

アルマ望遠鏡による遠方サブミリ波銀河の重元素量調査



長 尾 透

〈京都大学 白眉センター 〒606-8302 京都市左京区吉田牛ノ宮町〉

e-mail: tohru@kusastro.kyoto-u.ac.jp

銀河の重元素量は銀河進化を特徴づける重要な物理量ですが、宇宙のいつ頃に銀河の重元素量が顕著な増加を示したのかはいまだ明らかではありません。この問題を調べるにはダストに覆われた進化途上にあるような遠方銀河について重元素量を測定することが重要ですが、そうした測定は可視光・近赤外線分光による手法では困難です。本稿では、銀河の遠赤外線スペクトルに見られる微細構造輝線に注目し、アルマ望遠鏡で遠方サブミリ波銀河の重元素量を調査したわれわれの研究についてご紹介いたします。併せて、アルマ望遠鏡を用いた研究について、検討段階から観測提案・準備・観測後の様子などをご紹介することで、多くの方にアルマ望遠鏡を用いた観測的研究に関心をもっていただくきっかけになればと思います。

1. はじめに

「Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 効果を使って、遠方の銀河団を電波観測でたくさん見つけられるすごい装置ができるらしい」…そんな内容の話に耳にしたのが、私とアルマ望遠鏡の最初の接点だったように思います。確かそれは1998年の秋、そしてその計画はまだLMSA (Large Millimeter and Submillimeter Array) と呼ばれていました。岡山天体物理観測所 (OAO) で取得したNGC天体の可視スペクトルをもとに卒業研究に取り組んでいた¹⁾ 私にとって、SZ効果はおろか遠方銀河団といわれても何のことも全くわかりませんでした。それから月日が流れてすばる望遠鏡が動きだし、電波観測と全く縁のない光赤外の世界で私が研究を続けていた一方で、LMSAはいつしかALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) と呼ばれる国際巨大プロジェクトになり、着々と建設が続けられていました。

本稿では、電波観測と無縁だった私がどのよう

にしてアルマ望遠鏡に関心をもつようになったのかをご紹介し、電波観測の経験がなかった「どシロウト」の私がどのようにアルマ望遠鏡を用いた観測を進めるに至ったのかを、私の研究テーマである銀河化学進化の観点からご紹介したいと思います。アルマ望遠鏡は性能が驚異的に素晴らしいだけでなく、電波天文学を専門としない研究者にとっても門戸が極めて広く開かれている望遠鏡です。研究内容の詳細というよりは、分野外の研究者である私から見たアルマ望遠鏡の姿をご紹介することで、より多くの方がアルマ望遠鏡に関心を持ち、より多くの優れた観測提案や研究成果が日本のコミュニティから発信されるきっかけになればと思います。

2. 銀河化学進化の観測的研究： 可視光から遠赤外線へ

2.1 可視光・近赤外線分光による銀河化学進化の観測的研究

1999年の春に東北大学にて大学院生となった

私は、OAOでの可視分光観測やデータ解析の経験をもとに、すばる望遠鏡も用いながら近傍セイファート銀河の可視分光観測を進め、さまざまなスペクトル解析に取り組みました²⁾⁻⁴⁾。分光観測とは面白いもので、例えば電離ガス（プラズマ）に関していえば、観測した輝線スペクトルの強度比を光電離モデルなどの理論予測と比較することで、何億光年も離れた場所にある天体におけるガスの物理状態や化学組成を地球にいながらにして診断することができます⁵⁾⁻⁸⁾。これはすなわち、遠方天体の分光観測によって昔の宇宙における天体の物理化学状態を調べることができるということを意味します。そこで私は、さまざまな時代における天体の重元素量を分光観測により測定することで宇宙の化学進化を観測的に研究してみたいと考えるようになりました。私が2004年の春に学振研究員の在外研究でアルチェトリ天文台（フィレンツェ）に異動した頃のことです。

電離ガス成分に注目して遠方銀河の重元素量をどのように測定するのか、という話はすでに以前の天文月報にてご紹介していますので⁹⁾、詳細はそちらをご覧ください。重要なのは、暗い遠方銀河のスペクトル取得は一般に困難であり、多くの輝線や微弱な輝線を使った重元素量診断ができない場合がほとんどであるということです。使える輝線が限られているのですから、使えるものだけでやりくりして何とかするしかありません。そういった思想により、比較的強い輝線の強度比から経験則をもとに重元素量を診断する方法（Strong-Line Method）が整備されてきています¹⁰⁾。私もSDSS銀河を用いたStrong-Line Methodのキャリブレーションに取り組み、遠方の星形成銀河のガス重元素量をどう測定すればよいか検討を重ねました¹¹⁾（図1）。このキャリブレーションを踏まえ、当時所属していたイタリアのグループでVLTの近赤外面分光器SINFONIを用いた遠方（ $z\sim 3$ ）星形成銀河の質量重元素量関係についての系統的観測を行いました。その結果、赤方偏移

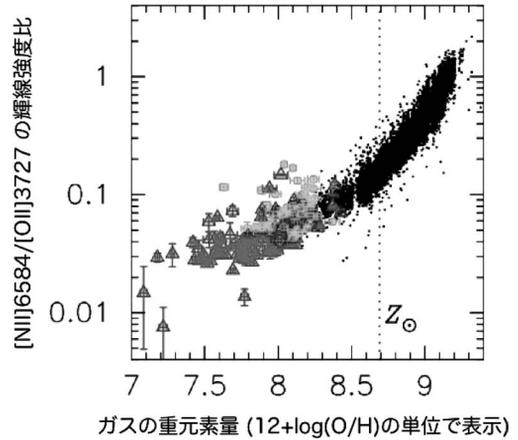


図1 重元素量の指標の一つである、可視光輝線の強度比 $[N II]\lambda 6584/[O II]\lambda 3727$ と重元素量の関係¹¹⁾。データ点のシンボルの違いはサンプルの違いを示し、点線は太陽重元素量を示す。

0から3にかけて星形成銀河の重元素量が減少していくこと、またその進化が銀河の星質量に依存することが見えてきました¹²⁾。重い銀河のほうが早い時代に化学進化を完了させている一方、軽い銀河は現在でもまだ化学進化を完了させていないという、いわゆる「ダウンサイジング」的進化^{13), 14)}に相当する描像です。

一方、より遠方を調査するための相補的方法として、星形成銀河ではなくクェーサーや電波銀河などの活動銀河核（AGN）のスペクトルを調べるアプローチがあります。私はアルチェトリ天文台にいた頃は、むしろこちらに注目して研究を進めていました。この内容も以前の天文月報にてご紹介しましたが¹⁵⁾、結論を一言でまとめると「AGNのスペクトルから示唆される重元素量は赤方偏移2から5程度まで変化が見られない」ということがわかってきました¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。

星形成銀河では見られた重元素量の赤方偏移依存性がAGNでは全く見られないというのも、何だか変な話です。この不一致をどう解釈したらいいのだろうかずっと思案していたのですが、予想もしていなかった方向からヒントが得られました。銀河の重元素量が星質量だけでなく、星形成

率にも強く依存するという“Fundamental Metallicity Relation (FMR)”が提案されたのです²⁰⁾. 遠方形形成銀河の分光観測の際にはどうしても観測しやすいような明るいターゲットから観測してしまうため、遠方銀河ほど星形成率の高いものを選んでいくことが系統誤差となり、見かけ上の重元素量進化が生じてしまっていたというのです。このFMRによると、同じ星形成率で比べれば赤方偏移3程度までは星形成銀河にも重元素量進化が見られないことになり、AGNで示唆されていた結果と定性的に合致します。この結果は一見喜ばしいことのように思えますが、一方でこれは「化学進化がまだ進んでいないような銀河を見たければ、赤方偏移3よりもっと遠方を調べないといけない」ということを意味します。Strong-Line Methodの指標は赤方偏移3を超えると地上観測が不可能な波長域にシフトしてしまいますので、可視光輝線を使わずに遠方銀河の重元素量を測定する新たな方策を考えなくてはなりません。

進化初期段階にある銀河を調べたいと思ったときに、もう一つ重要な要素がダストです。激しく星形成活動を行う銀河は大量のダストに覆われ、そのダストの熱放射により遠赤外線やサブミリ波で極めて明るく輝く超高光度赤外線銀河(ULIRG)やサブミリ波銀河(SMG)として観測される場合があります。こうした天体では静止系可視スペクトルがダスト赤化の影響を強く受けてしまうため、前述のStrong-Line Methodによる重元素量診断が困難です。つまり、化学的に成熟していない進化途上にある若い銀河を調べなければ、赤方偏移3を超す宇宙でダストに覆われた銀河について重元素量の測定を行う必要があるのですが、そのためのよい手段がなかったのです。

2.2 遠赤外線・サブミリ波へ

そこでわれわれは、ダストの影響を受けない遠赤外線スペクトルに見られる微細構造輝線に着目しました。これまで遠赤外線での高感度観測が難しかったため、微細構造輝線を用いたStrong-

Line Methodを経験的な手法で検討することは困難です。しかし光電離モデル計算の力を借りて、どの輝線の組み合わせで重元素量が診断できるか検討することができます。検討の結果、特に静止系波長が50 μm から200 μm あたりのスペクトルに、ガスの物理化学状態の診断に有用なさまざまな輝線があることがわかってきました^{9),21)}.

しかしいくら有用な輝線があるといっても、観測できなければ意味がありません。遠赤外スペクトルが取得可能だったISO衛星では、極めて近傍の天体でしか遠赤外微細構造輝線の輝線強度比測定が行えていません。Herschel衛星による分光観測で遠方銀河の遠赤外微細構造輝線を観測することができるようになりましたが、それでも赤方偏移1にはなかなか届きません。衛星観測で宇宙論的距離にある銀河の分光観測を進めていくには、どうしてもSPICA衛星の登場を待つしかなさそうです²¹⁾.

では、赤方偏移した微細構造輝線を地上サブミリ波望遠鏡で観測するという戦略はどうでしょうか。私が所属していたイタリアの研究チームでは、高赤方偏移天体の微細構造輝線観測に果敢に挑戦し、遠方天体における[C II]158 μm の初検出を報告しました²²⁾。そして私がフィレンツェから三鷹・松山へと研究拠点を変えていく間にもこの共同研究は続き、赤方偏移4を超す遠方天体に対する[C II]観測が続けられました²³⁾⁻²⁵⁾。しかしいくつかの挑戦にもかかわらず、既存の地上観測装置を用いた観測ではどうしても[C II]158 μm 以外の微細構造輝線を遠方天体に対して検出することができず、ガスの物理化学状態の診断を進めるには至りませんでした。あと一步、感度が不足していたのです。

3. アルマ望遠鏡：サイクル0

3.1 サイクル0へ

私が愛媛から京都に異動した2011年の春になると、いよいよアルマ望遠鏡の初めての観測公募

(サイクル0)に向けた機運が世界中で高まってきました。なにしろ、これまでのミリ波・サブミリ波観測に比べると感度・空間分解能が桁違いに向上することに加え、アタカマの高地という設置サイトのおかげでサブミリ波の高振動数帯でこれまで極めて困難だった観測が可能になるのです。まさに世界中の天文学者が長く待ち望んでいた瞬間が近づいてきた、というワクワクするような空気が業界に広がっていました。

ただし、実はアルマ望遠鏡はまだ完成していません。完成時には12 mのパラボラアンテナが50台と、日本が担当する「いぎよい」(12 mアンテナ4台と7 mアンテナ12台)からなり、空間的に広がった成分を正確に観測するためのAtacama Compact Array; ACA)を用いた観測により、圧倒的な感度と数ミリ秒角という超高空間分解能が達成される予定ですが、それはまだもう少し先の話。サイクル0では「いぎよい」の7 mアンテナは使えず、パラボラアンテナの台数も十数台という部分的な観測が公開されたのです(とはいえこれまでの望遠鏡に比べると遥かに素晴らしい性能なのですが)。そして何より、初めての観測公募であるサイクル0ではこれまでアルマ望遠鏡を待ち望んでいた世界中の天文学者からの観測提案が殺到することが予想されたため、短い時間でかつ確実に成果が上がりそうな観測提案を検討しなければいけないという強い制約がありました。

そんな話題で世界中が盛り上がっているなか、私も共同研究者たちとサイクル0に向けた相談を重ねました。できるだけシンプルかつ短時間で実行可能な観測で、空間分解能もさほど必要なく、振動数帯もさほど高くなく、アルマ望遠鏡の高感度を活かせるような観測提案ができないか。そんな議論の中で出てきたアイデアが、微細構造輝線を用いた遠方SMGの重元素量診断でした。幸い、既に述べたようにわれわれのグループではこれまで遠方銀河の[C II]158 μm 観測を進めてきています。そこで、もしこの[C II]の情報にはほかの輝

線の情報を加えることで重元素量の議論ができるのであれば面白いのでは、という話になったわけです。

しかし「他の輝線の情報を加えることで」というのは簡単ですが、果たしてそんな都合のよい輝線などあるのでしょうか。そこで直感的に思い出したのが、図1で示した可視光でのStrong-Line Methodの一つ、[N II] λ 6584/[O II] λ 3727です。この輝線比が重元素量とよい相関を示す理由は、窒素が二次元素、すなわち重元素量が高ければ高いほどほかの元素に対する相対組成比が高くなるという性質をもっているからです。とはいえ輝線強度の強弱はエネルギー源である大質量星の数によりますから、星形成率の指標として使われる[O II]の強度で窒素の輝線である[N II]の強度を規格化し、重元素量の指標としているわけです。サブミリ波スペクトルに目を転じると、[C II] 158 μm の強度はしばしば星形成率の指標として使われるものですし、この[C II]輝線と近い振動数をもつ窒素輝線には[N II]122 μm や[N II] 205 μm があります。そこで急いでモデル計算をしてみたところ、予想どおり[N II]205 μm /[C II] 158 μm の輝線強度比が重元素量と強い相関を示すことがわかりました(図2)。幸い、われわれが[C II]輝線を検出した天体のうちの一つ、SMGであるLESS J033229.4-275619 (LESS J0332)は赤方偏移が4.76にあり、[N II]205 μm 輝線をちょうど観測の容易な振動数(254 GHz)でとらえることができます。これは面白いという話になり、LESS J0332の[N II]205 μm 観測を提案することにしました。観測締切の1カ月半ほど前、5月中旬のことです。

とはいえ、電波観測の観測経験もほとんどなく、電波干渉計を用いた観測提案など書いたこともない「どシロウト」の私にとって、アルマ望遠鏡への観測提案を検討するというのは非常に敷居が高く感じられました。受信機の設定だとかキャリアブレーターの選択だとか言われても、ほとんど

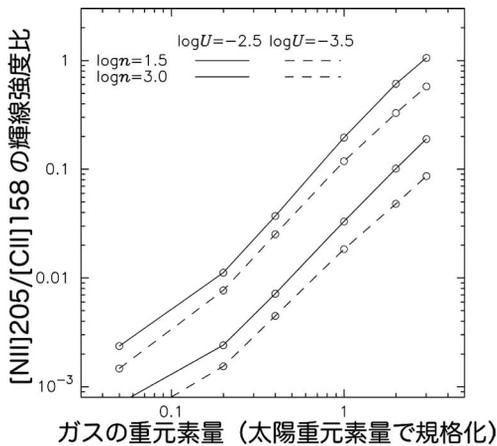


図2 光電離モデルに基づく、遠赤外輝線の強度比 $[N II]205 \mu m/[C II]158 \mu m$ の重元素量依存性の予測²⁶⁾。異なるパラメーターによるモデル予測を異なる線で示している。このモデル計算では、公開されているコードである *Cloudy*²⁷⁾ を使用している。

ちんぷんかんぷんな状態です。ひたすらおろおろしていた私でしたが、国立天文台に設置されている東アジア・アルマ地域センター（以降、EA-ARC）が観測準備のための説明会や必要なソフトウェアのチュートリアルを開催してくれると聞き、申し込んでみることにしました。実は内心「シロウトが出席したって、どうせ難しすぎて何もわからないのでは…」と不安に思いながら参加したのですが、「初心者コース」「経験者コース」などレベル別の設定まで用意してあるという親切な説明会のおかげで、観測準備の際に何をどう検討すればよいのか非常によく理解することができました（図3）。EA-ARCの皆様の「一つでも多くの良い観測提案が日本から出されるように」という熱い想いがひしひしと伝わり、感激したのを覚えています。

更に心強かったのは、電波干渉計観測に詳しい甘日出さんに共同研究者として加わっていただけたことです。甘日出さんもお自身の提案の検討でお忙しかったにもかかわらず、シロウトの私からの基本的すぎる（のかどうかさえ私にはよくわか



図3 アルマ望遠鏡サイクル0観測公募を前にして三鷹で開催された説明会の様子。

らなかったというのが正直なところですが）質問に快く答えていただき、6月末にどうにか観測提案を提出するところまでたどり着くことができました。

3.2 サイクル0: 観測

サイクル0では900件以上の観測提案が提出され、望遠鏡時間の獲得のための競争倍率も約9倍に達したようだ、と風の噂で耳にしましたが、観測提案というのは提出した瞬間にすべて忘れてしまうのが精神衛生上たいへん良いものです。普段から、前の日に食べた夕食の内容さえ思い出せない私ですので、サイクル0の提案についてもきれいさっぱり忘れてしまってほかの仕事に取り組む日々を過ごしていました。そんな私のところに提案審査結果が届いたのは、9月に入ってからのことでした。「あなたのプロポーザルはサイクル0への全提案の中で上位10%以内として評価され、観測される可能性が最も高いグループに属しています。」というメールが届いたのですが、すばる望遠鏡の審査結果通知のような「コングラチュレーション！ 採択されましたよ！」といった分かりやすい表現ではないため、なんだこりゃとしばらく考え込んでしまいました。どうやら自分の提案が採択されたいとようやく理解し、慌てて共同研究者の方々にメールを転送したりするうちに、嬉しさよりも観測準備（phase 2と呼ばれ

るもので、提案者は観測提案時よりも細かい装置設定などを決める必要があります)はいつどう進めたらいいのだろうという不安感が押し寄せてきました。

しかし素晴らしいことに、phase 2の際にもEA-ARCの皆様が非常に親切に配慮をして下さり、ほとんど問題なく手順を進めることができました。キャリブレーター(データ校正のために観測する参照天体)の選択などでは、廿日出さんがよりよい可能性についてアドバイスしてくださったりしたのもたいへんありがたかったところです(このあたりは私のようなシロウトには手も足もでないところでした)。

アルマ望遠鏡の観測者は観測所まで出かける必要がないため、phase 2が済むと、あとは観測が実行されるのをじっと待つことになります。観測が遂行されたという連絡を受け取ったのは2月の頭、ちょうど私がGemini望遠鏡で観測を行っていた最中のことでした。さっそくデータをダウンロードしてみようと思ってよくよくメールを読みなおしてみると、生データだけで78 GBもあるとのこと。いったいそんな巨大な生データをどう触ったらよいのでしょうか。と、ここでもまたEA-ARCによる手厚いサポートが用意されていて、三鷹にて直接データ解析について相談を聞いていただけるといいうありがたいお話をうかがい、いったいどんなデータが取れているのだろうとワクワクしながら三鷹に向かいました。これが2月末のことでした。

3.3 サイクル0で見えてきたもの

「はっきり受かってますね、7シグマくらいで。」EA-ARCの西合さんと三鷹でお会いした際、開口一番に言われたこのことばを聞いて、嬉しさというよりはホッとしたというのが正直なところでした。図4に示しているとおおり、明らかにLESS J0332が放射する[N II]205 μmが検出されています。図5にて、アルマ望遠鏡で取得した[N II]205 μmのスペクトルとAPEX望遠鏡で過去

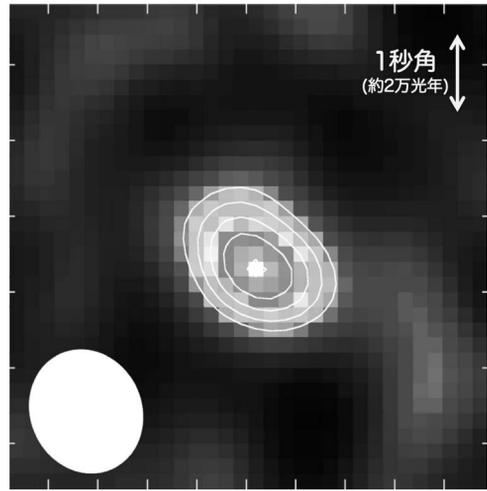


図4 アルマ望遠鏡がとらえた、LESS J0332が放射する[N II]205 μm輝線の画像²⁶⁾。画面左下部の白丸は、本観測の際のアルマ望遠鏡の空間分解能の大きさ。

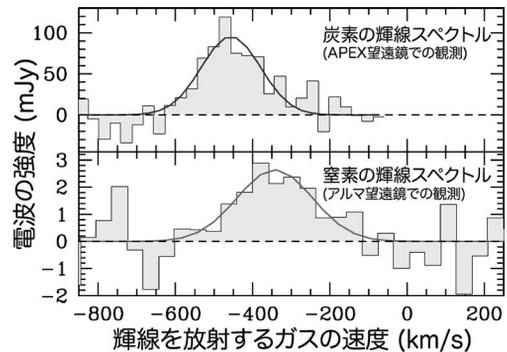


図5 今回アルマ望遠鏡で観測した[N II]205 μm(下段)²⁶⁾と、APEX望遠鏡で既に観測していた[C II]158 μm(上段)²⁴⁾のスペクトル。輝線間に速度差があるように見えるが、統計的には2シグマ程度のずれであり、リアルかどうか議論することは難しい。仮にリアルだとすると、ターゲットの銀河においてガスの物理化学状態が非一様である可能性などが考えられる。

に取得していた[C II]158 μmのスペクトルを比べていますが、縦軸のスケールの違いに驚かされます。LESS J0332について、APEX望遠鏡での[C II]158 μm輝線の観測には14.5時間を要したのですが、その10分の1以下の明るさしかない

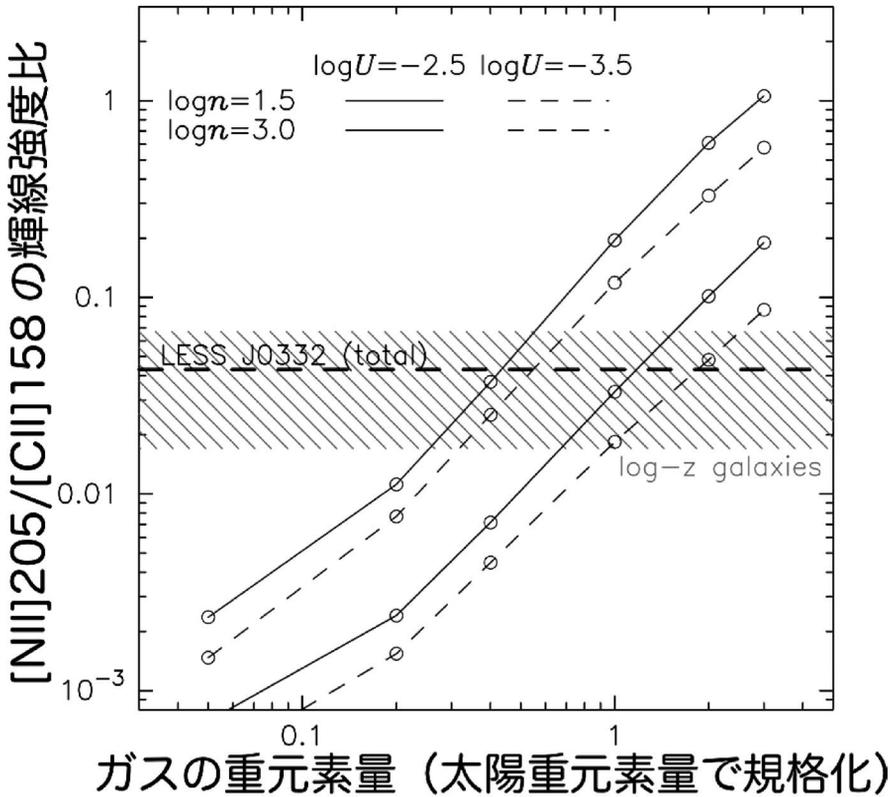


図6 輝線強度比 $[N II]205/[C II]158$ のモデル計算結果と観測結果の比較²⁶⁾。モデル結果は図2と同じ。水平に示されている破線が、アルマ望遠鏡による LESS J0332 の観測結果。斜め線で示された領域は、近傍銀河で観測されている輝線強度比の範囲。

$[N II]205 \mu m$ 輝線をアルマ望遠鏡でとらえるのに
 かった時間がわずか3.6時間だったことが、アルマ望遠鏡の感度の素晴らしさを物語っています。

では、この $[N II]$ の観測結果からどういうことがわかるのでしょうか。LESS J0332 において $[N II]205 \mu m$ 輝線の強度が $[C II]158 \mu m$ 輝線強度の4%程度であることがわかったわけですが、近傍のいくつかの銀河ではこの値が2%から7%程度であることが知られています。図2で見たように、この輝線強度比は重元素量に応じて非常に敏感に変化するため、LESS J0332 の重元素量が近傍銀河で見られる重元素量とそんなに変わらないことが示唆されます。もう少し定量的に議論するため、観測結果とモデル計算結果を比べてみま

しょう(図6)。輝線強度比のモデル予測値は重元素量だけでなくガスの密度や電離パラメーターといった量にも依存するため、ある程度の不定性が生じてしまうのですが、それでもおおよそ太陽重元素量と $\pm 0.3 \text{ dex}$ 程度の範囲で合致していることが見てとれます。LESS J0332 の赤方偏移である $z=4.76$ は宇宙年齢に換算すると約13億年(現在の宇宙年齢の約10分の1)に相当しますが、そうした初期宇宙においてもすでにこの天体で化学進化が相当進行していたことがわかったのです²⁶⁾。

以上の話を論文にまとめて投稿したのが5月の頭でした。短時間のうちに論文を作成することができたのは、共同研究者の皆様の協力もさることながら、EA-ARCによる充実したサポートがあってこそのことでした。幸いにもレフェリーからも

好意的に評価していただき、5月のうちに論文をA&Aに受理していただくことができました。早い段階でアルマ望遠鏡のサイクル0の成果を日本から発信できたことはとても良かったと思っています。

さて、たった一つのSMGを調べただけで銀河進化について何か一般的なことを述べるなんて、読者の皆様から怒られてしまいそうな話ではありません。それでも想像力をたくましくして考えると、AGNについて赤方偏移5程度まで重元素量進化が見られないという話と今回のLESS J0332の結果との間に関係があるような気がしてきます。すなわち、AGNもSMGもともに大質量銀河に伴うものと考えられますので、大質量銀河における化学進化が宇宙のかなり初期の段階で急速に進行したのではないかと考えられるわけです。本当でしょうか？ 答えを出すには、もう少しデータが必要のようです。

4. 今後の展望：サイクル1、さらにその後へ

前節の最後のほうでは、うっかり想像力をたくましくしすぎてしまいました。こうした話をきちんと議論するためには、どうしても多数の天体について系統的な調査を進めていく必要があります。また、今の話では重元素量の不定性は観測誤差ではなくガスのパラメーターの不定性に起因する系統誤差で決まっていますので、他の微細構造輝線も観測することで不定性を減らす必要があります。こうした観測を通して、銀河のFMRがどのあたりの赤方偏移まで無進化なのか、銀河の化学進化が顕著だったのは宇宙の歴史の中でいつ頃だったのか、といった謎が明らかになっていくものと期待されます。こうした動機で、私たちのチームではサイクル1にも観測提案を提出しました。サイクル1の締切は7月上旬でしたが、本稿が天文月報に掲載される頃にはもう採否結果がわかっていることでしょう。それまではこの話は

いったん忘れ、しばしほかの仕事に励みたいと思います。

ここまで本稿を読み進めてくださった皆様にはきっと伝わったかと思いますが、アルマ望遠鏡は「シロウト」でも使える望遠鏡です。もちろん、非常に複雑な大型干渉計を使いこなすのはチャレンジなことではありますが、EA-ARCによる極めて充実した支援のおかげで、サイエンスのアイデアさえあれば干渉計の詳しい知識がなくても観測提案の検討やphase 2での観測準備を進めることが可能です。ですので、電波天文学者ではない皆様（理論家の皆様も含めて！）にも、ぜひアルマ望遠鏡を用いた観測を検討してみることをお勧めしたいと思います。

ようやく動き始めたアルマ望遠鏡。ミリ波・サブミリ波帯で革新的な感度を実現し、これから銀河進化の研究で大活躍することが期待されます。しかし、アルマ望遠鏡さえあればわれわれは銀河進化の諸問題をすべて解決することができるのでしょうか。実は、ミリ波・サブミリ波帯で興味深い性質を示す天体があったときに、その可視光・近赤外線の性質をきちんと調べようとすると、すばる望遠鏡では感度が足りないという事態もあることが想定されます。アルマ時代の光赤外天文学を展開するためには、すばる望遠鏡を超えた光学赤外線望遠鏡、TMT (Thirty Meter Telescope) がどうしても必要です。そして、地上観測が可能な可視光・近赤外線とミリ波・サブミリ波帯の間をつなぐために、次世代赤外線望遠鏡SPICA衛星も欠かせません。動き始めたアルマ望遠鏡に続いて、TMTとSPICA衛星が動き始めたとき、これまで全く未知の世界だった新しい宇宙の理解が得られると期待されます。

謝辞

本研究は、アルマ望遠鏡サイクル0共同利用観測ADS/JAO.ALMA#2011.0.00268.Sで取得されたデータに基づいて行われました。また本研究は廿

日出文洋, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, 西合一矢の各氏との共同研究により, 科学研究費補助金および京都大学白眉プロジェクトの助成を受けて行われたものです。アルマ望遠鏡の建設と運用にかかわられているすべての方々に, 深く感謝いたします。なお本稿執筆に際しては, 国立天文台の平松正顕さんと柏川伸成さんから有用なアドバイスをいただきました。

参考文献

- 1) Nagao T., Murayama T., Taniguchi Y., et al., 2000, AJ 119, 620
- 2) Nagao T., Murayama T., Shioya Y., et al., 2003, AJ 126, 1167
- 3) Nagao T., Kawabata K., Murayama T., et al., 2004, AJ 128, 109
- 4) Nagao T., Kawabata K., Murayama T., et al., 2004, AJ 128, 2066
- 5) Nagao T., Murayama T., Taniguchi Y., 2001, ApJ 546, 744
- 6) Nagao T., Murayama T., Taniguchi Y., 2001, ApJ 549, 155
- 7) Nagao T., Murayama T., Shioya Y., et al., 2002, ApJ 575, 721
- 8) Nagao T., Murayama T., Shioya Y., et al., 2003, AJ 125, 1729
- 9) 長尾 透, 2011, 天文月報 104, 626
- 10) Kewley L., Dopita M., 2002, ApJS 142, 35
- 11) Nagao T., Maiolino R., Marconi A., 2006, A&A 459, 85
- 12) Maiolino R., Nagao T., Grazian A., et al., 2008, A&A 488, 463
- 13) Cowie L., Songaila A., Hu E., et al., 1996, AJ 112, 839
- 14) Ikeda H., Nagao T., Matsuoka K., et al., 2011, ApJ 728, L25
- 15) 長尾 透, 2007, 天文月報 100, 656
- 16) Nagao T., Marconi A., Maiolino R., 2006, A&A 447, 157
- 17) Nagao T., Maiolino R., Marconi A., 2006, A&A 447, 863
- 18) Matsuoka K., Nagao T., Maiolino R., et al., 2009, A&A 503, 721
- 19) Matsuoka K., Nagao T., Maiolino R., et al., 2011, A&A 532, L10
- 20) Mannucci F., Cresci G., Maiolino R., et al., 2010, MNRAS 408, 2115
- 21) Nagao T., Maiolino R., Marconi A., et al., 2011, A&A 526, A149
- 22) Maiolino R., Cox P., Caselli P., et al., 2005, A&A 440, L51
- 23) Maiolino R., Caselli P., Nagao T., et al., 2009, A&A 500, L1
- 24) De Breuck C., Maiolino R., Caselli P., et al., 2011, A&A 530, L8
- 25) Gallerani S., Neri R., Maiolino R., et al., 2012, A&A 543, A114
- 26) Nagao T., Maiolino R., De Breuck C., et al., 2012, A&A 542, L34
- 27) Ferland G., Korista K., Verner D., et al., 1998, PASP 110, 761

ALMA Views of Chemical Properties in a Distant Submillimeter Galaxy

Tohru NAGAO

The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University, Yoshida-Ushinomiya-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8302, Japan

Abstract: Metallicity is one of powerful diagnostics for galaxy evolution studies, but the major epoch of the metallicity enrichment in galaxies is still unclear. Although measuring the metallicity in distant dust-obscured galaxies is extremely important, such measurements are hard by means of optical and near-infrared spectroscopic observations. Here we report our study on the metallicity in a sub-millimeter galaxy at $z=4.76$ based on ALMA cycle 0 observations. Our new observations have revealed that the chemical evolution in a sub-millimeter galaxy had been progressed significantly even when the age of the universe was only 1.3 billion years.