

第8回

浜松コンファレンス・新しい文化論

講演録

— 1991.11.9(浜松) —

光

第8回浜松コンファレンス 新しい文化論

日時■平成3年(1991)11月9日(土曜日)
13:30~17:00
会場■浜松市福祉文化会館

主テーマ●ひかり

講演録



浜松コンファレンス

浜松コンファレンス実行委員会

8th HAMAMATSU CONFERENCE

■第8回浜松コンファレンス■

新しい文化論

主テーマ

ひかり

プ・ロ・グ・ラ・ム

1.はじめの言葉

浜松コンファレンス実行委員長

大村 弘司

講演
2.「宇宙を見る」

～宇宙はどこまで
分かったか～

国立天文台 大型光学赤外線望遠鏡建設
推進室 助教授 理学博士

家 正則



音楽鑑賞
3.「自然と音」

ヤマハ株式会社
オンラインソフト制作室

講演
4.「宇宙と光」
～この1年～

浜松ホトニクス株式会社 社長

晝馬 輝夫



講演

「宇宙を見る」

国立天文台 大型光学赤外線望遠鏡建設
推進室 助教授 理学博士

家 正則

～宇宙はどこまで分かったか～

はじめに

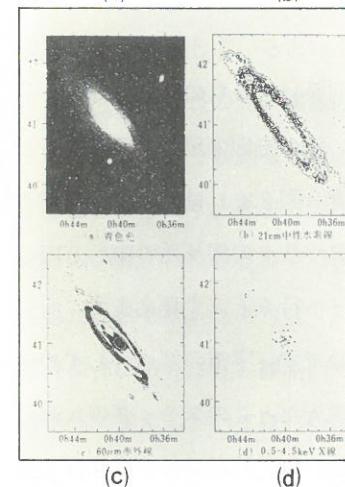
皆さんこんにちは。只今ご紹介にあずかりました国立天文台の家(いえ)と申します。今日はプログラムにございますように、『宇宙を見る』と題しましてお話をさせていただきたいと思います。

今日の話の内容は大きく纏めまして3つございます。1つは銀河・宇宙の観測の最新の成果をいくつかご紹介したいと思います。ここ10年、20年の間に観測手段がいろいろと進歩しまして、宇宙に関する知識は飛躍的に増えています。宇宙の構造と進化を理解するうえで、標準的な枠組みとなっているのがビッグバン宇宙モデルです。銀河・宇宙に関する新しい発見がビッグバン宇宙モデルの中でどう位置づけられるのかを軸にお話したいと思います。2つ目は、私ども国立天文台がハワイ島に今年から建設を始めました口径8メートルの世界一の望遠鏡の話です。これは宇宙の果てを見ようということを合言葉にして作られる望遠鏡です。これについて簡単にご紹介したいと思います。3つ目は、僻地の高山にあります世界の大天文台の様子と、そこで観測する天文学者約100名の活動を、スライドで観光案内をさせていただきます。そして最後に、浜松、或いは東海地方と宇宙の関係みたいなことを少しこメントさせていただきたいと思っております。

天体をいろいろな電磁波で観測する

この写真（図1 a）はご存じの方が多いと思いますが、私どもの銀河系のお姉さん格にあたる一番近いお隣りの銀河、アンドロメダ座のメシエ31（M31）であります。ちょうど秋の今頃が見頃でして、空の暗いところで星座早見図を手にして見ると、目の良い方なら肉眼でも艶げに分かると思います。「光」がこのコンファレンスのテーマですが、光は電磁波の一種です。いろ

図1 (a) (b)



(a) アンドロメダ座の渦巻銀河M31（距離230万光年）の可視像

(b) 波長21cmの電波で撮影したM31。水素原子の分布を表している

(c) 波長60 μm の赤外線で撮影したM31。塵の分布を表している

(d) X線で撮影したM31。X線連星の分布を表している

いろいろな電磁波でこの銀河の写真を撮りますと、見え方が大へん違ってまいります。

同じアンドロメダ座の銀河ですが、波長が約100倍長い赤外線(60ミクロン；μ)で撮りますと少し違ってこんな風に見えます（図1 c）。60ミクロンの赤外線で見た画像は、実はこの銀河の中に漂う塵の分布を表していると考えられます。この電磁波の波長がさらに1,000倍ぐらい長くなりますと電波になりますが、その中でも波長が21センチメートルの電波は、とくに水素ガスの分布を表す写真を提供してくれます。アンドロメダ銀河では真ん中が抜けていてドーナツ状に水素ガスが分布していることが分かります（図1 b）。逆に、可視光の波長に比べて1,000分の1ぐらいの短い波長、高エネルギーのX線でこの銀河をレントゲン撮影しますと幾つかの点々が見えます（図1 d）。これは、2つの星（連星）がぐるぐる廻っています、その一方の星にもう一方の星からガスが降り積もって爆発現象が起きる、そういうときに出るX線を見ているのです。このように、天体というものを把握するにはいろいろ

な波長の電磁波で見ることが大事です。それによって見えてくるものが違ってくるからです。

お隣りの銀河を紹介しましたが、我々の銀河系はどうなのでしょうか。私は円盤状の銀河系の中にいますから、円盤の縁の方向の星の混んでいるところが天の川として見えるわけです。この写真（図2 a）は天の川の中でもとくに明るい射手座の方向ありますが、これが我々の銀河系の中心方向といわれています。射手座は南半球だとかハワイへ行くとよく見えます。所々黒くなっているのは宇宙の空間を漂う塵のせいです。宇宙の塵はさしづめ、光を遮る宇宙スモッグというところです。可視光だとこのスモッグのために真っ暗でその奥はなにも見えません。ところが、少し波長の長い赤外線で見ますとスモッグを通してその奥にある星が見えてきます。実際、先ほどの天の川と全く同じ領域を赤外線で見るとこんな写真のように見えることが最近分かってきました（図2 b）。よその銀河を真横から見るとこんな風に見え



図2(a)

我々の銀河系の中心、射手座の天の川の姿。
宇宙塵のためところどころが黒くなっている



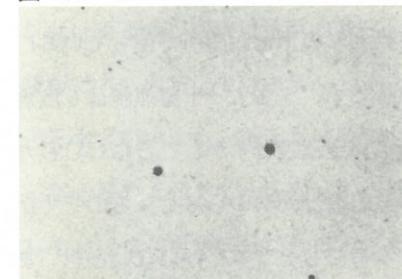
図2(b)

射手座の天の川の赤外線像。
赤外線では塵の雲を透かして奥まで見通すことができる

ることはよく分かっていたのですが、我々の銀河系も赤外線で見ると、やはりこういう形をしているということが初めて画像として確認されたのです。

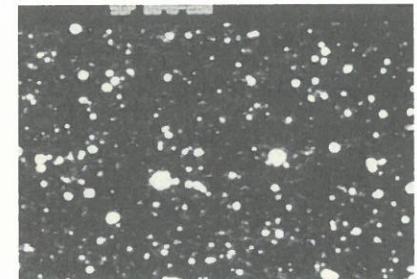
いろいろな波長の光、電磁波で宇宙を見ることが大事であると申し上げましたが、そういう観測をする場合に、電磁波を受ける検出器（ディテクタ）が重要になります。今まで天体観測は殆ど写真、つまり感光乳剤を使ったフィルム、或いは写真乾板で撮影するという方法で19世紀以来常々とやり続けてきたわけです。この写真（図3 a）は現在、写真乾板を使って到達できる最高傑作、限界に近い観測例です。ここに台形に4つの星が見えているのに着目して覚えておいてほしいのですが、これと同じ領域を、最近実用化されるようになってきたCCD (charge coupled device)という半導体素子を使ったテレビカメラで観察しますと、次の写真（図3 b）のように沢山の星が見えてきます。先程は4つの台形に見えた星の周りには殆どなにも写っていなかったのですが、それがこんなに見えてきます。これは我々、天文学者にとっても非常な驚きでした。CCDは写真フィルムに比べ量子効率が50倍ぐらい良いので、見え方がまるで違ってきたわけです。今まで見えていたものより50倍ぐらいよく見えるようになってきたということで、これは大きな進

図3(a)



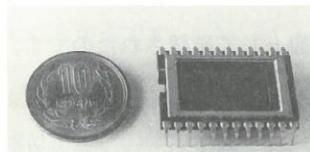
写真乾板による銀河系南極方向の像。
約21等星までが写っている

図3(b)



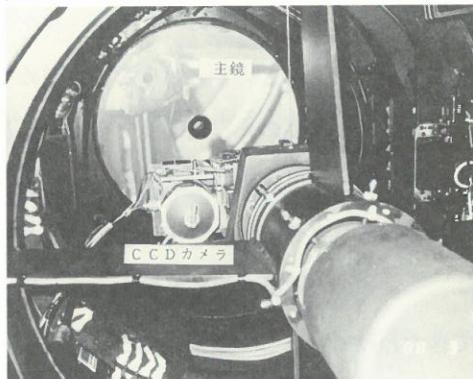
CCDカメラによる同じ領域の像。
(a)図に比べ感度が約50倍高いため、
27等級の天体までが写っている

図4



日本で最初に本格的な天体観測に使われたCCD素子（国立天文台岡山天体物理観測所）

図5



液体窒素冷却型CCDカメラを取り付けた口径105センチメートル・シュミット望遠鏡（東京大学木曾観測所）

歩です。最近では赤外線の二次元画像も高画質で撮影することができるようになりました。

この写真（図4）は私どもが日本で初めて、液体窒素冷却型のCCDカメラを作つて非常に暗い天体を観測したときに使つたCCDです。6～7年前になりますが、約20万個の目（画素）を持っているCCDで、画素1つあたりの値段を換算するとだいたい10円ぐらいにつきました。CCD素子の値段は高いのですが、文部省のお役人には「1個あたり10円ですよ」と説明しまして予算をいただきました（会場笑い）。

これ（図5）は、長野県にあります東京大学の木曾観測所で使つている口径105センチメートルのシュミット望遠鏡です。シュミット望遠鏡は6度角ぐらいの空が一度に写せる非常に視野の広い望遠鏡ですが、ここにCCDカメラを取り付けました。望遠鏡を外から見た方は大勢いらっしゃるのですが、望遠鏡の中に入ったことがある人は天文学者でもそう多くはないと思います。望遠鏡の中で金色に光っているところに、液体窒素で冷却したカメラが付いています。

星のスペクトル分析で動きや距離が分かる

ここまでお話ししたのは、天体をいろいろな波長の電磁波で撮影すると宇宙の見え方が変わってきたということです。天体を見るときに写真を撮るのが一番分かり易いのですが、もう少し学問的に計測をするには、例えば天体からの光をプリズムなどで虹に分けます。この虹をスペクトルといいます。そのスペクトルをきちんと調べると、得られる情報が増えます。

例えば、ドップラー効果というのを皆さんご存知だと思います。パトカーが近づいてきますとサイレンの音が高くなり遠ざかると音が低くなります。それと同じことが光にもあります。光の色は光源が遠ざかると赤くなり、近づくと青くなります。色の変化を測るのに、スペクトルの中にある特徴的な指紋（線スペクトル）に注目します。その波長の変化量を測りますと、その天体がどのくらいのスピードで動いているかが分かります。野球のピッチャーの投げるボールのスピード測定や警察の速度取締りのネズミ取りと同じ原理です。銀河やクエーサーのスペクトルをとりますと、その天体がどのくらいの速度で我々から遠ざかっているか、運動のようすが測定できます。これが宇宙論の中では天体の距離を決める非常によい目安になっています。

もう1つ、スペクトルをとると分かるのは、その天体にどういう元素がどれだけ有るか、或いは温度や密度がどうなっているのかという物理化学的な情報です。天文学では水素、ヘリウム以外の酸素や窒素などは全部まとめて重元素といいます。重元素は星の中の核融合反応でできるのです。例えば、多数の星のスペクトルを測って、星の運動速度と重元素量を調べると、星がなんとなく2種類に分かれます。太陽に近い星の多くは太陽と一緒に銀河系の周囲を約2億年かかる円運動をしています。そういう星はほとんどの場合、重元素量が多い天体です。一方、太陽の運動と全く異なる動きをする星

を調べてみると、どれも重元素量の少ない星ばかりです。このような星のなかには銀河系を逆に廻っているものさえあります。このことから、銀河系の初期に生まれた天体は、ガス中の重元素量が少なく運動もばらばらですが、最近新しく生まれた天体は、重元素量も増えていて、全部同じ方向に運動が揃っているということになります。これこそ、銀河の進化の証拠と考えられています。

アンドロメダ大星雲は距離にして約230万光年ですが、例えばM51は1,800万光年の距離にあります。そしてM51は銀河と銀河がぶつかってニアミスを起こしたところだといわれています（図6）。この写真は球状星団ですが、我々の銀河系の中の球状星団を写真に撮りますと星がこんなに混み合っています（図7）。こんなに混んでいると星同士がぶつかるのではないかと思いますが、実は球状星団といえどもその中で星がぶつかることはまず考えられません。ところが銀河の世界では様子が大分違います。銀河の直径に比べて銀河と銀河の距離はせいぜい数十倍ということがよくあります（図8）。そうしますと、宇宙の歴史の中では銀河と銀河がぶつかるることは結構起こっているんです。

もっと遠いところの銀河はどう分布しているのでしょうか。先程は1,800万光年ぐらいの銀河でしたが、それよりもっと遠い銀河のスペクトルをとってその距離を調べ、銀河の分布図を作ってみます。そして、5億光年ぐらいまでの地図を作ってみると、銀河はばらばらに分布しているのではなくて互いによりそっていることが分かってきました。泡の中がからっぽなように、銀河が存在しない超空洞が見つかっています。銀河は泡と泡の境目に群がっている感じです。銀河のこのような分布をグレートウォール、万里の長城と天文学では言っています（図9）。

図6



距離1,800万光年の渦巻銀河M51。
2つの銀河がすれ違っているところと考えられている



図7

球状星団M3。これほど星が密集しているように見えるが、星と星が衝突することはない



図8 ヘラクレス座銀河団

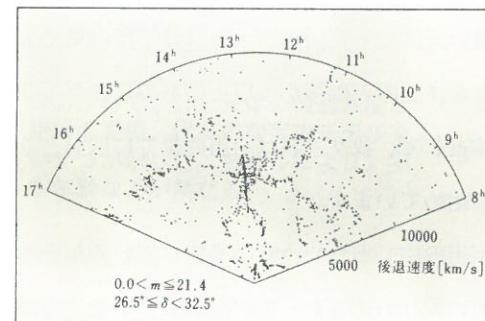


図9

グレートウォールと呼ばれる銀河の分布図。
約5億光年にわたる銀河の分布から泡状の構造が見えてきた

我々の銀河系から天の川の北極方向と南極方向を見ますと星の数が少ないので遠くまで見えますが、そういう方向に見える銀河の分布を調べますと、銀河が周期的に分布しているといわれ始めました。これはまだ確認が必要な話ですが、もしこれが本当だとすると、今までの宇宙論は非常に困難に直面します。これまでにいろいろな卓抜な理論が提案されていますが、こういうことが事実だとしますと、実はこれを説明できる理論が無いんです。ですから、これが本当かどうか確認するのは今後の非常に重要なテーマです。

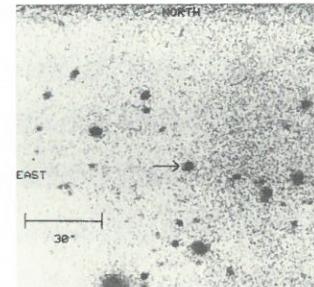
遠くの銀河の姿を見て、宇宙の果てを推測する

銀河のお話の最後に宇宙ギネスブックとしまして、現在確認されている宇宙で1番遠くの銀河をご紹介しましょう。解像度が悪いのでこれが本当の姿かどうか分かりませんが、この天体の赤方偏移は3.8といわれています。赤方偏移というのはドップラー効果によって波長が伸びる割合ですが、3.8ということは元の波長に1倍を足して4.8倍に波長が間伸びしていることを表しています。これは宇宙の果てまでの距離の90パーセントの距離になるということとして、果てまではあと10パーセントの距離にあります。銀河としてはこれが1番のレコードです。

次は、銀河の中心核かもしれないと思われているクエーサーという天体です。このクエーサーの赤方偏移はもっと大きく4.90で、現在までに知られているすべての天体のなかで一番遠い天体です（図10）。これは宇宙の果てまであと7パーセントの距離にあります。赤方偏移が4以上の中はまだ10個程度ですけれど、具体的な天体として、我々人類は宇宙の果てに近いところにあるこのような天体を見つけ始めています。

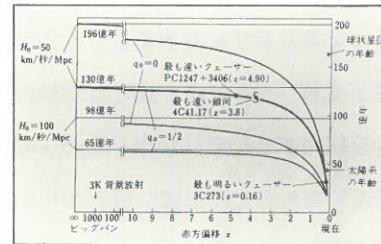
このような発見がビッグバン宇宙の中でどういう意味を持っているかをお話します。この図（図11）は横軸に天体の遠ざかっていくスピードを赤方偏移で表して書いています。赤方偏移0は我々の銀河系を表します。赤方偏移が無限大というのがビッグバンの世界です。この図の縦軸はその天体の距離を億光年単位で示しています。遠くの天体はそれだけそこからやってくる光が地球に届くまでに時間がかかります。ですから遠くの天体を見るということは、その時間だけその天体の昔の姿を見ていることになります。大雑把にいいますと、150億光年先の天体は我々から150億年昔の姿を我々に見せていことになります。したがって、距離は億年単位の年齢（ただし、さかのぼ

図10



赤方偏移4.90のクエーサーPC1247+3406。宇宙で最も遠い天体

図11



赤方偏移で表した天体の後退速度と距離の関係。代表的な宇宙モデルをいくつか示した。モデルにより、宇宙年齢などが異なる

る年齢）にも換算できます。宇宙の始まりは赤方偏移でいうと無限大に相当すると申しました。宇宙が膨張して、赤方偏移が無限大から1,000程度にまで下がるのにかかる時間はせいぜい10万年程度です。この宇宙の最初の10万年ぐらいの時代の様子は、素粒子物理学の知識を借りまして、宇宙が爆発してからどのように薄まっていったかを調べることによって、かなりよく分かっています。

赤方偏移にして1,000から5ぐらいまでの時間が宇宙の暗黒時代です。この宇宙の暗黒時代のいずれかの時に多くの銀河が生まれたわけですが、しか

し、それがどのように生まれたかは全く分かっておりません。更に不思議なことに、赤方偏移1,000の時代はマイクロ波という電磁波で観測することによってその様子を知ることができるのがですが、このマイクロ波の強さは宇宙のどの方向でも非常に一様で、むらむらが観測されません。つまり、今の銀河の種になるむらむらが赤方偏移1,000の時代には全く見あたらないのです。それなのに、赤方偏移0から1程度の時代にはみごとな銀河が多数存在します。それでは一体、いつの時代に我々の銀河系の種がまかれて成長したのか、この種明しができないのです。宇宙の始まりの数十万年ぐらいのことは分かっているのですが、その後の数億年になにが起こったかを知ることが大切で

す。これは、これから10年先、21世紀の天文学のチャレンジすべき最大のテーマです。

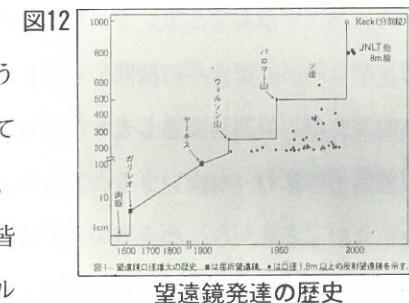
それからここでもう一つコメントしておきたいことがあります。赤方偏移は観測量でして、誰が測っても測定精度の範囲内で同じ結果になります。しかし、例えば赤方偏移4.9の天体が一体、我々から何億光年の距離にあるのか、或いは何億年昔の姿かということは、宇宙がどういうモデル構造になっているかによって変わってきます。よく科学雑誌などに解説記事を書くとき、天体の距離を赤方偏移でなくて、ずばり何億年と書いて欲しいと頼まれますが、研究者としてはこれはちょっと困ることであります。赤方偏移でならはっきりと表現できますが、何億年という数字を言うためには、例えば開いた宇宙モデルを採用するか閉じた宇宙モデルを採用するかで話が全く変わってくるからです。宇宙モデルはまだ確定できていないことでして、宇宙の年齢は130億年かもしれないし200億年ぐらいかもしれません（図11）。それをきちんと調べ決めることがもう1つの大きなテーマになっています。

膨張する宇宙は、ドップラー効果により光の波長が間伸びするといいました。ですから、その天体を出たときにはある波長だった光も地球に到達するまでにドップラー効果で波長が伸びてしまう、つまり赤色の方へずれてしまいます。従来、天文学では紫外線から可視域の観測手段を日々と積み上げてきたわけですが、最近、赤外線の検出器が天文学でも使えるようになりました。スペクトルが赤方偏移によって赤外線領域に移ってきますので、昔の宇宙の赤外線での姿と現在の宇宙の光で見た姿を比べると、昔の宇宙を理解することができます。そういう意味で赤外線での観測が重要になってきているのです。

世界一大口径レンズを持つ「すばる望遠鏡」の建設

私ども国立天文台は、1988年までは東京大学東京天文台という名前でした。これまでお話をしたような背景をもとにして、どうしても宇宙の果てに近い天体、宇宙の始まりを見たいということで、赤外線でも可視光でも暗い天体が観測できるような8メートルクラスの大きな望遠鏡を是非作ろうといいろいろ検討を進めてきたわけです。それにあたっては一大学の研究機関という形ではなくて日本全国の共同利用機関になる必要があるということから、3年前に国立天文台というものに発展的に改組したわけです。幸い、1991年度から文部省に予算を認めてもらいまして、ハワイ島に直径8メートルの望遠鏡を作る計画が始まりました。その中に使われるハイテク技術について少しご紹介したいと思います。

この図は望遠鏡の大きさがどのように発展してきたかという歴史を表しています（図12）。横軸が西暦の年数、縦軸が望遠鏡のレンズの直径です。皆さんには肉眼という口径7ミリメートルぐらいの精度の良いインテリジェントな望遠鏡をお持ちな筈ですが（会場笑い）、人類はこの望遠鏡を使って宇宙を眺めたり、いろいろ哲学的な思索をしてきました。1610年にガリレオ・ガリレイが口径5センチから7センチメートルのレンズを使った望遠鏡を組み立てました。ガリレオはそれで土星や木星を見て、初めて土星には「耳」があり、木星は4つの衛星を持っているということを発見したわけです。それからは望遠鏡がどんどん大きくなりまして、20世紀初頭にはヤーキス天文台で口径1メートルのレンズを用いた望遠鏡ができました。ところが、レンズの望遠鏡というのは筒が非常に長



くなってしまいますし、それにレンズを通った光が色ずれをおこしてしまいます。これらの点で使いにくうことから、これ以後の望遠鏡は全て反射鏡を使った望遠鏡になりました。

第1次世界大戦の末期に、アメリカのパロマー山に直径5メートルの望遠鏡が作られました。これは今考えても大へんな技術で、当時としてはすごくチャレンジングなことだったと思います。その後1960年代、70年代、80年代に世界中で直径4メートルクラスの望遠鏡が10台程作られています。しかし、5メートルより大きい望遠鏡は作られませんでした。ただ、ソ連がチャレンジして1台だけ6メートルの望遠鏡を作りましたが、これははっきり言ってあまり良い出来ではありませんでした。精度の良い望遠鏡を作ろうとすると4メートルが限界でして、それ以上大きくすると重くなってしまって精度が出ない。ですがこの二、三十年の期間に、光を集める望遠鏡自体は大きくならなかったのですが、最初にお話しましたように光を検出する方の技術は写真から半導体素子に変わったということで、天文学は観測技術において非常に進歩することができました。ところがついに、CCDカメラなどの量子効率は100パーセントに近づいてしまいました。100パーセントを越すことは原理的に無理な話ですから、検出器を改善する方はもう限界に近づいているといってよい。そうなると、光を集める方を大きくしなければならないということで、1980年代後半から再び望遠鏡をなんとか大きくしたいと世界中で真面目に考えられるようになったわけです。

それで、8メートル級の望遠鏡の計画なんですが、この望遠鏡はジャパン・ナショナル・ラージ・テレスコープという名前がつけられました。愛称もつけようということで今年の夏に新聞等で公募いたしました、結局「すばる望遠鏡」という愛称になりました。「すばる」はプレアデス星団を表す大和

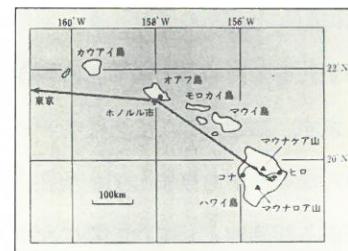


図13(b) マウナケア山頂

図13(a) ハワイ島

言葉でして、日本の計画ですからなんとか日本の言葉を使いたかったのです。自ずとイメージを表す言葉ということで決まりました。私ども天文台のすぐ北側に富士重工業株式会社が在りまして、富士重工さん宛の郵便物がこちらに紛れたり、逆に我々宛の郵便物があちらにまぎれたりと混乱することがありちょっと困っていますが、この「すばる」は望遠鏡の愛称です(笑い)。

この望遠鏡を何処に建てるかですが、ハワイ諸島の一番東側のハワイ島のマウナケアという死火山の頂上に作る計画です。ここには既に、世界各国が作った9台の望遠鏡があり、観測が行われています(図13)。ここは標高が4,200メートルもありますから気圧はだいたい平地の60パーセントになります。ですから、いきなり上へ登って激しい作業をしますと頭痛やめまいがすることもあります。このために2,800メートルのところに基地を設けましてそこで寝泊まりをしています。やはり冬になると雪が降りまして、マウナケアというのはハワイ語で、マウナはマウンテン、ケアは白い、ですから白山ということらしいです。ハワイでも冬はスキーができるとして、元気のある人はスキーをかついて天文台の周りを滑るようです。

この場所の良い理由はいろいろな調査結果から明らかになっています。まず晴天率が非常に高く、年間で6~7割は晴れています。また高い山の上ですから、水蒸気量が非常に少なくて赤外線の観測に向いています。それから

割と強い風が吹きますが、絶海の孤島で風上に山などはありませんから風の乱れが少なく、いつも一定の風が吹いています。このため星がちらちら瞬かないで、ピンとした写真を撮ることができます。私達はこのことをシーリングが良いと呼んでいます。まだまだいろいろな条件がありまして、現在、世界でこの高度で道がついていてアクセスできる観測地としては、このマウナケアが世界一であるといわれています。

ここには現在、これだけの望遠鏡があります、マウナケアの噴火口の縁に沿って並んで作られています。日本の望遠鏡はこの辺に建設する予定です。現地での気象確認テストやボーリングによる地盤調査などは終えていました、来年度から現地での工事を始めることになっております。この図は設計図を基にしたスケッチですが、ドームの直径が40メートルぐらい、高さは40数メートルという巨大構造になっています（図14）。鏡の直径が8メートル、鏡の焦点距離が15メートル程度ですから筒の長さが15メートル強です。普通の望遠鏡は北極星に向いた軸を持っていてその周りに一定の速さで回転しますが、この望遠鏡は2つの軸で動かします。そのため、望遠鏡が星を追尾するのにもコンピュータ制御が必要になりますが、その辺は日本の技術のお得意なところです。こういう具体的な設計モデルができあがってきております。

宇宙観測のハイテクニック

この望遠鏡のハイテクの話題は、私どもが能動光学と呼んでいる技術です。従来の設計概念で望遠鏡を建設しようとしますと非常に精密な鏡を要し

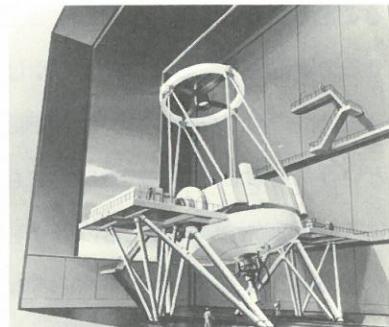
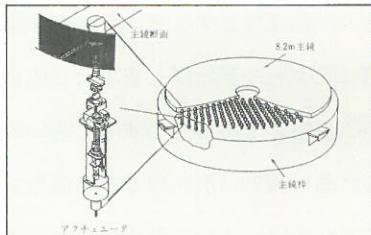


図14 口径8メートルの超大型望遠鏡「すばる」の完成予想図

ます。8メートルの鏡に必要な精度、表面の凹凸度は30ナノメートル以下でなくてはいけない。これをそのまま1万倍にスケールアップしますと、直径80キロメートルの土地を0.3ミリメートルの平坦さで地ならしするぐらいの精度に相当します。したがって、鏡は非常に高い精度に磨かなければなりません。実際には、いろいろな天体を観測するためにいろいろな方向に傾けて使いますから、いい加減な支え方だと向きが変わる度に鏡が歪んでしまいます。今までの技術では望遠鏡を作るときは、傾けても鏡が歪まないだけの非常に厚くて固い丈夫な鏡を使っていました。でも、この考え方で8メートルの望遠鏡を作りますと、鏡のガラスだけで100トンもの重さになってしまいます。鏡が重くなるとそれを支える望遠鏡も重くなり、望遠鏡が重くなるとそれを載せるドームも大きく重くなってしまうということで、お金が天文学者でもびっくりする程の天文的な額になってしまいます（笑い）。そういうわけで、なんとか軽くしなければなりませんでした。苦肉の策で思い切って薄くしよう、薄くすれば軽くなります。でも薄くして傾けると鏡は曲がってしまう。ですから、鏡の曲がりを常に精密に測っていて、曲がろうとしたらコンピュータ制御ですぐにこれを元に戻すというやり方を考えました。これが能動光学という考え方です。この方法で、今までの重さに比べれば6分の1ぐらいに軽くすることができました。

この方式をとることによりまして多くのメリットが出てきます。というのは今までですと、一旦磨いてしまったら据えつけ方が悪くて歪んでも手直しのようがない、それから温度が変わって鏡が歪んでも直しがなかつたわけです。しかし、この考え方ですと時々刻々調整できるわけですから、これは鏡を磨く会社の人には秘密にしておきたいのですが、多少いい加減に磨かれてもこちらでなんとかすることができるということです（笑い）。

図15



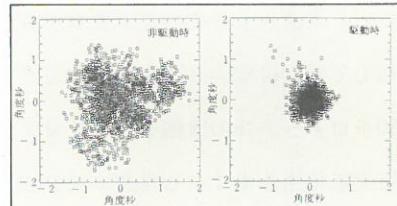
能動支持ロボットハンド群で支えられる直径8mの鏡

鏡は沢山のコンピュータ制御のアクチュエータ、ロボットハンドとも呼びますが、それで支えられています（図15）。1つ1つのアクチュエータには支えている力を測るセンサが付いています、どれだけの力で支えているかが分かります。すると、鏡の形がどうなっているかを計算できます。一方、実際に星の光を使って鏡がきちんとしているかを測ることができます。この2つの情報を使って、鏡をいつも最良の状態にしようというのが能動光学の考え方です。能動光学というハイテク技術で、鏡の形を思い通りにコントロールできるということを、私たちは1988年に直径62センチメートル、厚さが2センチメートルのガラス鏡でデモンストレーションしました。

すばる望遠鏡は地上で考えられる一番良い場所を選びました。ハワイ島のマウナケアの山頂に1エーカーというかなり広い土地をハワイから借りています。年間借地料はたった1ドルという約束ですが、これはきちんと払います（笑い）。場所は一番良い、それにコンピュータ制御で非常に良い鏡を作ります。白雪姫にててくる魔女のお妃が「宇宙で一番美しいのはだれ？」と問いかけても、「うーむ」と困るぐらいの非常に正直な、良い鏡です。

望遠鏡を入れるドームにもいろいろな工夫がされます。良い場所に良い望遠鏡を作っても、それを入れるドームがいい加減ではその中の空気が揺らいで像が駄目になります。したがって、ドームの中には一切の熱源を置きませ

図16



我々の開発したイメージスタビライザを用いるとシャープな星像が得られる

ん。それでも空気が揺らいだ場合には、それを吹き飛ばすなどいろんな工夫を考えております。こういうことによって、今までの望遠鏡で得られなかつた良い像を得ることを狙っています。しかしながら地上にいる限り、どうしても避けて通れないのが上層大気のゆらぎです。高さでいうと数キロメートルから100キロメートルぐらいの空気の揺らぎはどうしようもありません。ですが、これをも直してしまおうというのが補償光学という技術です。これは目下、研究開発中でありますし、実用になる目処がそろそろついてきたのではないかと私どもは思っております。

補償光学といいますのは、原理的には能動光学の技術と共通です。ただそれを非常にスピードアップしたものでして、1秒間に1,000回ぐらいた大気の揺らぎの状態を測って、そのデータを使って薄い鏡をぺこぺこ動かして全部調整してしまおうという技術です。これが実現しますと、わざわざ宇宙空間に出なくても、回折限界という理論的な限界はありますがそこに達するぐらいの解像度が得られます。宇宙望遠鏡がまだ2メートルクラスですから、8メートルクラスの望遠鏡ですと宇宙望遠鏡より4倍ぐらい良い解像力が実現できる筈です。

そういう技術の1つの手始めとして私どもが開発したものに、イメージスタビライザというのがあります。大気がゆらゆらしていますと、星は肉眼で見てもちらちらしています。実際に望遠鏡で見るとダンシングといって、星が踊りまわっています。ですから普通に観測していますと、星の位置がふらふら動きまわりましてそれらの集合として星の像が広がってしまいます。ところが、その動きを測定して一時手早く戻すようにしてやりますと、星をぴたっと止めることができます（図16）。これをイメージスタビライザといいます。

補償光学という技術が実現しますと天体の見え方がこんなに変わるというシミュレーションです。この図では星の像の大きさが角度の3秒角程度の場合はこのように見えます。日本国内の観測所では平均的にはこれぐらいですが、ハワイは大気が安定していますから平均で1秒角ぐらいが実現します。見え方がこれだけ違ってきます。それを能動光学手法を使って望遠鏡の光学系の甘さをきちんと修正しますと、もう3倍ぐらいは良くなります。更に補償光学手法で大気の揺らぎを時々刻々補正することができる解像力がもう10倍上がりまして、これまで見えなかったものも見えてくると期待しています（図17）。

世界の大天文台巡り

堅苦しいお話を続きましたので世界の天文台巡り、無料で世界一周できるガイドツアーをいたしましょう。

この写真は人工衛星から夜の地球を撮影したものです（図18）。そう思って見ていただくと世界地図に見えてくると思います。ちょっと日本が明かる過ぎて、いくらなんでも北海道までぎんぎらぎんなのは気になりますけれど…（笑い）。日本はもう文明国で、山奥のどこへ行っても光から逃げられないことがある意味では明らかになりました。現在、地球上で光害の影響を受けず、最先端の望遠鏡が設置されている三大天文台といわれているのは、南米のチリ、アフリカモロッコ沖のカナリー諸島、それにハワイ島です。いずれも絶海の孤島、或いは大陸の西側で寒流が下りてくる所、それが良い条件で、中緯度帯で風が西から東へ吹いています。

先ずチリの天文台にご案内いたします。サンチャゴから北方へ約600キロメートルのところに比較的大きな天文台が3つあります。この中のラ・シア

図17 能動光学や補償光学により星像をシャープにすると、より暗い天体も見えて来る

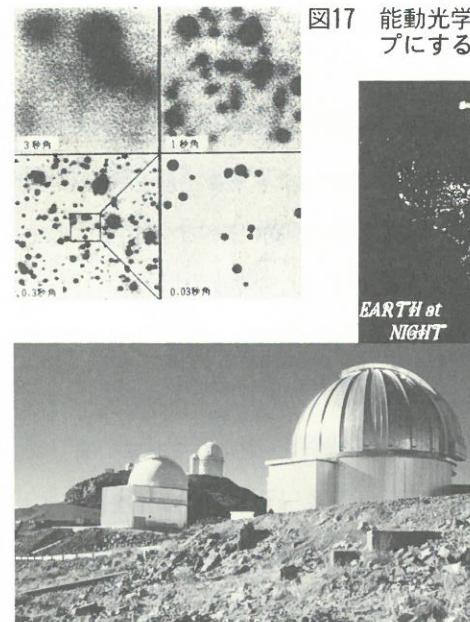
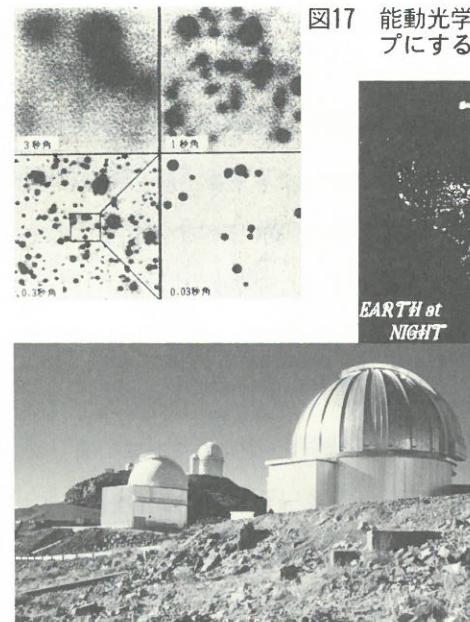


図18 人工衛星から見た夜の地球。都市の灯が著しい

図19 ヨーロッパ8か国共同機関、欧州南天天文台ラ・シア観測所（チリ）



天文台がこの写真です。600キロメートルありますので地元のバスで行きまると10時間ぐらいかかります。これはヨーロッパ8か国が1960年代に作った国際共同の天文台です。アメリカがそれまでに北半球にかなり大きい望遠鏡の天文台を沢山作っていました。ヨーロッパも作りたい、だけど北半球にはもうある。宇宙を観測するには北の宇宙を見ているだけでは全宇宙は分かりません、南半球にも天文台を作つて南の宇宙も観測して初めて全宇宙が見えるわけです。したがってヨーロッパは、我々は南へ行こうということで、南米のチリに大きな天文台を作りました。これが南米のチリにある欧州南天天文台です。ここでは今、13台の望遠鏡が宇宙を睨んでいます。これはちょっと古い写真ですが、これだけ各国の望遠鏡がありますので、この山上に毎日100人ぐらいの天文学者、コックさんなどいろんな方が寝泊まりして観測やそのサポート業務を行っています（図19）。

ヨーロッパの天文学は昔から貴族の学問だったと思います。そのへんが我々とはちょっと違う(笑い)。この機関はお金があるということもありまして、山頂まで 600キロメートルも行くのは大へんだということでこの天文台のすぐ麓に専用の滑走路を作ってしまいまして、週3回チャーター便を飛ばして観測に行く人を運んでいるわけです。その天文台で最初に作られた口径3.6メートルの望遠鏡には、ちょうど牧場のサイロのように子供の望遠鏡が付いています。7~8年前に行ったときに、当時流行っていました松田聖子のカセットテープを観測中にかけて聞いていたところ、現地のナイトアシスタントに「非常にセクシーな声だ、そのカセットを是非俺にくれ」と、取られてしまいました。

これは食事風景です。山の上なんですけど、しっかりネクタイを締めてサーブしてくれる人がいまして、まるでホテル並みです(図20)。生活環境を大事にするという文化風土の違いがあると思います。インスタントラーメンをすすっている、こっちの写真は私どもの天文台の夜食風景です(笑い)。ち



図20 人里離れたアンデス高地でも
食堂はヨーロッパ風

ょっと落差が大きいですね。

次の天文台は、カナリー諸島にある天文台です。ここもいろいろ歴史がありまして、皆さんご存じのグリニッジ天文台、これはロンドン郊外のグリニッジにあったわけですが、ロンドンの光が強くなってきたということで戦前、ロンドンから 100キロメートルぐらい南のハーストモンソーというところに望遠鏡を移して引っ越ししたわけです。ところが賢いイギリス人でも間違いをおかしまして、100 キロメートルぐらい行っただけでは全然お話にならない、夜空は少し暗くなりましたが、だいたい天候の悪いイギリス国内に望遠鏡を作っても駄目なんです。それで、そ

のあとは賢いのですが、もう1回引っ越しをしようということで思い切ってモロッコ沖の大西洋にあるカナリー諸島に移ったというわけです。ここには直径 4.2メートルの最新式の望遠鏡が動いていまして、この火山のカルデラの絶壁に建っています。

ハーストモンソーの天文台は、フランスがイギリスに攻め入った時に作られたフランス風の古城を、イギリスの文部省が買い取りまして、オフィスに使っていました。ここを訪問しましたら、4本の柱がついた王様が寝るような豪華な屋根の付いたベッドで、お風呂も寒々とする程広い部屋に泊められました。ところが、ここを維持するのが大へんになって2、3年前に売り払いまして引っ越しをしています。売り払うときには、これはきっと日本人が買うに違いないと言われていましたが、結果はどうなったか知りません。

カナリー諸島の天文台にはヘリコプターの発着場が4つあります。開所式をやったときに、これもヨーロッパの共同機関ですので、イギリス、オランダ、スウェーデン、スペインの王室から王族が来られる。順番をつけられないというので、4か国の王室専用にそれぞれヘリポートを作ってしまったと聞きました。ですからそのときには、キングが何枚、クィーンが何枚と、トランプでいうとフルハウスよりも凄い手になったそうです(笑い)。

日本が計画しておりますハワイ島の写真は先ほども見ていただきました。ここに山頂の望遠鏡ドーム、海拔 2,800メートルの所に中間宿泊施設、ハワイ第二の町ヒロ市に現地観測所を建て、日本とは衛星コミュニケーション、海底光ファイバーケーブルで通信します。今すでに、ハワイ大学と東京大学との間に専用の通信ネットワークが繋がっておりますし、そういうものを利用してやりとりをするという構想です。最後にもう一度、すばる望遠鏡の完成予想図をご覧いただきます。

講

演

「宇宙と光」

（この1年）

浜松ホトニクス株式会社 社長
晝馬輝夫

浜松の技術で宇宙の新しい姿を見つけたい

私ども国立天文台では、ハワイ島に直径8メートルの、1枚鏡としては世界最大の望遠鏡を8年計画で作りたいということで1991年度から建設を始めました。ですから21世紀の初めには、非常にシャープな宇宙を見る良い眼鏡ができている筈です。光は集められます。でも、それをきちんと捕らえて処理することがもう1つ大事な技術になります。それには今までにCCDとか光のディテクタの発展がものをいってきたわけですが、更に日本の優秀なハイテク光技術が期待されています。

東海地方というのは、天女の羽衣の時代から宇宙との関係があったのではないかと思います。もう1つ、今日の主催者にお世辞を言うわけではありませんが、浜松ホトニクスさんには私ども天文関係では光を捕らえる検出器の部分で非常にお世話になっています。これは皆さんご存じでしょうが、光技術という意味で世界的に有名で、実際私どもだけでなく、世界の先端的な天文台でも浜松ホトニクスの製品がよく使われています。天体物理学の分野でもいろいろな成果が出ています。例えば、3年前のマゼラン星雲の超新星爆発のときにやってきたニュートリノを浜松ホトニクスの光電子増倍管が捕らえ、世界中に大きなインパクトを与えたしました。

こういう宇宙の理解に対する貢献がこの浜松地域から出ています。私どもとしましては、「すばる」望遠鏡の検出器の開発を一緒にやらせていただいて、浜松市民の皆さんの誇りとなるようなノーベル賞クラスの発見、宇宙に対する認識を変えるような発見につながる研究をしていきたいと日夜努力しております。

以上で私の講演を終わらせていただきます。どうもご清聴ありがとうございました。（会場拍手）