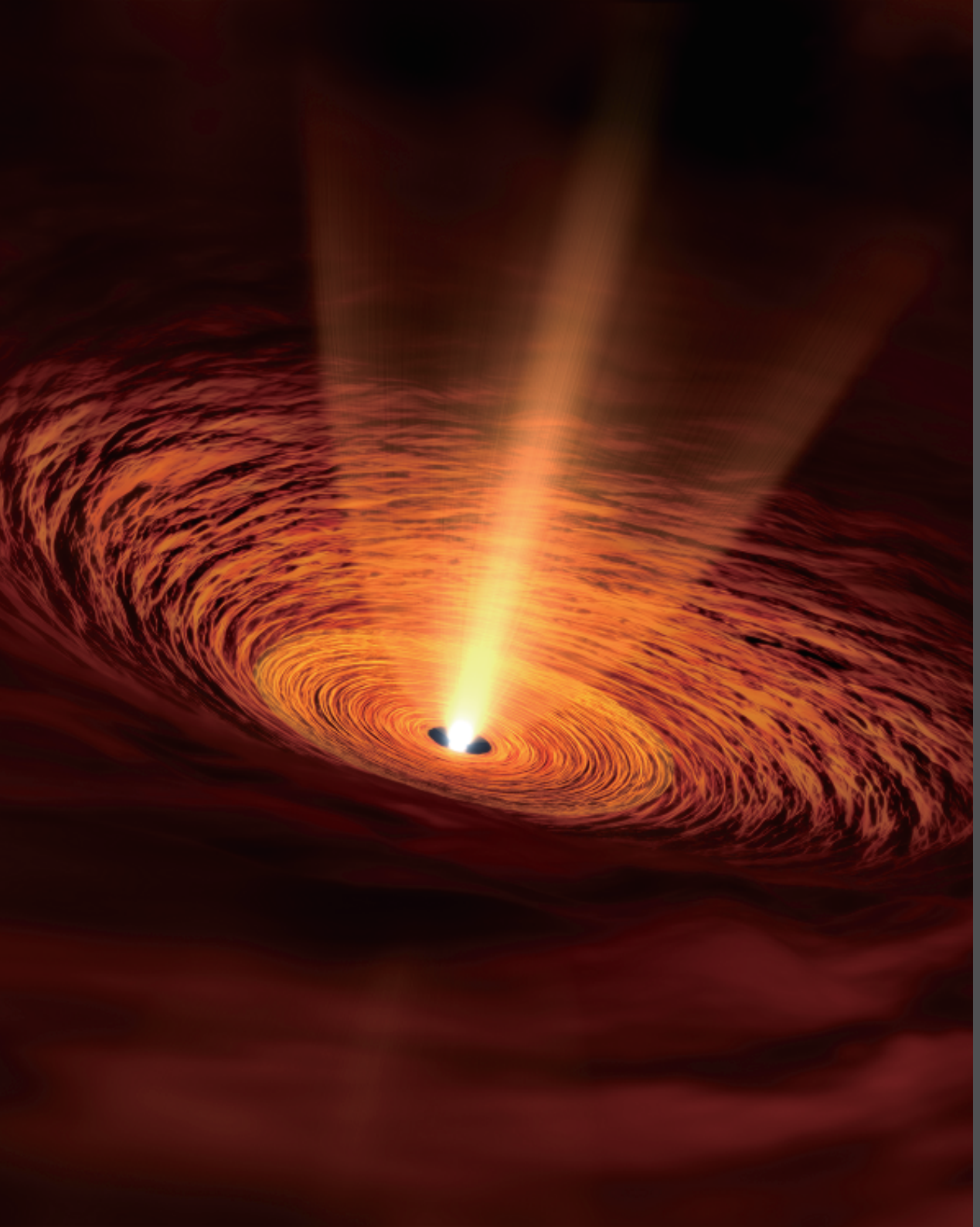


宇宙研究最前線



表紙：原始星を取り巻く円盤の想像図 (C) 国立天文台

宇宙の大規模構造のシミュレーション（C)石山 智明

宇宙の謎に挑む

星の誕生
Star formation

夜空を見上げるとたくさんの星が輝いています。こうした星々はずっと昔から変わらずに輝いているように見えますが、実はそうではありません。宇宙そのものでさえ、その昔ビッグバンと呼ばれる大爆発から始まりました。星々はそうした宇宙の中で日々誕生しているのです。

自ら明るく輝く星の実体は、水素のガスのかたまりです。宇宙空間には星を作る原料となるガスが豊富にあります。このようなガスはとても冷たく、可視光で見ることはできません。しかし、電波などの波長の長い光の放射や、背景の星を遮る影として見てとることができます。

星はこうしたガスの「雲」が自分の重力でつぶれて、密度や温度が上がった結果生まれると考えられています。ガス雲がつぶれると、始めに中心に星の赤ちゃんとも言うべき小さい星、「原始星」が誕生します。もとの雲が回転していると、星の周りには円盤ができます。ガスは円盤を通して原始星に降り積もり、星はだんだんと一人前の姿に近づいていきます。

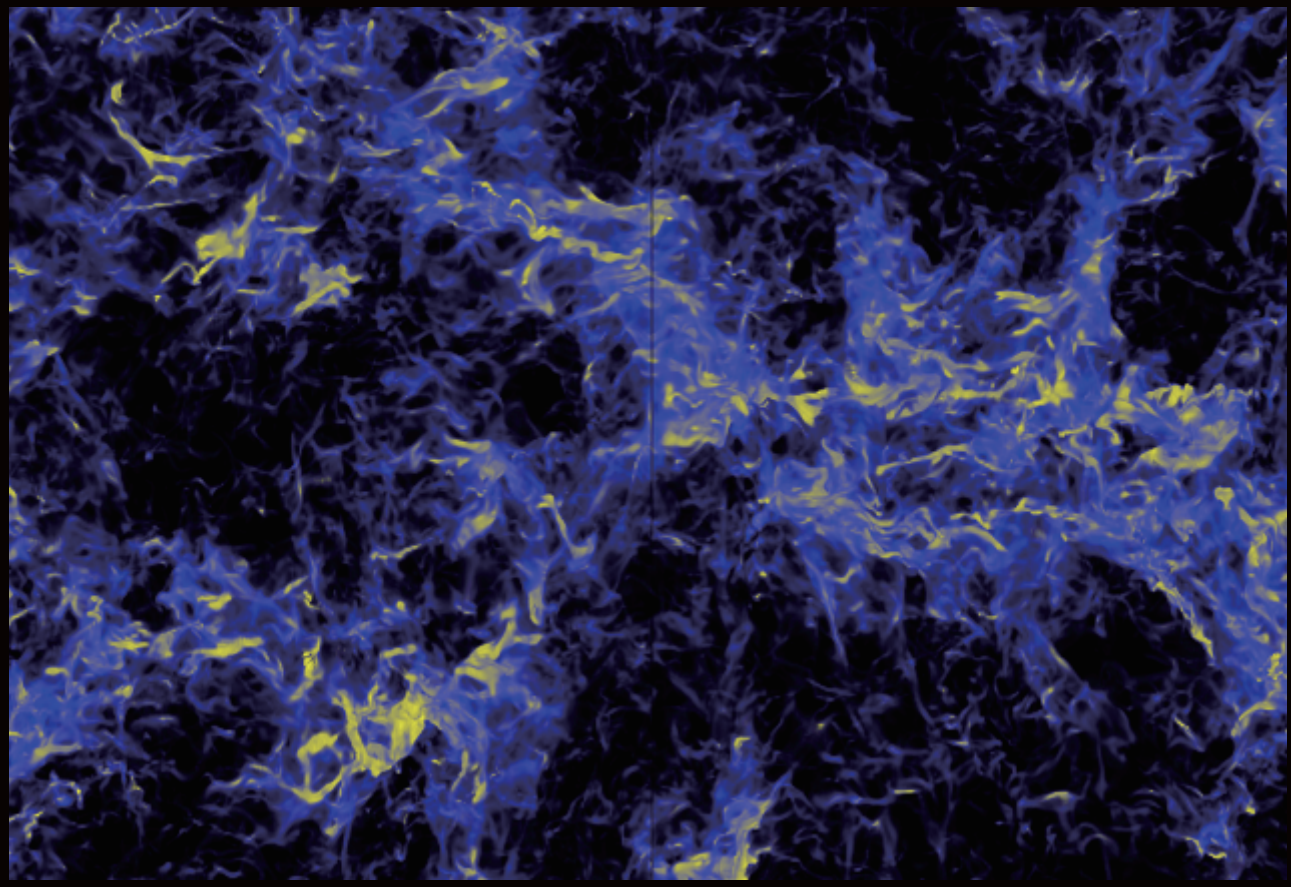
ガス雲の中でこのような原始星が誕生するまでには100万年ぐらい、さらに太陽のような大人の星へと成長するまでには1,000万年ぐらいの時間がかかります。つまり、私たちは星の誕生の様子を観測し続けることはできません。そのため私たちは、さまざまな進化段階にあるガス雲や原始星の観測的研究と、星への進化の様子をコンピューター内に再現するという天文シミュレーション研究の両方を駆使して，星形成過程の解明を目指しています。



オリオン星雲 (C) Hubble Space Telescope

銀河系は、摂氏マイナス263度の極低温ガスから摂氏百万度以上の極高温ガスまで、さまざまな状態のガスで満たされています。その中で星が生まれるのは、極低温のガス雲で分子雲と呼ばれています。ガスはその状態に永久にとどまるのではなく、銀河系の進化の中で、互いに移り変わっていきます。分子雲が作られ、その中で星が誕生し、星からの放射や超新星爆発で高温ガスが生成され、分子が霧消していきます。そしてまた新たな分子雲が作られるというふうに物質が輪廻しています。

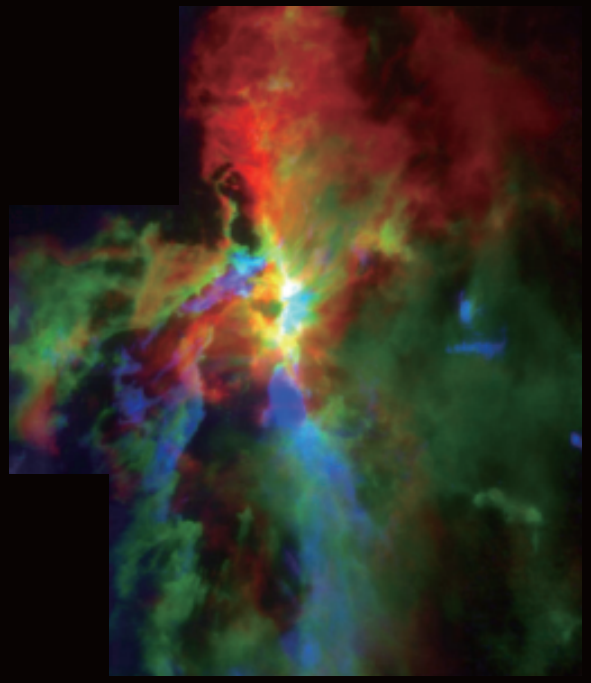
星の素になる分子雲がどのように作られるのか、また、その中でどのように星が誕生するのかを明らかにするためには、重力だけでなく、ガスの放射冷却・加熱や化学反応、そして磁場など様々な過程を適切に取り入れた高度な最先端の天文シミュレーションが必須です。そのようなシミュレーションを駆使して、私たちは星形成を解き明かすべく研究を進めています。



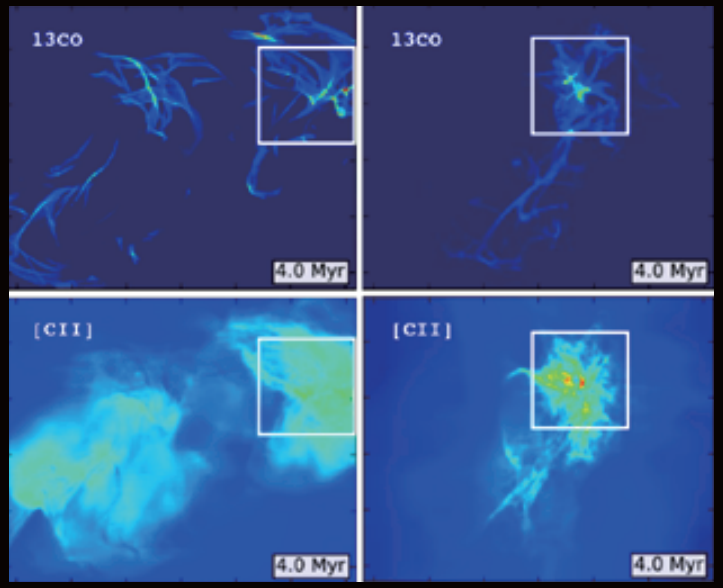
分子雲から星の素になるコアができるまでの
天文シミュレーション (C) 岩﨑 一成

分子雲は非常に複雑な内部構造や速度構造を持っています。生まれた星から放射される電磁波は周りのガスに大きな影響を与えます。そのため、分子雲内部は複雑な密度構造・速度構造を持ちます。その一例として、図にオリオン大星雲付近の分子ガスの分布を示します。オリオン大星雲の中心部は最も明るく見える真ん中に位置します。中心からしたに伸びる暗く見える部分は、オリオン大星雲の星々から放射される紫外線で飛ばされてできた穴です。穴の中には、強い紫外線の影響下で生き残った尾を引くコアが穴の下の方に見られます。図の真ん中右側に見える青い構造は、星風でできたバブル構造と分子雲が相互作用によりできた波型の構造です。速度差を持つ流体の境界で起こるケルビン・ヘルムホルツ不安定による作られたと考えられています。このように星の誕生過程は非常にダイナミックで、周りの分子雲に大きな影響を及ぼしながら進みます。

また、星間空間ではランダムに動く分子雲同士がぶつかって星の誕生を誘発するというダイナミックな現象、分子雲衝突もしばしば観測されます。分子雲衝突が起こると、短時間で非常にコンパクトな高密度ガス塊ができるので、そのようなガスが集中した箇所が太陽の10倍以上の質量を持つ星の誕生と関係している可能性が最近注目されています。最新の観測によると、オリオン大星雲は6万年前に起きた超新星爆発によって圧縮された層から生まれたと議論されていますが、そもそもオリオン分子雲自体、2つの分子雲の衝突でできたのかもしれません。実際に観測される分子ガスの大局的な分布は、分子雲衝突から予想される分布と似ています。



オリオン大星雲領域の分子ガスの電波地図。
緑はオリオン大星雲付近の分子ガス、赤、青はそれぞれ視線方向にオリオン大星雲のガスに近づくガスと遠ざかるガスを表す。
(C) Shuo, K. et al. ApJS, 236, 2, 25 (2018)



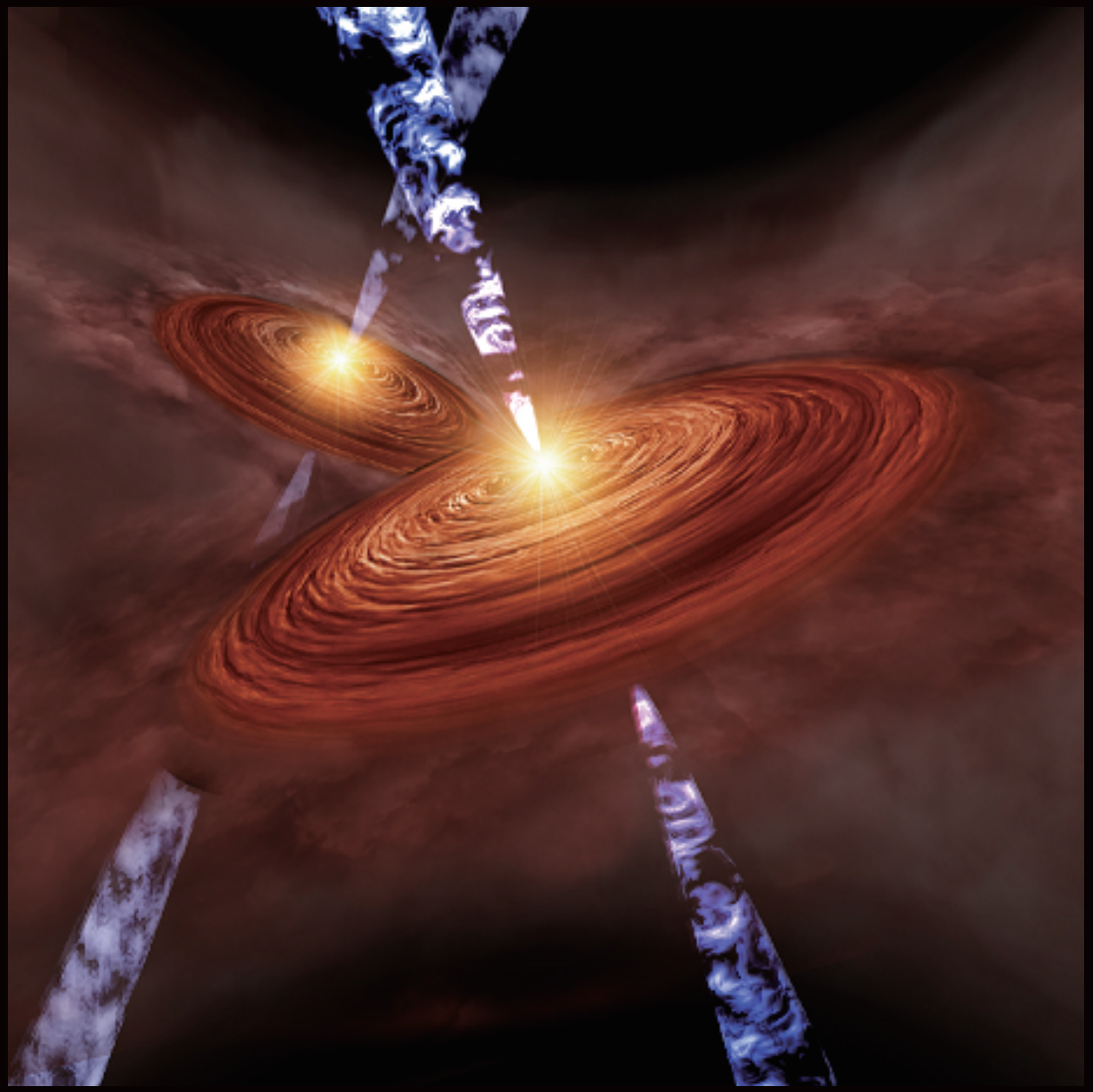
分子雲衝突のコンピュータシミュレーション
左は衝突が起こらない場合のガス分布、右は衝突した場合のガス分布を表す。分子雲衝突が起こるとCO輝線で観測される細長いフィラメント構造が形成され、衝突点を中心にCII輝線が広がって観測される。
(C) Wanggi Lim, 中村 文隆 ほか

赤ちゃんが生まれるときに産声をあげるように、星もその誕生時に産声をあげます。原始星を取り巻くガス円盤の上下の垂直向きに、激しくガスを放出します。これが原始星の産声とも言われる原始星ジェットという現象です。速いものでは1秒間に100kmもの距離を進みます。この原始星ジェットを研究することで、星誕生の様子を調べることができます。

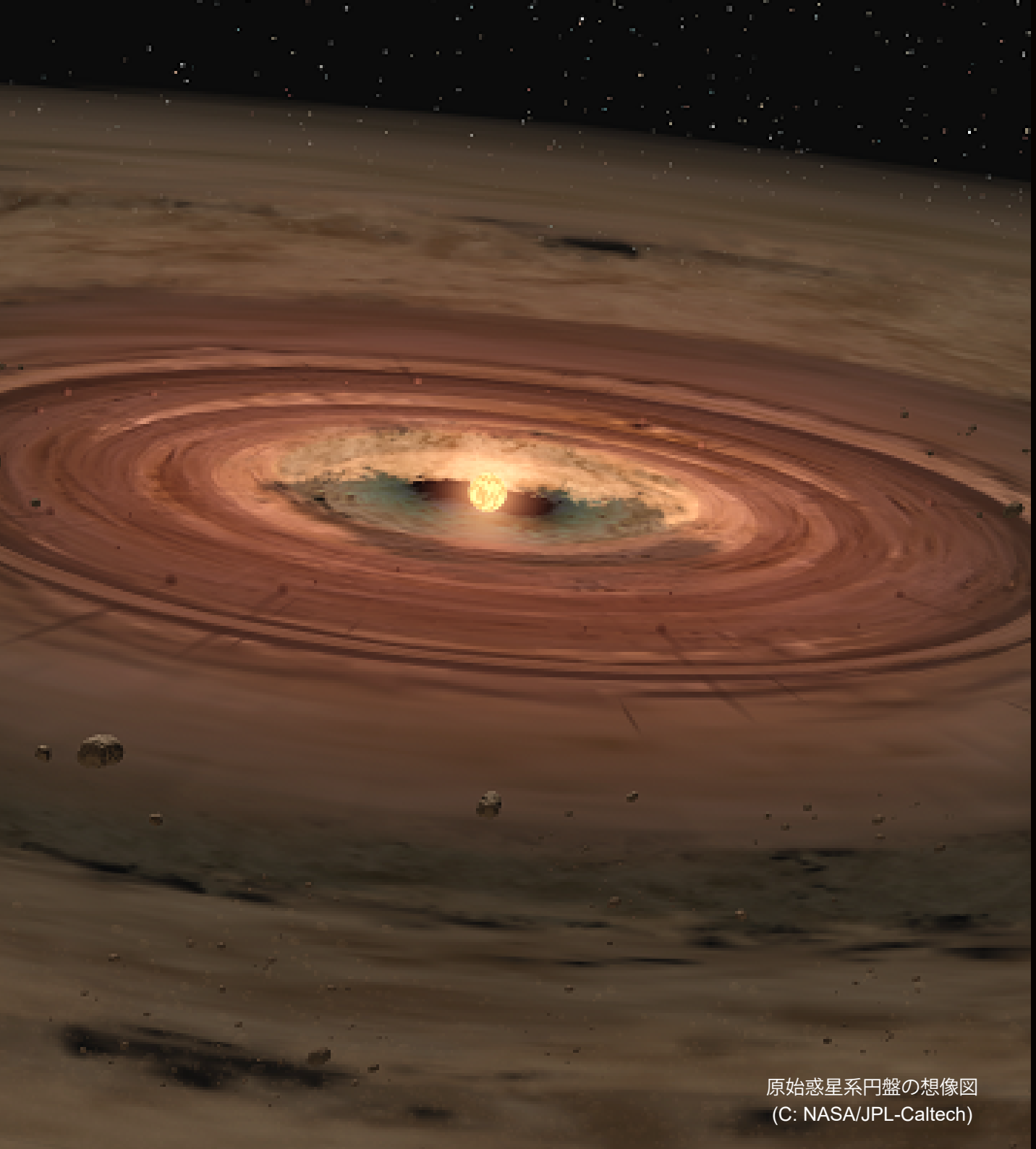
太陽は周囲に他の星がいない単独星ですが、多くの星は双子つまり連星で生まれます。しかし連星がどのように誕生するのかは、まだ観測的にも理論的にもよくわかっておらず、星形成研究の大きな謎となっています。

東京大学と国立天文台の研究チームは、連星誕生の現場を捉えるために、南米チリのアルマ望遠鏡を使った高解像度観測をおこない、双子原始星VLA1623Aから噴出する原始星ジェットの詳細な構造を調べました。その結果、原始星ジェットは双子原始星それぞれから噴出され、しかも両者は60度も傾いていることがわかりました。

このような不揃いの双子原始星ジェットが、おおよそ太陽と天王星までの距離しか離れていない近接した双子原始星で見つかったのは初めてのことです。原始星ジェットは原始星周囲の円盤に垂直に噴出されますので、円盤も大きく傾いていることを示しています。この不揃いな原始星ジェットの発見は、種々提案されている連星形成シナリオの検証につながります。今後このような観測を積み重ねるとともに、理論研究結果とつき合わせることで、星形成の主要なパスである連星形成の理解が進むと期待しています。



双子原始星からの不揃いな原始星ジェットと円盤の想像図
(C) 国立天文台



原始惑星系円盤の想像図
(C: NASA/JPL-Caltech)

惑星の誕生
Planet formation

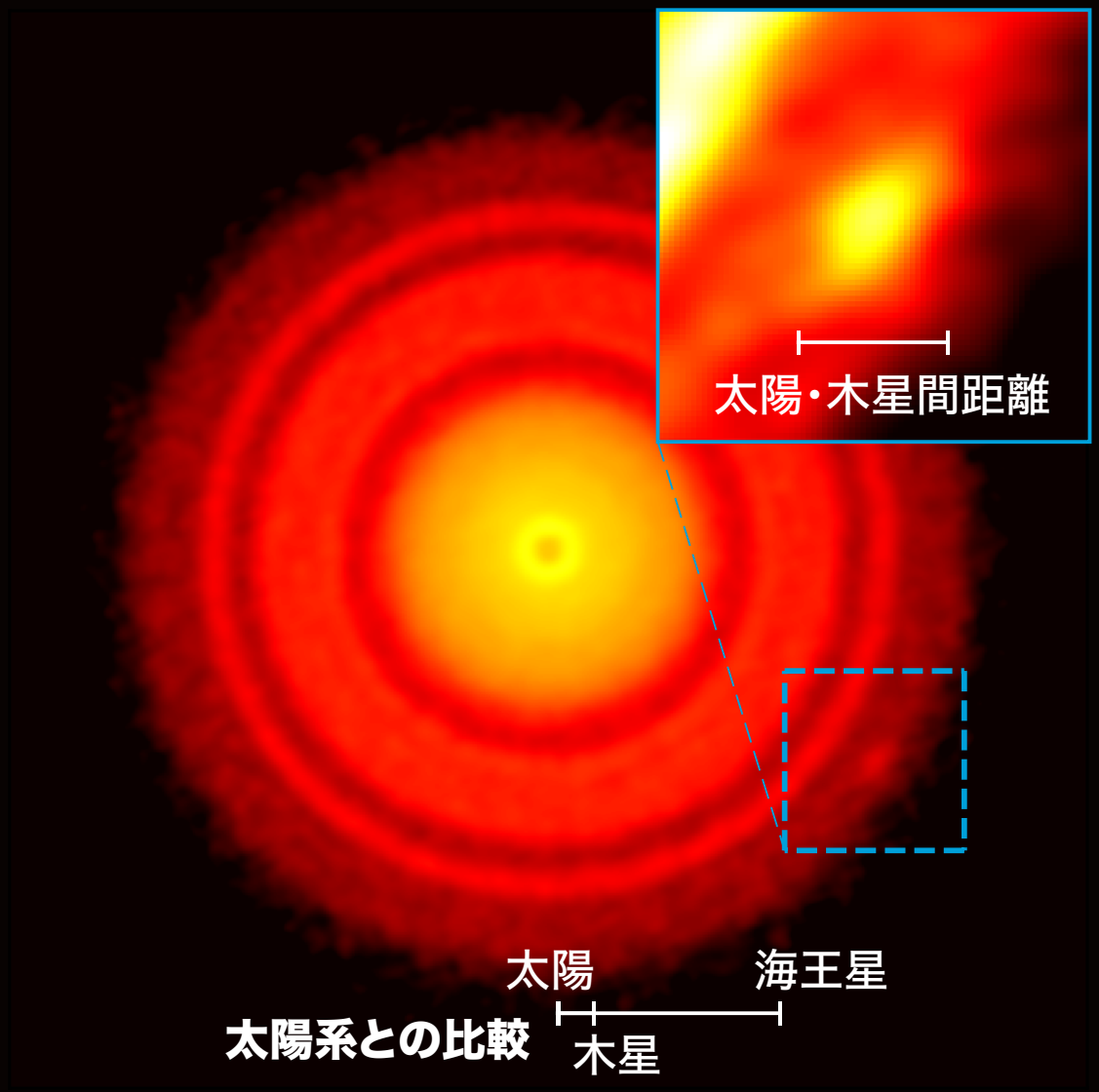
私たちが住む地球は太陽の周りを回っている惑星の１つです。太陽をとりまく太陽系には地球を含む８つの惑星に加え、多くの小天体が存在しています。火星よりも内側の惑星は地球のように岩石でできていて、木星や土星の主成分はガスで、その外側の天王星や海王星はほとんど氷でできています。このような太陽系はどのようにしてできたのでしょうか？

地球をはじめとする太陽系の惑星は、約46億年前に原始太陽の周りの円盤から誕生したと考えられています。宇宙空間には、1ミクロン程度の大きさの塵（ダスト）が存在していて、原始太陽の周りの円盤にもダストが含まれています。このダストがお互いにくっつき成長することで、「微惑星」と呼ばれる大きさが1km程度の惑星の材料ができます。さらにこの微惑星同士が合体を繰り返すことで、火星ぐらいの大きさの「原始惑星」となり、これが地球型の惑星や、木星のような巨大ガス惑星、天王星のような氷惑星を作る種となるのです。

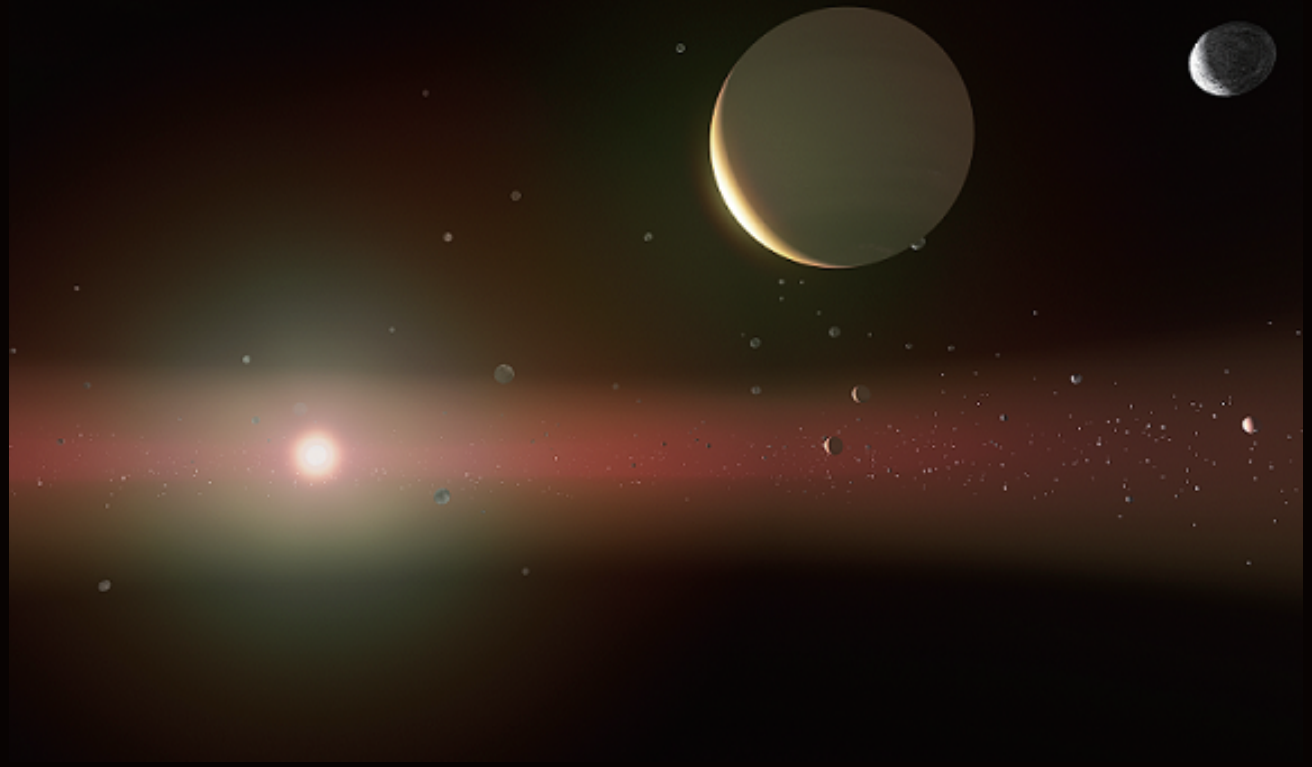
このような太陽系の形態は宇宙の中で標準的なのでしょうか？1995年に太陽系以外の惑星系「系外惑星」が初めて発見されました。その後、次々と系外惑星が発見され、太陽系に似ているもの、似ていないもの、様々な惑星系があることが分かってきています。つまり、太陽系だけでなく、様々な惑星系の生い立ちを説明するシナリオが求められているのです。私たち研究者は、太陽系に限らず様々な惑星系の成り立ちを解明するため、惑星の形成過程を理論と観測の両面から研究しています。

惑星は、若い恒星を取り巻く塵とガスの円盤（原始惑星系円盤）の中で生まれると考えられています。しかし、惑星が具体的にどのように周囲の物質を取り込んで成長していくかなど、その誕生と成長過程の詳細には未解明な点が多く残されています。天文学者たちは、原始惑星系円盤を詳しく観測することで、惑星がどのように生まれてくるのかを調べようとしています。原始惑星系円盤に含まれる塵やガスはマイナス250℃程度と極めて低温であるため可視光を発しません。一方で電波は低温の物質からも発せられるため、電波をとらえることのできるアルマ望遠鏡で盛んに観測されてきました。その結果、円盤は複数の隙間を持つ構造をしていることがわかっています。

国立天文台などの研究チームは、惑星誕生の詳細なプロセスを調べるため、南米チリのアルマ望遠鏡を使って、若い星うみへび座TW星を取り巻く塵とガスの円盤（原始惑星系円盤）を観測し、円盤内で惑星が作られつつある強い証拠を発見しました。円盤内に、これまで発見されていなかった小さな電波源が存在することを明らかにしたのです。研究グループは、この電波源が　(1)すでに形成されつつある海王星サイズの惑星を取り巻く「周惑星円盤」、(2)円盤内で生まれたガスの渦に溜まった塵で今後惑星になりうる構造、のいずれかだと考えています。どちらの場合も円盤内で惑星が成長していく重要な現場を見ていることになり、惑星形成の過程を理解する重要な観測成果です。



若い星うみへび座TW星を取り巻く原始惑星系円盤の観測結果
(C) ALMA (ESO/NAOJ/NRAO, 塚越 崇ほか



惑星形成シミュレーションの結果
(C) 国立天文台４次元デジタル宇宙プロジェクト

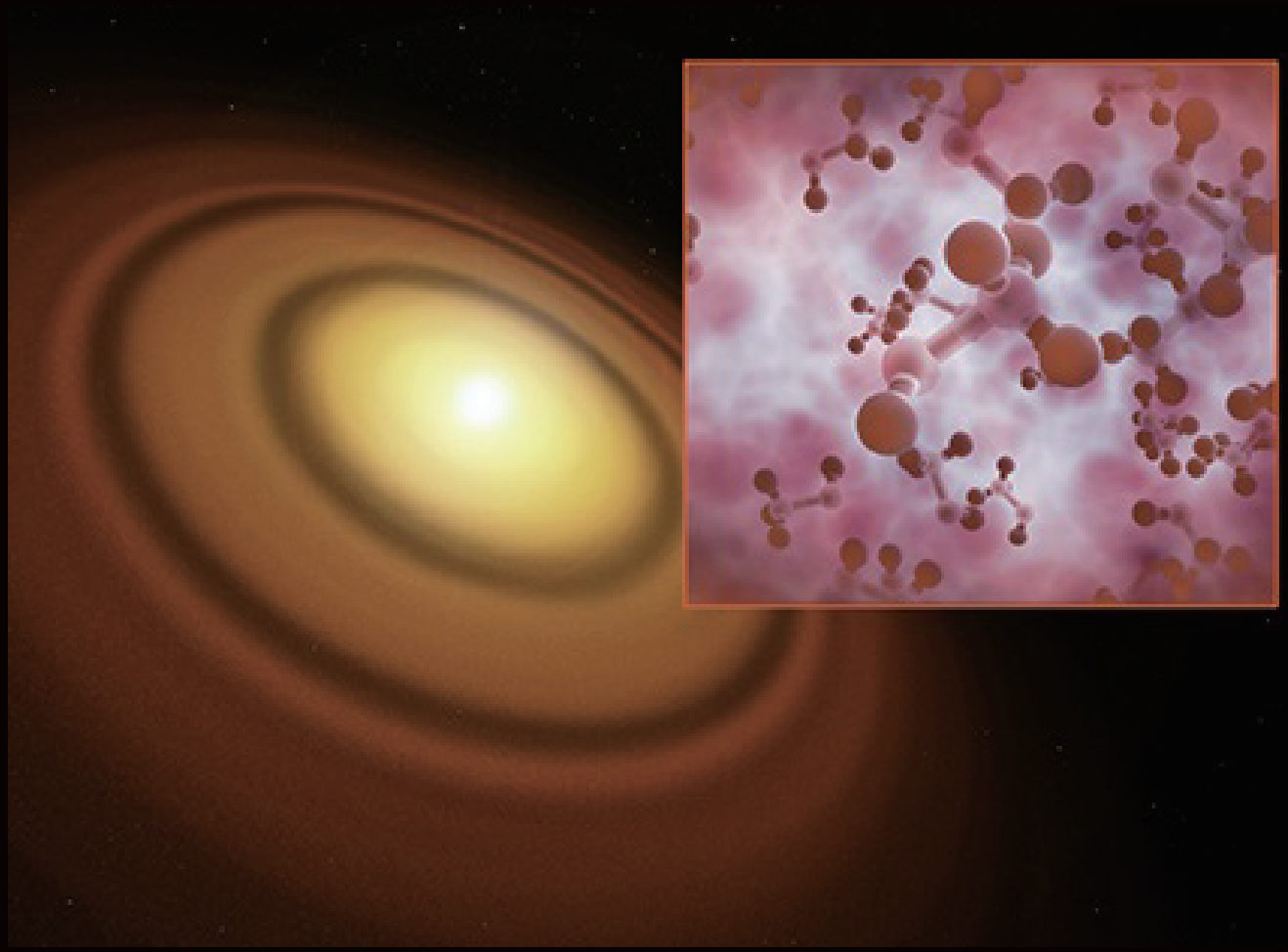
銀河系には私たちの太陽系をはじめとして、多数の惑星系が存在することが近年の観測によって明らかになっています。太陽系以外の惑星系は系外惑星系と呼ばれ、その構造は実に多様で、非常に恒星に近いところに木星のような惑星があったり、彗星のように軌道の歪んだ惑星があったりと、太陽系には存在しないような様々な惑星が存在することがわかってきました。このような惑星の多様性はどこから来るのでしょうか。

惑星系は原始惑星系円盤とよばれる恒星周りのガスと塵(ダスト)からなる円盤から形成されると考えられています。このような円盤が若い恒星の周りに存在することは観測によって確かめられています。現在の標準的な形成シナリオは、ダストからの微惑星の形成、微惑星からの原始惑星の形成、原始惑星からの惑星の形成、と進みます。この過程は構造形成の過程で、様々な物理が複雑に絡み合うおもしろい現象です。この惑星系形成の素過程を理論的解析や多体・流体シミュレーションなどを駆使して明らかにし、素過程を積み上げることによって惑星系形成のを全体像を描き出すのが目標です。そして、太陽系の起源に限らず、多様な系外惑星系の起源も説明することができる一般的な惑星系形成理論の構築を目指します。また、惑星に限らず、惑星と同時に形成される小天体(小惑星や彗星)、また、惑星の衛星や環などの形成も明らかにすることを目指します。

生命を構成するのに必要な元素の多くは、太陽のような恒星の中で核融合反応により生成され、恒星の寿命がつきる際に、宇宙空間へ放出されます。放出された元素はガス雲に取り込まれ、その内部で我々の太陽系や系外惑星系のような惑星系が形成されたと考えられています。ガス雲で見つかっている分子の大部分は数個の原子で構成されており、複雑なものでも、アミノ酸の中で最も単純なグリシンよりもさらに単純な分子です。一方で太陽系内の隕石中には、複雑なアミノ酸が多数見つかっています。また、彗星でもグリシンの発見が報告されています。

ガス雲で見つかっている小さな分子から、太陽系内の天体で見つかっている複雑な有機分子はどのようにして生成されるのでしょうか。ガス雲は一般的に低温のため、地球上のような温かい環境では進む気相化学反応でも、ガス雲中では活性化エネルギーの壁を超えることができず、反応が進まないことがよくあります。このようなガス雲において複雑な有機分子を生成するには、塵表面反応が必要であると考えられています。低温下の気相中ではほとんど進まない化学反応が、塵の表面を触媒として、効率よく進むのです。

我々はガス雲中の原始惑星系円盤とよばれる惑星形成領域でおこる化学反応のモデル計算を行い、どのような有機分子が円盤内のどのような領域で生成され得るかを調べています。一方で、大型電波干渉計アルマにより有機分子を検出し、円盤内の塵表面反応を検証したり、彗星などの太陽系内物質の組成との関連を議論したりしています。さらには、原始惑星系円盤から地球のような岩石惑星へ、どのように有機分子が持ち込まれ得たかを明らかにしたいと考えています。



うみへび座TW星を取り巻く円盤とその中に含まれるメタノール分子の想像図
(C) ESO/M. Kornmesser

星の進化と爆発
Stellar evolution and supernova

星空を見上げると赤い星や青い星が見つかります。例えばさそり座のアンタレスは赤く、おおいぬ座のシリウスは青く光っています。オリオン座のベテルギウスは近年明るさが急激に変動しており、話題を集めています。

星の色と明るさは何によって決まるのでしょうか。星のもともとの質量というのが一つの答えです。ただし、実は星はその年齢によってもその明るさと色を変化させていきます。これを「星の進化」と呼びます。また星が輝いている間を寿命と定義すると、その寿命は星の質量によって大きく違います。特に大爆発によって星が最期を迎える場合、その爆発は「超新星」と呼ばれます。もう少し専門的に言うと、この項で取り扱うのは重力崩壊型と呼ばれる種類の超新星爆発です。

超新星爆発によって星は中心部と外層部の二つの部分に分かれます。中心部は極めて密度の高い中性子星となります。この中性子星が放出するエネルギーで外層が爆発すると考えられています。爆発が星の表面に届いた後、超新星は強く輝きます。一方、外層はさらに大きく膨張していき、爆発から数百年後にはX線で輝く超新星残骸となります。超新星残骸は次の世代の星をつくるゆりかごにもなります。このように星の最期は星の誕生にも密接に関係しているのです。



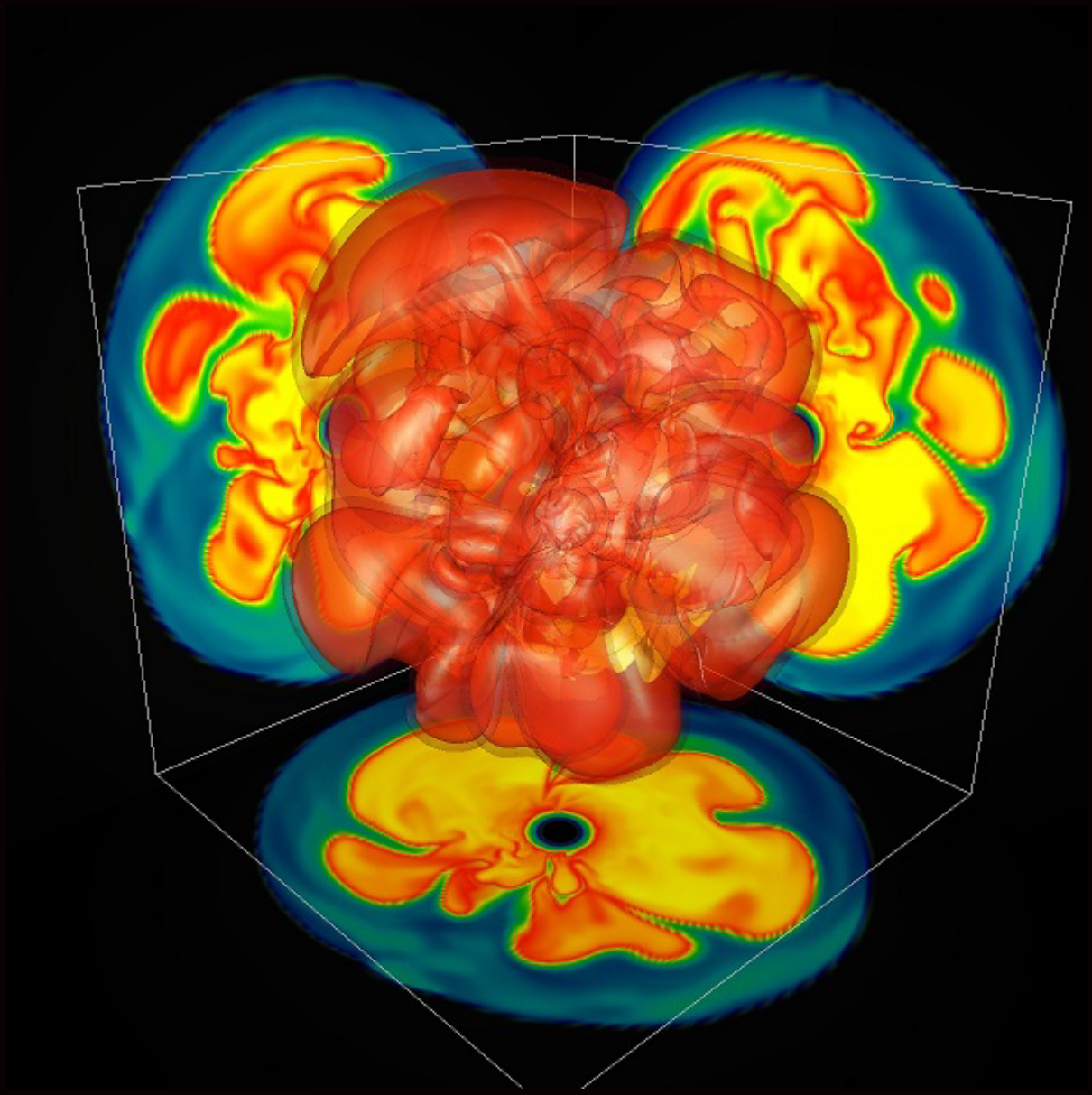
冬の夜空に現れるオリオン座。左上の赤く光る星がベテルギウス。
ベテルギウスはいつ超新星を起こしてもおかしくない状態にある。
(C) 天文学辞典 (日本天文学会)

星の中では何が起こっているのでしょう。若い星の中心部では、水素からヘリウムが作られる核融合反応が起きており、これが星の光のエネルギー源です。星が重く、中心の温度が高くなる場合には炭素や酸素など、より重い元素も核融合で作られ、それによって星を光らせるエネルギーが供給されます。また中心部のエネルギー供給が強く、外層が膨らむ場合には星の表面の温度が下がり、赤い星になります。

質量が太陽の10倍以上ある星を大質量星と呼びましょう。大質量星の内部では核融合反応が鉄の生成まで進みます。核融合でエネルギーが取り出せるのはここまでです。核融合反応でエネルギーが取り出せなければ、星はその大きな質量を支えていた圧力が維持できず、中心に向かってつぶれてしまいます。これを「重力崩壊」と呼びます。重力崩壊によって中心が超高密度の中性子星になると、解放された重力エネルギーにより星全体が吹きとんでしまいます。これが超新星爆発で、大質量星は華々しくその一生を終えるのです。この爆発によって星の中で作られた重元素が銀河中にまき散らされます。私たちの身の回りにある様々な元素は、星の中で起きる核融合反応によって作られ、超新星爆発により放出されたものなのです。

このように超新星は高密度の中性子星が誕生する時に引き起こされますが、その現場は星の分厚い外層に隠されており、光学観測ではその瞬間を見ることができません。この爆発の引き金を直接的に明らかにするには、星の外層を透過するニュートリノや重力波を観測するのが有効です。これに関しては1987年に起こった超新星1987Aが唯一の観測例となっているため、詳細を明らかにするために、次の近傍銀河での超新星爆発が待望されています。

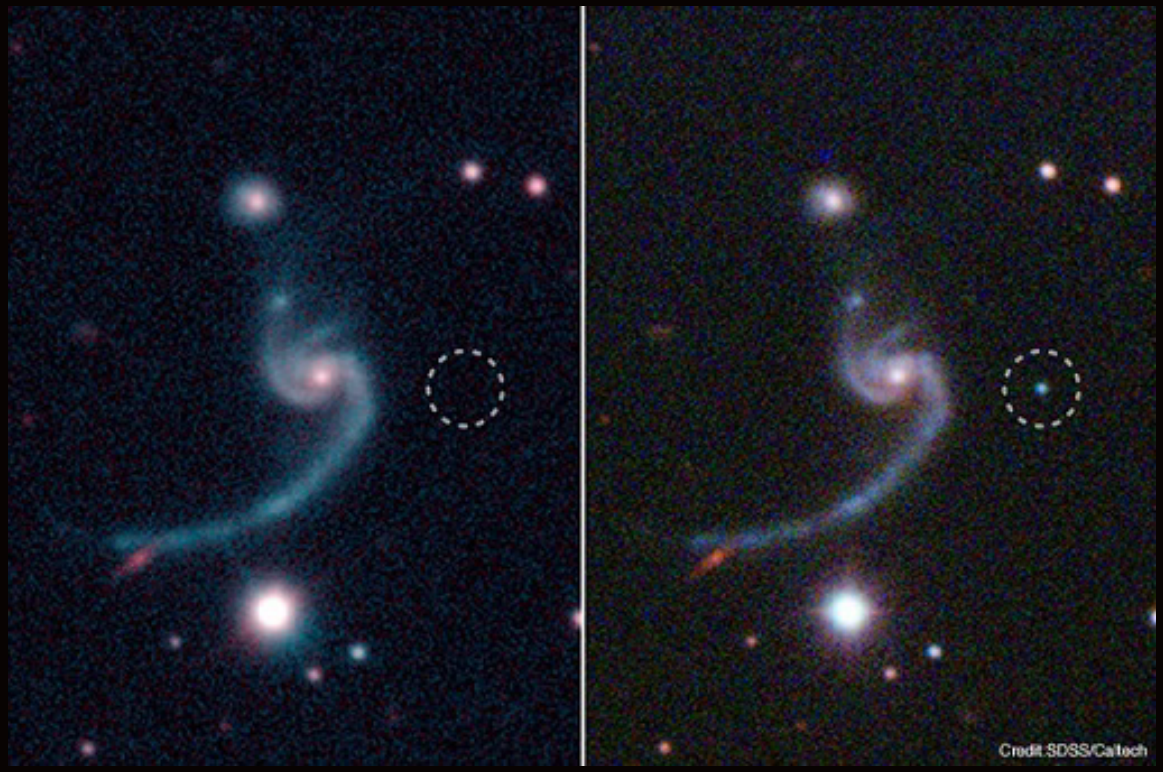
理論的には中性子星から放出されるニュートリノが外層部を加熱し、ガスを膨張させ爆発を起こすという仮説が爆発の機構として最も有力視されています。この仮説に基づいて、大規模な数値シミュレーションを用いた研究が現在盛んに行われています。その研究では定性的には爆発の様子の再現に成功していますが、我々の物理学の知識が不完全なのか、爆発を完全に定量的にコンピュータで再現することはまだできておりません。今後より一層の研究の進展が求められます。



超新星爆発のシミュレーション
(C) 滝脇 知也

星の中心部で起こった爆発は、星の表面に到達したあと、主に可視光や赤外線として観測されます。この超新星は爆発後に数ヶ月程度明るくなり、最大で銀河全体に匹敵するほどの明るさになります。超新星からの光を詳細に観測することで星の爆発について多くの情報を得ることができます。例えば、爆発した星にどの元素がどのくらい存在したか、爆発のエネルギーはどのくらいだったか、さらには爆発がどのような形をしていたかを知ることもできます。このような情報をもとに、星が爆発する直前にどのような姿をしていたのか、星の爆発がどのように駆動されているのかを明らかにしています。

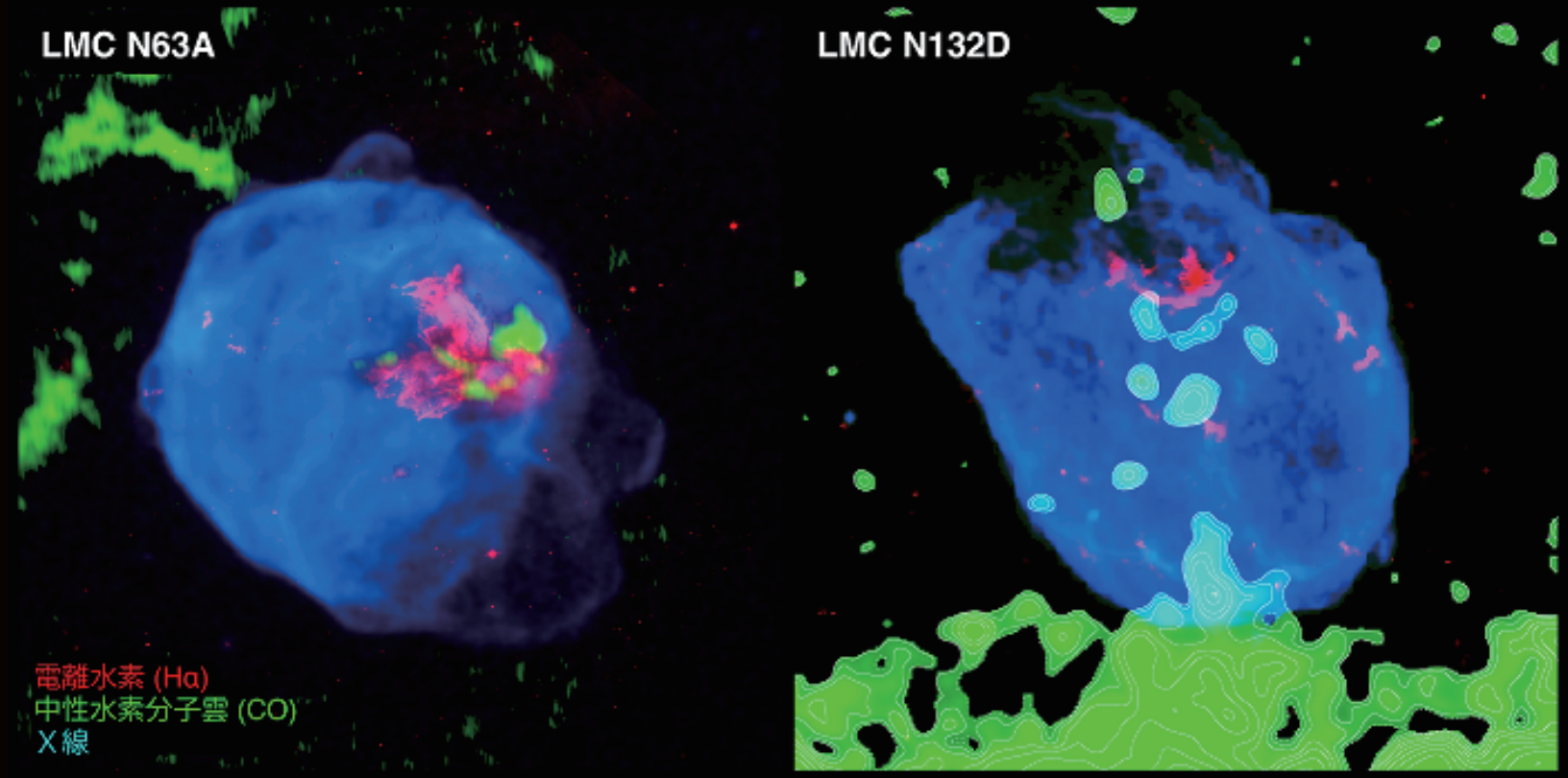
超新星は宇宙のどこで現れるか分からないため、発見をするのは容易ではありません。しかし、近年大規模な超新星探しが行われるようになり、超新星の発見数が飛躍的に上昇しました。この結果、１０年前までは知られていなかったような新種の超新星が数多く発見されました。標準的には考えられないほど明るい超新星や、逆に異常に暗い超新星、さらには１ヶ月もたたないうちに暗くなってしまう超新星、逆に何年も明るく光り続けている超新星など、多種多様な超新星が存在することが明らかになっています。超新星の多様性は、爆発する時に星が様々な状態にあること、星の爆発を駆動するメカニズムに多様性があることに由来していると考えられています。超新星の多様性の起源を、星の進化の多様性や星の爆発の仕方の多様性といった様々な視点から解明する研究を行っています。



超新星が現れる前後の銀河の画像。波線の丸で囲まれた部分の中心に超新星が現れている。(C) SDSS/Caltech

超新星が見えなくなった後も、爆発で放出された高温ガス層は膨張を続けます。秒速1万キロメートルにも達するこの衝撃波層は「超新星残骸」と呼ばれ、およそ数万年間、電波からX線・ガンマ線まで幅広い波長域で輝きます。衝撃波は宇宙空間に大きな影響を与えると予想されていますが、その詳細は謎のままでした。そこで私たちは、アルマ電波望遠鏡を用いて、大マゼラン雲にある超新星残骸を観測しました。その結果、星のもとになる水素ガス雲が、衝撃波によってイオン化されつつある現場を捉えることができました。また、激流の中にある大岩のように、その周りでは多くの渦が発生して、高いエネルギーの放射線—宇宙線—が生み出されることも明らかになりました。

観測天文学の面白い点のひとつは、波長ごとに異なる物理状態を調べられることです。例えば電波では-263度の水素ガス雲、X線では1000万度の衝撃波、可視光ではイオン化されたガスといった具合です。様々な波長で得られる観測データと理論計算を組み合わせることで、星の進化と超新星爆発の全容解明に挑んでいます。



大マゼラン雲の超新星残骸 N63A (左) と N132D (右)。
(C) 佐野栄俊 (H. Sano et al., ApJ, 873, 40, 2019; H. Sano et al., ApJ, 902, 53, 2020)

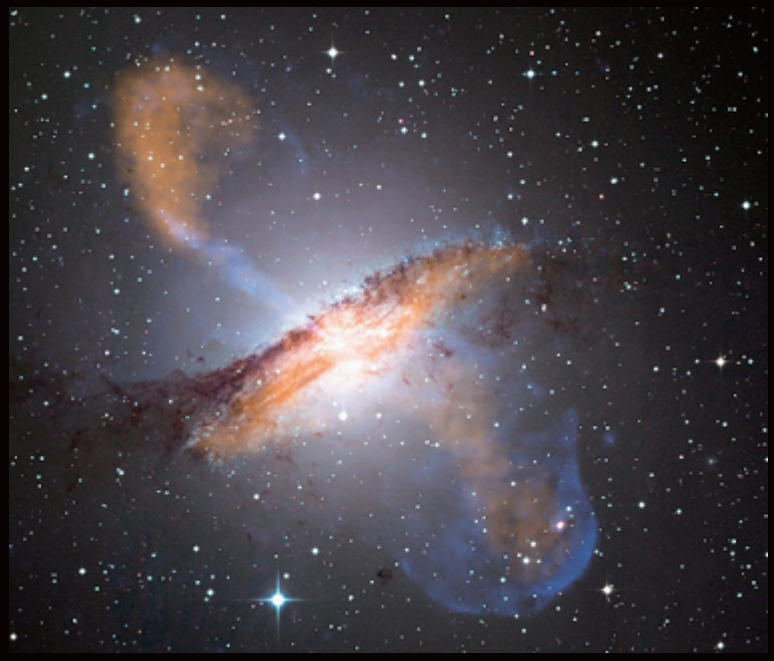
近傍銀河
Nearby Galaxies

銀河は100万から100兆ほどの星が集まってできています。星々の間にはガスがあり、そうしたガスや宇宙塵が重力で集まり星ができることがわかっています。銀河の進化の歴史の中で、星々は常に作られ続けてきました。しかし、銀河の歴史の中で常に同じ数の星が作られているわけではありません。近くの銀河を詳しく研究してみると、非常に頻繁に星が生まれている銀河があります。その中でも爆発的に、と言えるほど星が多く作られているのがスターバースト銀河と呼ばれるものです。スターバースト現象は二つの銀河が合体する過程や相互的に重力が影響し合う中で頻繁に引き起こされることがわかっています。また、違った形状の銀河の中ではその中の星が作られる頻度に違いがあることが観測からわかっています。例えば、顕著な構造のない楕円銀河にはあまりガスがなく、星があまりできていません。その一方で渦巻構造のある渦巻銀河、特に中心に棒状構造のある棒渦巻銀河などはより頻繁に星を作っています。

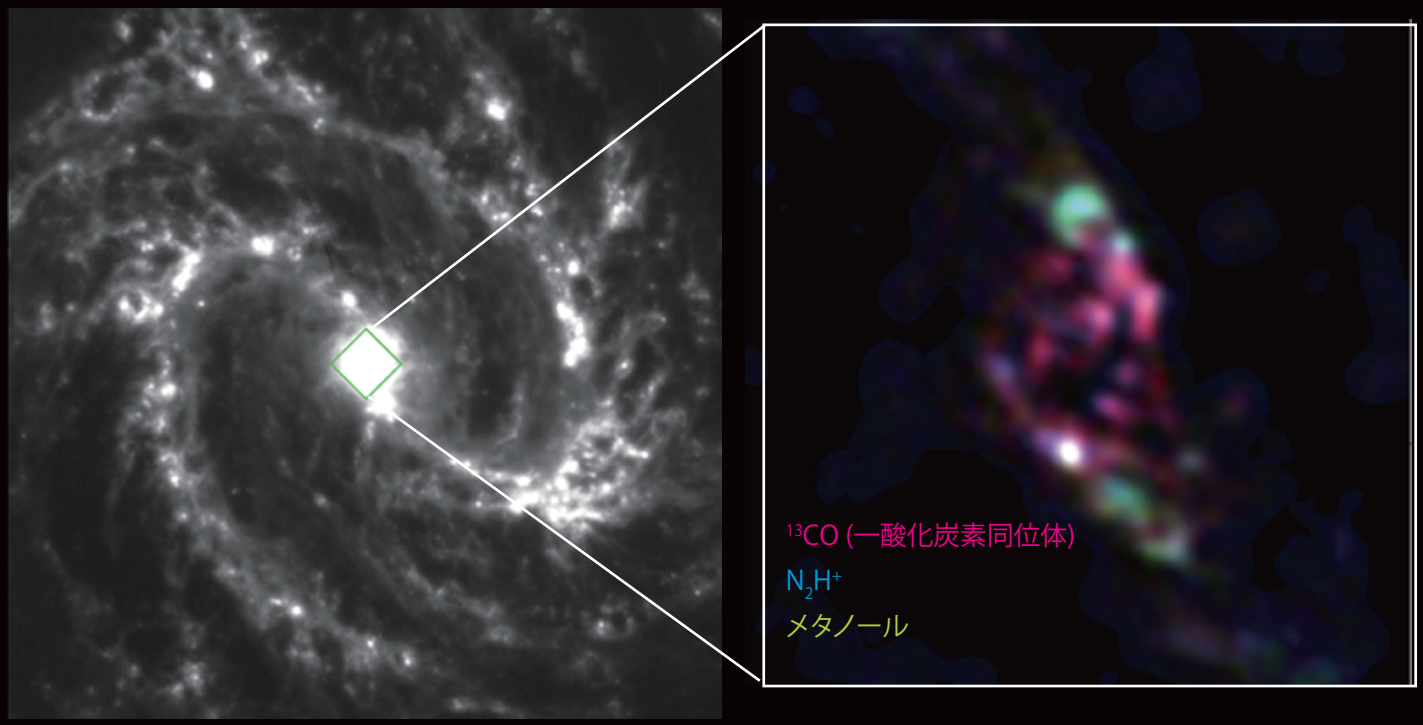
また、星ができると同時に銀河内で成長し続けているものが、銀河の中心にある超巨大ブラックホールです。ブラックホールという名前から、そこから光は出ていないように思われますが、実はその周りは非常に明るく光っている場合があります。質量がブラックホールに吸い込まれている時はガスの重力ポテンシャルエネルギーが光という形で放出されそれがとても明るく見えるのです。これを活動銀河核と呼びます。



合体銀河 Arp 272
(C) NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration, and K. Noll (STScI)



活動銀河核を含むケンタウロス座A
(C) ESO/WFI (Optical); MPIfR/ESO/APEX/A.Weiss et al. (Submillimetre); NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al. (X-ray)



(左) 棒渦巻銀河 M83の赤外線の画像　(右) 銀河の中心部で複数の分子をアルマ望遠鏡を使い観測したもの
(C) 原田 ななせ

国立天文台では、アルマ望遠鏡を使いこれらの様々な銀河で星の材料であるガスを観測する研究が行われています。こうしたガスは、星ができるような密度の濃いところでは分子として存在します。この分子ガスの量を調べるのにアルマ望遠鏡などの電波望遠鏡でよく使われるのが一酸化炭素です。最近できた星の量の指標となる赤外線などと分子の量を比べることで、一定の星の材料からどれだけ効率よく星ができているかも調べることができます。

また、ブラックホール付近のガスも大体が分子ガスの形で存在します。それらのガスはブラックホールを囲む円盤、またはドーナツ型の形をしています。そこからどうやってプラックホールにガスが吸い込まれるか、そのメカニズムはあまりわかっていません。そのため、ブラックホールの近くでのガスの構造を観測することはガスがブラックホールに吸い込まれる仕組みを調べるのに有効です。

その他、アルマ望遠鏡では一番観測しやすい一酸化炭素以外の分子も詳しく観測ができるようになりました。例えばN_2H^+やシアン化水素(HCN)などの分子は一酸化炭素よりも高密度のガスを調べることができます。星は分子ガスの中でも高密度の領域で作られるので、これらの分子はそうした比較的密度の高い領域のガスの量を探る指標となると考えられています。つまり、こうした分子がよく見られるところでは効率良く星ができているとも考えられます。その他、メタノールや一酸化ケイ素（SiO）は超音速の衝撃波が起きている場所で見られます。これらの分子が分子ガスの動きを察することもできます。

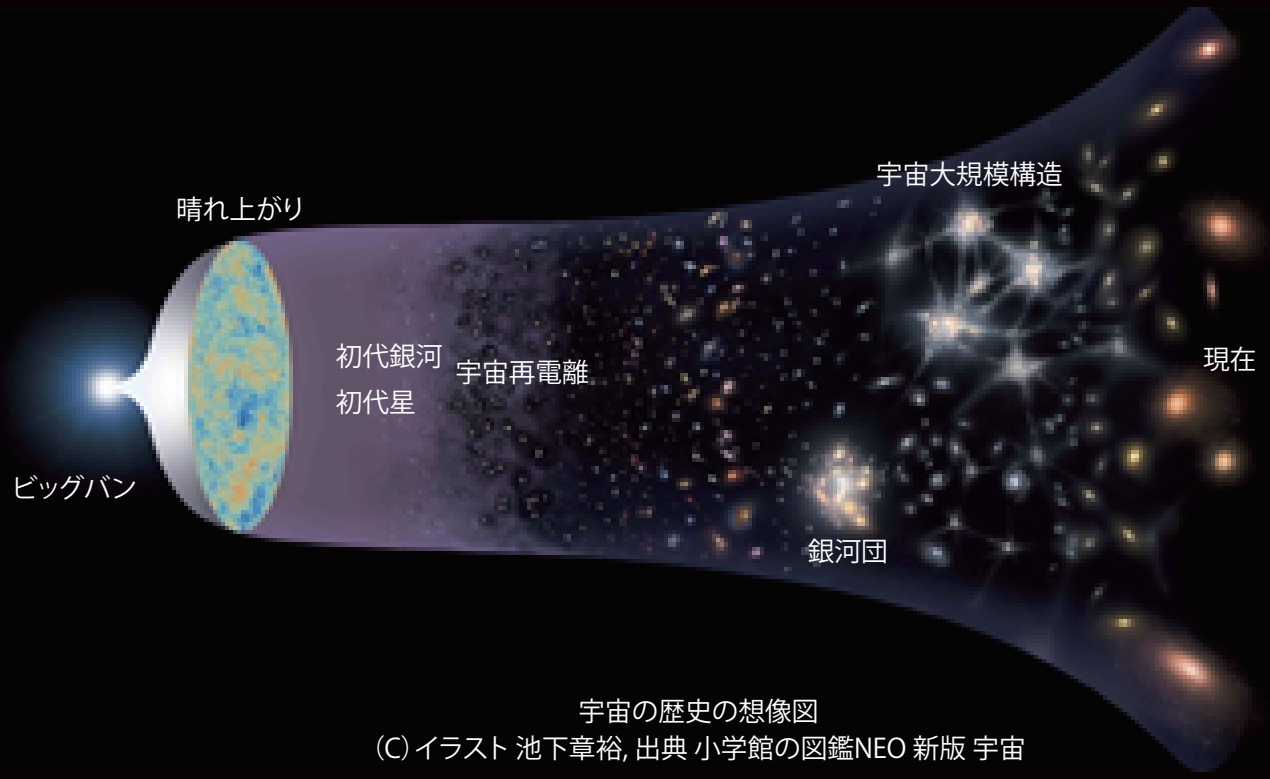
銀河形成と宇宙初期
Galaxy Formation and the Early Universe

私たちの住む宇宙は、基本的な力学構造である星や銀河、銀河同士が重力で結びつく銀河団、そして銀河が網目状に連なる宇宙最大の構造、宇宙大規模構造という豊かな構造からなります。

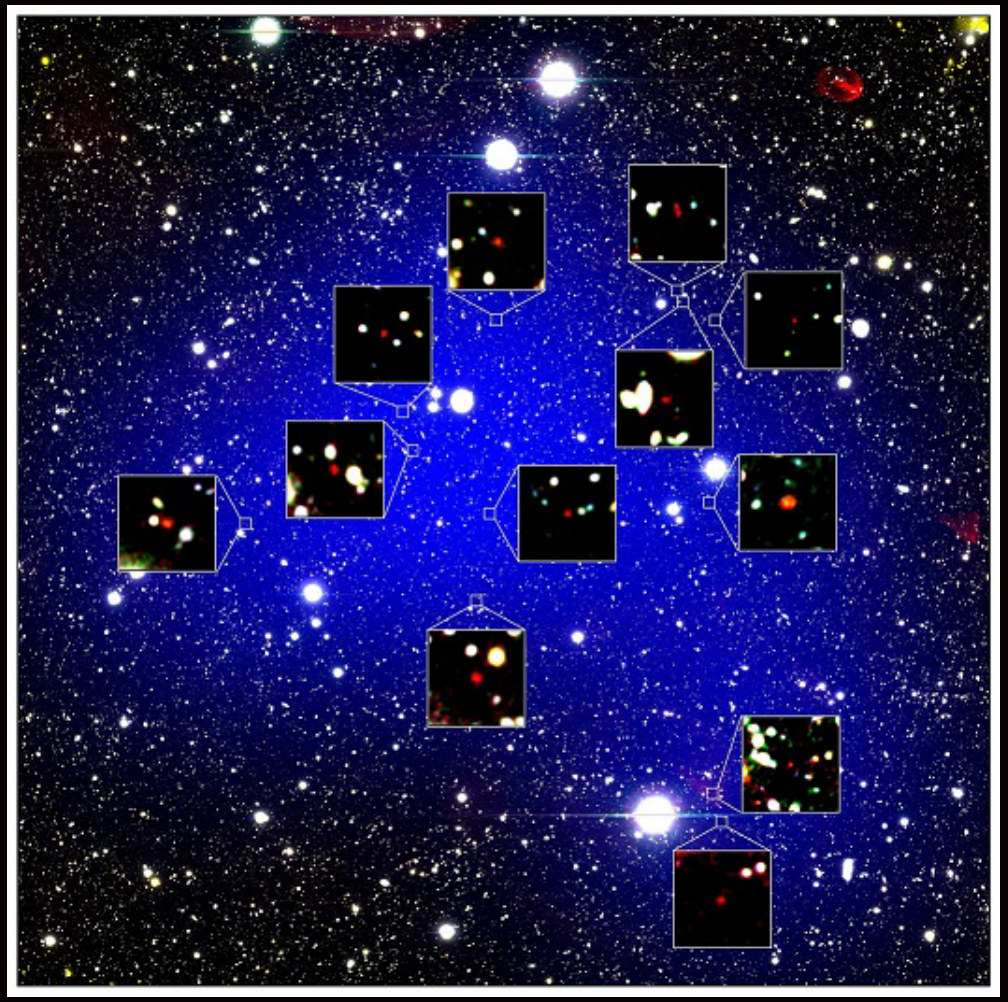
このような宇宙が、どのように出来たのかという疑問は、天文学における最重要課題の一つです。これは、ポール・ゴーギャンの絵画の題名にある「我々はどこから来たのか　我々は何者か　我々はどこへ行くのか」のうち、最初の疑問、「我々はどこから来たのか？」に合致する、人類にとって根源的な疑問です。この疑問に答えるには、ビッグバンから始まり、膨張を続ける宇宙において過去を観測し、宇宙の歴史を紐解く必要があります。

宇宙の歴史を探るには、大きく分けて二つの観測方法があります。一つ目の方法は、現在の宇宙に残る古い、化石のような天体を詳しく観測することです。例えば、ビッグバンで作られた始原ガスを主成分とする星や銀河を観測して、宇宙初期に現れた天体の形成過程の手がかりを得ます。二つ目の方法は、遠くの宇宙を観測することです。例えば、すばる望遠鏡などの大型望遠鏡による観測を行い、宇宙の果てとよべる130億光年彼方の宇宙から届く電磁波を検出して、130億年前の宇宙を探ります。このようにして、宇宙138億年の歴史の中で、最初の8億年後の時代（現在の宇宙年齢の僅か6%）を知ることができます。

以上のように、宇宙の歴史を探り、宇宙における天体、特に銀河が、どのように誕生し、進化してきたかについての観測研究が盛んに進められています。そして、ビッグバン直後に存在した物質の初期密度揺らぎをもとに計算したコンピューター・シミュレーションにより、観測で分かった天体の性質、そして宇宙における進化を支配する物理過程に迫っています。



宇宙の歴史の想像図
(C) イラスト 池下章裕, 出典 小学館の図鑑NEO 新版 宇宙



すばるが発見した最遠方の原始銀河団
(拡大図中の赤い天体が原始銀河団を構成する銀河)
(C) 国立天文台

私たちは、すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡をはじめとする大型望遠鏡を使い、銀河の形成過程や宇宙の歴史（特に初期の宇宙）を研究しています。その中でも、すばる望遠鏡の超広視野撮像装置HSCを使った深宇宙探査では、すばる望遠鏡が得意とする超広領域観測にもとづいて、銀河から宇宙大規模構造までを包含する広大な宇宙の進化を調べています。一例としては、銀河団形成の初めの段階にある原始銀河団についての研究です。すばる望遠鏡が発見した130億年前の最遠方の原始銀河団の中では、同時代の銀河に比べて5倍にもおよぶ星が激しく生まれていました。この原始銀河団は質量が大きいため、周りから星の材料であるガスが大量に供給され、星の生まれる効率が非常に高くなっています。コンピューター・シミュレーションの結果と比べると、現在では10^{14}太陽質量の銀河団へ進化している確率が最も高いため、この原始銀河団は、銀河団の祖先の姿だと考えられています。

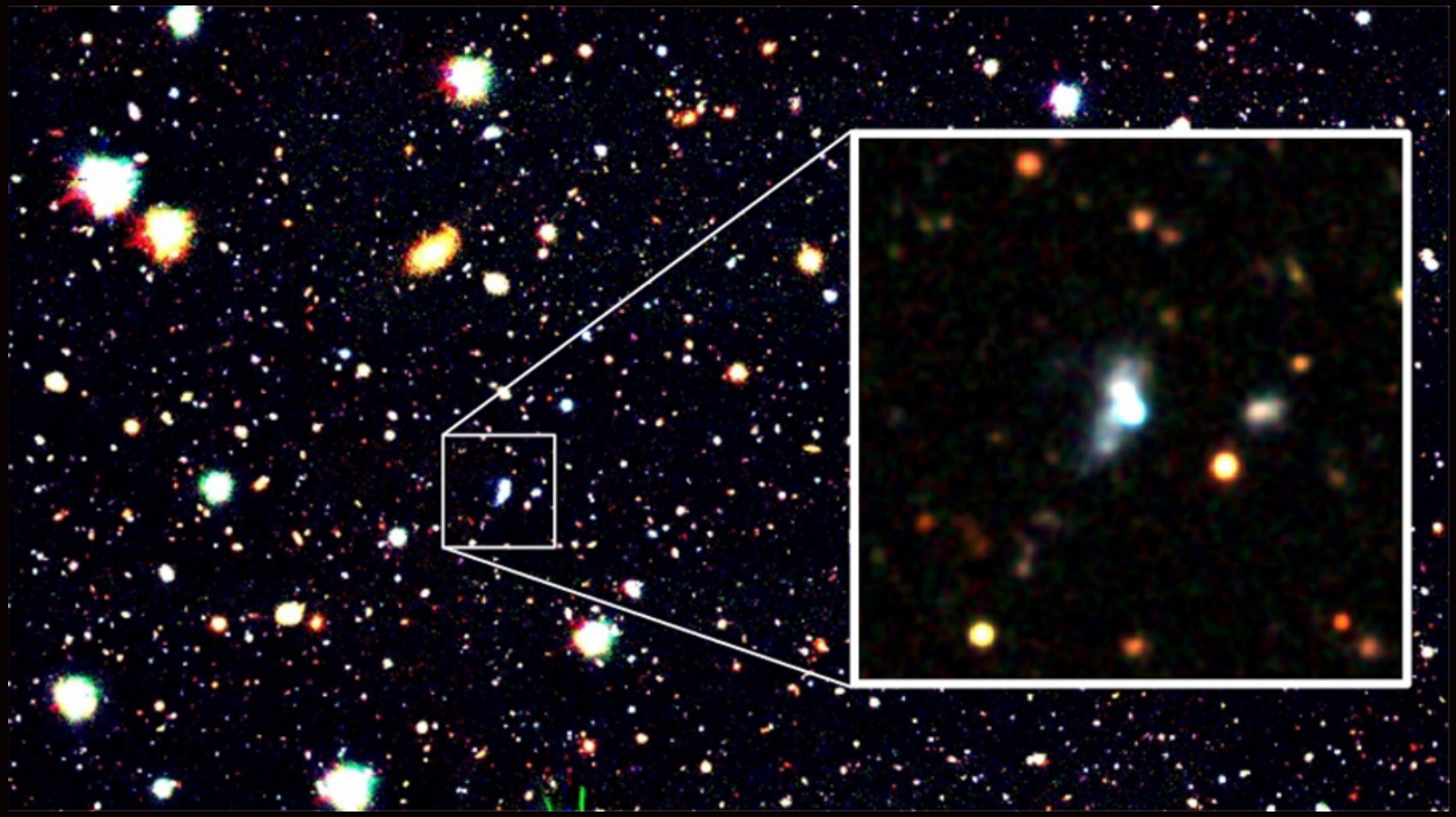
今後は、すばる超広視野分光器PFSによる観測で、銀河までの距離を正確に測定し、約130億年前までの広大な宇宙大規模構造を描き出す予定です。この測定により、初期の宇宙で広く起こったと考えられる宇宙再電離の物理過程を明らかにしようとしています。さらに、NASAのRoman宇宙望遠鏡や超大型望遠鏡TMTといった次世代望遠鏡との協調観測により、130億年よりも過去の、より初期の宇宙にも迫っていきます。

現在のすばる望遠鏡、そして次世代望遠鏡の観測からは、ペタバイトを優に超えるビッグデータが出されます。私たちは、機械学習をはじめとしたAI技術を用いた研究も展開し、すばる望遠鏡で検出された数億個の天体の中から、銀河形成の鍵を握る銀河を探し出すプロジェクトも同時に進めています。

生命の源となる酸素などの重元素は、宇宙の長い歴史を通じて、星によって徐々に作られてきました。そのため、形作られ始めたばかりの銀河、つまり形成初期の銀河には、重元素はほとんど含まれていなかったと考えられています。宇宙初期にはそのような形成初期の銀河が多くあったと思われており、銀河形成およびその後の化学進化の鍵を握る重要な天体だと考えられています。

形成初期の銀河は暗く、遠くの宇宙において直接探査することは現状至難の技です。そこで私たちは、現在の宇宙に残された数少ない形成初期の銀河をすばる望遠鏡の超広視野撮像装置HSCの大規模データから探し出し、その性質を詳しく探るプロジェクトを進めています。理論モデルから予想される形成初期の銀河の色の特徴をコンピュータに繰り返し学習させることで、膨大なHSCデータの中から形成初期の銀河を機械学習の手法で選び出す方法を確立しました。その中には、酸素含有率が太陽の1.6%と極めて低く、銀河における酸素含有率の最低記録を更新する最も若い銀河も含まれています。

現在の宇宙で発見された形成初期の銀河の詳しい性質が分光等の多波長観測によって今まさに明らかにされ始めました。その結果を星の進化と爆発の理論研究者とともに解釈することで、形成初期の銀河における星形成の謎に迫ろうとしています。

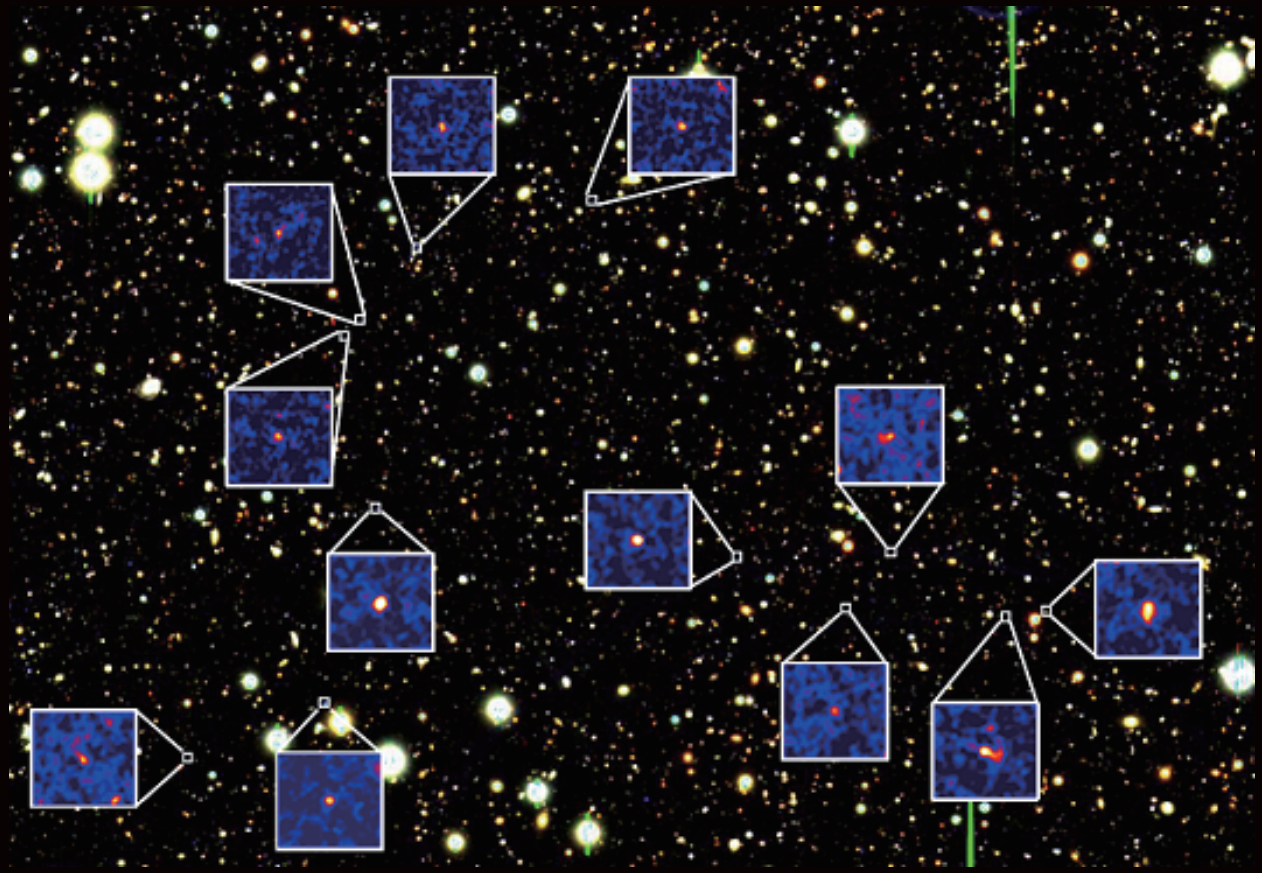


すばるHSCの大規模データから探し出された、観測史上最も酸素含有率が低い銀河
(C) 国立天文台、小島 崇史 ほか

この宇宙は誕生後10億年以内に中性から電離状態へと大きく転換したことが知られており、これを宇宙再電離と呼びます。現在の宇宙に存在する星の99%以上が宇宙再電離後に作られたことがわかっており、宇宙再電離は宇宙初期およびその後の天体形成を左右する重要な現象だと捉えられています。

宇宙初期に多く存在していた銀河が宇宙再電離を引き起こすことができたかどうかは、特に近年注目を浴びている課題です。この課題に迫るため、私たちはハッブル宇宙望遠鏡を用いて、銀河に周囲の空間を電離する能力があるかどうかを探るプロジェクトを進めています。ハッブル宇宙望遠鏡の紫外カメラで深い観測を行うことによって、若く活発に星形成を行う銀河の多くから電離放射を検出することに成功しました。これまでの研究で、成長した大質量の銀河からの電離放射は平均的に微弱であり、電離源として不十分であることが示唆されていました。私たちの研究によって、若い小質量銀河が宇宙再電離に特に重要な役割を果たしたことが観測的に裏付けられました。分光による追観測および宇宙論的流体シミュレーションによる観測結果の再現を通じて、電離放射を強く出す銀河の性質を観測的・理論的により良く理解しようとしています。

超大型望遠鏡TMT時代には、宇宙再電離期の遠くの宇宙の銀河の性質が直接得られるようになると期待されます。本プロジェクトで得られる知識を活用し、将来の宇宙再電離期の銀河の直接観測研究へ応用していく計画です。



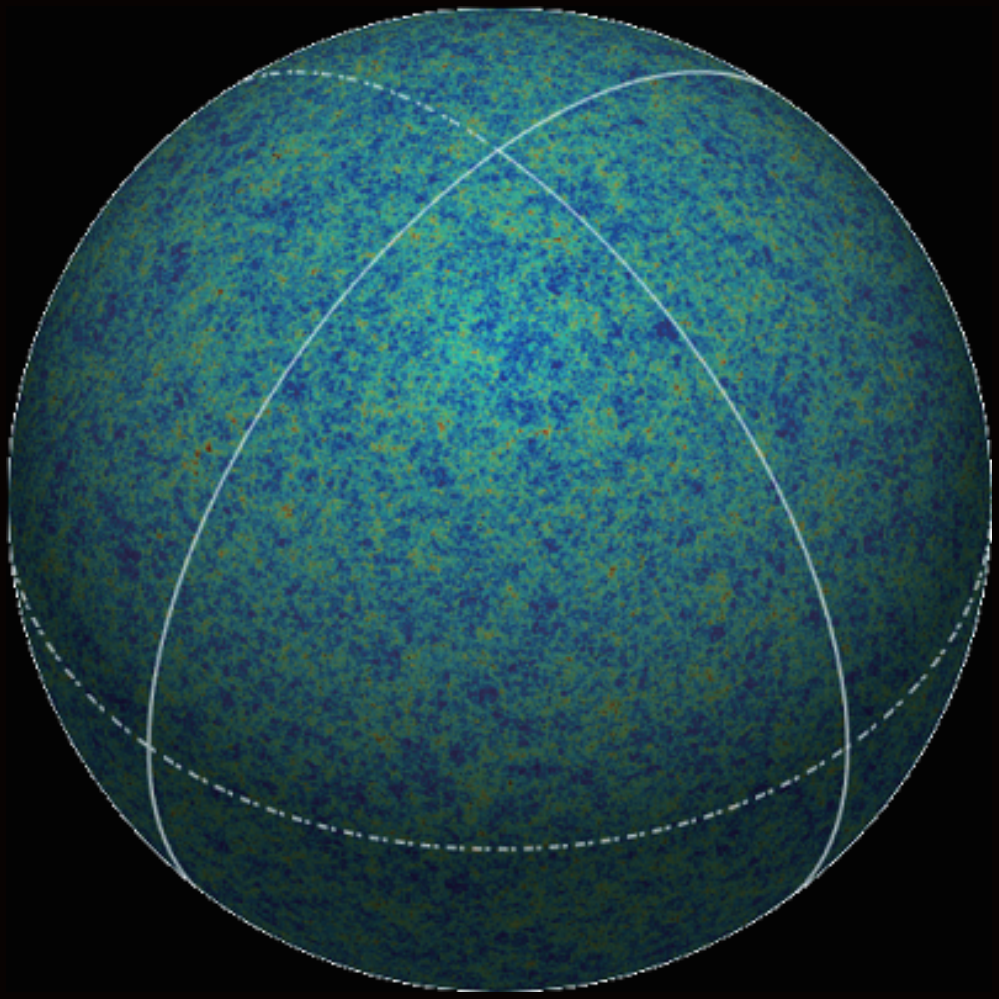
ハッブル宇宙望遠鏡で検出された若い銀河からの電離放射（拡大図中の赤い光）。
画像全体は若い銀河を選択するために使われたすばる画像
(C) 中島 王彦, LACES

宇宙論
Cosmology

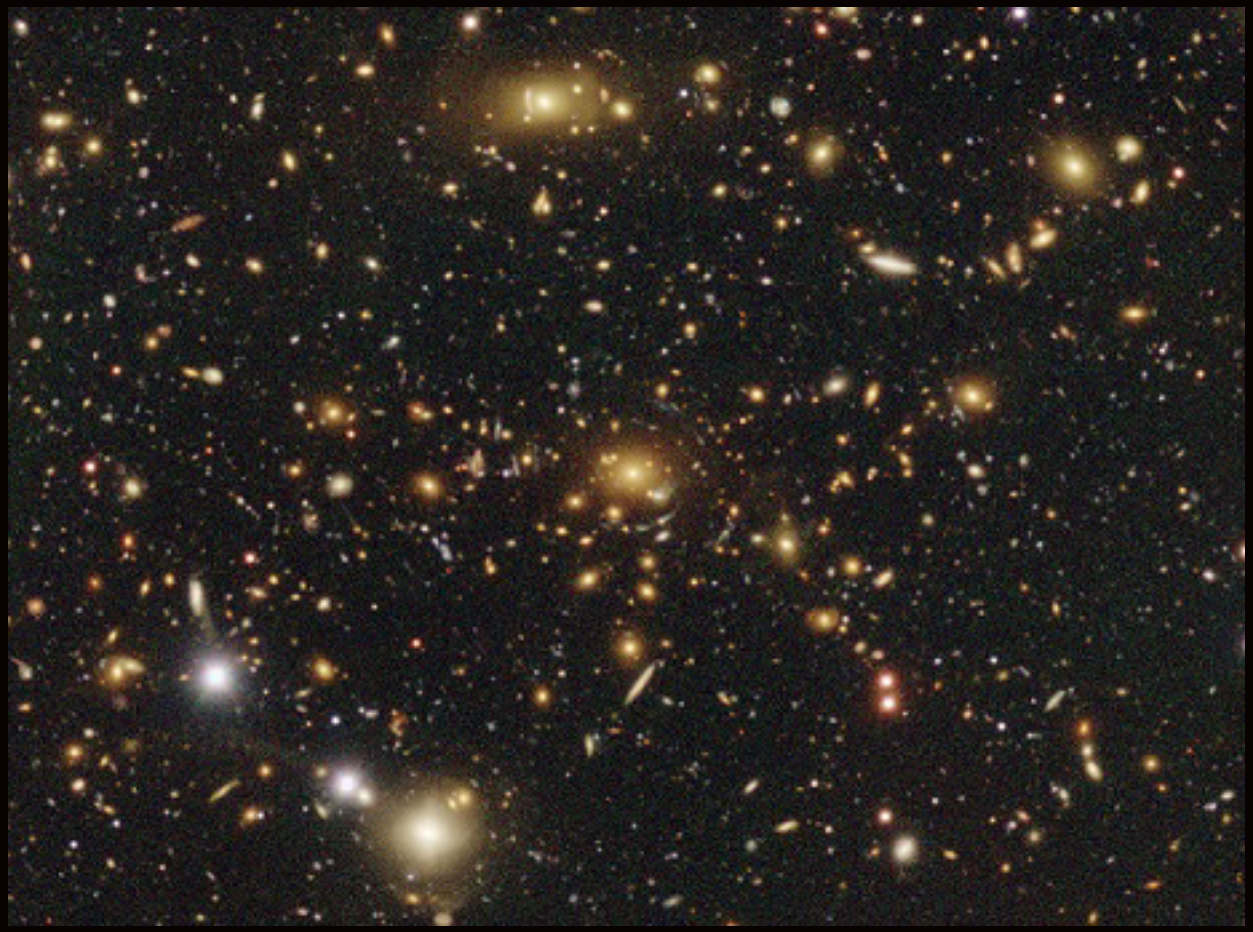
宇宙に存在する様々なスケールの天体の研究を紹介してきましたが、宇宙そのものが何でできていて、どのような物理法則によって支配されているのか、というのも天文学の研究対象です。このような研究分野は「宇宙論」と呼ばれています。

最新の宇宙観測から宇宙は約138億年前に誕生したと考えられています。10^{-36}秒後には「インフレーション」と呼ばれる急膨張を経て、高温の火の玉宇宙へと姿を変えます。その後、宇宙は膨張して冷え続ける一方宇宙初期にあった微小な密度揺らぎは重力によって成長し、やがて星や銀河が生まれ現在のような豊かな物質構造をもつ宇宙に進化してきたと考えられています。火の玉宇宙の名残である「宇宙背景放射」が発見されたことと軽元素の存在比が予想通りだったことによりビッグバン仮説は標準モデルとして確立しました。

宇宙背景放射の揺らぎや銀河の大規模構造の統計的性質を詳細に解析することで、宇宙に関する様々な情報を得ることができます。その結果、驚くべきことが分かりました。私たちが知っている通常の物質は宇宙の全密度のわずか5%しか占めておらず、残りの27%が暗黒物質、約68%が暗黒エネルギーと呼ばれる未知の成分によって占められているのです。これら暗黒成分の正体の解明は、現代宇宙論の最重要未解決問題の１つです。宇宙の暗黒成分は、銀河や銀河団の形成、元素の合成などにも影響を及ぼすため、私たちはその影響を詳細に研究し、実際の観測を行うことで、宇宙の暗黒成分の正体に迫ろうとしています。



重力レンズ数値シミュレーションで得られた、全天の暗黒物質分布。暗い部分が低密度で、明るい部分が高密度領域を表す。赤い領域は超高密度領域で銀河団のような巨大な構造が存在しており、強い重力レンズ現象が予想される。(C) 白崎 正人



すばる望遠鏡Hyper SuprimeCamで撮像された銀河団 NVSS J142016+005718。
明るい赤みがかった銀河は銀河団に属するもので、青みかかった弓状の像は
背景の銀河が銀河団の重力レンズ効果により歪められたもの。(C) 国立天文台

世界中の研究者が様々な方法を用いて、宇宙の暗黒成分の解明に挑戦しています。ここでは私たちが行っている「重力レンズ効果」を応用した研究を紹介します。アインシュタインの一般相対性理論によれば、重たい物体があると時空が歪み、そこを通った光の軌跡はその物体が無かった場合に比べ曲がったように観測され、それにより銀河のように広がりを持つ天体の像は歪められます。多数の遠方銀河像を精密測定することで重力レンズ効果が「観測」でき、そこからレンズ天体の性質を探る事が出来るのです。

重力レンズ効果には物質の重力のみが関与するので、「見えない」暗黒物質を探る事ができ、従って宇宙における暗黒物質分布を測定する事が出来ます。これを理論的に予想される分布と比べる事で暗黒物質モデルを検証できます。また暗黒エネルギーは、銀河団のような巨大な構造の形成に影響をおよぼすので、重力レンズ効果でもって発見された銀河団の数密度から暗黒エネルギーの性質を探ることが出来ます。

私たちは、国立天文台が有する２つの強力な道具を駆使して重力レンズ効果を利用した宇宙論研究を行っています。まず、スーパーコンピュータを使って、暗黒物質や暗黒エネルギーが宇宙の構造の形成進化に与える影響とそれが重力レンズ効果によってどのように観測されるかを計算します。それを「すばる望遠鏡」で得られた観測結果と比較することで暗黒物質の性質を探っています。このようにして私たちは、理論と観測の両面から宇宙の暗黒成分の謎に挑戦しています。

科学研究部
Division of Science

現代天文学の研究対象は、宇宙の過去から未来、宇宙論から恒星・惑星まで、時と空間のあらゆるものに広がっています。それに応じて、研究方法も、可視、電波にとどまらず、広範囲な電磁波、さらに重力波、ニュートリノ、宇宙線といった観測手段が開拓され、観測天文学を豊かにしてきました。一方で、紙と鉛筆の理論天文学も、スーパーコンピュータの中に天体を再現して研究する天文シミュレーションが理論天文学を強力なものにしました。

近年、天文学研究は、新たな発展時期を迎えています。理論研究を行うことで、すばる望遠鏡やALMAなど最新の観測装置から得られる観測結果を解釈し、その現象の本質を理解する理論観測融合。重力波源天体に向けたすばる望遠鏡の観測で天体の正体を解き明かすような、電磁波とそれ以外のメッセンジャーを組み合わせたマルチメッセンジャー観測。X線、光学赤外線、電波を組み合わせた、多波長観測天文学などが、発展方向として急速に進歩しています。

科学研究部は、宇宙の過去から未来、宇宙論から恒星・惑星まで、時と空間のあらゆるものを、研究する部門です。そして理論観測融合、マルチメッセンジャー天文学といった発展方向から研究する新たな部門です。



(2019年4月3日 撮影)

教授	大内 正己　川邊良平　小久保 英一郎　富阪 幸治　野村英子
特任教授	梶野 敏貴
准教授	中村 文隆　藤井 友香　町田 真美
助教	岩﨑 一成　片岡 章雅　滝脇 知也　原田ななせ　浜名 崇　森野 潤一　守屋 尭
特任助教 (国立天文台フェロー)	荻原 正博　佐野 栄俊　杉山 尚徳　鈴木 昭宏
特任助教	高橋 実道　塚越 崇　中島 王彦　古家 健次
特任研究員	野沢 貴也
日本学術振興会特別研究員	荒川 創太　植田 高啓　佐々木 宏和　松下 祐子
研究支援員	Kim, Seong-Joong
特定事務職員	泉 塩子　渡邉 愛美
大学院生	(総研大)　竹村 英晃　柏木 頼我　石原 昂将　土井 聖明　佐々木 俊輔　Bilinsky, Illya
	(東京大)　森 寛治　山口 正行　辰馬 未沙子　Chin, Kahwuy
	Kwok, Carol　Luo, Yudong　星野 遥　山崎 雄太　木下 真一
	吉田 雄城　Shuo, Huang　小野 恭平　森井 嘉穂
	(東工大)　胡 博超
	(九州大)　大前 陸人　田嶋 裕太

科学研究部で研究してみませんか？

大学生、大学院生の皆さん、国立天文台で研究してみませんか？

国立天文台は、大学共同利用機関として、全国の大学研究者にすばる望遠鏡、ALMAといった大型観測装置やスーパーコンピュータなどを使った研究機会を提供しています。それにとどまらず、これらの大型研究装置を生かした研究などで大学院生を直接、指導しています。科学研究部では2020年度20名の大学院生が在籍し日々研究に打ち込んでいます。

科学研究部で勉強するには、いくつかの道があります。

総合研究大学院大学は４つの大学共同利用機関法人と国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構が設置する17の研究所等を基盤とする学部を持たない国立の大学院大学です。国立天文台は物理科学研究科天文科学専攻の教育研究を担っています。5年一貫制博士課程（修士＋博士後期課程に相当）と同3年次編入（博士後期課程に相当）があり、「すばる観測実習」や「海外インターンシップ」といった特徴ある教育を行っています。准研究員制度やジュニア・フェローなどのサポートもしっかりしています。

国立天文台は、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻をはじめとして協定に基づいた連携大学院として大学の教育に協力しています。これらの大学院に入学し、科学研究部の教員を指導教員とすることで、科学研究部での研究をスタートすることができます。それ以外に、全国の大学院から研究指導委託院生として国立天文台に滞在して教育を受けることができます。

科学研究部は、多くの理論、観測の研究者が集まり、多種多様な研究が日々行われています。その中から自分に合った指導教員を見つけることができます。若い研究者が多く、活発な雰囲気の中で、研究指導を受けることができます。サマースチューデントプログラム、スプリングレクチャーなど学部生向けプログラムを行っておりますので、是非、勉強しに来てください。

大学生、大学院生の皆さん、科学研究部で研究してみませんか？



大学院生のセミナー風景



Division of Science

National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ)

National Institutes of Natural Sciences



Designed by
Kazunari IWASAKI, Masaomi TANAKA, Hideko NOMURA