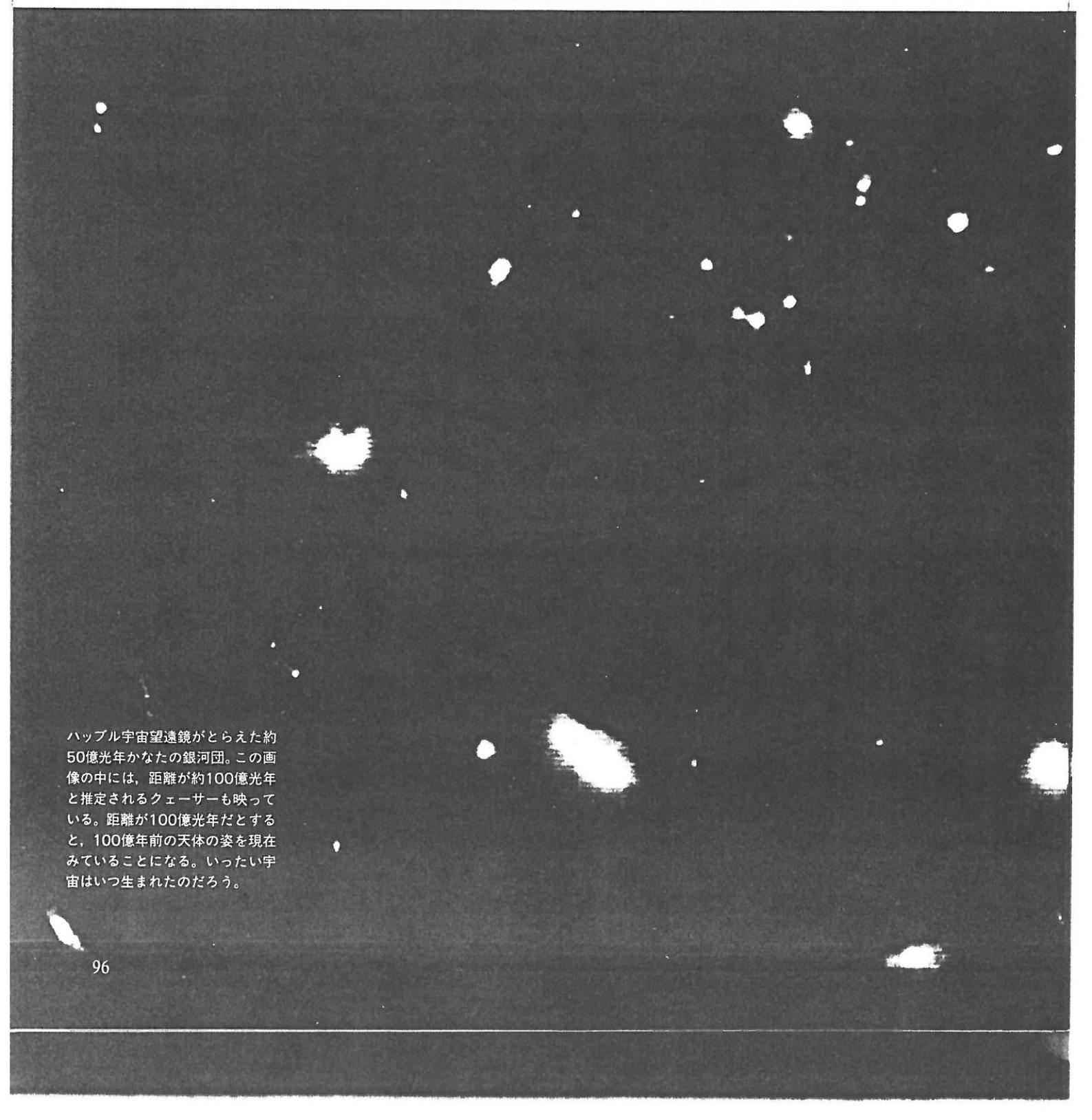


宇宙の年齢を 最新観測データが示す

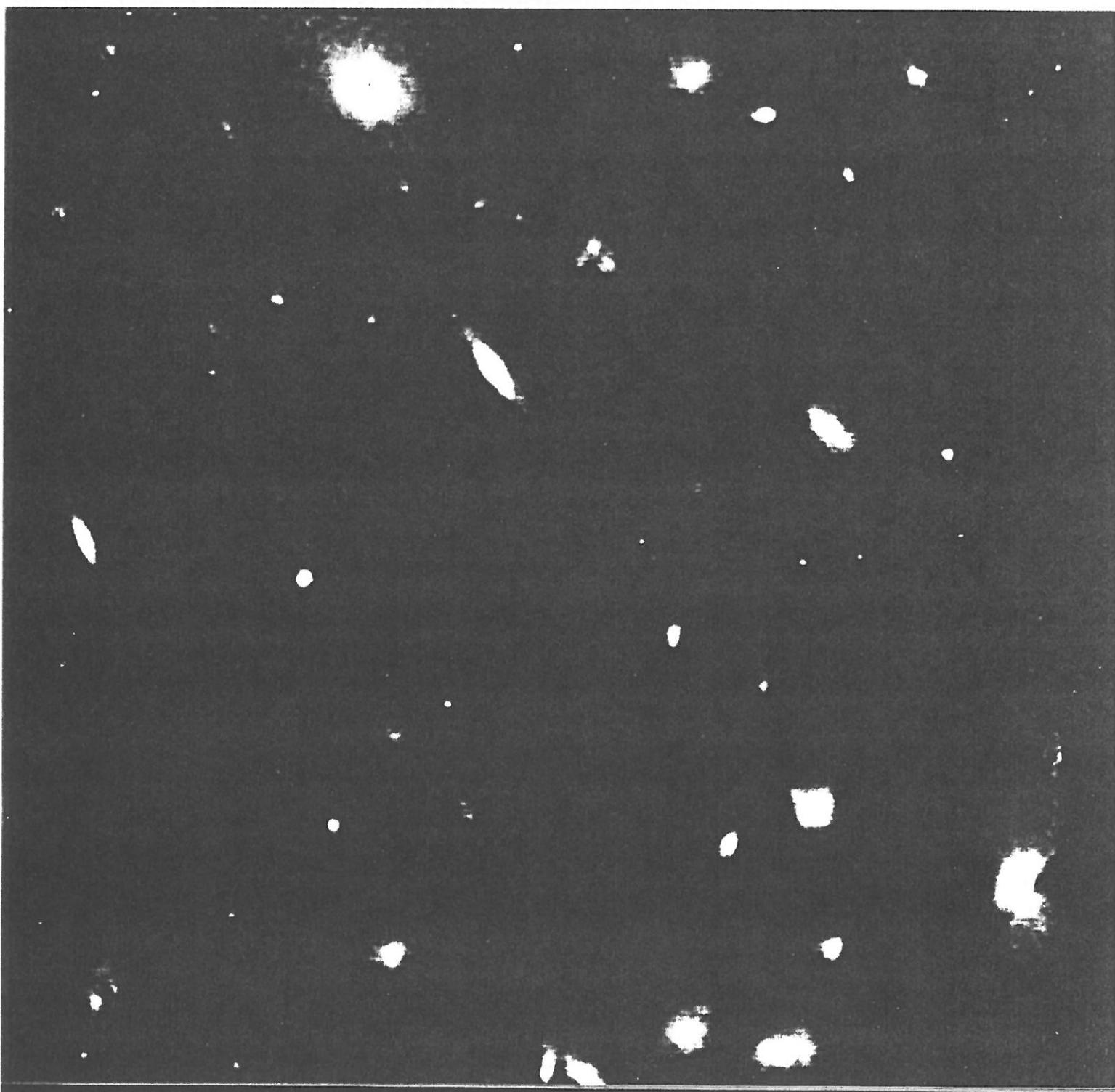


ハッブル宇宙望遠鏡がとらえた約50億光年かたの銀河団。この画像の中には、距離が約100億光年と推定されるクエーサーも映っている。距離が100億光年だとすると、100億年前の天体の姿を現在みていることになる。いったい宇宙はいつ生まれたのだろう。

はかる 宇宙の年齢

これまでのNewtonでは宇宙の年齢を150億年としている。しかし実は、宇宙の年齢はまだよくわかっていない。さまざまな観測データからみちびきだされる値には、まだかなりのばらつきがある。どのような方法で、宇宙の年齢ははかれるのか。最新データが示す宇宙の年齢は……。

家 正則 国立天文台教授



1915年、ドイツ生まれの物理学者アルバート・アインシュタインは「一般相対性理論」を完成了。1917年、アインシュタインがこの理論を使って宇宙の構造を調べてみたところ、宇宙は膨張したり収縮したりするという答えがみちびかれた。当時、宇宙は永久不变であると考えられていたので、アインシュタインは宇宙の収縮を止める「宇宙項」を式につけ加えた。もし宇宙が永久不变で、はじまりも終わりもないものならば、宇宙には年齢もないことになる。

1929年、アメリカの天文学者エド温ン・ハッブルは遠くの銀河ほど大きな速度で遠ざかっており、銀河が遠ざかる速度は銀河までの距離にはほぼ比例することを発見した。これは宇宙の膨張を逆にたどり、昔にさかのぼるとすべての銀河が一点に集まっていたことを示す。この観測結果を知ったアインシュタインは、宇宙項という余分な式をつけ加えたことを「生涯最大の

アメリカ、パロマー山天文台にある口径508センチの望遠鏡とエド温ン・ハッブル。1929年、ハッブルは遠くの銀河ほど速く遠ざかっていることを発見し、宇宙は一様に膨張していると主張した。

あやまち」となげいたという。

宇宙に関する一般向けの本を数多く書いたアメリカの天文学者ジョージ・ガモフらは、1948年に「ビッグバン宇宙モデル」を発表した。この宇宙モデルでは、現在膨張している宇宙は、過去のある瞬間から爆発的に膨張をはじめたと考える。そこで、ビッグバン宇宙モデルでは膨張開始から現在までの時間を「宇宙の年齢」とよぶ。

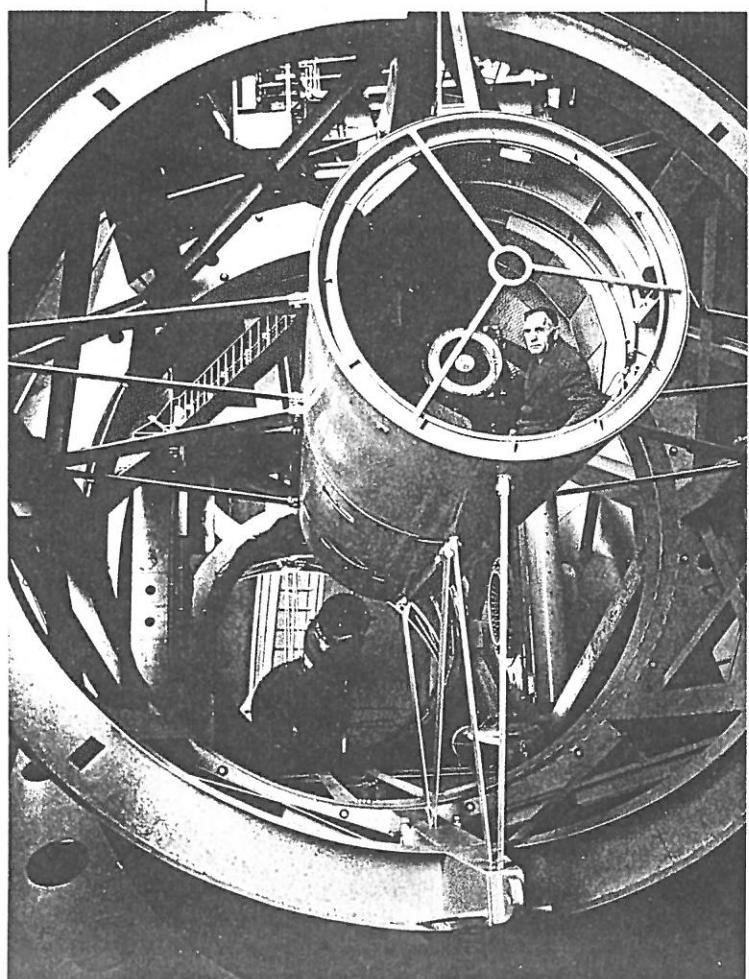
宇宙の理解は、20世紀後半の観測技術の進歩により大きく前進した。予想もされなかつたさまざまな発見がつづいた。宇宙論の学界も右往左往してきた面があるが、新しい観測事実は基本的にビッグバン宇宙モデルを支持する結果となっている。では、ビッグバンがおきたのはいったい何年前だったのだろうか？

宇宙の年齢をはかるには

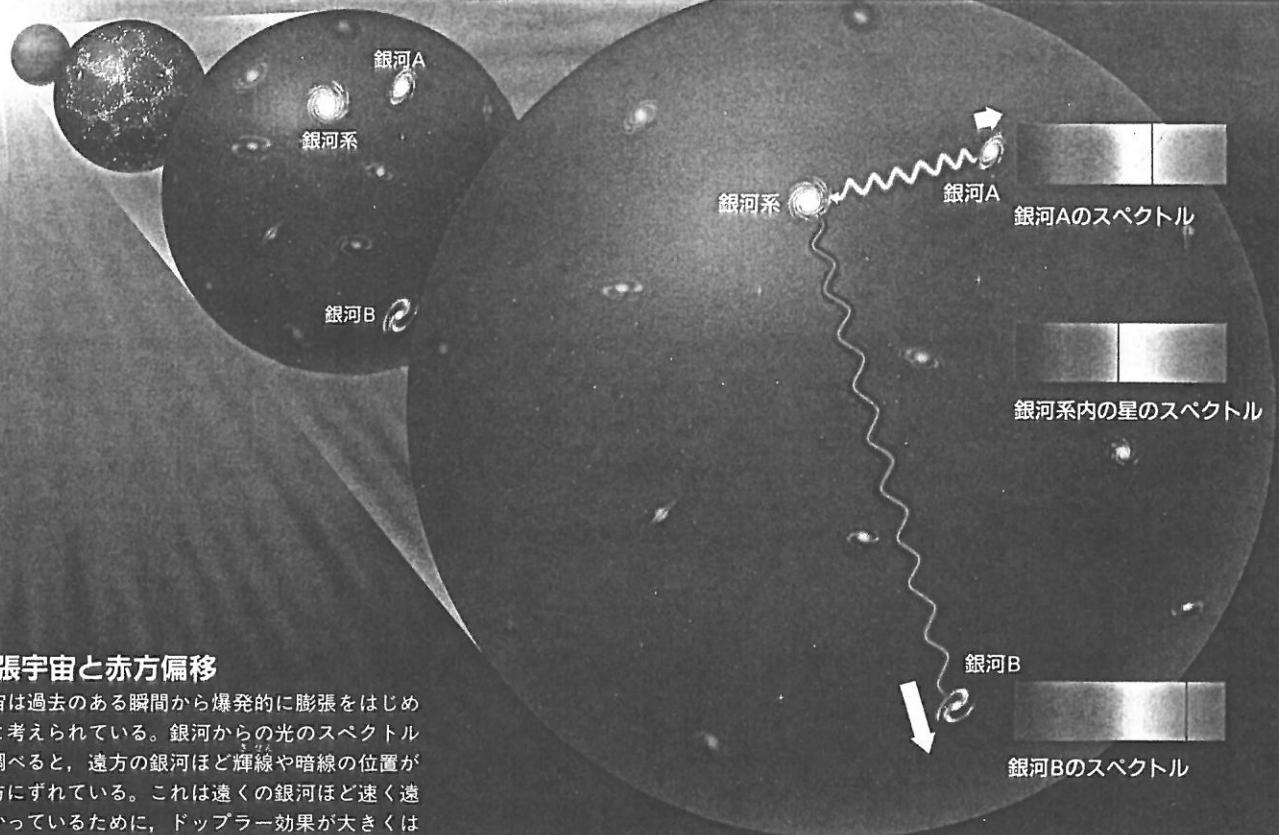
宇宙の年齢をはかるには、重要な二つの量を観測から求めなければならない。一つは現在の宇宙の膨張率をあらわす「ハッブル定数(H_0)」である。銀河が遠ざかる速度を v 、われわれから銀河までの距離を r とすると、ほぼ $v = H_0 r$ とあらわせることにハッブルは気がついた。ハッブル定数の逆数 $1/H_0 = r/v$ は宇宙が現在の大きさに広がるのに要した時間の目安になり、これを「ハッブル年齢」とよぶ。

ハッブル年齢は、宇宙の膨張率が一定であるとしたときの宇宙の年齢である。膨張をはじめた宇宙は、みずからの重力で膨張にブレーキをかけることになる。ブレーキの強さは宇宙の質量に比例する。現在の膨張の減速率をあらわす「減速定数」が第二の重要な量である。ブレーキが強ければ膨張はやがて止まり、宇宙は収縮に転じる。ブレーキが弱いと膨張は永遠に止まらない。いずれにせよ膨張にはブレーキがかかるので、実際の宇宙の年齢はハッブル年齢より長くはない。

ハッブルの観測によって、銀河の遠ざかる速度は、100万ペーセク(326万光年)はなれるごとに、秒速526キロだけ速くなるという結果が得られた。この値で計算するとハッブル年齢は約20億年となり、約46億年と推定されている



ビッグバン



膨張宇宙と赤方偏移

宇宙は過去のある瞬間から爆発的に膨張をはじめたと考えられている。銀河からの光のスペクトルを調べると、遠方の銀河ほど輝線や暗線の位置が赤方にずれている。これは遠くの銀河ほど速く遠ざかっているために、ドップラー効果が大きくなるから、光の波長が引きのばされるためである。

地球の年齢より短いことになってしまう。これはハッブルの時代の観測精度が不十分で、銀河までの距離を正確に求めることができなかつたためである。その後、距離の推定精度が改善されて、ハッブル定数の値は現在では45~90キロ/秒/100万パーセクの範囲内にあるとみなされている。この値でハッブル年齢を計算すると、110億~220億年という値になる。

宇宙は生まれた直後の激しい膨張を経てビッグバンに至ったという「インフレーション宇宙モデル」では、宇宙膨張はちょうど膨張が止まるようにセットされていると予言している。理論的にもすっきりしたインフレーション宇宙モデルを採用したいところだが、観測でみえてくる銀河や銀河間ガスをすべて足し合わせても、膨張を止めるのに必要な質量の10~20%にしかならない。光による観測ではとらえることができない「暗黒物質」が存在していると考えられている。しかしインフレーション宇宙モデルの予測に見合う量の物質が、宇宙に存在するという確認はまだできていない。

明るさがわかる天体を用いて推定する方法

ハッブル定数を測定できれば、宇宙年齢の目安となるハッブル年齢が決まる。ハッブル定数を求めるには、銀河が遠ざかる速度と、銀河までの距離を求める必要がある。

銀河が遠ざかる速度を求めるには、銀河から届く光の波長を調べればよい。通過した救急車のサイレンの音が低くなるように、遠ざかる銀河からの光はドップラー効果により波長がのびる。光をプリズムによってスペクトルに分けてみると、銀河からの光は波長の長い赤方にずれていることがわかる。銀河の遠ざかる速度が大きいほど、赤方へのずれは大きくなる。

銀河までの距離をはかる方法は、天体のほんとうの明るさと見かけの明るさを比較して距離を推定する方法と、それ以外の方法に大別できる。見かけの明るさは天体までの距離の2乗に反比例して、距離が遠くなるほど暗くなる。ほんとうの明るさが一定していてわかりやすい天体を用いれば、天体までの距離を推定できる。

「セファイド型変光星」は1日から100日程度の周期でふくらんだり、ちぢんだりして、明るさが規則的に変化する星である。このような変光の周期と星のほんとうの明るさとの間に、物理的な関係のあることが確かめられている。したがって、セファイド型変光星を多数みつければ、その銀河までの距離を推定することができる。セファイド型変光星を用いる距離測定法は最も信頼できる方法であり、これからハッブル定数は70~90キロ/秒/100万パーセクという結果が得られている。この値から求められるハッブル年齢は110億~140億年である。距離が約5900万光年と推定されてきたおとめ座銀河団中の銀河の距離決定が、この方法での現在の観測の限界である。

より遠い銀河に対しては、水素原子が放つ電波を調べて、銀河のほんとうの明るさを求める方法がある。水素原子は波長21センチの電波を放出する。この電波を観測して銀河の自転速度を求め、銀河の重力の強さを推定する。同じタイプの銀河では、銀河の重力の強さは銀河に含まれる星の数に比例するので、銀河の明るさのよい目安となる。このようにして銀河のほんとうの明るさを求め、見かけの明るさと比較して距離を推定する。この方法でハッブル定数を求めると、やはり70~90キロ/秒/100万パーセクとなり、セファイド型変光星によって求められた値と一致する。

星の一生の最終段階で、星から放出されたガスが中心の星に照らされて輝く惑星状星雲は、特徴的な光のスペクトルをもつため、遠方の銀河でも比較的みつけやすい天体である。惑星状星雲のほんとうの明るさには上限があるから、ある銀河内で最も明るい惑星状星雲の明るさはその銀河までの距離の目安となる。この方法でもセファイド型変光星によって求められたハッブル定数とほぼ同じ値が得られる。

超新星や重力レンズを用いて推定する方法

質量が大きな星は、その一生の最後に超新星爆発をおこす。「Ia型」とよばれるタイプの超新星は、重くなりすぎた白色矮星で核融合反応が暴走するものである。Ia型超新星は、どれもス

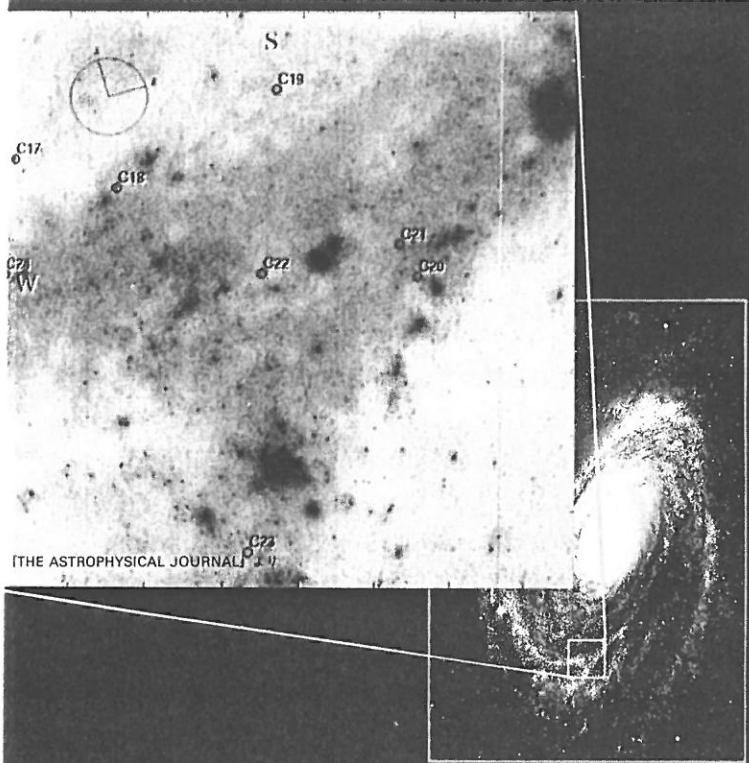
ペクトルのようすや光度変化のようすが非常に似ている。おとめ座銀河団に出現した7個のIa型超新星は、その最大光度がわずかに20%のばらつきでほぼ一定であることが報告されている。Ia型超新星は超新星の中でも最も明るいため、遠くの銀河で爆発したものでも発見しやすい。この方法で距離を決めて得られるハッブル定数は、45~70キロ/秒/100万パーセク程度であり、140億~220億年というハッブル年齢が得られる。

超新星爆発により飛び散ったガスは高速で膨張する。重い星の中心核がつぶれて、その反動で星全体が爆発するII型超新星では、ドップラー効果からその膨張速度をはかり、その色から求めた温度と組み合わせると、その超新星のほんとうの明るさが計算できる。これを見かけの明るさとくらべると、超新星までの距離を推定できる。この方法で求められるハッブル定数は、50~70キロ/秒/100万パーセク程度で、ハッブル年齢は140億~200億年である。

重力レンズによりハッブル定数を求める方法もある。重力レンズは、クエーサーなどの遠方にある天体からの光が、途中にある銀河や銀河団などの重力により曲げられて、複数の像ができる現象である。重力レンズ効果により、クエーサーが二重にみえる二重クエーサーがいくつか発見されている。だぶってみえる二つの像は光の通り道がちがうから、クエーサーの明るさが変化すると、二つの像の明るさの変化が時間的にずれておきる。この時間差はハッブル年齢に比例するので、時間差をはければハッブル定数を求めることができる。重力レンズ天体「0957+561」から求められたハッブル定数は50~80キロ/秒/100万パーセクであり、120億~200億年というハッブル年齢が得られる。

銀河団をひたしている高温プラズマが存在することが、銀河団からのX線の観測などで確かめられている。ビッグバンのなごりである絶対温度3度Kの宇宙背景放射は、宇宙のあらゆる方向からやってくる。その低エネルギー光子は銀河団を通るときに高温プラズマ中の電子によりはじきとばされて、エネルギーの高い光子となる。このため、銀河団からの宇宙背景放射エ

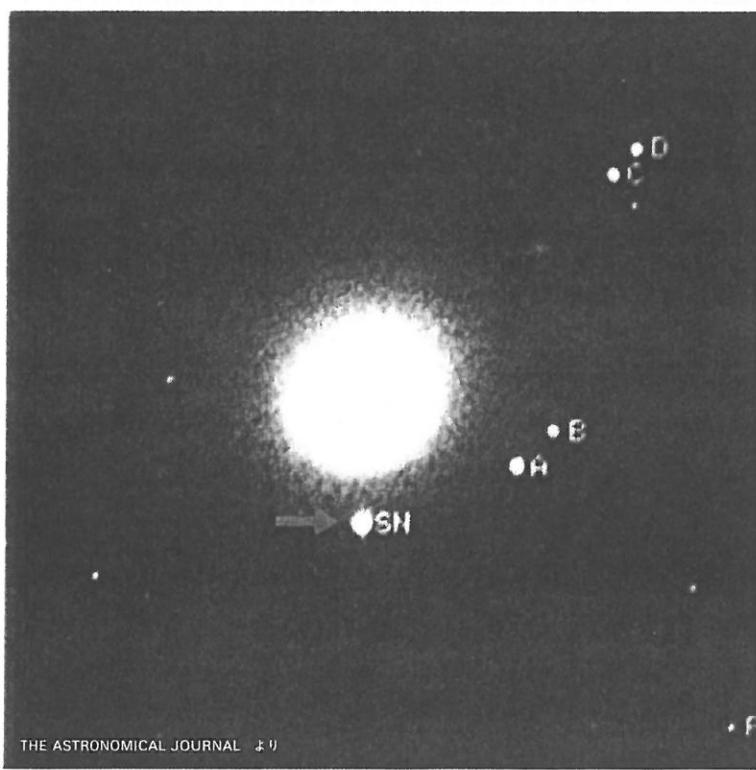
宇宙の年齢の推定に使われる天体



セファイド型変光星 セファイド型変光星は、1日から100日の周期で明るさが変化する星である。周期から本来の明るさが決まるので、銀河の距離を精度よく推定でき、ハッブル年齢が求められる。写真は渦巻銀河M81の中のセファイド型変光星(○)の個所。

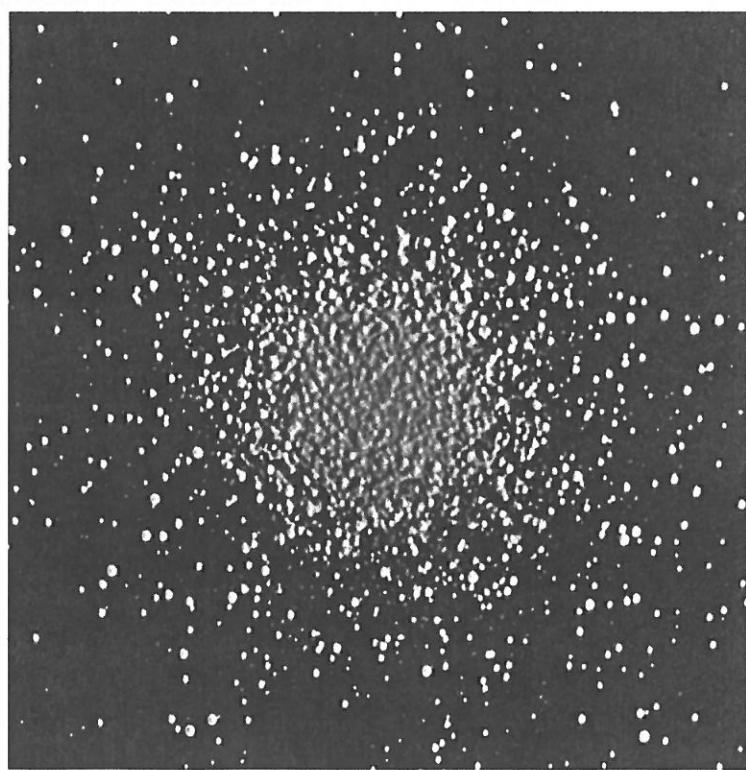


惑星状星雲 惑星状星雲は、星から放出されたガスが中心の星の光で照らされて輝いている。特徴的なスペクトルをもつ惑星状星雲の明るさには一定の上限があるため、銀河の距離推定に使え、ハッブル年齢を求めることができる。写真は銀河系内の惑星状星雲M27。



THE ASTRONOMICAL JOURNAL より

超新星 質量が大きな星はその一生の最後に超新星爆発をおこす。Ia型超新星はその最大光度が決まっているので、銀河の距離推定の目安となる。写真はおとめ座銀河団にあるNGC4374の中のIa型超新星1991bg(矢印)。Ia型としてはやや光度が暗い。



球状星団 球状星団は銀河系円盤のまわりを取り巻く古い星の集まりである。球状星団の星々の明るさと色を調べると、星団の年齢が推定できる。最も古い球状星団の年齢は約170億年前後と推定されている。写真は銀河系内の球状星団M13。

エネルギーのスペクトルは、高エネルギー側（短波長側）へずれるはずである。

実際「アーベル2218」という銀河団で、この現象が確認されている。この効果の強さは銀河団の大きさに比例するので、銀河団のはんとうの大きさを推定できる。見かけの大きさと比較して距離を求め、ハッブル定数を計算すると、50に近い小さな値となる。ハッブル定数が50キロ／秒／100万パーセクだとすると、ハッブル年齢は200億年となる。ただし、この方法での推定はまだ誤差が大きい。

天体の年齢を用いて推定する方法

ハッブル定数によらず、天体の年齢から宇宙の年齢を推定する方法もある。

球状星団は古い星がいっぱいいつまつた宇宙の化石のような天体である。星の寿命は星の質量に大きく依存する。重い星ほど明るく輝くため寿命が短い。球状星団が生まれたときにはいろいろな重さの星があったと思われるが、時とともに重い星から順にその一生を終える。したがって、現在まだ光り輝いている最も重い星を調べれば、球状星団の年齢が推定できる。この方法で多くの球状星団の年齢を調べると、150億～180億年前後という値が出てくる。

原子には安定な原子と、放射性崩壊によりこわれていく不安定原子がある。不安定原子がこわれる平均の寿命を「半減期」という。トリウムのように半減期が宇宙年齢程度の元素の量を、ネオジウムのような安定した元素の量と比

宇宙の年齢をはかる主な方法と宇宙の年齢の目安

方法	ハッブル定数 (km 秒 100万パーセク)	ハッブル年齢 ^{*1} (億年)	方法	各種天体の推定年齢 ^{*4} (億年)
セファイド型変光星 (周期光度関係)	70～90	110～140	球状星団 (HR図)	150～180
銀河の自転速度 (タリー・フィッシャー関係)	70～90	110～140	古い星 (放射性元素)	95～110
惑星状星雲 (光度関数)	70～90	110～140	白色矮星 (冷却曲線)	100
Ia型超新星 (最大光度)	45～70	140～220		
II型超新星 (膨張光球法)	50～70	140～200		
重力レンズ (変光遅延時間)	50～80 ^{*2}	120～200		
銀河団からの宇宙背景放射 (スニーエフ・ゼルドビッチ効果)	50に近い値 ^{*3}	～200		

*1—宇宙年齢はこれ以下

*2—重力レンズ天体「0957+561」で求めた値

*3—銀河団「アーベル2218」で求めた値

*4—宇宙年齢はこれ以上

較すると、その元素ができるから年月が調べられる。いくつかの元素の組み合わせから、古い星の年齢を推定すると95億～110億年という値が得られる。

白色矮星は燃えついた星のしんである。白色矮星は、できたときには非常に高温だが、その後しだいに冷えて暗くなっていく。冷え方は決まっているので、白色矮星の明るさや色がわかると、その年齢が推定できる。多数の白色矮星を調べてみると、100億年程度以上のものはほとんどない。したがって、銀河系の恒星円盤の年齢はせいぜい70億～110億年であるという研究がある。ただし100億年以上の白色矮星は、あったとしても非常に暗く観測しにくいことを考えると、まだ結論を出すには早そうである。

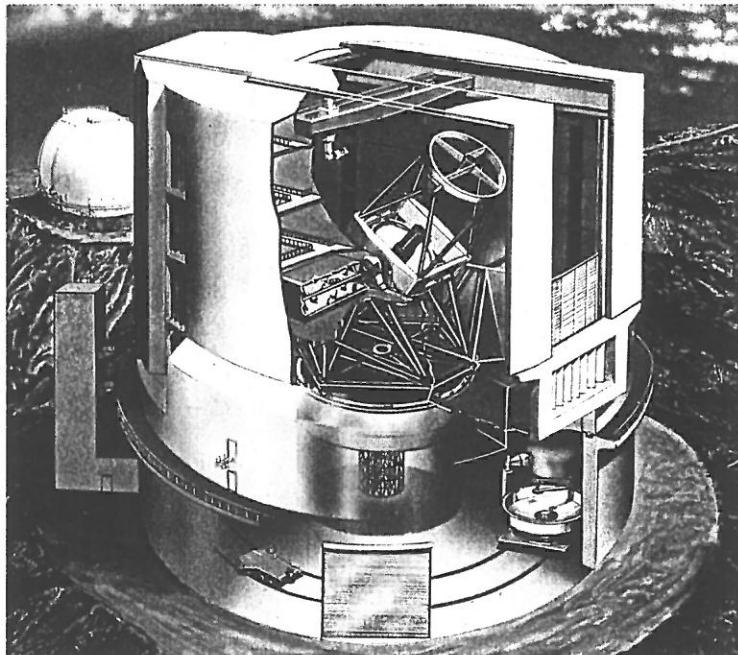
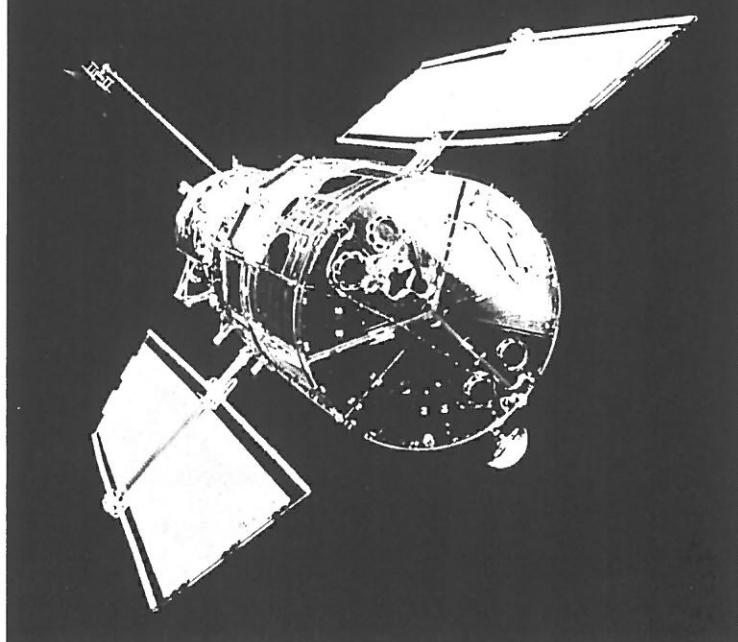
結局、何がわかっているのか？

銀河の自転速度と銀河の明るさの関係を用いたり、セファイド型変光星や惑星状星雲など明るさのわかっている約2億光年以内の天体を目安にして求めたハッブル定数は、70～90キロ／秒／100万パーセク程度とほぼ一致した結果となり、ハッブル年齢は110億～140億年程度となる。したがって実際の宇宙年齢はこれ以下となる。放射性の元素を調べて求めた古い星の年齢や、最も古い白色矮星の年齢推定でも約110億年程度という小さめの値が得られる。

一方、恒星の進化モデルから求めた球状星団の年齢は約150億～180億年と推定される。また超新星や重力レンズ、銀河団からの宇宙背景放射の観測などから求めたハッブル定数は45～80キロ／秒／100万パーセク程度で、120億～220億年という大きめのハッブル年齢が得られる。

いろいろな方法で求めた宇宙年齢が、約2倍の範囲内で一致していることにむしろ感心すべきなのかもしれない。しかし、宇宙年齢が球状星団の年齢より短いということは、たいへん考えにくいことである。

われわれは何かを見落としているのであろう。球状星団の年齢推定に誤りがあるのか、2億年以内の天体から決めたハッブル定数に誤りがあるのか、それとも宇宙モデルそのものを見直さなければならぬのだろうか。



ハッブル宇宙望遠鏡（上）とすばる望遠鏡（下）。観測手段の進歩により、宇宙の年齢は21世紀初頭には確定できるかもしれない。国立天文台がハワイ島に建設中のすばる望遠鏡は、口径8メートルの光学赤外線望遠鏡で、1998年に試験観測が開始される予定である。

宇宙の収縮を止めるためにAINSHUTAINが数学的に導入したけれども、物理的あるいは観測的な根拠がないため、普通は無視されている宇宙項を復活させて、この矛盾をさけようという試みも真剣に議論されている。

宇宙の過去と未来を正しく理解するには、ハッブル定数や減速定数を観測的により精度よく求めて宇宙モデルを確立し、宇宙の年齢を確定する必要がある。国立天文台がハワイ島に建設中のすばる望遠鏡などが活躍をはじめる21世紀初頭には、観測精度も向上し宇宙年齢をめぐるなぞが解決できるであろう。