

# 宇宙総合学研究ユニット NEWS 2020年12月号



## 第3回 SCB2 森林環境実習 in 芦生研究林 開催報告

宇宙総合学研究ユニットではアリゾナ州にある人工閉鎖生態系 Biosphere2 におけるスペースキャンプ (Space Camp at Biosphere2; SCB2) を昨年2回開催しました。今年は新型コロナウイルス感染症の世界的蔓延のもと、日本側参加者の渡米を断念して、国内の代替地3か所における環境実習と宇宙無線通信実験を実施しています。

2020年11月28日～29日に京都大学芦生研究林(京都府南丹市)で森林環境実習を開催し、全国公募で選抜された5名のSCB2クルー(参加学生)が参加しました。1日目は京都大学フィールド科学教育研究センターの石原正恵准教授から、芦生研究林の歴史的・生態学的特徴、森林における炭素循環メカニズム、樹木炭素量の推定方法についての講義を受けました。その後、実際の調査エリアで樹木の測定法を学び、データ解析をおこないました。2日目は、原生林を歩きながら、森林と人間、シカなどの野生動物の関係について学びました。

SCB2クルーは今回学んだことを、アメリカ側クルー5名に対してオンラインで発表して共有し、火星におけるBiosphere3のデザイン考案という最終課題の議論に活かす予定です。

### 第3回 SCB2 クルー

東 亜希哉 (産業医科大学 医学部 医学科 4年)

高畑 花帆 (近畿大学 医学部 医学科 4年)

大上 耕平 (京都大学 工学部 物理工学科 2年)

清水 里香 (京都大学 理学部 宇宙物理学分野 3年)

堀山 勝輝 (京都大学 医学部 人間健康科学科 1年)



写真。(左) 樹木の周囲長を測定して炭素量推定法を学んだ (右) 推定樹齢1000年の大カツラの前で

## 今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
12月11日 (金) 16:30-18:00	<p>第5回宇宙学セミナー</p> <p>タイトル：宇宙ビジネスの新しい潮流と宇宙産業の拡大について</p> <p>講師：岩本裕之 氏 (JAXA 新事業促進部)</p> <p>事前申込方法：</p> <p>下記のリンクから事前申し込みをお願いいたします。</p> <p>このミーティングに事前登録する：</p> <p><a href="https://kyoto-u-edu.zoom.us/meeting/register/tZMsduitpz8tEtPh1VeB-Q5EoGem9Ij7WBEs">https://kyoto-u-edu.zoom.us/meeting/register/tZMsduitpz8tEtPh1VeB-Q5EoGem9Ij7WBEs</a></p> <p>登録後、ミーティング参加に関する情報の確認メールが届きます。</p> <p>確認メールにある「ここをクリックして参加」、あるいは登録画面にある「この URL をクリックして参加してください」からご参加ください。</p>	Zoom によるオンライン開催 (事前申込制)
2021年2月 13日(土) 13:00-17:00 14日(日) 10:00-17:30	<p>第14回 京都大学宇宙ユニットシンポジウム</p> <p>テーマ：「人類は宇宙に居住できるのか？ —宇宙生物学を踏まえた教育と展望」</p>	オンライン開催 (事前登録必要。詳細は決まり次第宇宙ユニット HP に掲載します。)

※宇宙学セミナー・宇宙ユニットシンポジウムの詳細は随時 Web ページ (<http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/seminar.html>) で公開いたします。

### 【告知】

今年度も宇宙ユニットシンポジウムを開催いたします。今回は、新型コロナウイルス感染症対策のため、オンライン開催となります。プログラムの詳細については今後宇宙ユニット HP に掲載いたします。ぜひ多くの皆さまのご参加をお待ちしております。

## 第14回 京都大学宇宙ユニットシンポジウム

### 「人類は宇宙に居住できるのか？ —宇宙生物学を踏まえた教育と展望」

京都大学宇宙総合学研究所(宇宙ユニット)では、文理を超えた幅広い領域を射程に、人類と宇宙に関わる諸問題の研究を推進しています。宇宙ユニットが主催する14回目のシンポジウムでは宇宙での居住に関する問題を議論します。

イーロン・マスク率いるスペースX社が火星移住を掲げ、他惑星への移住の機運が高まっています。月面基地の構築を2020年代に始めようとする動きもあり、各国による火星探査機の打ち上げも進んでいます。しかし、地球外惑星への移住を実現するためには依然として高いハードルが存在します。果たして人類はこの難題をどのように解決できる可能性があるのか、最新の研究をベースに議論を行います。

さらに惑星移住を考える際には「宇宙に生命は存在するか」という点が問題になります。かつて海があったと目される火星や、間欠泉や内部海を持つ可能性がある木星衛星には生命の存在や痕跡が見つかる可能性はあるのでしょうか、また人類がこれまでに見つけた「ハビタブルな系外惑星」は居住に適した環境を持つのでしょうか。NASAのケプラー宇宙望遠鏡やTESS宇宙望遠鏡、また2019年より運用が始まった日本のせいめい望遠鏡などが生み出してきた成果を

踏まえ、様々な専門背景を持つ登壇者とともに、今後の展望について議論を行います。

#### 開催概要

日時 : 2021年2月13日(土) 13:00-17:00、14日(日) 10:00-17:30  
開催形態 : オンライン開催  
参加費 : 無料  
申し込み : 要申し込み、12月以降にウェブサイトにてご案内します

#### 2月13日(土) 13:00-17:00

- ・オンラインポスター展示交流会 (発表ポスターを公募し、発表賞を設ける予定です)
- ・基調講演 山崎直子 氏 (宙ツーリズム推進協議会理事、元 JAXA 宇宙飛行士) (予定)

#### 2日目: 2月14日(日) 10:00-17:30

- ・シンポジウム講演 (登壇者は決定次第、順次ウェブサイトに掲載します)
- ・パネルディスカッション「人類は宇宙に居住できるか」

## 超巨大ブラックホールの起源 細川 隆史 (京都大学理学研究科 物理学第二教室)

### 1. 超巨大ブラックホール

最近、アインシュタインが一般相対性理論で約 100 年前に予言した“重力波”が初めて直接観測されたことが話題になった。最初の 2015 年の観測でいち早くノーベル賞が与えられた。その後の重力波観測により、宇宙ではブラックホール同士の合体が沢山起こっていることが明らかになった。このときのブラックホール質量は太陽の数十倍程度である。このようなブラックホールは太陽の数十倍とかとても質量の大きい恒星が進化したなれの果てと考えられる。核融合を終えて重力崩壊した星の残骸として、最後にブラックホールが残される。これらは恒星質量ブラックホールと呼ばれる。

一方、これらとは別種族のずっと質量の非常に大きいブラックホールが存在する。これが**超巨大ブラックホール(Supermassive Black Hole; 以下 SMBH)**である。これらの SMBH は少なくとも現在の宇宙では殆ど全ての銀河中心に存在することが観測から分かっている。質量がどれ以上だったら SMBH、という明確な定義は無いが、普通はすでに知られている  $10^5 \sim 10^{10}$  太陽質量のものを指す。例えば、我々の銀河系も例に漏れず、中心部に太陽の 400 万倍の質量を持つ SMBH が存在する。2019 年にブラックホールの“穴”が直接撮像された EHT(Event Horizon Telescope)の電波観測が話題になったが、これは近くの別の銀河の中心にあるブラックホールで太陽の 70 億倍の質量がある。SMBH の存在は様々な方法で観測的に検知できるが、近傍であれば周囲の星の運動を分解する直接的な方法が取られる。銀河系では中心部ごく周囲の星の軌道運動が数十年に渡って詳細に観測されており、SMBH の確実な証拠となった。この研究は 2020 年のノーベル物理学賞を受賞した。

これら SMBH はもちろんその起源が問題になるが、現在のところ確立した描像は存在しない。ひとつ重要かつ興味深い観測事実がある。それは、SMBH の質量がそれを宿す銀河の性質とよく相関していることである。例えば、渦巻き型銀河の星の分布には中心部にふくらんだバルジという構造があるが、このバルジの質量と SMBH 質量はおよそ 1000:1 の比例関係にある。ここで、SMBH の大きさとバルジの大きさが全く異なっていることに注意がいる。SMBH は例えば周囲の星の運動に影響する重力圏のサイズを考えると、例えば  $10^8$  太陽質量の SMBH に対して  $10^{19}$ cm くらいである。一方で、バルジのサイズはこの 1000 倍は大きく、一見物理的に影響しそうにないが何故か両者は相関している。こうした SMBH とその母銀河の関係は、よく「**SMBH-銀河の共進化**」と呼ばれ SMBH の起源を考える上でともに説明すべき基本的な性質と捉えられている。SMBH の起源はどうやら銀河の起源、形成と切り離して考えることは許されないようである。

上で述べた観測事実は基本的に我々のごく近傍、すなわち現在の宇宙ではそうなっているということである。例えば、ほとんど全ての銀河中心にある SMBH がいつ、どこで、どのようにそうなったか、という問題に迫るには昔すなわち遠方の宇宙にいくと事情がどう変わるかを知ることが大きな手掛かりになる。遠方の宇宙でどういう銀河にどういう SMBH が存在するか(又はしないか)が分かればよい。以下で述べるように実際そのような研究が最近精力的に行われており大きく進展している。

## 2. 宇宙最初の超巨大ブラックホール?

近傍の宇宙では銀河中心部の個々の星を空間的に分解し、その運動の様子から SMBH の存在を窺い知ることができた。ところが、遠方宇宙で同じ手法は使うことができない。望遠鏡の分解能の限界を大きく越えるし、感度の上でも個々の星の光を捉えることは難しい。しかし、ここでうまく具合に**クエーサー**という天体を使うことができる。クエーサーは略称で Quasi Stellar Object(日本語で準恒星状天体)を表す。これは元々謎の大光度点源として観測されていたのが、後に銀河中心部のごく小領域が銀河全体より明るく輝いていると分かった。この放射は今では **SMBH へのガス降着**が起源になっていると知られている。

今、何かの原因で SMBH の重力圏に落ち込んだ軌道角運動量を持つガスを考えよう。中心部に近づくにつれて遠心力が効くのでガスはブラックホールの周囲に円盤状に蓄積される。これを降着円盤と呼び、これが大光度で輝く。ここで起きるのは、円盤ではたらく乱流粘性によって、まず重力エネルギーが熱エネルギーに変えられ、さらに高温になった円盤から放射エネルギーとして出ていく過程である。この放射を我々が見ているのである。

クエーサーは非常に明るいので、非常に遠くにある SMBH の存在を観測的に知ることができる。当然、遠方になればなるほどクエーサーとはいえ暗くなるので、最遠方の天体を見つけることはいつでも難しい。しかし、技術の進歩によって今ではビッグバンから 10 億年以下しか経っていない時代にあるクエーサーも多く見つかっている。中心部にある SMBH の質量を推定すると、**驚くべきことに宇宙年齢 8 億年以下のごく初期の宇宙に、すでに  $10^9$  太陽質量を上回るような SMBH が存在することが明らかになってきた**。2010 年代に入って急速に観測が進み、すでにこうした天体が数十例知られるようになってきている。いわば、“宇宙最初の SMBH”に迫ることができる時代が近づいてきたのである。

### 3. SMBH の起源と宇宙最初の星の誕生

遠方宇宙の観測が SMBH の起源にどのような示唆を与えるか、その一つは時間に対する制約である。つまり、10 億年以下の間に、どうやって  $10^9$  太陽質量を上回る天体を作るのか、**時間が足りるのか**、という問題である。逆にこの制約を満たせない形成シナリオは排除できる可能性があるため、SMBH の起源に関する数少ない観測的制限と捉えることもできる。

クエーサーは SMBH へのガス降着で輝いていると考えられるので、ブラックホールはガスを吸い込んだぶん質量を増すはずである。そうこうしてブラックホールが成長して SMBH になるにせよ、最初の“種”のブラックホールの存在を考える必要がある。ブラックホールは太陽の数十倍とか質量の大きな星が一生を終えた後に残されるのだから、結局この問題は、宇宙のごく初期に一体どんな星が生まれて、その結果何太陽質量の“種”ブラックホールがどれくらい残されるのか、という問題と深く関わっている。

誕生する星の基本的な性質を決めるのはその質量である。我々の銀河系を含む近傍の宇宙では、どのような質量の星がどういう割合で生まれるのか観測によってよく分かっている。およそ太陽程度の星が最も典型的で、星質量が大きくなるにつれてその数は急激に減少する。銀河系では、知られている星の最大質量は太陽の 150 倍程度である。問題はこの描像が宇宙最初の星形成を考えた場合に、どのように変わるかということである。幸運な(驚くべき)ことに、ビッグバン直後の天体形成の初期条件は観測によって非常によく定まっているので、理論的な考察によって、こうした初代天体の形成過程に迫ることができる。あまり詳細には踏み込まないが、現在の標準的な描像では、宇宙最初のいわゆる初代星の典型的な質量は近傍宇宙に比べると非常に大きく、およそ太陽の数 10~100 倍の質量になるだろうと言われている。稀な場合を考えると、もっと質量の大きな太陽の 1~10 万倍の質量の星も形成し得るのではないかと議論されている。

最新の研究では、先端技術を駆使した数値シミュレーションによって、こうした初代天体の形成過程がスーパーコンピュータを用いて計算されている。図 1 は一例で、特に質量の大きな星同士の連星系の形成過程を示している。このような大質量星どうしの連星は、最終的には恒星質量ブラックホールどうしの連星へと進化する可能性がある。もしそうなれば重力波放射を伴う合体が起こるかもしれない。重力波を道具にして、宇宙最初の星の誕生に迫れる可能性があるのだ。

### 4. SMBH どうしの合体と重力波観測の将来

種ブラックホールからガス降着を経る SMBH 形成は有力な可能性の一つだが、唯一のものではない。これとよく対比される過程として、

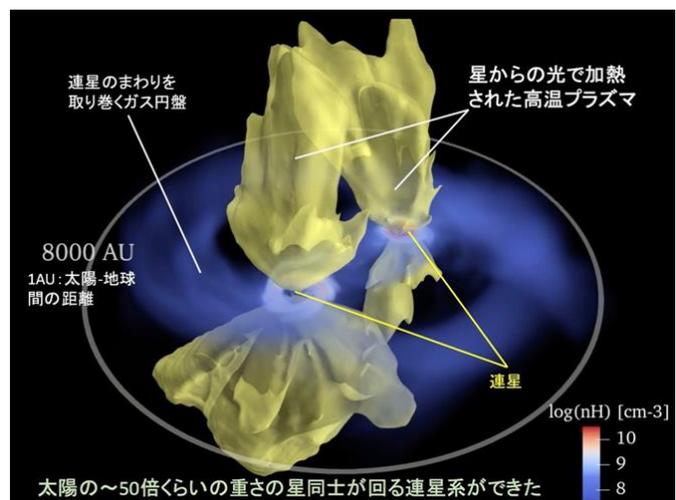


図 1:スーパーコンピュータによる数値実験で再現された宇宙最初に誕生する星どうしの連星の様子。ビッグバンから数億年後に、太陽の~50倍程度の質量の星を含む連星系が誕生する。連星をなす各々の星の周囲のガス円盤、さらに連星を取り巻く周連星ガス円盤が連星のまわりにまだ残され、それと垂直のガス密度の低い方向に星からの光に照らされた高温プラズマが広がっている様子がわかる。

**SMBH どうしの合体成長**が議論されている。重力波観測によると、太陽の数十倍のブラックホールどうしの合体が起こっているのは確かなのだから、これがもっと大質量のブラックホールにまで続いているのではないかと考えることは自然なことだろう。SMBH は通常銀河の中心に存在しているが、銀河同士の合体は実際に数多く観測されている。このとき、2つの銀河中心にそれぞれ SMBH があれば、SMBH どうしの連星が作られる可能性がある。

2つの SMBH が合体する場合、やはり非常に強い重力波放射が予想されている。ただし、この場合は恒星質量ブラックホールのときと比べて重力波の波長がずっと長く、現在稼働している数 km サイズの地上の観測施設では感度がない。そのかわり、人工衛星を利用した宇宙での重力波望遠鏡計画が提案されている。こうした計画のうち最も有名なものは米欧で長らく議論されてきた **LISA(Laser Interferometer Space Antenna)**である。250万 km 離れた3つの人工衛星を地球と同じ公転軌道に上げる計画である。既に2016年にパスインダーの打ち上げを成功裏に終えており、2034年以降の本格運用に向けて期待が高まっている。台頭著しい中国も最近、「天琴計画」と称した殆ど同じ計画を進めると発表した。この先激しい主導権争いが計画を加速させ、一気に研究が進む可能性がある。

## 5. まとめ

銀河中心に存在する SMBH の起源について、最近の理論・観測両面における進展、さらに重力波観測を踏まえた将来への展望を概観してきた。この問題は天体物理学全ての分野の中でも有数の未解決問題と言っても過言ではない。しかし、問題としては分かりやすく、多くの人々の興味をかきたてる魅力的な謎であり続けている。

特に最近注目が集まっているのは、宇宙ごく初期に存在する  $10^9$  太陽質量を越えるような SMBH の観測的発見である。ビッグバンから10億年足らずのこの時期に、なぜこのような大質量の天体が存在し得るのか、活発な議論が続いている。理論面ではこの発見は、いわゆる宇宙最初の星形成のより広い枠組みの研究を巻き込んで研究が行われている。SMBH 形成シナリオとしては、多岐に渡るものの、大きく分ければガス降着とブラックホール同士の合体が2本柱として議論されている。

SMBH どうしの合体にはこれまで観測的な制限がほとんどないが、ここで期待されているのが重力波、特に宇宙からの重力波観測を目指す将来観測である。急拡大する重力波天文学の力によって、そう遠くない未来にこの分野でも新しい扉が開かれようとしている。

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

### 京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 403 号室

編集人：平井颯

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: [usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp](mailto:usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp)