

竹内 努 准教授

*竹内 努 准教授 Tsutomu T. Takeuchi#, Associate professor #研究上英文名ではセカンドネームを用いている。

宇宙の歴史138億年のなかで星の大集団である銀河がいかに形成・進化してきたか、つまり宇宙の星形成史を正確に把握することは、宇宙に存在する重元素の量を理解するうえで極めて根本的な問題である。重元素はビッグバン元素合成では形成されず、星の中心部の核反応でしか合成されないからである。星で作られた重元素は星の死にともなって宇宙空間に放出され、再び凝縮して次の世代の星や惑星に取り込まれ、我々のような生命の源となっている。しかし、その根本的重要性にもかかわらず、宇宙の星形成の歴史についての議論は未だに収束していない。銀河の星形成率は、原理的には若い大質量星からの紫外線によって測定できる。ところが、星が合成した重元素は星間空間では固体微粒子(ダスト)となって紫外線を吸収し、赤外線で再放射する。つまり、紫外・赤外線放射は星形成活動のいわば光と影であり、どちらか一方のみでは正確な星形成史を求めることはできない。この複雑さが議論を混乱させている根本的原因である。本研究室での研究の大目標は、γ線からX線、紫外線、可視光、赤外線、サブミリ波およびミリ波、そして電波におよぶ多波長観測データ解析及び理論モデルによって、宇宙初期から現在にいたる銀河の誕生と進化、さらにその前夜までを明らかにすることである。一口に銀河進化といっても、初期宇宙から現在までの宇宙に関係するあらゆる物理現象が関係しており、純粋に理論的なものから観測データ解析まで様々な方法論が考えられる。Ω研では観測データの解析による観測的アプローチ、



図1: 紫外線全天探査衛星GALEXによって観測されたアンドロメダ銀河。銀河中心と渦状腕の星形成領域がはっきり見えている。Ω研は紫外線データの解析のノウハウを持つ国内でもユニークな研究室である。

物理法則に基づくモデル構築を目指す理論的アプローチ、そして最新のデータ科学の方法による発見的アプローチという3つの柱に立脚した研究を進めている。どのようなアプローチをとる場合でも「まずデータありき」を座右の銘とし、最新の観測を念頭に置いた研究を進める方針である。

1. 観測的アプローチ

光の速さが有限であることから、遠くの宇宙を見れば昔の姿が見える。銀河物理学や宇宙論ではこの効果を積極的に用いて宇宙史をひもといている。しかし、よく誤解されることが多いが、遠方すなわち昔の銀河の性質さえ分かれば銀河進化が解明できるわけではない。銀河がいかにして現在の姿になったのかを定量的に評価するためには、宇宙のあらゆる時代を均一な基準で検証することが唯一の方法である。Ω研では、近傍つまり現在の宇宙の銀河を観測的に詳細に検証し、その性質をもたらした物理を解明する研究を行っている。最近特に力を入れている2つのテーマを以下に紹介する。

銀河スケール則の起源

銀河の様々な観測量の間には、多くの自明でない関係が知られている。これらを総称して銀河のスケール則と呼ぶ。その多くは数十年にわたって研究されているが、スケール則そのものは数多くのモデルで再現できるため、真に支配的な物理を特定することは難しい。しかし物理的理解が進んでいる小スケール(数パーセク)の現象と結びつけるには、スケール則の現れる空間スケール(数千パーセク)は大きすぎる。そこで、Ω研では近傍銀河の電波から遠赤外線、可視光線、紫外線で観測された画像を空間的に分解し、スケール則の出現する空間スケールを調べることで、その実態に迫る研究を行っている。

宇宙の星形成史と星形成指標の再評価

銀河は近傍といっても数メガパーセクの距離にあり、星形成率を観測的に求めるのは簡単ではない。そこで、銀河の観測量を星形成領域に関する知識を使って単位時間当たり形成される星の質量に焼きなおす。電離水素

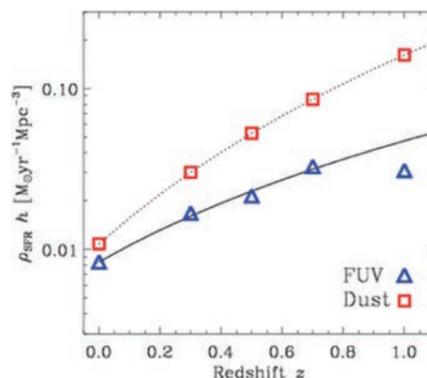


図2: 紫外線全天探査衛星GALEXおよび赤外線天文衛星IRAS, Spitzerのデータから求めた宇宙年齢後半の星形成史 (Takeuchi et al. 2005)。

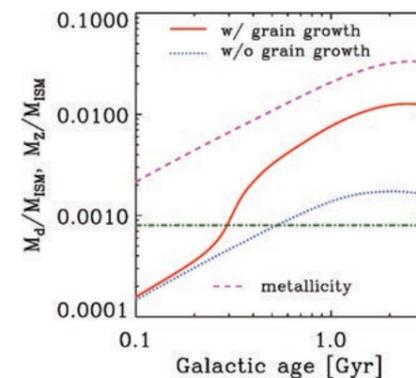


図3: ダスト進化理論が予測するダスト量進化。強い非線型性(実線)が現れることが特徴 (Nozawa et al. 2015)。

領域から放射される水素の再結合線、大質量星から放射される紫外線、紫外線を吸収した星間塵(ダスト)から放射される遠赤外線といった観測量が星形成指標として用いられているが、それぞれ一長一短であり、求めた星形成率が一致しないことも多い。Ω研では紫外線と赤外線を組み合わせた指標を精力的に検証してきた。これに加え、最近では系統的不定性の小さい長波長電波を星形成指標として採用し、オーストラリアのマーチソン広視野アレイ(MWA)による長波長電波データを用いてその性質を検証している。

2. 理論的アプローチ

近年、超遠方宇宙の観測が可能になり、続々と興味深いデータが公開されている。しかし、やはり遠方銀河の観測の持つ情報は限定的で、銀河形成に関する研究は10年前と比べて観測のウエイトが大きくなってはきたものの、依然として理論主導で進められている。Ω研は、特に銀河のダスト進化について世界的に評価されている理論モデルを2013年に発表して以降、その拡張と応用に取り組んでいる。また銀河と活動銀河中心核(ブラックホールに物質が落下してエネルギーを開放する激しい現象)との関連も新たなテーマとして進めている。

銀河のガス・ダスト進化モデル構築

銀河の進化を司る最も基本的な過程は星形成である。星は銀河の星間物質が凝集して誕生する。生まれた星は核融合によって重元素を合成し、その最期に重元素を星間物質に還元する。重元素は星間空間では固体微粒子であるダストとして存在するが、ダストには分子の形成を通じて次の世代の星形成を急激に加速する働きがある。このため、星の進化と重元素進化・ダスト進化は複雑に絡み合った非線型過程になっている。我々はこの複雑な問題を理論的に定式化し、簡便な理論モデルを構築することに成功した。この成果はすぐに世界的に知られることになり、現在では宇宙論的シミュレーションなどにも取り入れられようとしている。現在Ω研ではこの理論を拡張し、またダストと同時にガスの進化を解く総合的モデルの構築を目指している。

銀河-ブラックホール共進化と宇宙再電離源の検証

多くの銀河の中心には、その質量の1/10,000程度の巨大なブラックホールが存在する。それ自体非常に巨大であるとはいえ、銀河と比べてブラックホールの質量は何桁

も小さい。ところが、観測からは銀河の成長とブラックホールの質量進化の間には密接な関係があることが示唆されており、大きな謎となっている。この関係を銀河-ブラックホール共進化と呼ぶ。我々は遠方宇宙まで活動銀河中心核を観測できると期待されている超巨大電波干渉計Square Kilometre Array (SKA)の稼働を見据え、この共進化問題をモデル化することを試みている。また、共進化問題を通じて宇宙初期の中性水素の電離源の解明、いわゆる宇宙再電離問題にも取り組んでいる。

3. データ科学の方法による新事実の発見

銀河をはじめ、天文学データは巨大化の一方をたどっている。すばる望遠鏡など可視光望遠鏡、全天探査衛星、そしてチリのALMAや来るべきSKAなどの電波干渉計データを現実的な速度で制約・処理するためには、従来とは質的に違ったデータの処理アルゴリズムなどが必要になる。巨大プロジェクトの時代に突入した宇宙物理学はデータ科学の格好の応用分野である。今世紀に入って大発展したデータ科学分野の方法を宇宙物理学に応用することにより、単なる方法の適用に留まらない本質的な発見をすることができる。竹内は2018年度より統計数理研究所の客員教員も務めており、こうしたデータ科学の方法を常に研究に反映している。Ω研では、データ科学の方法によって初めて可能となる新たな発見を目指している。

大学院生の研究活動

Ω研は現在ポスドク研究員(JSPS)1名、博士後期課程学生3名、博士前期課程学生4名および学部学生2名(うち国際プログラム生2名)で構成されている。研究の基本方針としては、まず基礎的な学習を行った上、希望に応じてなるべく早い時期に銀河進化に関連するテーマを選び、基礎学習と並行して研究を進めてもらう。また大学院生は上記のテーマにあまり限定することなく、ぜひ積極的に新しい研究を開拓してほしい。このため内外の共同研究者を招聘して議論の機会を持つ。また本研究室はGALEX, SKAなどを通じて特にフランス、イタリア、オーストラリア、ポーランドをはじめとする世界各国の研究者と密接な共同研究プロジェクトを進めており、海外研究機関(主としてフランス・マルセイユ天体物理学研究所および西オーストラリア大学)との共同研究の機会も提供する。データ科学的側面に興味を持つ学生は統計数理研究所との共同研究の機会もある。



Ω研メンバー

https://sites.google.com/site/omegalabnagoya

*連絡先 tsutomu.takeuchi.ttt@gmail.com

教授:0/准教授:1/講師:0/助教:0/PD:1/DC:3/MC:4