

連載

最新宇宙誌【12】

エポックⅣ：星と銀河の形成
～構造形成の時代（前編）～

福江 純（大阪教育大学）

1. 黄金の時代—星と銀河の時代

宇宙全体が無色透明になったり紫藍に輝き始めたりしている間にも、宇宙初期に仕込まれたわずかなゆらぎは成長を続け、それらが一斉に開花する時代が到来した。星や銀河などの天体が形成される黄金時代である。宇宙開闢から計った時間は約10億年から30億年ぐらい（赤方偏移は約2から3ぐらい）、宇宙のサイズは約20億光年から45億光年ぐらい（現在の約4分の1）である（図1）。

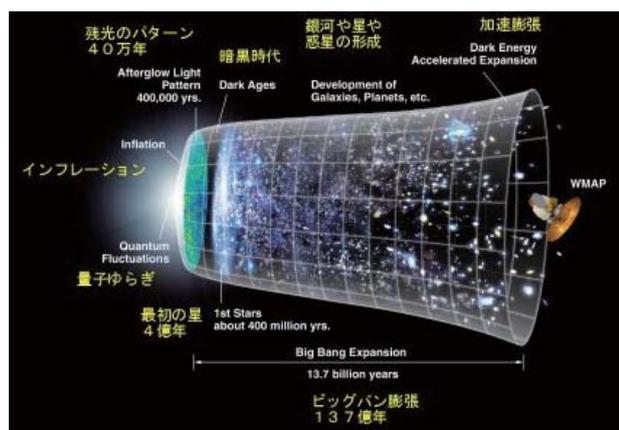


図1 天体の時代（© NASA）

上のパラグラフのファイルタイムスタンプは2007年1月26日となっている。最新の宇宙誌をまとめてみようと考えて、授業期間も終わり卒論などの目処も立った時期に、全体の構成を練って粗筋を書いたときだ。宇宙の歳月に比べると人間の時間はとても短いのを感じる（笑）。あっという間に2度目の冬が巡ってきて、ようやくエポックⅣまで筆を進めることができた。いよいよ、星や銀河など天体形成の時代の話である。

が、実はやや途方に暮れている感がある。

一言で言えば、複雑すぎるのだ。どうまとめればいいのか。3日前と昨日と、「巨大ブラックホール天文学」という研究会に参加していて、銀河形成と巨大ブラックホール形成に関する最近の話題なども出てきたのだが、銀河形成、面白いけど難しいなあ。

エポックⅠ（『天文教育』2007年5～9月号）などで扱った宇宙開闢時の話は、物理の素過程は難しいものの、宇宙全体が熱平衡状態になっているので、扱い自体は非常に単純で、話の流れも一本道だった。正確に言えば、アインシュタイン方程式にしたがった時空構造の変化と、素粒子物理学に支配される物質の性質変化の2本立てで済んだ。……もっとも、時空構造と物質／エネルギーとは、とくに非常に高いエネルギー状態ではお互いに縊り合っているのだから、本当はそれほど簡単ではないようだ。

一方、星や銀河の形成は、物理の素過程自体はニュートン重力が中心で非常にシンプルだが、要素がめったやたらに増えて複雑に絡み合っている。そのために、要素だけの振る舞いを調べるのではだめで、要素間の相互作用をきちんと取り入れないといけない。しかし、これは実際にはかなり難しいことで、その結果、構造形成の問題は扱いが非常に難しく、見通しも立てにくく、全体像も掴みにくいのである。

具体的な要素としては、

- 目に見える星やガスやチリなどの通常物質
- 目に見えない暗黒物質
- 輻射（エネルギー）や磁場

がある。要素内および要素間の相互作用としては、

- ・重力作用
- ・(電磁)流体力学的作用
- ・輻射や磁場などの作用

などがある。さらにそれらのもとで形成される構造には、

- ・星(最初の星、後代の星)
- ・星団(最初の星団、球状星団)
- ・銀河(最初の銀河、通常銀河、合体銀河)
- ・大規模構造(銀河団、超銀河団、超空洞)
- ・暗黒物質構造

などが考えられるだろう。

これらの天体は性質もスケールも大きく異なるのだが、独立に形成されたわけではなく、おそらく同時にお互いに影響を与えながら形成されてきた、いわゆる「共進化(co-evolution)」したはずなのだ。

ということで、とりあえずの予定としては、2節で天体構造のスケールについて整理した後、3節で大規模構造の観測を歴史的な順序にしたがって紹介してみようと思う。また4節では、構造形成の基本的な考え方である重力不安定と、膨張宇宙における重力不安定の起こり方を、こちらも勉強しながらまとめてみたい。つづく5節では、構造形成の古典的な理論を紹介し、6節では WMAP 衛星によって明らかになった構造ゆらぎのパターンとバリオン振動(実はまだバリオン振動が何か、書いている本人もよくわかっていない；泣)を考えよう。そして7節で、最近の考え方である、バイアスモデルや、 Λ CDM モデルなどを紹介しよう(ここらへんも、ほとんど言葉ぐらいしか知らない；笑)。

2. 天体のスケール

このところ相対論の解説書を書いているので、質量や時空について久しぶりに熟考する

機会があったのだが、改めて、ぼくたちがほとんど何もわかっていないことに気づいた。グラビトン(重力子)の性質だとか、高次元Dブレーンにおける超ひも粒子としての振る舞いだとか、さまざまに議論されてはいるが、その実質については、最先端の物理学者も含め、まだだれも答えをもっていないようだ。重力が支配している天体の大規模構造では、差し当たってはニュートンの信奉者でいれば済むのだが……。

などというエクスキューズをしたのは、具体的な話に進む前に、構造のスケールを少し考えてみようと思ったからだ。自然の階層やものの大きさについては、ぼくの知る限り2冊ほど、よくまとまった本が出ている[1][2]。

まず身の回りにあるモノの大きさは、何で決まっているかという、これははっきりしていて身の回りでもっとも強い「電磁力/電磁相互作用」である。講義などで机に手を押しつけて、“(原子の内部は空虚なのに)なぜ手は机にめり込まないのか?”などとよくやるだろう。それらのモノのサイズの下限を決めるのは量子効果で、したがって原子分子サイズが下限になる。一方、上限を決めているのは地上重力である。あまりに大きくなると、体重に抗して生物の骨組みは維持できなくなるし、山脈は崩れてしまう。

つぎに星だが、これは結構いろいろなケースがある。核反応が起こる前の原始星は、重力収縮によって生じた熱によって高圧になったガスの圧力(電磁力)と重力とが釣り合う大きさになっている(はず)。主系列星でもガス圧と重力が釣り合っているのは同じだが、熱源が核融合なため、核力も関与しているのがややこしい。主系列星の下限を決めるのは核融合が起こる条件(0.08太陽質量ぐらい)で、上限を決めるのは放射圧で吹き飛ばす条件(100太陽質量ぐらい)になる。ただし、星でも白色矮星や中性子星は、核力と重力がそ

のサイズを決めている。ブラックホールは星とは言わないだろうが、ブラックホールのサイズは一般相対論的重力で決まっている。

では、銀河はどうだろう。これが難しいのである。

一つの考えとしては、銀河が形成される時のガスの圧力と重力のせめぎ合いで決める、というものだ。後の節で紹介する重力不安定がそれにあたる。しかし、銀河団や超銀河団、さらに大規模構造などがあるので、重力不安定ではすべてを説明することは難しい。

別の考えとしては、重力作用で部分が集まっていき、集団になったとするものである。後の節で紹介する重力集団化だ。しかし、モノのサイズが力学的な釣り合いで決まるとすると（一般にはエネルギー的な釣り合いも必要だが）、最低限、二つの力が必要である。ニュートン重力は逆2乗でどこまでも届くスケールフリーな力なので、(ブラックホールは別として) 重力だけではサイズが決まらないのだ。

そして、ダークマターの存在が広く信じられるようになった現在では、通常物質の10倍もある暗黒物質が、銀河形成で重要な役割を果たしていると考えられている、と思う。しかし、その肝心のダークマターについて、わかっていないことが多すぎるため、結果、銀河形成についても、曖昧にしか言えないのが現状だろう、と思う。

3. 大規模構造の観測

一般相対論にもとづく膨張宇宙論では、アインシュタイン方程式を解く際に、

- ・宇宙はどの場所でも均質に見える（一様性）
- ・宇宙はどの方向も同じに見える（等方性）

という大きな二つの仮定を置く。いわゆる「宇宙原理 (cosmological principle)」と呼ばれるものだ。しかし、細かい精度でみれば、等

方性はともかく、一様性の仮定は成り立っていない。現在の宇宙には、銀河その他のさまざまな構造が存在しているからだ。

まずこの節では、銀河より上の階層構造について、発見された順にしたがって、まとめていきたい。

3.1 古くから知られていた天体構造

ごく常識的なことだが、一応、基本的な銀河や銀河団から整理していこう。

3.1.1 銀河

まず、銀河の一種で、多数の星が、球状あるいは楕円体状に集まったものが「楕円銀河 (elliptical galaxy)」だ (図2)。



図2 楕円銀河 M49 (画像提供：大阪教育大学)

記号では E で表し、その丸みの度合いによって、丸いものから扁平なものへ、E0 から E7 まで細分類する。たとえば、アンドロメダ銀河の伴銀河の M32 は E2 型で、おとめ座銀河団の中心にある巨大楕円銀河 M87 は E0-1p 型である。後者は、E0 型ないし E1 型で、p は特異 (peculiar) を表す。

ちなみに、E8 とか E9 という非常に扁平な楕円銀河はない。この事実は、楕円銀河と渦状銀河の成因と関係するはずだが、こんな基本的なことが、未解決なのである。

銀河の一種で、多数の星が円盤状に集まったものを「円盤銀河 (disk galaxy)」と総称するが、その中で渦状構造などの“グランドデザイン”をもたないノッペリとしたものを「レンズ状銀河 (lenticular galaxy)」と呼んでいる。記号では S0 で表す。

一方、渦状構造やリング構造のような綺麗なグランドデザインをもつものを「渦状銀河 (spiral galaxy)」と呼ぶ (図 3、図 4)。記号は S で表す。渦状銀河の中では、棒状構造



図 3 渦状銀河アンドロメダ銀河 M31 (画像提供：大阪教育大学)
伴銀河 M32 (中央左側の丸い銀河) と M110 (右下の楕円銀河) も写っている。

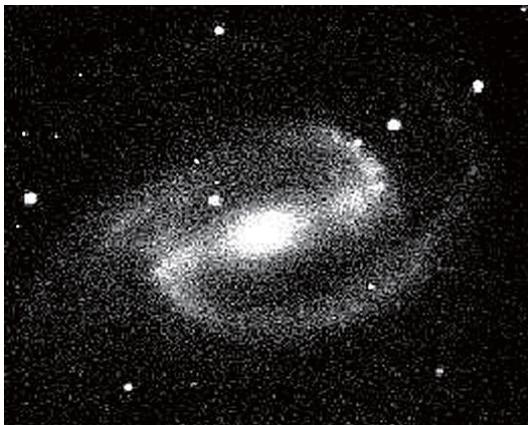


図 4 棒渦状銀河 NGC1300 (画像提供：大阪教育大学)

をもたない「渦状銀河 (spiral galaxy)」(記号 SA) と棒状構造をもつ「棒渦状銀河 (barred spiral galaxy)」(記号 SB)、そして中間的なもの(記号 SAB)にわけられる。また、渦状銀河は渦巻きの腕の開き具合によって、腕がきつく巻きついたものから、ゆるやかに広がったものへ、Sa、Sb、Sc、Sd、Sm と添え字をつけて細分類する(棒渦状銀河だと、SBa などになる)。

お隣のアンドロメダ銀河 M31 は SAb 型だし、子持ち銀河として有名な M51 は SAbcp である。p は特異を表す。

銀河のうち、楕円銀河、レンズ状銀河、渦状銀河・棒渦状銀河などの分類に当てはまらないもので、不規則な形状をした銀河を「不規則銀河 (irregular galaxy)」と呼ぶ。記号は Irr で表す。

銀河系の伴銀河の一つ、小マゼラン銀河が Irr である。また、かつては大マゼラン銀河も Irr に分類していたが、最近では棒渦状銀河 SBm ということになったらしい。

以上の銀河の基本的な形態は、その見かけ上の特徴にしたがって、音叉型の図に並べられる(図 5)。エドウィン・ハッブル (Edwin Powell Hubble ; 1889~1953) が行った銀河の形態分類を「ハッブル分類 (Hubble classification)」と呼び、ダイアグラムを「ハッブル系列 (Hubble sequence)」とか「ハッ

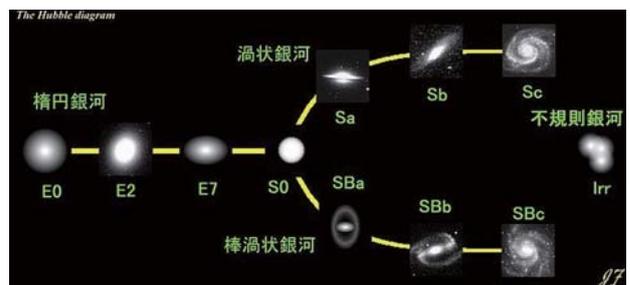


図 5 渦状銀河の構造 (栗野ほか『宇宙スペクトル博物館』より)

ブルの音叉図（Hubble diagram）」などと呼ぶ。

ハッブル分類は、比較的大きな銀河を見かけ上の形態で並べたものであり、あくまでも博物学的な視点だ。歴史的には、楕円銀河を早期型、渦状銀河を晩期型と呼ぶことがあるように（もういまは呼ばないかも）、楕円銀河が渦状銀河へ“進化する”のではないかと思われていたこともある。逆に、少し前ぐらいだと、渦状銀河が合体して楕円銀河に“進化する”と思われたこともある。たしかに合体することもあるが、事の本質は、それほど単純なものではないらしい。

また観測技術が進展して、より暗い銀河やより遠方の銀河が観測されるようになると、ハッブル分類に乗りにくい銀河も見つかるようになってきた。

たとえば、典型的な銀河に比べてかなり小さい銀河を「矮小銀河（dwarf galaxy）」という（図6）。矮小銀河は暗いためよく調べられてこなかったが、案外と数も多く、また予想に反して活発に星が生まれている場合もあるようだ。ひょっとしたら、宇宙には小さくて暗い矮小銀河が思ったよりもたくさんあるのかもしれない。



図6 矮小銀河 Leo I (© David Malin/AAO)

また、形成されて間のないの銀河を「原始銀河（protogalaxy）」という（図7）。深宇宙の探査が進むにつれ、原始銀河らしいものが発見されてきた。

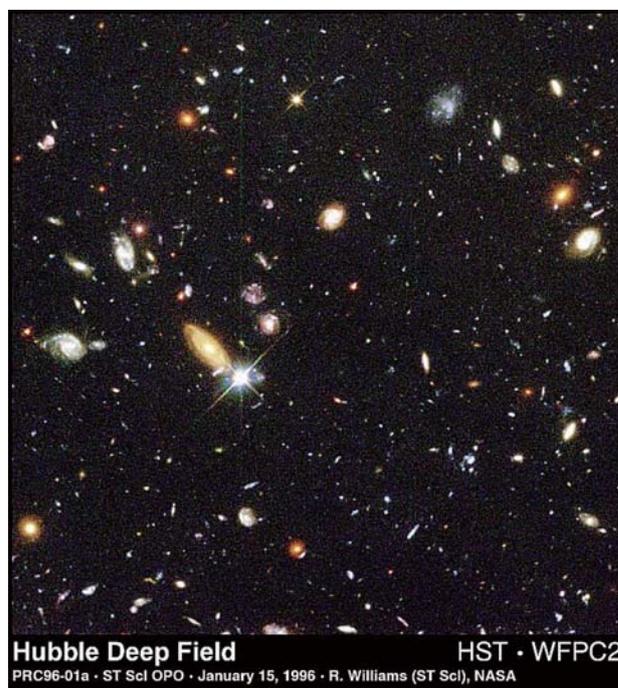


図7 ハッブル深宇宙探査で写っている原始銀河たち (© NASA/STScI)

さらに、銀河の形態で通常よく見られる形状以外に、ジェット状構造や爆発状構造その他、特異な構造を示す銀河を「特異銀河（peculiar galaxy）」と併称する（図8、図9）。



図8 （説明は次ページ）

図 8 特異銀河メガメーザーM106/NGC4258
(© NASA/Chandra)

可視光でわかる渦状腕とは別に、もう一対の腕構造がありX線などでみえている。また中心には、水メーザーで発見された超大質量ブラックホールと降着円盤がある。



図 9 相互作用銀河であるアンテナ銀河 NGC4038 (出典: http://www.belplasca.de/skyimages/Antenne_LRGB_090607_mg.jpg)

たとえば、おとめ座銀河団の中心に位置する巨大楕円銀河 M87 は、楕円銀河のコアハロ構造以外に、中心部からジェットが噴き出ているので、特異銀河でもあり E0-1p 型に分類される。この p が peculiar (特異) を示す。また、円盤銀河 M82 は爆発的にガスが噴き出ている構造を示すので、やはり特異銀河である。これら特異銀河には、中心核で異常な活動を示す「活動銀河 (active galaxy)」や、別の銀河との重力相互作用を受けている「相互作用銀河 (interacting galaxy)」が多い。

3.1.2 銀河集団

銀河の集まりについて、整理しておこう。

星の場合と同様に、銀河も二つあるいはそれ以上の銀河が重力的に結びついて存在していることがある (図 10、図 11)。2 個の銀河が連なった場合は「連銀河 (binary galaxy)」と呼ぶし、たとえば、五つの場合は五連銀河



図 10 子持ち銀河 M51 (画像提供: 大阪教育大学)



図 11 ステファンの五つ子 (© NASA/JPL) パラアルト天文台の可視光画像とシュピッツァー赤外線天文台の赤外線画像を合成したもの。銀河同士の衝突(?)によって生じた(?)衝撃波が写っている。

とか「五つ子 (quintet)」などと呼ぶ。また大きい銀河に小さい銀河が付随しているときには、小さい方をしばしば「伴銀河 (companion galaxy/companion)」と呼ぶ。

連銀河はしばしばお互いに重力作用を及ぼしあっており、二つの銀河の間に「橋 (bridge)」などが見られることも多い。その

ような連銀河は、相互作用銀河でもある。

たとえば、子持ち銀河 M51 は、9 等の大きい銀河 NGC5194 (SAbc) と 10.5 等の小さい銀河 NGC5195 (SBp) の連銀河だが、小さい方はまた伴銀河でもある。

また、多数の星が集まって星団を作るように、銀河もしばしば集団を作る（図 12、図 13）。数個から数十個程度の小規模な銀河集団は「銀河群（group of galaxies）」と呼び、比較的大きな集団は「銀河団（cluster of galaxies）」と呼ぶ。

有名なものとしては、おとめ座の方向で 6000 万光年程度の距離には、楕円銀河 M87 などを含み 50 個程度の銀河からなるおとめ座銀河団 (Virgo Cluster) がある。さらに、かみのけ座の方向 4 億光年の彼方には、100 個以上の銀河を含むかみのけ座銀河団 (Coma Cluster) がある。



図 13 かみのけ座銀河団（画像提供：国立天文台）

銀河や銀河団は宇宙の中で一様に分布しているわけではなく、銀河・銀河団が比較的密な領域や疎な領域がある。銀河や銀河団が比較的密な領域で、それらが連なり合ってきた数億光年程度の広がりをもつ銀河（団）の集まりを「超銀河団（supercluster / supercluster of galaxies）」と呼ぶ。

近傍の超銀河団には、おとめ座超銀河団やかみのけ座超銀河団、そしてケンタウルス座

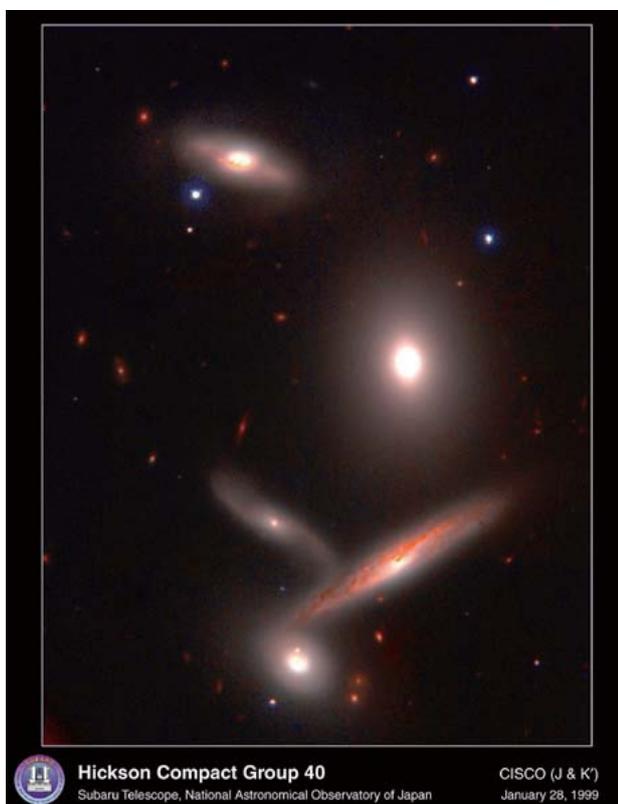


図 12 ヒクソンコンパクト銀河群 40 (画像提供：国立天文台)

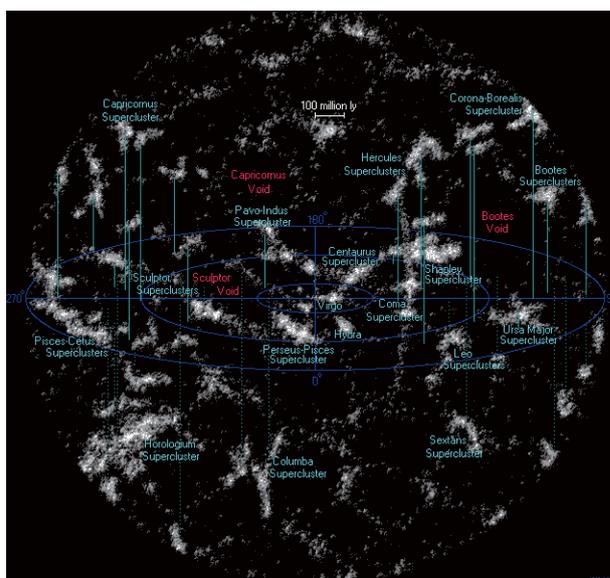


図 14 シャプレー超銀河団（出典：http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/46/Superclusters_atlasoftheuniverse.gif）

方向で約 6.5 億光年離れたところにある「シャプレー超銀河団 (Shapley Supercluster)」などがある (図 14)。

ところで、銀河団よりも上の階層構造はあるのだろうか。いわゆる CfA サーベイが行われる 1980 年代以前、思想的および理論的には、銀河団より上の階層構造があると考えられており、超銀河団と呼ばれていた。ただし、当時はまだ、十分な観測的証拠があったわけではないと思う。ここらへんは、きちんと文献をあたったわけではないので、超銀河団が観測的に実証されたのがいつの時点かは、勘違いがあるかもしれないが、おそらくは 1980 年代以降だと思う。

3.2 大規模構造と超空洞の 1980 年代

少し辞書的な定義を続けよう。

超銀河団は、しばしばフィラメント状の構造や扁平なシート状の構造をしているように見える。とくに巨大な壁状の構造は、「超壁／グレートウォール (great wall)」と呼ばれる。なお、グレートウォールは「万里の長城」の意味だが、1980 年代の CfA サーベイで発見されたグレートウォールは一つで、最初は固有名詞のように使われていた、と思う。しかし、その後の SDSS サーベイなどでもっと大きなグレートウォールが発見されたので、現在は普通名詞のように使われているようだ。

逆に、いくつかの超銀河団やグレートウォールによって取り囲まれた、数億光年の広がりをもつ銀河のほとんど存在しない領域を「超空洞／ボイド (void)」と呼ぶ。

そして、宇宙全体では、超銀河団と超壁や超空洞がシャボンの泡のように入り交じって「宇宙の大規模構造 (large scale structure of the Universe)」を形作っている (図 15)。

宇宙の中で銀河が実際にどのような分布をしているかを調べるには、天球面だけでなく、宇宙の奥行き方向に向かって、銀河の分布を

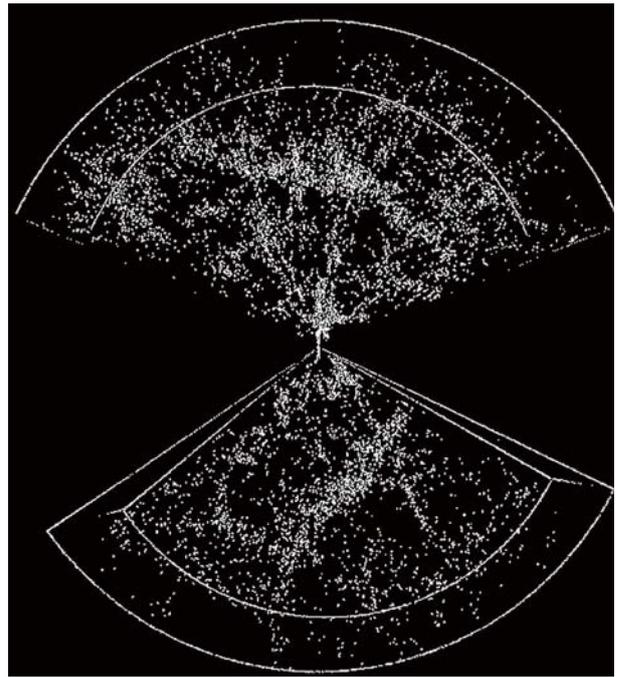


図 15 銀河の大規模構造 (出典：
<http://cfa-www.harvard.edu/>)

図の中央が銀河系で、一個一個の点が銀河を表している。

知ることが必要になる。そのためには、銀河の赤方偏移を測って距離を推定しなければならない。しかし、遠くになればなるほど銀河は暗くなるので、赤方偏移を測ることはどんどん難しくなる。

観測装置の性能が向上してきた 1980 年ごろから、ようやく組織的なサーベイが開始された。実施したのがハーバード大学天体物理学センター (Center for Astrophysics) —— CfA と通称する —— の研究者たちで、彼らの銀河サーベイ (銀河探査) を「CfA サーベイ」と呼んでいる。

最初の CfA サーベイは、1977 年にデービス (Marc Davis) やハクラ (John Huchra) たちが開始し、1982 年に完了した。このときには、たしかに銀河や銀河団がフィラメント状の超銀河団を形成していることが観測的に立証された (図 16)。図の真ん中へんに見える“人型” —— 「CfA の棒男 (CfA Stick Man)」

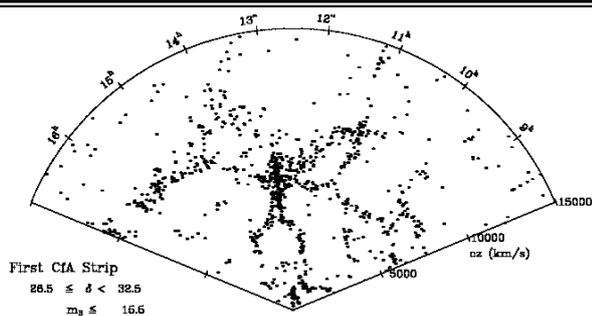


図 16 最初の CfA サーベイで得られた銀河の分布（出典：<http://www.cfa.harvard.edu/~huchra/2mass/public.php>）

銀河の個数はまだ少ない。円周方向は赤経 8 時から 17 時くらいで、半径方向は後退速度 12000km/s ぐらい。

というニックネームが付いた——が超銀河団である。

図 16 に似たような扇形の図が何度も出てくるが、これらの図では、扇の要が銀河系で、要から宇宙の奥行き方向を眺めたものになっている。すなわち、この図では、扇の円周方向が赤経で、半径方向が赤方偏移に対応する速度になっている。距離に変換していないのは、宇宙モデルなどの不確定要素が入ってくるのを避けるためだ（最近では宇宙モデルが確定してきたので距離換算した図も多い）。また、この“扇”はある程度の厚みがあって、この図では赤緯方向に 6° の範囲でサーベイした銀河を平面に射影している。

第 2 期の CfA サーベイは、ハクラとマーガレット・ゲラー（Margaret Geller）たちが 1984 年に開始し、多数の協力を得た 10 年がかりの大きなプロジェクトとなり、ときどき成果を報告しながら、1995 年に完了した。最終的には、北天の 18000 個の銀河が調べられ、扇形図にプロットされた（図 15、図 17）。

この第 2 期サーベイでは、銀河の少ない超空洞／ボイド構造が数多く発見され、銀河の分布が“泡構造”をなしていることが明らかになった。台所のシャボンのようなと説明し

た“ゲラーおばさん”の印象が強く、この第 2 期サーベイの結果は、一般の人にも強い印象を残したと思う。

また、この第 2 期サーベイでは、観測領域の全体に 7 億光年以上にもわたって伸びたグレートウォール／万里の長城（の一つ）がはじめて発見された。

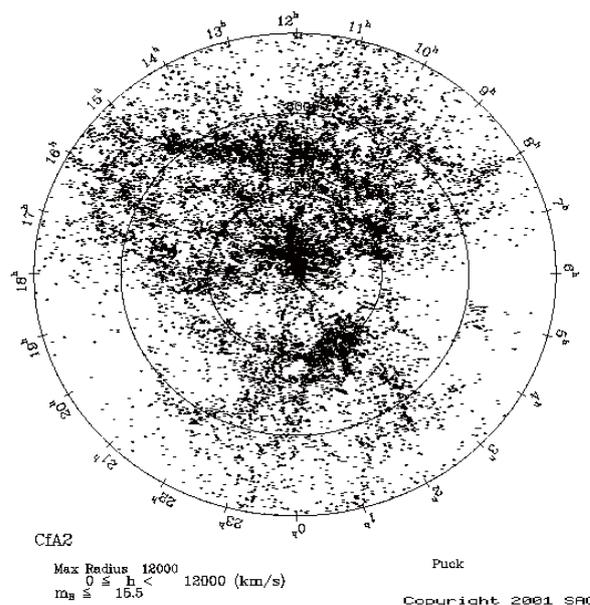


図 17 第 2 期の CfA サーベイで得られた銀河の分布（出典：<http://www.cfa.harvard.edu/~huchra/zcat/>）

銀河は 18000 個（のはず）。円周方向は赤経すべて、中心から半径方向は 12000km/s まで。この図は全周を見ているので、中心が銀河系。

歴史のイフではあるが、もし銀河や銀河団の集まった超銀河団が、宇宙のそこかしこに点在していて、10 億年ぐらいの領域で全体として万遍なく散らばってれば、話はそこで終わっただろう。アインシュタインの宇宙原理の一つ、一様性も満たされただろう。

しかし実際には、銀河団や超銀河団はネットワーク状に連なり合っており、銀河の少ないボイドも多数あり、CfA サーベイの範囲内では、あまり一様にはみえない。宇宙の大規模構造は予想外に複雑だったのだ。

つぎの段階は、当然、より範囲を拡げて宇宙の奥行き地図を作成することである。問題は、時間もお金もかかる大がかりなプロジェクトを、だれが、どのように実行するかだった。

3.3 宇宙地図を作成する 2000 年代

人類がまだ見ぬ領域まで広範な宇宙地図を作成する目的で、世紀の変わり目に2つの大プロジェクトが開始された。一つは、「スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (Sloan Digital Sky Survey)」通称 SDSS で、もう一つは「2dF 銀河赤方偏移サーベイ (2dF Galaxy Redshift Survey)」通称 2dF である。前者では100万個におよぶ銀河やクエーサーの赤方偏移を、後者では22万個強の銀河の赤方偏移を計測する巨大プロジェクトだった。

すでにプロジェクトの完了した後から紹介する (<http://www2.aao.gov.au/~TDFgg/>)。

後者の 2dF サーベイは、オーストラリアとイギリスのチームが、アングロ・オーストラリアン天文台 AAO の 3.9m 望遠鏡を使って実施したものだ。……と書いて、あれ、AAO の所在地は、どこだったっけ、と HP へ跳んだ。HP に住所がみつからなかったが、画像 (図 18) の名前でもわかった。サイディング・スプ



図 18 オーストラリアはサイディング・スプリングのアングロ・オーストラリアン天文台 (出典: <http://www.aao.gov.au/theaao.html>)

リングだった。

彼らは、角度にして 2° 四方の領域内の400個の天体のスペクトルを“同時”に取得できるフィールド板 (field plate) を用いたので、プロジェクトには「2dF (Two Degree Field)」という名前が付けられた (図 19)。

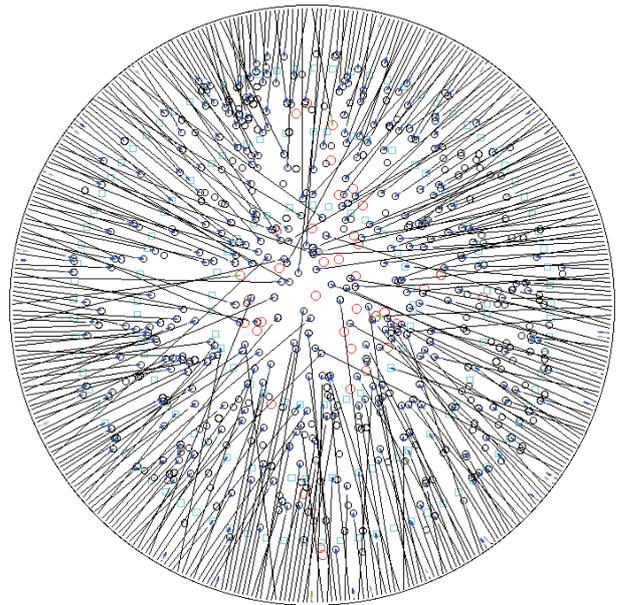


図 19 望遠鏡の焦点面に、各視野に応じて、焦点に結像する銀河の位置に孔を開けたプレートを設置する。それぞれの孔に取り付けたガラスファイバーで銀河の光を分光器まで誘導し、400個の銀河のスペクトルを一挙に得るしくみである。

5年間で約1500平方度 (約 40° 四方) の領域で245591天体のスペクトルを取得し、十分な信頼性で221414銀河の赤方偏移を測定した。プロジェクトは完了しており、最終結果は2003年に発表されている (図 20)。

見たことがある人も多いだろうが、約22万個の銀河がプロットされた宇宙地図には、圧倒されるものがある。成果をかいつまんで紹介しようと思って概要と成果のページをチェックしたら、64項目もあってめげたので、詳しく知りたい人は URL を参考にして欲しい (<http://www2.aao.gov.au/~TDFgg/>)。ト

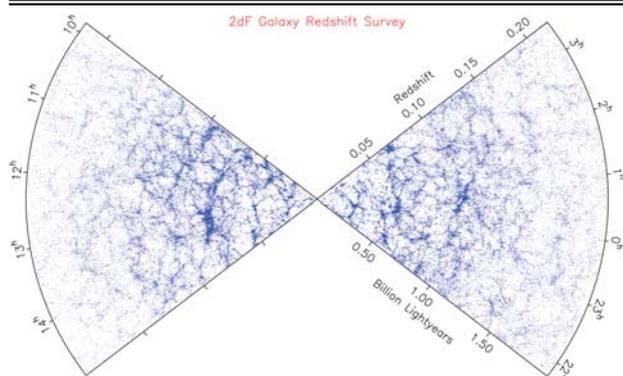


図 20 2dF サーベイで得られた宇宙地図（出典：<http://www2.aao.gov.au/~TDFgg/>）扇型の弧の部分には左右とも赤経で5時間分ぐらい、半径は20億光年（赤方偏移で0.2強）ぐらい。約22万個の銀河がプロットしてある。

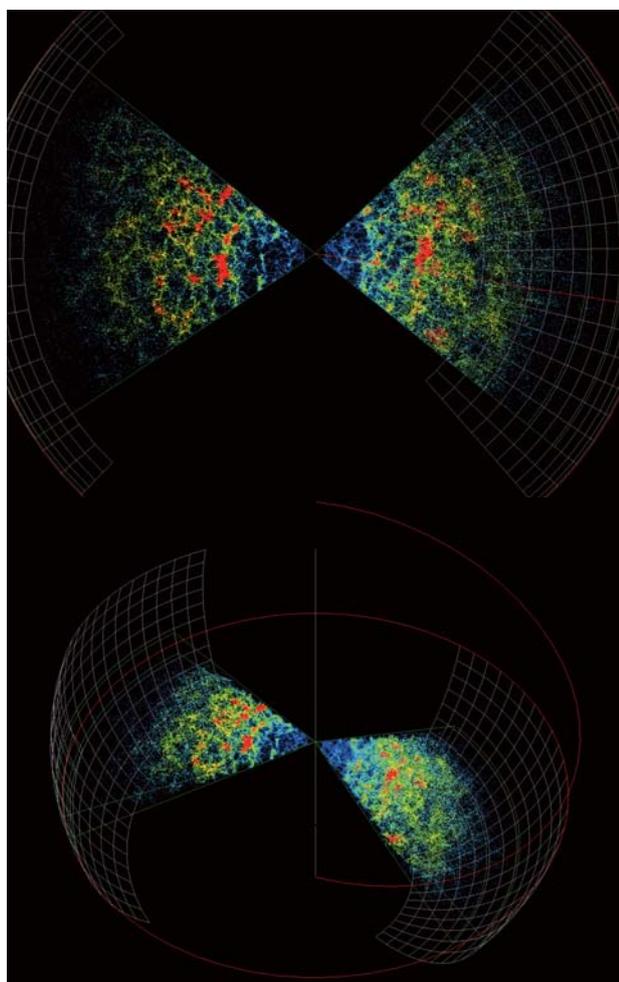


図 21 トップビューとサイドビュー（出典：<http://www2.aao.gov.au/~TDFgg/>）原図は色着けしてあって、色には何か意味があると思うが、どこに書いてあるかわからなかった。

ップビューとサイドビューを並べて出しておこう（図 21）。フライスルーの動画もあったけど、マックのクイックタイムなので見られなかった（泣）。

有名な SDSS (<http://www.sdss.org/>) に進もう。

一口に SDSS といっても、第一期 SDSS-I (2000～2005) と第二期 SDSS-II (2005～2008)、第三期 (2008～2014) と、すでに足かけ8年以上にわたり続き、これからも続くようだ。一番最初に SDSS の話を聞いたのは1996年にプリンストン大学に行ったときだから（そのときは全然ピンと来なかったけど）、計画自体はもっともっと前からのものである。プリンストン大学を中心に（だと思う）、日米共同天文観測計画として発足し、その後、世界中から25研究機関が参加する本格的な国際共同研究になって、何百人もの天文学者が参加した巨大プロジェクトである。スローン財団の寄付によって実現したので、その名前を冠している。

SDSS の特徴はサーベイ用の専用望遠鏡を建設したことだ。アメリカのニューメキシコ州、アパッチ・ポイント天文台に設置した2.5mの専用望遠鏡を有して、常時観測できる体制を取った点だった（図 22）。そして、1.5平方度（満月の約8倍の広さ）内の608天体のスペクトルを“同時”に取得できるプレートを用いた（図 23）。二つの観測モードがあって、晴れた日にはとにかく宇宙深部まで暗い銀河をサーベイし、月があつたり薄曇りだったり観測条件の悪い日には分光器でそれらの銀河の赤方偏移を測定するのだ。

ちなみに、観測に用いて使用済みの穿孔アルミニウムプレートは、観測視野専用で他に使いようがない。東大の須藤靖を中心とする日本グループでは、ビッグバン宇宙国際研究センターの援助を受け、天文学の教育普及の



図 22 SDSS プロジェクトのためにアパッチ・ポイント天文台に作られた口径 2.5m の専用望遠鏡

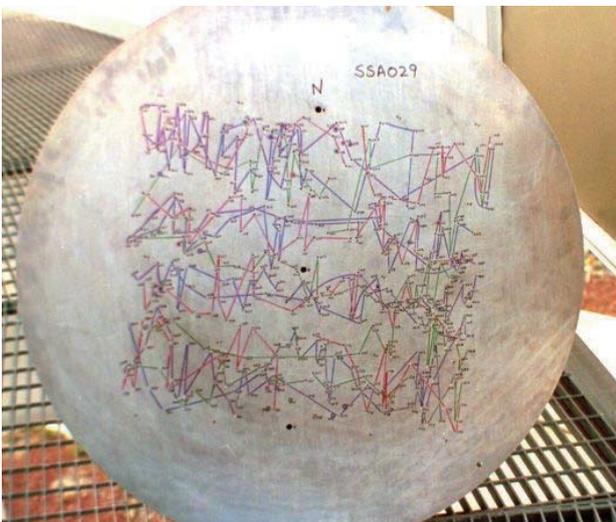


図 23 SDSS で用いられた穿孔アルミニウムプレート
2dF では 400 個だったが、SDSS では 608 個の孔が開けられている。

ためにアルミプレートを無償で配布することにした（郵送料まで含めて無償というところが気前いい）。そして幸い、うち（大阪教育大学）の図書館でも 1 枚ゲットできた。相談を受けたとき、折角のチャンスだから是非応募してください、展示とかは何とかなりますよ、と言っていたのだが、ほんとに手に入ってしまった。展示どーしよう（笑）。ちなみに、うちでゲットしたプレートの ID 番号は、

赤経 150.093704

赤緯 25.55829

の領域だった（図 24）

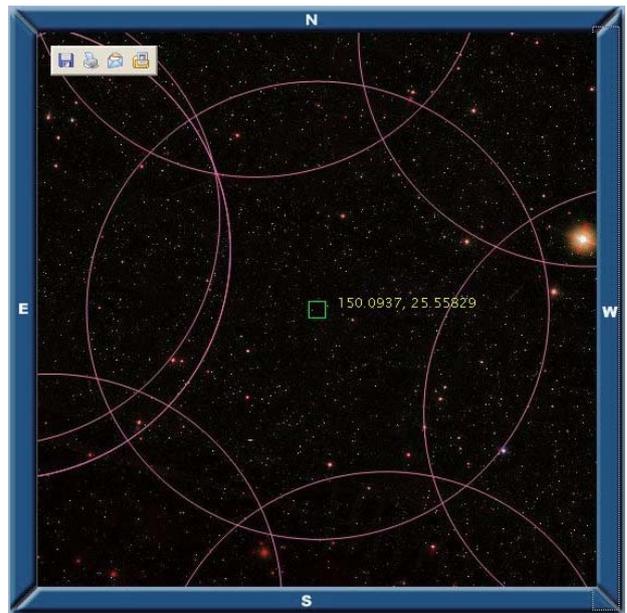


図 24 大阪教育大学図書館で取得したアルミニウムプレートの観測視野

さて、SDSS の成果だが、第一期と第二期および補完的なスローン・レガシー・サーベイ (Sloan Legacy Survey) によって、約 8400 平方度の領域（全天の 1/5 ぐらい）において検出された 230 万天体のうち、約 93 万個の銀河と 12 万個のクェーサー、合わせて 100 万個以上の天体のスペクトル（およびイメージ）を取得した（図 25）。

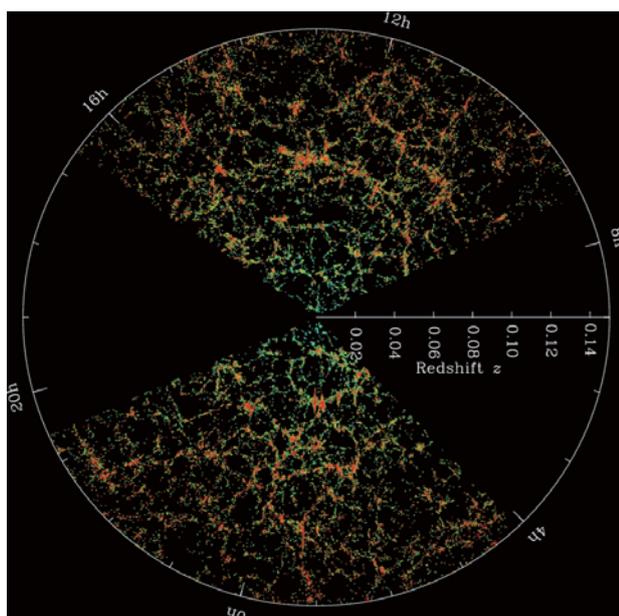


図 25 約 100 万個の銀河とクェーサーをプロットした宇宙地図
明るさに応じて色分けしてある。

SDSS の科学成果のページに並べてあった主な成果は、幸い 14 項目だったので、一応、目を通して見た。そのうちから、宇宙の大規模構造に関わるモノをピックアップしてみる。

- ・重力レンズ効果を用いた銀河周辺の物質分布のマッピング
- ・クェーサーの正確な明るさ分布の測定
- ・大規模構造の正確な測定と宇宙論への制限
- ・銀河分布における音波振動の兆候の発見(いわゆるバリオン振動でいいと思う)・クェーサーの集団化の測定

などなどがある。

もともとは宇宙の地図の作成が主目的だったが、その他の天体も当然に写るので、ついどうも副産物として、銀河系やアンドロメダ銀河周辺の現象、銀河系内の星々の現象、小惑星などまで、非常に多くの成果が得られている。詳しくはホームページを参照してほしい (<http://www.sdss.org/>)。

……つづく……

参考文献

- [1] 池内 了 (1995) 『宇宙と自然界の成立ちを探る』、サイエンス社
- [2] 須藤 靖 (2006) 『ものの大きさー自然の階層・宇宙の階層』、東京大学出版会
- [3] バーバラ・ライデン (2003) 『宇宙論入門』 (牧野伸義 訳)、ピアソン・エデュケーション
- [4] Gerhard Borner (1993) “The Early Universe”, Springer-Verlag