

# 宇宙論の現状

池内 了<sup>1</sup>

## 1. はじめに

1980年代になって、宇宙論は二つの方向で大きな展開をみせた。一つは、宇宙の創成や宇宙のインフレーションなど、1970年代に明らかにされた素粒子間に働く力の統一理論を、宇宙初期における物質状態に適用し、宇宙の時空構造への効果を調べることができるようになったからである。もう一つは、CCDの活用による銀河宇宙の大構造の発見や、X線・電波などによる遠宇宙に関する情報が増え、観測的宇宙論が確立してきたからである。前者は物質の理論、後者は観測的發展と、宇宙を研究対象とする道具立てが揃ってきたのである。ここでは、後者の現状を手短かにまとめる。

## 2. 人々の「宇宙」の拡大

人々が認識してきた「宇宙」の大きさは、時代の宇宙を観測する技術に強く依存している。ガリレイが直径4cmくらいの望遠鏡を夜空に向けるまで、人々の宇宙は太陽系に留まっていた。地球と7つの動く星が宇宙の構成員であり、恒星世界はエーテルの塊としてわれわれの宇宙を飾りたてているものでしかなかった(図1)。

ガリレイの偉業は、恒星が太陽と同じ星であるということ、望遠鏡の中にはっきりと見たことである。つまり、宇宙はこの

太陽系から一気に「無数の星界」へ押し広がったのだ。続くニュートンの万有引力の発見によって、宇宙は星が一様に無限に分布していなければならないことになる。万有引力で宇宙が潰れてしまわないためには、端があってはいけないからである。しかし、星が運動していれば(例えば太陽系のように)、潰れない宇宙とすることができる。また、

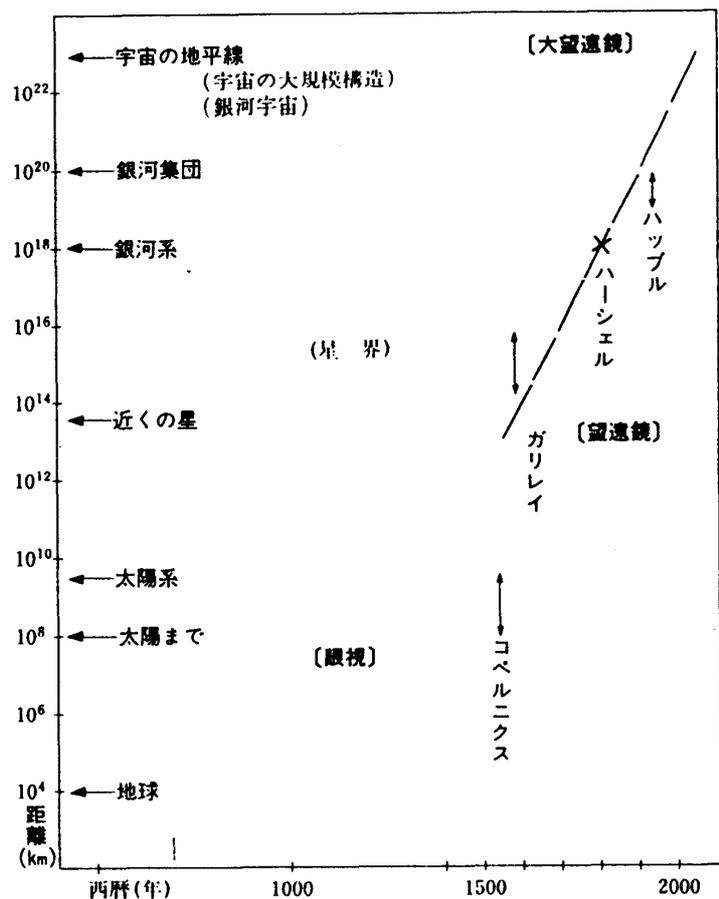


図1. 宇宙の拡大の歴史

各天体の距離とそれを認識した西暦年の関係を示す。眼で見ている間は太陽系内しか認識できなかったのが、望遠鏡を用いるようになって指数関数的に拡大した。

<sup>1</sup>大阪大学理学部

宇宙は潰れてもいいのだと考えれば、端があってもいいし、星の分布が非一様であってよい。もしニュートンが、永久不変の宇宙とか、静的な宇宙というドグマを持たなかったら、この時代（1680年代）に膨張宇宙を予言できたのである。しかし、それは誰に聞いても有り得ないと言うだろう。宇宙論は、一方において、時代の自然観からたやすくは逃れられないのである。今世紀のインシュタインすら、静的な宇宙を作ろうとしたのだから。

天の川を見ると、天球上の星分布が一様でないことがわかる。実際、星分布がどうなっているかを調べたのが、ハーシェル兄妹である（1780年以降）。つまり、宇宙の構造を観測によって調べる観測的宇宙論が、ハーシェルによって拓かれたのである。ハーシェルは、天球面を区画に切って、各区画内に見える星の数を明るさ毎に1個ずつ数えたのだが、星までの距離を見積もるために重要な仮説（あるいは経験則）を採用した。彼は、「すべての星は同じ明るさで輝いている」と仮定し、明るく見える星は近くにあり暗い星は遠くにあるとして、星の立体分布を得ることができたのである。この「仮説」あるいは「経験則」の役割の大事さを、強調しておきたい。根拠はまだ明らかではないが何らかの簡単な関係を仮定することにより、全体を一体として捉えることができ、次のステップへの手がかりが得られるのである。ハーシェルは、星が高さと直径の比が1:5の円柱状に集中していることを明らかにし、これを星雲と呼んだ。星のつくる宇宙は歪んでいるのである。そこで、ハーシェルは、この宇宙には星雲が点々と分布しているのだらうと予想した。これを基礎にカントは、島宇宙説としての宇宙論を展開した。

ハーシェルの予想は、20世紀になるまで確認することができなかった。星雲各々までの距離を決定する方法と技術が、揃わなかったからである。

19世紀中旬に発明された写真技術が、天文観測を一つの科学としたのは確かである。さらに、長時間の露光で暗い天体までもその像が撮れ、スペクトルを調べることでガスの組成や運動状態も知ることができるようになった。そして、ウィルソン山上に建設された口径2.5mの大望遠鏡。

### 3. 膨張する銀河宇宙

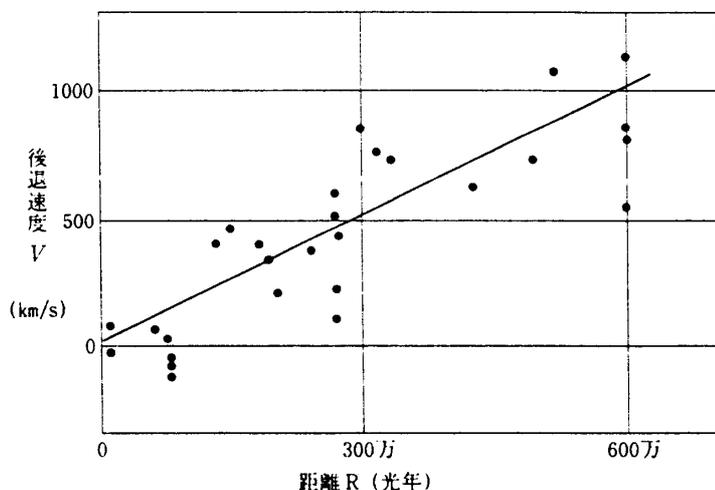
これらの技術的背景の下に、変光星を使った距離決定法が発見され（これも当初は経験則であった）、スペクトルから星の視線方向の速度を決定（ドップラー効果を利用）することが可能となった。その結果、星雲には2種類あり、一つは天の川にある星の数百個の集団、もう一つは天の川の遙かかなたにある星数千億個の集団。後者こそ、ハーシェルが予想した島宇宙であり、現在「銀河」と呼んでいる、この宇宙における基本的な天体である。つまり、星の集団としての銀河が、宇宙における物質の存在形態なのである。従って、私たちはこの宇宙を「銀河宇宙」とも呼んでいる。

これら銀河の距離と視線方向速度のデータが溜まるにつれ、ほとんどの銀河は私たちから遠ざかっており、その速度は距離に比例していることが、ハッブルによって示された。ハッブルは、これこそが宇宙が一様に膨張している直接証拠であると主張した（1929年）。実は、他のグループもこれに気付いていたのだが、データの荒さと結論の重大さに躊躇して、すぐに結果を発表しなかった。宇宙が膨張しているかもしれないという予想は、既に1923年にインシュタインの宇宙方程式から得られていた。ハッブルは、この理論的結果を十分に把握して観測に集中した。仮説を持って実験・観測を行うことによって、たとえ粗いデータからでも真実を読み取れるのだらう（図2）。

こうして、銀河が点々と分布し、宇宙膨張で互

## 宇宙論の現状／池内

図2. ハッブル図. 縦軸は各銀河の視線方向の速度. 横軸が距離で, ハッブルはこの図より, これらが比例関係にあることを見抜いた.



いに遠ざかっているという宇宙のイメージが確立した。(念のために言っておくと, 銀河間の空間が大きくなっているのであって, 銀河自身はもはや膨張していない. また, 銀河が空間に対し運動しているのではなく, 銀河は各空間点上を動かず, 空間自身が伸びているのである.)

すると, 宇宙の構造を調べるとは, 宇宙空間に銀河がどのように分布しているのかを観測することである. しかし, この研究は1980年代まではかばかしく進まなかった.

まず, 夜空の広い領域の写真を撮る. これには, 1931年に開発された魚眼レンズを備えたシュミットカメラが力を発揮した. 30cm四方の乾板上には, 10万もの天体が写っている. それを一つずつ虫眼鏡で覗いて星か銀河かの区別をつける. こうして, 天球面上に射影された銀河の2次元分布が得られる. この分布図から, 銀河が集団を形成している傾向がわかる.

#### 4. 宇宙の大規模構造

しかし, 各銀河までの距離を測定しないと, 本当に銀河が集まっているのか, 偶然同じ方向に集

まって見えているのかわからない. 銀河の距離測定には, スペクトルを撮らなければならない. 望遠鏡が小さく, フィルムや乾板を使っている間は, 明るい, 従って近くの銀河のスペクトルしか撮れない. 遠くの例外的に明るい銀河は撮れるが, その数は少なくとも構造を議論できるほどのデータは集まらない. むろん, 同じ銀河に何時間も望遠鏡を向け続けなければいいのだが, 一晩に1-2個しかスペクトルが撮れないから, 100年仕事になってしまう. これが, 銀河宇宙の構造の研究が余り進まなかった原因である.

1970年代から, 天文観測に半導体素子が使われるようになった. フィルム上に写真を撮るアナログ技術から, 光電素子によって光子を電子に変えるデジタル技術に転換したのである. さらに, 光を溜めるCCD(電荷結合素子)へと進む. これにより, 一気に銀河観測の効率が上がり, 多数の銀河の距離測定が競って行われるようになった.

第一の結果は, 夜空の狭い領域だが銀河の奥行き分布(距離と銀河の個数の関係)から, 銀河分布が一樣でなく, ほとんど銀河が見えない領域が大きく広がっていることの報告であった. これを銀河の「空洞(ボイド)」と呼んでおり, 大きいものは直径1億光年にもなる. 明らかに, 宇宙空間は銀河がのっぺりとどこにも同じように一樣に散らばっているのではなく, 何らかの非一樣=構造があるらしい. それを知るためには, 広い領域の多数の銀河の分布を調べねばならない.

その結果は, 1986年にハーバード大学の天体物理センターから発表された. 実は, このグループが使った望遠鏡は口径1m程度であり, CCD(まだその原型であった)無しでは実現できなかった観測である. 彼らは, およそ8年かけて, 15.5等

より明るい銀河約1700個の距離測定を行った。およそ、奥行きは5億光年、横の広がりには10億光年分である。彼らが発表した図から、銀河は孤立しているものは少なく、銀河の集団に属しているか、それらをつなぐ様に連なっており（連結）、一方銀

河の見えない空洞はあちこちに大きく丸く広がり、ちょうどシャボンの泡のように見える。空洞が泡の丸い部分、銀河の連なりが泡の膜のように見える。ずばり、泡構造と言え。泡（空洞）の大きさは、1000万光年から1億光年まで大小さまざまである（図3）。

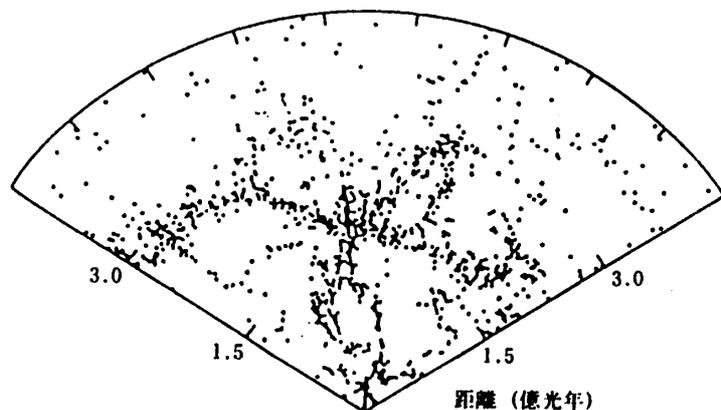


図3. 銀河の奥行き分布。私たちは扇の要（カナメ）の位置にある。

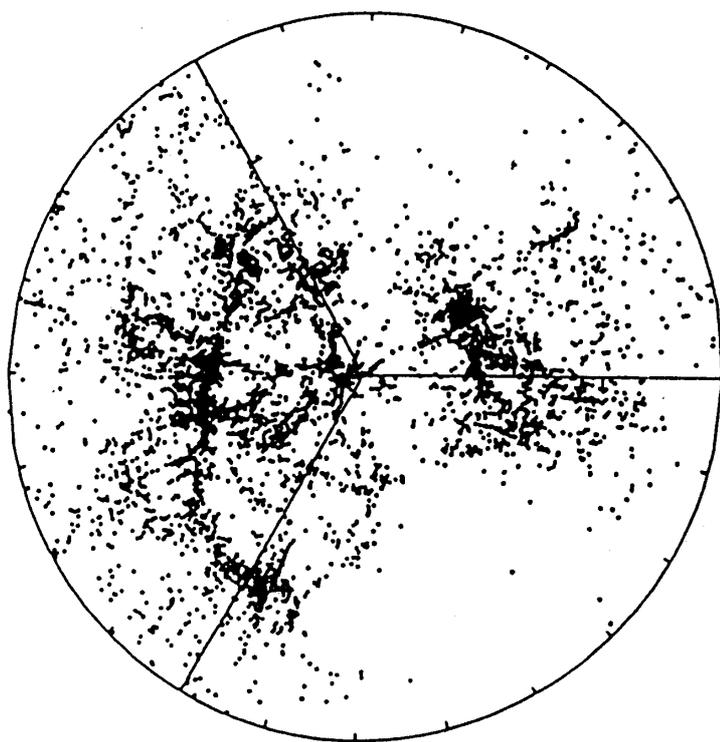


図4. 天球上の全方位の銀河の奥行き分布。私たちはこの円の中心にいる。円の大きさは約6億光年である。左（北天）と右（南天）に一つずつグレートウォールが見える。

さらに、限界の等級を15.7等に上げ、空の領域を広げて、およそ4000個の銀河分布を調べた結果、泡構造よりさらに大きいグレート・ウォール（万里の長城）という大構造が発見された（1989年）。これは、銀河や銀河の集団が、長さ6億光年、高さ2億光年、厚み2000万光年の壁（ウォール）状の領域に集中しており、それが多数の泡を包み込むようにして宇宙空間を区切っている構造である。現在知られている最大規模の単一構造が、このグレート・ウォールである（図4）。

先の狭い領域内の銀河の奥行き分布を調べる観測（ペンシルベニア・サーベイと言う）は、スペクトルが撮れる限界に近い22等の暗い銀河まで行われるようになった。ここまで等級を上げると、満月の約半分の大きさの中に200個もの銀河が見える。その各々の距離を決定することにより、およそ50億光年まで銀河の奥行き分布がわかる。その結果、50億光年先まで銀河分布が大きく凸凹となっていることが確認された。一番始めの凸の部分はグレートウォールに一致しており、どうやらグレートウォールは何個も宇宙空間に散らばっているらしい。そこで、天の北極と南極方向について、系統的にペンシルベニア・サーベイを行った

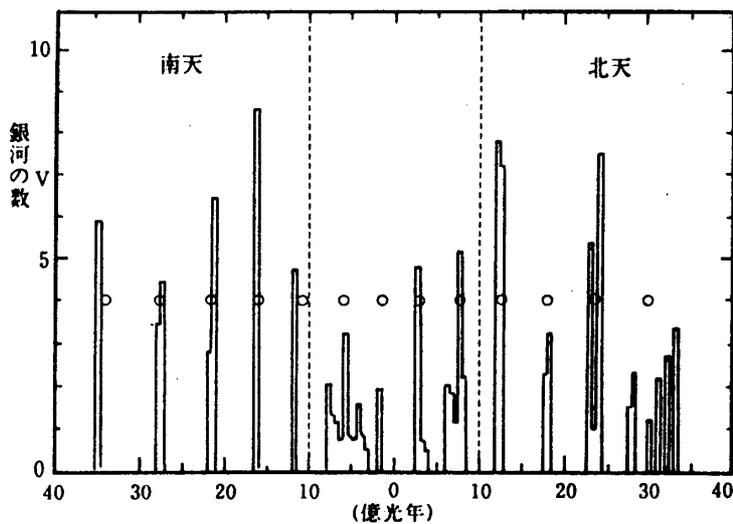


図5. ペンシルベニア・サーベイによるグレートウォールの整列.

結果、南北60億光年にわたって13個以上のグレートウォールが、約4億光年間隔で規則的に整列していることが示された(1990年)。どうやらグレートウォールの分布自身に構造が存在しているようなのである。現在、この構造についての詳細はまだ明らかではないが、数十億光年スケールの巨大構造がまだ暗闇に隠れていそうである(図5)。

以上のように、この10年ばかりの間に、1-30億光年の領域の構造探査が進み、銀河や銀河集団がさらに大きな構造を作っていることがわかってきた。今後、この領域内の徹底的なサーベイ、より広い領域へのより暗い銀河までの距離測定がなされ、大宇宙を特徴づける構造が発見されるだろう。

## 5. 今後の展開

問題は、このような大構造がどのようにして形成されたのかである。ビッグバン宇宙の立場では、密度ゆらぎが自己重力によって成長し、やがて宇宙膨張を振り切って安定構造に落ち着くという、重力不安定理論が有力である。とすると、密度ゆらぎの起源が問題になるのだが、これは宇宙創成

期の重力の分岐に伴う物質の相変化の際に生じたと考えられている。このように、宇宙の誕生と宇宙の大構造の二大テーマが結びつくようになったのである。

さらに、暗黒物質の問題がからんでくる。電磁波では捉えられないが重力源として働く物質が、星の総質量の10倍以上存在しているという問題である。暗黒物質が、何で、どのように分布しており、それは銀河や大構造の形成にどのような役割を果たしているかが、今後の宇宙進化論の鍵となるだろう。

宇宙論は観測が進むにつれ、これまで未知であった物質や構造が発見され、常に新たなシナリオを書き直さねばならないという宿命を負っている。21世紀に向けて、大望遠鏡や専用望遠鏡を建設し、より広い宇宙を観測する計画が進められている。思いもよらぬ新しい宇宙の姿が発見されるのではと、楽しみにしている。