

## 銀河の生い立ちと死

単純化しすぎているように思えるかもしれませんが、「銀河はどのように成長するのだろうか?」と「銀河はどのようにして死ぬのだろうか?」といったような質問は、根本的なだけでなく、銀河形成というテーマにおける現在の最も重要な問題の数多くを捉えたものとなっています。天文学者はこういった質問に答えようとしていますが、そうすることによって私たちの住む天の川銀河を含む銀河の形成と進化史の原動力となる物理的な機構の本質を解明したいと望んでいます。

これらの質問に対する洞察を得るためには多くの有望な道筋がありますが、ここでは銀河種族の解析で史上初の大統計を達成することで、研究を大きく進展させる可能性を持つ2種類の新しい観測データについて取り上げたいと思います。

まず最初に、空間分解分光観測のデータ収集能力を50倍に高めた技術的なブレイクスルーについて取り上げます。銀河に対して、医学のCTスキャン(コンピュータ断層撮影)に相当するものを想像して下さい。それは、銀河の各場所における分光データ、いわゆる「3次元データ」で、銀河をその主要な成分である、星とガスに分解し、それぞれの性質の詳細を明らかにすることを可能にします。さらに、この銀河のCTスキャンを何千個もの近傍銀河に対して行い、そのデータを手に入れることを想像して下さい。私が中心研究者を務めている、現在実施中のMaNGAサーベイ(Mapping

Nearby Galaxies at Apache Point Observatory、アパッチ・ポイント天文台における近傍銀河のマッピング)は、2020年に終了するまでには最終的に10,000個もの銀河の分光観測を目指しており、すでにこの種の分光観測では世界最大のサーベイになっています。この豊富なデータは進化の機構が働いている現場を捕らえるのに役立っており、その一例としては、私たちが2016年に発見し、「red geyser (レッドガイザー、赤い噴泉)」と呼んでいる全く新しい種類の銀河は、なぜ星形成を停止した「枯渇した」銀河がその状態のままであるのか? という謎に対する貴重な手掛かりを与えてくれました。

二つ目の進展は非常に広い天域に渡る深いイメージング(撮像)観測であり、典型的な例としてはやはりKavli IPMUがリードしている、すばる望遠鏡のハイパーシュプリーム・カムのようなサーベイ観測があります。こういった深い撮像サーベイは、138億年の宇宙の歴史に渡り数千万個もの銀河のカタログを作成することを可能にします(遠方の宇宙を撮像することは、昔の宇宙の姿を見ることと等価です)。このデータで初めて、宇宙史の約60~80億年前から現在までのあいだの銀河の成長史、異なる種族への経路史を高精度で描き出すことが可能となり、それを引き起こす物理過程に制限を与えることができます。

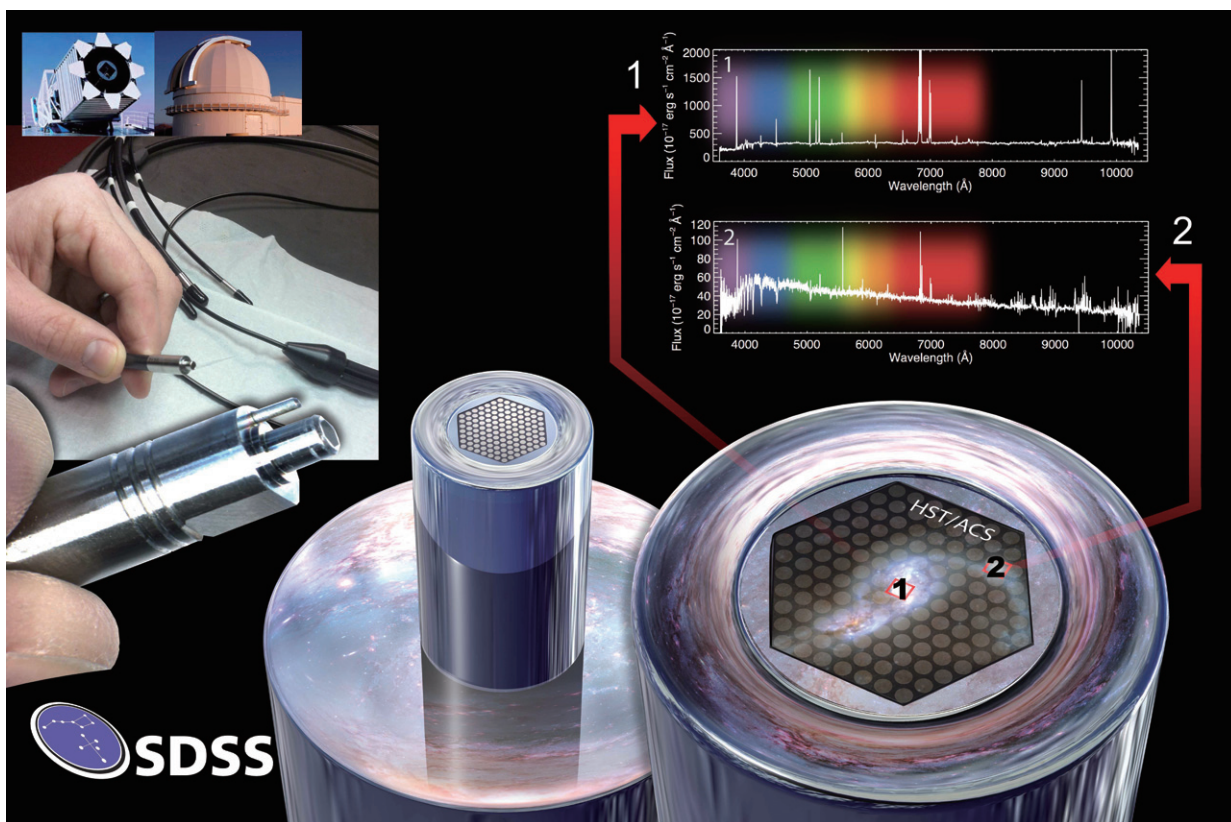


図1 MaNGAのファイバー束技術の図解。六角形配列に並べた光ファイバー束を用いて標的銀河の全面に渡る分光観測が可能となる。MaNGAは天球上の与えられた方向の観測で、このようなファイバー束17本を標的銀河の位置に個別に穴をあけたアルミニウム板の穴に挿入して配置する。(Credit: SDSS)

## MaNGA により銀河の死を理解する

銀河は、その生涯の大部分に渡って、ガスを星に転換する最高の環境を与えています。しかし、それが突然その役目を終えてしまうことが分かってきました。数10億年前から現在までのあいだに、正体不明の「銀河の温暖化」のようなものが、極めて多数の銀河を、生まれだての若い星を含まない「砂漠」に変えてしまいました。現在の宇宙は、多くの銀河で星形成が枯渇した（死を迎えた）時代にあるように見えます。私たちの天の川銀河系自身も砂漠への道を辿っています。（しかし、心配することはありません。それはまだ数10億年も先の話です。）どのような物理過程が、これらの冬眠状態にある銀河内のガスを加熱し、あるいは

吹き飛ばし、見かけ上星形成を止めているのか、という問題は長年謎でした。

この謎を解く上での一つの問題は、現在の銀河のサーベイ観測は規模が小さ過ぎるため、統計的不確定性を克服して、進化する種族の間の明確な相互関係を確立することができないことでした。どの種族も個数密度の時間進化はこれまで20～30%より良い精度で測定されたことはなく、質量の大きい銀河は、（相対的に明るいので）より完全なサンプルが得られるのですが、そのような銀河は稀な銀河であるため、この状況は悪化していました。後で述べるHSCサーベイのような広域サーベイによって、一つの種族（例えば星形成銀河）の個数の減少が他の種族（例えば休眠中の円盤銀河）の個数の増加に等しいかどうかを検証するこ

とを初めて可能とします。銀河の死に至る経路を確立することは、様々な機構を含む包括的な予言をテストする上で役立ちます。

しかし、死に瀕している銀河の病の原因を完全に診断するためには、その内部を注意深く観察し、内部の仕組みを調べなければなりません。これがMaNGAサーベイの目的の一つで、MaNGAは2014年に開始し、2020年にそのサーベイを完結する第4期スローン・デジタル・スカイ・サーベイの中心的なプロジェクトの一つです。MaNGAは図1に示すように光ファイバーを密接に束ね、約10,000個の近傍銀河の各々を空間分解し、その全面を分光観測することを可能とするものです。ある銀河の進化史はその内部構造に情報が刻み込まれています。例えば、これは樹木の一生がその年輪に刻まれていることに似ているでしょう。このため、MaNGAによって銀河の基本的な構成要素の空間分布をマッピングすることを可能にします。すなわち、銀河内の星々をばらばらにせず、結びつけておくダークマターの分布、星を形成する原料となるガスの分布、星々の分布、星の内部の核融合で作られ、星の最後の爆発（超新星）で銀河にまき散らした化学元素の分布です。MaNGAのデータにより、個々の銀河内の空間的な位置における星形成、また星とガスの運動を精密にマッピングできるのです。

## 謎の「レッド・ガイザー」

MaNGAの最初の1年の銀河観測データを手にして、Kavli IPMU博士研究員のエドモンド・チャンと私は、サンプルの中の「赤い色で、星形成をしていない」銀河の分光データをじっくりと調べました。これは、MaNGAが分光ターゲットにした銀河のうちの約30～40%を占める種族の銀河サンプルです。

近年、星形成が止まった銀河でも、（ガスが枯渇しているのではなく）しばしば電離したガスを含んでいることが判明していました。つまり問題は、このガスがやがて冷却し、収縮し、新しい星を形成することを

妨げているものは何かということです。宇宙に大量に存在する新鮮なガスが常に銀河に少しずつ流れ込むことから、星形成の「復活」がもっと頻繁に起こっても良いと考えられます。生まれたての若い星は年老いた星よりも非常に熱く、より青く光るため、これらの銀河ではほんの少しの新しい星形成が起こっても、観測でわかります。ところが、ひとたび終わってしまった星形成が再び始まることはほとんど見つかっていません。

MaNGAのマップは、赤くて星形成をしていない銀河にもイオン化したガスが広範に存在していることを確認しましたが、エドモンドは興味深い空間的なパターンが存在することに注目しました。すぐに私たちは多くの銀河にこのパターンが見られることに気が付きました。それは、銀河の中心核から流れ出している不規則な左右対称のガス流のように見えるパターンです。私たちは、興味をそそられる一方、懐疑的なところもあったのですが、これを「レッドガイザー」と呼ぶことにしました。星形成をしていない特徴的な赤い色の銀河にみられることから「レッド」で、物質が流れ出しているように見えるので「ガイザー（噴泉）」です。

この10年のあいだに銀河の死の謎を解く一つの方法として考えられていたのが、銀河中心に存在する超巨大ブラックホールの巨大なパワーを利用することで。もしこのブラックホールの周りを回転する物質のほんの一部からでも解放されたエネルギーが、何らかの方法ですっと大きなスケールで銀河を取り巻くガスに注入されれば、これはガスを暖める熱源となり、ガスから星を形成することを妨げることができます。問題は、このような機構が存在するかどうかです。エドモンドと私は、レッドガイザーが答を持っているのではないかと思いました。

8～10個のレッドガイザーとして調べるべきサンプルから、私たちは（日本にある私たちの研究機関とMaNGAサーベイという絶妙な名前に対するオマージュとして）日本の漫画の有名な登場人物の名をとっ

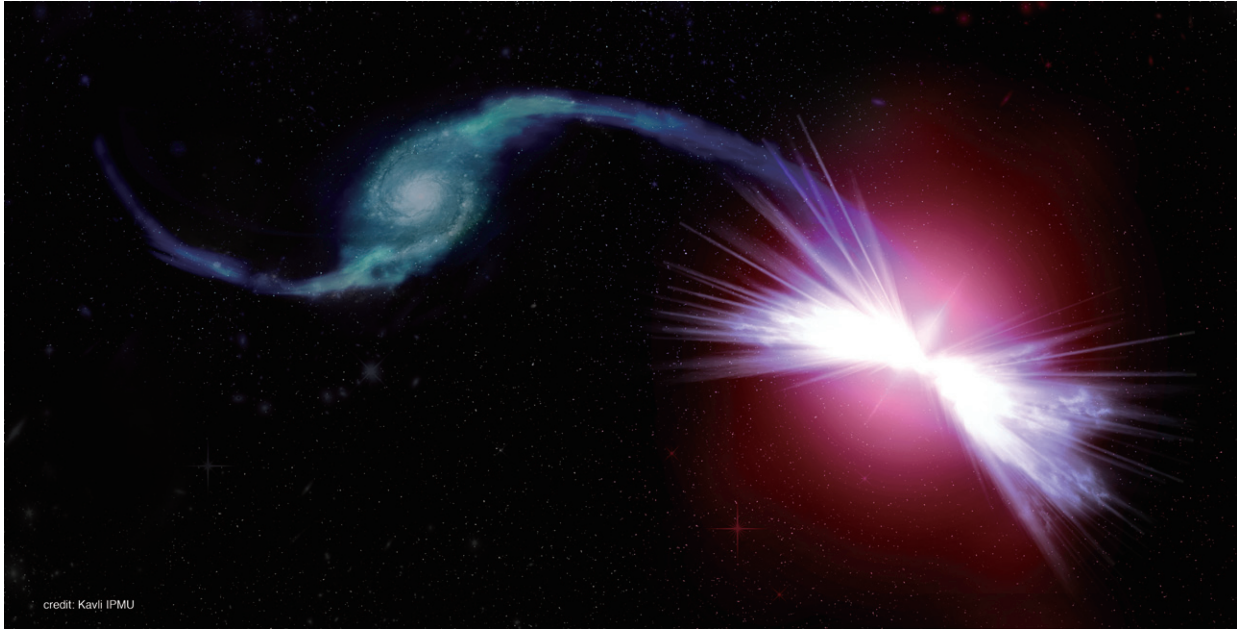


図2 典型的な「レッドガイザー」のアキラ(右)と相互作用しているテツオ(左)のイメージ図。テツオのガスがアキラの重力により、アキラの中心にある超巨大ブラックホールに引き込まれ、アキラのガスを加熱する力を持つ風を生み出している。ブラックホールから吹き出す風的作用によりアキラでの新たな星形成サイクルが妨げられている。(Credit: Kavli IPMU)

アキラと名付けた銀河を選び、これに焦点を合わせて研究しました。以前に取られた多色のイメージングの画像では、アキラは星形成をしていない典型的かつ平凡な楕円銀河に見えました。しかし、アキラは質量がずっと小さな、星形成をしている(私たちがテツオと名付けた)銀河と相互作用しており、テツオから派生し、2つの銀河を結ぶ長い潮汐構造(tidal tail)によってそれが分かります(図2参照)。

しかし、MaNGAのデータは、アキラが一見したよりもはるかに活動的で興味深いことを明らかにしています。イオン化したガスのマップは流れ出しているようなパターンを見せていますが、私たちはこのガスの運動を調べ、完全に星の運動とは切り離されていること、さらに十分な速度で運動しているため、恐らく将来ほとんどのガスが銀河から逃げ出していくことを見つけました。これらの議論は、アキラおよびレッドガイザーに、一般的に中心にある超巨大ブラックホール

が吹き出す風が内在する可能性があることを示すものです。

MaNGAの他の種類のマップは、アキラの中に第2の成分としてずっと冷たいガスの存在を明らかにしています。私たちは、それが相棒の小さな星形成銀河から降り積もったものと信じています。私たちの簡単な評価から、このガスが冷えて星を形成しているが、その頻度は検出されない程度のはずであることが分かりました。さらに、レッドガイザーの風の加熱パワーは冷却率と釣り合うのに十分であるように見えます。従って、私たちはレッドガイザーが活動中の重要な過程であり、ブラックホールからの風が周囲を取り巻くガスを加熱し、赤い銀河が新しい星を形成することを妨げていると考えています。

2016年5月にこのエキサイティングな発見についての私たちの論文が *Nature* に出版されました (Cheung et al. 2016, *Nature*, **533**, 504)。Kavli

IPMUとSDSSによるプレスリリースの後では、*PBS NewsHour*のウェブサイトと朝日新聞を含む全世界で100以上の報道機関がこのニュースを伝えました。

## 銀河はどのように成長するのか？

ここで話題を死から成長へ変えると、標準的宇宙論の枠組みの基本的予言によれば、宇宙の構造は「階層的」に成長します。銀河は信じがたいほど巨大な質量を持つ構造ですが—私たちの天の川銀河の質量は太陽 $10^{11}$ 個分に相当します—銀河を包み込んでダークマターハローと呼ばれる重力的な結合系を作っている謎のダークマターの質量と比較すると30分の1かそれ以下なのです。そのため、宇宙論的な観点からは構造の成長はダークマターに支配されており、従って階層的成長を簡単に言い表すと、どの時間においても最大のダークマターハローが最も新しく形成される構造であり、より小さなハローの合体によって形成されます。問題は、銀河もまたこのパターンに従うのかどうかです。

ナイーブには答はイエスと予想されます。結局、ダークマターハローの中央に位置している銀河は、概ねダークマターに引きずり回されます。もしハローが合体すれば銀河も合体するはずで、そして、もし銀河の全質量を銀河が放射する光量で近似できるとすると、銀河内の恒星質量 $M_*$ の分布は階層的に進化すると予想されます。現在最も重い銀河は、自分自身に属する星を最近集積したはずで、

不思議なことに、最近の研究には「逆の」傾向を主張するものがあり、重い銀河が遠い昔最初集積し、一方、時間の経過と共に低質量の銀河が増えることを見出しています。観測による制限が一致することにより、宇宙の構造成長の階層模型が確かめられたことから、私たちはダークマターハロー中で銀河がどのように成長するか理解していないように見えます。

この結論は、非常に難問、すなわち、現在私たちは銀河の成長率について、特に宇宙史の後半において決

定的な基準を持っていないことを示しています。問題は、これまで観測された銀河のサンプルは、満月の約10倍の面積に相当する、天球のたった0.01%のサーベイに基づくことです。距離については非常に遠方まで達してはいますが、これらの「ペンシルビーム」サーベイは小さ過ぎて十分な統計が得られません。また、「宇宙のクモの巣」と呼ばれる銀河のネットワークを貫いて、密度の非常に高い部分や銀河がほとんど存在しないポイドと交差するため、得られたサンプルの統計的性質はばらつきが大きく、銀河の性質についての本当の分布をあいまいな画像としてしか見せてくれません。

## すばる望遠鏡の強力な役割

今後数年で、新しい広視野カメラによる広域サーベイにより、「宇宙全体で平均的な」銀河の成長史を測定するために、(宇宙の代表的な構造をすべて含む)宇宙論的体積に渡り銀河をサーベイし、高精度の銀河進化史の研究をする新たな時代を迎えます。長期的には欧州宇宙機関のEuclid(ユークリッド)衛星や米国のLSST(大型シノプティック・サーベイ望遠鏡)のような施設が前例のない大統計の観測データを提供することになります。しかし、その前に、前例のない規模の撮像サーベイを実施するハイパーシュプリーム・カム(HSC)のような装置によって大きな進展が可能となります。HSCのサーベイプログラムのうち、宇宙論的体積をカバーする広天域サーベイは、宇宙の年齢が現在の半分以下の時代の銀河を検出する能力のある撮像の深さに届きます。しかし、過去のサーベイのようにたった数平方度をカバーする代わりに、HSC-Wideは天球の1400平方度に渡る、満月5600個分相当の面積をカバーします。

2014年にスタートしたHSCのサーベイは、まだ10~20%を終えたところですが、既に私たちは銀河の成長についての問題に取り組むには、宇宙全体を統計的に代表するのに十分な体積をカバーするだけではな

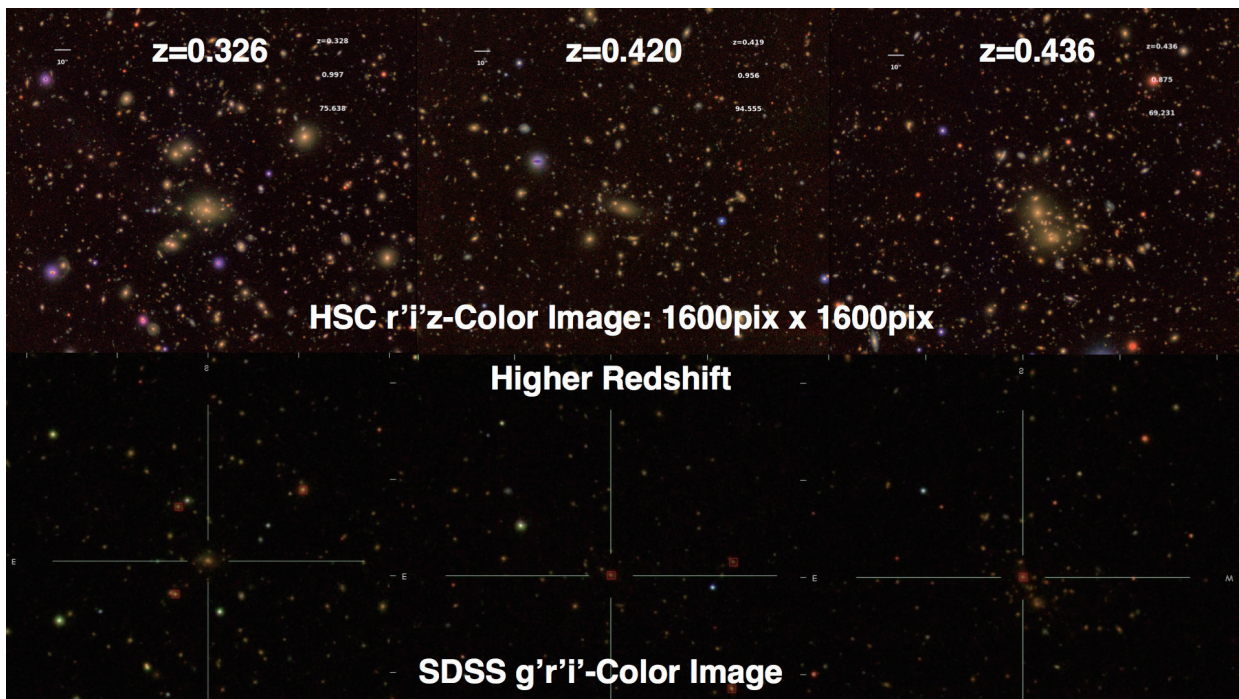


図3 赤方偏移 ( $z$ ) が 0.3 ~ 0.4 (およそ30 ~ 40億年前) の3つの巨大銀河について、HSCの深い画像 (上) とそれより浅いスローン・デジタル・スカイサーベイの画像 (下) の比較。HSCのより深い画像は、巨大銀河の質量のかなりの部分を占めるぼやっとした外縁部など、より多くの形態を捉えている。(Credit: Song Huang)

く、巨大銀河の外部領域に感度を有する深さの撮像も必要であることが分かっています。HSCの画像と過去に行われた、より浅いスローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS) の画像を比較した図3を見ると、これがはっきり分かります。

巨大銀河のぼやっとした外縁部は、本質的に暗いかもしれませんが、銀河の中心領域よりずっと遠くまで広がっていて、合計するとかなりの星と質量を含んでいます。従って、過去のずっと小規模のサーベイで観測された、銀河の成長が不十分であるという点も、成長が起きるかもしれない外縁部を「見落としていた」という事実によるのかもしれませんが。

近い将来、HSCはこのトピックにおけるブレークスルーを起こす態勢にあります。第1に銀河の星質量の過去の測定に立ち戻ることが可能です。多くの場合、外縁部の星を測定するHSCの能力のおかげで銀河の

星質量の推定値は大きい方に改訂されるでしょう。第2に、サーベイの成熟に伴い、間もなく私たちは過去の統計の不足による限界に対処し高精度で成長率を示すために必要なサンプルを手に入れます。銀河が階層的に成長するかどうかという問題については、まだ最終的な評価は定まっていません。しかし、HSCは確かな足取りで進んでいますので、結果を乞うご期待!