

風に舞う塵の運命

—スターバースト銀河M82からの ダストフローの運動学



吉田 道利

〈広島大学宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: yoshidam@hiroshima-u.ac.jp

スターバースト銀河からは、毎秒数百km～千kmに及ぶ速度で高温（数千万度）のガスが銀河外に噴き出している。これを超銀河風（スーパーウィンド）と呼ぶ。スーパーウィンドは、スターバースト領域で大量に生まれた大質量星からの星風や、それらの星々が死ぬときの超新星爆発によって銀河円盤ガスが加熱されて銀河外に吹き飛ばされている現象である。多くのスーパーウィンドに星間塵（ダスト）が付随していることが知られているが、ダストの運動を測ることは容易ではなく、これまでスーパーウィンドに付随するダストフローの運動は知られていなかった。われわれは、すばる望遠鏡を用いた偏光分光観測によって、スターバースト銀河M82のダストフローの運動を初めて計測することに成功した。その結果、M82のダストフローは銀河円盤からの距離とともに単調に減速し、円盤から1キロパーセク付近で銀河に対してほぼ静止してしまっていることがわかった。この結果は、スーパーウィンドによっていったんは銀河外に巻き上げられたダストが、数千万年のタイムスケールで再び銀河円盤に降り積もってくることを示唆している。

1. きっかけ

風はどこからともなく吹いてきた。

「一体これはどうなってるんでしょうね？」

「さあ、何なんだろうね、こんなに散乱成分があるとは。」

そのとき、私は大学院の先輩であるS氏とともに、とある論文に見入っていた。1990年代の初めであった。その論文には、有名なスターバースト銀河であるM82のH α 輝線による偏光撮像観測の結果が載っていた¹⁾。

「まるで反射星雲ですね。」

「だね、スケールは全然違うけどね。」

M82の周りには、中心核スターバースト領域から噴き出しているスーパーウィンドに付随する

巨大な電離ガスフィラメントが広がっており、H α 輝線によく見える（図1）。これはスーパーウィンドに巻き込まれた星間ガスが、衝撃波加熱またはスターバーストによる光電離を受けて光っているものと解釈されていた。

だが、私たちが目にして偏光マップの示すことは、H α 輝線のかかなりの部分が散乱光・反射光である、ということであった（図2）。しかも、きれいな同心円状の偏光ベクトルの分布は、光源が中心にあることを示している（図2右）。

「何が反射してるんですかね？」

「ダスト（星間塵）だろうね。」

ダストは可視光を効率良く反射する。どうやらM82のスーパーウィンドには大量のダストが巻き込まれていて、それが中心のスターバーストか

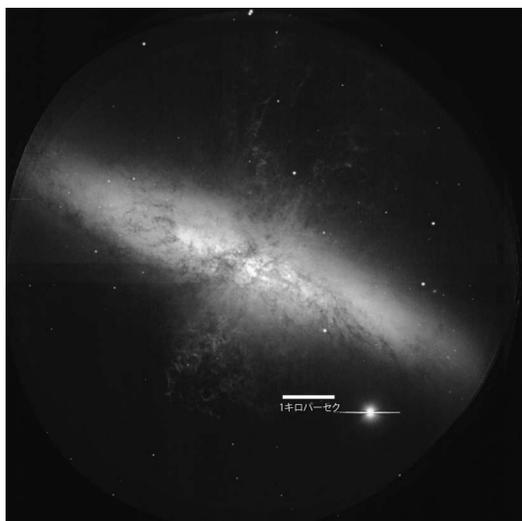


図1 すばる望遠鏡で得られたスターバースト銀河M82の疑似カラーイメージ²⁾。Bバンド，Vバンド，H α ナローバンドのイメージをそれぞれ青，緑，赤に割り当てている。スターバースト領域から噴き出すスーパーウィンドの電離ガスが細いフィラメントとして見えている。

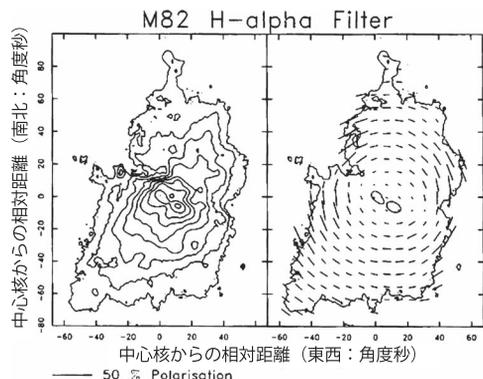


図2 スターバースト銀河M82のH α 輝線イメージ(左図の等高線)と，H α 輝線の偏光分布(右図)¹⁾。右図において，各線分の向きは偏光角，長さは偏光度を表している。偏光分布が銀河の中心核を中心として同心円状になっているのがわかる。

らの光を反射しているようなのだ。しかし，銀河の偏光マップでこんな変なやつは見たことがなかった。スケールを隠したら，多くの天文学者が反射星雲のデータだと思うだろう。なにしろ，場

所によっては偏光度が30%に及び，ほとんどが反射光だと言って差し支えないレベルなのである。ただ，こいつの場合，銀河系の反射星雲の1,000倍ものサイズをもっているのだが。

「めちゃくちゃダストがあって，しかも中心光が強いつつわけですか。でもこのダストって本当にスーパーウィンドに付随しているんですかね。ダストはどんな運動してるんでしょうね。」

「これは，偏光分光だな…。」

S氏のつぶやいたこの一言が，本研究のきっかけであった。

2. アイデア

ダストの存在が偏光で見えているのだから，偏光観測すればいいではないか。もし，ダストが銀河中心のスターバースト領域の光を反射しているのなら，偏光成分はダストの運動に関する情報をもっているはずだ。であれば，偏光分光観測をすれば，ダストの運動を測ることができるのではないか。

発想は実に単純であった。ダストは銀河中心から放射される輝線を反射する。反射された光は偏光している。反射された輝線のドップラー偏移には，ダストの銀河中心に対する相対速度とダスト自身のわれわれに対する視線速度とがたまたま込まれている。したがって，偏光分光観測によって偏光成分(ダストによる反射成分)を取り出し，ダストの運動方向に関する適当な仮定をおけば，反射成分のドップラー偏移からダストの運動を推定することができる(図3)。

こりゃうまくいく。私は瞬時に確信した。ダストというのは後に述べるように，その運動を示す手がかりをほとんど与えてくれない。偏光分光はダスト運動を知る数少ない手段の一つだ。スーパーウィンド中のダスト運動は，ウィンドの構造を解明するのみならず，銀河間空間へのダスト放出機構を知るうえでも重要である。M82を偏光分光観測すれば，スーパーウィンド中のダスト運

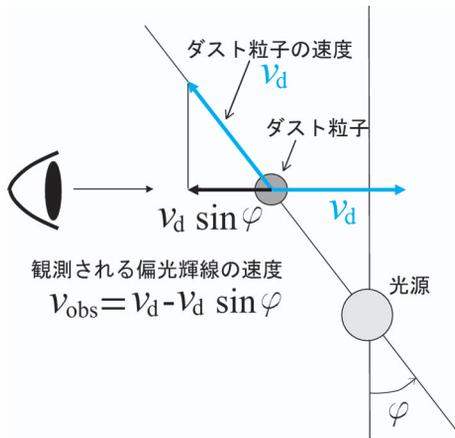


図3 光源に対してダストが速度 v_d で運動しているとする。このダストによって反射された、光源からの輝線は v_d だけ赤方偏移をする。一方、この図のような配置だと、ダストはわれわれに対して視線速度 $-v_d \sin \varphi$ をもつ。そこで結局、観測される偏光輝線はこの二つの成分の足し算となり、 φ が推定できればダストの運動速度 v_d が求まることになる。

動を初めて解明できる。

これはいけるぞ。

だが、時は1991年。アイデアはあっても実現の手段が無かった。適当な装置がない。銀河の可視光の偏光分光は世界的にもマイナーな分野であった。当時、世界でこの分野をリードしていたのは、セイファート2型銀河NGC 1068の中心核に隠された広輝線領域（ブロードライン・リージョン）を発見したアントヌッチ(R. Antonucci), ミラー(J. S. Miller)ら、リック天文台のグループであった³⁾。彼らは3 m望遠鏡に高性能の偏光分光装置をつけて、AGN中心核についての偏光分光結果を次々と発表していた⁴⁾。しかし、彼らの装置はM82のダスト運動を探るには波長分解能が悪すぎた。ダスト運動を測るには、波長分解能($\lambda / \Delta \lambda$) 1,500以上が欲しい。また、視野も十数秒角程度と限られており、数分角に広がったM82のスーパーウィンドをカバーするには狭すぎた。

いかんともし難い。

1991年。私は博士課程3年生であった。ちょっとしたアイデアを思いついたところで、それを実現する道がなかった。一体いつになったらこの状況を脱することができるのか。その頃の日本の光赤外天文学を覆っていたフラストレーションと、一体自分は研究者になれるのだろうかという不安が相まって、私の気を滅入らせたのであった。

3. スターバーストスーパーウィンド

ここで、スターバーストとスーパーウィンドについて簡単にまとめておこう。

銀河全体の星生成率が $10\text{--}1,000 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ （太陽質量/年）に及ぶ銀河のことをスターバースト銀河と呼ぶ^{5),6)}。われわれの住む天の川銀河（銀河系）の星生成率はおおよそ $1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ であろうと考えられているので、その10倍以上の星を常に生成していれば、スターバースト銀河と呼ばれることになる。しかしながら、そのように激しい星生成をしている銀河では、星生成領域が銀河全体に広がっていることはまれである。多くの場合、中心核近傍に星生成領域が集中している。したがって、スターバースト銀河と通常の銀河の違いの本質は、銀河全体の星生成率の総量というよりもむしろ、星生成領域の空間密度である。たとえば、本研究においてターゲットとなっているM82の場合、赤外線放射から見積られた銀河全体の星生成率は約 $10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ であり⁷⁾、天の川銀河の10倍程度にすぎない。ところが、天の川銀河の星生成領域が銀河円盤全体のおよそ100立方キロパーセクの空間にわたって分散しているのに対して、M82の星生成領域は中心核近傍の半径200–300パーセクの領域に集中しており、その体積は0.1立方キロパーセク程度である。すなわち、星生成領域の空間密度で言えば、M82は天の川銀河の1万倍となっているのである。このような激しく集中した星生成が生じる原因としては、銀河間相互作用による銀河中心へのガスの流入が有力視されている。

さて、スターバーストのような集中した激しい星生成が起こると、当然ながらそこで大量の大質量星が作られる。生成された大質量星は、その膨大な放射によって自らの外層を吹き飛ばしながら輝く。こうした星風は星形成領域内のガス温度を上昇させていく。さらに、大質量星は超新星爆発を起こしてその生涯を閉じる。大量に生まれた大質量星と超新星爆発。これらが相まってスターバースト領域の星間空間は1億度近くまで加熱され、加熱されたガスは銀河円盤の中を急速に広がり、やがて円盤の垂直方向に膨張し巨大な風船(バブル)を形成する。スターバーストが継続していけば、バブルは膨張し続け、やがてはじける。そして銀河間空間に高温ガスが自由に流れ出すスーパーウィンドが形成されると考えられている⁸⁾⁻¹⁰⁾。

4. スーパーウィンドとダスト

スーパーウィンドは銀河円盤内にあるさまざまな状態のガスを巻き込んでいくと考えられている。スターバースト領域から直接に噴き出しているのは高温のプラズマであるが、そのプラズマ流は周辺に存在する1万度程度の温度をもつ電離ガスや中性ガス、分子ガスなども一緒に銀河の外へつれていく。そして、ダストもまたスーパーウィンドによって銀河の外へ運ばれていく¹¹⁾。

ダストはスーパーウィンドによって運ばれるだけではない。スターバースト領域から発せられる膨大な光の放射圧に押されて、ダストは銀河外へ出ていくであろうとも推定されている。ある計算によれば、スターバースト領域から放射圧で加速されたダストは銀河の脱出速度をも超えて、銀河外空間に流れ出していく^{12), 13)}。そして、このダストアウトフローは周辺を巻き込んで流れ出していくであろうとも考えられている。もしこの効果が効けば、スーパーウィンドによるガスの流出は、ダストによってさらに加速されていくことになる。

しかし、果たして実際のダストの運動はどうなっているのだろうか。これがわからない。ダストは星からの紫外線を受けて暖められ、赤外線を放出して冷えていく。ダストは銀河の主な赤外線放出源であり、スターバースト銀河においては、スターバーストによる大質量星の紫外線のほとんどがダストによって吸収されて赤外線となって放出される。だが、ダストの放射する赤外線には、放射物質の詳しい速度情報をもつ鋭い輝線や吸収線がない。すなわち、ダスト放射の観測からダストの運動を探ることは極めて難しいのである。

サイズの小さなダストと考えられている、PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon: 芳香族炭化水素) と呼ばれる高分子物質は、特徴的な輝線を放射する。しかしながら、PAHは複雑な分子構造をもつため、その輝線は幅広いバンド放射となっている。そのため、PAH輝線から放射物質の運動を計測することは容易ではない。

最初に戻ろう。だから、偏光分光である。偏光分光は、ダストの運動を測る数少ない有力な手段の一つなのである。

5. すばるによる偏光分光観測

時は流れた。1999年末、すばる望遠鏡がファーストライトを迎えた。このことがいかにすごい出来事であったのかについては、さまざまところで縷々語られていることであり、私が付け加えるようなことは何もない。

すばるの第一期観測装置の一つであるFOCAS(微光天体撮像分光装置)には、偏光分光機能が備わっていた。開発メンバーによる詳細な試験により、FOCASの偏光観測機能は非常に優れていることが保障されていた¹⁴⁾。だが、すばるのファーストライト当時、FOCASには波長分解能1,500以上の分光機能がまだなかった。これにはVPH (Volume Phase Holography) グリズムの導入を待たなければならなかったのである¹⁵⁾。

すばるFOCASであれば申し分ない。中分散グ

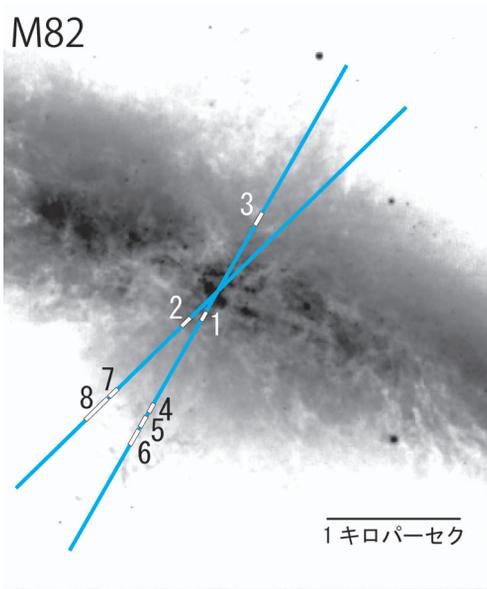


図4 すばる FOCASによる偏光分光観測のスリット位置 (2本) と、スリット上でスーパーウィンドの偏光成分を計測した場所 (1-8の数字の場所) を示す。

リズムさえ導入されれば、あのときに思いついたアイデアを試すことができる。

そのチャンスは2003年末にやってきた。2003年12月に、われわれのグループはFOCASの偏光分光モードを用いて、波長分解能1,700の偏光分光観測をM82のH α フィラメントに対して実行した。図4はそのとき用いたスリットの位置と、偏光成分を計測した場所を示している。

6. 解析—そして停滞

データ解析によってすぐに明らかになったことは、H α 輝線の偏光成分は、無偏光成分と比べて系統的に赤方偏移していることだった (図5)。これはまさに、図3の状況となっていることを意味する。つまり、ダストが銀河の中心核に対して外側に運動しているために、ダストによる反射光はその分 (図3の v_d) だけ赤方偏移してしまっているのだ。

さらには、電子密度を反映する硫黄の輝線強度

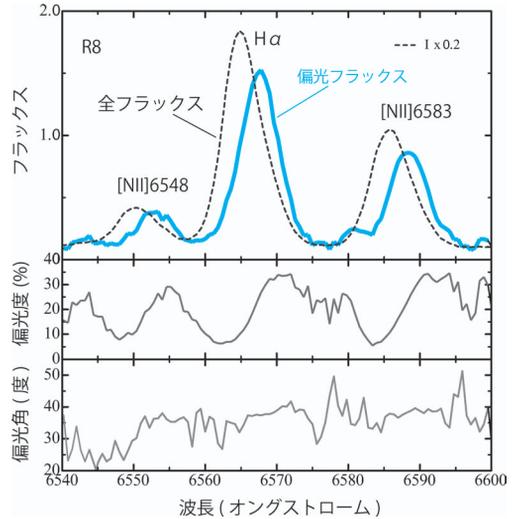


図5 M82スーパーウィンドのH α 輝線付近のスペクトル。R8の領域について例として示す。上のパネルがフラックスを示し、赤線が偏光成分のフラックス、点線が全フラックスを表している。スケールを合わせるために全フラックスは0.2倍して偏光成分フラックスに重ね書きしている。偏光成分が赤方偏移しているのがわかる。中のパネルは波長ごとの偏光度、下のパネルは偏光方位角を示している。

比 ($[S II] \lambda 6731\text{\AA} / [S II] \lambda 6717\text{\AA}$) が、偏光成分と無偏光成分でこれまた系統的に異なっており、偏光成分から求められる電子密度が無偏光成分より大きいことがわかった。これも輝線の偏光成分が中心核光の反射であることを支持している。中心核付近の密度の高いところから出た光が反射されて偏光成分として見えているということである。

これらの結果はまさに、予想どおり。偏光成分と無偏光成分の速度のずれは、そのままダストの運動を表しているに違いない。あとは適当なフローモデルを考えてデータを当てはめればダスト速度が求められる。

最初は単純な円錐フローモデルを考えた。中心核を円錐の頂点として、ダストがその円錐の壁に沿って外に流れ出しているというモデルである。図3をそのまま拡張したようなものであった。ところが、観測データをこれに当てはめてダストの

運動を求めると、速度が中心核からの距離によってばらばらになってしまった。大局的な運動の傾向といったものが見られないのである。

ダストの運動はそんなに乱雑なものなのだろうか。もちろん、そう考えたっておかしくないのだが、距離によって速くなったり遅くなったり、一定のパターンが見られないというのは、そもそも円錐フローモデルの妥当性さえ疑われる。

ここで少し行き詰った私は、ちょうどそのころ別の研究に興味湧き、そちらに心を奪われていた。某観測所の責任者としての業務もあった。というわけで、この研究についてはひとまず後回しにすることにしたのである。さいわい、世界を見渡しても、同様の研究をやっている人はいない。また、やりそうな雰囲気もない。

一度モチベーションが下がると、人間、ダメである。少しの間放っておこう、と思っていたのが、あっという間に数年間が過ぎていった。

7. ダストフローモデル

ダストがどのような運動をしているのか。単純な円錐型フローモデルではどうにもデータをうまく説明できなかった。

しばらくこの問題を忘れていた私であったが、データを死蔵するわけにはいかない。私が気力減退している間に世の中はずいぶん進んでおり、赤外線やサブミリ波でM82の周りに広がる巨大なダストフローの姿が明らかにされつつあった¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。が、いったん集中力が切れた問題に対して再び深く考えるようになるのは容易ではない。きっかけが必要だ。それは2009年末に訪れた。職場が変わることになったのである。これを機に、しばらく放っておいたM82のことをもう一度ゆっくり考えてみようと思った。

まったく、きっかけなんてものは何でも良いの

だと思わせる。などと他人事のように言っていると、しかるべき筋から厳しいお叱りを受けそうだが^{*1}、まあとにかく、もう一度データを引張り出してきて考えてみた。単純円錐モデルではダメだった。ではどうするか。何のことはない、昔から可視電離ガスのフローで提唱されてきた、円錐台モデルを採用したらどうだろうか(図6)。

スターバースト領域は広がりをもつ。そこからは直接にウィンドが吹いているはずだが、その実体は1,000万度以上の高温プラズマであり、そこからは可視光の輝線は出てこないし、ダストも生き残れない。H α 輝線はメインウィンドを取り囲むような円錐形の壁の部分から出ているだろう。

分子ガスやダストなどの冷たい物質は、さらにその外側を取り囲むような領域に沿って吹き上げられているに違いない。結局、ダストは、頭を切り飛ばした円錐(円錐台)状の領域の壁に沿って銀河円盤から外に流れ出しているのではないかと(図6)。ということで、ダストウィンドの根元を少し広げてみたのである。

なんて単純な。今さら偉そうな顔をして書くよ

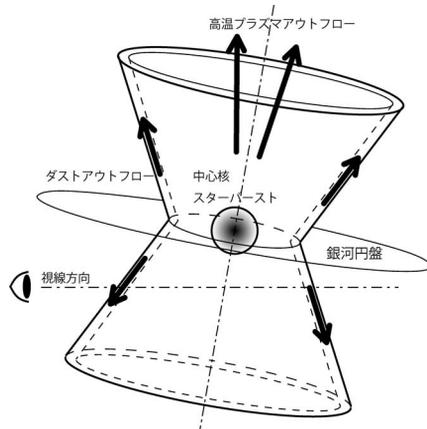


図6 ダストフローの円錐台モデル。ダストフローは円錐台の壁に沿って、M82から外側に流れ出していると考えた。

*1 例えば、某氏が次のようにおっしゃるのが聞こえる。「なんやかんや言うてお前がサボってただけとちゃうんかい。雑事が、とか言いわけにもならへんぞ。」

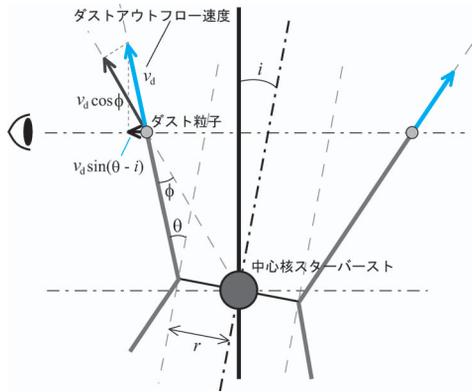


図7 ダストフローの円錐台モデルの詳細。フローの円錐台の軸は銀河円盤に垂直であると仮定し、銀河円盤の天球面からの傾き*i*を15とした。ダストフローの開き角 θ 、フローの根元の半径*r*については、電離ガスフィラメントに対して推定されている値²⁰⁾を採用し、それぞれ 12.5°, 300パーセクとして、観測データに当てはめた。

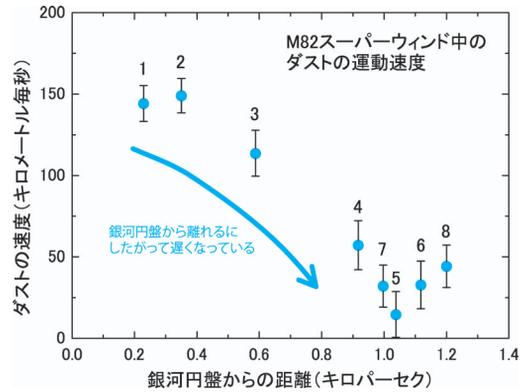


図8 円錐台モデルを仮定したときのダストの運動。横軸はM82の銀河円盤からの垂直距離で、縦軸は銀河に対するダストの相対速度。各データ点の上に書かれた数字は各計測位置 (図3参照) を示す。銀河円盤から離れるに従って、ほぼ単調にダストの速度は落ちていって、およそ1キロパーセクのところで毎秒数十キロメートルまでに減速している。

うなことではないだろう。そう言われてしまえば、すみませんと言うしかない。私の体たらくはさておき、とりあえずこの修正モデルをデータに適用することにした。

8. 明らかになったスーパーウィンド中のダスト運動

中抜け、かつ、頭を切り飛ばした円錐状のアウトフローモデル (図7) を観測データに当てはめると、驚くほどきれいな結果が得られた¹⁹⁾。ダストは銀河円盤から離れるに従って単調に減速しており、銀河円盤からおよそ1キロパーセクのところで毎秒数十キロメートルにまで遅くなっていることが示されたのだ (図8)。観測誤差を考えに入れば、1キロパーセク付近で銀河に対してほぼ止まってしまっていると言っていいぐらいだ。

この傾向は、スーパーウィンド中の電離ガスや分子ガスの運動と全く異なる。電離ガスや分子ガスは、銀河円盤から数百パーセクまでは加速されていて、それより離れたところではほぼ一定の速度で流れ出している。しかも、速い。過去の研究

により、電離ガスの流出速度は毎秒およそ600キロメートル、分子ガスは毎秒200キロメートル程度であろうと見積られている。それらに比べると今回明らかになったダストの運動は極めて遅い。中心付近こそ毎秒150キロメートル程度と、分子ガスに匹敵するスピードで流れているが、そこから先は遅くなる一方だ。この結果は明らかに、ダストの流れは、電離ガスや分子ガスとは全然分離してしまっていることを示している。

ダストが熱い電離ガスと分離してしまっても、驚くことではない。だが、銀河円盤内ではしばしば共存していることが知られている分子ガスとの分離となると、これはスーパーウィンドの構造についての新たな情報と言ってよいだろう。今回推定された毎秒数十キロメートルの流出速度などというのは、銀河からの脱出速度よりもはるかに遅い。この結果だけからすれば、ダストは決してM82を脱出することなく、やがては銀河円盤に降り積もっていくことになる。銀河円盤より1キロパーセクのところから自由落下でダストが降り積もるとすると、その時間スケールはお

よそ 10^7 年のオーダーとなる。スターバーストの継続時間は典型的に 10^7 年と言われている。さまざまな観測から、M82の中心核スターバーストはその終焉期にあるとされている。スーパーウィンドによって巻き上げられたダストは、中心核スターバーストが終了したぐらいのタイミングで、今度は銀河円盤での活発な星生成を誘発するのであろうか。

ここで注意しておかねばならないのは、われわれの調べたダストというのは、「可視光を効率良く散乱するサイズ（およそ0.1-1ミクロン）のダスト」であるということだ。幅広いサイズ分布をもつと思われるダスト全体を見たわけではない。実際、前述のPAHダストでは銀河円盤から2キロパーセクを超えて広がるフィラメントが観測されているし¹⁶⁾、遠赤外線ではもっと広がった冷たいダストが検出されている¹⁸⁾。また、M82の周囲には、近傍の銀河M81との相互作用によると思われる長大な中性水素ガスフィラメントが広がっていることがわかっており、このフィラメントも大量のダストを含んでいることが示唆されている²¹⁾。われわれの計測したダスト運動の一部は、スーパーウィンド起源ではなく、このフィラメントの運動を反映している可能性もある。図8をよく見ると、銀河円盤から1.2キロパーセク付近から遠くで、ダスト運動が少し速くなっている。この遠方での加速の兆候（まだ確実ではないが）は、もしかすると中性水素フィラメント成分を見ているのかもしれない。あるいは、輻射圧などでふたたびダストが加速され始めているのかもしれない。

いずれにせよ、手持ちのデータで言えることはここまでである。M82のダストフローの全体像を明らかにするには、より詳細かつ広範囲な観測

が必要であろう。

9. 風に舞う塵の運命

その昔、ボブ・ディランは、世の中にある答えのはっきりしない諸々の問題を問いかける歌を作った。そして自らは答えを与えず、ただ「その答えは風に吹かれている」と結んだ。幼き日にこの歌に触れた私には、何も言っていない歌にしか聴こえなかった。答えが風に吹かれているだって？ そんなことは誰にでも言えるぞ、と^{*2}。

しかし、人生50年近くも生きてくると、世の中、風に吹かれているとしか答えようのない問題がごろごろしていることに否応なしに気づかされる。研究もしかりである^{*3}。いや、爺くさい話になって申しわけない。とは言え、ようやくディランの歌が身にしみるようになってきた。私が50の声を聞いてようやく実感し始めた事実を、ディランは若干21歳のときに歌った。彼の天才に目のくらむ思いである。

今回、われわれはスーパーウィンド中のダストの運動について、何がしかの手がかりを得た。風に舞う塵の運命に関して、少しは考える材料を提供することができたと思っている。もちろん、われわれの得た結果にはまだまだ検討を要するところがたくさんある。ダストフローのモデルを変えれば結果も大きく影響を受ける。そもそもわれわれのとらえたダストが、すべてスーパーウィンドに起因するのかどうかすら、定かではない。ダスト運動を解明する第一歩をようやく踏み出したところだと言うのが適切であろう。偏光分光観測は強力な研究手段である。M82のダスト運動の全体像をとらえるためには、銀河全面にわたる偏光分光マッピングを行う必要があるだろう。もちろん、ダスト放射を直接とらえることのできる、赤

^{*2} 実際のところ、小学生の私は「何言うどんねん、このおっさん」と言ったのであるが。

^{*3} もちろん、そもそも答えがあるのかどうかすらはっきりしない世の中の難しい問題たちと、科学的研究をごっちゃにするつもりはない。科学は、紆余曲折を経ながらも少しずつ答えを見いだしていく果てしない作業であろう。

外線観測, サブミリ波観測との比較も重要である。動き出したALMAは, 残念ながらM82を見ることはできない*4が, 他のスターバースト銀河のダスト研究に大きな力を発揮するであろう。

M82の大量のダストはどこから来たのか。そして, どこへ行くのか。他のスターバースト銀河ではどうなのか。スターバースト, スーパーウィンド, ひいては銀河進化におけるダストの役割は何なのか。

その答えは, 風に吹かれている。

謝 辞

まず最初に, 本研究の共同研究者である, 川端弘治, 大山陽一の両氏に感謝します。本研究のアイデアは私が大学院生時代に佐々木実氏とした議論が元になっています。佐々木さん, ありがとうございました。FOCASの優れた偏光分光機能なしには本研究はなしえませんでした。FOCAS偏光チームのリーダーである佐々木敏由紀氏はじめ, FOCAS開発チームに感謝します。観測をサポートしていただいたハワイ観測所の皆さんにも, この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Scarrott S. M., et al., 1991, MNRAS 252, 12
- 2) <http://subarutelescope.org/Pressrelease/2000/03/24/>
- 3) Antonucci R. R. J., Miller J. S., 1985, ApJ 297, 621
- 4) Miller J. S., Goodrich R. W., 1990, ApJ 355, 456
- 5) Balzano V. A., 1983, ApJ 268, 602
- 6) Tacconi L., Lutz D., 2001, Starburst Galaxies: Near and Far (Springer-Verlag)
- 7) Sanders D. B., et al., 2003, AJ 126, 1607
- 8) Heckman T. M., 2003, Rev. Mex. Astron. Astros. 17, 47
- 9) Veilleux S., Cecil G., Bland-Hawthorn J., 2005, ARA & A 43, 769
- 10) Cooper J. L., et al., 2008, ApJ 674, 157
- 11) Alton P. B., et al., 1999, A & A 343, 51
- 12) Ferrara A., et al., 1991, ApJ 381, 137

- 13) Aguirre A., et al., 2001, ApJL 556, L11
- 14) Kashikawa N., et al., 2002, PASJ 54, 819
- 15) Ebizuka N., et al., 2011, PASJ 63, 613
- 16) Engelbracht C. W., et al., 2006, ApJL 642, L127
- 17) Leeuw L. L., Robson E. I., 2009, AJ 137, 517
- 18) Kaneda H., et al., 2010, A & A 514, A14
- 19) Yoshida M., Kawabata K. S., Ohyama Y., 2011, PASJ 63, 493
- 20) Shopbell P. L., Bland-Hawthorn J., 1998, ApJ 493, 129
- 21) Yun M. S., et al., 1994, Nature 372, 530

Dust Blown in the Wind—Kinematics of the Dust Outflow from the Starburst Galaxy M82

Michitoshi YOSHIDA

Hiroshima Astrophysical Science Center, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: It is well known that high-temperature ($\sim 10^7$ K) energetic outflow whose outward velocity reaches $100\text{--}1,000\text{ km}^{-1}$ is associated with starburst galaxies. This outflow is called as “superwind”. A superwind gains its energy by collecting effect of stellar winds from newly born massive stars and frequent supernova explosions in the starburst region. Although it also is known that huge dust is associated with superwinds, the kinematics of superwind dust outflow had been unclear because of lack of useful observational tools to measure the dust motion. We first revealed the dust motion in the superwind of the starburst galaxy M82 by means of deep spectropolarimetry using Subaru Telescope. The dust flow velocity monotonically decreases with the distance from the galaxy disk. The dust is almost stopped relative to the galaxy at around 1 kpc from the disk. It indicates that the dust entrained by the superwind of M82 would come back to the galaxy disk within a timescale of order of 10^7 yr.

*4 M82の赤緯は+78°であって, 南半球にあるALMAからは見えない。