

すばるからTMTへ—TMT計画の科学的意義と期待される成果—

全国プラネタリウム大会 2013・西東京 記念講演 2013年6月3日 於：多摩六都科学館

講演者：家 正則（いえ・まさのり 国立天文台TMT推進室室長）
聞き手：高柳 雄一（たかやなぎ・ゆういち 多摩六都科学館館長）

今回の記念講演の様子は、ビデオアーカイブとして下記 URL (U-stream) で動画配信されています。紙面上では割愛した画像も含め、約1時間半の講演の一部始終を見ることができます。ぜひご覧ください。
<http://www.ustream.tv/recorded/33751991>

(アナウンス) たいへん長らくお待たせいたしました。それでは本日の記念講演をはじめさせていただきます。本日の記念講演は、当館（多摩六都科学館）の館長であります高柳館長と、国立天文台TMT推進室の家先生との対談形式で行わせていただきます。それでは、高柳館長、どうぞよろしくお願ひします。

(高柳雄一多摩六都科学館館長、以下、高)

ただいまマイクをお預かりいたしました。開催館ということで、不肖私がお引き受けいたしましたけれど、もし、途中で何か「こんなこと聞いてみたい」という人があったら、举手をいただければ、私、マイクを持って駆けつけますから（笑）。

ということで、実は、家先生とは不思議なご縁がありまして。距離のミステリー、と言ったほうがいいのかなあ。お互いに住んでいる場所がですね、東京なのでなんとか区なんとか何丁目ってのがあって、何番号ってあるんですけども、何番っていうところがほんのちょっとだけしか違わない。すごく近くにお住まいなんですね。そういうのがありますて、前に何かのイベントでご一緒したときに、あ、年賀状でわかつたのかな、その時先生がお宅で白い犬を飼っていらっしゃった。あの有名なコマーシャルに出てくる犬にそっくりだったんですね。僕、知り合いの人に「家先生のところには白い犬がいる。家先生が犬のお父さんだ」って言ったら、その人に叱られた。僕、知らなかつた。「あの犬」がお父さんだった（笑）。そんなわけで、まさに距離のミステリー。ミステリーといえば先生、もうひとつあるんですよね。

(家正則国立天文台TMT推進室室長、以下、家)

そうですね。今住んでいるところは高柳先生のお宅

から本当に50m離れているかいないかで、散歩のときよく通らせています。ちゃんと糞の始末はします（笑）。もうひとつの偶然なんですが、実は私の実家はここ（多摩六都科学館）から500mも離れていない。小学校時代は私はこのへんで育ったんですね。当時はこのへんはまだ畠で、住宅と畠と、工場なんかがあって。そういうところで多摩六都科学館とつながりを感じています。

(高) そんな場所に、宇宙の果てまで語れるような場所ができちゃって。今日は先生とここでお話できることをすごく幸せだと思っています。先生は超大型望遠鏡、TMT推進室室長ということで、TMTのお仕事をしてこられたわけですが、（会場を指して）今日は皆さんね、プロの方ばかりでいらっしゃいますから。すばるから、すばるでのご経験を活かしてTMTを。そういうお話を伺ってみたいと思います。

(家) そうですね。今日は「プロ仕様」ということで、普段の講演よりすこしレベルを上げて、皆さんのが帰ってきて使っていただけるような材料も入ってるかな、というところでお話をさせていただきます。

すばる望遠鏡は1984年から1999年に完成するまで15年以上かかりました。その後、順調に動きはじめた2002年ごろから、次のことをそろそろ考えないと、ということになって、日本独自ですばるの次の30m級望遠鏡のことを考えはじめた。その後いろんな事情があって、ちょっとやっぱり単独でやるにはお金がかかりすぎるということで、「国際協力で」という話で方針変更しました。私が定年になるまでに予算がつくのは難しいかなと正直思っていたのですが、今年度最初の予算がつきまして、いよいよはじまるということになりました。私の短い研究者人生の中で、望遠鏡をふたつ最初から最後まで、ま、最後までいられるかどうかちょっと心配なところもありますけれども、関わるというのは大変幸せなことだと感じています。

(高) 家先生、さっそく、すばるのいろいろな思い出から、ここが次のTMTに活きてる、というお話を。

(家) はい。それじゃ、ちょっと後ろ向きなので、立つ

てやらせていただきます。(移動する)

(高) あ、そこに台があります。私もそこ(客席)へ行こうかな。そちらのほうが見やすい。

(家) どうぞどうぞ。(移動を待つ)

今日はですね、1時間ほどいただいている。やはり、現代の天文学の発展の裏には、大変な技術の発展があった。それなくしては、今までと違う世界が見ええてこなかつたんだという話をしたいと思います。

すばる望遠鏡をどうやって作ったのか、そしてそのすばる望遠鏡の視力を10倍に上げた「補償光学」というのはどういう技術なのか、そしてそれらを受けて、今、これから作ろうとしている30m望遠鏡、TMT、これはThirty Meter Telescopeの略でTMTです。これをどういうふうに作ろうとしているのか、というお話をしたいと思います。

そして、TMTができたら一体何を見ようとしているのか、これは大事な話です。「第二の地球を探す」それから「銀河が生まれた宇宙の歴史を探る」、そして「ダークエネルギーの謎に迫る」そういうお話を、時間の範囲内でさせていただければと思います。

【すばる望遠鏡】

(家) すばる望遠鏡を作ることを考えはじめた時に、まずどこに作ろうか、ということが当然問題になるわけです。国立天文台の前身にあたる東京大学東京天文台が、1960年に岡山県に直径2メートルの望遠鏡を作りました。岡山の望遠鏡ができた当時は世界で6位くらいだったんですが、すばるをはじめる頃にはもう40位くらいになってしまっていたんですね。

それから長野県の木曾に木曾観測所、というシュミット望遠鏡を作りました。70年代です。これは、日本の中では夜空が暗いということで選んで、銀河の研究をするには暗い空が必要なので、ここに作ったんです。



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則(国立天文台)

さて、次の8メートル級の望遠鏡を作ろうというときに、じゃあ、日本の国内にいいところがあるか。ご覧のように日本列島は光の渦ですので、いいところって無いんですね。ここがちょっと暗いんですけども(朝鮮半島の北部を指す、場内笑い)幸か不幸かその当時ここに作りたいと言い出した者がいなかったものですから、候補地にはなりませんでした。

結局、国内にはもういい場所がないということで、最先端の望遠鏡を作るにはやっぱり世界中のいい場所を探してそこに作ろうということで選ばれたのが、ハワイ島のマウナケアでした。

ホノルルから飛行機を乗り換えて40分くらいの、ヒロという、人口4~5万人の町があります。ハワイ州ではここがホノルルに次ぐ第二の大都会なんです。日系のアメリカ人、明治時代にサトウキビのプランテーション栽培で入植された方の三世や四世の方がいらっしゃって、だから町に我々が行ってもあまり違和感がない。このヒロに本部を置いて、望遠鏡をマウナケアの山頂に作ろうということになりました。

(1) 8mすばる望遠鏡

1999年完成(準備に7年、建設に9年)
建設費400億円
無料内部見学(要予約)



国立天文台ハワイ観測所

「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則(国立天文台)

これがハワイのヒロにありますハワイ大学のキャンパスにお借りした敷地に作った、国立天文台ハワイ観測所です。そして山頂にも一部、土地をお借りして作ったのがすばるなんですね。

すばる望遠鏡は1999年に完成しましたが、準備に1984年から1990年まで7年間かかって、建設が1991年から1999年まで9年間かかりました。ですから、真面目に検討をはじめてから16年かかるんですね。

建設総額400億円です。当時は400億円の概算要求をしても、まあなかなか通らないかなと思ったんですが、日本の経済が右肩上がりの時代だったので、文科省にがんばっていただきまして、これを作ることができました。



これは空撮の写真ですが、直径 40 メートル、白いコンクリートの建物の上に、望遠鏡と一緒に回るドームになっています。ふつうの白い、ピンポン球を半分に割ったようなドームとはだいぶ形が違います。回転する部分だけで 2500 トンの重さがあります。高さ 40 メートル、この上に人が立っているのが見えるかと思いますが、マウナケアというのは、マウナはハワイの言葉で「山」、ケアは「白い」という意味なんですね。「白山」というわけです。実際冬になると何回か雪が積もります。雪が積もると、このドームの屋根に積もった雪を下さなくてはいけない、その時に人が上がっていくかなければいけない。大変怖いんですけども、それで上がれるようにしてあります。

8 メートルの望遠鏡を作る上で最初の課題は、どうやって 8 メートルの鏡を作るか、ということでした。伊勢丹に注文してもそんなものはありませんので(笑)、世界中のガラス会社に「天体望遠鏡の 8 メートルのガラスを作りたいんだけど、お宅は作れますか」と聞いてまわりました。普通のガラスじゃダメです。膨張率がゼロの、「超低膨張ガラス」という特殊なガラスでないとダメなんです。当時それが作れるガラスメーカーの会社はアメリカとドイツにあったんですけども、どちらも「そんな(8 メートルのガラスが作れる)設備は持っておりません」という回答でした。

さて、それでですね、我々が選んだのはアメリカのコーニングというガラス会社で、超低膨張ガラスを作れたんですが、それでも当時作っていた最大のガラスで 2 メートル弱でした。8 メートルにするには、これをたくさん作って並べて、全体で 1 枚につなげる、という作業が必要です。で、約 50 枚の超低膨張ガラスを並べたわけですが、ここで最初の数学の問題が発生しました。全部これ六角形にしますから、入れ替えるんです。たとえばこのガラスの膨張率が 2ppb(温度を 1°C 上げると 1 億分の 2 膨張する)としま

す。隣のガラスが 4ppb、こちらのガラスはマイナス 1ppb。そういうふうに、膨張率ゼロとはいって、若干、性質が違うわけなんですね。ではそれをどう並べたらいいか、賢い並べ方とそうでない時とでは、出来上がったガラスの曲がり方がまったく違ってきますので、やっぱり一番いい並べ方を見つけたい。

さて、ここで問題です。

(画面: 多摩六都クイズ★第1問 …55枚の六角形セグメントの並べ方は何通り? (1) 55通り (2) 2970通り (3) 約3000万通り (4) 約10の62乗通り)

(アナウンス) さて、皆様のお座席の右側の下にレスポンスレバーがございます。(ボタンの説明、場内笑い。投票開始、30秒間カウント)

(画面に回答結果が表示される。3番と4番に集中)

(家) ほお。正解はですね、ほぼ 55 の階乗になるんです。というわけで、4 番、約 10 の 62 乗通りです。これはとんでもない数です。たとえばスーパーコンピュータを使えば、ある並べ方をした時にガラスがどんな変形をするかは計算できるんですが、1 秒間に 1 回それをやったとすると、10 の 62 乗秒かかります。宇宙年齢(137 億年)が 10 の 18 乗秒くらいですから、宇宙が終わるまでやっても計算が終わらない、というくらいの数なんですね。さすがにこれ全部はできませんので、十万通りぐらい調べて、その中で一番いい並べ方を見つけました。おかげで、出来上がったガラスの変形を何も考えない並べ方よりも 10 分の 1 ぐらいに減らすことができました。

さて、並べ方が決まったので、これを一枚のガラスに仕立てるには、大きな炉を作つて火にかけます。ガラスが溶けてしまつては困るんですが、継ぎ目がちょっと溶けてとろへりとろけるチーズが一枚になるような、そんな作り方をします。こんな設備は当然ありませんから、この工場・設備を、すばるのために作つてもらう必要があった。で、作つてもらいまして、出来上がったガラスがこんな大きなガラスです。

世界最大のガラス(製造に4年)



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、東正則(国立天文台)

ガラスが最初にできたときはほぼ完全な平面の円盤だったんですが、それをこんな、三笠まんじゅうみたいな形の上に載せてもう一回火にかけると、すこし垂れ下がってだいたいお皿形になります。なぜそうするかというと、削る量を減らすためです。なるべく最終的な形に近いお皿形にするんですね。こういうやり方で、ガラスを作るだけで4年かかったんです。

次に磨きはじめました。ガラスを作ったのはコーニングガラスという会社で、ニューヨーク州のコーニングという町にあるんですが、これはもうカナダの国境に近いあたりです。で、今度は「磨く会社はありませんか」と世界中の光学会社に問い合わせをしました。やはりどこもそんなことはやったことがないし、やれる設備ももっていません。実は提案書を出してきたのが2社あったんですが、私たちはピッツバーグにあるコントラベスという会社にお願いしました。

で、この計画を考えはじめた時には、どうやってガラスを作るかということに一生懸命で、どうやって運ぶか、まではまったく考えてませんでした。メーカーの方が「ところで先生、ガラスどうやって運びます?」と言われて、私は何も考えていなかったと絶句しました。こんなに大きくなると、ガラスを運ぶというだけで大変な作業です。

直径8メートルのガラスが割れないようにクッションを敷いた専用の10メートルの運搬箱を作り、それをトレーラーで運びました。アメリカの高速道路は日本の首都高なんかと違って幅が広いんですが、三車線でも両側にゆとりがないので追い越しはできません。したがって警察に許可を得て、前後にパトカーについて、道路を占用して運ぶという作戦をとりました。



コントラベス社は、石灰岩の採掘坑を利用して、山の中にくり抜いた堅穴を作り、そこに研磨設備を作りました。

すばるの主鏡は直径8メートルで焦点距離が15

メートルの鏡です。上に返ってくる光は15メートル先を焦点にしますが、焦点距離というのは鏡の曲率半径の約半分です。鏡が半径30メートルの完璧な球面であれば、30メートル先の球心から光を出すと光が戻ってくるはずです。

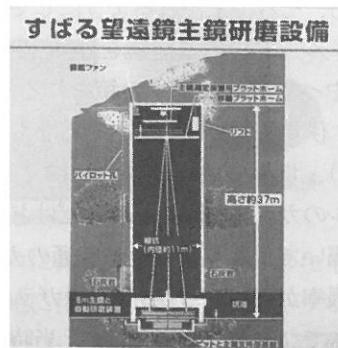
しかしすばるの主鏡は球からすこし形のずれた回転双曲面という難しい形をした鏡で、30メートル先からレーザーを当てても完璧には光が戻りません。戻りませんが、ここに回転双曲面を球面に変換する「マルレンズ」という測定用のレンズを置きますと、そのレンズを通った後、簡単にいうと光が一点に戻ります。

そのレンズを通して、毎日正しい形にどこまで近づいたかを測定しながら翌日の磨き方をプログラムしていくんですね。そのためこの堅穴は30メートルの高さが必要だったんです。ヨーロッパの会社は30メートルのタワーを作りそこで測るという提案だったんですが、タワーを立てるとき風で揺れたり日照で傾いたりと、いろんな問題が生じます。ここは山の中にある坑道から堅穴をくり抜いていますから、風や日照の心配もありませんし、山の中ですから車なんかが通っても振動がない。いろんなメリットがありました。すばるの鏡はしたがって、地下で生まれたんですね。

**専用地下工場
をつくって
鏡を磨く**

**振動がない
風で揺れない、
日照で傾かない**

**すばるも
地下でできた**



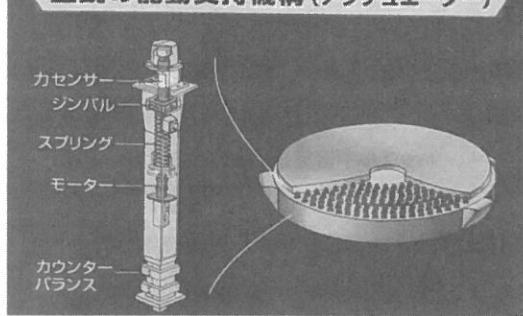
ガラスの研磨は、直径8メートルのガラスがターンテーブルの上を1分間に6回ゆっくり回っています。その上を、研磨液を流しながら研磨パッドがぐるぐるスピンして、レールの上を行ったり来たりして真ん中のへんとか、端っこのはうを按配よく磨いていくわけですね。これはコンピュータコントロールで、どこをどれだけ磨く時間をかけるかということがプログラミされています。しかし慎重にやらないといけないんですね。毎日、鏡の「山」と「谷」を測って、そつと、「山」の高さを3分の1ぐらいに減らすように磨くわけです。万一「谷」を間違って磨くとその分深くなりますから、その深さに合わせて今度は全面磨き直さな

.5メートル
鏡の曲率半
完璧な球面
出すと光が
くてはいけない。ですから「谷」はご法度。絶対にさ
わっちゃんいけない。そうして毎日「山」をすこしづつ、
もぐらたたきのように磨き落としていって、4年間か
かって磨きあがりました。

出で上がった鏡は、厚さ 20cm・重さ 23t もあります
が、光の波長のレベルで見ると鏡はふにやふにやで、
傾けると変形してしまいます。ですが、コンピュータ
制御のたくさんのアクチュエーター（ロボットの腕）
でもって上手に支えてやれば、鏡の形をコンピュータ
でいつも正しい形に制御できるんじやないか。これが
「能動工学」というすばるの新しい考え方だったんで
すね。

ロボット腕が鏡のゆがみを直す

主鏡の能動支持機構（アクチュエーター）



ガラスの裏側にたくさんのポケットを作つて、鏡の重心面のところ、中央面ぐらいで主鏡を支えるようにしたんです。そこにこのアクチュエーターを差し込みました。

これはなぜかというと、鏡が真上を向いているだけならいいんですが、低い星を見ようと思うと鏡を傾けます。そうすると下で支えているだけでは滑っていつちゃうんですね。ふつうは周辺にベルトを巻いたりして落ちないようにしていますが、こんな薄い鏡を周辺だけで支えようとすると大きく曲がってしまいます。したがって、各場所の重心面で支えるようにして、傾けても変形しないような仕組みにしたんですね。

しかし、ガラスの裏側に261個もの穴をあけるのは大変リスクを伴います。やめたほうがいい、いや、そこまで追求して性能を出そう、ずいぶんみんなで議論しました。最後はリスクを覚悟でアクチュエーターを採用しました。

アクチュエーターは、モーターが回ってバネを押し動かし、その力を非常に精密なセンサーで測り、制御できる装置です。23トンぐらいの重さのガラスを261個のロボットが支えますから、最大で1ヶ所90kgぐらいの重さを支えなくてはいけない。その精

度は1グラム単位です。もしこのセンサーを体重計に仕込みますと、1グラムの精度で測れますから、皆さんのがダイエットしてるとときにこっそり飴なんか食べてもすぐバレてしまう、そういうセンサーなんですね。

こういった技術の発展で、すばる望遠鏡はいつでも高精度で正しい鏡の形を保つことができるようになりました。

これはコンピュータで制御できますが、本当に正しい形になっているかどうかは、やっぱり星を見ながら確認する必要があります。そのための検査装置を国立天文台で作りました。

銀河円盤の振動(1978)とガラス円盤の変形(1989)は同じ式

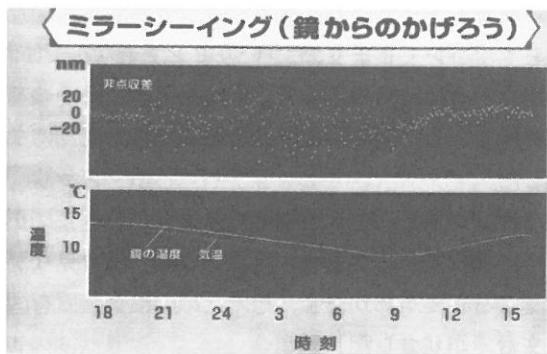


これはその検査装置と直径 60cm の鏡を備えた能動光学の実証試験機です。60 cm の球面の裏側にさつきのアクチュエーターを 12 本つけて、鏡の形を自在に折り曲げられるようにしました。鏡の形を思った通りに曲げられるということは、曲がった鏡を思った通りに直すことができるということで、実験では鏡をわざと二つ折りにしました。結果的に、鏡はきれいに曲がりました（上図右）。

私自身の大学院時代の学位研究は、銀河の円盤の中にどうして渦巻ができるのかということを理論的に研究したものでした（上図左）。銀河円盤と望遠鏡の鏡とでは、実は物理数学では同じ式を使うんです。私にとっては鏡の問題は銀河の渦巻の理屈よりずっとわかりやすい。ですからさばる望遠鏡の鏡は直感的に「できるな」と最初から確信をもっていたように思います。

さて、鏡をちゃんと測れるかどうか精度を高めるためにたくさん実験をしました。うちのチームのメンバーが、3分ごとに自動で鏡を測るプログラムを組みました。夜中のほうが人が寝静まってるし車も通らないし陽も当たってないので、たぶん精度よく測れるだろうと考えて、夕方実験をセットして、翌日見に行ってみたら、なんとですね、逆なんです。夜中のあいだの測定値はバラバラにばらついて、明け方、我々が出勤してくると、サボってたのを恥じるようになんか測定値が

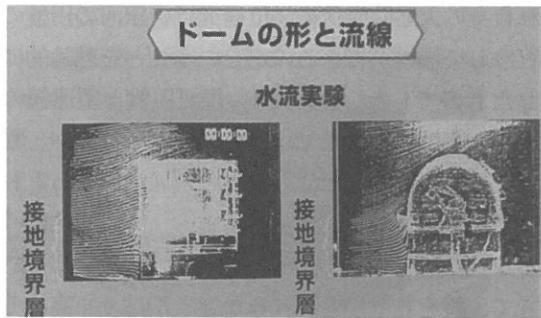
落ち着いてくるんですね。まったく予想と逆の結果が出ました。



これはどうしてだろう。実はこれ、大変な事実を物語っていたんです。この理屈を調べるために、いろいろところに温度センサーをつけて測りました。

夜中、気温は必ず下がっていきます。鏡も冷えていきますが、必ず、気温よりも遅れて冷えます。したがって気温が下がってくる夜中は、鏡のほうが冷えきらないで温かいんですね。そうすると鏡から陽炎が立って、光で見た鏡の測定がばらつく。朝日が昇って気温が上がり、鏡より気温のほうが高くなると、測定がぴったりくる。

この発見は、世界中のこれまでの天文台の望遠鏡が実は、夜中に鏡自身からゆらぎを出しながら天体観測していたということを物語っているんです。ですからすばるではこれが起きないように、夜の気温を予測してガラスの温度を気温より2°Cほど低くして、鏡が気温よりも温かくならないようにする、そういう工夫をすることにしたんです。



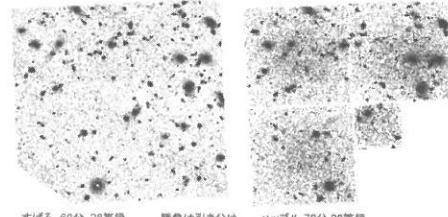
すばるのドームの形も、普通の丸い形と違う形をしています。丸いドームだと、地面の近くの乱れた風が望遠鏡の前に上がってき見え方を悪くする。円筒形にすると、風がドームの両側を回っていってくれて上がってくる風の量が少ないので、見え方が良くなるだろう。そういう実験結果からこういう形を採用しました。そしていっぱい窓をつけて、ドームの中の空気がよどまないようにという設計をしたんです。



これは1998年8月に鏡が出来上がった時の写真です。この鏡を先ほどの工場からミシシッピ川を下つてメキシコ湾からパナマ運河を通ってハワイまで輸送して、そこからハワイ島の上ではまたコンピュータ制御のトレーラーに載せて山頂まで持ってきてました。1998年の秋に鏡をメッキして、1998年の12月24日、クリスマス・イブにファーストライトを迎えました。

ハッブル宇宙望遠鏡との性能比較

Subaru R 3600 s HST F702W 4200 s



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全衛プラネットarium大会@多摩六都館、家正利(国立天文台)

その2週間後、1999年の1月10日だったと思いますが、試験観測を行ったときのデータがこれです。

この時、ハッブル宇宙望遠鏡との真っ向勝負をかけたんです。ハッブル宇宙望遠鏡はとてもきれいな写真をたくさん撮っていて、マスコミでも報道されていました。すばるは見え味はどうか。正直言いまして、ちょっと分が悪いなと思いました。なぜかというと、ハッブルは真空の宇宙空間で、空気のよどみがないところで写真を撮ります。すばるはどうしても空気のゆらぎを通して見ていくので、望遠鏡としてはずっと大きいんですが、像がにじんでしまいます。

これは40億光年くらいの銀河団の白黒写真です。ハッブルが撮ったのと同じところをすばるで観測しました。何等星まで見えているかというと、両方とも28等星で、写真撮影としては引き分けだったんですね。すばる望遠鏡は当初の期待以上の出来でした。すばる望遠鏡は非常にいい望遠鏡だと思っています。

【すばる望遠鏡の成果】

えー、私の顔の前に、ブラックホールを置くと何が起こるでしょうか。ブラックホールの重力場で、光がその両側を回りこむので、私の顔はピカソの絵のように崩れて、ぐるぐる渦を巻いて見えることになります。この現象が、実はすばる望遠鏡で見えているんです。

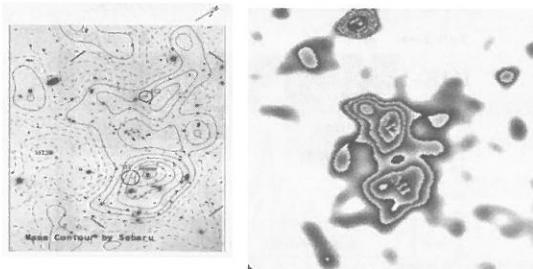


実際に重力場を起こすような強い銀河団のあるところでは、背景の天体の光が両側を回りこんできますので、銀河団の向こう側の背景の銀河がこんな風に渦巻いて見えます（上図右下）。

ここに見えているのは先ほどの、40億光年くらいの距離の銀河団なんですが、この背景にはもっと後ろにあるもっと暗い天体がたくさん写っています。

そういう背景の銀河の写真をよく調べてみると、たとえばこのへんにある暗い銀河だけ調べるとみんな平均的に一方向に、赤い線の方向に間伸びして見えます。銀河団を取り巻くように渦を巻いているような形になっています。そのデータから逆に、どういう重力レンズがあるとそのデータが再現できるかということを計算したのがこの等高線なんですね（下図左）。

銀河団の重力レンズ効果
質量分布がX線分布と一致

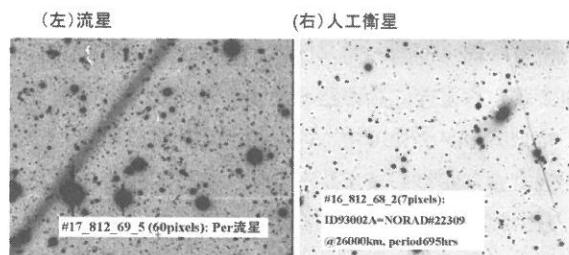


私も最初は計算はそうかもしれないけれど、本当に信用していいものか、と思いました。しかしこの同じ天体をX線で観測したデータがありまして、X線の強さの等高線です（上図右）。なんとなく対応していますよね。今はこの技術がずっと発展しまして、目に見えない「暗黒物質」の分布を重力レンズを使って暴

きだすというのが、すばるの非常に大きな研究テーマになっています。

ほかにもすばる望遠鏡はいろんな成果を出しています。これはお隣のアンドロメダ大銀河。実はアンドロメダ銀河の星々というのはこんなところまで広がっています。こんなに離れたところを写真に撮っても、アンドロメダ銀河の星だってちゃんとわかる星があるんですね。

こういう観測をやってましたら、ちょっとおもしろい副産物がありました。ちょうど8月の10日前後で、ペルセウス座流星群のころだったんですが、たくさん筋が写ったんです。人工衛星は右の写真、そして流星は左の写真です。流星は高さ100kmくらいのところで光りますから、すばるから見るととんでもなく近くで光っているので、ピンボケになるんですね。



さて、ここで2番目のクイズです。すばるで見たときに写る散在流星というのをだいたい7等星とか8等星とか、人の目にはちょっと見えないけれども、それが簡単に写るんですが、そういう散在流星の、光っているところの「幅」というのはどれくらいでしょうか。（多摩六都クイズ★第2問 …散在流星の発光領域の幅はどれくらい？）（1）数ミクロン （2）数ミリ （3）数メートル （4）数百メートル）

（回答結果は3番が最も多く、僅差で2番、1番、4番の順）

（家）はい。正解は2番です。

流星がなぜ光るか、それはですね、たとえば先ほどの散在流星だと1ミリより小さなダストが秒速10kmを超すような速さで大気中にやってきます。そうするとそのダストによって、大気中の分子や原子が叩かれます。その叩かれたものが追衝突を起こして前のやつをどんどん叩いていくって、その叩かれたところが光っているんですね。ちょっと専門的になりますが、酸素の禁制線という特別な光の量をすばるで測ったんです。1回衝突が起こると、この特別な光が1個出ます。ですから何個のフォトンが出てるかを数えれば、いくつ衝突が起きたかが計算できるわけです。スピードが

わかっていますし、光っている長さもわかっているので、衝突総数がわかれれば幅が計算できるんです。そうして計算してみると、7~8等の流星の光っている幅はわずか数ミリしかない、ということがわかりました。

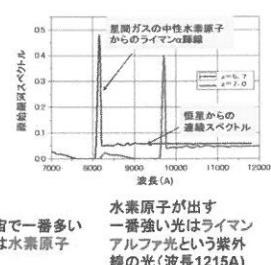
私は宇宙で遠い銀河を見つけた世界記録を共同研究者と一緒に持っています。私が書いた論文のうち、この流星の論文がすばるで見た一番近い天体に関する科学的な論文です。私はすばるで見た一番近い天体と一番遠い銀河の両方の論文を書きましたので、すばるを使い尽くしたかな、と自負しています。

では、最も遠い銀河の話をさせていただきます。

宇宙で一番たくさんある原子は水素原子です。水素原子が出る一番強い光はライマンアルファ光といいます。陽子の周りで電子がとれる軌道は、量子力学で飛び飛びの軌道になっています。電子が高い軌道から低い軌道へ移っていって、電子が最後に一番下の安住の地に落ちるときに余ったエネルギーを出す、これがライマンアルファ光です。遠い銀河の出すこの光は宇宙膨張で赤方偏移しますから、本来紫外線なんですけれども、波長が可視光を通り越して赤外線になって観測されます。こういうものを調べれば、遠い銀河を調べられるだろうというのを、もう50年ほど前に理論家が提案して、これ以来世界中の天文学者が世界中の望遠鏡でこの光を見つけようとしたんですが、約30年、失敗の連続でした。そしてすばる望遠鏡の時代になって、やっとこれが成功したんですね。

ライマンアルファ銀河を探せ

Partridge-Peebles (1967)
の提案 => 失敗の連続



水素原子が放出する一番強い光はライマンアルファ光という紫外線の光(波長1215Å)

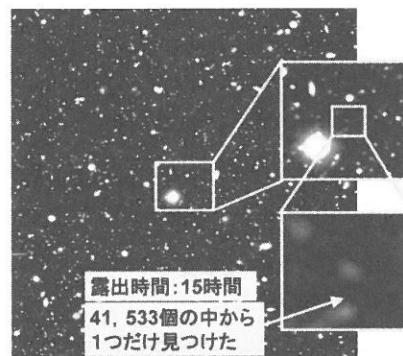
「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正剛（国立天文台）

実際にどうやったかをお話します。

赤外線カメラで見ると、実は夜空って真っ暗ではないんですね。酸素と水素がくついた大気分子が光るので、大気はオーロラのように光っています。しかし大気分子が光っていない波長帯、つまり夜空の暗い「窓」が赤外線にもあります。その赤外線の窓で見ると、遠くの宇宙が見やすいので、そういう窓の光だけを通すようなフィルターを何種類か作ったんですね。可視

光を通さないのでフィルターは真っ黒に見えますが、特定の赤外線だけが通るように作っています。これも当時の世界中のフィルター会社に相談したんですけども難しすぎると断られ、結局2年くらいかかるで、日本の会社ががんばって作ってくれました。

さてこのフィルターをすばるについて、15時間、明るい星など何もない夜空を観測したら、41,533個の天体が写りました。この星（中央のやや大きい光）は銀河系の中の星ですが、それ以外はすべて、遠くの、一個一個が銀河です。この中から、探し求めているものは一つだけしか見つかりませんでした。



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正剛（国立天文台）

なぜこれがそうか。ほかのフィルターで撮影しても光りません。青・黄色・赤、赤外線のほかのフィルターで写しても写らないんですけど、私たちが作った特殊フィルターでだけ、光った。実際にそのスペクトラルを見ると、そこの波長でだけ光が出ている。これがライマンアルファ輝線の証拠なんです。この光の波長の測定結果から、赤方偏移が6.964、128.8億年前、距離にすると128.8億光年彼方の銀河からの光だということがわかったんです。これが世界記録になりました。

129億年昔、最遠方銀河「IOK-1」の発見

フィルター $B \quad V \quad R \quad i' \quad z' \quad NB973$

IOK-1



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正剛（国立天文台）

この観測をやったのは、私と当時の東大の大学院生のOさんと助手だったKさんの3人で、頭文字をとつて勝手にIOK-1と名付けたんです。1番とつけたのは、2番3番もすぐに見つかるだろうと考えてたからなんですね。ところが…、なかなか次が見つからない。

遠方銀河のギネス記録



Table 1: 赤方偏移が確定した最遠銀河ベスト 12(2009 年 10 月 1 日時点)。

順位	銀河名	座標	赤方偏移	億年 #	論文	出版日
1	IOK-1	J132359.8+273456	6.594	128.8	室川ほか	2006年9月14日
2	SDF ID1004	J132522.3+273520	6.597	128.2	谷口ほか	2005年2月25日
3	SDF ID1018	J132320.4+273459	6.596	128.2	柏川ほか	2006年4月25日
4	SXDF Himiko		6.595	128.2	大内ほか	2008年7月25日
5	SDF ID1030	J132357.1+272448	6.588	128.2	柏川ほか	2006年4月25日
6	SDF ID91163	J132343.4+272945	6.587	128.2	柏川ほか	2009年2月
7	SDF ID91988	J132342.2+272645	6.587	128.2	柏川ほか	2009年2月
8	SDF ID71101	J132350.7+273159	6.587	128.2	柏川ほか	2009年2月
9	SDF ID1 赤方偏移 6.6 ではたくさん見つかったが、					年2月25日
10	SDF ID1 赤方偏移 7.0 では一つだけ					年2月25日
11	SDF ID1 初代銀河					年4月25日
12	SDF ID157057	J132419.3+274124	6.568	128.2	柏川ほか	2009年2月
13	HCM-6A	J023054.7+013332	6.560	128.2	Huほか	2002年4月1日

^② 年齢は宇宙年齢が 136.6 億年となるモデルに基づいて算出。

「すばるから TMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則（国立天文台）

35

これがその 3 年後の遠い銀河の世界記録のリストです。1 番は我々の IOK-1。赤方偏移がほぼ 7.0 です。2 番以下ずっとこの当時は 12 位まで全部、日本人が見つけたものです。しかしこれらは赤方偏移がほぼ 6.6 です。大事なことは、6.6 は数十個見つかったんですが、7.0 は 1 個しか見つかっていない。IOK-1 以外、出てこないんですね。

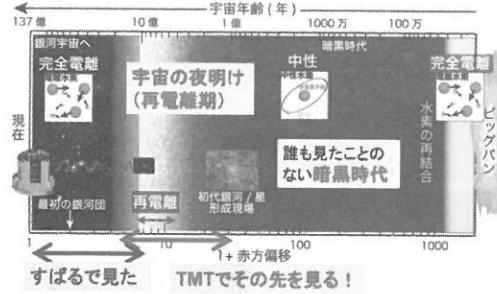
一昨年（2011 年）我々の世界記録はアメリカとイタリアの研究者に破られました。悔しい思いをしたんですが、うちの学生ががんばってですね、去年（2012 年）また世界一に返り咲きました。これが 126.5 億光年彼方の銀河（60 個ほど見える）。これからほんのわずか 1.7 億光年さらに奥を見ると…、こんなふうに見えます（30 個ほど見える）。128.2 億光年です。ここからさらに、ほんの 0.6 億光年、奥を見ると…（128.8 億光年）、とたんに見えなくなる（ひとつだけぽつんと見える）。これはこの間に宇宙で何かが起こったことを意味しているんです。

これは初期宇宙のシミュレーション、理論屋さんがやったシミュレーションです。宇宙は 137 億年前に生まれて、わずか 38 万年後には急激な膨張で冷えて、陽子と電子がくついた中性水素で満たされるようになり、冷たい宇宙になりました。そこから先は光るものがない暗黒時代です。その暗黒時代の宇宙を緑色で描いています。やがて 2 ~ 3 億年たつと、その中の濃いところで星が生まれます。生まれた星は紫外線を出して周りの冷たい空間を温めてオレンジ色になります。現在の宇宙は完全に温まったオレンジ色の住み心地のいい宇宙です。

すばる望遠鏡はたぶん、この緑色の宇宙がオレンジ色になりかけたところまで遡って踏み込んだのだと思います。緑色の宇宙の中では先ほどのライマンアルファ光が通らないので、それで見えなくなつたんだと考えています。つまり「宇宙の夜明け」といいますが、

宇宙の夜明けがいつ終わったのかを、すばる望遠鏡が見つけたんじゃないかな、と考えているのです。

宇宙考古学：宇宙の歴史を観測でひもとく



「すばるから TMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則（国立天文台）

38

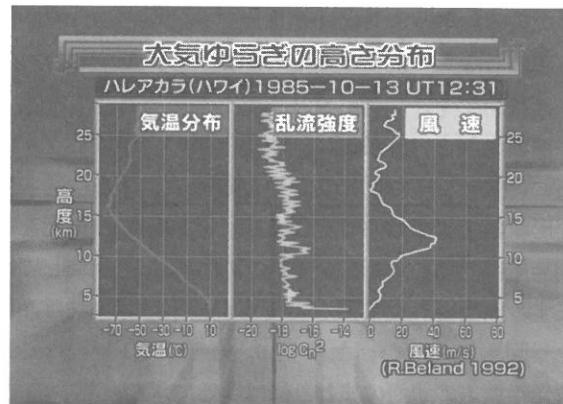
137 億年前のビッグバンからはじまって、誰も見たことがない暗黒時代、銀河が生まれて宇宙の夜明けが完了したのが 10 億年後くらいなんですが、7 ~ 8 億年後ではまだ夜明けになりきっていない。TMTができるとこのさらに先を見て、最初の銀河や星が生まれた時代を見ることができると期待しています。

すばる望遠鏡では非常に大きな世界一のカメラを持っているんですが、それをさらに 10 倍にしたカメラを作っています、TMT が完成するまでの 10 年間、こういう観測はすばるの独壇場になります。

あ、もう一時間だ。あと少しで終わるようにします。

【補償光学とは】

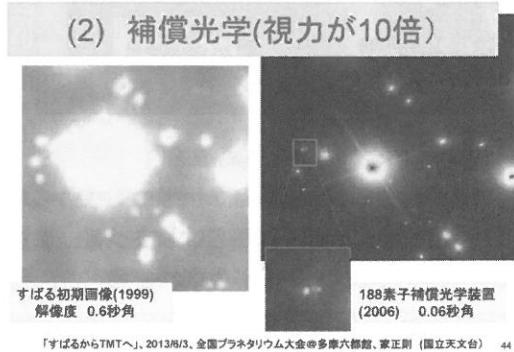
空気のゆらぎが像の見え方を悪くするんですが、補償光学でそれを直してしまうというハイテク技術です。



この図はハレアカラの山頂の上空で測った空気のゆらぎのデータです。気温が下がっていって、風速（右グラフ）は上空 12 km 付近がもっとも強くなっていますが、乱流強度（中グラフ）の高度分布はギザギザで、乱れた層が多数折り重なっていることを示しています。

1999 年にオリオン座のトラペジウムの近くのきれ

いなカラー写真を撮りました。新聞にもたくさん使ってもらったんですが、これをうんと拡大すると実は星がこんなにボケています（下図左）。星像の大きさは0.6秒、常識的な意味では非常にシャープな像なんですが、補償光学系を通すと、星の大きさが10分の1に縮まって、これだけ見え方が改善されました（同右）。



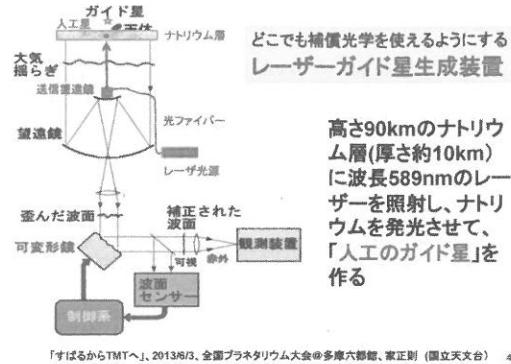
（動画）何が起こっているかお気づきでしょうか。

これは土星の衛星タイタンに補償光学を効かせた望遠鏡をロックして、その背後の星の前を通っていくところを撮った動画です。

補償光学を効かせると、望遠鏡の回折限界、理論的な限界までのいい像が撮れます。幾何学的にはタイタンが背景の星の前を通り過ぎて星を隠すんですが、光がこう、つるつと回りますね（星の光が見えなくなる瞬間、タイタンの縁を回るように見える）。これはタイタンが非常に分厚い大気を持っているため、大気中を光が屈折してああいうふうに見える現象だということが後でわかりました。補償光学を使うとこんな、誰も想像しなかったようなものが見えるんですね。

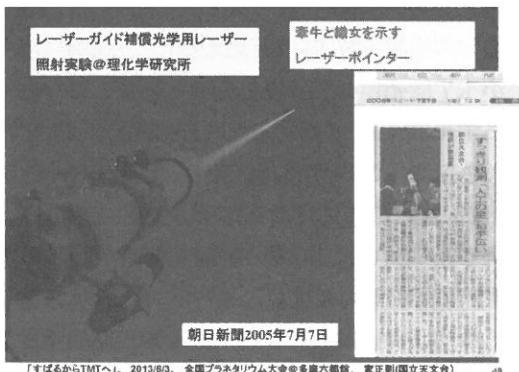
補償光学という装置は、明るい星の光のゆらぎを波面センサーで1秒間に1,000回測って、小さな薄い可変形状鏡でそのゆらぎを直して、きれいにした光を観測装置に送ることで、シャープな画像を可能にしています。大変優れた装置なんですが、実は私自身はこれを一回も使えなかつたんです。なぜかというと、129億光年彼方の銀河のまわりには明るい星など無いので、補償光学は使えなかつたのです。せっかく作ったんですけど私は使えなくて、残念な思いをしたんです。

そこで、近くにガイド星がないターゲットでも補償光学を使えるように、パワーレーザーですばるの上空90kmに「人工星」を作る。そういうとんでもない装置を開発しました。



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則（国立天文台） 48

このアイディアはアメリカから出たものです。上空90kmくらいの高さでは流星が蒸発した時にいろいろな元素がばらばらになります。中性のナトリウム元素は上空90kmくらいの高さで一番密度が濃くなります。したがって、高速道路にあるオレンジ色のナトリウムランプの波長でレーザーを当てるとき、このナトリウムが励起されて光ります。そのレーザーは埼玉県にあります理化学研究所と一緒に作ったんですが、目に見えないふたつの赤外線の光を足すと、偶然この波長になるんですね。それを使ったんですね。



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則（国立天文台） 48

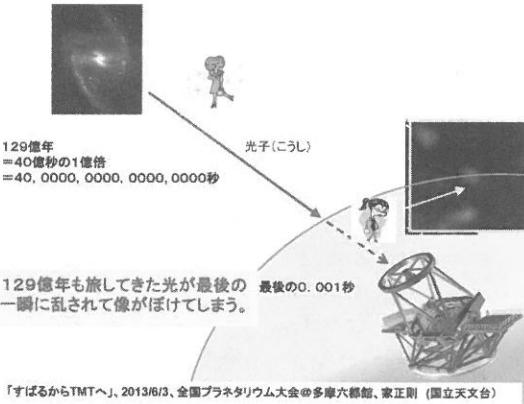
これは2005年にそのレーザービームを使って、七夕の日に「これが牽牛です、これが織女です」と、実際の空でレーザーポイントしたときの画像です。私が今使っているこのレーザーポイント（会議用）は1ミリワットくらいの光ですが、すばるの場合はその当時で4ワットですから、これの四千倍明るいので、ビームの先にある塵や上空の窒素分子だと酸素分子が光を散乱させて、途中のビームがずっと見えているんですね。ちなみにこれは1億円のレーザーポイントです。

これは実際に上空に人工星ができているという証拠写真です。上空のナトリウムが本当に反応するには、周波数、波長を1千万分の1のレベルで合わせないといけません。それが合つてるとこいうふうに光るんですが、周波数をちょっとずらすと消えてしまいます。

このレーザーをハワイで実際に打っているとき、2009年ですが、横のケック望遠鏡からもこんなふうに(すばるからのレーザー光と交わるかのように)レーザーが出ていました。この技術は今や最先端の天文台では必須の技術です。数億円かかりますが、これを使うと望遠鏡の視力が10倍上がるわけです。

(ライトセーバーを交差させて戦うスター・ウォーズのヨーダの画像が登場、場内笑い….) えー、お隣の天文台をこのレーザーで焼いてしまう、などということは考えてはいませんが(笑)、上空に飛行機が飛んできて、パイロットが間違って見てしまうと危ないので、飛行機が飛んできそうなときにはレーザーは消すとか、そういう注意をしています。

実際にこれを使ったひとつの例、今、私が大学院生とやっている研究の例をお見せしたいと思います。非常に解像度が高いので、球状星団が銀河系の中で動いているのが見えはじめたのです。球状星団の一部を拡大した絵なんですが、球状星団の背景に遠くのクエーサーが写っています。クエーサーはさすがに動かないんですが、クエーサーの手前にある球状星団の星々が、7年前にハッブル望遠鏡が撮った写真と比べてみると、左斜め上にちょっと動いていますよね。銀河系の中の星の動きまでこうして測れる、そんな時代になつてきているということです。



先ほどの129億光年彼方の銀河からの光という話がありましたが、その光一個一個の粒のことを光子(こうし)といいます。ミツコさんですね。ミツコさんは129億年前にここを飛び立って、129億年、何もない闇の宇宙空間を旅して、最後にすばる望遠鏡の視野に入ってきて、皆さんに見てもらいたいわ、と言ってやってくるわけです。ところが最後の一瞬、地球の大気を通るとき、100kmを通るのにはほんの一瞬、1秒の千分の1です、この一瞬のゆらぎで、お化粧が崩れてしまう。こんなかわいそうなことはない。それを

直すのが補償光学なんですね。TMTはこの技術をさらに進化させています。

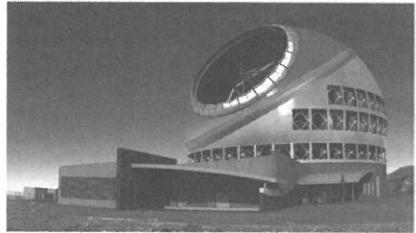
医学などでも実は、この技術の応用がはじまっています。さて、どれでしょう。

(多摩六都クイズ★第3問 …補償光学が応用されているのは? (1) 美容整形 (2) 眼底検査 (3) 耳鼻科 (4) X線検査)

(結果表示、2番が圧倒的多数)

(家) ああ、正解多いですね。はい。その通りです。実際に眼底検査をするときにフラッシュをたいて、その反射光で目の奥の網膜を撮影するんですけど、目の中を光が通過するときにやっぱりゆらぎが生じるために奥まできれいに写らないんですね。それを補償光学の測定技術を使って直してやると、きれいに写る、そういう技術なんです。日本のメーカーがそういう機能を取り込んだカメラを開発して、商品化された事例です。

(3) 次世代30m超大型望遠鏡TMT



日本国立天文台、カリフォルニア大学、カリフォルニア工科大学
米国天文学大学連合、カナダ天文学大学連合、
中国国家天文台、インドTMT連携機構

「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則（国立天文台）

【TMTについて】

さて、もう最後になりました。時間もすでに終わってるんですが、一番話したかった30メートル望遠鏡の話をさせていただきたいと思います。ちょっと、じゃ、これ、例の、ドーム映像でやりましょうか。

(アナウンス) はい、では、ドーム映像に切り替えます。お部屋の中が暗くなります。

(TMTプレゼンテーション映像、3分間)

(家) はい、ありがとうございました。五藤光学さんの協力で大変すばらしい…、もう望遠鏡が出来上がつてると勘違いするような映像です(笑)。

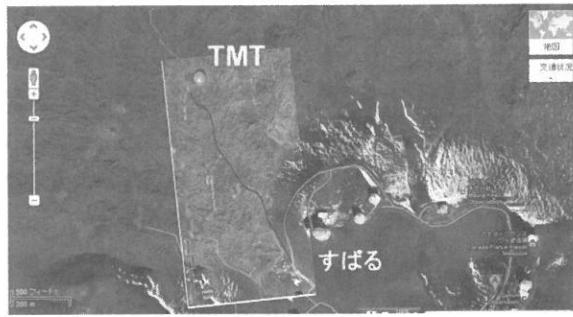
すばる望遠鏡は約400億円かかりましたが、TMTは1500億円くらいで作ります。8メートルの望遠鏡が400億ですから、そのままスケールアップすると、30メートルは約4倍で、4の3乗だと64倍で、

400 億の 64 倍だと 2 兆円くらいになるんです。それから見るとずいぶんお安いですよと財務省には話してます (笑)。なかなか、はいそうですかとはいえないんですけど。

この規模になると、アメリカといえども単独ではできません。したがって国際協力という話になってきます。日本は 25% くらい貢献しようとしています。

望遠鏡を少しでも安く作るため、口径比は F/1 (主鏡 : F/1 有効口径 30m) にします。考えられないくらい筒の長さを短くしてドームを小さくすることで、コストダウンを図っています。

山頂建設予定地 13N : 建設許可2012年末予定



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則（国立天文台） 57

これがマウナケアの山頂です。これがすばる、ケック望遠鏡、ジェミニ、とあるんですが、いい場所はみんな取られちゃってて、TMTはちょっと下ったところに置くということで、建設許可は一応もう出ています。今年の後半から地盤調査、ボーリング等をやって、来年の4月から建設がはじめられることになっています。

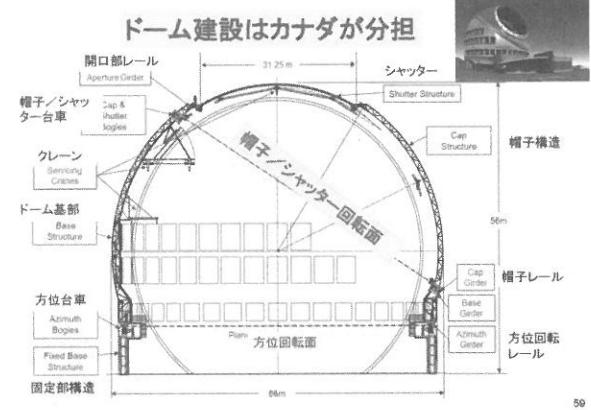


「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則（国立天文台） 58

望遠鏡の本体構造は、すばるを作った実績のある日本のメーカーが担当に決まっています。超大型の精密な構造物、それを駆動するという技術は日本の技術が活きているんですね。それからこの主鏡を構成するゼロ膨張の特殊ガラス、これも全部日本製です。磨くのも全部日本でできなくはないんですけど、そうす

るともう日本の望遠鏡になってしまいます (笑)、磨くほうは中国やインドも含めて4か国で分担しようとという話になっています。

ドームはこういう斜めのレールの上をベレー帽が回るような、ちょっとユニークな外観です。



(模型の写真)

これはスケール 1/100 の模型です。実物は文部科学省の玄関ロビーに展示しています。文部科学省に出入りする人たちがこれに気がつくように (笑)、展示をさせていただいている。

(TMT建設スケジュール)

各国の予算がついて同意書にサインができると、来年 (2014 年) 4 月から建設をはじめて、2021 年に観測がはじまる、ということを想定しています。

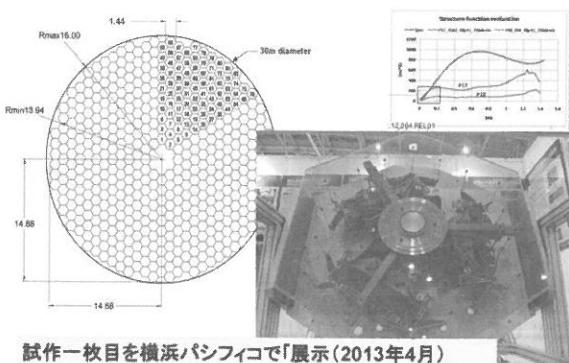
主鏡用超低膨張ガラス574枚は日本製

- 直径 1.55m、厚さ 58mm
- 総数: 574 枚
- 鏡材としての性能評価
(国立天文台で実証済み)



主鏡のガラス (ゼロ膨張のガラス) 574 枚は、今度は全部日本で作ります。今年 (2013 年)、その 10% の 60 枚のガラスをもう作りはじめています。このガラスの鏡の形、球面だったら全部同じ形で済むんですが、回転双曲面という非常に複雑な形をしていますので、内側から外へいくほど形がすこしづつ変化していくという難しい形をしています。真ん中は球に近いんですが、外側へいくほど変な形。日本のメーカーが外側の一番変な形の 82 番という鏡を 2 ~ 3 年かけて磨いて、ちゃんと仕様を満たしたものができるています。

82種類×7枚=574枚の 30%以上を日本で研磨

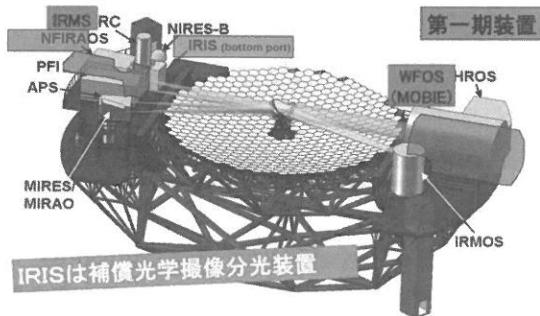


試作一枚目を横浜パシフィコで「展示(2013年4月)

主鏡の裏側の支持機構が見えています。これを600くらい作ります。このうち30%くらいは日本で分担し、残りはアメリカや中国やインドで分担します。(アクチュエーター)

TMTは制御のかたまりです。すばるの鏡は制御する箇所が261ヶ所でしたが、今度のTMTの鏡は調整する箇所が1万を超します(セグメント形状制御:10332個)。初期調整でだいたい済むとは思っています。それから、1秒間に10回くらいの速さで、鏡と鏡が光の波長のレベルででこぼこズれないようにしなきゃいけませんので、リアルタイムのアクチュエーターで制御します。これが1500個くらいあります(セグメント姿勢制御:1478個)。このように実に制御のかたまりなんですが、技術的には実現できる、と考えています。

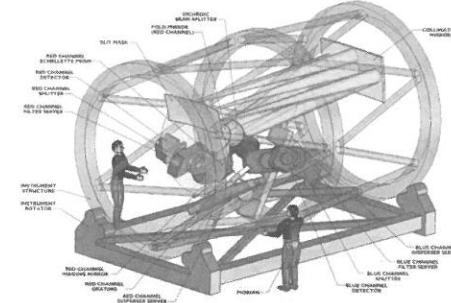
TMT観測装置



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正剛（国立天文台）

観測装置はいわば赤外線のデジカメです。まず赤外線の検出器であるということで、冷やさないといけません。冷やすためには真空にしないといけないので、超大型の冷凍機で冷やした大型の真空容器の中にカメラを入れます。TMTは大変解像能力が高い写真を撮れるデジカメなので、光学系も大変難しいものがあります。これを日本で作ります。国立天文台の若手のいろんな方が携わって設計を進めています。

WFOS: 巨大な回転分光器／カメラ部製作を日本に期待



国立天文台第808回講話会 2012/9/7

65

これは可視光用の装置です。これも大型のカメラなんですが、望遠鏡を動かしているとき、経緯台の方式だと回転と同時に天体の像も回ります。それを追いかけるためにこの、バスみたいな大きさのカメラ一式が日周運動とともに追っかけて回る、そういう装置なんです。これも、日本とカナダとアメリカとで分担して作ります。日本はカメラ部分を作ります。



応援メッセージもよろしく



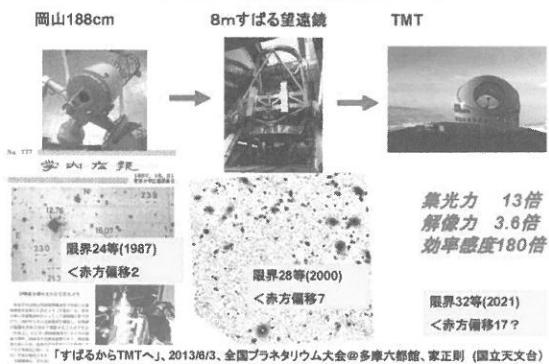
皆さんも千円から寄付できます！
今年度末までの第一期寄付者リスト
銘板をハワイ観測所に掲示予定。

「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正剛（国立天文台） 66

このおじさん（右。左は家室長）。彼は「インテル入ってる」のIntelを作ったGordon Moore氏という方です。ムーアの法則を提唱した人でもあります。この方は、TMT計画に2.5億ドル、約250億円を寄附しています。かつてこの望遠鏡はその名前になる可能性があります（笑）。冗談ではなく、皆さんも千円から寄付していただけます。ということで、去年あたりからキャンペーンをしておりまして、千円寄附していただいた方の名前を刻んだ銘板を、TMTができたらTMTに飾ると宣言しています。まだできていないので、ハワイ観測所に掲示するということでお話を進んでいます。昨年度末までに約1700件くらいの寄附をいただきました。今年（2013年）の12月まで第2期をやっていますので、3000万円くらいになると、さつきの500枚の鏡のうちの1枚は寄附

のお金でできそうです。500枚のうち1枚は日本の皆さんの善意のお金でできました、と、できればしたいな、と思っています。寄附申込書も今日持ってきてましたので、もし関心のある方はぜひお取りいただければ（場内笑い）。一口1000円で名前が残るので、これはたいへんお得なキャンペーンです。

望遠鏡の進化



私の短い研究者人生の中でも、私が大学院生として観測に携わりはじめたのは1972年ごろからなんですが、最初は暗室で写真を現像していました。日本で初めてCCDカメラというデジカメを作り、岡山の2メートル望遠鏡につけて観測したのが1987年です。わずか20数年前です。このときに24等星まで撮っていました。写真乾板の時代は21等星まででしたから、デジカメにしたら24等星まで簡単に写ったというで感激して、大学の広報誌に載せてもらいました。それから13年後にすばるが完成して、すばるで撮影した先ほどのハッブルと真っ向勝負の写真、28等星まで写っています。それで赤方偏移が7の時代まで見えた。

TMTができると集光力は13倍、解像力は約4倍、感度は200倍くらいになりますから、32等星くらい、赤方偏移17くらいまで見えるかもしれないと思っています。

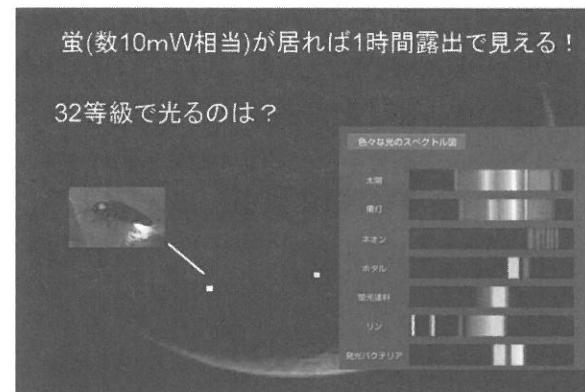
さて、それでは。

(多摩六都クイズ★第4問 …TMTだと東京から札幌の何を数えることができるでしょう？ (1) 人間を一人一人 (2) 野球のボール (3) 1円玉 (4) 砂粒) (回答表示、4番圧倒的多数、3番2番1番の順) (家) あ、これはちょっと期待が大きすぎましたか、すみません(笑)。砂粒まではさすがに見えないんですが、1円玉がいくつあるかは数えられます。正解は3番。ただし、数えるというと1円玉くらいが限界ですが、解像力が非常にいいので、1円玉が1ミリ動いたとしたら、それもわかります。そういう意味では砂粒くらいの移動も測れる。

もうひとつ。TMTは感度が非常にいい、32等星くらいまで見えるだろう。月面に32等星を置くとすると、どれくらいの明るさに相当するでしょうか。

(多摩六都クイズ★第5問 …TMTなら月面の夜に光るつぎのどれが見えるでしょう？ (1) 60W電球 (2) マッチの火 (3) 豆電球 (4) ゲンジボタル) (回答表示、4番が圧倒的多数)

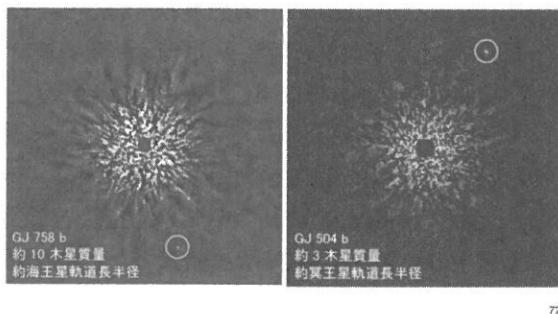
(家) はい。じゃ、ちょっと見てみましょう。月面で32等星のものが光っています。



(映像、画面に小さい光が点滅し、拡大すると…ホタル。場内溜息)

(家) ホタルの明るさがどれくらいかっていうのはホタルの研究者と連絡取りあって計算してみると、だいたい月面にゲンジボタルを1匹置いとくと、まあ1時間光り続けてくれるかどうかわかりませんけれども(笑)、地球に残した彼女を思ってお尻をピカピカ1時間光らせてくればですね、そこに何かが光っているというのがTMTだったらわかります。

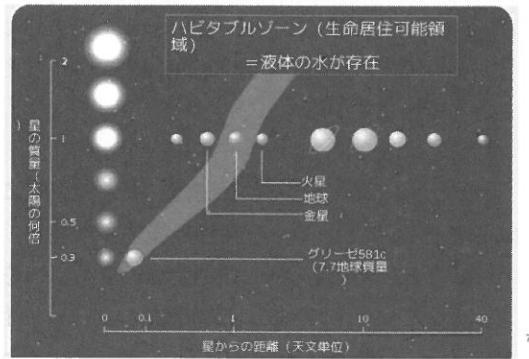
すばるが撮影に成功した2つの太陽系外惑星



72

すばるでは、太陽に似た星の像を補償光学でうんと小さく絞って、遮蔽板で中心を隠して眩しい光を消することで、その星の周りにある大型惑星の写真を撮影することにすでに成功しています。この技術をさらに進展していくと、地球くらいの惑星も写真撮影できる時がやがて来る。TMTはそういうものをさらに詳しく調べることが目標です。

生命居住可能領域にある太陽系外惑星探査 大気分析で生命の兆候(酸素など)を探す



73

地球は、太陽からの距離がほどよいので、ちょうど水が液体で海を形成できる環境にあります。そういう居心地のいい距離にある惑星なので、発生した生命が進化できたんですね。もっと小さい、暗い太陽だったら(例: グリーゼ 581c)、太陽の近くにそういうハビタブルゾーンがあるはずです。だからそういうところに回っている惑星には生命が発生する可能性がある。こういうほどよい距離にある惑星を探して生命がある兆候がないかを調べるというのがひとつ大きな関心なわけです。

実際に生命があるかどうか、直接実証するのは難しいですが、地球から見ていて主星の前を惑星が横切る、そういううまい軌道になっている系外惑星があれば、チャンスです。主星の光を分析すると、一部の光は惑星の表面の大気を通ってきますので、そこに酸素があれば酸素によって光が吸収される、そういう証拠が見え

るはずです。地球の酸素はシアノバクテリアなどの生命活動によって作られたといわれています。酸素は活動性が高いので、ふつうの状態では酸素単体で大気中に残りにくい元素ですので、もしそういうものが見つかれば、その惑星に生命がいる可能性が考えられるんですね。そういう研究が10年後には本当にできるのです。

3つの暗黒問題



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則（国立天文台）

76

- ・暗黒物質
(未知の素粒子?)
- ・暗黒エネルギー
(真空のエネルギー?)
- ・暗黒時代
(初代銀河、宇宙再電離)

宇宙の構成要素



もうひとつ、宇宙の大きな謎は、暗黒物質、暗黒エネルギー、暗黒時代、3つの暗黒問題といいます。

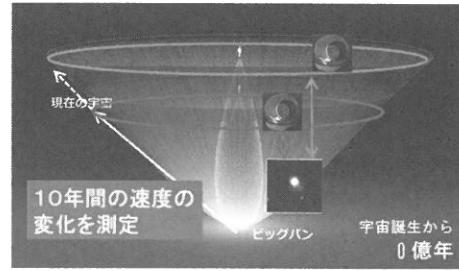
暗黒時代についてはすばるで一番遠い銀河を見たり、宇宙の夜明けを調べたりしはじめています。TMTは間違いなくこの研究分野をさらに発展させるでしょう。

暗黒物質は、先ほどの重力レンズ効果を使って見えない物質の分布を調べる、これもすばるではじまっていますので、やがてこれも研究ができると思います。その正体は宇宙の素粒子だと考えられていますので望遠鏡では見ることができませんが、望遠鏡を使って別の方法で調べるということで貢献していくと思います。

さて、一番難しい暗黒エネルギー。これはですね、高エネルギー実験、加速器実験では研究できないんですね。宇宙の大きさ、宇宙スケールでだけ効いてくる真空のエネルギー、かな?と言われているんですが、天文学でしか調べられません。

TMTの科学目標

③ ダークエネルギーの性質の解明



「すばるからTMTへ」、2013/6/3、全国プラネタリウム大会@多摩六都館、家正則（国立天文台）

77

宇宙は137億歳ですから、137億年間膨張し続けています。来年の宇宙は137億分の1だけ大きくなります。遠くの宇宙を見るときに宇宙の膨張が一様であつたらそんなに変化しないんですが、膨張が加速したり減速してたりすると、スピードが変わる様子が測れます。超精密に測らないといけないんですが、いろんな時代のクエーサーとか銀河のスピードを測っておいて、10年か30年後に同じことをやってみると、スピードが変わっているということが見えてくる可能性があります。これがダークエネルギーがいつごろ、どういうふうに宇宙を加速してきたのかを測定する唯一の方法なんです。TMTはそういう研究に取りかかることができる可能性を秘めています。なかなかこれはチャレンジングな研究ではありますが、おそらくこれが唯一、直接やれる研究なのかもしれません。

さて、ずいぶん時間を超過してしまって申し訳ありません。今日はすばるの話、補償光学、そしてTMTの話をさせていただきました。TMTの目的は「第2の地球を見つける」、「生命の兆候を探す」、「銀河のできた宇宙の歴史を探す」、そして「ダークエネルギーの謎に迫る」。そういう内容のお話をさせていただきました。ご清聴どうもありがとうございました。

(場内拍手)

(高) どうも先生、ありがとうございました。どうぞそこへ座って。もっともっと聞きたいことがあるんですが、時間が終わりのほうに来ています。

(家) すみません。

(高) いえいえ。今のお話を伺っていて、今年の「宇宙図」つてのをもらったならね、前の宇宙図では、宇宙はどうやって生まれてきたかってところがね、今年のは「推測される」ってのがカッコつきで前に書いてるんですよ。

(家) そうなんですか。

(高) それで思ったんですが、ここまでわかつたっていう時代の風潮と、こんなことがわからないっていう時代の波があるような気がして。「推測される」という言葉を宇宙図のあそこにつけたのは、ダークを調べたいっていうことなんですね。

(家) そうですね。ダークエネルギーがある・ないというのは、AINSHUTAINの宇宙項の話からすると昔から話はなくはなかったんですけど、みんな信じていなかつたんですね。それが超新星宇宙論とマイクロ波背景放射宇宙論の両方からほぼ同じ結果が出たということで、ダークエネルギー、宇宙の膨張ということはほぼ間違いないんだろうといわれています。

(高) そういう科学論の流れの中で、先生が先ほど大きな望遠鏡の計画に人生でふたつ携わったという話を伺って、私もたまたま仕事で加速器の研究所に行ったときに思ったんですが、自分の人生の中での研究活動と科学の歴史の中での接点というのは片方にいろいろ…、何ていうのかな、違いが出てきますね。

(家) そうですね。そういう意味では本当に、宇宙論とか観測が進歩する、一番いい時代にこの業界で仕事をさせてもらったな、幸せだな、と思いますね。

(高) はい。では、時間がだんだんなくなってきたんですが、どうしましょう、会場から一人だけ、質問を聞きますか。えーと、手を挙げていただけたら私がマイクを持って駆けつけます。…あ。ちょっと明るいからよく見えないんだけど、どなたか…、いらっしゃいません?

…まあそうですね、あとで個人的に先生をつかまえて聞くこともできますから…。

(家) はい。

(高) どなたか…。いませんね。では、あとで先生に個人的に迫るということで。それじゃ先生、本当に、何ていうのかなあ、あ、もひとつ聞きたかったのは、やっぱりこれからこの計画のように国際的にいろんな仕事をしていくという状況が生まれてきてて、若い人たちが科学技術の現場で働いていくうえで、国際間の問題っていうのがそこであるわけですよね。語りだしたらきりがないでしょうから…。

(家) そうですね。お酒の席かなんかでも (笑)。

(高) では皆さん、迫っていただくことにして (笑)。とりあえずこの会場のお話はこれで終わりにしたいと思います。では皆さん、家先生に拍手で。

(場内拍手)

(家) ありがとうございました。

(終了 1時間22分)