

初期宇宙の 巨大ブラックホールを求めて

松岡良樹 まつおか よしき
愛媛大学 宇宙進化研究センター(光赤外線天文学)

太陽質量の数10億倍にも達するような「巨大ブラックホール」は、宇宙にあまねく存在し、夜空を彩る星や銀河の運命を大きく変えてきたとされる。近年行われた様々な画期的観測によって、その実在はほぼ疑いないものになったと言えるだろう。これらの怪物の最初の種族は、ビッグバンからまもない初期宇宙で生まれると考えられている。私たちは、その誕生の現場を観測によって捉えることができるだろうか？ 初期宇宙における巨大ブラックホールの探査は、今どこまで進んでいるのだろうか？

巨大ブラックホールはいかにして生まれるか？

宇宙で観測されるブラックホールは、大きく2種族に分けられる。1つは恒星ブラックホールと呼ばれるもので、大型の星が超新星爆発による死を迎えた際、残骸として残される。それらは、無限に収縮し続ける星のコア(かつてコアだった部分)である。宇宙が誕生してから約138億年、多くの星が生まれ死んでいく中で大量の恒星ブラックホールが生成されたと考えられており、最も一般的なブラックホールとすることができる。おおむね太陽の10倍前後の質量をもつとされる。

もう1つの種族は巨大ブラックホールと呼ばれ、太陽の100万~100億倍の質量をもつ。恒星ブラックホールが銀河の中に遍在するのは対照的に、巨大ブラックホールはほとんどの場合、各

銀河の中心核に1つだけある。普段は静かに闇に潜んでいるが、ときどき近くを通りかかった物質を吸い寄せると、周辺領域から光などの莫大なエネルギーを放出し、宿主である銀河全体に大きな影響を及ぼすとされている。この発光現象を遠い地球から見ると、銀河中心のみが異常に明るく輝く「活動銀河核」として観測される。活動銀河核の中でも特に遠く明るく、中心核の光だけが針先の点のように観測されるものが「クエーサー」である(図1)。

巨大ブラックホールのような怪物がいつ、どこで、どのように誕生するのかは、現代天文学が抱える最大の未解決問題の1つである。宇宙初代星の死や巨大物質塊の直接崩壊など、いくつかの可能性が提案されているが、いずれも仮説の域を出ない。しかし少なくとも、それらの最初の種族

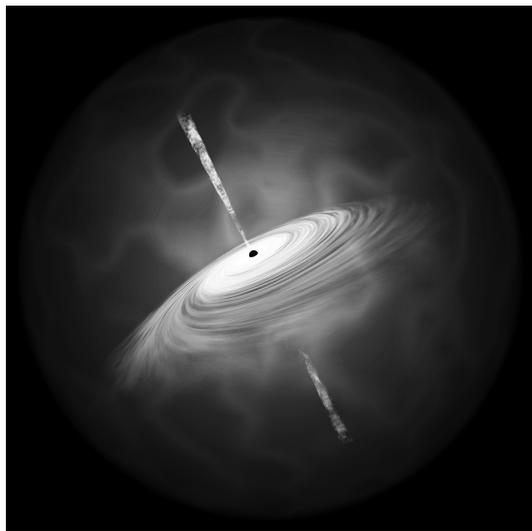


図1—クエーサーの想像図

銀河中心の巨大ブラックホールに吸い寄せられた周囲の物質が、光などの莫大なエネルギーを放つ。

Quest for supermassive black holes in the early Universe
Yoshiki MATSUOKA
E-mail: yk.matsuoka@cosmos.ehime-u.ac.jp
URL: <https://cosmos.phys.sci.ehime-u.ac.jp/~yk.matsuoka/>

がビッグバンからまもない初期宇宙で生まれることは、これまでの研究から確実視されている。そのような宇宙最初の巨大ブラックホールを、私たちは観測によって捉えることができるだろうか？その質量、数密度、周辺環境などを精密に測定することができれば、巨大ブラックホールの形成問題を解き明かす決定的な手がかりとなる。

オーストラリアでの失敗

私たちは2000年頃から20年近くにわたって、初期宇宙、すなわち遠方宇宙における巨大ブラックホールの探索を行ってきた。人類がもつ最先端の観測技術をもってしても、これは非常に困難な作業である。ブラックホール自体は光を放たないことに加え、Event Horizon Telescopeが成功したような影の検出や、近傍銀河で行われるブラックホール重力場での星の運動測定なども、遠方宇宙ではまったく不可能である。唯一の可能性として、活発に物質を飲み込みつつある巨大ブラックホールに焦点を絞り、その明るいクエーサーの光を捉える、という方法を私たちは採用した。次の困難は、期待される数密度の少なさである。これは、たった1つ見つけるだけでも広大な空を探索する必要があるということの意味する。その広大な空には、夥しい数の銀河系の星々も存在しており、遠方クエーサーの光はそれらに紛れ込む形になる。星も遠方クエーサーも針先の点のようにしか写らないので、どのようにして遠方クエーサーだけを選別するかという問題がさらなる困難を生む(図2)。

私たちはまず、オーストラリアのサイディング・スプリング観測所を拠点に探索を始めた。約10年間にわたって40インチ(口径1m)望遠鏡の広視野カメラを使い、計150夜にも及ぶ観測で、広大な空の画像データを撮り続けた。そこに写る星々の中から、色を手がかりにして遠方クエーサーの発見を試みた。遠方クエーサーからの光は宇宙膨張に伴って強い赤方偏移を受け、さらに宇宙空間の水素による青い光の吸収効果も加わって、地球に届く頃には極端に赤い色を示すようになる。

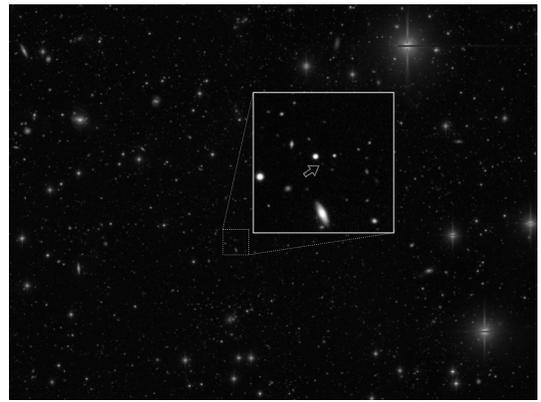


図2—遠方クエーサーの一例(矢印の先の淡い天体)
まわりに多数見られる銀河系内の星々と同様、遠方クエーサーは画像上で針先の点のようにしか写らない。それらをどのように区別するかが、探査のカギを握る。

そこで画像データの中から、極端に赤い点状天体のみを抜き出し、遠方クエーサー候補とした。ただしこれでは、同様の赤い色を示す低温度星なども候補に紛れ込んでしまう。そこで次に分光観測を行い、候補のスペクトルを計測した。スペクトルの形は天体種族に固有のもので、候補の中から本物の遠方クエーサーを判別し、さらに赤方偏移を測定して地球からの距離(すなわち、遠方クエーサーが存在した当時の宇宙年齢)を決めることができる。

こうして2000~2010年頃にわたって大規模な探査を行ったが、残念ながら、遠方クエーサーは1つも発見することができなかった。多くの候補を見つけ、精力的にスペクトルを計測したが、どれも低温度星などのハズレ天体であった。探査した空の面積は約1000平方度(満月5000個分)に及び、いま最先端の研究成果をもとに見積もっても、少なくとも数個の遠方クエーサーが画像データに写っていたはずである。しかしハズレ天体の紛れ込みがあまりにも多く、結果として大量の候補の分光観測を行うことになり、限られた望遠鏡使用時間の中で遠方クエーサーを見出すことができなかった。

二度目の挑戦

こうして一度は頓挫した遠方クエーサー探査だったが、私たちは諦めなかった。新しいチャンス

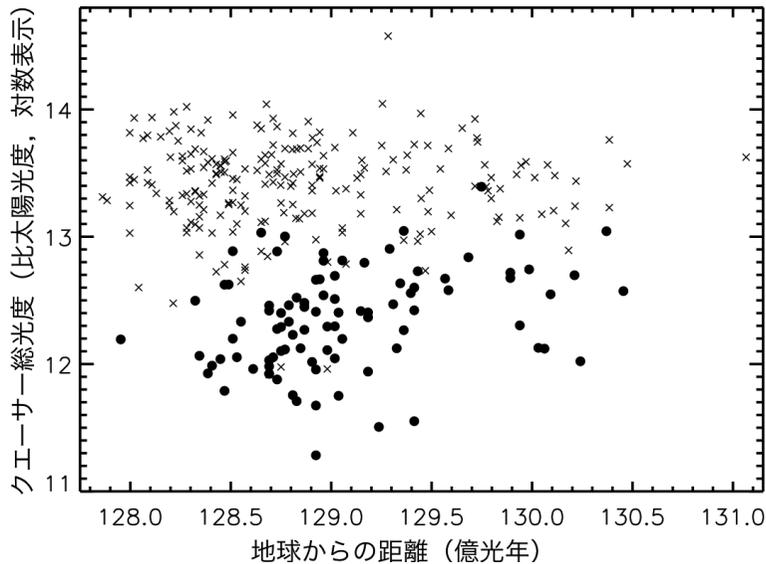


図3—現在までに人類が発見した最遠方クエーサー群

丸印が私たちのHSC探査で発見されたクエーサー、バツ印は他の研究グループが発見したクエーサーである。縦軸は底10の対数表示であり、たとえば12の目盛りは太陽光度の 10^{12} 倍を表す。

が訪れたのは、2010年代の初めである。日本が誇る世界最先端の観測施設、口径8.2mのすばる望遠鏡に、新開発のカメラ「Hyper Suprime-Cam (HSC)」が搭載されたのである。すばる望遠鏡はもともと主焦点を用いた広視野観測を得意としていたが、HSCの搭載によって、世界の追随を許さない圧倒的な広域探査能力を手に入れることになる。そこでHSCを用いて、計300夜もの大規模観測プロジェクトをやろうという話が持ち上がった。このプロジェクトはオールジャパンの体制で、台湾と米国プリンストン大学の研究者も加わって2014年に開始され、現在も継続中である。1000平方度以上にわたる広大な空で、極めて良好な感度・画質をもつデータが蓄積されつつある。その中には当然、遠方クエーサーも写り込んでいるだろう。

私たちは2014年に、HSCのデータを用いた遠方クエーサー探査を開始した。二度目の挑戦である。前回オーストラリアでは失敗したが、そのときの経験が無駄にせず、探査の様々な点を改良した。画像データから極めて赤い点状天体を選び出すという基本方針は変わらないが、遠方クエーサー

と様々な種類の低温度星が示す色をすべてモデル化し、画像データに写る各天体について、遠方クエーサーである統計的確率を導出することにした。またコンピュータと人の目によって二重に画像データのチェックを行い、超新星などの突発天体や太陽系小惑星、宇宙線シグナルなどが候補に紛れ込むことを防いだ。これらの工夫によってハズレ天体の数を劇的に減らし、分光観測によるスペクトル取得の効率を大きく改善することに成功した。

私たちが最初の遠方クエーサーを発見したのは、忘れもしない2015年9月14日である。このとき分光観測に使ったのは、スペイン領カナリア諸島に設置された大カナリア望遠鏡(口径10.4m)だった。大カナリア望遠鏡はキュー観測という制度を採用しており、詳細な実行プログラムを事前に準備しておけば、現地のスタッフが観測を代行してくれる。私たちは、HSCの初期データから選出した最も有望な候補をプログラムに記載して送っておいた。そして観測が行われた9月14日の夜が明け、スペクトルが送られてきたとき、そこに写っているのが紛れもなく本物の遠方クエーサー

であることは瞬時にわかった。オーストラリアでの試みを始めてから実に15年間、このスペクトルを探し求めてきたのである。

この最初の発見は、大きな突破口となった。1つ見つかったのだから、根気よく同じやり方を続ければ他にも見つかるはずである。また発見の実績ができたことで、潤沢な望遠鏡使用時間が私たちに与えられるようになった。本稿を執筆している2019年11月までで、すばる望遠鏡45夜、大カナリア望遠鏡16夜の観測を行い、計93個の遠方クエーサーを新発見している。図3に示すように、それらの距離は地球から128.0~130.5億光年に及ぶ。一方、この図から同時にわかるように、遠方クエーサーを探しているのは私たちだけではない。世界的な競争が行われており、現在最先端にいるのは3グループ——米国・アリゾナ大学を中心とするグループ、欧州・マックスプランク天文学研究所を中心とするグループ、そして私たちのグループ——である。しかし競争とは言っても、それぞれの狙いと戦略には違いがある。米国・欧州の2グループは主に口径4m以下の中小望遠鏡を使って、全天(約40000平方度)に迫るような非常に広い空を比較的低感度で探査し、最も明るく最も重い、極めて希少な巨大ブラックホールを探している。これに対して、私たちは口径8.2mのすばる望遠鏡で約1000平方度の空を丹念に高感度探査しており、明るさ、重さとも標準的な巨大ブラックホールを探している。私たちの探査対象こそが種族の大多数を占めるものであり、誕生した時により近い姿を保っていることから、巨大ブラックホール形成問題の解明に向けて最も重要な手がかりを与えると期待される。

もっと遠くへ

私たちの探査は、ようやく遠方クエーサーを(大量に)見つけ始めたばかりであり、それらの詳細な性質については今後の追観測を待たねばならない。すでに一部開始した欧州南天天文台・超大型望遠鏡(口径8.2m)などでの観測からは、質量や物質の飲み込み効率など、発見された巨大ブラックホー

ルの個性に大きなばらつきが見つまっている。またアルマ望遠鏡を用いた電波帯での追観測によって、それら巨大ブラックホールの宿主銀河について、質量や成長(星形成)率などの性質が明らかにされつつある。遠方クエーサーの明るさごとの数密度、光度関数と呼ばれる基本関数についても導出されており、巨大ブラックホール形成理論との比較が始まろうとしている。これらに加えて、私たちとは独立な研究グループによる追観測の計画もあちこちにあると聞く。これから10年ほどをかけて、私たちの発見を土台とする様々な追観測・研究が世界中で行われていくだろう。

いずれにせよ、これまでの探査が明らかにした最も重要なことは、130億光年の彼方、ビッグバンからわずか10億年以内の宇宙に、すでに多数の巨大ブラックホールが存在するという事実である。これまでに測定された様々な性質は、現在の宇宙にある巨大ブラックホールと基本的には変わらない。あらゆる観測が、それらの誕生の舞台がより遠方の宇宙にあることを指し示している。しかし強い赤方偏移と宇宙空間での水素吸収の効果によって、130億光年以遠の宇宙は、HSCなどで観測できる可視光では見通せない。これから先、2020年代に入ると宇宙空間での近赤外線観測を行うEuclid, WFIRSTなどの衛星ミッションが計画されており、それらの目指す超広域探査によって、さらなる地平が切り拓かれていくだろう。ビッグバンまで未踏の時代はあとわずか10億年程度であり、そのどこかに宇宙最初の巨大ブラックホールはある。ブレイクスルーはまもなく訪れる、かもしれない。

松岡良樹 まつおか よしき

天文学者。東京大学大学院で2009年に博士号を取得後、名古屋大学、米国プリンストン大学、国立天文台を経て、2017年から現職。主に銀河と巨大ブラックホールの形成・進化に興味をもち、現在は宇宙最遠のブラックホール探査で世界をリードする。2018年に日本天文学会・研究奨励賞、2019年に科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞を受賞。