

1. みえてきた宇宙の大構造と まだみえない原始銀河 —観測的宇宙論— 家 正則

国立天文台教授

はじめに

観測事実に基づいて宇宙の構造と進化を研究する観測的宇宙論は、素粒子の知識を使って宇宙の進化を考える素粒子的宇宙論研究と対をなすものです。例えは適切でないかもしれませんのが、素粒子が重要であった宇宙のごく初期の時代を「あの世」とすれば、私たちが現在住んでいる「この世」から、そのような時代にさかのぼる研究分野であるといえます。

本日の私の話の内容は二つにわけることができます。前半では、どんな技術革新が宇宙観測を進める原動力となったのかということと、宇宙論の枠組みについて、触れることになります。さらに、宇宙の果ての天体の観測の現状を具体的な例を示しながら紹介し、宇宙論のなかでそれがどのような意味をもつているかをお話しすることにします。

後半では、21世紀の観測的宇宙論研究を大いに進展させることをねらい、国立天文台が1991年度からハワイ島に建設している口径8mの『すばる』望遠鏡(JNLT)計画についてお話しします。最後に少々時間をいただき、世界の最先端の天文台へスライドでご案内することにします。

1. 宇宙の果ての天体を求めて

1.1 観測天文学を飛躍させた技術革新

20世紀の後半、観測的宇宙論の分野で大きな進展がありました。これを支えた大きな要因を2点あげることができます。第1は、天体観測に用いる電磁波の波長域が拡大したこと、第2は電磁波をとらえる半導体技術の進歩で、観測精度が飛躍的に向上したことです。

観測波長域の拡大

まず、観測波長域の拡大について説明することにします。本シンポジウムでは、電磁波以外の宇宙線、ニュートリノ、重力波を使って宇宙を観察するという話が、荒船先生、戸塚先生、河島先生からあります。電磁波だけにかぎっても1900年以降、特に50年以降、観測する手段が広がってきました。20世紀前半までは、光の画像を写真に撮るという手段しかありませんでしたが、第2次世界大戦前後から電波を使って宇宙からの「音」を聞くことができるようになりました。そして、70年代、80年代になり、X線から紫外線、可視、赤外、電波などすべての波長域で、宇宙を観測する何らかの方法が確立したことが、宇宙の理解を進めるうえで大きな原動力になりました。

一つの端的な例を示しましょう。図1aは私たちの銀河系のお隣り、距離230万光年にある、お姉さん格のアンドロメダ大星雲です。この銀河もいろいろな波長で観測すると、様

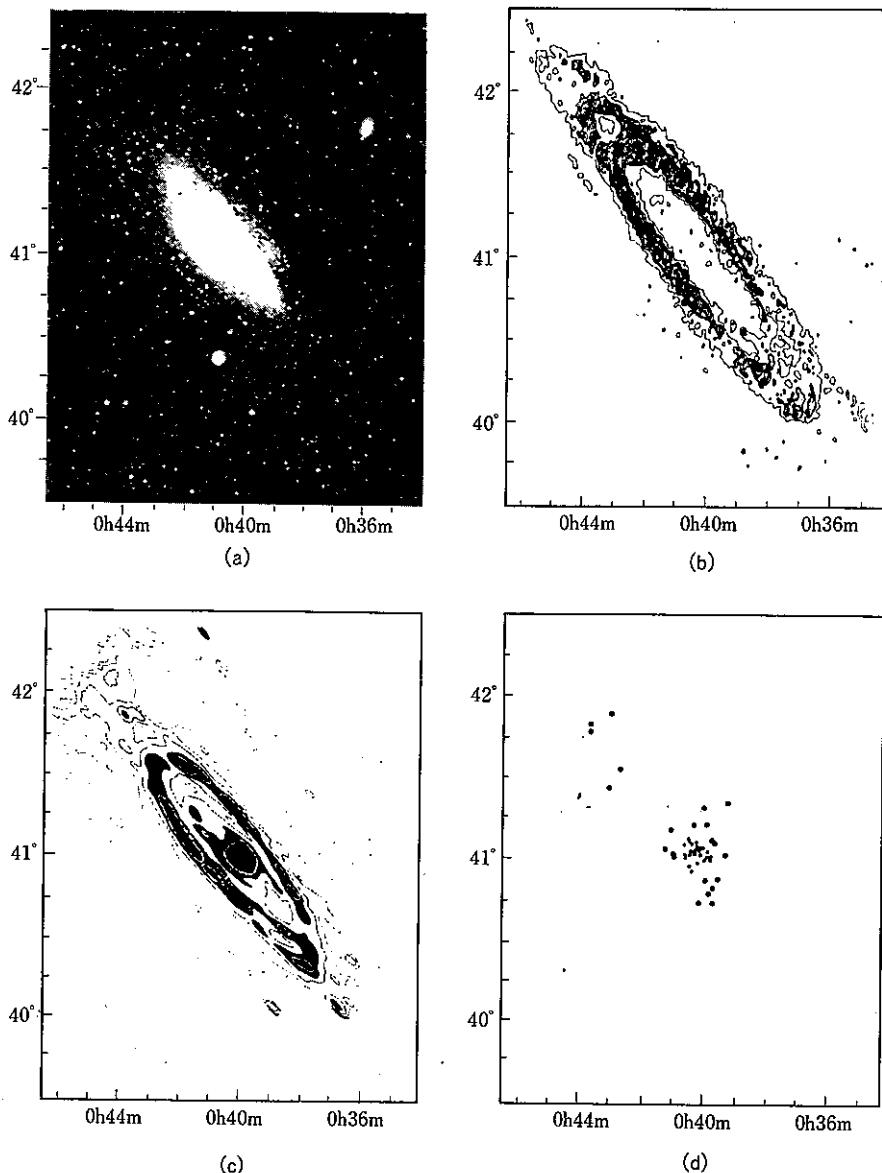


図1 いろいろな波長でみたアンドロメダ銀河M31。(a)青色光、(b)中性水素21cm線、(c)60 μ m赤外線、(d)0.5–4.5keV X線(G. Walker : Astronomical Observations, Cambridge Univ. Press, p.5, 1987)

子が異なったものとなります。図1 aは青い光でみた画像で、主に質量の大きい比較的若い星々の分布を示しています。図1 bは、中性水素の原子が放射する波長21cmの特徴的な電波をとらえて画像化したもので、中性水素原子の分布を表していますが、アンドロメダ

大星雲では、中性水素原子がなぜかリング状に分布しています。電波と光の中間の波長である60 μ mの赤外線で観測すると、図1 cに示すようになります。電波の観測結果と少し似ていますが、真ん中に少し明るい部分があり、周りがリングになっています。これは主に星

間空間に漂う塵からの赤外線放射を観測しているものと思われます。

もっと波長が短いX線でアンドロメダ大星雲を観測すると図1dのようになります。中心近傍に点がいくつみえるだけになります。X線は非常に高温のガスから放射されます。このような現象は、数ある連星(二つの星が互いに回っているもの)のうち、一方の星から他方のコンパクトな星にガスが降り積もる現象が起るときに観測されるといわれています。

このように、観測する電磁波の波長域により、違った天体の姿がみえ、観測的宇宙論を進めるうえでも大きな引き金になりました。

より微かな天体を目指して

天体の明るさはベガ(織女星)を基準に定義されています。ベガの明るさを0等星ときめ、その明るさの100分の1の天体を5等星と天文学では規定しています。0等星から地球上に到達するフォトン(光子)の数は、1Åの波長域で1秒間に 1 cm^2 当たり約1,000個であり、実生活で使われている明るさの単位に換算すると2.5マイクロルクスとなります。普通、1ルクスほどの明るさで撮れれば超高感度カメラといわれていますので、0等星といえども星明りとはずいぶん暗いものであることがおわかりいただけると思います。

しかし、これで驚いてはいけません。観測的宇宙論で実際に観測したい天体は25等星、場合によってはそれより暗い天体です。このため、後述する直径8mの大望遠鏡で集めたとしても、25等星からのフォトン数は、波長幅1,000Åで、1秒当たりせいぜい50個ほどにしかなりません。星の像は10画素程度に広がりますが、1画素当たり1万個ほどのフォトンを集めると質のよい画像となりますので、画像をえるだけであれば8mの望遠鏡で最新の技術を使えば、約30分の露出ですみます。しかし、観測的宇宙論を物理的、学問的に進めるためには、その光を虹の7色に分光し、

物理的な解析を行う必要があり、ただでさえ微かな光を分光するため、フォトンの到来率は非常に低くなります。実際に25等星を天体物理的な測定が可能な程度に分解すると、4秒間に1個ほどのフォトンしか届きません。1万個集めようとすると、10時間の露出が必要になります。その意味で、宇宙論的観測を実際に行うためには宇宙からのフォトンを1個たりとも無駄にできません。これが天文学者が欲張りだといわれる由縁です。

このため、大きな望遠鏡で星からの光をたくさん集め、集めたものは残さず汲みつくす、感度の高い無駄のない光学系と検出器を使うことが鍵になります。

半導体検出器の進歩

検出器の進歩でもっとも典型的な成果は、CCD(charge coupled device)という、シリコン半導体のなかでの内部光電効果を使った検出器の実用化でした。図2は、日本で私たちが最初に液体窒素冷却方式で使ったCCD素子です。目玉にあたる画素が約20万個あり、1個当たりの値段は約10円でしたが、当時としては高価なものでした。私たちは、1986年頃に東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡にCCDカメラをつけて24等星までの暗い天体の観測に成功しましたが、日本国内で1番暗い天体をみた記録は、まだ私たちがもっているのではないかと思います。

このCCDは家庭用ビデオカメラにも組み込

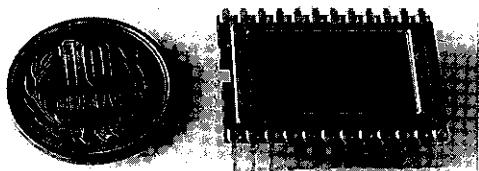


図2 岡山天体物理観測所で用いられたCCD

まれていますが、天体観測に使う場合、ノイズを少なくするため液体窒素を用いて $-120\text{--}-130^{\circ}\text{C}$ に冷却して使います。このような検出器が開発されたおかげで天体観測が進みました。その一例を紹介します。

アメリカのキットピーク天文台にある4m望遠鏡は、現在でも最先端で活躍しています。この望遠鏡に、粒子が細かく最高感度の写真乾板をつけて観測した例を図3aに示します。この写真は、天の川からもっとも離れた方向、銀河系の北極方向の写真です。この方向は星がもっとも少ない領域で、遠くの宇宙をみるのに手前の星がじゃまにならない方向です。この写真にはもっとも暗いもので、21等星までが写っています。これが1980年頃の先端技術でした。

これとまったく同じ領域をCCDを使って観測すると、図3bのようになります。このCCD写真には、もっとも暗い天体で28等星までの多くの天体をみることができます。このようなCCD写真をさまざまな色フィルターで撮影すると、その天体の色がわかります。このCCD写真を撮ったタイソンは、非常に多くの青くて暗い天体があることを発見しました。これらの天体は、直接の証拠こそありませんが、赤方偏移(z)が1程度の非常に遠い銀河、大ざっぱにいうと宇宙の果てまでの半分ほどの

距離にある銀河であると想像されています。CCD技術を十二分に使うことにより、このような天体が何とかみえるようになってきたのが現在の状況です。国立天文台でも、広い宇宙を一度に観測するため、CCD素子を64個並べた大きな検出器システムの開発がはじまっています。

赤方偏移と赤外線観測の重要性

宇宙は一様に膨張しているため、遠くにあり、非常に速い速度でわれわれから遠ざかっている天体からやってくる電磁波は、ドップラー効果により波長が引き延ばされます。ドップラー効果は、消防車が近づいてくると音が高くなり、遠ざかっていくとピッチが下がるという、音に対する現象でおなじみですね。まったく同じことが光に対しても起こります。したがって、非常に遠い天体が、宇宙膨張のためにわれわれから遠ざかっていくと、そこからくる電磁波の波長が間伸びして長くなり、色が赤っぽくなります。もし近づいていれば、逆に青っぽくなります。このように、波長が何割伸びたかという目安を赤方偏移(レッドシフト)といいます。このため、その天体から発せられたときには可視光であっても、地球に届くときには波長の長い赤外線になってしまいます(図4)。ですから、宇宙の果てに近い天体を観測するには、可視光だけではなく、

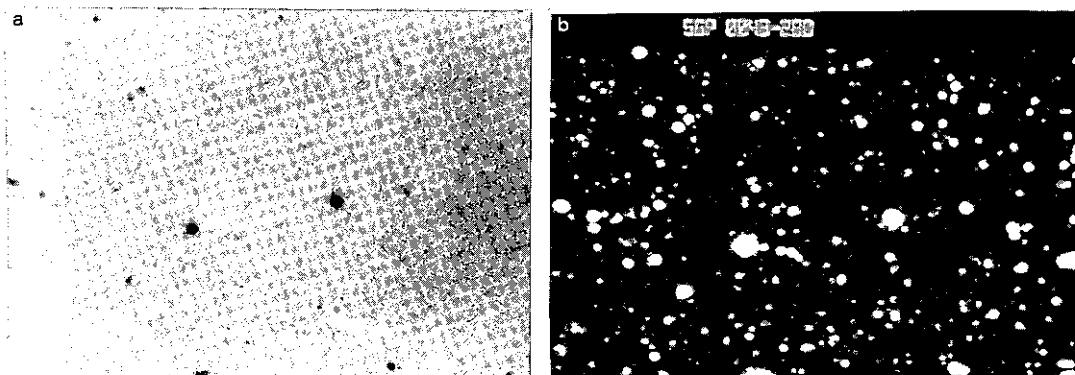


図3 銀河系南極方向の(a)高感度乳剤写真と、(b)高感度CCD写真 (A. Tyson : Astron. J., 96, p.1, 1988)

赤外線でも感度の高い観測装置が重要になります。そのような観測が現在可能になりはじめています。

画像を撮るだけではなく、天体を物理学的に調べるためにには、天体からの光をプリズムのような分光素子を使って7色の虹に分光し分析します。実際には、分光素子の分解能を

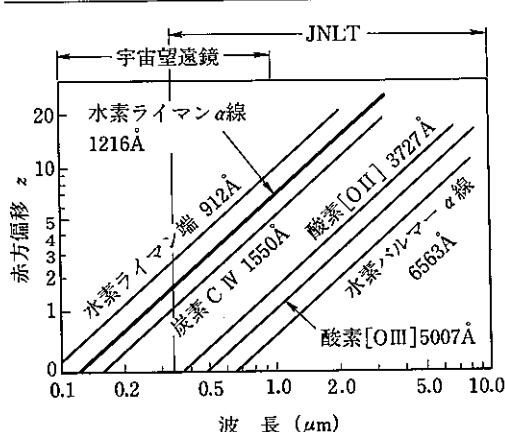


図4 赤方偏移 z と輝線スペクトルの観測波長

上げて1,000色から10万色に分光します。こうして、その天体の温度、速度、化学組成など、物理的な各種の情報をえることができます。わずかな天体の光を分光することは簡単ではありませんが、宇宙の果ての天体の性質や物理状態を分光学的に調べることが可能になります。望遠鏡の前に大きなプリズムをおくと、すべての星、すべての天体が虹になります。このスペクトルを解析することにより、それぞれの星の性質や状態が読み取れます。多くのスペクトルのなかから特徴のある天体を拾いだすことにより、うまくすると、それが宇宙の果てにある天体だったりするわけです。

1.2 宇宙モデルと大構造

銀河の世界

図5は、ヘラクレス座の銀河団で、点状でなく、少し「もやっ」としているのがすべて銀河です。一つ一つの銀河に、われわれの銀河系と同じく約2,000億個の星があります。星

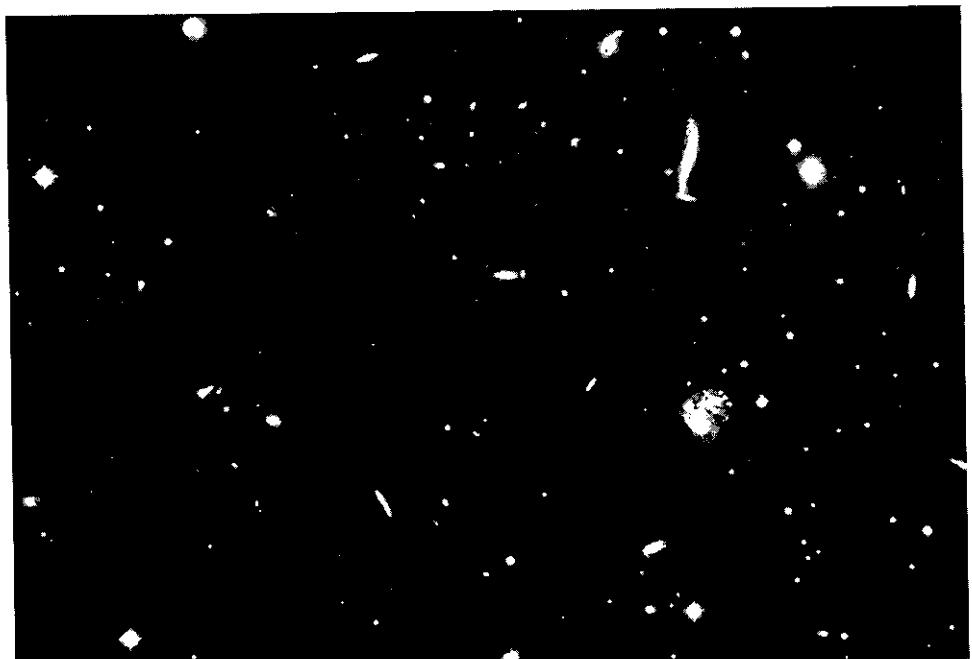


図5 ヘラクレス座銀河団

と星の間の平均距離は星の大きさに比べて非常に長く、例えば球状星団のように星が混んでいる領域でも星同士が衝突することはまず起こりません。しかし、銀河と銀河の間の距離は、密度の高い銀河団の中心などでは銀河の直径のわずか数十倍であるため、銀河同士はニアミスをしたり、衝突していると考えられます。実際、銀河団の中心方向、銀河の密度が高い領域では楕円銀河の割合が多く、銀河がまばらな領域では渦巻銀河が多いことが、統計的に示されています。銀河の社会でも弱肉強食の原理があり、銀河団のなかに非常に大きな楕円銀河ができると、その重力により、次々と周りの銀河が飲み込まれてしまいます。そのようなことをカニバリズムといいます。

銀河の分布地図の作製

ドップラー効果を使って各銀河の後退速度を測定し、ハッブルの宇宙膨張の法則を使い、われわれからの距離に換算します。数万個の銀河について測定したアメリカのグループの結果をプロットすると、われわれから数億光年の範囲内では、銀河がほとんどない領域と銀河が連なっている領域があることがわかりました。これは宇宙の泡構造あるいは「大構造」といわれています(図6)。

一方、宇宙背景放射観測衛星“COBE”が、宇宙からくるマイクロ波の強度分布を0.01%の精度で測定し、マイクロ波の強さにムラがあることを発見しました。これは、 $z \approx 1,000$ 程度の時代の宇宙のかすかなムラを発見した

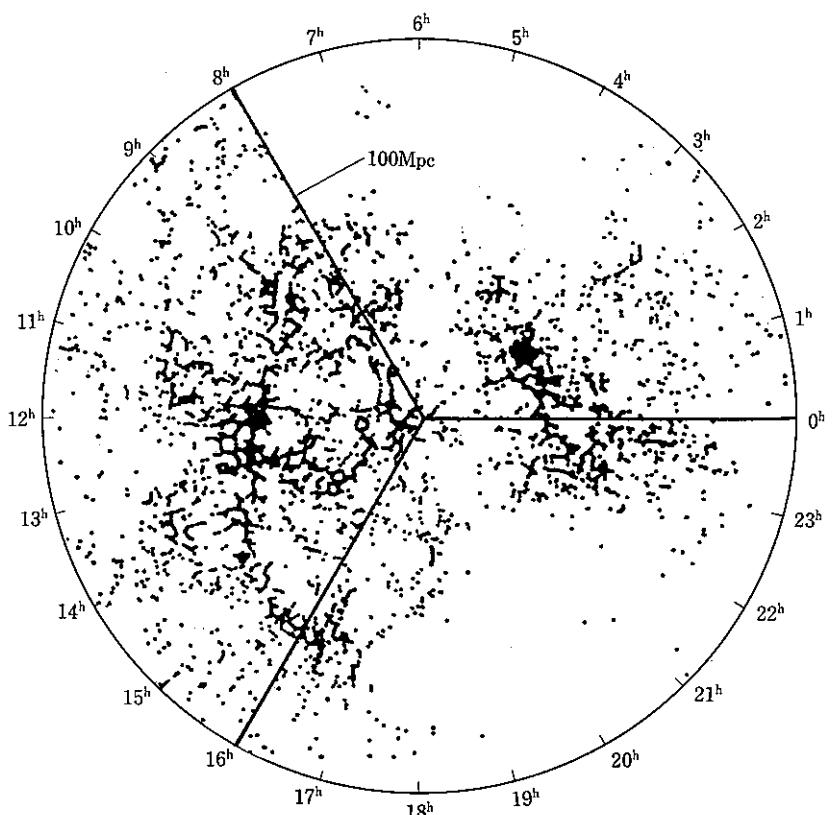


図6 赤方偏移探査から求められた銀河の分布にみられる宇宙の大構造
(M. J. Geller and J. P. Huchra : Science 246, 857, 1989)

ことになります。この関係を少し説明します。

大構造が明らかになっている領域は数億光年、赤方偏移では $z < 0.1$ の領域です。宇宙の果ては距離でいうと、ざっと 150 億光年、赤方偏移は無限大です。後述しますが、実際に個別の天体としては、最大 $z = 4.90$ の天体まで現在確認されています。 $4.9 < z < 1000$ の領域、あるいはそれに対応する時代は、観測的には何も知られていない宇宙の暗黒時代ということができます。

しかし、これから 10 年、20 年の間に 8 m 級望遠鏡やサーベイ専用望遠鏡により銀河の分布地図をつくることが計画されています。21 世紀には宇宙のかなりの部分に関して宇宙地図が作製できるものと予想されます。その地図ができると、そのなかで特に興味深い領域に着目し、つぶさに観測することが可能になり、宇宙の大規模な構造が明らかになります。

500 年前にコロンブスが新大陸発見の大航海にて、人類の認識の範囲を地球全体に広めました。コロンブスから 500 年後の現在、私た

ちは後で述べる『すばる』望遠鏡などにより、人類の認識の範囲を宇宙のほんの 1% ほどの領域から、宇宙全体に広げようとしています。私たちは人類史上、大きな意識上の変革期にさしかかっているのです。

宇宙モデル／ハッブル定数と減速定数

赤方偏移が 1 に比べて無視できないほど大きくなると、相対論の効果を考える必要があります。赤方偏移が非常に小さい範囲では、赤方偏移の大きさは、その天体が遠ざかる速度と光速の比になります。そして、一様膨張している宇宙のなかでは、遠ざかる速度は、その天体までの距離に比例していることが、ハッブルの法則として 1920 年代後半に明らかになっています。

膨張する宇宙モデルを記述するパラメータとして、基本的なものが二つあります。現在の宇宙は、ある時刻で、ある大きさをもっています。現在の宇宙は一様等方に膨張していますが、単位時間当たりの膨張速度は、50% ほどの誤差範囲で観測的にきまっています。

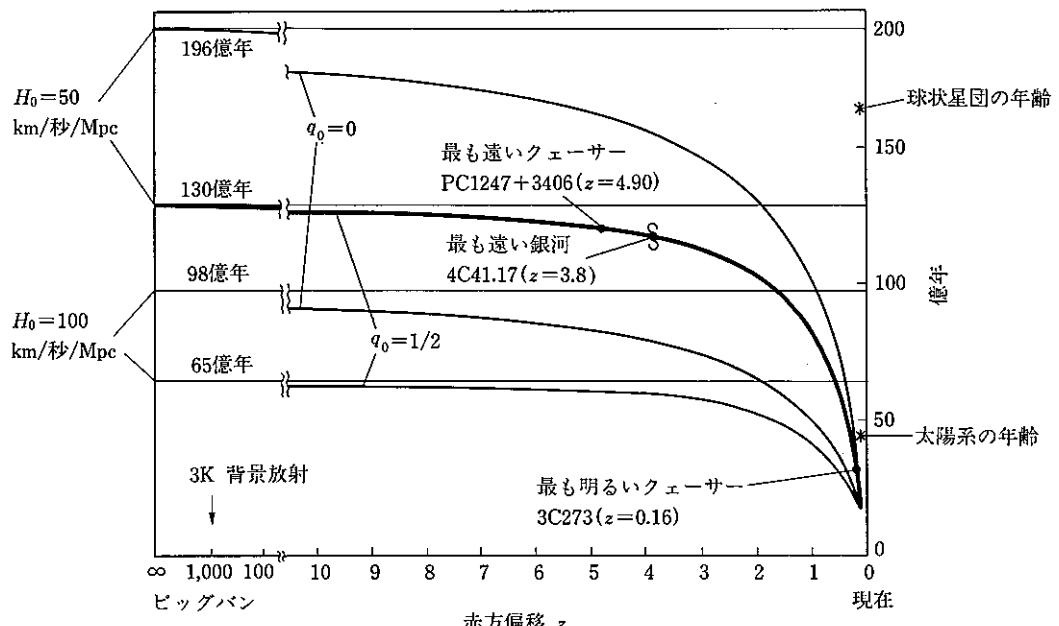


図 7 4 つ宇宙モデルにおける赤方偏移 z と宇宙経過時間 t

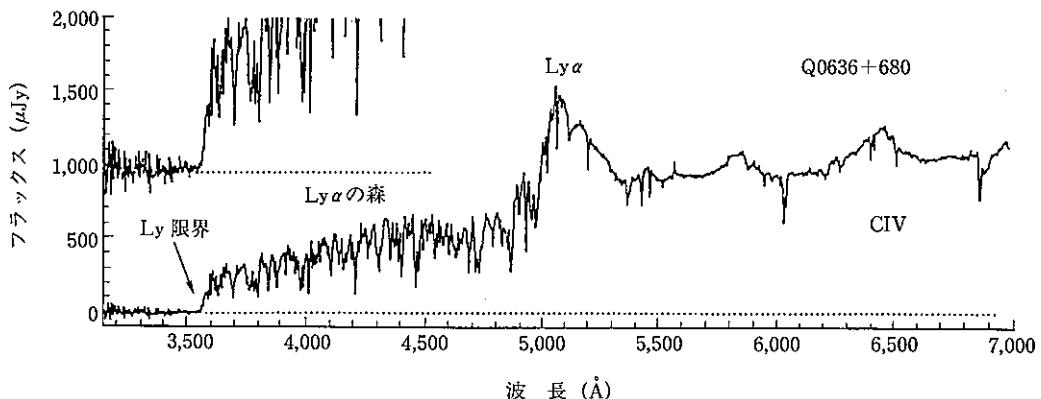


図 8 クエーサーのスペクトルにみられるライマン α 吸収雲
(Sargent et al. : Astrophys. J. Suppl., 69, 703, 1989)

この膨張の割合をハッブル定数 H_0 といい、このハッブル定数の逆数が宇宙のハッブル時間で、宇宙の年齢の目安になります。

もう一つの重要な定数は、宇宙の平均密度に関係しています。膨張がやがてとまるか、とまらないかという問題に対応したパラメータです。それを表すパラメータが減速定数(q_0)、減速パラメータです。佐藤先生が説明されたインフレーション宇宙では、 q_0 が0.5という値になることが予測されています。 $q_0 > 0.5$ であれば、何十億年か先に宇宙は膨張から収縮に転じます。 $q_0 < 0.5$ であれば膨張はとまりません。実際の観測から宇宙の平均密度を計算すると、 q_0 は0.5より小さい値になります。この謎は、みえない暗黒物質(ダークマター)の話とつながっています。

図7は、横軸が赤方偏移、縦軸が宇宙がはじまってからの時間、または宇宙の大きさ(距離)を示しています。この図に実際の宇宙の膨張の様子を書いてみると、ハッブル定数と減速定数の値に応じていろいろな曲線となります。図には4通りの宇宙モデルを書いてみました。横軸の赤方偏移は、観測できる一意的な値で、縦軸の年齢または距離は、宇宙モデルを介して赤方偏移と結びついています。ですから、天文学者はこれこれの天体は赤方

偏移がいくつというときには、自信に満ちた口調でいいますが、「距離はいくらですか」と聞かれると、「宇宙モデルをこれこれと仮定すると、何億光年となります」と、少し歯切れが悪くなるのです。赤方偏移が同じ天体でも、その距離は宇宙モデルのとり方次第で大きく異なってしまいます。

1.3 宇宙ギネスブック

原始銀河

銀河形成がどのようにして起こったのか、さまざまなシナリオが描かれていますが、いわゆる原始銀河(生まれたての銀河)はいまだ発見されていません。赤方偏移の大きい遠くのクエーサーの光を分光してスペクトルを撮ると、そこには細い吸収線がたくさんみえてきます(図8)。宇宙でもっとも多い元素である水素の、もっとも強い線スペクトルであるライマン α 線として観測される、これらの吸収線は、銀河になり損ねた原始ガス雲と考えられています。しかしながら、“ライマン α の森”と呼ばれる、これらの吸収線スペクトルに対応する原始雲は、1個1個では銀河といえるほどの質量にはなりません。

ちなみに、原始銀河とはビッグバンから1億年(10億年くらいかもしれません)の間に、宇宙膨張を振り切って、自分自身の重力で一

つの塊になった状態を想定して呼んでいます。それは $z = 3 \sim 30$ ほどの時代です。

1967年にパートリッジとピープルスが、次のような理論的な予言をしました。ビッグバンから1億年ほどして宇宙が十分冷えると、密度のムラムラが濃くなり、原始銀河のなかで重い星や軽い星がいっせいに誕生します。重い星はわりと短時間で一生をおえて爆発してしまいます。

そう考えると、生まれたての銀河では、大質量の星がいっせいに輝くため、非常に明るい時代があったはずです。場合によっては現在の一つの銀河の100倍ほど明るい時期があった可能性があります。そこで、そのような天体の探索がはじめられました。

実際に、銀河が生まれてから年とともに、どのようにその放射スペクトルが変化するかを計算した例があります。生まれたての銀河では非常に大きな質量の星が輝きます。そのような星は高温ですから青い光が強くなっています。そして、エネルギーの強い輻射場のなかで星間ガスが電離されるため、水素などいろいろな原子が特定の輝線スペクトルを放射します。重い星はすぐに死んでしまうため、数億年から10億年ほどで青い光が衰え、赤く

なります。これが銀河の色でみた進化です。

実際に、原始銀河ではないかと最初にいわれたのが、PKS1614+051というクエーサーに付随する天体です。このクエーサーは赤方偏移 $z = 3.218$ ですから、波長が4.2倍に伸びていますが、その4.2倍に伸びたライマン α 輝線（実験室では波長が約1,215 Å）の光だけを通すフィルターを使い撮影した写真と、普通の写真とを比較したところ、クエーサーの近傍に輝線の強い天体が発見されたのです。

しかし、これをもって原始銀河とすることにはいろいろな反論がでています。一つには、クエーサーが近くにあるので、星自体が光っているのではなく、クエーサーからの光をうけたガスが電離して光っているのだといわれ、原始銀河の候補としては失格になりました。

別の赤方偏移 $z = 3.4$ ほどの電波天体0902+343から、やはり赤方偏移したライマン α 輝線が観測されました。その天体の色を調べると（図9）、2カ所の波長で明るさが大きく変化していることがわかりました。このとびは、原子物理学でてくるバルマージャンプあるいはライマンジャンプに対応するとびと解釈されています。その解釈にたつと、このような色をもつためには、この天体にはすでに15

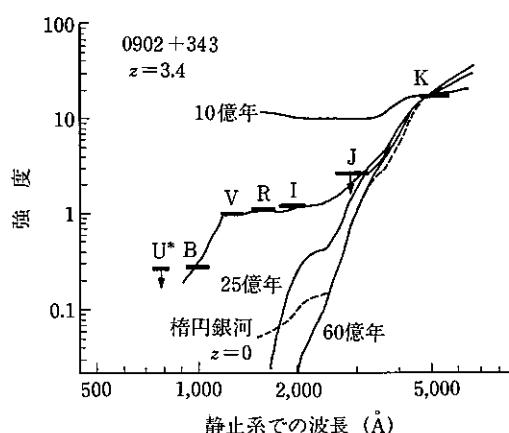


図9 15億歳の星々を含む遠方の銀河 0902+343(S. Lilly : Astrophys. J., 333, 161, 1988)

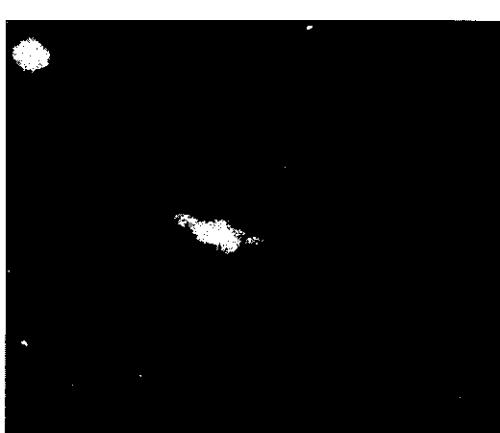


図10 もっとも遠い銀河4C41.17(K. Chambers et al. : Astrophys. J., 363, 21, 1990)

億年ほど経った、年をとった星がかなり多く存在しなければならないことになります。すでに15億歳の星があるという意味で、この銀河も生まれたての銀河とはいえません¹⁾。

ちなみに、この天体のすぐ近くで $z=3.395$ の時代からの中性水素の電波が受信できました。これはごく最近の結果ですが、広がりと中性水素電波の強さから、中性水素ガスの量は太陽質量の100兆倍と見積られ、銀河系100~1,000個分に相当する質量をガスだけでもっています。これこそ原始パンケーキではないかといわれています。今まで原始銀河といつてもよいであろうと思われるのはこれくらいです。このパンケーキ領域からも、やはりライマン α 光だけで光っている天体が発

見されています。これが光るために、クエーサーからの光は遠いため、自分自身のなかに星間ガスを光らせるエネルギー源が必要となります。それが若い星だとすると、これはかなり若い、生まれたての銀河だということができるかもしれません。

確認されているもっとも遠い銀河と
クエーサー

いろいろな例を紹介しましたが、宇宙ギネスブックという観点から、現在、観測されているもっとも遠い銀河4C41.17の姿を図10に示します。 $z=3.800$ の天体で電波源を観測していくで発見されたもので、このライマン α 光も電波源のエネルギーをもらって光っているのかもしれません。

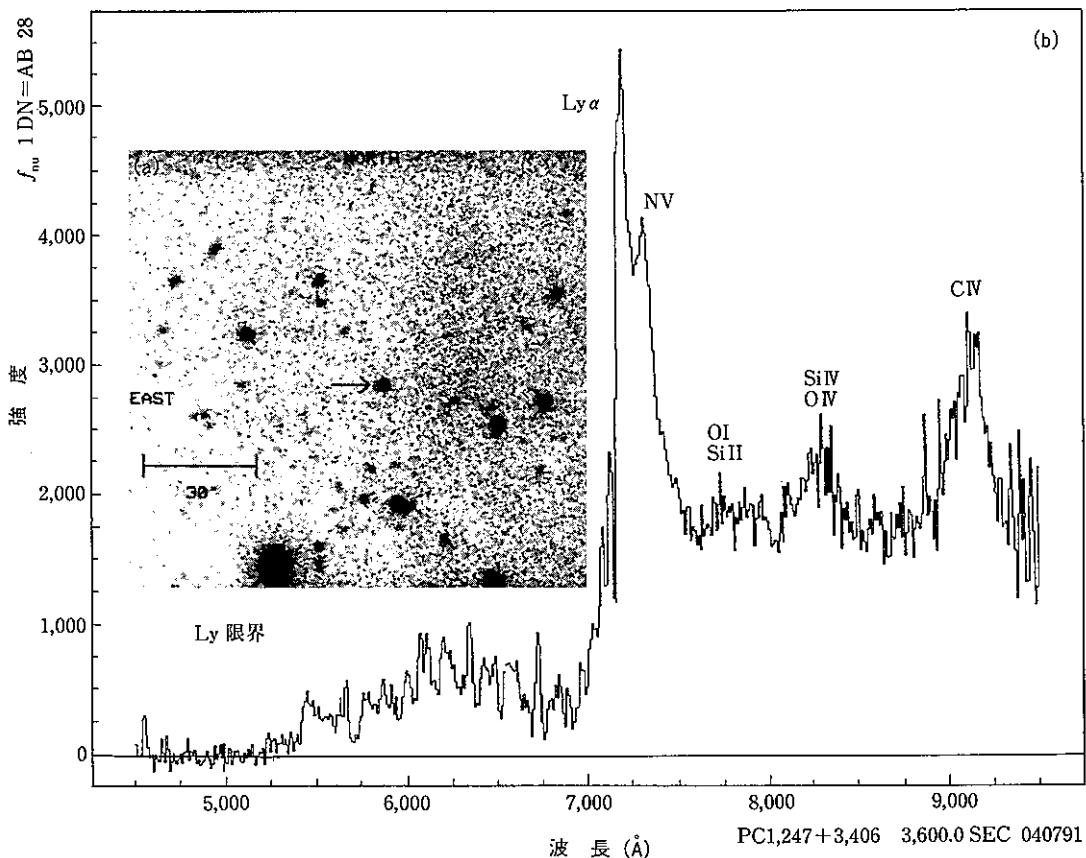


図11 もっとも遠いクエーサーPC1247+3406 (Schneider et al. : Astron. J., 102, 387, 1991)

銀河ではなくクエーサーにまで範囲を広げると、もっとも遠い赤方偏移 $z=4.897$ のクエーサー PC1247+3406 があります(図11a)。この天体の場合、本来、 $1,215\text{ \AA}$ にあるべきライマン α 光が実際には $7,200\text{ \AA}$ まで伸びています(図11b)。

簡単にまとめると、もっとも遠いクエーサーとしては $z=4.90$ のものが発見され、 z が 4 を超すクエーサーは約20例、 z が 3 ほどの銀河は数十個発見されています。人類の具体的な認識としては、そういう遠さの領域まで個々の天体としては達しています。しかし、宇宙全体を把握しているかというと、まだほど遠い状況にあります。「この世」から「あの世」へアプローチする立場からいうと、少なくとも z が 5 より昔の時代に生まれていた天体がいくつかあることは確かです。このことが観測的宇宙モデルにどのような制限を与えるかを簡単に紹介します。

原始銀河観測の意義

宇宙膨張の様子は、宇宙モデルのいろいろ

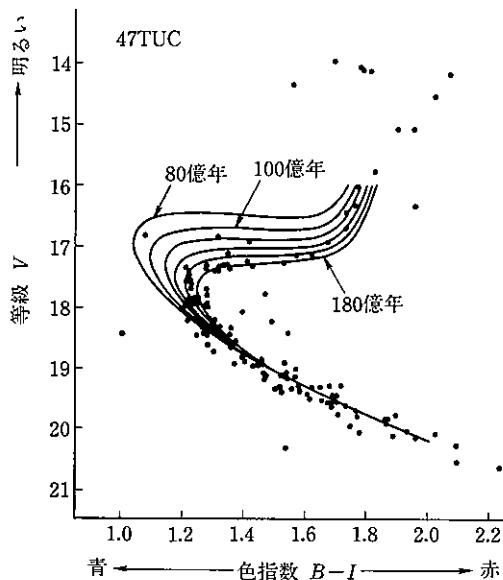


図12 球状星団の色-等級図と球状星団の年齢
(G. Alcaino : Messenger, 53, 32, 1987)

なパラメータの値により、図7のように異なる曲線にそって変化します。例えば、赤方偏移 $z=3.4$ の領域に15億年経た銀河があると述べました。その通りうけとると、 $z=3.4$ のところでは、それより15億年前に生まれていることになります。したがって、 $z=3.4$ と $z=\infty$ との時間差が15億年以下の宇宙モデルは、不都合を生じることになります。このような考察から、宇宙論のなかのハッブル定数や減速定数に対する具体的な制限をつけることができます。

原始銀河をいろいろな方法で探索していますが、間違いなく、誰もが認める原始銀河は、残念ながら、まだ発見されていません。その理由はよくわかりませんが、星形成が最初に予想されていたほどいっせいに起こらなかったのかもしれません。非常に明るくなるような大質量星が、最初に多く生まれなかったのかもしれません。あるいは、実際に存在してもダストにおおわれてみえないのかもしれません。原始銀河が誕生したのは赤方偏移が10よりも昔であり、赤外線でないと観察できないのかもしれません。このように、いろいろな考え方がありますが、このへんを明らかにするのが今後10年間のテーマの一つであると思います。

宇宙年齢をきめるうえで鍵になっているのが、球状星団の H-R 図(色-等級図)です。球状星団の色と明るさを調べ、星の進化理論から求められる色や明るさと比較することによ

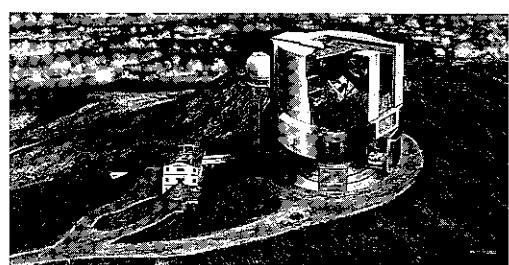


図13 すばる望遠鏡完成予想図

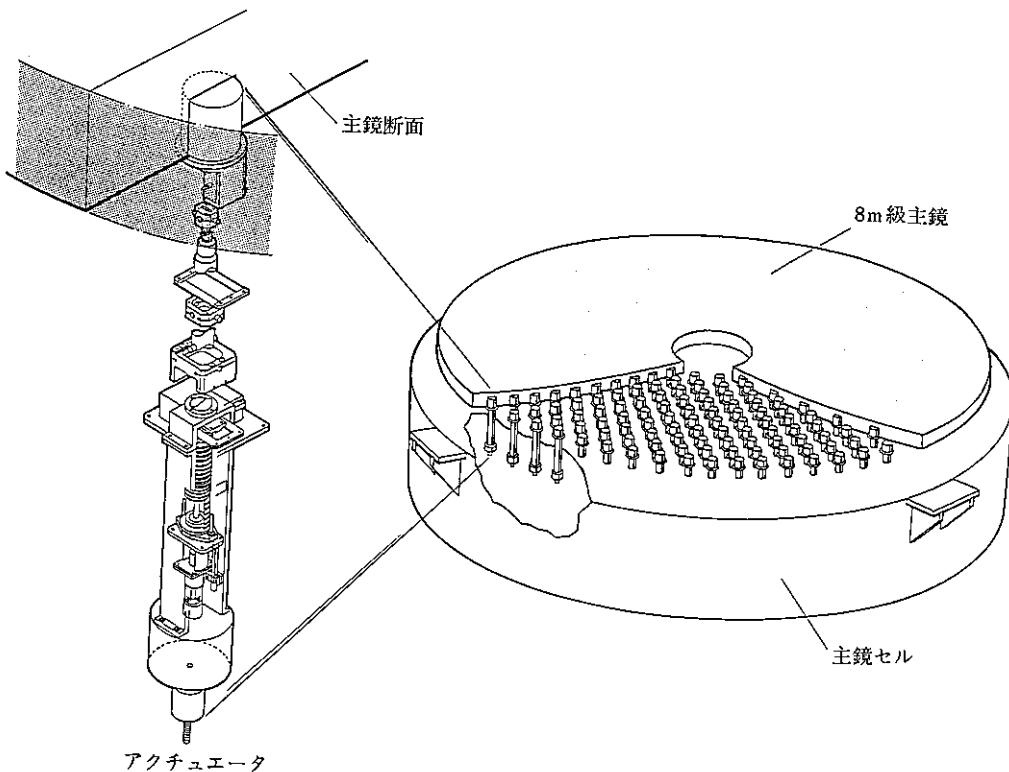


図14 すばる望遠鏡 8 m 主鏡の能動光学支持システム

り、球状星団の年齢は170億年ほどであることがわかっています(図12)。半減期の長い放射性同位元素の量を、古い星と新しい星とで比べることにより、もっとも古い星の年齢を見積ることができます。その方法を使うと、最古の星の年齢は球状星団の年齢よりはかなり小さくなってしまいます。現在、一見矛盾した結果を与えていているようにみえる各種の観測結果も、より詳しい観測により整合性がとれ、宇宙の進化と構造を統一的に理解できる時代が、もう近いのではないかというのが一つの結論です。

2. 「すばる」望遠鏡計画

ハワイにつくる 8 m 望遠鏡

国立天文台が着手している『すばる』望遠鏡計画は、単一鏡としては世界最大の口径 8 m 望遠鏡をハワイ島の海拔4,200m のマウナ・

ケア山山頂に建設しようというものです。文部省に承認をいただき、1991年度から建設を開始し、92年7月7日に現地で鍛入れ式を行い、その秋に地盤改良をおえ、基礎工事も順調に進んでいます。

ハワイの山上には、現在 9 台ほどの望遠鏡がありますが、20世紀末までに13台まで建設を許可することが、ハワイの環境保全条例できまっており、私たちの望遠鏡はその10番目か11番目になります。完成予想図を図13に示しますが、望遠鏡の直径が 8 m、ドームの高さが 42m、直径も 40m という巨大な構造物になります。

この望遠鏡の鏡は直径 8 m ですが、ガラスの厚さはわずか 20cm しかありません。従来の常識を破る非常に薄い鏡を、264本のコンピュータ制御のアクチュエータで支え、鏡面を常に設計通りの理想的な形に制御します(図14)。

能動光学と名づけたこの新技術が、大きな望遠鏡実現への道を切り開きました。8 mの望遠鏡を光の波長の10分の1、つまり $0.03\mu\text{m}$ の誤差で滑らかにすることを、スケールアップしてたとえると、直径80kmの土地を0.3mmの精度で地ならしすることに相当します。これはたいへんなことですが、現在の技術を用いれば、2年余りの時間さえあればその精度に磨くことが可能です。この8 mの薄い鏡を支えるのは、コンピュータ制御の技術です。重い構造物がいろいろな天体の方向を向くとたわみが生じますし、温度が少しでも変化すると熱膨張による歪みが生じます。能動光学はそれらをすべて測定して修正する技術です。

超解像を実現する補償光学

この能動光学技術をさらに発展させたのが補償光学です。地上に設置する望遠鏡は、地球大気を通して宇宙を見るわけです。これは、いわば陽炎を通して宇宙をみているようなものです。これが地上観測の空間解像力限界をきめていました。この陽炎のゆらぎを刻一刻測定し、陽炎の影響を打ち消してしまおうというのが補償光学の目的です。補償光学技術の実用化により、宇宙で観測するのとほとんど同じくらいの解像力が地上からでも実現できる見通しがたちました。

星のちらつきはロマンチックですが、天文

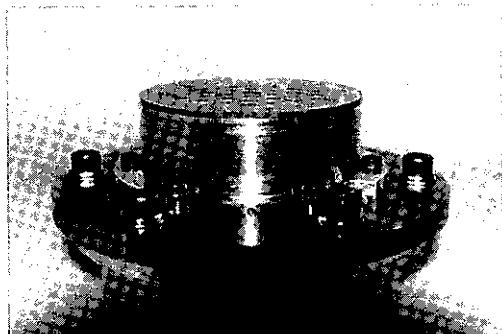


図15 試作した可変形状鏡(高遠徳尚：東京大学博士論文)

学にとっては観測の妨げ以外のなものではありません。私たちのグループでは、2年ほど前に初步的な補償光学装置を試作し、その装置を“イメージスタビライザ”と名づけました。星のちらつきを測定してそれをとめる装置です。このイメージスタビライザーを動作させると、星の像がシャープになることが確かめられました。現在はより高度な補償光学系を開発中ですが、図15は新しく試作した形状可変鏡です。これを用いて空気のゆらぎによる光波面の乱れを直し、星像をシャープにする実験を企画しています。

星像がシャープになることの重要性を示したのが図16のシミュレーションです。現在、日本の国内での観測所では、平均すると星の像は写真乾板のうえで2、3秒角に広がっています。マウナケア山は絶海の孤立峰で、比較的強い風が吹きますが、風に乱れがないため、普通の日で1秒角くらいのシャープな星像がえられます。私たちの望遠鏡のようにコンピュータ制御でいつも調整されている望遠鏡が実現すると、0.3秒角ほどの像になると期待しています。さらに、空気のゆらぎを測定してそれを実時間で高速に直す補償光学技術

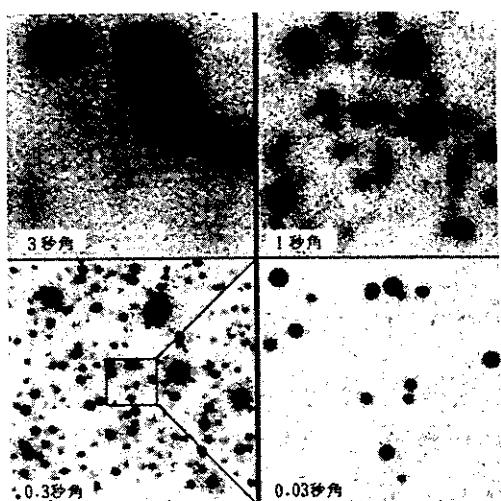


図16 解像力と星々のみえ方のシミュレーション



図17 夜の地球(ワシントン大学提供)

が実現すると、解像力がさらに1桁上がりま
す。図16は、望遠鏡の回折限界といわれる理
論的な限界を達成できると、それまでみえな
かった暗い天体までみえてくることを示して
います。

3. スライドツアー

やや堅い話を、しかも「宇宙語」で長々と
お話ししました。お疲れになったと思います
ので、最後に気分転換に、スライドで皆様を

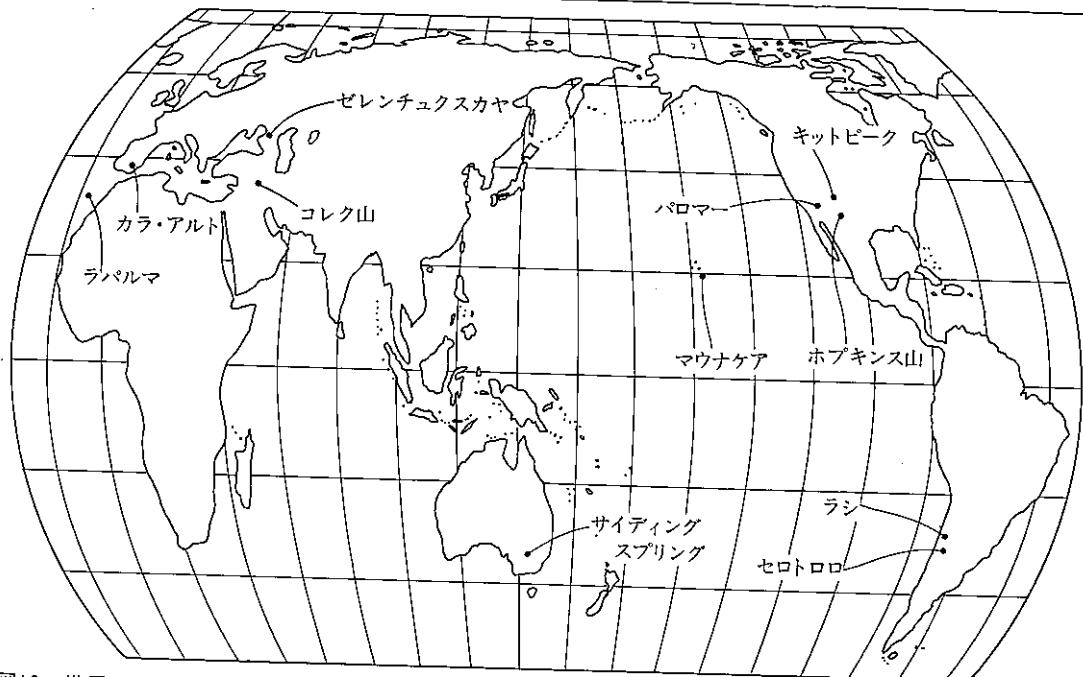


図18 世界の天文台

世界の最先端天文台にご案内し、私の話をお聞かせることに致します。

世界の3大天文台

図17は人工衛星からみた夜の地球です。日本列島が北海道まですべて真っ白というのを少し大きさとも思いますが、これをみても宇宙を観測するには、文明のない人里離れた場所に望遠鏡を設置する必要があることがわかります。

口径3m以上の望遠鏡が設置されている地点を世界地図に示すと、図18のようになります。宇宙観測を行うためには北半球からみているだけではだめで、北半球と南半球にそれぞれ設置しないと宇宙全体がみえません。世界中で宇宙を観測する場所として、ハワイ島マウナケア山、アンデス山脈のラシア山とセロトロロ山、アフリカのラパルマ島の3ヵ所

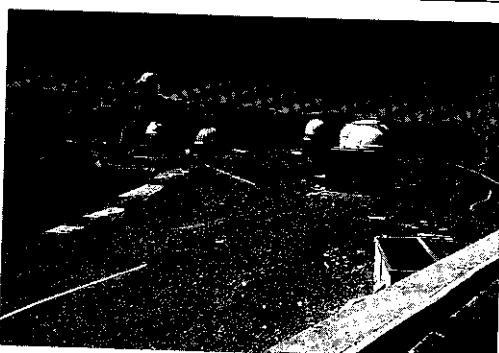


図19 チリ アンデス山中のラシア天文台



図20 ラシア天文台3.6m望遠鏡での観測風景

が最適といわれています。

チリのアンデス山脈には3つの天文台がありますが、サンチャゴ国際空港から約600km北、車でいくと半日かかります。ここにヨーロッパの8ヵ国が、ヨーロッパの国際機関として南の宇宙を分担して観測するため大天文台を設置しています。天文台のすぐ麓の砂漠に天文台専用の滑走路があり、サンチャゴからセスナ機を毎週3往復チャーターし、観測者や職員を運んでいます。

図19は、望遠鏡の台数と山頂で働く天文学者数とが世界最大のチリのラシア天文台です。13~14台の望遠鏡があります。ここは近くの街から100kmほど離れているので、観測する人は泊まり込みです。そして、図書係りの女性やコックさんも1週間交替の勤務で、月曜から金曜まで働き、翌週は完全に休みという体制で運用しています。



図21 ラシア天文台での夕食風景



図22 1991年までグリニッジ天文台の本部がおかれていたハーストモンゾー城

図20は、1985年にこの天文台最大の3.6mの望遠鏡を使い、筆者がセイファート銀河という特異な銀河の観測を行ったときの観測風景です。もう7～8年前になりますのでやや旧式の操作盤の前に座って観測していますが、最近はワークステーションで観測が制御できるようになり、もっとスマートなシステムになっています。

図21はそこの食事風景です。きちんとネクタイをつけ、コックさんも5～6人いてホテルなみの食事をだします。高山の厳しい自然環境のなかでの作業ですので、働く人々の安全と快適さを確保することはとてもたいせつです。私たちがハワイに建設する天文台も、ぜひこのようにしたいと思っています。

次にご案内するのは、アフリカ沖のカナリー諸島にあり、イギリスのグリニッジ天文台が運営している施設です。グリニッジ天文台はロンドンのテームズ川の河畔にありましたが、20世紀の前半にロンドンが明るくなり、ロンドンの南100kmほどの郊外に疎開しました。100

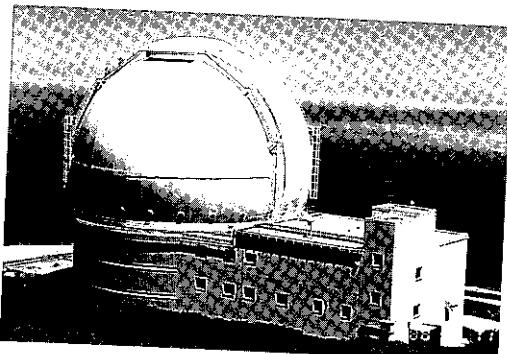


図23 ラパルマ天文台4.2m 望遠鏡

kmほど移ってもあまり天気がよくなるわけではないので、1970年代にもう一度疎開してアフリカ沖まで望遠鏡を移したのです。図22は100km南に移ったときの天文台のオフィスです。15世紀頃のフランスのお城を買い取り、イギリスの文部省がそこを天文台のオフィスにしたのですが、維持費が高すぎて結局最後は売り払ってしまったようです。移転先はアフリカ沖のラパルマ島という絶海の孤島で火山島の山頂です。

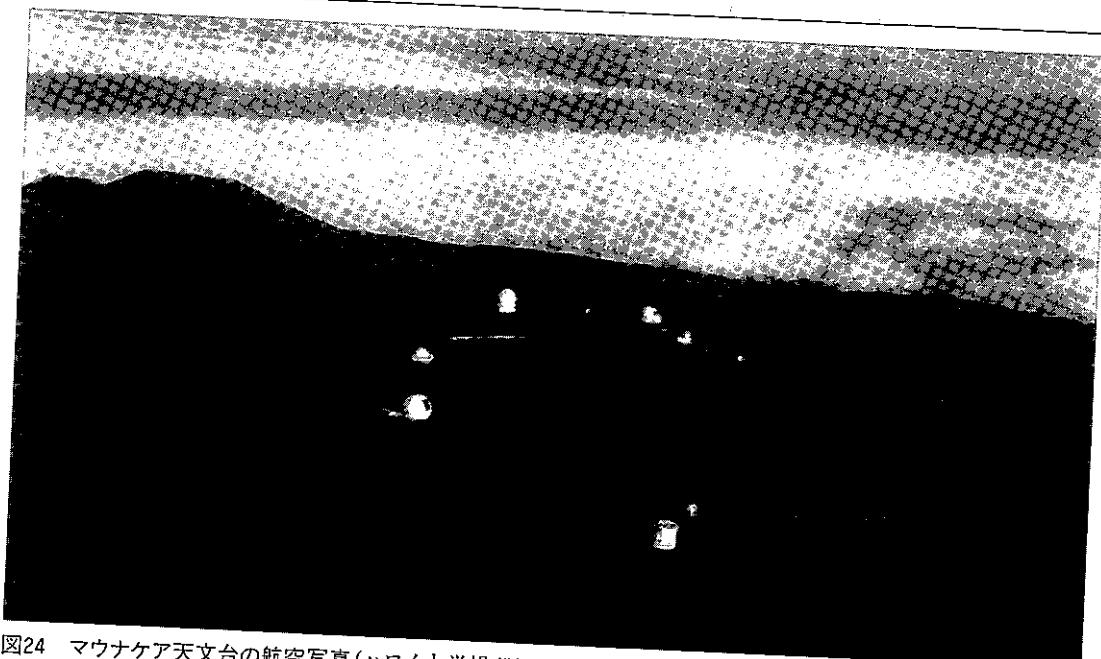


図24 マウナケア天文台の航空写真(ハワイ大学提供)

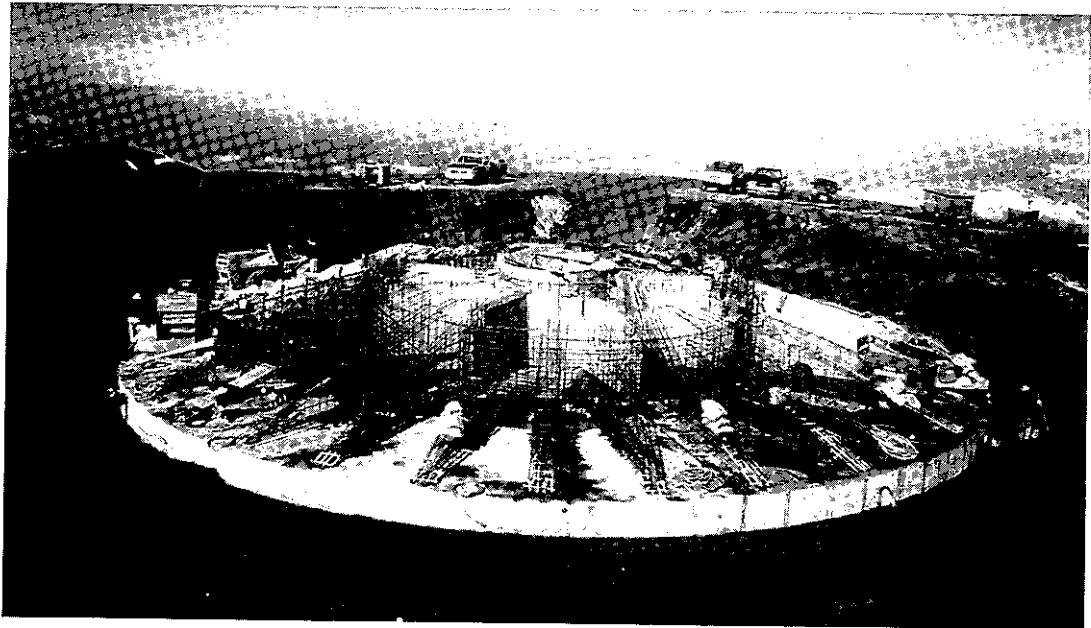


図25 すばる望遠鏡ドーム基礎工事の様子

ラパルマ観測所には、山頂近くに4つのヘリポートがあります。この天文台の開所式にイギリス、オランダ、スウェーデン、スペインの四カ国の皇族がヘリコプターでこられたので、国の数だけヘリポートをつくったのだといっています。図23は経緯台方式で動くようになった最初の4.2mの望遠鏡で、イギリスが建設した、1980年代後半の新しいタイプの望遠鏡の先駆けになったものです。

最後にご案内するのが、私たち国立天文台がハワイに8m望遠鏡を建設しているマウナケア国際観測所です。図24は山頂の航空写真です。ここにも現在10台ほどの望遠鏡が建設されており、私たちの望遠鏡のドームの基礎工事も順調に進んでいます(図25)。1998年には最初の試験観測ができるようになると建設を進めています。

冬になると、ハワイといっても山頂は雪景色になります。マウナケアはハワイ語で「白い山」という意味だそうです。山頂は0.6気圧しかなく、山頂で眠ると健康上少し問題があ

るため、富士山の5合目くらいの高さに建設したハレ・ポハク中間宿泊施設まで降り、日中は寝泊まりするようにします。スペースシャトル・チャレンジャーの爆発事故で亡くなった宇宙飛行士のオニヅカさんがハワイ島の出身だそうで、オニヅカ記念館がハレ・ポハクのすぐそばにあり、見学することができます。将来的には衛星リンクあるいは光ファイバリンクで、山頂の望遠鏡、中間宿泊施設、山麓のハワイ観測所と、東京三鷹の国立天文台を結び、東京から夕方(現地では真夜中)に観測ができるようにもしたいと思っています。皆さんの応援をお願い致します。

*本稿で用いた図の多くは拙著「銀河が語る宇宙の進化」(培風館:1992)から転載した。

注

- 1)その後、この銀河の色のとびは赤方偏移した酸素の輝線が原因と判明し、0902+343の星々の年齢は1億年以下という可能性が指摘され、ふたたび原始銀河候補として脚光を浴びている(1993年5月補足)。

Q&A

■Q■

最近は非常に広範囲なスペクトルをうけられるとのことでしたが、赤方偏移の大きな天体の場合、実際には短波長のX線を観測しているということもあるのでしょうか。

●A●

現在もっとも感度が高いシリコンのCCD検出器を用いて地上からの観測でカバーできる範囲は、波長域で $0.33\mu\text{m}$ から $1\mu\text{m}$ 強までです。近傍の銀河や天体についてはその範囲で観測し、その波長域でどのような性質をもっているかを天文学者はよく知っています。赤方偏移が2以上の天体だと、水素の固有スペクトルで波長 $0.12\mu\text{m}$ の紫外線がこの波長域に偏移してきますので観測することができます。波長 $1\mu\text{m}$ 以上の赤外線検出器も実用化されていますから、紫外線から可視光が赤方偏移したものについては十分うけられます。

波長 $0.03\mu\text{m}$ のX線域には、水素に次いで多い元素であるヘリウムのスペクトル線があります。赤方偏移が12以上の天体だと、これをCCDで観測することができるかもしれません。ただ、もつと波長の短いガンマ線やX線が赤方偏移で可視光までくるかというご質問だとしたら、それは赤方偏移でいうと非常に大きな値になり、そのような可能性は

理論的にも考えにくいと思います。

■Q■

先ほどの補償光学の問題で、空気の歪みについて補償できるということでしたが、ハワイ島は地震問題で地殻の振動など、外から与えられる光軸のブレなどについても同じように補償できると考えてよいのでしょうか。

●A●

たいへんよいポイントだと思います。建設地の地盤は事前工事で改良してゆれにくくしてあります。望遠鏡の土台も地盤のゆれに左右されにくくよう設計されています。それに、地盤のゆれは、1秒の100分の1以下の速さの大気のゆれに比べるとずっと遅いことがわかっています。ですから、ほんとうに地震が起こっているときはだめですが、万一微振動が生じても、速い大気のゆれを補償できる装置で、その影響を補償することができます。

■Q■

先ほどのお話のなかに、宇宙年齢よりも古い球状星団が発見されたとあったと思うのですが、そうでしょうか。

●A●

そう聞こえたとしたら、私の説明が不十分だったのだと思います。球状星団のH-R図からもっとも古い球状星団の年齢を

数字として求めると、170億±10億年というかなり狭い範囲の数字がでてしまいます。放射性同位元素からもっとも古い星の年齢を求めるに180億年以下、場合によっては110億年という数字がえられます。

宇宙年齢は、明らかに球状星団の年齢や古い星の年齢より大きいはずです。宇宙論でよくいわれる150億年という数字を宇宙年齢として採用しようとすると、球状星団から求めた年齢より短くなってしまい、矛盾するようになります。問題は、これを矛盾と思うかどうかということです。逆にいうと、宇宙年齢は、まだそれくらいの精度でしかきまっていないと理解していただいたらよいと思います。

■Q■

今日の演題からは少しずれるかと思いますが、球状星団はどうしてあのような形状を保つことができるのでしょうか。理由は明確になっているのでしょうか。

●A●

球状星団のなかには約1万~10万個ほどの星があります。それぞれの星の運動を調べると、全体に一様に回転しているではなく、まったくバラバラな運動をしています。バラバラな運動をしているとはいっても、個々の星は球状星団全体がつくる重