

ALMA への期待 —理論天体物理学の立場から—

羽部 朝男

〈北海道大学大学院理学研究科 〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目〉

e-mail: habe@astrol.sci.hokudai.ac.jp

1. ALMA の特徴 — 百倍の解像力は 100 万倍の規模の数値シミュレーションに匹敵 —

ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) の建設が日米欧で合意され、その実現がいよいよ具体的になってきた。ALMA の特徴は、本号の ALMA 特集記事にも示されているように、1) 非常に大きな集光力 (NMA (Nobeyama Millimeter Array) の 15 倍)、2) 角度分解能の高さ (NMA の 100 倍)、3) 観測波長がミリ波からより波長の短いサブミリ波まで、である。こうした高い性能は、理論天体物理学の発展にも大きな刺激を与えるものである。ALMA の主要な観測対象は、形成期の銀河である。銀河がどのように形成されるのかを人類はいまだ観測していない。銀河形成期では、爆発的星形成が起きており、大質量星や超新星爆発などで放出されたエネルギーがダストを加熱し、熱せられたダストから赤外線が大量に放射されると期待される¹⁾。 $z = 1-10$ で放射された赤外線は、赤方偏移して ALMA の波長に入ってくるので、形成期の銀河は、まさに ALMA の特徴を生かした観測対象である。

また、ALMA の角度分解能はサブミリ波の観測の場合 0.01 秒角に達する。これは、100 Mpc 離れた銀河の 5 pc 以下のスケールを観測できる。つまり、この程度の距離なら銀河の巨大分子雲を分解できる。また、10 Mpc 程度の距離の近くの活動的銀河であれば、0.5 pc のスケールで観測が可能にな

る。数値シミュレーションでの 100 倍の解像度は、3次元シミュレーションでは 100 万倍の記憶容量の計算を行うことになる。これは大変な進歩である。ALMA では、こうした高い分解能を生かして、活動的銀河核周辺のガスの分布と運動が観測可能になり、中心核へのガス供給過程の研究が進むであろう。また、大集光力によって観測時間が大幅に短縮されるので、一つの銀河に対して、さまざまな分子による観測が可能になり、銀河スケールでのガス密度の違いに応じた分子の分布の違いが観測可能になる²⁾。その結果、銀河スケールでの星形成の研究が多に進むと期待される。ここでは、これらの点をふまえ、理論の立場から、ALMA への期待を述べよう。

2. 形成期の銀河と ALMA

銀河形成はダークハローの力学的時間スケールで起こると期待される。我々の銀河では、ダークハローの質量はおおよそ太陽質量の 1 兆倍、大きさは 100 kpc、ダークハローの重力とつりあう回転速度はおおよそ 200 km/s である。このことからダークハローの力学的時間スケールは、おおよそ 20 億年である。これは、最近の宇宙モデルパラメーターの観測値から赤方偏移になおすと $z = 3-4$ である。形成期の銀河の星形成率は非常に大きい。我々の銀河の星の総質量は太陽質量の 1000 億倍であり、それが 20 億年で形成されると、平均星形成率は 1 年当たり 50 太陽質量となる。これは我々の銀河の 50 倍にもなる。このような大量の星形成率を示す銀河

は、すでに SCUBA によって遠方銀河で観測されている³⁾。これらは楕円銀河へと進化すると期待されているが、ALMA にはこうした銀河の構造の詳しい観測を期待したい。一方、円盤銀河の星形成史は、この力学的時間よりゆっくりとした星形成史をたどると考えられる。このような星形成史の違いは、遠方の円盤銀河と楕円銀河の ALMA による観測でこうした違いに関して手がかりを与えて欲しい。

◆銀河の形態の起源

銀河の形態には、円盤銀河と楕円銀河、不規則銀河がある。この形態の起源について cold dark matter model では、次のように理解される。銀河スケールの密度揺らぎの持つ角運動量の大きさは、ダークハロースケールに分布したバリオンから円盤銀河が形成するのに十分な大きさが期待できる。大半の密度揺らぎがこのような大きさの角運動量を持つので、最近の銀河形成論では、銀河は基本的には円盤銀河として形成され、それが merging によって楕円銀河が作られたという可能性が検討されている。この立場では、円盤銀河は high z で形成されることになる。不規則銀河は、重力成長の時間スケールの長い密度揺らぎが対応している。円盤銀河の merging で楕円銀河が形成されることは数値シミュレーションで示されている。また、銀河団に属している銀河に占める楕円銀河の割合が宇宙の平均よりも大きいという観測結果は、上記の銀河形成シナリオで理解できる。

しかし、円盤銀河の形成はそう単純ではないらしい。最近、宇宙論的な銀河形成の数値シミュレーションが銀河をはるかにこえるスケールで行われるようになって、バリオンの角運動量はダークマターに輸送され、星の円盤は観測よりもはるかに小さなサイズの円盤しか形成されることが分かってきた⁴⁾。こうした困難は、従来の数値シミュレーションが、精度がまだ粗いため角運動量輸送が起きたと考えられている。銀河が形成される過程で星

形成によって放出されたエネルギーが星間ガスを加熱し、その結果角運動量輸送が減少する可能性が検討されている。このことは、星形成による星間ガスへの影響を観測的にも検討する重要性を教えている。こうした過程は $z = 1$ 近くまで起きる必要がある、ALMA による観測が重要な手がかりを与えるだろう。

また、最近の HST をはじめとする観測によって、最近 $z = 0.3$ を越えると、円盤銀河の渦状腕が発達していないことが示されている⁵⁾。つまり、わずかに 50 億年過去にさかのぼると円盤銀河の性質は、現在と異なることになる。これは、cold dark matter モデルではうまく説明できていない。円盤銀河の進化が $z < 1$ でも起きている理由として、大きな銀河周辺にはガス雲やガスの豊富な矮小銀河が多数存在していて、それらの大きな銀河への合体が引き続いて起きている可能性を示唆する。こうした可能性は、従来の銀河形成の数値シミュレーションの解像度では十分に示されていない。遠方の円盤銀河の周辺の矮小銀河やガス雲の分布が z とともに進化するようすを調べることが重要だろう。この点でも、ALMA の活躍を期待している。

このほか、Cold dark matter 宇宙モデルでは、宇宙の最初の星形成は $z = 10$ 前後で起こると期待される。この時、どのような質量の星が形成されるのか、どの程度重元素を生成するのか、という問題は、population III の問題や宇宙の電離の問題と関連して重要である。ALMA によって、この最初の星形成をどのように観測できるかは、重要な課題と言える。

3. 近傍の活動銀河

以上、遠方の銀河に関する観測と関連した問題について述べてきた。では、比較的近い銀河を ALMA で観測することで、どのような新しい天文学が明らかにできるであろうか。注目したい観測対象として、銀河の中心領域をとりあげる。

◆銀河中心部の観測

銀河の活動性は、銀河中心の巨大ブラックホールへのガス供給によって引き起こされている。最近銀河中心の巨大ブラックホールの形成が、爆発的星形成によると言う示唆が観測から得られている。巨大ブラックホールの形成は、QSOがいつどのように形成されたのかという問題と密接に関係している。そうした点でも銀河中心へのガス供給問題とその結果としての爆発的星形成は重要である。ALMAは、その高い分解能によって銀河中心付近のガスの観測を進めることができる。

活動的銀河中心には、巨大ブラックホールのまわりの大量のエネルギー解放を行っている降着円盤の部分と、その外側のガスの自己重力が重要となっているガス円盤部分があると考えられる。後者では、自己重力によってガス円盤はガス雲に分裂し、ガス雲同士の重力的な相互作用や衝突によって、角運動量輸送が起き、より内側の降着円盤部へのガス供給の境界条件となっていると考えられる。よってこの部分の観測は重要である。10 Mpc程度の近傍銀河であれば、ALMAの解像度で1 pc以下のスケールまで観測できる。これまでNMAで観測されていた100 pcスケールと水メーザーで観測されている0.1 pcスケールとの間がどのようになっているのかがALMAによって明らかにされるであろう。

また、近傍のセイファート銀河や爆発的星形成銀河を観測することで、超新星残骸やスーパーバブルの観測が可能になり、星形成とその結果として星間物質へ与える影響が明らかになる。こうした爆発的星形成過程とその影響がどのように進むのかは、銀河形成の物理の解明にとっても重要である。

4. まとめ

以上、ALMAの特徴から、銀河の形成と進化についてどのような成果が期待されるのかを述べてきた。ALMAの特徴を生かした観測を進めるために、理論的な研究もALMAによる詳細な観測を意識して進める必要がある。これまでにも、形成期の銀河の観測特徴を明らかにするため、多くの研究がなされてきたが、ALMAの高解像度、高感度を生かした観測によって、どのような天文学が明らかにできるのかを具体的に検討するためにも、高精度大規模数値計算による研究の進展が求められていると考えている。

参考文献

- 1) 高木俊暢子, 2001, 天文月報, 第94巻, 9号, 405ページ,
- 2) たとえば, Matushita et al. 1998, *Astrophys. J.*, 495, 267
- 3) 谷口義明, 1998, 天文月報, 第94巻, 11号, 528ページ
- 4) たとえば, M. Steinmetz, 1999 *Ap&SS*.269, p513
- 5) R G. Abraham., S.van den Bergh, astro-ph/0109358