

ALMAによる銀河の観測

谷口 義明

〈放送大学 〒261-8586 千葉県美浜区若葉 2-11〉

e-mail: yoshiaki-taniguchi@ouj.ac.jp



ALMAは2013年の開所から宇宙の電波観測の世界を激変させてきている。すでに500編以上の論文が出版され、銀河・宇宙論関係の論文数も200編に迫る勢いである（2016年12月1日現在）。私はサイクル0, 2, および3のパネル・ミーティング（プログラム審査会）に参加する機会もあった。そのときの感想を踏まえつつ、ALMAは銀河の研究でどのようなスタートダッシュを切ったか振り返ってみたい*1。

1. 銀河の研究

個人的な話で恐縮だが、私は銀河の研究に向いていない。何しろ、光度関数と2体相関関数があり好みではないからだ。それでも銀河の研究をやっているのは不思議なことだ。そんな私が天文学者をやられているのは、研究というビジネスが探偵稼業に近いからかもしれない。何しろ私の趣味は推理小説を読むことなのだ。

何か事件が起これば探偵は犯人を探さなければならぬ。例えば銀河の中心に巨大ブラックホールがあり、その周辺が輝いていたとする。まず、なぜ銀河の中心に巨大ブラックホールがあるのか？ 巨大ブラックホールを造った犯人（物理過程）を探ることになる。次に、なぜその周辺が輝いているのか？ ガス降着だとすれば、何がそれをドライブしているのか？ やはり、その犯人（物理過程）を探ることになる。

古今の推理小説を紐解くと、探偵稼業はなかなか難しい商売であることがわかる。同じ論理で語るわけにはいかないが、研究も難しい。どの研究も難しいが、宇宙の研究は特殊事情があって難し

さが増す。とにかく研究対象（本稿では銀河）が近くにないからだ。実験室で銀河を培養するわけにもいかない。体温を計るわけにもいかず、ましてや体重計に乗せられるはずもない。歯がゆい天体なのだ。

遠くの銀河で起こっている出来事の犯人を探すのは骨が折れる仕事だ。よほど良いメガネ（望遠鏡）をかけない限り、犯人は霞んでしか見えない。そして今、私たちはALMAという特上のメガネをもつことになった。果たして、銀河で起きているさまざまな事件を解決できるのだろうか？ 遠方銀河から近傍銀河まで、順を追って見ていくことにしよう。

2. 微細構造輝線

ALMAが動き始めたらやってみたいこと。その一つに微細構造輝線を用いた遠方銀河の研究がある。遠赤外帯で観測される代表的な微細構造輝線を表1にまとめた¹⁾。微細構造輝線はスピン軌道相互作用による原子やイオンのエネルギー準位が僅かなエネルギー差をもつ準位に分裂し、それらの準位間で遷移が起きるときに放射されるスペク

*1 本文中では敬称を略させていただきます。

表1 主な微細構造輝線.

| 輝線 | 遷移 | 励起温度 (K) | 臨界密度 (cm^{-3}) | 静止波長 (μm) |
|---------|-----------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|
| [C I] | $^3P_2 \rightarrow ^3P_1$ | 63 | 1.2×10^3 | 370.42 |
| [C I] | $^3P_1 \rightarrow ^3P_0$ | 24 | 4.7×10^2 | 609.14 |
| [C II] | $^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ | 91 | 2.8×10^3 | 157.74 |
| [O I] | $^3P_1 \rightarrow ^3P_2$ | 228 | 4.7×10^5 | 63.18 |
| [O I] | $^3P_0 \rightarrow ^3P_1$ | 329 | 9.4×10^4 | 145.53 |
| [O III] | $^3P_2 \rightarrow ^3P_1$ | 440 | 3.6×10^3 | 51.82 |
| [O III] | $^3P_1 \rightarrow ^3P_0$ | 163 | 5.1×10^2 | 88.36 |
| [N II] | $^3P_1 \rightarrow ^3P_2$ | 188 | 3.1×10^2 | 121.90 |
| [N II] | $^3P_1 \rightarrow ^3P_0$ | 70 | 4.8×10^1 | 205.18 |

遷移の項目にあるスペクトル項は $^{2S+1}L_J$ であり、 L, S, J はそれぞれ全軌道角運動量量子数、全スピン量子数、および全角運動量量子数である。 L は $L=0, 1, 2, 3, \dots$ に対して S, P, D, F, \dots という記号が与えられている。なお、臨界密度は水素原子との衝突に対する値である。電子との場合はこれらの値より低い。

トル線である。最も代表的なものは波長 $157.74 \mu\text{m}$ の[C II]輝線である(以下では[C II]158と略す。他の輝線も同様)。[C II]158は冷たい($<10^4 \text{K}$)星間ガスでは極めて有効なクーラントであるため輝線強度が強い。例えばCO($J=1-0$)の約千倍も強く放射されるのだ。これなら遠方の銀河の観測にも使えるだろう。実際、IRAMの30 m電波望遠鏡は赤方偏移 $z>1$ の銀河の[C II]158の検出に成功した。まだ、2005年のことだった²⁾。

遠方の銀河を観測する場合、表1の微細構造輝線はサブミリ波帯で観測されるので、ALMA時代には非常に強力な観測ツールになる。そして、ALMA時代に突入した。

私はサイクル0のパネルメンバーだったので多数の観測提案を見ることになった。予想どおりだった。 $z=5$ や 6 にある銀河の[C II]158検出を目的とする観測提案だらけと言っても過言ではなかった。私は一つの観測提案を除いて、軒並み低いスコアを付けた。サンチャゴで開催されたパネル・ミーティングでは他の委員の方々からクレームがきた。

「なんで、軒並み低いスコアを付けたのか？」

もちろん、重要性はわかる。気持ちもわかる。

なぜなら、すばる望遠鏡が動き出したとき、私たちは遠方銀河のライマン α 輝線の探査に明け暮れた。主焦点カメラSuprime-Camの優れた広視野撮像能力のおかげでどんどん見つかった。ただ、冷静に考えれば多数の星生成銀河が遠方宇宙に見つかっただけで、なぜそれらの銀河が激しい星生成を起こしているのかはわからない。冒頭に述べた犯人探しという観点から言えば、容疑者は見つかったものの犯行の動機や手口はわからないことに相当する。

ただ、すばる望遠鏡の観測が遠方宇宙にある若い銀河の研究に多大な貢献をしたことは事実だ。その意味では、ALMAができれば、やはり[C II]158で探査すべきなのである。私が低いスコアを付けたのは、重要性はわかるが工夫がないからだ。検出した後の研究戦略がないのだ。星生成率を求めるだけ。空間的に分解して強度分布や速度構造がわかったとしても、それだけのことだ。そもそも近傍銀河の分子ガスの観測ではある程度の精度で情報が得られているが、依然として星生成を引き起こす犯人は特定できていない。結局、何かブレイクスルーとなる秘策(犯人逮捕の決め手となる動かぬ証拠)がなければ、問題解決には程遠いということだ。しかし、まずは挑戦ということで、多くの[C II]158による観測提案は採択された。成果についてはすでに出版された論文に譲ることにしよう^{*2}。

さきほど“一つの観測提案を除いて”と記したが、その提案はHIMIKOを観測ターゲットにしていた。HIMIKOはすばる望遠鏡のSubaru-XMM-Newton Deep Field((SXDF)で大内正己らによって発見された赤方偏移 $z=6.596$ にある巨大ライマン α 輝線銀河だ³⁾。3個の成分からなり、サイズは約20 kpc [図1(a)]。とても遠方の宇宙にある銀河とは思えない。

ライマン α 輝線銀河の中にはライマン α ブロブ(Lyman α blob; LAB)と呼ばれるものがある。SSA22天域で最初に発見されたLAB1^{*3}とLAB2

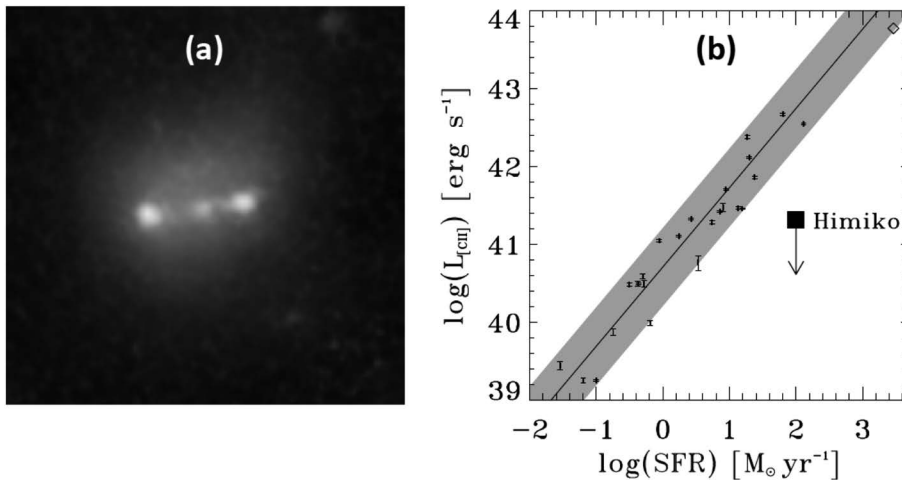


図1 (a) すばる望遠鏡, ハッブル宇宙望遠鏡, スピッツァー宇宙望遠鏡による HIMIKO のイメージ, (b) [C II] 158 輝線光度と星生成率ダイアグラムにおける HIMIKO と他の銀河との比較. 直線は近傍銀河における関係. (a) の出典: <http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA17558>

はサイズが 100 kpc 程度もあるが, 赤方偏移としては $z \sim 3$ 程度の宇宙にある⁴⁾. また, 3 個の明瞭なクランプ構造も HIMIKO を特別なものになっている. HIMIKO のようなエクストリーム・ケースの天体は是が非でも ALMA で観測したほうが良いに決まっている. 標準的なライマン α 輝線銀河 (Lyman α emitters; LAEs) やライマンブレイク銀河 (Lyman break galaxies; LBGs) を観測することも大切だが, それらよりは HIMIKO は何か新しいことを語ってくれる可能性が高いからだ.

しかし, 一つ問題があった. サイクル 0 では HIMIKO に関する観測提案が独立に 4 個も提案されたからだ. ターゲットが HIMIKO だけにいずれもスコアは高く付けられた. しかし, すべてを採択するわけにはいかない. どの提案を採択する

か. その判断はパネルチェアだけが出席する最終日の委員会に委ねられた. そして軍配は HIMIKO の発見者である大内正己に上ることになった. 狙うは [C II] 158 の検出だ.

そして, その結果が出た⁵⁾. No detection! 何と HIMIKO では [C II] 158 が受からなかったのだ [図 1(b)]. HIMIKO には拡がったライマン α 輝線領域がある [図 1(a)]. 星生成率も年間あたり太陽 100 個分. 電離ガス領域のみならず, 大質量星に照らし出された PDR があるはずだ. それなのに, 受からなかった.

問題はこれをどう解釈するかだ. 電離度が高くて C^+ イオンが少なく, ほとんどが C^{++} 以上になっているのか? しかし, HIMIKO には活動銀河中心核の兆候はなく, 主たる電離源は星だろ

^{*2} [C II] 158 の情報を読み解くのはそれほど単純ではない. ご存じのように炭素の電離ポテンシャルは 11.3 eV で水素 (13.6 eV) に比べて低い. そのため, 完全電離領域のみならず, 部分電離領域や中性領域でも放射される. 近傍銀河の観測によれば, 主たる放射領域は星生成領域にある大質量星の紫外光によってできた光解離領域 (photodissociation region) あるいは photon dominated region でいずれも略称は PDR) であることがわかっている. また, 活動銀河中心核や超新星爆発によって生成された熱いプラズマから放射される X 線によって加熱された領域 (X-ray dominated region; XDR と略される) からも [C II] 158 は放射される.

^{*3} LAB1 については ALMA による 850 μm 連続光の観測がある. 従来, 一つのサブミリ波源とされていたものが 3 個のクランプに分解されて観測されたが, これも ALMA の威力を示す成果である⁶⁾.

う。だとすれば残る可能性の一つは、炭素そのものの存在量が少ないことだ。つまり、化学進化が進んでいない、極めて若い銀河という解釈だ*4。これは面白い。ついに人類は生まれたての銀河を垣間見たのだろうか？ 今後のさらなる研究が必要であることは論を待たないが、銀河の誕生過程の研究に展望が見えてきたように感じた。ALMAの醍醐味。いきなり、それが見えてきたのだ。

そして、サイクル0にはもう一つ興味深い観測提案があった。私の属しているパネルとは違うパネルで審査されていたので、結果は最終日に判明した。採択。その観測提案は長尾透らのものだ。ターゲットは赤方偏移 $z=4.76$ にあるサブミリ波銀河 (submm galaxies; SMGs) の一つである LESS J033229.4-275619だ*8)。

私の関心をひいたのは、彼らの観測戦略である。[C II]158のみならず [N II]205を観測し、その強度比から化学進化の状態を探る点にあった。炭素や酸素はヘリウム原子核 (α 粒子) から直接生成されていくので一次元素 (primary elements, あるいは α element) と呼ばれる。一方、窒素はCNOサイクルのエンド・プロダクトとして生成される。原料になるのは一次元素なので、窒素は二次的に生成されるという意味で二次元素 (secondary elements) と呼ばれる。進化が進んでいなければ窒素は相対的に少ない。つまり、[N II]205/[C II]158比は進化の時計の役割を果たしてくれるのだ*5。赤方偏移が大きくなると、静止系の可視光スペクトルによる分光診断ができないので、彼らの戦略はとて有効になる。

彼らの得た結論は [N II]205/[C II]158比は近傍銀河の値と同じということだった。つまり、

LESS J033229.4-275619はすでに十分化学進化を経た高赤方偏移銀河であったことになる。高赤方偏移クエーサーでも化学進化が進んでいることがわかっているが*9)、まさにそれと同じ傾向を示すことがわかったのだ。おそらくは、銀河の進化はバリオンの質量で支配されているのかもしれない。つまり、重い銀河ほど進化が速い。いわゆるダウン・サイジング*6のシナリオと合致する。しかし、私たちはまだその理由を知らない*7。

さて、微細構造輝線でもう一つ。最後は [O III]88だ。井上昭雄らのグループはこの輝線を使えば赤方偏移 $z=8$ 以上の銀河でも観測できることを提案していた*14)。できるだけ遠い銀河を見る。これは銀河形成論のみならず宇宙再電離の探求にも重要だ。そして、彼らが選んだターゲットはSXDSF-NB1006-2。赤方偏移 $z=7.2$ のライマン α 輝線銀河だ。結果は大成功*15)。[O III]88輝線検出の世界記録の達成だ。この項目については本特集号に井上昭雄自身による解説があるので参照されたい。

なお、日本人で初めて [O III]88微細構造輝線を検出したのは高見英樹らのグループである*16)。口径50 cmのパルーンで打ち上げた赤外線望遠鏡BIRTで銀河系の電離ガス領域であるRCW38を観測したものだ。ちなみに [O III]52も同時に観測しており、お見事としか言いようがない。それもまだ、今から30年も前のこと。1987年のことだった。確かに、時は経ったのだと思う。

3. ディープ・サーベイ

ディープ・サーベイ。心ひかれる言葉だ。私は長年ディープ・サーベイの世界で仕事をしてき

*4 赤方偏移 $z\sim 5-6$ のライマン α 輝線銀河で [C II]158が検出されている銀河でダストが系統的に少ないという報告もある*7)。ダスト形成も含めて化学進化があまり進んでいない銀河たちが見えてきたのだろう。

*5 窒素の電離ポテンシャルは14.0 eVと高いので、電離度の影響は受けることに注意する必要がある。

*6 重い銀河ほど進化が速いという表現を用いたが、軽い銀河のほうが星生成の継続するタイムスケールが長いと表現しても良い*10),*11)。なお、活動銀河中心核についても同様の傾向が確認されている*12)。

*7 赤方偏移 $z=5-6$ の典型的なLBGでは [N II]205が極端に弱いことが報告されている*13)。金属量やダスト量が少ないことと関連されて議論されているが、大質量銀河でない効果もあるのかもしれない。

た。ESAの赤外線宇宙天文台（ISO）での中間赤外線（波長7ミクロン）と遠赤外線（波長90ミクロンと170ミクロン）、ジェームス・クラーク・マックスウエル電波望遠鏡（JCMT）でのサブミリ波（波長850ミクロン）、すばる望遠鏡のすばる・ディープ・フィールドでの赤方偏移 $z=6.6$ 銀河探査、ハッブル宇宙望遠鏡の基幹プログラムである“宇宙進化サーベイ（通称COSMOS）”、そしてESOのVISTA望遠鏡での近赤外線ディープ・サーベイULTRAVISTA、ESOのVLTでの可視光分光サーベイVUDS。よくやってきたものだと思う。では、なぜディープ・サーベイに心ひかれるのか？ それは、ディープ・サーベイは答えを決めてやる仕事ではないからだ。やってみないとわからない。だから面白いのだ。当然のことながら、ALMAもディープ・サーベイに向かわなければならない。

しかし、還暦を過ぎた私が出る幕ではない。幸い、河野孝太郎らがALMAディープ・サーベイを一貫してリードしてくれている。すでに波長1.1 mm帯でのディープ・サーベイはSXDFとSSA22の天域で行われ成果が出た¹⁷⁾⁻²¹⁾。本特集号では山口裕貴による解説があるので、そちらを参照されたい。ちなみに、日本チームの最新論文²¹⁾では、ついにALMA Deep Field (ADF)という言葉が使われた。約10年前のことだが、すばる望遠鏡でGOODS-Southの撮像サーベイをしていたころ、ADFはどの天域になるのだろうかと考えていたことがある。答えはGOODS-South（ハッブル宇宙望遠鏡のUDFでもある）ではなく、SSA22になった。ところで、この論文の筆頭著者は梅畑豪紀である。この名前を優先すると、何とUDFになる。ちなみにファーストネームはHidekiなので、合わせるとHUDFになるではないか。まさかの展開だ。なお、この大発見は松田有一によってなされた。

ディープ・サーベイは、イメージング・サーベイだけではなく、ブランク・フィールドにおける

スペクトラル・スキャン・サーベイもありだ。最近、HUDF（Hubble Ultra Deep Field）でのサーベイが出始めた²²⁾。プロジェクト名はASPECTS（=the ALMA SPECTroscopic Survey in the HUDF）。波長1 mm帯と3 mm帯。[C II] 158 m輝線なら赤方偏移 $z=6-8$ の銀河が見つかる可能性がある。現在のところ約20個の天体が見つまっているが、それらの素性を調べるのは今後の課題だ。スペクトラル・スキャンは何が見えてくるかわからないという楽しさがある。今後の進展に期待したい。

ここで一つユニークな試みを紹介しておこう。それは松田有一によるものだ²³⁾。彼らはサイクル0のアーカイブデータを用いて、赤方偏移 $z=4.5$ の[C II] 158輝線天体の探査を行った。有意な天体は検出されなかったが、サイクル1以降のデータを解析していくことで、将来的には $z=4.5$ における星生成率密度に対して独立な制限を与えることができるかもしれない。アーカイブデータの活用で思わぬ宝物を見つけることができるとすれば、それもALMAに秘められたパワーと言えらるだろう。

ディープ・サーベイは未踏の荒野に挑む人類の果てしなき挑戦である。そのため、人類はより高性能の望遠鏡を作ってこのフロンティアに挑戦し続けてきている。しかし、人類がどんなに頑張っても、自ずと望遠鏡には性能の限界がある。ところが、宇宙は人類にとっても優しい。天然の望遠鏡を宇宙に仕込んで人類の手助けをしてくれるからだ。それは重力レンズ望遠鏡だ。アルベルト・アインシュタインの一般相対性理論で予言されたものだが²⁴⁾、当のアインシュタインは宇宙で実際に観測されることはないと思っていたようだ。しかしながら、原理的には遠方宇宙にある天体はすべて、多かれ少なかれ重力レンズ効果を受けているはずだ。そして、アインシュタインの予測は1987年に敗れた。銀河団Abell 370で初めて重力レンズ現象が観測されたからだ²⁵⁾。これは“強い重力レンズ効果”だが、その後“弱い重力レン

ズ効果（ウイーク・シアー）”も有用であることが指摘され²⁶⁾、宇宙のダークマターの分布の研究に利用されるようになった²⁷⁾。強い重力レンズ効果の場合、レンズ効果が最大になる臨界線（caustic line）のエリアでは増光率が数十倍にもなり、約4等級も暗い天体が観測されることになる^{*8)}。そのため、ハッブル宇宙望遠鏡によるディープ・サーベイではこの効果に期待して、ハッブル・フロンティア・フィールド（Hubble Frontier Fields）を展開してきている²⁸⁾。ALMAでも早速この天域で波長1.1 mm帯での探査が進められている²⁹⁾。まだ臨界線近傍でサブミリ波銀河が受かってはいないが、今後の進展には大いに期待がもてる。

最後にもう一つ関連する話題に触れておこう。ディープ・サーベイの目的は単に超遠方の銀河を発見するだけにとどまらない。宇宙を観測すると銀河などの独立した光源のほかに、背景放射と呼ばれるものがある。ビッグバンの名残として有名なのは宇宙マイクロ波背景放射だが、どの波長帯でも観測される。その中で、起源が不明なものとして宇宙赤外線背景放射（Cosmic Infrared Background; CIB）がある。私もこの起源については関心をもっていたが、まさかALMAによって一気に解決を見えるとは思っていなかった。

藤本征史らはALMAのアーカイブデータを用いてこの問題に挑戦した³¹⁾。約900日に及ぶデータを解析したが、必要なポイントは重力レンズ効

果で増光されたSMGも検出したことだ。すると、可視光や近赤外線の観測では見えない、暗いSMGが見つかった。今までの探査で見つかったSMGの明るさは1 mJy^{*9)}程度だが、0.02 mJyのものまで検出できたのだ。これらの暗いSMGの寄与を考慮すると、CIBの全強度を説明することができる。つまり、CIBの起源は暗くて検出されていなかった銀河の放射の集積だったのだ（図2）。

この成果はALMAの重要な研究成果として歴史に残るだろう。その証拠に、16年1月の公表にもかかわらず、すでに20回以上も引用されていることがその証左だ。国際研究会で積極的に発表していることもプラスに働いていることは間違いない^{*10)}。

しかし、一気に藤本征史らの研究に至ったのではない。CIB解決への扉を開けたのは廿日出文洋らの研究だった³³⁾。“Faint End of 1.3 mm Number Count Revealed by ALMA”という一編の論文。この論文が道をつけたのだ。Number Count。これは銀河計数法と呼ばれる研究手法で、図2の下段に示したものがその典型的な結果である。この手法は銀河の進化を調べるために80年代までは、可視光帯でのディープ・サーベイで多用されたものである³⁴⁾。

廿日出文洋らの研究は、最初からCIBの解明に向けて行われたものではなかった。彼らは赤方偏移 $z \sim 1.4$ の星生成銀河の性質を調べるために波長

^{*8)} ハッブル宇宙望遠鏡によるディープ・サーベイの限界等級は29等（AB）だが、重力レンズ効果を使えば33等までいくことを意味する。TMTの限界等級に匹敵する。ただ、それでも初代星を見るには、道が遠い。太陽質量の500倍の初代星が赤方偏移 $z=20$ にあるとすれば、中間赤外線（波長約5ミクロン）帯での等級は39.3等だ³⁰⁾。絶望的に暗い。だが、私は楽観している。宇宙は人類に優しいからだ。あの手この手を使って宇宙は私たちの初代星の姿を見せてくれると信じている。もちろん、もう少し先のことになるだろう。

^{*9)} 電波強度の単位で1 Jy（ジャンスキー） $=10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ 。銀河系の中心からの電波を初めて同定した無線技術者のカール・ジャンスキー（Karl Jansky, 1905-1950）に因む。1 mJy=0.001 Jy。

^{*10)} 藤本征史、ニック・スコビル（Nick Scoville）、そして私は良い友人関係を構築してきている。16年9月某日、カリフォルニアから一通のメールが届いた。藤本征史からだ。「明日講演があり、そこでニックと一緒に写真を見せて笑いを取りたい」私は急いで、写真を選んで送った。後日、講演は成功裏に終わったと聞いて安堵した。ニックからもメールがきた。「セイジのトークはナイスだった」研究会の講演で最初に聴衆を和ませるために見せるスライドを用意する。キューと呼ばれるやつだ³²⁾。これを用意する心掛は見習いたい。

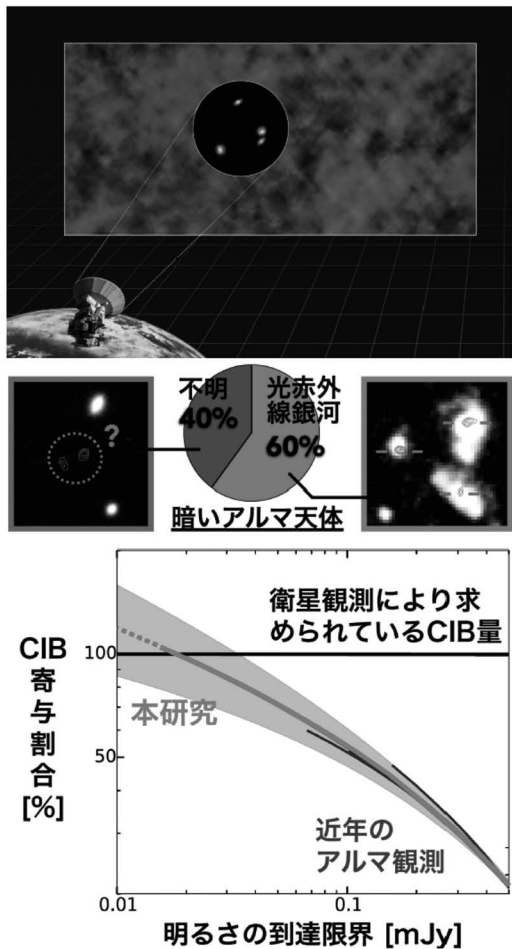


図2 (上) ALMAがCIBの起源である暗いSMGとして同定した様子を示す概念図、(中) ALMAで見つかった暗いSMGのうち、40%は可視光や近赤外線では見えない銀河である。(下) CIBへの寄与とSMGサーベイの検出限界との関係。
<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201603107894.html>

1.3 mmで観測した。すると、観測しようとしていた銀河のほかに、予想外に暗いサブミリ波銀河が15個も見つかったのだ。彼らはこれらこそがCIBの担い手ではないかと見切ったのだ。この先駆的な発見は業界で絶賛されている³⁵⁾。そして藤本征史らの大成果につながったということだ。数十年の謎が僅か3年で解決されるものだろうか。ALMA、恐るべし。

4. 宇宙史の正午

高赤方偏移宇宙から一足飛びに近傍銀河の話に移るわけにはいかない。ご存じのように、宇宙は赤方偏移が $z \sim 2-3$ で星生成率密度のピークを迎える³⁶⁾。そのため、この時代は宇宙史の正午(cosmic noon)とも呼ばれ、まさに銀河進化の花形時代だと考えられている。その意味で、この時代を極めることは銀河進化を極めることにも直結する。

この分野は来るべきALMA時代を見据えて、日本が国際協力のもとアタカマで運用を開始した口径10 mの電波望遠鏡ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) によって道が切り開かれていた。田村陽一らはミリ波ボロメーター・アレイであるAzTECカメラを用いて、波長1.1 mm帯でSMGの探査を行った³⁷⁾。天域は赤方偏移 $z=3.1$ の原始銀河団が見つかったSSA22。彼らは原始銀河団のコア領域にSMGが密集していることを突き止めた。その領域にはすばる望遠鏡による探査でLAEも密集していることがわかってきた。つまり、ダストに覆われた銀河(SMG)も覆われていない銀河(LAE)も、あたかもシンクロして進化しているのだ。誰も予想しなかった事実である。

そして、この先駆的な努力が、梅畑豪紀らが行ったSSA22天域でのSMG探査へとつながっていったのだ¹⁹⁾。SMGの放射するサブミリ波は、大量に生成された大質量星に温められたダストが放射する遠赤外線が、赤方偏移のためサブミリ波帯で観測されるものだ。

SMGの中にはモンスター銀河と呼ばれる種類がある^{*11)}。星生成率は年間あたり太陽の数百倍から千倍もの質量もあり、大量にあるダストで母銀河が隠されている。そのため、電波で探査するしかない。実際に発見されたSMG(モンスター銀河)を見てみると、ALMAでは明瞭に検出されているが、すばる望遠鏡の可視光イメージでは

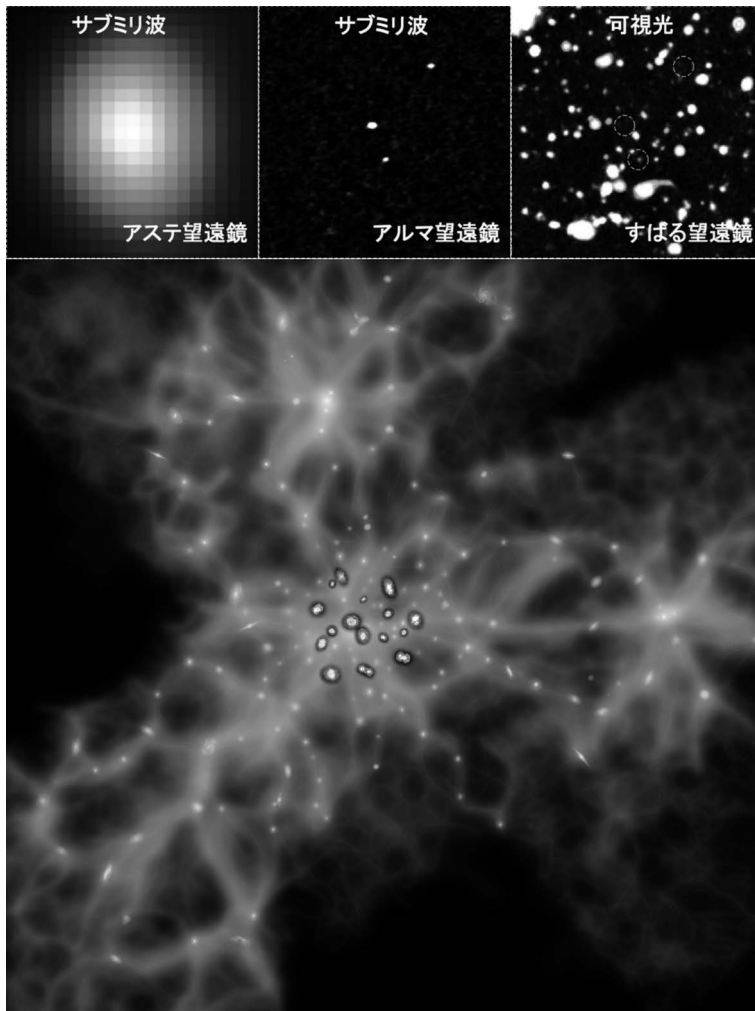


図3 (上) SSA22天域で発見されたSMGの例。アステ望遠鏡では一つのSMGとして見えていたが(左), ALMAでは3個の独立したSMGに分解された(中央)。一方, すばる望遠鏡の可視光のイメージではSMGは見えない(右)。(下) 約5億光年に及ぶ大規模構造の中でSMGが分布する様子 [これはイラストである]。
<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/56.html>

見えていない(図3)。SSA22天域には赤方偏移 $z \sim 3$ に大規模構造があるが, SMGはまさに銀河の個数密度の高い領域に集中していることがわかってきた。宇宙史の正午にふさわしい現場が見えてきたことになる。

最後に, 重力レンズ効果の偉大さを物語る観測を紹介しておこう。ターゲットはハーシェル赤外線宇宙望遠鏡のH-ATLAS (Herschel Astrophysical Terahertz Large Area Survey) プロジェクトで発見されたSDP.81という名前の銀河だ。赤方偏

*¹¹ モンスター銀河という呼び名は2008年に発見された赤方偏移 $z=4.6$ にあるCOSMOS J100054.13+023434.9に対して初めて使われた³⁸⁾。ベビーブーム銀河とも呼ばれる。しかし, 2008年に“モンスター銀河狩り”(拙著, NTT出版)という書籍が刊行されているのは驚きである。しかし, この書名は私が付けたものではない。命名者は池内了である。感謝するしかない。

移は $z=3.042$. SMGの一つだ. この銀河のほぼ視線上に赤方偏移 $z=0.3$ の銀河がある. SDP.81はこの銀河の影響で強い重力レンズ効果を受けている [図4(a)]. 田村陽一らはALMAの長基線キャンペーンで得られた波長1.0, 1.3, および2.0 mm帯でのデータを使い, なんと視力13,000でSDP.081の超高解像を得た³⁹⁾. 視力13,000だと東京スカイツリーから富士山の山頂にある米粒を見極めることができる (4.6ミリ秒角). 子どもの頃, 視力2.0で自慢にしていたが, 馬鹿馬鹿しくなる.

この視力はALMAだけの力で達成されたものではない. 重力レンズ効果のおかげで達成できている [図4(b)]. 図4(c)を見るとわかるように, 近傍銀河の巨大HII領域 (M 33にあるNGC604)と同程度に, その姿が見て取れる. これは驚き以外の何者でもない.

また, その超高解像のイメージのおかげで, 精密な重力レンズ・モデルを作り, 観測データと比較することができる. その結果, レンズ源となっている赤方偏移 $z=0.3$ の銀河の中心には太陽の3億倍の質量をもつ超大質量ブラックホールがあることもわかった. 余録にしてはさすがの結果だ. 今後も, 長基線キャンペーンをどんどん進めて欲しい.

ところで, 重力レンズ効果をややクローズアップした感があるが, ALMAは裸眼でもすごいことを言い添えておこう. 五十嵐 (いからし) 創らは, ASTEのサーベイで見つかった赤方偏移 $z\sim 3-6$ のSMGを1.1 mm帯で観測した⁴⁰⁾. その結果, 半径が1 kpcにも満たないコンパクトな星生成銀河であることを突き止めた. これらが進化するともう少し手前の赤方偏移 $z\sim 2$ にあるコンパクトで静穏な (星生成を起こしていない) 銀河に進化していくのかもしれない. コンパクトで静穏な銀河の起源は謎だったので, 少し光明が見えてきた. 重力レンズの助けがなくてもALMAはここまでできるのだ.

なお今回の特集には, 伊王野大介によるSMGsに関する解説もあるので, 併せて参照されたい.

5. 近傍銀河

ようやく近傍銀河の番だ. ところで, ここまで記事を書いてきて, 銀河団という言葉が出てこないことに気づく. SSA22のところで原始銀河団が出てきたが, やや寂しさを感じる. 昔, 天文学会のセッションには銀河・銀河団というものがあり, 銀河団には憧れにも近い印象をもっていた. おとめ座銀河団やかみのけ座銀河団がなくなったわけではない. しかし, 宇宙の大規模構造が認識されてから, 高密度領域や低密度領域という言葉が好まれるようになってしまった. 銀河団の対局の環境として“フィールド”という言葉が使われていたが, 今や死語になりつつある. 特別な構造がない天域を“ブランク・フィールド”と呼ぶが, この言葉にかすかに名残がある程度だ.

ということで, 銀河団にまつわる話題を一つ紹介しよう. 銀河団の名前はRX J1347.5-1145. 赤方偏移は $z=0.451$. これで近傍かと思われるかもしれない. ディープ・サーベイを始めた頃, 私にとって $z>5$ しか興味がなかったのも, $z<5$ は近傍だった. UDFで $z>10$ の銀河が見つかり始めた頃からは $z<10$ が近傍だと思っている. ということでお許し願おう.

この銀河団のキーワードはスニャエフ・ゼルドビッチ効果 (Sunyaev-Zel'dovich effect; SZE) だ. 宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background radiation; CMB) の光子が銀河団を通過すると, 銀河団内に存在する高温の電子と相互作用し, 逆コンプトン散乱のためCMB光子は高エネルギーにシフトする. そのため, 電波で銀河団を観測すると, CMBの揺らぎ具合から銀河団内のプラズマの様子がわかる. この現象をSZEと呼ぶ⁴¹⁾.

RX J1347.5-1145はX線で非常に明るい銀河団として知られていた. つまり, 高温の電子がた

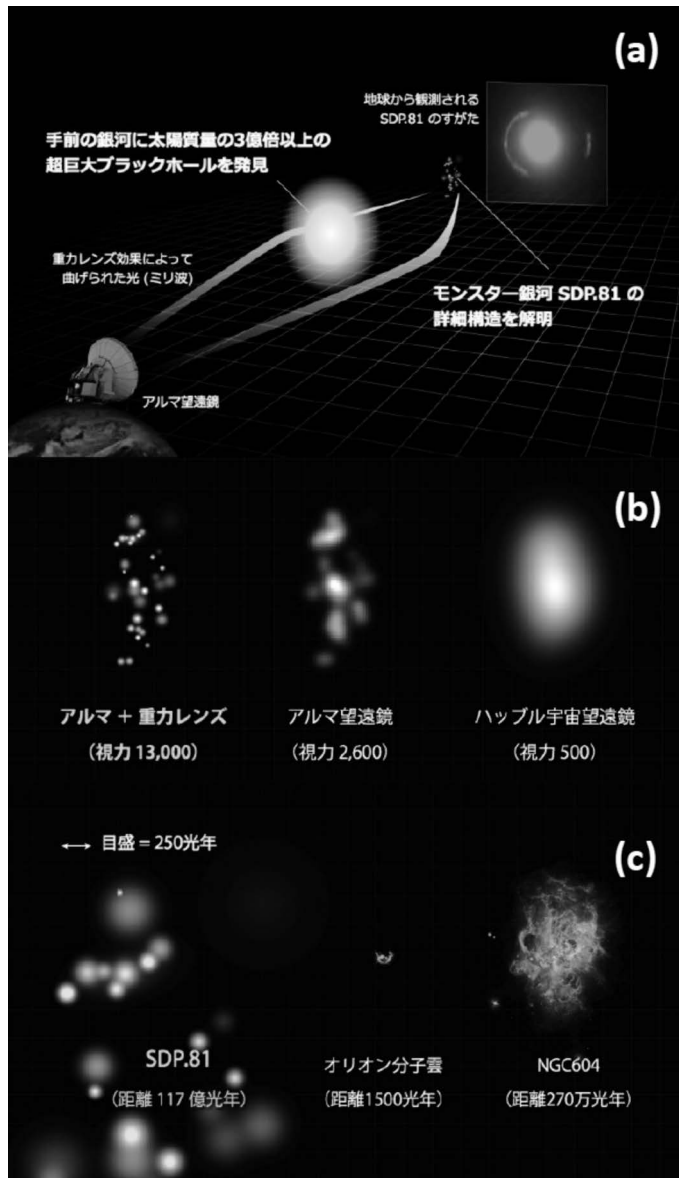


図4 (a) 重力レンズ効果で解明されたSDP.81とレンズ銀河の性質の概要, (b) 左からALMA+重力レンズ, ALMAのみ, そしてハッブル宇宙望遠鏡を用いたときの視力の比較, (c) 分解されて見えてきたSDP.81の内部構造. 比較のため銀河系のオリオン分子雲とM33の巨大HII領域であるNGC 604を同じ実スケールで比較してある.

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/29.html>

くさんあるので, SZEの観測にはうってつけの銀河団である. そのため, 野辺山宇宙電波観測所の45 m電波望遠鏡に搭載されたボロメーター・アレイNOBAによる観測などが90年代から始めら

れていた. ところがチャンドラX線天文台で得られたホット・プラズマの分布とSZEの結果が合わず, なぜ両者の空間分布にズレが生じているのか謎が残されていた.

もう15年ぐらい前の話だが、東北大学天文学教室に勤務していた頃、当時大学院生だった小松英一郎がSZEの観測でJCMTに出かけるという話を聞いて驚いたことがあった⁴²⁾。当時私がJCMTでやっていたのは近傍銀河のCO($J=3-2$)というありふれた観測だったので、うらやましく感じたものだ。しかし、彼らのJCMTでの観測でも謎は解明されなかった。

そこで、ALMAの出番だ。小松英一郎らは満を持してこの謎に挑んだ⁴³⁾。そして謎は見事に解明された。ALMAで新たに得られた結果はX線の観測から評価された電子の圧力分布と一致した。ようするに今までの電波のSZE観測は角分解能が足りなかったのだ。ただ、この観測での角分解能は5秒角である(20 kpcに相当)。しかし、今までの観測が数十秒角以上だったことを考えると格段の進歩だ。実際、このSZEを調べた観測では史上最高の角分解能を達成した^{*12}。ALMAで見えてきたホット・プラズマの分布は複雑であり、おそらくこの銀河団は衝突・合体による激しい動的な進化の途上にあるのだろう。かくして、ALMAは銀河団の研究でも大活躍している。

ここで、本当の近傍銀河に戻ろう。近傍銀河なら従来の電波望遠鏡でもいろいろなことがわかるのではないかと。そう思うかもしれない。しかし、それは違う。私自身、野辺山の45 m電波望遠鏡や干渉計(NMA)、JCMTの15 m電波望遠鏡やFCRAO(Five College Radio Astronomy Observatory^{*13})の14 m電波望遠鏡で近傍銀河の観測をしたことがある。主としてスターバース

ト銀河や活動銀河中心核をもつ銀河のCO分子の観測だが、空間分解能はざっと1 kpcである。スターバーストならまだしも、活動銀河中心核へのガス降着は1 pc以下のスケールで起こっている現象なので、とても歯が立たない。いくつか論文を書いたものの、何となくスッキリとはしなかった。隔靴搔痒。まさにそんな感じの観測で、とても銀河の活動性の本質には迫れそうもなかった。そのため、90年代中盤には電波を離れ、ISOによるディープ・サーベイに転じたのである。ところが面白いもので、その縁でJCMTのSCUBA^{*14}が登場したとき、人類初の850 μm 帯でのディープ・サーベイに参加できたのは望外の幸だった⁴⁴⁾。なぜなら、このとき、人類は初めてSMGを見たからだ。閑話休題。

ご存じのように、ALMAによる近傍銀河の観測成果はどんどん出てきている。スターバースト、活動銀河中心核、またその関連で合体銀河の観測が多い。特に合体銀河と活動銀河中心核については本特集号にそれぞれ齊藤俊貴と泉拓磨による記事があるので参照されたい。

本稿では、一つの銀河に着目したい。NGC 1068だ。近傍宇宙にある代表的なセイファート銀河の一つだ⁴⁵⁾。しかも、銀河中心核の周辺ではスターバーストも発生している⁴⁶⁾。さらには、合体銀河の可能性もある。ただし、衛星銀河の合体、マイナーマージャーだ^{47), 48)}。こうしてみると、この銀河には多くの研究者をひきつける要素がすべてそろっている。実際、サイクル0で観測され、電波連続光と多数の分子ガス輝線の詳細な

^{*12} この論文がarXivに出た途端、以下のブログで絶賛された：<https://telescope.wordpress.com/2016/08/01/high-resolution-observation-of-the-sunyaev-zeldovich-effect-with-alma/>

^{*13} マサチューセッツ大学を中心とする5大学が運用していたミリ波望遠鏡だが2011年に閉鎖。その代わりに、現在はメキシコにできた口径50 mの大型ミリ波望遠鏡(LMT)が運用されている。私は一時期マサチューセッツ大学のジュディス・ヤング(Judith Young)と共同研究していたので、その関係でFCRAOでの観測時間をいただいたことがある。そのときは、ヒクソン・コンパクト銀河群のCO($J=1-0$)の観測を楽しんだ。

^{*14} サブミリ波帯初のボロメーターアレイ。現在はSCUBA-2にバージョンアップされている。SCUBAはSubmillimeter Common Use Bolometer Arrayの略称だが、もちろんハワイで盛んなスキューバ・ダイビングを意識したネーミングである。ちなみにマニュアルの名前はサーフだった。

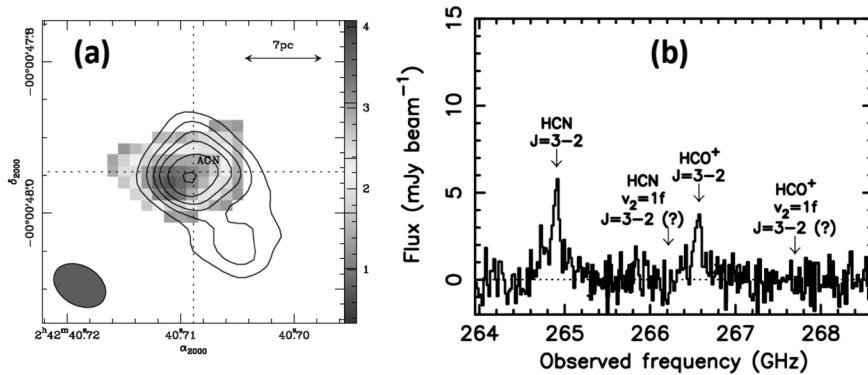


図5 (a) CO($J=6-5$) 輝線で検出された分子ガストラス。コンタは689 GHz連続光⁴⁹⁾。(b) 中心核に付随するさまざまな分子ガス輝線⁵⁰⁾。これらの研究では銀河中心核はVLBAで同定されているS1成分である⁵¹⁾。

データが取得された⁴⁹⁾⁻⁵¹⁾。その後、サイクル2でも観測され、ついに銀河中心核に付随する分子ガス雲も捉えられた^{52), 53)}(図5)。パーセクスケールの構造なので、いわゆる分子ガストラスが見えてきたことを意味する。NGC1068のトーラスは、トーラス内壁の電離ガスの放射する電波連続光ですでに観測されていたが⁵⁵⁾、ついに分子ガスでもその姿が見えてきたことは画期的なことだ^{*15)}。同じくサイクル2の観測では、数パーセクスケールの 400 km s^{-1} の速度で吹き出る分子ガス双極流もCO($J=6-5$)輝線で検出されるに至った⁵⁷⁾。

さらに野心的な挑戦がサイクル2でなされた。それはサブミリ波帯の電波再結合線H26 α の観測だ⁵⁸⁾。電波再結合線を使えばダストの吸収の影響を受けずにご本尊近くにある広輝線領域(broad line region; BLR)の電離ガスの性質を調べることができる。残念ながら未検出に終わったが、こういうチャレンジングな観測をやる気にさせる電波望遠鏡は今までになかった。やはりALMAはすごい。

NGC 1068に関してはもう二つ研究成果が出ている。一つは古屋玲と私によるものだが、中心核

付近に今まで見つかっていなかったような性質をもつ分子ガス雲が発見されたのだ⁴⁷⁾(図6)。質量は銀河系にある巨大分子ガス雲と同程度だが、密度は高くサイズも大きい。このようなガス雲の性質を調べると、銀河系では見られない極端な星生成、すなわちスターバーストの成因に迫れるかもしれない。

もう一つは濤崎智佳らの成果だ⁵⁹⁾。彼女らはNGC 1068の中心の約4 kpcの領域にある巨大分子ガス雲の同定を行い(図7)、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ のデータから質量を評価し、ガス雲の質量関数を求めた。質量の上限値は太陽質量の6,000万倍だが、これは明らかに銀河系や他の銀河で見つかったもの比べて大きな値だ。質量関数にも違いが見られるが、なぜNGC 1068では特殊な状況になっているのだろうか? 活動銀河中心核の存在と直接結びつかないかもしれないが、何か重要な示唆を与えてくれるかもしれない。

ところで、古屋&谷口という組み合わせは意外だ。お互いの研究分野は銀河系の星生成領域と系外銀河であり、一般的には一緒に論文を書くことはない。新たなALMA効果かもしれないが、この辺の事情についてはまた稿を改めて、天文月

*15 NGC 1068では22 GHzの水メーザー輝線で分子ガストラスが検出されている⁵⁶⁾。これは非熱的分子ガスで、ALMAで観測されたのは熱的分子ガスということで初めての検出になる。

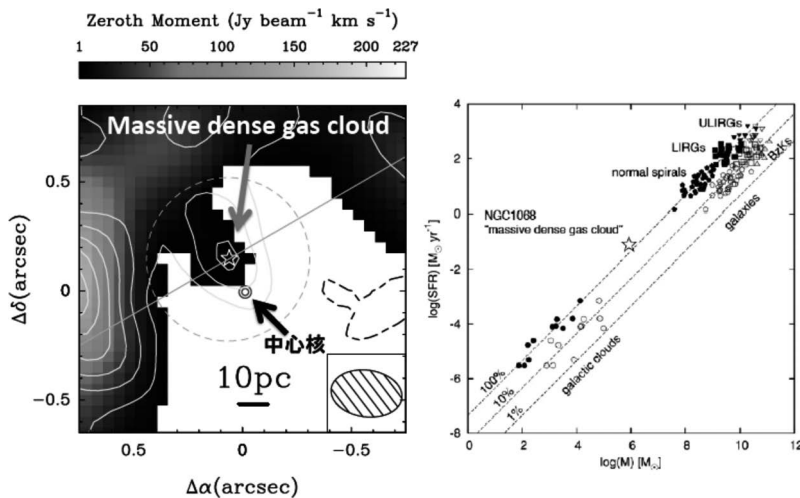


図6 (左) NGC 1068で見つかった分子ガス雲, (右) 星生成率 (SFR) と星質量 (M) の関係図. 銀河系と系外銀河で見つかった分子ガス雲の中間的な性質をもつことがわかる.

報でお知らせできればと考えている。

活動銀河中心核関連で話題をもう一つ。それは、超大質量ブラックホール (supermassive black hole; SMBH) の質量を正確に求める試みだ⁶⁰⁾。大西響子らはNGC 1097の中心領域の分子ガスの分布と運動をHCNとHCO⁺の輝線を用いて調べ、質量分布モデルとの比較から、この銀河の中心にあるSMBHの質量を太陽質量の1.4億倍と測定することに成功した。

SMBHの質量はスフェロイド成分 (銀河バルジあるいは楕円銀河の場合は本体) の質量と相関していることが知られており、銀河とSMBHの共進化が話題を集めている⁶²⁾。このテーマを探求するには宇宙史の中で両者がどのように質量を獲得してきたかを調べなければならない。SMBHは銀河に比べて質量測定が難しいので^{*16)}、今回試された手法で、近傍銀河のSMBHを片っ端から調べると良いだろう。得られたデータはSMBHの質量のみならず、銀河中心領域にある分子ガス

雲の性質を調べることに威力を発揮する。実際、NGC 1097のデータはそのように有効利用されている⁶³⁾⁻⁶⁵⁾。今後、ラージ・プログラムの候補の一つになるだろう。

なお、銀河系の中心核であるSgr A*については、坪井昌人による解説があるので、参照されたい。

6. 銀河の影を慕いて

ここまでは、ダストに隠されているかどうかを問わず、とりあえず電波や可視光で輝いている銀河の話をしてきた。しかし、宇宙を観測すると、影として見えるものがある。光と影。常に対照とされる概念だが、宇宙にも適用できる。一見、“銀河の影”とは、やや唐突なセクションタイトルのように思われるかもしれない。だが、これを無視するにはいかないのだ。

では銀河の影とは何か？ それは、言わずと知れたクエーサー吸収線系である。遠方のクエーサーのスペクトルに刻まれた影として見える天体

*16) SMBH周辺の1 pc以下の領域にあるダスト・トーラスには分子も含まれており、22 GHzに放射される水メーザーのVLBI観測が最も正確なSMBHの質量評価法である⁶¹⁾。そのほかに反響マッピング (reverberation mapping) や簡便な方法としては可視光帯の水素原子のバルマー線やMg IIの輝線幅と可視連続光の光度を用いる方法があるが、誤差は大きい⁶²⁾。

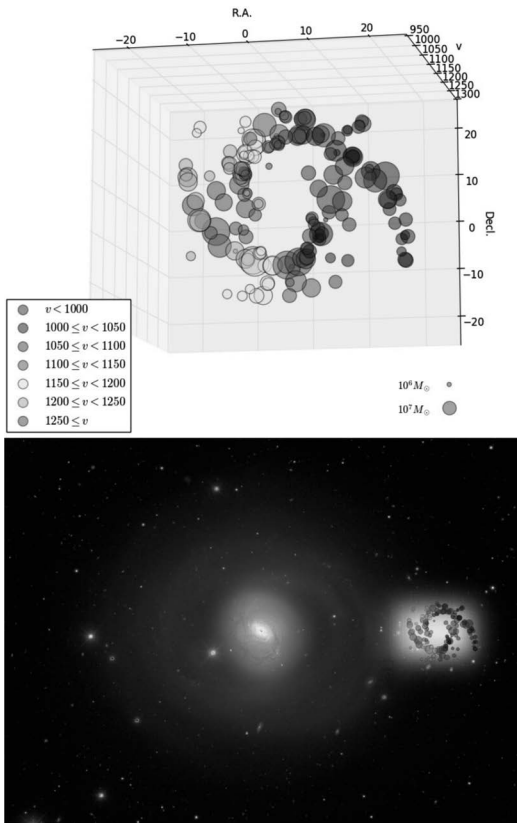


図7 NGC 1068の中心の4 kpc領域で同定された巨大分子ガス雲の3次元マップ。スケールを見もらうために、下図のNGC 1068の可視光写真の右に3次元マップをインセットした。可視光写真はMichael Blantonに提供していた。

である⁶⁶⁾。大別するとライマンαの森、ライマン・リミット系 (Lyman limit system; LLS), 減衰ライマンα吸収線系 (damped Lyα absorption system; DLA) に分類されるが^{*17)}, ここではDLAに着目する。

DLAでは水素原子の柱密度が $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ を超えるが、これは銀河円盤で予想される典型的な値である。そのため、DLAの正体はクエーサーの視線にある円盤銀河であると予想される。ところが、調べてみるとそのような銀河の見つかる

確率はたかだか10%でしかない。また見つかった場合も視線からの距離 (インパクト・パラメータ) が100 kpcを超えるものが多い。遠方宇宙にある円盤銀河のサイズがそんなに大きいはずもない。これらの問題を回避するモデルはスーパーウィンド (銀河風) で生成されたシェル状のガス雲である⁶⁷⁾。このモデルの観測的検証を目指した私の観測提案がサイクル2で採択されたが、Band 8の観測だったため、残念ながらサイクル2の期間中に観測が終了せず、涙を呑んだ。DLAの正体は依然として不明なので、今後のALMAの観測に期待したい。

関連する研究分野としては銀河周辺物質 (circum galactic medium; CGM) の探求がある。銀河の周りにどのような性質のガスが取り巻いているかという問題だ。銀河の周りには重力ポテンシャルにトラップされた高温プラズマがあることがX線の観測からわかっているが、ライマンα輝線のハローが見つまっているケースもある⁶⁸⁾。宇宙の大規模構造 (フィラメントなど) との関連もあり、さまざまな要素が絡んでいる⁶⁹⁾。まだ研究が進んでいない分野であるが、クエーサー吸収線系の総合的な理解の観点からも進展が望まれる。

なお、銀河間空間に関連する話題では、井上開輝による重力レンズSDP81を用いた銀河間物質の構造に関する解説があるので参照されたい。

7. 銀河の研究、ふたたび

銀河の研究。いったい何が大切なのだろうか？ 宇宙には美しい渦巻銀河がある。どうして宇宙にはそんなに美しい構造があるのだろうか？ この謎にひかれて、私は天文学者を目指した。大学院に入って勉強を進めるうち、一つの論文に出会った。タイトルは“On the Relative Importance of the Bulge to the Disk of Spiral and S0 Galaxies”で

*17 水素原子の柱密度で分類され、それぞれ $N(\text{HI}) = 10^{12-17} \text{ cm}^{-2}$, $10^{17-2} \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, および $\geq 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ となる。また、Mg IIなどでプローブされる金属吸収線系もある。



図8 “銀河バルジ大作戦”のときの記念写真。研究会の会場は長野県上松町の施設。いったい、誰が写っているのだろうか。ヒントは当時の東大の大学院生である。S0銀河の多様性についてレビューをしてもらったのだが、私は彼らを“東京ダイナミックス”と呼んでいた。このとき、すばるやALMAに向けて走り出していたのだろう。

ある⁷⁰⁾。円盤銀河のバルジ円盤の光度比を γ とすると、 γ は銀河の分類形態とよく相関する。しかし、 γ は円盤の光度とは全く相関しない。銀河の進化で大切なのはバルジのほうである。要約すれば、こういう話だ。なるほどと思った。この論文に啓発され、東京大学・木曾観測所で天文学者として勤務し始めた頃“銀河バルジ大作戦^{*18)}”という研究会を開催した。懐かしい思い出(図8)。

そしてその頃、“Morphology and Dynamics of Galaxies”という叢書に出くわした⁷¹⁾。その中で興味をひかれたのは、銀河の成分に着目した研究のアプローチだった。今にして思えば、大した話ではないのかもしれない。とにかく、バルジ、円盤、レンズ、棒状構造、リングなどの成分に分けて性質を議論するものだった。それを読みながらいろいろ考えたことを思い出す。私にとっては第一級の推理小説のように思えたものだ。

まず、第一義的に重要な成分はハロー（実際にはダークマター・ハロー）とスフェロイド成分だ

ろう。円盤をどう捉えるかは人によるが、第一義的と考えなくても良い。なぜなら、銀河の種ができた頃（赤方偏移 $z \sim 20-30$ ）、太陽質量の100万倍程度のダークマター・ハローの中に集められたバリオンから星が生まれるが（初代星）、その時代に円盤が卓越していたとは思えない。円盤はその後引き続いて起こる階層的な合体過程で角運動量を獲得して成長してきたと考えるほうが自然だろう。もしそうなら、円盤は第二義的な成分になる。第二義的成分の中で発生する波である渦巻構造、棒状構造、およびリングなどは第三義的な構造になる。銀河の進化にとって重要な鍵を握っているのはやはり第一義的な成分だろう。どう考えても、論理的に正しいように思えた。かくして、私は銀河円盤に興味を抱かなくなった。

これは当時の個人的な感想だが、最近はずっかり改心した。

「私たちはなぜ138億歳の宇宙に住んでいるのか？」

この疑問について考え始めたからだ。

数十億年後、銀河系はアンドロメダ銀河と合体し、巨大楕円銀河に育っていく。そのとき、円盤は消える。また、合体の際にスターバーストが大規模に発生すると分子ガスも消費され、その後は星を作らない楕円銀河になるだろう。さらに1千億年後になると、宇宙膨張が進行して隣の銀河が見えなくなる。見えるものは自分たちの住んでいるメタ・ギャラクシーだけ。レッドアウトと呼ばれる現象だ。なにしろ、ほかに銀河が見えないのだから、銀河のハッブル分類も意味をなさない。宇宙膨張の証拠も観測できないので、定常宇宙論が復活しているはずだ。そんな時代に宇宙を調べ意義はあるのだろうか。

つまり、今なのだ。銀河の歴史がガスから星を作ってきた歴史であるならば、今の時代にこそ星

^{*18)} この研究会の名前は米国の映画“バルジ大作戦”に因む(1966年)。バルジは“膨らみ”という意味で、銀河のバルジもまさに膨らんだ構造をしている。ただ、バルジ大作戦のバルジは第二次世界大戦の末期に西ヨーロッパのアルデンヌ地方にできたドイツ軍の突出した(膨らんだ)最前線を意味する。

生成を徹底的に理解すべきなのである。オリオン大星雲が見える。おうし座分子ガス雲もあるじゃないか。私たちは幸せな時代に生きているのだ。

8. ALMA 時代の銀河研究

ALMAのおかげで、近傍銀河の円盤部にある分子ガス雲はかなり明瞭に観測できるようになった。実際、大マゼラン雲では、系外銀河としては初めて分子ガス雲のホットコア（生まれたばかりの星を包む暖かい分子ガス成分）が発見された⁷²⁾。銀河系で見つがっているホットコアと比べると、化学組成が大きく異なる。ところ変われば品変わるということだ。確かに、大マゼラン雲は銀河系と比べると化学進化が進んでいないので、同じである理由はない。実際、大マゼラン雲には銀河系の球状星団と散開星団の中間的な性質をもつ星団もあり、よくわかっていないことが多い。銀河が若かりし時代、どのような星生成が起こっていたのか？ それを調べる格好の材料を大マゼラン雲が提供してくれるのだ。この件については下西隆による解説があるので参照されたい。

大マゼラン雲のみならず、局所銀河群にある銀河は全て格好の実験場だ。ALMAによって星生成研究の新時代が到来した。その新時代とは銀河系と系外銀河を分ける必要のない時代だ。物理はスケールを問わない。ALMAに導かれて、古屋玲と私が共著論文を書いたのは必然だったのだろう。

それにしても、銀河は手強い。その理由は、たぶん銀河は孤立系ではないからだ。明らかに開放系として進化してきている。しかも、そのときどきで何事もなかったかのように美しい姿を見せつける。それを眺めて私たちは銀河を誤解する。そのような歴史が繰り返されてきたように思う。罪深きは銀河。だが、そろそろ決着をつけたいところだ。

9. 終わりに

本稿の参考文献を眺めて気がつくことがある。プレスリリースされた研究成果が非常に多いことだ。ALMAが見る宇宙は、今まで私たちが見ることができなかった宇宙である。そのためだろう。また、研究者も自覚してきたせいもある。成果が出たら、パブリックに還元するのは当然だからだ。

極端な話だが「プレスリリースできないような論文は書くな」という考え方もある。だいぶ前に聞いた話だが、ヨーロッパのある物理関係の研究所では所長から檄が飛ぶそうだ。「Physical Review Lettersに投稿できないような仕事はするな」なるほどと思える側面もあるが、これで良いのかという疑問も湧く。競争的外部資金に頼って研究を進めるご時世では、成果を次々と出していかねなければならない。書類書きに追われる日々の中で、画期的かつ本当に重要な研究成果を出し続けるのは至難の技だろう。

1900年、チューリッヒ連邦工科大学を卒業したアルベルト・アインシュタインは大学に研究者として残ることはできなかった。2年後、ベルンのスイス特許庁に就職したが、不本意だっただろう。しかし、その3年後、物理学にとって奇跡の年が訪れる。ご存じのように、光量子仮説、ブラウン運動、そして特殊相対性理論の3編の論文が公表された。弱冠26歳のときだった。

アインシュタインが大学に研究者として残っていた場合、この奇跡の年は訪れたのだろうかと思うことがある。誰にも邪魔されず、安楽椅子探偵として、自分の本当にやりたい研究に没頭できたことが大切だったのかもしれない。今の状況を見ていると、21世紀のアインシュタインが出てくるとは思えない。ALMAで何をやるべきか？ 今一度、自問自答しながら、筆を置くことにしよう^{*19)}。

^{*19)} なお、「スーパー望遠鏡ALMAが見た宇宙」(福井康雄監修, 日本評論社, 2015年)にもALMAによる宇宙論・銀河関係の成果を紹介したので、ご一読いただければ幸いです。

謝 辞

今回のALMA特集号の原稿については国立天文台ALMA室の平松正顕氏からご依頼をいただきました。このような機会を与えていただき、深く感謝しております。河野孝太郎氏と大内正巳氏にはディープ・サーベイから銀河まで貴重なコメントをいただき深く感謝いたします。おかげさまで、本稿は大幅に改良されました。また、本稿をまとめるにあたり、長谷川哲夫、阪本成一、立松健一、林正彦、瀧崎智佳、柏川伸成、今西昌俊、井上昭雄、古屋玲、長尾透、甘日出文洋、田村陽一、松岡健太、諸隈・松井佳奈、江草芙実、泉拓磨、山口裕貴、大西響子、梅畑豪紀、藤本征史の各氏から貴重なコメントをいただきました。末尾ながら深く感謝させていただきます。なお、本稿は部分的に日本学術振興会の科学研究費(Nos. 23244031 & 16H02166)によって支援されていることを申し添えておきます。

参考文献

- 1) Carilli C. L., Walter, F., 2013, ARA&A 51, 105
- 2) Maiolino R., et al., 2005, A&A 440, L51
- 3) Ouchi M., et al., 2009, ApJ 696, 1164
- 4) Steidel C. C., et al., 2000, ApJ 532, 170
- 5) Ouchi M., et al., 2013, ApJ 778, 102; プレスリリースは以下のURLを参照<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201311227250.html>
- 6) Geach J. E., et al., 2016, ApJ 832, id.37
- 7) Capak P., et al., 2015, Nature 522, 455
- 8) Nagao T., et al., 2012, A&A 542, L34; 長尾透, 2013, 天文月報2月号, 142; プレスリリースは以下のURLを参照http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/124_3.html
- 9) Mortlock D. J., et al., 2011, Nature 474, 616
- 10) Cowie L. L., et al., 1996, AJ 112, 839
- 11) Pérez-González P. G., et al., 2008, ApJ 675, 234
- 12) Ueda Y., et al., 2003, ApJ 598, 886
- 13) Pavesi R., et al., 2016, ApJ 832, 151
- 14) Inoue A., et al., 2014, ApJ 780, L18
- 15) Inoue A., et al., 2016, Science 352, 1559
- 16) Takami H., et al., 1987, PASP 99, 832
- 17) Yamaguchi Y., et al., 2016, PASJ 68, 82
- 18) Tadaki K., et al., 2015, ApJ 811, L3
- 19) Umehata H., et al., 2015, ApJ 815, L8; プレスリリースは以下のURLを参照<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/56.html>
- 20) Hatsukade B., et al., 2016, PASJ 68, 36
- 21) Umehata H., et al., 2017, ApJ 835, 98
- 22) Walter F., et al., 2016, ApJ 833, 67
- 23) Matsuda Y., et al., 2015, MNRAS 451, 1141
- 24) Einstein A., 1936, Science 84, 506
- 25) Soucail G., et al., 1987, A&A 172, L14
- 26) Kaiser N., 1992, ApJ 388, 272
- 27) Massey R., et al., 2007, Nature 445, 286
- 28) <http://www.stsci.edu/hst/campaigns/frontier-fields/>
- 29) González-López J., et al., 2017, A&A 597, A41
- 30) 谷口義明, 2011, 「宇宙の一番星を探して」(丸善)
- 31) Fujimoto S., et al., 2016, ApJS 222, 1; プレスリリースは以下のURLを参照<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201603107894.html>
- 32) 中村輝太郎編, 1982, 「英語口頭発表のすべて—国際社会での活躍をめざす科学者・技術者のために」(丸善)
- 33) Hatsukade B., et al., 2013, ApJ 769, L27; プレスリリースは以下のURLを参照<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201305317116.html>
- 34) Sandage A., 1988, ARA&A 26, 561; "Observational Tests of World Models" と題されたこの論文の主たる論拠は以下の論文に拠っていることは特筆に値する Yoshii Y., Takahara F., 1988, ApJ 326, 1
- 35) Casey C. M., et al., 2014, Physics Reports 541, 45
- 36) Madau P., Dickinson M., 2014, ARA&A 52, 415
- 37) Tamura Y., et al., 2009, Nature 459, 61
- 38) Capak P., et al., 2008, ApJ 683, L53
- 39) Tamura Y., et al., 2015, PASJ 67, 72; プレスリリースは以下のURLを参照<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/29.html>
- 40) Ikarashi S., et al., 2015, ApJ 810, 133
- 41) Sunyaev R. A., Zel'dovich Ya. B., 1970, Ap. Sp. Sci. 7, 3; ちなみに、この論文では光子とバリオンの相互作用による音響振動のことも予言されていた。
- 42) Komatsu E., et al., 2001, PASJ 53, 57
- 43) Kitayama T., et al., 2016, PASJ 68, 88
- 44) Barger A. J., et al., 1998, Nature 394, 248
- 45) Seyfert C. K., 1943, ApJ 97, 28
- 46) Telesco C. M., et al., 1984, ApJ 282, 427
- 47) Furuya R. S., Taniguchi Y., 2016, PASJ 68, 103
- 48) セイファート銀河の起源としてマイナーマージャー説については以下を参照; Taniguchi Y., 1999, ApJ 524, 65, および谷口義明, 2016, 天文月報, 109, 339
- 49) García-Burillo S., et al., 2014, A&A 567, A125;
- 50) Viti S., et al., 2014, A&A 570, A28
- 51) Nakajima T., et al., 2015, PASJ 67, 8
- 52) García-Burillo S., et al., 2016, ApJ 823, L12
- 53) Imanishi M., et al., 2016, ApJ 822, L10
- 54) Gallimore J. E., et al., 2004, ApJ 613, 794
- 55) Gallimore J. E., et al., 1997, Nature 388, 852
- 56) Greenhill L. J., et al., 1996, ApJ 472, L21; Gallimore J. E., et al., 1996, ApJ 462, 740; Greenhill L. J., Gwinn C.

- R., 1997, Ap&SS 248, 261; Gallimore J. F., et al., 2001, ApJ 556, 694
- 57) Gallimore J. F., et al., 2016, ApJ 829, L7
- 58) Izumi T., et al., 2016, MNRAS 459, 3629
- 59) Tosaki T., et al., 2016, PASJ in press, arXiv161200948
- 60) Onishi K., et al., 2015, ApJ, 806, 39 ; プレスリリースは以下のURLを参照<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201506187684.html>
- 61) Miyoshi M., et al., 1995, Nature 373, 127
- 62) Kormendy J., Ho L. C., 2013, ARA&A 51, 511
- 63) Fathi K., et al., 2013, ApJ 770, L27
- 64) Izumi T., et al., 2013, PASJ 65, 100 ; プレスリリースは以下のURLを参照<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2013/44.html>
- 65) Martín S., et al., 2015, A&A 573, 116
- 66) Wolfe A. M., et al., 2005, ARA&A 43, 861
- 67) Taniguchi Y., Shioya Y., 2001, ApJ 547, 146 ; 以下の論文も参照, Taniguchi Y., Shioya Y., 2000, APJ 532, L13
- 68) Steidel C. C., et al., 2011, ApJ 736, 160
- 69) Rakic O., et al., 2012, ApJ 751, 94; Lee K.-G., et al., 2014, ApJ 795, L12; Croft R. A. C., et al., 2016, MNRAS 457, 3541
- 70) Yoshizawa M., Wakamatsu K., 1975, A&A 44, 363
- 71) Binney J., Kormendy J., White S. D. M., 1982, 12th

- Advanced Course, Swiss Society of Astronomy and Astrophysics (SAAS-FEE), eds. Martinet L., Mayor M. (Geneva Observatory: Geneva)
- 72) Shimonishi T., et al., 2016, ApJ 827, 72; プレスリリースについては以下のURLを参照<http://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20160905-8024.html>

Observations of galaxies with ALMA

Yoshiaki TANIGUCHI

The Open University of Japan

Abstract:ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) has been playing a very active part in all fields in astrophysics. In fact, more than 500 papers have been already published with ~200 papers for galaxies and cosmology. Fortunately, I learned many things from my experience in the past panel meetings (Cycle 0, 2, and 3). In this article, I would like to give a summary of the recent progress in the ALMA science for galaxies.