳しい話は省略いたしますが、今までの理論ではとても説明できないような真っ赤っかの銀河というのが今回の観測で見つかりました。このスペクトルを調べて、宇宙の始まりのころの銀河の正体を解明したいと思っています。

天体のエネルギー発生機構 —————*

星は、核融合反応で水素原子をヘリウムに変えるということで光っている核融合炉（図14）です。太陽は、その中心で安定な核融合反応を起こして約100億年間燃えます。宇宙は、約150億年昔のビッグバンで始まりましたが、その最初の3分間から5分間で宇宙のすべての元素のうちの約6%がヘリウムになりました。でも、ビッグバンはすごい勢いで膨張してしまって、温度が急激に下がったので、水素原子をヘリウムに変えるのが精いっぱいです。それより重い元素をつくる暇がなかったのです。ですから、いま私たちの体をつくっている炭素や酸素や鉄など、ヘリウムより重い元素はすべて、その後、どこかの星の中で核融合反応でつくられたものなのです。私たちは、そういう意味では「星の子」なわけです。

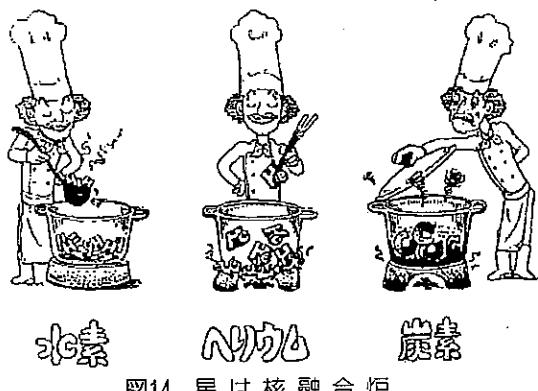


図14 星は核融合炉

水素がヘリウムに燃える段階を主系列と言いますが、この核融合反応は非常に安定で長く続きます。星の寿命は、この核融合反応が続いている時間です。太陽の場合は約100億年。もう既に50億年燃えていますので、あと50億年ぐらい、こういう状態が続きます。

星の中で水素が燃えてヘリウムが中心にたまつてくると今度は、そのヘリウムが燃えて炭素になります。そういう核融合反応がどんどん進むわけ

ですが、核融合反応でつくれるのは鉄までなんですよ。鉄より重い原子を融合させようとすると、逆にエネルギーを入れてやらないとつくれないからです。このため、鉄まで星の中でつくられた段階で核融合反応は止まってしまいます。鉄がたくさん出来た星は、その中に最後に光分解反応というのを起こして爆発し、超新星となります。超新星爆発では約1000億個の太陽の光に相当するような光をほとんど一瞬のうちに出してしまいます。

ここまで話は、核融合でのエネルギー開放ですが、天文学では核融合では説明できないほど効率の高いエネルギーを開放している天体もあります。例えばクエーサーという天体は、その明るさが1か月程度で変わるために、その天体の大きさは、光が1か月で走る距離に相当する1光月よりも大きくはないことがわかります。ところがクエーサーから出ている光の量は天の川銀河全体よりも100倍も明るいのです。

核融合反応で水素からヘリウムが出来るときには、静止質量の0.7%が失われてエネルギーになります。ところがクエーサーのエネルギー発生率は、こんなものじゃ説明できないくらい大きいのです。核融合反応よりも効率の良いエネルギーの発生機構として考えられているのは重力エネルギーの開放です。ブラックホールのように非常に重力場が強いところにガスが落ちていくときには、ダムの水力発電と同じですが、落差に相当する位置エネルギーが開放されます。ブラックホールのエネルギーが開放機構を利用して火力発電よりも何倍も効率の良い発電所をつくるなんてのは、SFの世界の話でしょうが、そういうエネルギーの発生機構もあるのです。

補償光学とその応用 —————*

すばる望遠鏡のドームの形は非常にへんてこな形（図15）をしています。これも醉狂でやったのではなくて、観測時に空気の乱れの影響が一番少なくなる形をいろんな実験で検討し、風通しが良く地上付近の乱れた風が巻き上がらない形ということで、円筒型のドームにたどりついたのです。私たちの能動光学の実験では、実は、もう一つ重要な発見がありました。夜になると、普通どこで

も気温が下がってきますね。それに伴ってガラスも冷えていきますが、ガラスの冷え方は気温よりも遅れるので、気温が下がっている間はガラスのほうが暖かい状態が続きます。つまり、これまでには、どこの天文台でも夜間観測中に鏡から陽炎を立たせながら観測していたのです。すばる望遠鏡は、こういうことが起きないように、夜の気温を予測して、ガラスをそれよりも冷やすという努力をしています。こういういろんな努力が、すばる望遠鏡の解像力を高めることに役立っているわけです。

8メートルの主鏡を1秒間に1回ぐらいたつ力を調整して、いつもチューニングするシステムを能動光学と私たちは名づけました。この方式の実現により、鏡が傾いても、温度変化しても常に調整できる理想的な望遠鏡が出来ました。能動光学で唯一直せないのが大気の揺らぎによる結像の劣化です。大気の揺らぎは非常に速くて、1秒間に1000回ぐらい揺れの状況が変わるので、団体の大きい直径8メートルの主鏡で直すことはとてもできませんが、時定数の短い小さな薄い鏡でなら素早く直すことができます。揺らいだ大気の底でも、揺らぎを測る手段と直す手段を組み込めば、真空中で見ているのと同じぐらいシャープに観測できるはずです。私たちは大気の揺らぎを実時間で測定し補正する光学系（補償光学システム）をつくりました。すばる望遠鏡の主鏡能動支持システムを直径10センチ程度の非常に薄い鏡で実現し、高速応答を持たせたミニチュア版です。今、この

図15 すばる望遠鏡
ドーム

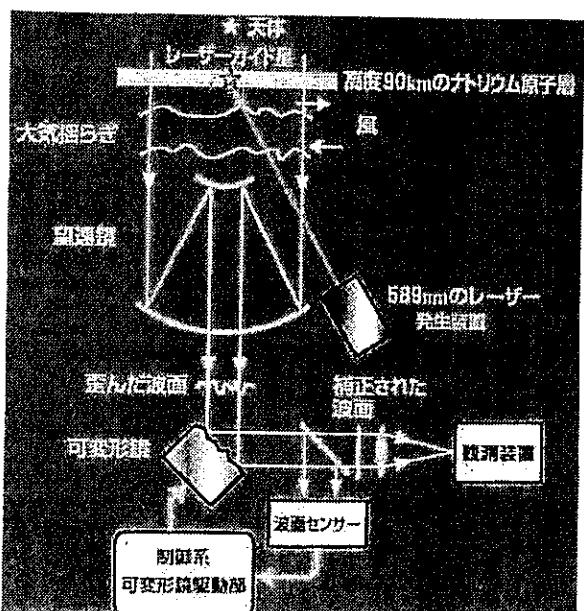
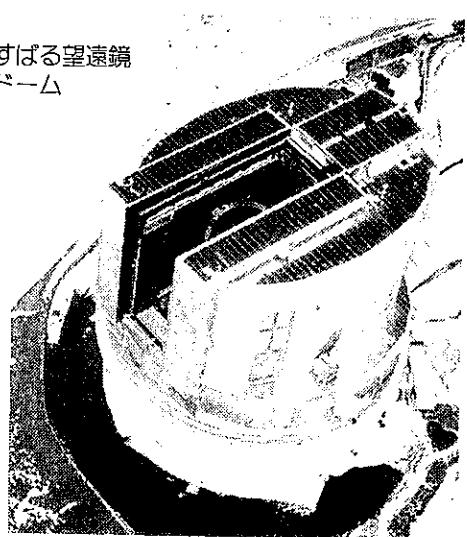


図16 補償光学の原理

システムはハワイに送って実験中ですので、この秋には、すばる望遠鏡に非常に強力な補正眼鏡がつくことになります。解像力がうんと上がったというご報告ができるかと思います。（図16）

このシステムを実際に動かすには空気の揺らぎを測らないといけません。普通は観測したい方向にある明るい星を使って、空気の揺らぎを1秒間に1000回測るんですが、そんなにいつも都合よく明るい星があるわけではありません。そこで、好きなところに明るい星があると便利だと、とんでもないことを考えた天文学者がいました。彼が考へついた方法は、地上からレーザービームを撃って上空に光る点をつくるというアイデアでした。高速道路でよく使われるオレンジ色のナトリウム灯というのがあります。この光で発振するようにレーザーをつくると、面白いことができます。レーザーの光は大気中の塵とか窒素、酸素の分子で散乱されるので、スターウォーズのようなレーザービームが見えます。上空に行くとだんだん分子も塵も無くなるので、ビームの先のほうでは見えなくなるのですが、地球の大気の高度90キロのところにナトリウムの原子密度の高い10キロぐらいの厚さの層があり、このレーザーで励起されたナトリウムの雲がその高さで光り、まるで星のように見える（図17）のです。これをレーザーガイド星と呼びます。国立天文台では通信総合研究所

と共同で、このようなレーザーガイド星の発生実験を始めています。数年後には、この技術を使って、すばる望遠鏡で、どこを向いても大気の揺らぎを直し、すばらしい画質の観測ができるようにしたいと考えています。

光の波面の乱れを測って直すという技術、これを補償光学と私たち呼んでいますが、こういう技術は、他にも応用の可能性がいろいろとあります。電力業界にも関係の深いレーザー核融合やウラン濃縮のパワーレーザーのビーム効率の向上、電力設備への落雷を避けるためのレーザー誘雷、レーザー加工、マイクロ波送電、レーザー手術などの応用で光面を制御してビームを絞る技術として接点があると思います。

最後になりますが、ことしの3月に私が組織委員長を務めまして、ミュンヘンで開催した国際会議では、15年20年後の望遠鏡を考えるセッションを設けました。一番元気のいいグループは、直径100メートルの望遠鏡(図18)の建設も今の技術の延長で出来ないわけではないと報告しました。ただし、このような超巨大望遠鏡を有効利用するには、空気の揺らぎを直す技術を今の100倍~1000倍、高度にしなければならない。ここが、なかなか大変です。しかし、そういうことが実現すると、それこそ本当に宇宙の果ての天体が見える、あるいは太陽系以外の惑星、地球のような環境を持った惑星を見つけることもできるかもしれません。天文学というのは今、そういう状態にあるということをお話しさせていただきました。

時間になりますので、これでお終いにさせていただきます。

(拍手)

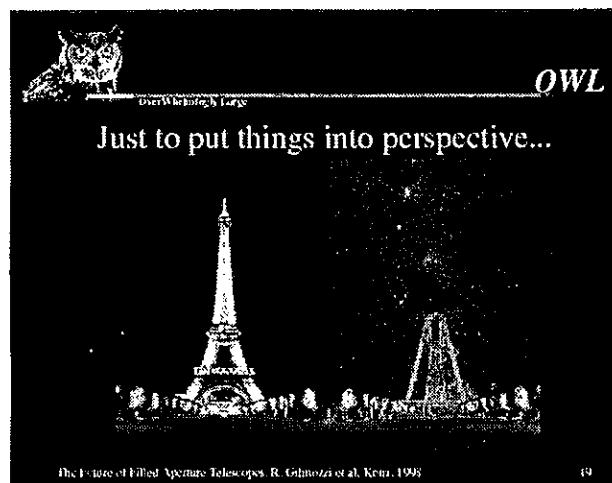
〔質疑応答〕

——大変楽しく聞かせていただきまして、ありがとうございました。ハワイ観測所のすばる望遠鏡は一般の見学者も中に入れて見学できるのでしょうか。

家 高い山の上なので、例えば心臓に問題がある方とか、妊娠中の方、16歳以下の方は登頂できませんが、私たちも400億円の税金を遣わせていただいているので、今後、見学には対応したい



図17 レーザーガイド星



〔欧洲南天天文台〕
図18 100m 望遠鏡構想

と思っています。これまでに私たちがお世話になったVIPの方はお断りできないので見ていただいているが、昨年だけでも紀宮親王をはじめとして2000人を超しています。うちの観測所のスタッフは赴任した職員が30名と現地雇いの職員が40名おりますが、その対応がなかなか大変で、頭を悩ましているところです。

基本的には、望遠鏡の中に人が入りますと、1人50ワットから100ワットの熱を出します。鏡すら冷やして揺らぎを出さないような設計ですので、ドームには人が入らないことを前提に設計をしました。ただ、見たいというご要望が非常に強いので、今、一般の見学者にもテレビで自由に様子が見られるように建物の構造を改修する計画を練っています。それが出来るまで、もう少しお待ちください。